

Vliv globálních změn na šumavská jezera

Změny chemického složení a rostlinných i živočišných společenstev šumavských jezer jsou citlivými ukazateli dopadů globálních změn na přírodní ekosystémy, kterých již v České republice mnoho nezůstává. Díky odlehlosti a relativně omezené dostupnosti nebyla povodí šumavských ledovcových jezer ovlivněna dlouhodobým hospodařením, které přeměnilo většinu středoevropské krajiny na zemědělsky či lesnicky intenzivně využívaná území. To zásadně a mnohdy téměř nevratně snížilo schopnost krajiny přirozeně reagovat na probíhající globální změny. Jejich vliv může být zpočátku slabě průkazný a v obhospodařované krajině bývá dlouho překryt bezprostřední lidskou činností, jakou představují např. eutrofizace hnojením, znečištění z průmyslových, zemědělských i komunálních zdrojů, intenzivní odvoz biomasy, umělé odvodnění, půdní eroze atd. Absence nebo minimální dopady antropogenních vlivů v posledních zbytcích přírodních území dosud uchovaly jejich citlivost k projevům globálních změn a činí z nich určitý „systém včasného varování“.

Nesmírná hodnota těchto lokalit spočívá také v možnosti sledovat neovlivněné přírodní procesy. Povodí šumavských jezer umožňují pochopení komplexnosti a řetězení dopadů nastupujících stresových faktorů napříč celým systémem atmosféra–vegetace–půda–voda. Můžeme zde detailně studovat následky vlivů typu znečišťování atmosféry a klimatické změny na vegetaci a chemismus půd, na mikroklimatický a hydrologický režim i na množství a kvalitu

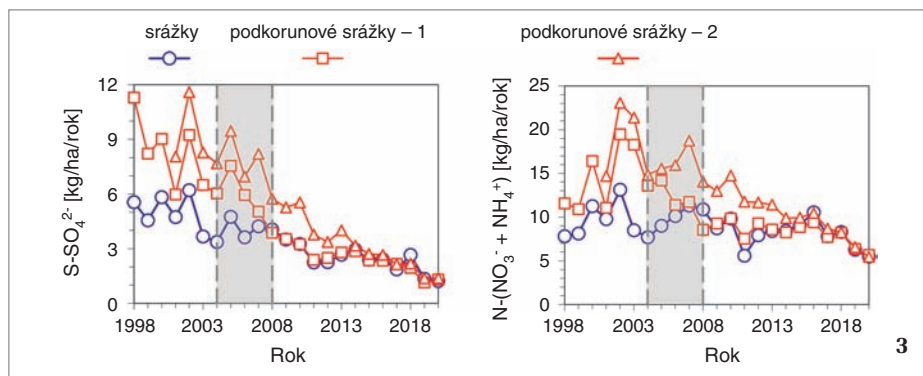
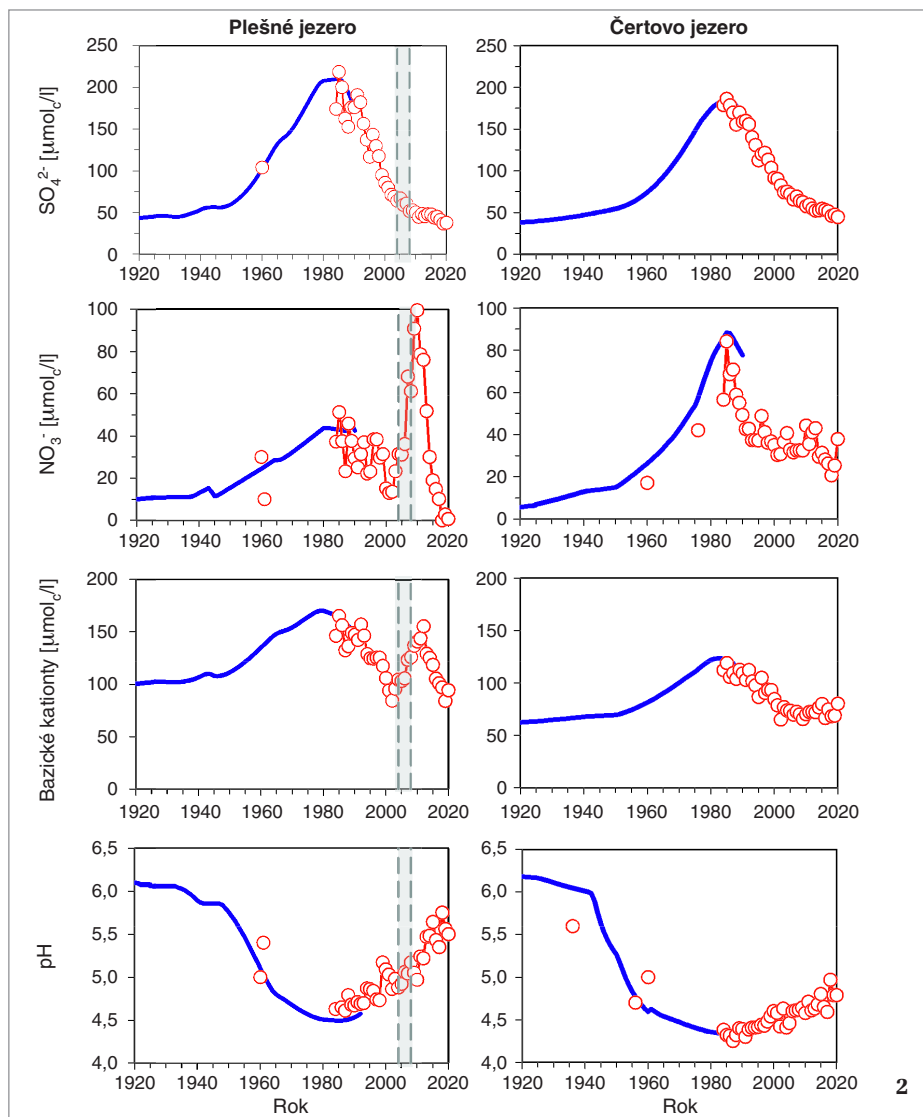
odtékající vody a její oživení. V následujícím textu si ukážeme příklad řetězce změn v systému povodí–jezero, které byly výsledkem dvou aktuálně nejvýznamnějších globálních faktorů – razantního snížení emisí sloučenin síry a dusíku do atmosféry od konce 80. let 20. století a značného oteplení, jež na počátku 21. století přispělo k velkoplošnému a intenzivnímu kůrovcovému narušení stromového patra a následné obnově šumavských smrkových porostů.

