

# Oxid uhličitý - obávaný nepřítel (2. část)

*Toto je druhý díl třídílného seriálu o oxidu uhličitém, který je jedním z nejčastějších přispěvatelů k mimořádným událostem při potápění. První díl naleznete [zde](#). Třetí díl bude zveřejněn v příštím vydání Alert Diver.*

## Proč je nadměrné množství oxidu uhličitého nebezpečné?

Technický termín pro abnormálně vysoké hladiny oxidu uhličitého je hyperkapnie. Hyperkapnie má za následek řadu negativních účinků, včetně mírného neurologického poškození ovlivňujícího poznávací schopnosti a kontrolu motoriky, což jsou dopady, které si daný subjekt může, ale nemusí uvědomovat.

CO<sub>2</sub> je [20krát](#) narkotičtější než dusík. Nadměrné koncentrace tohoto plynu v krevním řečišti mají silný psychologický dopad, způsobují zmatek a iracionální chování. Hyperkapnie může také vyvolat úzkost, podrážděnost a/nebo reakci formou boje, útěku nebo paniky. Abychom tuto skutečnost nenazývali až příliš ohleduplně, můžeme otevřeně konstatovat, že hyperkapnie dělá člověka hloupějšího a zároveň vystrašenějšího – což je poněkud nešťastná kombinace. Těžká hyperkapnie je vysilující a v konečném důsledku vede ke ztrátě vědomí.

Hyperkapnie také způsobuje *vazodilataci* neboli expanzi krevních cév. Uvnitř hlavy je spousta krevních cév a naše lebka postrádá schopnost zvětšovat se zároveň s nimi. V důsledku toho zvýšený průtok krve způsobí zvýšení intrakraniálního tlaku. Pokud vás po potápění bolí hlava, možná bude zapotřebí zamyslet se nad možností nadbytku oxidu uhličitého jako o potenciálním viníku. Zvýšený průtok krve do mozku a centrálního nervového systému také znamená, že do těchto orgánů je dodáváno více kyslíku, což učiní potápěče náchylnějším k toxicitě způsobené kyslíkem CNS.

Vzhledem k tomu, že dýchací reflex je spouštěn oxidem uhličitým, nemělo by být žádným překvapením, že častým příznakem hyperkapnie je dyspnea (dušnost). Co se týče náchylnosti k tomuto problému, u lidí existují velké individuální rozdíly, takže jeho absence není zárukou, že se nevyskytnou i další účinky, jako např. kognitivní porucha.

Jestliže hyperkapnie skutečně nastane, její účinky obvykle přetrvávají v mírných případech alespoň několik minut, ale v závažnějších případech mohou trvat i několik hodin.



## Pod vodou je vše komplikovanější

Netřeba dodávat, že všechny výše uvedené příznaky mají pod vodou mnohem závažnější důsledky a jsou nebezpečnější, než by tomu bylo na suchu. Upadnutí do bezvědomí s sebou samozřejmě nese vysoké riziko utonutí, zatímco kognitivní poruchy a další psychologické efekty, jakými jsou úzkost nebo panika, mohou vést k impulzivnímu a chybnému rozhodování. Dušnost, i když je relativně mírná, a z ní plynoucí obtížné dýchání může způsobit absolutní chaos v zásobování potápěče plynem, což patří k dalším možným důsledkům, které probereme níže. A reakce „bojů nebo uteč“ je velice kontraproduktivní při jakémkoli scénáři potápění.

## Mrtvý vzdušný prostor

Vlastní výměna kyslíku a oxidu uhličitého mezi krví a dýchacím plynem se odehrává v alveolech, tj. v malých plicních váčcích. Aby však byl  $\text{CO}_2$  zcela vyloučen z našeho systému, musí před výdechem projít z plicních váčků přes průdušky, průdušnici a dutiny v hlavě.

Tyto mezilehlé části se souhrnně označují jako mrtvý vzdušný prostor. Nepřispívají k výměně plynů a množství plynu vyskytující se v těchto prostorech po výdechu, včetně oxidu uhličitého, je v dalším dýchacím cyklu znovu vdechováno. [Průměrný objem anatomického mrtvého vzdušného prostoru u člověka](#) je asi 150 mililitrů, zatímco průměrný dechový objem plic v klidu (tj. objem vzduchu vcházejícího do a z našich plic na jeden dechový cyklus) je 500 mililitrů. To znamená, že znovu vdechneme asi 30 % zatuchlého vzduchu bohatého na oxid uhličitý, který opouští naše alveoly. Při hlubším dýchání, ať už záměrně nebo v důsledku námahy, je to méně.

Při potápění je objem mrtvého vzduchu zvětšen náustkem a komorou druhého stupně nebo náustkem



rebreatheru. Tento přidaný mrtvý vzduchový prostor snižuje množství  $\text{CO}_2$ , které účinně vypustíme při každém dýchacím cyklu.



