

# Když se ryby dusí aneb Příčiny a důsledky úbytku kyslíku ve vodách

**Přístup k dostatečnému množství kyslíku k dýchání je pro naprostou většinu živočichů zásadní podmínkou pro život. My suchozemci jsme citliví na čistotu vzduchu, přítomnost toxických plynů či zplodin hoření nám může značně znepříjemnit nebo i ukončit život, ale jen málokdo z nás se dostane do prostředí, kde by nám mohl způsobit vážné problémy nedostatek tohoto „životodárného“ plynu. Výjimky samozřejmě existují – např. ve vysokých horách nebo pro piloty stíhaček je nedostatek kyslíku (v důsledku nízkého atmosférického tlaku) zásadní. Obyvatelé vodního prostředí se ale mohou v situacích, kdy se v jejich okolí rozpuštěného kyslíku nedostává, ocitát mnohem častěji. Varující zprávou přitom je, že následkem lidské činnosti a klimatických změn takových situací přibývá jak v mořích, tak v jezerech.**

Molekulární kyslík vzniká na Zemi přirozeně téměř výhradně při fotosyntéze probíhající v buňkách rostlin, řas a sinic. Hlavní zásobárnou tohoto plynu je atmosféra, z níž se přestupem přes hladinu rozpuští v povrchových vodách. Čím je voda chladnější, tím může obsahovat více rozpuštěných plynů. Fotosyntetizující vodní rostliny a mikroorganismy uvolňují vyprodukovaný kyslík přímo do okolní vody, a pokud je ho ve vodě rozpuštěno více, než je rovnovážná koncentrace při dané teplotě a tlaku, kyslík se naopak z vody uvolňuje do okolního vzduchu. Zároveň je spotřebováván vodními organismy při respiraci – prodýchávají ho živočichové, značná část spotřeby ale obvykle padne na aerobní rozklad organických látek pomocí mikroorganismů a nelze zapomenout ani na spotřebu samotnými rostlinami a řasami. Nejen za tmy, ale i při nízkých intenzitách světla jejich respirace nad fotosyntézou převáží.

Oba hlavní mechanismy přísunu kyslíku do vodního prostředí jsou vázány na vrstvu při hladině, kam proniká dostatek sluneč-

ního světla. Hlubiny oceánů i jezer a jejich obyvatelé závisejí na přísunu vody z mělkých vrstev, obsahující dostatek rozpuštěného kyslíku. Ta se může dostat do větších hloubek díky více či méně periodickému míchání vodního sloupce pomocí větru (podrobnosti na str. XLV–XLVII kuleru této Živy), případně klesat „samovolně“ v důsledku zvýšení hustoty při změnách teploty nebo obsahu rozpuštěných solí. Pro jezera je až na výjimky typický první případ – klíčovým hybatelem posílajícím kyslík do hlubin je vítr nad jejich hladinou, pokud to ovšem teplotní a hustotní stratifikace vodního sloupce dovolí.

Na otevřeném moři je situace složitější, neboť energie větru není na promíchání kilometry hlubokého vodního sloupce dostatečná. Globální koloběh chladné mořské vody zanořující se do hlubin v severním Atlantském oceánu a Jižním oceánu u Antarktidy, nazývaný termohalinní cirkulace, nicméně zajišťuje přísun kyslíku pro hlubokomořská společenstva většiny světového oceánu. Do některých vnitřních