Znečišťování atmosféry

Složení šumavských půd a vod bylo dlouhodobě negativně ovlivňováno vysokou depozicí síranových (SO_4^{2-}), dusičnanových (NO_3^-) a amoniakových (NH_4^+) iontů, pocházejících především z výroby energie a ze zemědělství (Živa 2009, 2: 93–96). Jejich atmosférická depozice (kyselý déšť) postupně sílila od poloviny 19. století, po druhé světové válce začala prudce gradovat kvůli masivní intenzifikaci průmyslu a dosáhla maxima v 80. letech 20. století. Na počátku 90. let však depozice sloučenin síry a dusíku na našem území prudce poklesly a jejich mírné snižování pokračuje dodnes (obr. A na webové stránce Živy). Tento pozitivní vývoj byl umožněn souběhem socioekonomických příčin (změna průmyslové základny, prudký propad spotřeby energie i zemědělské, především živočišné, výroby) a pozdějšího cíleného omezování emisí. Současná úroveň atmosférické depozice síry ($< 2 \text{ kg/ha/rok}$) a anorganického dusíku ($< 8 \text{ kg/ha/rok}$) je tak v povodí šumavských jezer nižší než na počátku 20. století, což otevřelo cestu rychlému zotavování jezerních ekosystémů z kyselého stresu.

Po razantním poklesu znečišťování atmosféry došlo k výraznému snížení působení kyselých dešťů na lesní porosty a k postupnému zotavování půd i jezerních ekosystémů silně postižených předchozí acidifikací (Živa 2009, 4: 189–192). Zdravotní stav smrkových porostů se začal zlepšovat díky snížení koncentrací polutantů v ovzduší, jež přímo poškozovaly povrch jehlic, ale i díky poklesu koncentrací iontových forem hliníku v půdních roztocích, které byly toxické pro jejich kořenové systémy a které se uvolňují při okyselování půdy. Zotavování půd z acidifikace se projevilo pozvolným vymýváním sloučenin síry, které se v nich akumulovaly v předchozích desetiletích, a snížením ztrát bazických kationtů, důležitých živin (vápníku, hořčíku)





1 Plešné jezero – jeden z přítoků. Říjen 2021

2 Dlouhodobé trendy chemického složení vody Plešného a Čertova jezera v důsledku kyselých dešťů a odumření smrkového porostu během kůrovcového žíru v letech 2004–08 (šedivá plocha). Modré linie ukazují data rekonstruovaná matematicko-chemickým modelem MAGIC (viz Živa 2009, 4: 189–192) pro období 1920–90 na základě vývoje atmosférické depozice, změn chemismu půd a zvětrávání hornin. Body – skutečně naměřené hodnoty, jednotka mol_c – molární koncentrace náboje daného iontu (z anglického mol of charge, tzv. ekvivalent)

3 Porovnání hodnot atmosférické depozice síranové síry (S-SO₄²⁻) a anorganických forem dusíku [N-(NO₃⁻ + NH₄⁺)]

v srážkách na volné ploše beze stromů (modře) a v podkorunových srážkách (červeně) pod smrků na dvou plochách v povodí Plešného jezera (1 – poblíž jezera, 2 – ve vrcholové partii) před napadením stromů, během kůrovcového žíru (šedivá barva) a po něm při postupném rozpadu korun odumřelých smrků

a draslíku), vyplavovaných z půd společně se síranu a dusičnanu. Výsledkem zlepšení kvality atmosféry byl pokles koncentrací síranů a dusičnanů v jezerech a snižování jejich kyselosti – pH vody začalo po desetiletích poklesu opět stoupat (obr. 2).

Podobné změny chemismu se projevily ve všech 8 jezerech na české i bavorské straně Šumavy. Lišily se však svou inten-

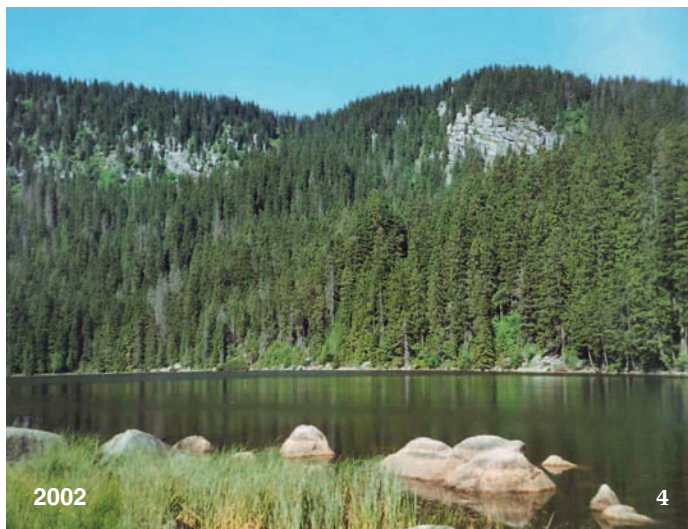
zitou, která byla úměrná míře předchozího okyselení. Velké změny tak pozorujeme u nejokyselenějších jezer – Černého, Čertova, Plešného a Roklanského. Tato jezera mají strmé kary s mělkými půdami, zatímco Laka, Prášílské, Velké Javorské a Malé Javorské mají pozvolnější povodí s mocnějšími půdami, schopnými kyselý déšť lépe neutralizovat. Protože kyselá depozice do povodí jezer byla na celém území Šumavy podobná, byla to právě schopnost půd toto znečištění zmírňovat, která rozhodovala o intenzitě změn chemického složení vody. Změny složení půd pak sehrály zásadní roli i při dopadu odumírání stromového patra na kvalitu a oživení vod.

