

# Jak je to vůbec možné?

RNDr. Luděk Sevc, CSc.,  
Ústav patologické fyziologie  
1. lékařské fakulty Univerzity Karlovy v Praze

Obrázky a foto: autor a archiv Martina Zajace,  
foto Ama potápěček Paul Custodio Bube, Lyon  
College, Arkansas

## Kapitoly z fyziologie NÁDECHOVÉHO POTÁPĚNÍ

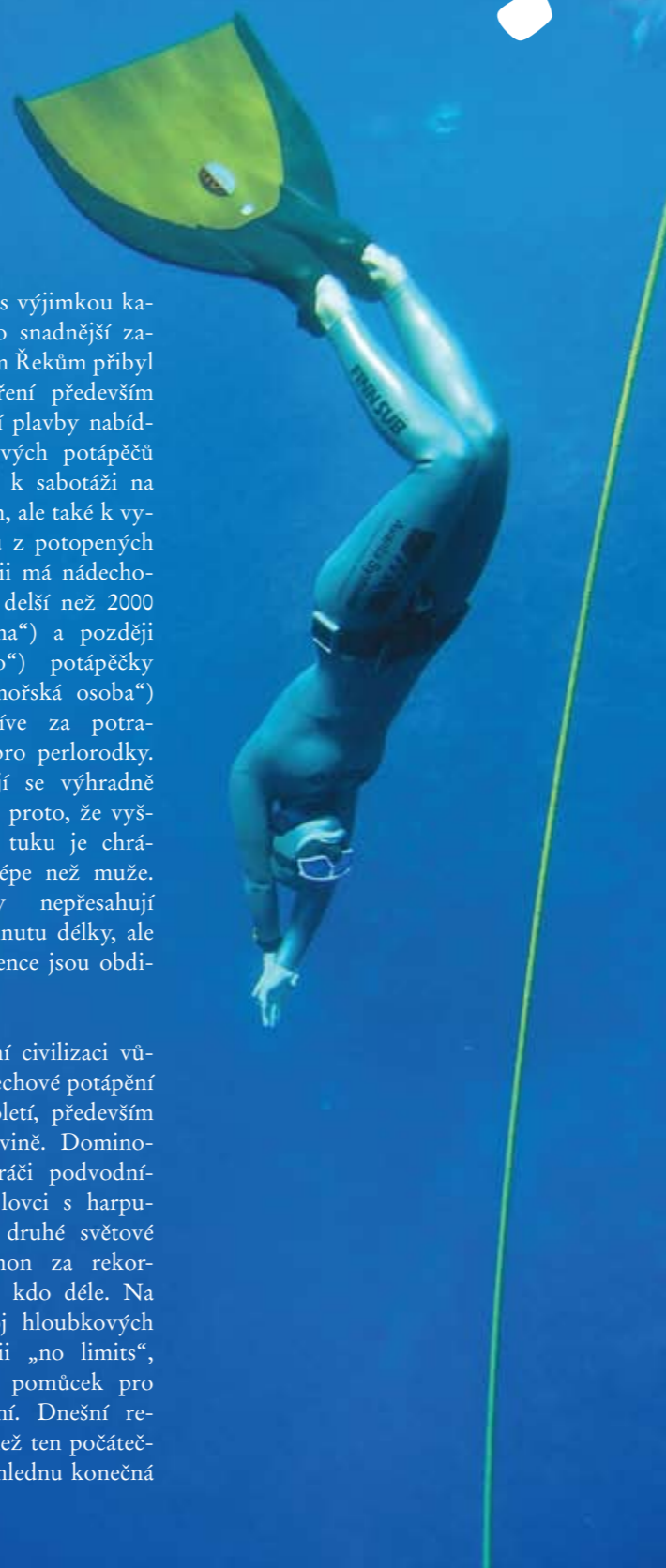
Boylův zákon mluví o vzájemném vztahu tlaku a objemu plynu v uzavřené soustavě, tedy i v plicích po nádechu. Kolikrát plyn stlačíme, tolikrát se zmenší jeho objem. Každý potápěč se pamatuje na procvičování tohoto vztahu na přednáškách z fyziky, kdy počítal teoretickou hloubku ponoru na nádech. Je to hloubka, ve které dojde ke stlačení vzduchem naplněných plic na objem, odpovídající plnému výdechu. Při dalším zanořování již hrudník nejde více stlačit, a v plicích nastává podtlak, krevní plazma je vtlačována do prostoru plicních sklípků a vzniká nebezpečný otok plic. Tato limitní hloubka se u běžného potápěče nachází mezi 30 a 40 metry. Jak je tedy možné, že tolik nádechových potápěčů tuto hloubku přesáhne, a že **Herbert Nitsch přežil rekordní ponor do 214 metrů**? Právě na to se pokusíme najít odpověď v následujících řádcích.