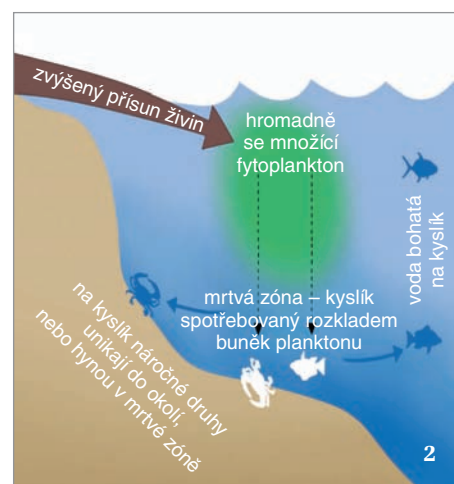
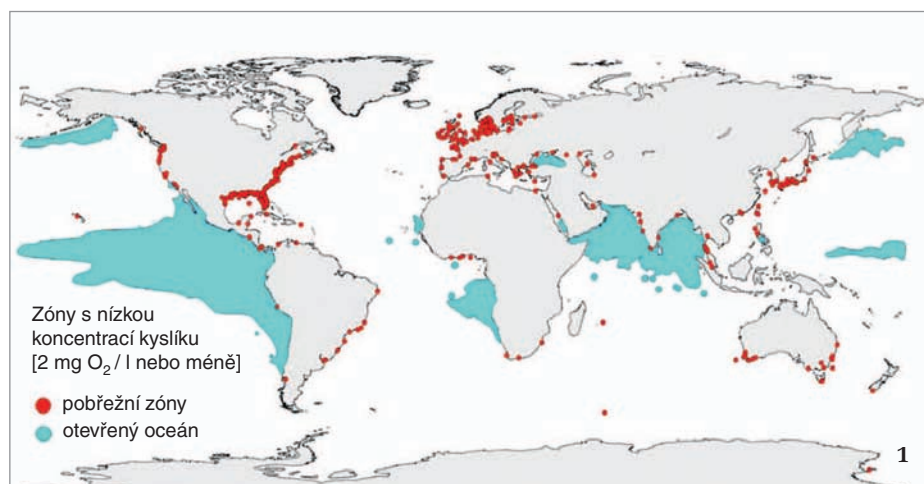
moří, stejně jako do mělkých příbřežních vod, ale tyto hlubinné vody bohaté na kyslík nepronikají. Specifickým případem jsou pak zálivy hluboko zařiznuté do pevniny, v nichž bývá výměna vody s otevřeným mořem značně omezená. Pokud se navíc na hladině drží vrstva vody o nižší hustotě (např. brakické vody, naředěné říčním přítokem), promíchávání vodního sloupce větrem je znemožněno. Za takových podmínek se jakýkoliv proces snižující koncentraci rozpuštěného kyslíku nebo zrychlující jeho odčerpávání může velmi negativně projevit na životních podmínkách pro mořské obyvatele.

Extrémním případem je vznik tzv. mrtvých zón, kdy po rozkladu organické hmoty klesající od hladiny dojde ve většině nemíchané části vodního sloupce k úplnému vyčerpání kyslíku (anoxii) nebo jeho dramatickému úbytku (hypoxii) až na koncentrace, které již není velká část mořských živočichů schopna tolerovat. Za hranici mrtvé zóny se obvykle pokládá koncentrace 2 mg O<sub>2</sub> na litr vody. Přirozeně takové podmínky najdeme třeba v Černém moři – většina jeho objemu v hloubce zhruba pod 100 m je zcela anoxická, navíc hlubinná voda obsahuje sulfan, a je tedy pro živočichy vyloženě toxická. V posledních několika dekádách ale přibýlo mnoho „mrtvých zón“ již od hloubky několika metrů či desítek metrů v oblastech, které předtím poskytovaly vhodné podmínky i pro komerční rybolov (obr. 1). Příčinou bývá antropogenní eutrofizace – zvýšení obsahu limitujících živin (dusíku a fosforu) ve

**1** Globální výskyt mořských „mrtvých zón“, v nichž dochází alespoň v části roku k výraznému poklesu obsahu rozpuštěného kyslíku. Mrtvé zóny v pobřežních vodách (červeně) obvykle sahají až ke dnu, kyslíková minima na otevřeném moři se většinou omezují na určitou část vodního sloupce, kde dochází k nejintenzivnějšímu rozkladu sedimentující organické hmoty.