Narušení stromového patra

Odumírání dospělých smrků zteplilých (*Picea abies*), dominujících lesním porostům v povodí šumavských jezer, významně zesílilo v posledních dvou desetiletích kvůli rychlému oteplování a působení lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*). Např. na meteorologické stanici Churáňov vzrostly roční průměrné teploty vzduchu mezi obdobími let 1976–80 a 2016–20 o 2 °C, z 3,9 na 5,9 °C. Zvýšené teploty stresují smrků nedostatkem vody a také prodlužují vegetační sezonu a urychlují vývoj lýkožrouta (kůrovce, více na str. 300–301), který pak může mít více generací během jediného roku. Klimatická změna (s níž souvisí i četnější silné vichřice) tak přispěla k rychlému šíření lýkožrouta vrcholovými partiemi Šumavy. Již v r. 1999 mu padly za obětí dospělé smrků v povodí Roklanského jezera a mezi roky 2004–08 odumřelo 90 % dospělých smrků v povodí Plešného jezera (obr. 4–9). V kombinaci s polomy v letech 2006 a 2007 poškodil kůrovcový žír většinu smrkových porostů i v povodí jezer Prášílského a Laka a v současné době graduje v povodí Černého a Čertova jezera.

Zcela zásadní pro další vývoj chemismu půd a vod po odumření stromového patra a během jeho následné regenerace bylo rozhodnutí správ národních parků na české i bavorské straně Šumavy ponechat veškerou mrtvou rostlinnou biomasu na místě. Navíc bezzásahový režim (skutečně žádné zásahy) zejména v povodí Roklanského a Plešného jezera a omezené zásahy u ostatních jezer otevřely cestu přirozeným procesům a umožnily jejich biogeochemickou kvantifikaci.

Odumření stromového patra významně ovlivnilo toky polutantů a živin celým systémem povodí–jezero a míru zapojení jednotlivých prvků do příslušných biogeochemických procesů. Napadené stromy ponechané přirozenému osudu se rozpadaly postupně. Nejprve ztratily jehlice, v následujících měsících a letech větvičky, kůru a velké větve, pak se lámaly i kmeny (obr. 4–7, 9). To představovalo zásadní rozdíl oproti holosečné i asanační těžbě, kdy je stromové patro odstraněno prakticky naráz a většina živin v biomase ze systému nenávratně mizí. Jejich část ve zbytcích po těžbě se zpravidla nachází na izolovaných místech a půdy i přirozené zmlazení bývají mechanicky porušeny těžební technikou a manipulací s kmeny. Postupný, přirozený rozpad stromového patra je naopak provázen mírnějšími změnami



mikroklimatických a hydrologických charakteristik, jako např. stínění a závětrí. Velmi důležité je rovněž neporušení půd erozními rýhami i rovnoměrnější rozmís-tění opadu pod stromy v čase i prostoru.

Vliv odumření stromového patra na půdy

Zmenšování plochy vegetace v korunách odumřelých stromů snížilo množství polutantů, které jsou z atmosféry odstraňovány v podobě suché depozice a horizontálních srážek (zadržené mlhy, námraz a vlhkosti z nízkých oblaků), usazujících se zejména na povrchu předmětů. Čím členitější povrch krajiny a větší nadmořská výška, tím větší měrou se horizontální depozice uplatňuje. Proto je vstup polutantů do půd výrazně vyšší pod jehličnatými porosty než pod listnatými stromy (především v zimních měsících) nebo než na volné ploše bez jakékoli vegetace. S postupným rozpadem korun smrků se tak zvolna snižoval rozdíl mezi depozicí síry a dusíku na volné ploše a v podkorunových srážkách a jejich celkový vstup do šumavských povodí klesl (obr. 3). Rozpad stromového patra tím významně přispěl k poklesu kyselé depozice do půd.

Ještě mnohem významnější vliv na změnu fyzikálně-chemických vlastností půd pod suchými stromy však měly pokles transpirace a postupné uvolňování živin z opadávající mrtvé biomasy. S odumřením stromů ustala jejich transpirace (dýchání), která ve zdravém lese představuje hlavní tok vody zpět z povodí do atmosféry. Přestože naopak vzrostl odpar z povrchu nezastíněných částí půdy, celkové množství vody vracené zpět do atmosféry se snížilo. Výsledkem byl nárůst půdní vlhkosti, mírné zvýšení množství vody odtékající z povodí, ale i ovlivnění půdních procesů.

Rozdíl ve složení půd pod odumřelými a zdravými stromy jsme zdokumentovali v povodích Plešného a Čertova jezera. Výzkumné plochy byly založeny v dospělých smrkových porostech v podobné nadmořské výšce na úrovni hladin jezer. Zatímco u Plešného jezera odumřely během let 2006–07 všechny přítomné dospělé smrky, u Čertova jezera byly změny stromového patra zanedbatelné. Odumření stromů mělo jen malý vliv na celoroční množství srážek dopadajících na půdu (obr. B na webu Živy). Sice klesl odpar přímo z povrchu korun stromů během letních měsíců, ale