## Pár slov z historie

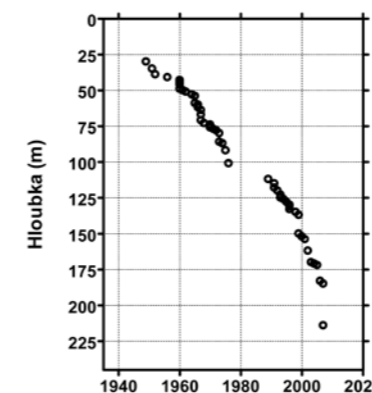
Mohli bychom začít obligátní větou „Už staří Řekové...!“, ale nebyla by to tak úplně pravda. Ve skutečnosti bychom našli první freedivera již mezi neolitickými sběrači a lovci. Sběr potravy byl tím, co je přimělo ponořit se pod hladinu. Chyběly

jakékoliv pomůcky s výjimkou kamene, umožňujícího snadnější zanoření. Zmiňovaným Řekům přibyl další motiv. Rozšíření především příbřežní a námořní plavby nabídlo využití nádechových potápěčů pro vojenské účely k sabotáži na nepřátelských lodích, ale také k vyvedávání předmětů z potopených plavidel. Také v Asii má nádechové potápění tradici delší než 2000 let. Japonské („Ama“) a později korejské („Haenyo“) potápěčky (oboje znamená „mořská osoba“) se potápěly nejdříve za potravou, později také pro perlorodky. Potápěly a potápějí se výhradně ženy, původně snad proto, že vyšší obsah tělesného tuku je chránil před chladem lépe než muže. Jednotlivé ponory nepřesahují 25 m hloubky a minutu délky, ale jejich počet a frekvence jsou obdivuhodné.

V Evropě a západní civilizaci vůbec se rozšířilo nádechové potápění až ve dvacátém století, především v jeho druhé polovině. Dominovali sportovci – hráči podvodního rugby, hokeje, lovci s harpunou, akvabely. Po druhé světové válce také začal hon za rekordy – kdo hlouběji, kdo déle. Na obrázku 1 je vývoj hloubkových rekordů v kategorii „no limits“, umožňující použití pomůcek pro zanoření i vnoření. Dnešní rekord je 7 x hlubší než ten počáteční, a stále je v nedohlednu konečná hranice.



Obr. 1 Vývoj rekordů No-Limits

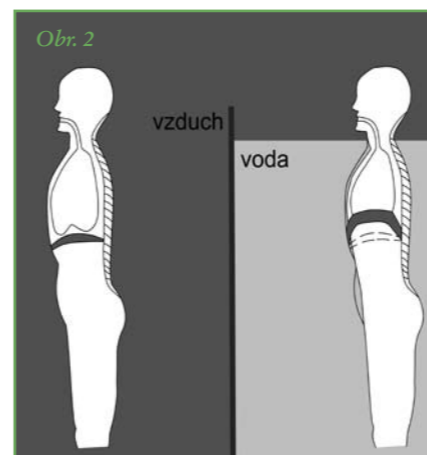


## ANATOMICKÉ A FYZIOLOGICKÉ ZMĚNY PŘI PONORU

Při potápění na nádech působí na tělo tlak okolní vody, který se mění s hloubkou. Mění se tlak významně ovlivňuje mechaniku dýchání, objem plic, ale i krevní oběh. Zároveň si naše tělo pamatuje reflexy, které tvořím, z nichž jsme se kdysi vyvinuli, umožňovaly přežít ve vodním prostředí.

## Objemové změny plic

Samotné zanoření po krk ve vzpřímené poloze znamená, že plice jsou vystaveny zvýšenému hydrostatickému tlaku okolní vody. Ten tlačí na bránici a zdvíhá ji směrem nahoru, a zároveň stlačuje hrudní koš (obr. 2). Výsledkem je zmenšení objemu plic a také vitální kapacity (objemu vzduchu, který dokážeme vydechnout po nejhlubším nádechu). **Pokles vitální kapacity** závisí na hloubce spodní části hrudní kosti (je vyšší u vysokých úzkých hrudníků), na teplotě vody (čím stude-



nější, tím větší pokles) a na době pobytu ve vodě (zhruba do 30 min od zanoření hrudníku vitální kapacita stále klesá v souvislosti s hromaděním krve v hrudníku). Vitální kapacita může poklesnout až o 30% oproti dýchání nad hladinou.

Plice nejsou utlačovány pouze zvenku stlačením hrudníku, ale také zevnitř zmenšením objemu, který je jim v hrudi vyhrazen. Tím se **zmenšuje zbytkový objem plic**, tedy ten objem vzduchu, který nedokážeme ani největším úsilím z plic vydechnout. Za toto zmenšení je zodpovědný především **přesun krve do hrudníku**. Ve vzpřímené poloze na souši gravitace tlačí krev dolů a značná část objemu krve setrvává v žilním systému dolních končetin. Pod vodou je toto působení gravitace eliminováno, krev je z nohou naopak zvýšeným tlakem vody vytlačována.

Při zanoření vydechnutého potápěče do 4,5 m hloubky nedojde ke snížení nitrohrudního tlaku, jak bychom očekávali. To je způsobeno přesunem cca 600 ml krve do hrudníku, a tedy snížením zbytkového objemu o tuto hodnotu. Při ponoru v barokomoře do 55 m bylo demonstrováno nahromadění 1,4 až 1,7 l krve. Už jen po samotném ponoření do chladné vody může v hrudníku přibýt navíc až 1 litr krve. Je také pravděpodobné, že i tlak okolní vody přispívá k účinnějšímu stlačení hrudníku i bránice než dokáže potápěč násilným výdechem na souši. **Snížení zbytkového objemu plic v důsledku redistribuce krve v těle je tedy klíčovým dějem, který umožní zanoření do velkých hloubek.**

