

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Biologie  
Studijní obor: Ekologická a evoluční biologie



Anna Macková

## **Vliv současných klimatických změn na ekosystémy horských jezer**

*Effect of current climate change on ecosystems of mountain lakes*

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. Linda Nedbalová, Ph.D.

Praha, 2024

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Praha 8. 8. 2024

Anna Macková

## **Poděkování**

Chtěla bych poděkovat především své školitelce doc. RNDr. Lindě Nedbalové, Ph.D. za konzultace, odborný dohled a pravidelné kontroly při psaní této bakalářské práce a hlavně trpělivost. Děkuji také svým blízkým za podporu.

## **Abstrakt:**

Současné globální klimatické změny ovlivňují horské oblasti a ekosystémy horských jezer na mnoha úrovních. S oteplením většiny horských oblastí se otepluje i jezerní voda a zkracuje se období zámru jezer. V jezerech se nově objevuje letní teplotní stratifikace nebo se zvyšuje počet dní, kdy tento jev nastává. Vlivem klimatických změn dochází ke změnám v atmosférické depozici, intenzivnějšímu zvětrávání hornin v povodí a nárůstu koncentrace rozpuštěného organického uhlíku, což má za následek změny iontového složení vody, vyšší přísun živin do těchto oligotrofních jezer a hnědnutí vody. Tající ledovce v horských oblastech dávají vznik novým horským jezerům v čím dál vyšších nadmořských výškách a zvětšují se i stávající jezera. Tavná ledovcová voda může ovlivnit i fyzikální a chemické vlastnosti jezerní vody, například teplotu, průhlednost, konduktivitu a koncentraci určitých prvků (zejména dusíku), ale i obsah toxických látek a mikroplastů, což má následně vliv na biotu jezer. V jezerech dochází ke změně druhového složení, objevují se druhy organismů preferující teplejší vodu s více živinami, mění se potravní sítě a prodlužuje se vegetační období. Lze tedy říci, že horská jezera prochází mnoha ekosystémovými změnami a s probíhajícími klimatickými změnami budou čelit i v budoucnosti mnoha novým výzvám.

## **Klíčová slova:**

Globální klimatické změny, horská jezera, teplotní stratifikace, ledová pokrývka, chemismus jezerní vody, tavná ledovcová voda, biota

## **Abstract:**

Current global climate change is affecting mountain regions and mountain lake ecosystems at many levels. With the warming of most mountain areas, lake water is also warming, and the freezing period of the lakes is shortening. Summer temperature stratification is newly appearing in lakes or the number of days when this phenomenon occurs is increasing. As a result of climate change, there are changes in atmospheric deposition, more intense weathering of rocks in the watersheds and an increase in the concentration of dissolved organic carbon, which results in a change in the ionic composition of the water, a higher supply of nutrients to these oligotrophic lakes and browning of the water. Melting glaciers in mountain areas give rise to new mountain lakes at higher and higher altitudes, and existing lakes are also getting bigger. Melting glacial water can also affect the physical and chemical properties of lake water, for example the temperature, transparency, conductivity and concentration of certain elements (especially nitrogen), but also the content of toxic substances and microplastics, which subsequently affects the lake biota. Species composition changes in lakes, organisms preferring warmer water with more nutrients appear, food webs change and the vegetation season lengthens. Ecosystems of mountain lakes are undergoing many changes and with ongoing climate changes in the future, they will face many new challenges.

## **Key words:**

Global climate change, mountain lakes, thermal stratification, ice cover, lake water chemistry, glacier melt water, biota

## Obsah

1. Úvod.....	1
2. Charakteristika horských jezer.....	2
3. Oteplování horských oblastí a horských jezer .....	3
Oteplování horských oblastí.....	3
Oteplování horských jezer.....	5
4. Teplotní režim a ledová pokrývka jezer.....	6
5. Chemismus jezerní vody.....	9
6. Vliv tajících ledovců.....	12
Vznik nových jezer a zvětšování jezer .....	12
Teplotní režim a průhlednost vody.....	14
Dusík a další prvky.....	15
Mikroplasty a další polutanty .....	16
7. Biota horských jezer .....	18
Vliv tajících ledovců na druhové složení a diverzitu .....	18
Vliv oteplení jezer na druhové složení a diverzitu .....	19
Vliv na produktivitu a potravní sítě.....	21
8. Závěr.....	23
9. Použitá literatura.....	24

## 1. Úvod

Od průmyslové revoluce stoupla průměrně teplota na Zemi o 1,09 °C a kontinenty se oteplily o 1,59 °C (IPCC, 2023). Probíhajícími klimatickými změnami jsou značně ovlivněny polární a horské oblasti, jelikož oteplení je zde mnohdy ještě větší a může docházet i k jeho akceleraci s rostoucí nadmořskou výškou (Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015). K oteplení jezer dochází celosvětově (O'Reilly et al., 2015; Williamson et al., 2009), avšak ohroženy jsou hlavně ekosystémy horských jezer, jelikož patří k nejcitlivějším ekosystémům (IPCC, 2019). Je zde mnoho endemických druhů a krátký potravní řetězec, což je činí zranitelnými vůči nepůvodním druhům a jakýmkoliv jiným změnám (Catalán et al., 2006; Ventura et al., 2017).