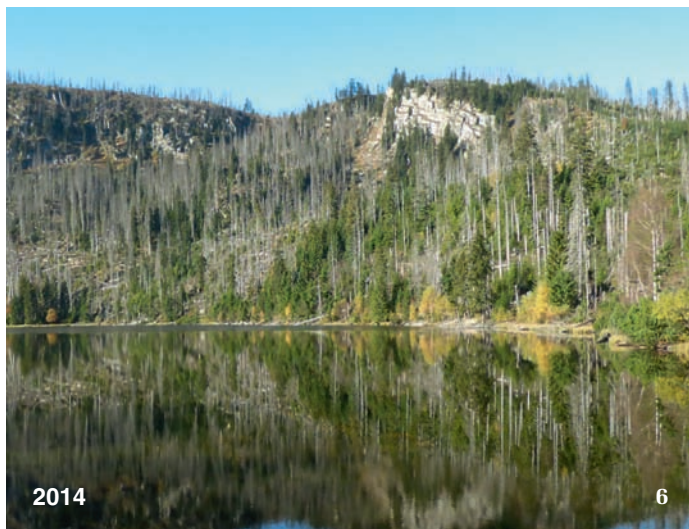
zároveň se snížilo i množství horizontálních srážek zachycených korunami zejména v chladném období. Přestože množství vody vstupující do půd bylo na obou plochách podobné, vlhkost půdy pod odumřelými stromy vzrostla a v porovnání s nepoškozenou plochou u Čertova jezera zůstala po několika následujících letech výrazně vyšší, a to i v letních měsících během kriticky suchých období v letech 2013 a 2015. Rozdíl v půdní vlhkosti vymizel přibližně po 10 letech, kdy plocha u Plešného jezera již byla pokryta početným, rychle rostoucím zmlazením dřevin i hustou podrostní vegetací a transpirace opět vzrostla. Rychlé zmlazování lesa bylo umožněno, kromě dostatku světla, právě stabilní půdní vlhkostí a snadnou dostupností živin z mrtvé biomasy původních smrků, ponechaných na místě k zetlení v rámci bezzásahového režimu. Podobně i biomonitoring Správy NP Šumava a výzkum kolegů z Lesnické fakulty České zemědělské univerzity na dalších šumavských lokalitách potvrdil, že bezzásahový režim vede k úspěšné přirozené obnově horských oblastí po kůrovcovém žíru (blíže na str. 278–281).

Zvýšená dostupnost živin postupně uvolňovaných z mrtvé biomasy dále významně ovlivnila složení půd i půdní mikrobiální procesy. Rozkladem čerstvého opadu (zpočátku především jehlic) se rychle uvolňovaly amonné (NH_4^+) a draselné (K^+) ionty, dále i ionty vápenaté (Ca^{2+}) a hořečnaté (Mg^{2+}). Jejich adsorpce na půdní výměnný komplex částečně nahradila vodíkové (H^+) a hlinité (Al^{3+}) ionty vyplavené do vod. Větší množství Ca^{2+} a Mg^{2+} zvýšilo bazickou saturaci půd, tedy procentuální podíl bazických kationtů na celkové kationtové výměnné kapacitě (obr. B na webu Živy). Toto obohacení půd živinami je zásadní pro zmlazující se porosty. Značné množství bazických kationtů bylo totiž z půd vymyto předchozími desetiletími kyselých dešťů, kdy byly odnášeny jako „protiionty“ síranových aniontů. Např. v povodí Čertova jezera, kde se na ztrátách bazických kationtů z půd navíc podílela i středověká těžba dřeva, je jejich současné výměnné množství v půdách nižší než v biomase stromového patra. Další odvoz dřevní hmoty by zde proto mohl vyústit v závažný nedostatek těchto živin pro nové porosty. Adsorpce uvolněných živin na půdní výměnný komplex při bezzásahovém

4 až 9 Jezerní stěna Plešného jezera v letech 2002 (obr. 4), 2007 (5), 2014 (6) a 2021 (7). Průběhy odumírání a rozpadu stromového patra v povodí Plešného jezera způsobené kůrovcovým žírem (8) v období 2004–08 (9; šedivá plocha). Snímky J. Kopáčka, není-li uvedeno jinak

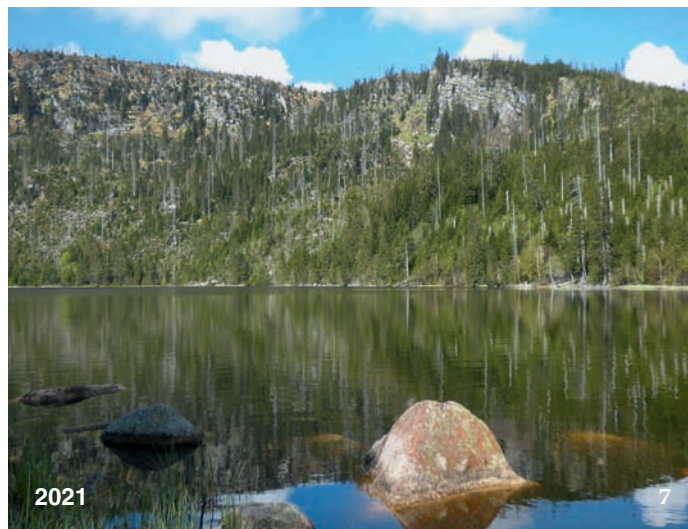
hovém režimu tak výrazně omezila jejich ztráty z povodí a ušetřila je pro nově rostoucí les. Koncentrace bazických kationtů v Plešném jezeře proto ani po odumření stromového patra nepřevýšily jejich hodnoty z období vrcholící acidifikace (obr. 2), zatímco jejich koncentrace v půdách se více než zdvojnásobily.

Pro mikrobiální pochody v půdách měla velký význam změna koncentrací amonických iontů a rozpuštěného organického uhlíku (DOC) v půdních roztocích. Koncentrace NH_4^+ v půdách po odumření stromů prudce vzrostla v důsledku mineralizace čerstvého opadu a sníženého odběru dusíku stromovou vegetací. Po odumření stromů zároveň ustala fotosyntéza a s ní i transport organických látek z koruny do kořenových systémů. Změna dostupnosti těchto živin způsobila pokles relativního zastoupení mykorhizních hub a zvýšení podílu heterotrofních bakterií v půdní mikrobiální biomase. Velké množství dostupného organického uhlíku v podobě čerstvého opadu umožnilo heterotrofním bakteriím akumulovat většinu mineralizací uvolňovaného NH_4^+ ve své biomase a pouze malý podíl NH_4^+ mohl být využit kompetičně znevýhodněnými autotrofními nitrifikačními bakteriemi. Ztráty anorganického N z půd tak byly bezprostředně po odumření stromů nízké a prudce se zvýšily až v následujících letech po vyčerpání snadno dostupného organického uhlíku. V tomto okamžiku začaly být amonné ionty více využívány nitrifikačními bakteriemi a vznikající dusičnan, který není významně v půdách fyzikálně-chemicky zadržován, začal odtékat ve zvýšených koncentracích. Spolu s ním se zvýšily i odnosy bazických kationtů (obr. 2), ale také vodíkových iontů a iontových forem hliníku (obr. C na webu Živy). Toto období zvýšeného vyplavování prvků z povodí trvalo přibližně 10 let. Poté odnosy NO_3^- (a s tímto aniontem spojené vyplavování bazických kationtů, H^+ a iontových forem Al) výrazně poklesly kvůli postupnému sni-