Zvýšení množství nadechnutého vzduchu umožní zvýšit poměr mezi celkovým a zbytkovým objemem plic, a tím umožnit ponor do větší hloubky. Plice zároveň pojmu i více kyslíku, prodlouží se i doby pobytu pod vodou. Nádechová potápěčka používají techniky tzv. „**pakování**“. Po plném nádechu si ještě chvíli rychle nabírají ústy vzduch a přes otevřenou hrtanovou přítklopku si ho mimickými svaly vpravují do plic. To vede ke zvýšení nitrohrudního tlaku o 3 – 6 kPa a pomáhá z hrudníku vytlačit krev, která uvolní místo vzduchu. Trénování potápěčů si tímto způsobem zvýší vitální kapacitu o 22 – 39%. vystavují se však riziku poranění plic (barotraumaty plic z přetlaku). Ama a Haenyo potápěčky před finálním nádechem dlouze silně hvízdají. Tento výdech proti odporu také zvýší nitrohrudní tlak, vytlačí z hrudníku krev a při následujícím nádechu jim umožní pojmout do plic více vzduchu.

Nesmíme zapomenout, že nádechová potápěčka nemůže využít všechny vzduch jako zásobu kyslíku. Část vzduchu musí být použita k **vyrovnání tlaku v nestlačitelných dutinách** vyplněných vzduchem. Jsou to vedlejší nosní dutiny a dutina středního ucha. Pro většinu potápěčů je limitující při ponoru právě schopnost vyrovnání tlaku. Pokud mají na obličej potápěčskou masku, musí vyrovnávat tlak i v ní. Proto při potápění do velkých hloubek (no-limits) masku nenosí. Někteří potápěči si v hloubce nechají vtlačit vodu do dutin, aby ušetřili vzduch v plicích. Je to velmi nepřijatelná zkušenost, ale dá se nacvičit.



### Potápěcí reflex (diving reflex)

Potápěcí reflex umožňuje živočichům dýchajícím vzduch potápnout se pod vodu a setrvat dlouhou dobu pod hladinou. Zadržetí dechu vede k reflexnímu zpomalení srdeční činnosti. Podráždění chladových receptorů na obličejí také. Spojení obou, tedy zadržetí dechu a ponoření obličeje do chladné vody, tento efekt výrazně zvyšuje. Srdeční tep zpočátku vzroste, ale vzápětí se zpomalí na hodnotu o 20 – 30% menší než je klidová.

U trénovaných jedinců je toto zpomalení výraznější, byly pozorovány i hodnoty kolem 8 úderů za minutu. Spolu se snížením srdeční frekvence nastává změna v krevní cirkulaci. Okysličená krev je schraňována pro nejdůležitější orgány, které nesnesou hypoxii, tj. pro mozek a srdce. Dochází ke stažení cév zásobujících kůži a končetiny (periferní vasokonstrikci), přísun krve do kůže, svalů, ale i k dalším orgánům je omezen a tyto orgány po vyčerpání zásob kyslíku pracují na kyslíkový dluh. Zatímco při namáhavé svalové práci na vzduchu stoupá tepová frekvence, při zanoření a aktivaci potápěcího reflexu tepová frekvence klesá i u intenzivně plavajícího potápěče. Minutový objem (množství přečerpávané krve) se snižuje, avšak v mozku a srdci je zajištěn dostatečný arteriální tlak, aby mohly využít veškerého dostupného kyslíku. Mozkem protéká během ponoru až dvojnásobné množství krve oproti klidovému. Do 15 sekund po vynoření dojde k obnově původní srdeční frekvence.

**Potápěcí reflex tedy šetří kyslík pro mozek a pro srdce,** aby mohlo zajistit jeho přísun. U některých kytovců (vorvaň), kteří se potápějí stovky až tisíce metrů

hluboko a vydrží pod vodou desítky minut, je tento reflex tak výrazně vyvinutý, že krev cirkuluje jenom mezi plícemi, mozkiem a srdcem, které bije jen dvakrát za minutu. Potápěč se navíc má velmi malý zbytkový objem plic a potápějí se ve výdechu, což je chrání před dekompresní chorobou a umožňuje rychlé vynořování, při kterém se neuvolňují v krvi bublinky dusíku.

U člověka není potápěcí reflex příliš silný, ale dá se tréninkem a dobrou fyzickou kondicí posílit. Chladové podráždění je nejúčinnější na oblast kolem očí a na čelo, ale nejlepšího účinku lze docílit zadržetím dechu a ponořením se s celým nechráněným obličejem do chladné vody. To vede také k prodloužení výdrže na nádech o cca 15%. Je nutné však podotknout,



že zbytek těla by měl být co nejlépe izolovaný od chladné vody (jako tukem obalená těla potápěčů se zvířat), protože chlad vede ke zvýšení bazálního metabolismu až o stovky procent, a tím k výraznému zkrácení výdrže na nádech.

Součástí potápěcího reflexu je i **kontrakce sleziny**. Slezina filtruje krev a jsou v ní zadrženy krevní buňky, které v případě potřeby mohou vstoupit do oběhu a doplnit krevní obraz. U potápěčů se tuleňů stoupá hematokrit (podíl červených krvinek v plazmě) až o polovinu během 10-12 minut potápění. Podobný, i když ne tak výrazný jev byl pozorován u profesionálních potápěčů i u Ama potápěček. Zvýšení hematokritu bylo provázáno 20% snížením objemu sleziny. Větší počet červených krvinek přenese více kyslíku a umožní setrvat pod vodou déle.