## Práce s dýcháním, hustota plynu a dynamická komprese dýchacích cest

Druhým a ještě důležitějším faktorem, který pod vodou vstupuje do hry, je *práce s dýcháním* (*WOB* = work of breathing). Práce s dýcháním je množství práce, kterou musí naše svaly vykonat, aby přesunuly plyn do plic a z plic ven.

Tato práce je funkcí *hmotnostního toku plynu* – fyzické hmotnosti molekul plynu procházejících průřezem našich dýchacích cest za jednotku času. Tento hmotnostní průtok je zase funkcí tří dalších veličin: *frekvenci dýchání* (tj. jak rychle dýcháme), *dechového objemu* (tj. objemu plynu vyměněného za jeden dýchací cyklus) a *hustoty plynu* (tj. hmotnosti plynu na objem).

Za normálních okolností – při dýchání vzduchu bez překážek a za atmosférického tlaku – je naše bránice schopna tuto práci zvládnout bez problémů. Stejně jako naše srdce je to sval optimalizovaný pro potřebnou účinnost a vytrvalost, produkuje velmi málo  $\text{CO}_2$  a pracuje nepřetržitě po celý život, aniž by vyžadoval odpočinek. Tím se odlišuje od většiny ostatních svalových skupin, např. nemůžeme po neomezenou dobu chodit nebo dělat kliky.

Dýchání vzduchu při atmosférickém tlaku však při potápění neprovádíme. S hloubkou se zvyšuje okolní tlak i hustota plynu. Větší hustota plynu znamená zvýšený průtok hmoty, což znamená intenzivnější dechovou práci. Jakmile práce s dýcháním překročí úroveň, pro kterou je naše bránice optimalizována, produkce  $\text{CO}_2$  a s ní riziko hyperkapnie se dramaticky zvýší.

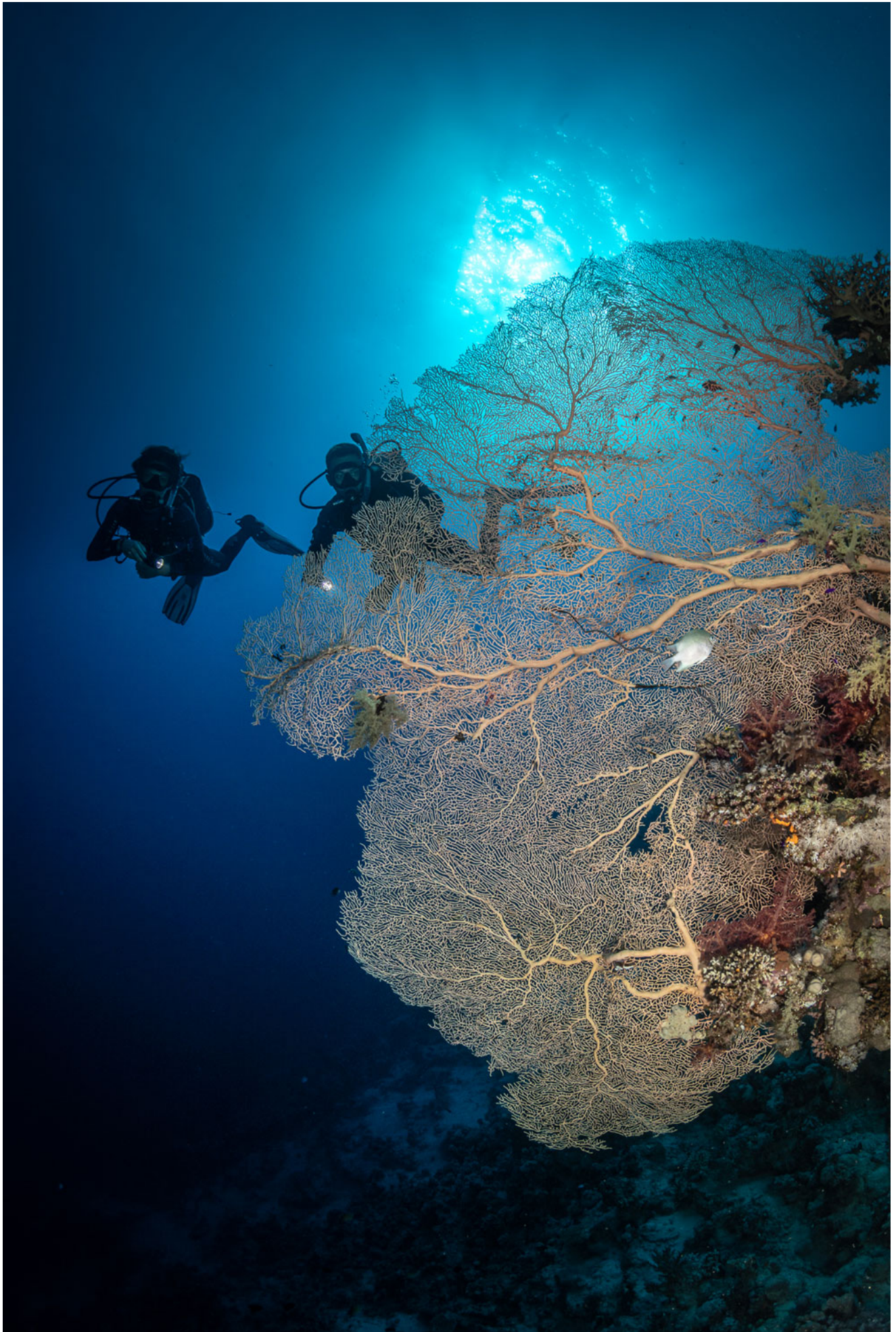
Tento efekt je dále umocněn tím, co se nazývá *dynamickou kompresí dýchacích cest*. Naše dýchací cesty nejsou tuhé trubky, nýbrž jsou celkem poddajné. V důsledku tření podél stěn dýchacích cest vytváří vysoký hmotnostní proud plynu tlakový rozdíl, který následně způsobuje stlačení trubic a omezení průtoku, což je efekt, který je podobný tomu, co se děje při astmatickém záchvatu. V roce 2003 vědci Enrico Camporesi a Gerardo Bosco [prokázali](#), že maximální objemová ventilace (pro vzduch), kterou může člověk dosáhnout v hloubce 30 metrů, je asi polovina maximálního objemu na hladině.