Upraveno podle: The Global Ocean Oxygen Network (GO<sub>2</sub>NE), UNESCO

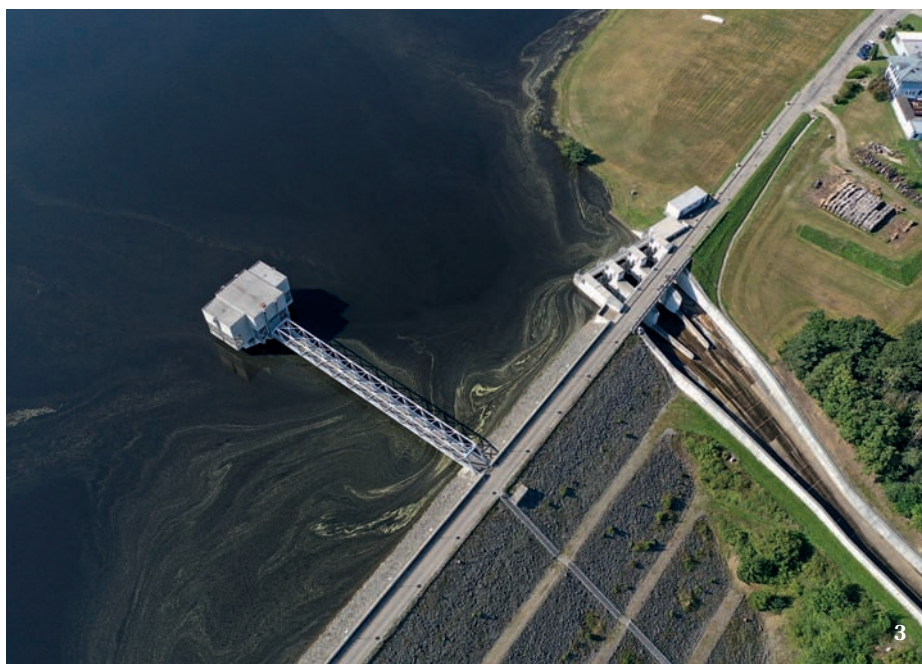
**2** Vznik mrtvé zóny u pobřeží. Intenzivní přísun živin říčním přítokem (hnědě) stimuluje růst planktonních řas a sinic, při jejichž rozkladu dojde k vyčerpání kyslíku a následnému úhynu živočichů. Upraveno podle různých zdrojů, např. U. S. Environmental Protection Agency, kreslila R. Bošková



vodě, často velmi výrazné. Tyto živiny do moře přitékají řekami nebo je z břehů splachuje dešťová voda, jejich typickými zdroji jsou umělá hnojiva na polích v povodí nebo splaškové vody. Fosfor a dusík podporují růst fytoplanktonu u hladiny, vyprodukovaná biomasa ale nakonec klesá do hloubky, kde se rozkládá. Obdobně působí i organické částice přinášené do pobřežních vod přítoky, ať už pocházejí z přirozených zdrojů, nebo třeba z nečištěných splaškových vod. Pokud dojde oproti přirozenému stavu k výraznému nárůstu takto sedimentující organické hmoty, je zaděláno na vznik hypoxie (obr. 2).

Jedna z prvních mořských mrtvých zón, na jejichž vzniku se bezesporu podílel člověk, byla pozorována v Chesapeacké zátocce na východním pobřeží USA v 70. letech 20. století. V současnosti známe takových oblastí ve světovém oceánu více než 400. Sedm z deseti nejvýznamnějších se nachází v Baltském moři, kde podstatným způsobem ovlivňují výskyt a úlovky komerčně důležitých druhů ryb. Rozsah velké části mrtvých zón vykazuje výrazné sezonní fluktuační. V závislosti na ročním období se totiž mění jak objem přítoků z pevniny a koncentrace živin v něm, tak rychlost růstu fytoplanktonu u hladiny a intenzita rozkladných procesů pod ní.