Součástí zdravotního vyšetření potápěče v některých laboratořích tělovýchovného lékařství bývá i měření potápěcího reflexu při zadržetím dechu a ponoření obličeje do ledové vody. U mnoha potápěčů jsou přítomny v průběhu pokusu srdeční arytmie. Krevní tlak je zvýšený a u velmi zřídka může dojít k vynechání srdečního stahu (krátké srdeční zástavě). Je to způsobeno zvýšenou dráždivostí tlumivé složky nervového systému, tzv. parasympatiky (nervus vagus). Právě parasympatikus je zodpovědný za snížení tepové frekvence, ale jeho přílišná aktivita může vést i k srdeční zástavě. Takoví potápěči mohou být pak ohroženi zástavou a ztrátou vědomí v hloubce, a neměli by se nádechovému potápění věnovat. Sporná je jejich diskvalifikace z hlediska přístrojového potápění. Samozřejmě může dojít k aktivaci potápěcího reflexu i při ponoru s dýchacím přístrojem, např. při ztrátě masky a zdroje vzduchu v hloubce ve studené vodě, ale v těchto případech stresová mobilizační složka nervového systému (sympatikus) přebije útlumovou reakci parasympatiky a k zástavě by dojít nemělo. Protože však není k dispozici dostatek relevantních dat, kardiologové často raději neriskují a potápění takovým zájemcům nepovolí.



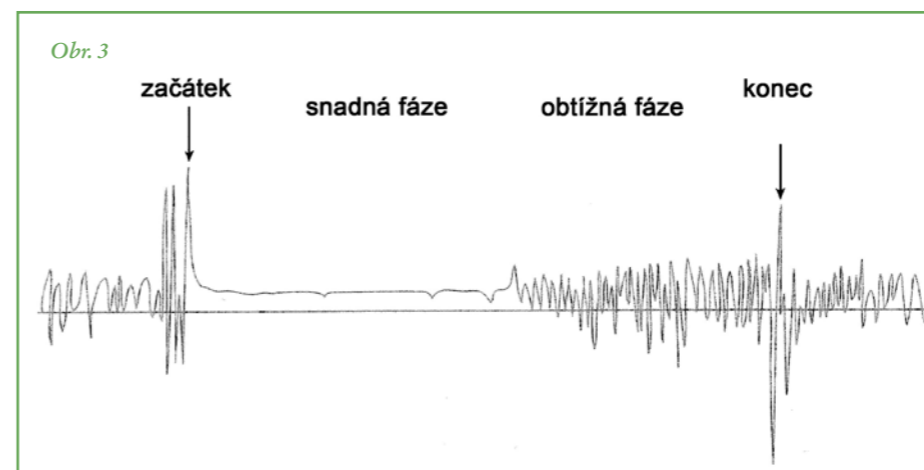
### Zadržování dechu

To, co nás nutí nadýchnout se, není nedostatek kyslíku, ale nadbytek vyprodukovaného oxidu uhličitého. Živiny se spalují za použití kyslíku a odpadními produkty této oxidace jsou oxid uhličitý a voda. Oxid uhličitý difunduje od buněk do krve, kterou je zčásti přenášen rozpustně, zčásti navázaný na červených krvinkách, ale nejvíce se ho přemění na slabou kyselinu uhličitou. **Nadměrné množství CO<sub>2</sub>** tedy zvyšuje kyselost krve (snižuje pH). Na několika místech krevního řečiště máme chemoreceptory, které reagují na kyselost krve a jsou stimulovány nadbytkem CO<sub>2</sub>. To **vyvolá velmi silné nucení k nádechu**. Nedostatek kyslíku také nutí k nádechu, ale velmi slabě a navíc pozdě, nedlouho před ztrátou vědomí z hypoxie.

Délka zadržetí dechu (apnoe) závisí na několika faktorech. V první řadě je to potápěčova fyziologická tolerance k nadbytku CO<sub>2</sub> (hyperkapnii) a nízké hladině kyslíku (hypoxii). Především tolerance

k hyperkapnii se dá významně zvýšit tréninkem. Dalším parametrem je rychlost metabolismu potápěče, při námaze se spotřebuje více kyslíku a vytvoří více oxidu uhličitého. Zvýšená schopnost a kapacita ukládat O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> také prodlouží apnoickou fázi. Nakonec potápěčova psychická odolnost vypořádání se s nepříjemnými pocity při dlouhém zadržetím dechu hraje nikoliv zanedbatelnou roli.

**Zadržetí dechu má dvě fáze,** snadnou a namáhavou. V první, snadné fázi, je hratanová přiklopka uzavřená, a nitrohrudní tlak zůstává stabilní. Její trvání určují fyziologické faktory, z nichž nejdůležitější je arteriální pCO<sub>2</sub> (parciální tlak oxidu uhličitého). Typicky končí při alveolárním pCO<sub>2</sub> kolem 6,1 kPa. Ve druhé, obtížné fázi, se začínají objevovat neovladatelné pohyby a kontrakce dýchacích svalů, které posléze celé zadržetí dechu ukončí otevřením dýchacích cest. Na obrázku 3 je vidět záznam pohybu hrudníku při pokusu o co nejdelší zadržetí dechu.



HD  
happy divers

KURZY POTÁPĚNÍ PADI  
ZNAČKOVÁ PRODEJNA  
BEUCHAT  
CESTY ZA POTÁPĚNÍM  
PŮJČOVNA VÝSTROJE  
ESHOP



Happy Divers, s.r.o.  
Na Václavce 18, 150 00 Praha 5  
tel.: 251 564 098

www.happydivers.cz

Délka obtížné fáze závisí jak na fyziologických tak na psychologických faktorech. U určitého jedince bývá limitována dosažením určitého alveolárního  $p\text{CO}_2$  (obvykle do 7,1 kPa). Tato hodnota bývá individuálně poměrně stabilní, po jejím dosažení dochází k ukončení apnoe.