## Dopad způsobený výbavou

Kromě *vnitřní zátěže* způsobené pohybem hustého plynu uvnitř našich dýchacích cest je dalším faktorem přispívajícím k těžší práci s dýcháním *vnější zátěž* způsobená potápěčskou výbavou. Naše dýchací svaly nemusí pouze tlačit plyny tam a zpět; poskytují také energii pro ovládání mechanických částí druhého stupně regulátoru. Náustek navíc působí doslova jako úzké hrdlo - nasávání vzduchu malým otvorem vyžaduje více energie než nasávání otvorem velkým. Můžete si to snadno ověřit tak, že se při procházce pokusíte dýchat brčkem.

Při potápění s rebreatherem je objem pohybovaného plynu mnohem větší než na otevřeném okruhu, neboť nejen naše plíce a dýchací cesty, ale celá dýchací smyčka je naplněna plynem, který je třeba tlačit celým okruhem. Pračka nabízí další odpor a plíce potápěče zůstávají jediným pohonným čerpadlem. Minimalizace WOB je klíčovým konstrukčním cílem při výrobě rebreatherů a potápěčům se doporučuje, aby byli ještě konzervativnější, pokud jde o hustotu plynu, než by byli na otevřeném okruhu.





## Doporučené limity hustoty plynu

S ohledem na zvýšenou dechovou práci způsobenou větší hustotou plynu se doporučuje ve [výzkumné zprávě vyhotovené Gavinem Anthonyem a Simonem Mitchellem](#) omezit hustotu jakéhokoli dýchacího plynu na 5 g/l, s pevným limitem 6 g/l. To odpovídá maximální hloubce potápění 29 metrů pro vzduch a 37 metrů pro nitrox. Tyto limity však ještě nebyly všeobecně přijaty vzdělávacími/školicími organizacemi a agenturami. Běžný hloubkový limit pro rekreační potápění je 40 metrů a výcvikové standardy pro dekompresní potápění podporované řadou agentur stanovují hranici dokonce ještě hlouběji, a to na 55 metrů pro vzduch, kde hustota plynu dosahuje téměř 8,4 g/l.

## Mimořádné události

Při běžném potápění může většina z výše uvedených faktorů zůstat pro potápěče téměř nepostřehnutelná. Když však musíme pracovat tvrději a metabolické nároky našeho těla se zvyšují, například v hloubce při proudění nebo při asistenci kolegovi v nouzi, mohou se náhle vyskytnout a změnit běžně zvládnutelnou situaci v složitý a nebezpečný případ.

*Tímto končí druhý díl našeho seriálu. V třetím dílu se zaměříme na protiopatření – dovednosti a postupy, jak udržet naše zatížení CO<sub>2</sub> pod kontrolou. Zůstaňte v bezpečí a také na příjmu!*

---

### O autorovi

[Tim Blömeke](#) vyučuje rekreační a technické potápění na Tchaj-wanu a Filipínách. Rovněž je spisovatelem na volné noze, překladatelem, a také přispívajícím redaktorem pro publikaci Alert Diver. Máte-li na něj nějaké otázky nebo k něčemu připomínky, můžete ho kontaktovat prostřednictvím jeho [blogové stránky](#) nebo na [Instagramu](#).

---

**Překladatel:** [Klement Hartinger](#)