Obdobné procesy, jež vedou ke vzniku mrtvých zón v mořích, samozřejmě probí-



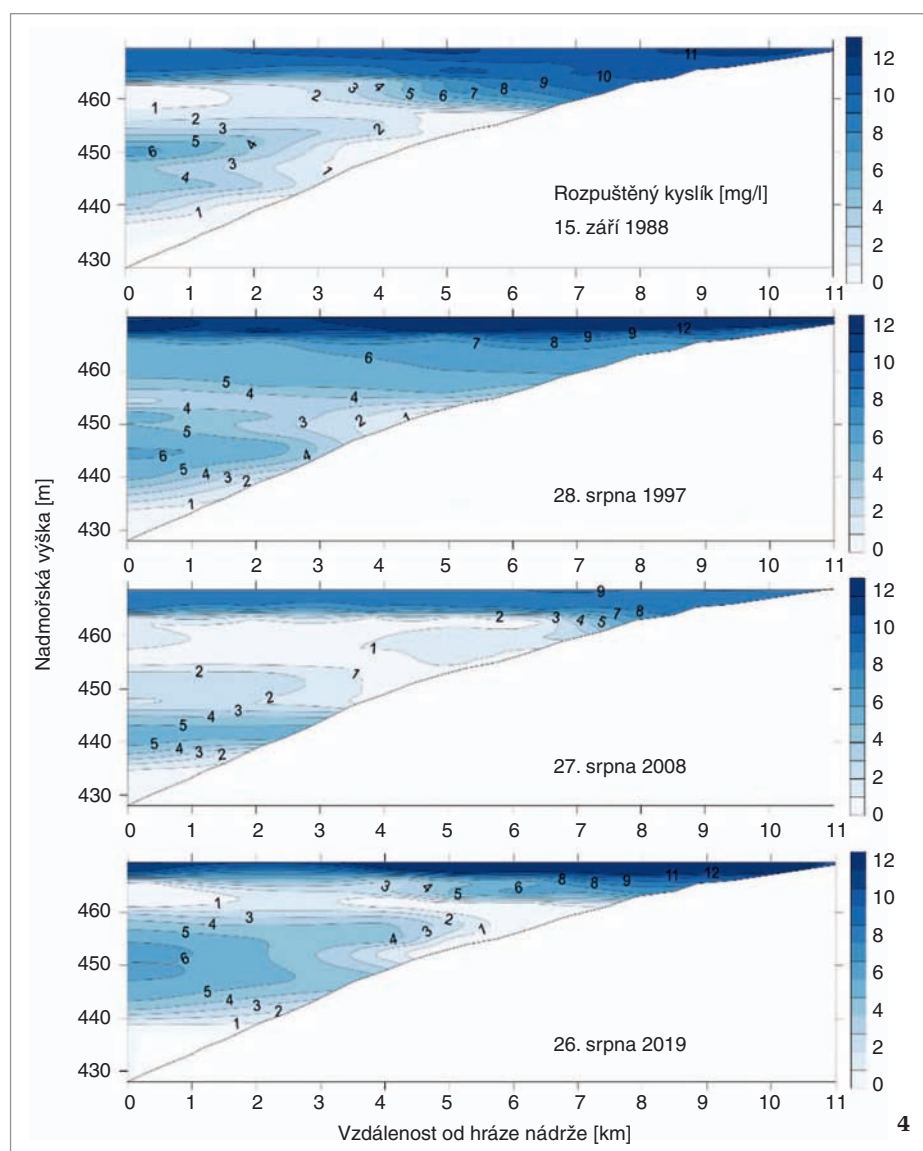
hají i v prostředí jezer, rybníků a jiných umělých vodních nádrží. V letním období v mírném pásu, kdy se v dostatečně hlubokých stojatých vodách ustává výrazná teplotní stratifikace (viz str. XLV–XLVII kuléru), je naprosto běžné, že v chladné nemíchané vrstvě u dna dochází k postup-

nému úbytku kyslíku. Stejně jako v mořských zálivkách jde o důsledek rozkladu sedimentujících organických částic, přinášených z povodí či vznikajících z primární produkce fytoplanktonu. Čím je dostupnost živin při hladině větší, tím je větší i pravděpodobnost, že se rozvine výrazný vegetační zákal, případně naroste sinicový vodní květ (obr. 3), což vyčerpání kyslíku podpoří – jak nárůstem množství sedimentující biomasy, tak zvýšeným zástínem.

Hypoxická nebo zcela anoxická vrstva s postupující sezónou postupně nabývá na mocnosti, dokud nedojde na podzim znovu k promíchání vodního sloupce a obnově zásoby kyslíku až ke dnu. Do té doby se mohou i hlubiny přehrady stát pro živočichy velmi nehostinným prostředím. Avšak nejen to. Anaerobní podmínky u dna podporují uvolňování fosforu vázaného v sedimentech (a tím další zesilování efektu eutrofizace) i mikrobiální produkci metanu, který se může za určitých podmínek uvolňovat do atmosféry a zvyšovat obsah skleníkových plynů.

Globální změny prostředí ovlivňují kyslíkový režim oceánů i jezer na celém světě. Zatímco alarmující zprávy o mrtvých zónách v mořích a nebezpečí úbytku kyslíku v hlubokomořském prostředí se objevují již řadu let, přesvědčivá velkoškálová data o trendech v jezerech na sebe nechala čekat. V létě loňského roku to napravila studie publikovaná ve vědeckém časopise Nature (Jane a kol. 2021), jež zkomponovala časové řady z téměř 400 jezer mírného pásu sledovaných po dobu minimálně 10 let, včetně řady lokalit s mnohem delší historií výzkumu. Nechyběla mezi nimi ani přehradní nádrž Římov na Malši (viz obr. 3–6), zásobující pitnou vodou České Budějovice a velkou část jihočeského regionu. Tato nádrž je detailně sledována od svého napuštění v r. 1979 až doposud.