Délku zadržetí dechu lze prodloužit několika způsoby, z nichž některé jsou vyloženě nebezpečné. Pokud se potápeč v obtížné fázi zaměstná fyzickou (hvízdání, provádění Valsavova manévru, žvýkání, mačkání posilovacího kroužku apod.) nebo mentální (počítání, recitování v duchu) aktivitou, podaří se mu často prodloužit dobu do dalšího nádechu. Když po prvním pokuse vydechne do igelitového sáčku a provede z něho několik nádechů a výdechů, zvýší si práh citlivosti na  $p\text{CO}_2$  a další zadržetí dechu je delší. Konečně hyperventilace (série rychlých hlubokých nádechů a výdechů) před zanořením odstraní ze sklípkového vzduchu a z krve většinu oxidu uhličitého (za normálních okolností je ho tam kolem 5 kPa) a při následujícím zadržetí dechu trvá značně déle, než se vyprodukuje dostatek nového  $\text{CO}_2$ , aby se podráždilo dechové centrum a dal signál k nadechnutí.

Obzvláště poslední způsob, **hyperventilace před zanořením, je extrémně nebezpečná** a stála už život velkého množství nádechových potápečů.

Na obrázku 4 je znázorněno, jak se mění parciální tlaky kyslíku a oxidu uhličitého při běžném zanoření (limitní hodnoty  $p\text{CO}_2$  je dosaženo před poklesem  $p\text{O}_2$  na nebezpečnou hodnotu a následuje vyno-

ření a nádech) a po hyperventilaci ( $p\text{CO}_2$  je stále ještě nízký, ale  $p\text{O}_2$  již poklesl na hodnotu, která nestačí pro zásobení mozku kyslíkem).

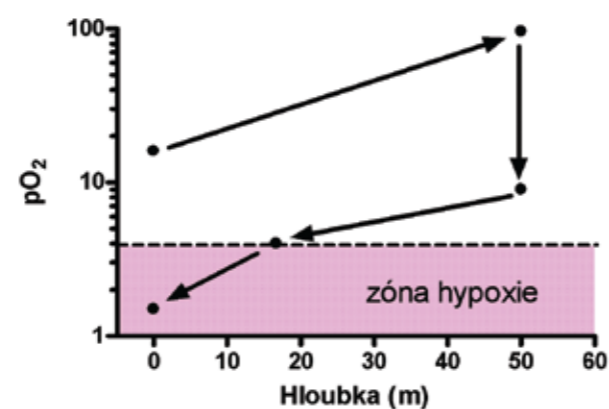
Hyperventilací se rozumí rychlý sled více než 3 – 4 nádechů a výdechů. Při skutečném 20 hlubokých vdechů v rozmezí 1 minuty se z těla odstraní takové množství  $\text{CO}_2$ , které odpovídá jeho produkci v klidu za 4 minuty. O tolik je tedy možno prodloužit zadržetí dechu v případě, že nedojde ke ztrátě vědomí pro nedostatek kyslíku.

**Nejdelší pokus o zadržetí dechu trval neuvěřitelných 17 minut a 4 sekundy** (David Blaine 30. 4. 2008). Bylo to však po hyperventilaci čistého kyslíku, tedy po odstranění  $\text{CO}_2$  a saturaci kyslíkem. Čerstvý rekord ve statickém zadržetí dechu je 10 minut a 12 sekund (Tom Sietas, 7. 6. 2008).



Pokud parciální tlak kyslíku poklesne pod 4 kPa, mozkové buňky, které nejsou schopny fungování bez kyslíku (anaerobního metabolismu), přestávají plnit svoji funkci a nastává okamžitá ztráta vědomí. K takové situaci však bez hyperventilace nemůže dojít, mnohem dříve nás zvýšená hladina oxidu uhličitého přinutí nadechnout se. Na obrázku 5 však vidíme, jak se mění parciální tlak kyslíku při hlubokém ponoru. Při zanoření a pobytu na dně je kyslíku nadbytek, sice se spotřebovává, ale vysoký tlak v hloubce udržuje parciální

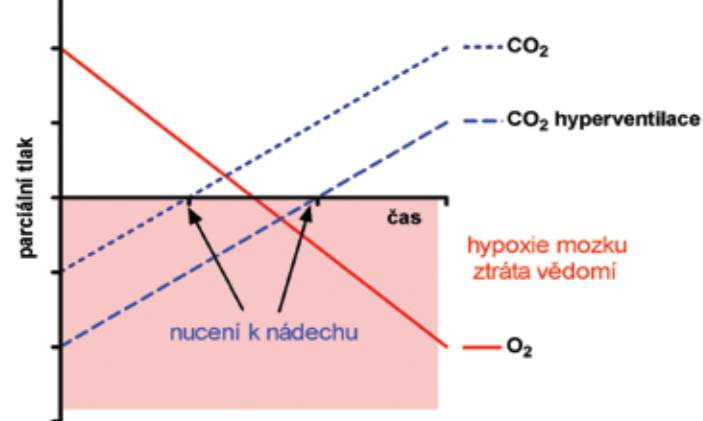
Obr. 5 Alveolární  $p\text{O}_2$  v průběhu ponoru do 50m



tlak kyslíku na komfortní výši. Oxidu uhličitého zatím také nebylo vyprodukováno dost, aby nám dal signál k ukončení ponoru.