Chladné podnebí a ledová pokrývka po většinu roku spolu s krátkým vegetačním obdobím horská jezera odlišuje od nížinných jezer, což se ale vlivem probíhajících klimatických změn mění a má přímý dopad na biotu jezer (Catalán et al., 2006), biotické i abiotické změny se velmi podobají ekosystémovým změnám arktických jezer (Rühland et al., 2008). V obou těchto oblastech dochází k nárůstu teploty, prodloužení období letní teplotní stratifikace, zkrácení období zámruzu jezer a objevují se stejné druhy organismů preferující teplejší klima (Rühland et al., 2008). Vyhodnocení časových změn však často komplikuje nedostatek dat, která je obtížné na často velmi odlehlých lokalitách (Rogora et al. 2020), jejich velmi cenným zdrojem je paleolimnologický záznam, který je však dostupný jen pro část jezer a jen pro určité abiotické parametry a skupiny organismů (Moser et al. 2019).

Tato bakalářská práce se bude zabývat vlivem současných klimatických změn na ekosystémy horských jezer, a to především jezery nacházejícími se nad horní hranicí lesa (vysokohorskými). Nejprve se budu věnovat změnám abiotických podmínek, jako je teplota vody, teplotní režim, chemismus a vliv tavné ledovcové vody na tyto parametry a poté jezerní biotě – dopadem klimatických změn na druhové složení planktonních a bentických společenstev a na produktivitu a strukturu potravních sítí.

## 2. Charakteristika horských jezer

Horská jezera jsou relativně izolované ekosystémy až do nedávna pokládané za málo ovlivněné lidskou činností. Odráží se v nich probíhající klimatické změny podobně jako ve většině jezer (Williamson et al., 2009) a můžeme v nich nalézt dlouhodobý záznam horského klimatu (Battarbee et al., 2002). I přesto, že je často dělí velké vzdálenosti, sdílejí společné vlastnosti. Větší pozornost je věnována jezerům na severní polokouli, zejména horským jezerům ve střední a jižní Evropě, střední a jižní Asii a na západě Severní Ameriky. Méně informací je o jezerech na jižní polokouli především v Andách a na Novém Zélandě (Moser et al., 2019). Mnoho z nich (karová jezera) vzniklo vyhloubením zemského povrchu ledovcem v poslední době ledové a jeho následným roztáním (Catalán et al., 2006). Ke vzniku horských jezer dochází i v posledních letech vlivem klimatických změn (IPCC, 2019; Shugar et al., 2020). Většinou se jedná o jezera s malým povodím oproti jezerům v nížinách a jsou relativně mělká. Geologické podloží může být značně variabilní. Jelikož intenzita slunečního záření stoupá s nadmořskou výškou (Blumthaler et al., 1997), je jeho vliv během letních měsíců, kdy na jezerech není led, mnohem větší, než v jezerech v nižších polohách (Sommaruga, 2001).

Podnebí je chladné, po většinu roku je na horských jezerech sněhová a ledová pokrývka bránící průniku slunečních paprsků, a tedy i průběhu fotosyntézy a nízké teploty vzduchu brání vzniku letní teplotní stratifikace nebo k ní dochází jen na krátké období. U mnoha horských jezer se kvůli klimatickým změnám zkracuje počet dní, kdy jsou jezera zamrzlá, a během léta se začíná objevovat teplotní stratifikace nebo se prodlužuje počet dní, kdy jsou jezera teplotně stratifikována. Jezerní voda většinou obsahuje velmi málo živin, proto jsou tyto ekosystémy charakterizovány jako oligotrofní, případně ultraoligotrofní (Catalán et al., 2006). Potravní řetězec je jednoduchý (Catalán et al., 2006; Straškrabová et al., 1999) a ryby často chybí nebo se jedná o nepůvodní druhy (Catalán et al., 2006; Ventura et al., 2017).

### **3. Oteplování horských oblastí a horských jezer**

Na většině naší planety dochází ke klimatickým změnám, v mnoha oblastech se výrazně oteplilo a i nadále se otepluje. Podle IPCC<sup>1</sup> lidské aktivity zapříčinily od začátku 20. století oteplení o 0,8 °C až 1,3 °C a teplota se zvýší podle předpovědi minimálně o 0,5°C během následujících 20 až 30 let. Teplota od začátku 20. století do konce 21. století se zvýší minimálně o 1,5 °C až 2 °C. Problémem je zejména nerovnoměrné oteplení, některá místa jsou oteplením zasažena více a některá méně, někde se může i ochladit (IPCC, 2022).