Analýza tak rozsáhlého datového souboru přinesla celou řadu znepokojujících zjištění. Meziročně je pozorována značná variabilita v množství rozpuštěného kyslíku a míře vzniku hypoxických zón, které závislejší zejména na počasí konkrétního roku. Celkově se ale bohužel potvrdil





5

3 Sinicový vodní květ nahromaděný u hráze vodárenské nádrže Římov, září 2020. Foto P. Znachor

4 Koncentrace rozpuštěného kyslíku v podélném profilu nádrže Římov v jednotlivých desetiletích existence nádrže koncem letního období, kdy bývá rozsah anoxie (úplného vyčerpání kyslíku) sezonně největší. Obsah kyslíku je znázorněn pomocí izochar, spojujících body se stejnou koncentrací. Hráz přehradní nádrže o maximální hloubce 44 m se na grafu nachází nalevo, říční přítok napravo. Rozsah anoxických zón meziročně značně kolísá podle toho, kde v nádrži naroste a sedimentuje nejvíc biomasy fytoplanktonu, což závisí hlavně na velikosti a variabilitě přítoku do nádrže a přítokové koncentraci fosforu, který je pro fytoplankton limitující živinou. Z porovnání jednotlivých obrázků je zřejmé, že kyslíkové poměry v nádrži se s časem zhoršují, i když zatížení nádrže fosforem bylo největší v 90. letech 20. století a od té doby spíše klesá. Zhoršování lze vysvětlit jednak zvyšováním spotřeby kyslíku sedimenty, které se postupně hromadí na dně nádrže, jednak stoupající teplotou vody, což působí snižování rovnovážné koncentrace kyslíku ve vodě a omezuje jeho vnášení přítokem i přestupem přes hladinu.

5 Pohled na nádrž Římov od přítoku, říjen 2021. Foto P. Znachor

6 Ortofografie nádrže Římov, srpen 2004. Ze snímků Gefos, a. s., zpracoval J. Žaloudík.

7 Hromadný úhyn ryb v důsledku vyčerpání kyslíku po nadměrném přísunu živin. Foto WorldAtlas.com, v souladu s podmínkami použití

předpoklad, že postupný úbytek zásob kyslíku není pouze problém světového oceánu, ale i temperátních jezer (obr. 4). Pozorovaný pokles je u nich navíc oproti oceánům výraznější, a to zhruba 3–9krát, což souvisí s menším objemem hlubinné vody v jezerech – kyslík se tam vyčerpá rychleji než v hlubších mořích – a s často

velmi intenzivní eutrofizací vnitrozemských vod. Stejně jako v oceánech se na úbytku kyslíku podílejí procesy fyzikální – zvyšování teploty povrchové vody, a tedy pokles rozpustnosti plynů – i biologické. Ty reagují jednak na vyšší teplotu vody zrychlením všech metabolických procesů včetně fotosyntézy a rozkladu, jednak na nárůst množství živin zvýšením intenzity rozkladných procesů v nemíchaných hlubších vrstvách vodního sloupce a zároveň snížením průhlednosti vody, což znemožňuje produkci kyslíku fotosyntézou ve větší hloubce.

Přes mnohé dílčí snahy o zredukování zátěže vodních zdrojů fosforem zůstává nadále antropogenní eutrofizace zásadním problémem povrchových vod v kulturní krajině. Není tedy překvapivé, že právě zvýšený přísun živin je hlavním faktorem podporujícím skutečně dramatické poklesy koncentrací kyslíku. Zároveň ale stojí i za opačným trendem – v některých jezerech je navzdory oteplování a eutrofizaci dobře měřitelný trend nárůstu koncentrace kyslíku. Má to ale háček – tento nárůst



6

pozorujeme jen v eutrofních jezerech při hladině a je způsoben vyšší intenzitou fotosyntézy při přemnožení fytoplanktonu. V těch samých jezerech je naopak v nemíchaných vrstvách u dna zvýšené riziko vzniku anoxie a pozorované poklesy koncentrací kyslíku v této části vodního sloupce patří k nejvýraznějším.

Na tak klíčovou charakteristiku vodního prostředí, jako je dostupnost kyslíku, mají tedy vliv jak globální klima, tak lokální změny v krajině. Ve výsledku je ovlivněno fungování celého ekosystému od činnosti mikroorganismů po fyziologickou pohodu, či dokonce přežití ekonomicky významných živočichů.

Seznam použité literatury je uveden na webové stránce Živa.



7