Při vynořování však klesá okolní tlak a s tím i parciální tlak kyslíku v plicích. Tento pokles může být tak prudký a výrazný, že v menší hloubce může  $p\text{O}_2$  v plicích dosáhnout menší hodnoty než  $p\text{O}_2$  v krvi, a místo aby byl kyslík do krve dodáván, naopak z krve přechází zpátky do plic. K tomu obvykle dochází v posledních metrech výstupu. Nastává ztráta vědomí z nedostatku kyslíku blízko hladiny. K jejímu pojmenování se vžil

Obr. 4



i v češtině anglický výraz **shallow water blackout**, tedy výpadek vědomí v malé hloubce. Přichází téměř bez varování, okolo se zatmí (buňky sítnice jsou velmi citlivé na hypoxii a přestanou fungovat) a ve zlomku sekundy potápeč ztratí vědomí. Proto je nezbytné, aby nikdo **neprovazoval nádechové potápění sám**. Partner by měl potápeč při vynořování stále sledovat a v případě potřeby ho vynést na hladinu a umožnit vzpamatovat se, v těžších případech provést oživovací pokusy. Důležitou součástí výstroje je bójka, ke které je potápeč připevněn a která umožní ho v případě potřeby vyvednout z hloubky, protože za určitých, ne zcela jasných okolností, může ke ztrátě vědomí dojít i v hloubce, a partner nemusí být schopen se do této hloubky zanořit a potápeč vynést. Výhodou je mít pozitivní vztlak v malé hloubce (do 10 m), upravit tedy zátěž tak, aby tělo při ztrátě vědomí v této hloubce vyplavalo samo na povrch. Mnozí autoři označují pojmem shallow water blackout jen takové případy, kdy ke ztrátě vědomí dojde po pobytu v hloubce



menší než 5 metrů (např. při pokusu uplavat v bazénu co nejdelší úsek na jeden nádech). Pro ztrátu vědomí při vynořování z hloubky mají termín deep water blackout (výpadek vědomí ve velké hloubce).

Někdy v důsledku hypoxie krátce po ponoru následuje krátké období zmatenosti, kdy potápeč nedokáže koordinovat své pohyby nebo myšlení. Je to stav, kdy došlo k vynoření těsně před ztrátou vědomí (blackoutem) a mozkové buňky nejsou schopny správné funkce. Nádechové potápečí tento stav označují „samba“ podle vláčkových pohybů potápeč navozujících představu latinskoamerického tance. Samozřejmě blackout i samba znamenají v soutěžích diskvalifikaci a neuznání výkonu.

### Vliv tréninku

Pokud pokusy o maximální délku zadržetí dechu následují rychle po sobě (s intervalem od 10 sekund po 4 minuty), výdrž významně stoupá až do zhruba čtvrtého pokusu. Tento jev je vysvětlován nechtěnou hyperventilací po vynoření vedoucí k odstranění oxidu uhličitého z plic a krve, a také snížením citlivosti chemoreceptorů ke zvýšenému parciálnímu tlaku  $\text{CO}_2$  (hyperkapnii). Toto **snížení citlivosti k  $p\text{CO}_2$**  je patrné i dlouhodobě u Ama potápeček, vojáků US Navy trénujících denně nouzové opuštění ponorky z hloubky 27 m, ale také u nádechových potápečů v tréninku. Je popsána snížená citlivost k hyperkapnii a hypoxii u po-

tápečů ve srovnání s nepotápečí, i to je důsledek nácviku plavání se zadržetým dechem. Trénink vede i ke změně metabolismu. Potápečí mají nejen výraznější aktivovatelný **potápečí reflex**, ale také sníženou spotřebu kyslíku v organismu. Jejich tělo snese lépe anaerobní metabolismus a zatímco pracuje na kyslíkový dluh, šetří kyslík pro mozek a srdeční sval, dvě tkáně, které jsou na dostatku kyslíku výlučně závislé. Pravidelný trénink také zvyšuje vitální kapacitu a snižuje zbytečný objem plic. To je přičítáno posílení přídatných dýchacích svalů a také zvýšené poddajnosti plic (compliance - ochoty plic přizpůsobovat se změnám tvaru hrudního koše).

### Zásoba kyslíku a oxidu uhličitého v organismu

Délka zadržetí dechu ve značné míře závisí na kapacitě organismu uchovávat  $\text{O}_2$  a  $\text{CO}_2$  a na množství těchto plynů v těle na začátku ponoru. Změněný metabolismus nádechových potápečů (potápečí reflex rezervující dostupný kyslík v plicích pro mozek a srdce, a anaerobní metabolismus ostatních tkání) umožní co nejvýhodnější využití zásob kyslíku. Průměrné tělo 70 kg těžkého muže s celkovým objemem plic 5,5 l pojme 1996 ml kyslíku. Z toho 820 ml je v plicích, 880 ml v krvi, 240 ml je vázáno na myoglobin (bílkovina schopná uchovávat kyslík pro pozdější použití) především ve svalch, a 56 ml je fyzikálně rozpuštěno v krvi a tkáních. Celá tato zásoba by byla bez další dodávky kyslíku hypoteticky vyčerpána přibližně po 6,5 minutách. **Trénovaným potápečům však vystačí tento kyslík déle** vzhledem ke schopnosti aktivovat anaerobní metabolismus, tedy získávání energie bez přístupu kyslíku.