2014

6

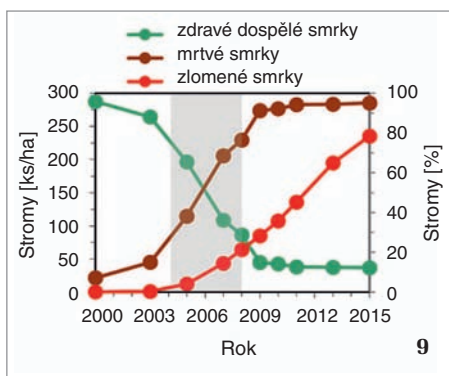


2021

7



8



9

žování produkce NH_4^+ z mrtvé biomasy a především vlivem rychle rostoucího odběru anorganických forem dusíku z půd zmlazující se vegetací.

Vyplavování DOC z půd bylo v prvních letech po odumření stromů nízké, protože snadno dostupné organické látky využívaly jako uhlíkový substrát heterotrofní bakterie. Zároveň byly pro mikroorganismy hůře dostupné huminové látky částečně imobilizovány vodíkovými ionty vznikajícími při nitrifikaci a vytěsněnými z půdního komplexu bazickými kationty, které se uvolnily mineralizací mrtvé biomasy. Rozpustnost huminových kyselin ve vodě klesá s mírou jejich protonizace (tedy s rostoucím podílem nedisociovaných karboxylových skupin), a je proto za nízkých hodnot pH nízká. Koncentrace DOC ve vodě odtékající do Plešného jezera začaly

růst až s několikaletým zpožděním po odumření stromů – poté, co poklesla produkce NO_3^- , a tedy i H^+ iontů (obr. C na webu Živy), což umožnilo vyšší míru disociace huminových látek a opět zvýšilo jejich rozpustnost v půdních roztocích. Vyplavování DOC podpořila i vyšší půdní vlhkost, která zvýšila četnost laterálního odtoku srážkové vody svrchními horizonty bohatými na organický uhlík. Zvýšený odnos DOC trvá dosud a byl kromě přítoků do Plešného jezera pozorován i v dalších šumavských jezerech, kde se na jeho růstu dlouhodobě podílí také pokles kyselé depozice, způsobující zvyšování pH půdních roztoků, a tím i zvýšenou disociací (a rozpustností) huminových látek. Významným doprovodným procesem zvýšeného vyplavování DOC z povodí je nárůst odnosu organických a iontových forem fosforu (P), které jsou jednak součástí rozpuštěných organických látek a jednak s nimi tvoří komplexní sloučeniny. Všechny procesy v povodí, které se podílejí na změnách vyplavování NO_3^- , H^+ , Al, DOC i P, zároveň ovlivnily složení vody v jezerech.

Vliv odumření stromového patra na chemické složení jezerní vody

Detailní dlouhodobý výzkum šumavských jezer začal již v 80. letech 20. století. Mohli jsme proto dobře zdokumentovat nejen vliv snižování kyselé depozice, ale i dopady odumření stromů v povodí. Výsledky z Plešného a Čertova jezera v mnoha ohledech překvapily. Na prvním místě to byla skutečnost, že i tak drastický rozpad stromového patra, jaký nastal v povodí Plešného jezera, měl mírnější a krátkodobější vliv na kvalitu vody než běžné změny v obhospodařování či užívání zemědělské půdy (přeměna pastvin na ornou půdu a zpět, hloubka orby, meliorační odvodnění apod.) nebo než měla předchozí éra kyselých dešťů. Z porovnání změn koncentrací hlavních iontů (obr. 2) je vidět, že disturbance v povodí Plešného jezera nijak neovlivnila koncentrace síranů, jejichž pokles pokračoval podobně jako v Čertově jezere jen v závislosti na snižování kyselé depozice a vyplavování nahromaděných sloučenin síry z půd. Prudké zvýšení koncentrací dusičnanů a bazických kationtů společně vyplavovaných z půd bylo pouze krátkodobé. Přibližně po 15 letech od počátku disturbance jezerní koncentrace du-

sičnanů dokonce klesly na nižší hodnoty než před kůrovcovým žírem, především z důvodu spotřeby dusíku rychle rostoucí vegetací v povodí. Koncentrace bazických kationtů však za stejné období klesly pouze na úroveň hodnot před disturbancí, tedy méně, než se snížilo vyplavování síranů a dusičnanů. Díky své větší dostupnosti v půdách tak bazické kationty částečně nahradily vodíkové ionty doprovázející jako protiionty odnos síranových a dusičnanových aniontů. Proto pH vody přítékající do Plešného jezera začalo růst strměji (a jezero se začalo rychleji zotavovat z acidifikace), než tomu bylo u Čertova jezera. Tato změna však nebyla jedinou ani hlavní příčinou rychlého zotavování jezerní vody po disturbanci v povodí.

Ještě významnější roli sehrály jezerní procesy. Ukázalo se, že zatímco se voda jezerních přítoků bezprostředně po odumření stromového patra krátkodobě silně okyselila, přímo v jezeře byl nárůst kyselosti (pokles pH vody) výrazně menší (viz obr. D na webu Živy). V následujících letech pak pH jezerní vody rostlo strměji než v přítocích a přibližně 10 let od konce disturbance se v Plešném jezeře dokonce obnovil uhlíčitánový pufrací systém (objevily se hydrogenuhličitanové ionty), který zde byl od počátku 60. let 20. století trvale vyčerpán kyselými dešti. Co způsobilo tuto náhlou změnu? Mohly za ni biogeochemické přeměny sloučenin dusíku, fosforu, organického uhlíku a hliníku.