Hyperventilace nedodá do organismu o mnoho více kyslíku. Krev se už nasytit kyslíkem více nemůže, získáme jen navíc o trochu víc kyslíku v plicích, protože alveolární  $p\text{O}_2$  bude vyšší než obvyklých 15 kPa. Při zvýšení o 3 kPa získáme navíc kyslík pro prodloužení apnoe nejvýše o půl minuty. Riziko odstranění oxidu uhličitého v takovém případě bylo už diskutováno výše. V hloubce je zvýšený parciální tlak kyslíku, a také spotřeba kyslíku organismem je

zvýšená. Tělo nemá důvod kyslíkem šetřit. To vysvětluje, proč je takový rozdíl mezi výdrží při statickém zadržení dechu (rekord 10 minut 12 sekund) a při asistovaném zanoření do hloubky (no-limits, stažení do hloubky závažím, výstup pomocí balónu naplněného vzduchem – 4 minuty 24 sekund při rekordním ponoru do 214 m). Dalším důvodem je, že v průběhu zanoření roste parciální tlak oxidu uhličitého v plicích, a dochází k obrácenému toku CO<sub>2</sub>. Místo z těla do plic přechází CO<sub>2</sub> z plic do krve, zvyšuje se jeho parciální tlak v krvi a tím i nucení k nádechu. Během výstupu se nestačí všechen nadby-



tečný CO<sub>2</sub> dostat z těla do plic. Po stejném dlouhém asistovaném ponoru do hloubky se v plicích nachází méně CO<sub>2</sub> než po zadržení dechu na hladině, toto množství CO<sub>2</sub> v těle přispívá k nutnosti nadechnout se. Minimální doba k odstranění tohoto CO<sub>2</sub> z tkání jsou 3 minuty, povrchový interval mezi ponory by měl tedy být alespoň takto dlouhý. Kratší intervaly možná nepovedou ke zkrácení doby ponoření, protože chemoreceptory se adaptují na zvýšený pCO<sub>2</sub>, ale zadržený oxid uhličitý může mít narkotické účinky.

Oxid uhličitý je v těle uchováno mnohem více než kyslíku. Nejvíce se ho nachází vázáno v kostech, 123 litrů, ale tato zásoba se obměňuje velmi pomalu. Ze zbývajících 16,6 l se 9,6 l nachází ve svalech. Právě svaly a vnitřní orgány se u trénovaných potápěčů stávají při ponoru významnou zásobárnou CO<sub>2</sub>. Dokáží pojmout až dvojnásobek CO<sub>2</sub> ve srovnání s nepotápěči, tento oxid uhličitý se nedostává do krve a nezvyšuje potřebu nadechnout se. Je to jeden z důvodů, proč jsou potápěči schopni zadržet dech na mnohem delší dobu než nepotápěči.

## NEHODY VZNIKAJÍCÍ PŘI NÁDECHOVÉM POTÁPĚNÍ

Dosud popsané fyziologické mechanismy umožňují nádechovým potápěčům bezpečně překonat obtížné podmínky spojené se zvýšeným tlakem a omezeným přísunem kyslíku. Přesto, pokud potápěč překoná určité hranice, vystavuje se nebezpečí vážného poškození organismu. Hrozí mu hypoxie, poškození způsobená změnami tlaků, ale i dekompresní choroba a v menší míře dusíková narkóza. Největší nebezpečí, shallow water blackout,

oběhu, zbytek se musí vejít do stávajících cév, jejichž přizpůsobivost (compliance) také není nekonečná. Výsledkem je vyšší tlak v plicním řečišti, který může vyústit až v rozvoj otoku plic (plicního edému), jak bylo popsáno u řady nádechových potápěčů, kteří po intenzivním potápění trpěli hemoptýzou (vykašláváním krve nebo zpěněného krvavého hleny). Může dojít i k poškození plicních kapilár a krvácení do plic. Riziko v tomto případě zvyšuje užívání aspirinu nebo jiných protisrážlivých léků. K definitivnímu závěru, zda nádechové potápění vyvolává trvalé poškození plicní architektury, máme příliš málo údajů.

## Barotraumata při výstupu

Při výstupu klesá okolní tlak a všechny plyny v těle zvětšují svůj objem. Jelikož nádechový potápěč je omezen časem výstupu, může dojít k barotraumatu i v případě, kdy by mu potápěč s dýchacím přístrojem dokázal zabránit. Například při obtížném vyrovnání tlaku v Eustachově trubici (středním uchu) při sestupu může dojít k otoku sliznice, a při výstupu může nastat alternobarické vertigo. Je to prudká závrať způsobená nerovnoměrným vyrovnáním tlaku v obou dutinách středního ucha, které podráždilo rovnovážné ústrojí. Tato závrať může dezorientovat potápěče vracejícího se na hladinu a vyústit v utonutí. Do kategorie poškozené změnou tlaku bychom mohli zařadit i zmiňovanou ztrátu vědomí při výstupu z důvodu hypoxie (shallow water blackout).