Po odumření stromového patra se rychle zvýšil vstup dusičnanů, vodíkových iontů a hliníku do jezera (obr. C na webu Živy) a později se postupně začalo z půd vyplavovat více DOC a fosforu. Primární produkce (růst řas) šumavských jezer je limitována dostupností fosforu. Po zvýšení jeho koncentrací tak začalo v Plešném jezeře růst více řas, které vyžadovaly pro budování svých těl také více reaktivního dusíku. Ten byl ve vodě přítomen především jako dusičnan. Při biochemických reakcích probíhajících během asimilace dusičnanového dusíku je z vody odstraňován (neutralizován) jeden H^+ iont na každý atom N. Růst biomasy řas tak kyselost vody částečně neutralizoval.

Fosforem podpořený vyšší nárůst primární produkce ale způsobil ještě další změny jezerních procesů. Odumřelé řasy sedimentují a stávají se obživou bakterií,

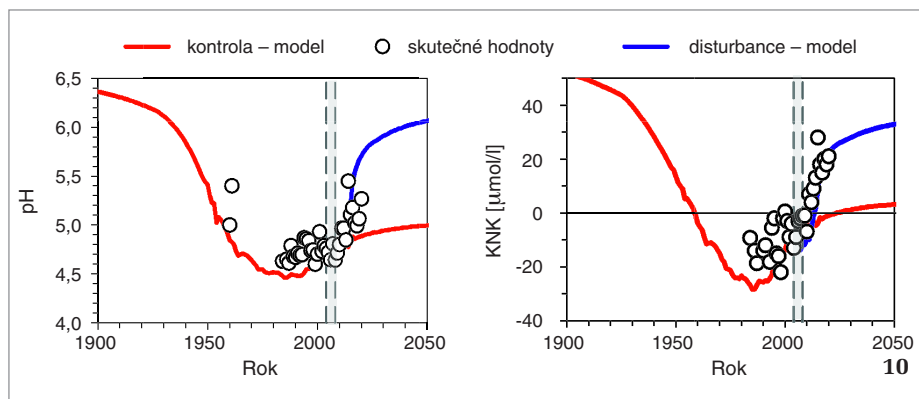
kteří k mineralizaci jejich těl potřebují ve vodě rozpuštěný kyslík. Vyšší primární produkce a sedimentace řas proto způsobila rychlejší vyčerpání rozpuštěného kyslíku a vznik rozsáhlejších anoxických podmínek u dna jezera. Za této situace jsou některé bakterie při mineralizaci organického substrátu schopné využívat jako konečný akceptor elektronů místo rozpuštěného kyslíku dusičnanový dusík a redukovat ho na plynný N_2 . Tento proces se nazývá denitrifikace. I při něm je spotřebován jeden H^+ iont na každý využitý atom N. Zvýšená denitrifikace tak dále přispěla ke snižování kyselosti vody.

Velmi důležitým pochodem neutralizujícím H^+ ionty je dále fotochemická a mikrobiální oxidace organických kyselin. Velká část DOC přitékajícího do jezera z půd je ve formě organických, převážně huminových kyselin nebo fulvokyselin. Jde o vysokomolekulární barevné látky, které intenzivně absorbují ultrafialovou složku slunečního záření. Toto vysoce energetické záření je schopno část organických kyselin přímo oxidovat na oxid uhličitý a vodu a část rozštěpit na nízkomolekulární organické látky. Ty se tak stávají dostupnými pro bakterie, které je mineralizují opět na oxid uhličitý a vodu. V obou případech klesá koncentrace organických kyselin ve vodě a její pH roste.

Oproti předchozím procesům snižujícím kyselost prostředí v jezeře probíhá i hydrolyza iontových forem hliníku (reakce s vodou za vzniku hydroxidu hlinitého a H^+ iontů), která naopak vodu okyseluje. Výsledná koncentrace H^+ a celková změna pH jezerní vody mezi přítokem a odtokem je tak daná součtem všech probíhajících procesů. Současné vstupy dusičnanů a hliníku do Plešného jezera postupně klesají, zatímco přítok DOC se udržuje stále vysoký (obr. C na webu Živy). Neutralizace H^+ iontů v jezeře spojená s mikrobiální redukcí dusičnanů postupně klesá, ale zároveň klesá i produkce H^+ spojená s hydrolyzou hliníku. Naproti tomu neutralizační vliv fotochemické a mikrobiální oxidace organických kyselin zůstává vysoký. Spotřeba H^+ iontů v jezeře tak převyšuje jejich produkci a zvyšuje pH vody. Obnovení uhličitánového pufracího systému navíc jezerní vodě vrátilo její přirozenou ochranu proti prudkému kolísání pH v důsledku sezónních změn koncentrací H^+ v přítocích. Další důležitou změnou spojenou s poklesem koncentrací hliníku v jezerní vodě je snížení toxického vlivu jeho iontových forem na většinu vodních organismů, který po dlouhou dobu představoval hlavní překážku jejich úspěšného zotavování z atmosférické acidifikace.

Podobné změny jako v Plešném jezeře se odehrály i v ostatních jezerech. Jejich míra se lišila v závislosti na acidifikační historii a míře disturbance v povodí. Ve všech případech však poškození stromového patra paradoxně přispělo po krátkém období relativně mírného zhoršení kvality vody ke zlepšení podmínek pro zotavování jezerních ekosystémů z acidifikace a ke zrychlení tohoto procesu. Život v jezerech z rozpadu stromového patra profitoval.

Rozdíly mezi vývojem chemického složení vody v povodí s disturbance a bezzásahovým režimem oproti situaci, kdy by ne-



proběhla kůrovcová kalamita, je uveden na obr. 10. Oba scénáře – rozpad stromového patra i kontrolní scénář s nenapadenými stromy – byly pro Plešné jezero vytvořeny pomocí matematicko-chemického modelu MAGIC (Model of Acidification of Groundwater in Catchments – Model acidifikace podzemních vod v povodích). V případě neporušeného lesa by dále pokračovala vyšší kyselá depozice do půd povodí (obr. 3), jejich bazická saturace by zůstala nízká (obr. B na webu Živy) a jezerní procesy, které značně přispívají k neutralizaci H^+ iontů, by nebyly tak významné. Výsledkem by byl podstatně pomalejší a méně výrazný růst pH i neutralizační kyselinové kapacity (KNK) jezerní vody (obr. 10) a podstatně nižší šance pro rychlé zotavování.

Biologické zotavování jezer

Atmosférická acidifikace šumavských jezer během 20. století způsobila zásadní změny v jejich oživení (viz Živa 2002, 6: 265–269; 2003, 1: 25–29). Nízké pH a zejména vysoké koncentrace iontových forem hliníku znemožnily přežívání ryb, vedly až na několik výjimek k vyhnutí původních planktonních korýšů a snížení diverzity makrozoobentosu a negativně ovlivnily i jezerní flóru od řas až po makrofyty, včetně šídlatek (*Isoëtes*; Živa 2016, 4: 165–167). Podobně jako v jiných acidifikovaných oblastech po celém světě však byly i změny v oživení šumavských jezer značně opožděny za poklesem kyselých depozic. První náznaky pozitivních změn, jako např. návrat perloočky *Ceriodaphnia quadrangula* do pelagiálu Černého jezera nebo zvýšení populací korýšů, planktonních vírníků a jepic v některých dalších jezerech, byly pozorovány s více než desetiletým zpožděním od počátku příznivých změn chemického složení jezerních vod. Po dlouhou dobu bylo biologické zotavování jezer pomalé.

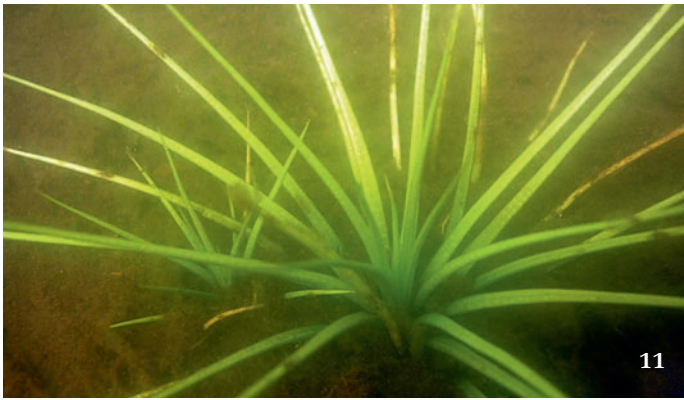
Výrazný skok ve změně různých druhů oživení šumavských jezer nastal až v posledních letech, přibližně desetiletí od rozpadu stromového patra (obr. 11–16). Jak jsme popsali výše, regenerace souvisí s obhacněním půd o bazické kationty, s růstem nové vegetace a změnami jezerního chemismu sníženým vyplavováním dusičnanů, H^+ a iontových forem hliníku z půd a zároveň se zvýšeným odnosem DOC a fosforu.

V mělkém litorálu Plešného jezera se tak v současnosti znovu rozmnožuje šídlatka ostnovýtrusá (*I. echinospora*, obr. 11), jejíž dospělé rostliny překročily období acidifikace díky hlubokým kořenům a dlouhověkosti. Kořínky klíčících rostlin, které se vyvíjejí na povrchu sedimentu, však podlé-

10 Vývoj hodnot pH a kyselinové neutralizační kapacity (KNK, Granova titrace) vody Plešného jezera před kůrovcovým žírem během let 2004–08 (šedivá plocha) a po něm simulovaný modelem MAGIC pro případ bez poškození stromového patra (kontrola, červená linie), a pro skutečný rozsah jeho odumření v bezzásahovém režimu (modrá). Body představují pozorované hodnoty.

Kladné hodnoty KNK přibližně odpovídají koncentraci hydrogenuhlíčanů. Orig. J. Kopáček, není-li uvedeno jinak 11 až 15 Organismy indikující biologické zotavování šumavských jezer. V populacích šídlatky ostnovýtrusé (*Isoëtes echinospora*, obr. 11) a š. jezerní (*I. lacustris*, 12) se znovu vyskytují mladé a dospívající rostliny potvrzující zlepšování kvality vod Plešného a Černého jezera. Populace zevaru úzkolistého (*Sparganium angustifolium*, 13) se v Plešném jezeře obnovuje ze semen přežívajících v sedimentu. Od r. 2008 ji tvořilo již mnoho desítek rostlin (14). V posledních letech se v Plešném jezeře zotavuje také ostrice zobánkatá (*Carex rostrata*), jejíž porost částečně zarůstá stanoviště zevaru a jeho početnost tak nyní opět omezuje. Koloniální nálevník lahvenka velká (*Ophrydium versatile*, 15) se objevil na kmenech odumřelých smrků spadlých do Prášílského jezera. Foto a orig. M. Čtvrtlíková (obr. 11–15) 16 Pstruh obecný (*Salmo trutta*) se v r. 2019 po mnoha desetiletích vrátil do jezera Laka. Foto L. Kočvara

haly několik desetiletí toxickým účinkům rozpuštěných iontových forem hliníku. V blízkosti zmlazující se populace šídlatky se ze semenné banky zachované v sedimentu zotavuje také zevar úzkolistý (*Sparganium angustifolium*, obr. 13 a 14), který během období acidifikace vymizel a byl prohlášen za vyhynulý nejen v Plešném jezeře, ale i v celé České republice. Od r. 2008 se však znovu objevuje v desítkách až stovkách jedinců. V mělkých vodách Plešného jezera se v posledních letech významně šíří i ostrice zobánkatá (*Carex rostrata*). Její porosty dnes téměř souvisle lemují břehy celého jezera. Částečně sice zarůstají i stanoviště šídlatky a zevaru, nicméně vytvářejí důležité prostředí pro přibývající larvy vodního hmyzu. Také v populaci šídlatky jezerní (*I. lacustris*, obr. 12) v hlubokém litorálu Černého jezera byly po několika desetiletích v r. 2017 zaznamenány první mladé rostliny, z nichž se už několika desítkám podařilo úspěšně zakořenit a dospět.