Paradoxně může při výstupu dojít i k poškození plic z přetlaku, manifestujícím se pneumotoraxem, plicním emfyzémem nebo vzduchovou embolií. Proč, vždyť v plicích nádechového potápěče nemůže být po vynoření více vzduchu než při zanoření? Uvědomme si však, že při rychlém výstupu se plíce prudce rozpínají. Krev, která se mezitím nahnula do hrudníku, je vytlačována mnohem pomaleji. Může dojít i k mechanickému utlačení a tím uzavření některých oblastí plic, rozpínající vzduch působí tedy na jiných místech zvýšeným tlakem. Byly popsány případy barotraumatu plic z přetlaku i se smrtelným koncem. Riziko zvyšuje „pakování“ plic vzduchem a používání velkoobjemových vaků pro vynášení potápěče k hladině,

ne (no-limits), které zrychlují již tak velmi rychlý výstup. Také některé neurologické potíže po vynoření bývají vedle hypoxie přičítány embolizaci (vniknutí bublinek vzduchu) do mozku.

## Dekompresní choroba

Člověk se na rozdíl od ostatních potápěčů se živočichů potápí nadechnutý, proto se z jeho plic vstřebává do těla dusík a při dostatečné hloubce a frekvenci ponorů je ohrožen i při potápění na nádech vznikem dekompresní choroby. Počítače s freedive módem toto nádechové scény nezohledňují pro následující ponor s přístrojem, je tedy velmi nebezpečné kombinovat intenzivní nádechové potápění s potápěním přístrojovým. Byla popsána celá řada těžkých případů dekompresní nemoci buď po intenzivním nádechovém potápění, nebo po kombinaci nádechového a přístrojového potápění.



Počítačová simulace naznačuje, že jediný ponor do hloubky 90 m trvající 220 sekund způsobí akumulaci nadbytečných 700 ml dusíku v potápěčově těle. Dokonce potápění do hloubek kolem 20 – 30 m s krátkými povrchovými intervaly způsobí významné nasycení organismu dusíkem. Lovci perel na Tuamotu se potápějí do hloubek okolo 30 m, kde setrvávají 30 – 60 sekund. Pod vodou stráví většinou kolem 1,5 minuty. Toto provozují asi 6 hodin denně, s krátkými intervaly mezi ponory. Často trpí neurologickými příznaky, označovanými Taravana (volně přeloženo „zbláznění“), včetně závratí, ochrnutí a v některých případech i úmrtí. Jiná skupina lovců perel, která mezi ponory praktikuje dvojnásobné intervaly, žádné příznaky nevykazuje. Ama potápěčky v minulosti dekompresní chorobou ne-

trpěly, protože studená voda jim bránila potápět se velmi dlouho. Teprve poté, co některé z nich začaly používat neoprénové obleky, které jim umožnily vydržet ve vodě déle, se mezi nimi objevily dekompresní příznaky. Profesor Novomeský, náš nestor potápěčské medicíny, správně rozpoznal a léčil v dekompresní komoře již před třiceti lety příznaky dekompresní choroby u slovenského nádechového potápěče – lovce s harpunou.

## Poškození mozku hypoxií

Nervové buňky jsou extrémně citlivé na nedostatek kyslíku. Bez jeho přítomnosti začnou již po 3 – 4 minutách odumírat. Opakované vystavování mozku hypoxii může vést k jejich poškození. Dosud není k dispozici dostatek údajů k zodpovědnému posouzení následků dlouhodobého provozování nádechového potápění. Zobrazení odumřelých

dobností vyvolá tvorbu bublin (maximální povolený poměr je 2:1 stanovil již John S. Haldane při tvorbě prvních dekompresních tabulek). Byl popsán minimálně jeden takový případ s těžkou neurologickou formou dekompresní choroby. Uvedený mechanismus je podporován i zjištěním, že žilní krev odebraná okamžitě po vynoření z hloubky 27 m pění, zatímco při odběru o 10 sekund později to již není znatelné.

## Dusíková narkóza

Někteří nádechoví potápěči popisují v hloubce příznaky podobné dusíkové narkóze. Vážný případ ohrožující potápěčův život však dosud popsán nebyl, pravděpodobně proto, že expozice vysokému parciálnímu tlaku dusíku je krátká. Také pokusy v dekompresní komoře (40 s ve 152 m) prokázaly pouze mírné (15%) snížení mentálních schopností. Příznaky narkózy ovšem může významně zvyšovat vysoká hladina oxidu uhličitého, který se v těle hromadí, pokud jsou intervaly mezi ponory příliš krátké.

## Závěrečné shrnutí

Účelem tohoto článku bylo vysvětlit mechanismy, které nám umožňují provozovat nejčistší formu potápění, nezávislou na výstroji, umožňující volný pohyb ve světě ticha a beztláče. Upozorňuje na některá nebezpečí, která mohou při nesprávném přístupu k tomuto sportu nastat, a nechce postrašit a odradit čtenáře od jeho provozování. Je podivuhodné, do jaké míry jsme schopni sdílet s lachtany, kapustňáky, velrybami, tučňáky a dalšími potápějícími se tvory jejich adaptační mechanismy, které jim umožňují bezpečné potápění na nádech. V některých hlediscích však jejich schopností nedosahujeme, potápění může vyvolávat srdeční arytmie, hrozí nám dekompresní nemoc i barotrauma plic. Je proto záhodno, aby se všichni, kteří se chtějí vážně věnovat tomuto sportu, seznámili s fyziologickými změnami, které probíhají v jejich těle v průběhu ponoru na nádech, a aby provozovali tento sport s respektem, při dodržování všech bezpečnostních pravidel, nejlépe alespoň zpočátku pod odborným vedením. Je to způsob, jak si můžete tento nádherný sport správně prožít a vyhnout se možným rizikům. Přeji všem zájemcům čistou vodu a radost z ponorů. ☺