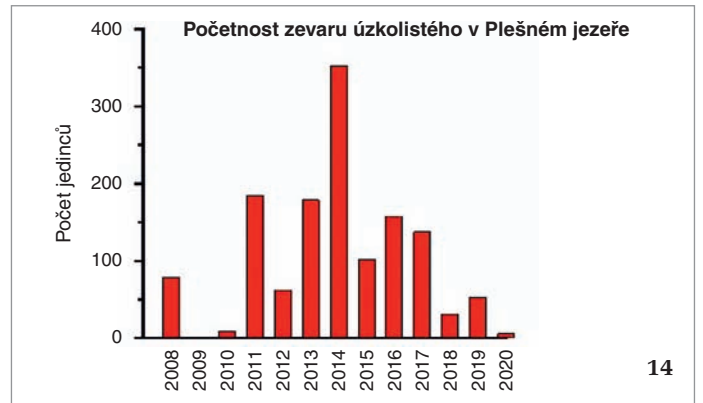
11



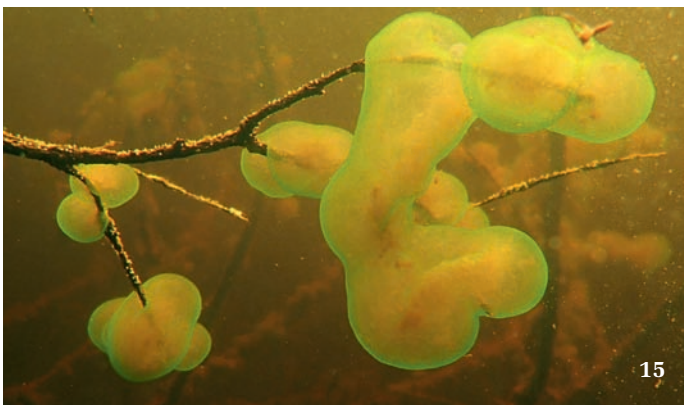
12



13



14



15



16

Prekvapivý objev jsme učinili v Prášilském jezeře, kde byl v r. 2019 zjištěn dříve nepozorovaný nálevník lahvenka velká (*Ophrydium versatile*, obr. 15), jež svými nápadnými slizovými koloniemi hustě pokrývá kmeny odumřelých smrků popadáných do jezera. Jako čistomilný druh tento organismus indikuje vysokou kvalitu jezerní vody. Na samém vrcholu pyramidy biologického zotavování šumavských jezer pak stojí postupný návrat ryb, který byl v poslední dekádě pozorován v obou Javorských jezerech a od r. 2019 dokonce i v jezeře Laka, které po mnoha desítkách let opět přirozeně osídlila populace pstruha obecného (*Salmo trutta*, obr. 16).

Dosud přesně nevíme, jaké konkrétní změny složení vody nebo jejich kombinace přispěly k rychlejšímu zotavování dílčích biologických složek jezerních ekosystémů. Podobně zůstávají částečně zahaleny příčiny a důsledky pozorovaných změn v půdních mikrobiálních společenstvech během rozpadu stromového patra a jeho obnovy nebo vliv rozdílu v mikroklimatických a půdních chemických charakteristikách na složení a rychlost růstu nového stromového patra v různých místech jezerních povodí. Tyto otázky budou hlavní

náplní našich dalších výzkumů. Již nyní je však zřejmé, že pozorovaná regenerace vody šumavských jezer a jejich oživení úzce souvisely s bezzásahovým režimem. Pokud by byla mrtvá biomasa stromů z povodí odvezena, vyplavování dusičnanů, vodíkových iontů a hliníku by bylo mnohem výraznější a zároveň by trvalo déle kvůli pomalejší regeneraci vegetace a nižšímu množství bazických kationtů v půdách. V tomto případě by se proces biologického zotavování jezer z atmosférické acidifikace výrazně oddálil, v některých případech pravděpodobně i zvrátil.

Závěrem

Naše výzkumy přesvědčivě odhalují úzké propojení biogeochemických cyklů všech živin a polutantů v atmosféře, vegetaci, půdě i vodě. Jejich vzájemné působení lze s trochou fantazie přirovnat k hodinovému strojků, kde jednotlivé prvky představují ozubená kolečka. Pokud nějaký proces ovlivní průměr či rychlost otáčení kteréhokoliv z nich, chod hodin se změní. Rozpoznání vazeb je klíčové pro pochopení komplexnosti fungování všech ekosystémů, od přírodních až po silně antropogenně ovlivněné. Otevírá totiž cestu k přes-

nějším odhadům možného vlivu různých typů lidské činnosti na vývoj zájmových území a tím ke včasnějším a lépe cíleným zmírňujícím a adaptačním opatřením k omezení dopadů. A právě v tom spočívá hlavní význam výzkumu povodí šumavských jezer, a především jejich přísné ochrany. Díky ní mohou nadále sloužit nejen jako krásná ukázka původní středoevropské horské krajiny, ale i jako aktuální a nesmírně cenná učebnice.

Kolektiv spoluautorů: Radek Bače, Martina Čtvrtlíková, Jakub Hruška, Jiří Kaňa, Filip Oulehle, Karolína Tahovská a Jaroslav Vrba

Príspevek využívá dat získaných v rámci řady projektů Grantové agentury ČR (aktuálně 19-16605S) a Strategie AV21 Akademie věd ČR (aktuálně VP20 – Voda pro život). Šumavská jezera jsou také sledována pro účely monitoringu směrnice Evropského parlamentu a Rady 2016/2284 (National Emissions Ceiling Directive).

Použitou literaturu a doplňující obrazové materiály najdete na webu Živy.