Na výrazný nárůst teploty jsou náchylné zejména polární a horské oblasti (Dyurgerov, 2003; Nogués-Bravo et al., 2007; IPCC, 2019). Podle IPCC předpovědi o nárůstu emisí v atmosféře dochází celosvětově ke zvýšení průměrné teploty v horských oblastech až dvojnásobně oproti celosvětovému průměru (IPCC, 2019).

#### **Oteplování horských oblastí**

V mnoha horských oblastech můžeme pozorovat větší oteplení než v nížinách (Pepin et al., 2022; You et al., 2020). Nárůst průměrné roční teploty roste společně s nadmořskou výškou (tzv. elevation dependent warming). To platí ale jen v určitém rozmezí nadmořských výšek a existuje mnoho výjimek, proč tento jev nemusí nastat (Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015; Ohmura, 2012). Důležité je brát v potaz délku období záznamu teplot. Avšak je zřejmé, že postupně se otepluje v horských oblastech stále rychleji (Vuille & Bradley, 2000). Od roku 1961 až 2010 došlo celkově k nárůstu teploty vzduchu v horských oblastech o 1,53 °C (Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015).

Nárůst průměrné teploty s rostoucí nadmořskou výškou byl zaznamenán například v Kordillerách (Bradley et al., 2004) a k tomuto jevu bude i nadále v této oblasti docházet, ale jen během určitých měsíců (Minder et al., 2018). Na Tibetské náhorní plošině došlo také k nárůstu průměrné teploty s rostoucí nadmořskou výškou avšak jen do 5000 m n. m. a jen v určitém sledovaném období (Qin et al., 2009; Wei & Fang, 2013). V některých oblastech může být

---

<sup>1</sup>Integrovaná prevence a omezování znečištění (IPPC angl. Integrated Pollution Prevention and Control)

oteplení největší ve středních nadmořských výškách, například ve Skalnatých horách v Coloradu. Oteplilo se zde v průměru o 0,4 °C za každých 10 let, zejména v jarních a letních měsících (McGuire et al., 2012).

Důležitou roli hraje albedo sněhu a může být důvodem, proč oteplení nad hranicí sněžné čáry nebo během zimy, kdy je většina horských oblastí pokrytá sněhem, nemusí nastat. Zvýšená tvorba oblačnosti může mít v nížinách podobný efekt albeda jako sněhová pokrývka v horách (Giorgi et al., 1997; Liang et al., 2002). Sníh během tání mění albedo, tající sníh má menší albedo než zmrzlý sníh. Sníh má větší albedo než sníh s ledem, který má však větší albedo než samotný led. Efekt albeda je velmi silný, např. v jižních Skalnatých horách a na Tibetské plošině (Qu & Hall, 2014), což by mohlo souviset s velikostí území se sněhovou pokrývkou. Albedo se může velmi výrazně projevit i na jaře, kdy dochází k významným rozdílům teplot zasněženého a nezasněženého povrchu (Scherrer et al., 2013).

Někdy může docházet i k ochlazení, jedná se o mnohem složitější procesy než jen oteplení. Během letních dní je povrch v horách teplejší než vzduch a v noci je to naopak (Pepin & Losleben, 2002). Ne vždy se oteplení v různých horských oblastech projeví podobně během stejného ročního období. Na Tibetské plošině dochází k největšímu oteplení v zimě hlavně za období 1990 až 2010 v průměru o 0,318 °C za každých 10 let (Wei & Fang, 2013) a ve Skalnatých horách v Coloradu dochází k oteplení zejména v létě a až potom v zimě a na jaře (Ceppi et al., 2012; McGuire et al., 2012). Celosvětově však až na zmíněné výjimky dochází k největšímu oteplení horských oblastí především v zimě (Ohmura, 2012; Qixiang et al., 2018).

Některé oblasti, např. části Alp, Karpat či tropických And, mohou reagovat odlišně a nárůst průměrné roční teploty vzduchu se projeví výrazněji v nížinách a oblastech pod 800 m n. m. než v horách. Nejvíce se v těchto oblastech otepluje v létě a v zimě. Na podzim jsou pozorovány minimální změny teplot (Micu et al., 2021; Rottler et al., 2019; Tudoroiu et al., 2016; Vuille & Bradley, 2000). V některých horských oblastech nad 5000 m n. m. k nárůstu teploty zřejmě ani nedochází a v budoucnosti by nemuselo docházet (Gao et al., 2018; Qin et al., 2009).

Celkově lze tedy shrnout, že v mnoha horských oblastech se nárůst teploty projeví, ale ne vždy se oteplování zrychluje s rostoucí nadmořskou výškou. Avšak horské a polární oblasti zůstávají i nadále jedny z nejnáchylnějších ke klimatickým změnám. Existuje mnoho důvodů, proč se v některých horských oblastech nemusí projevit nárůst průměrné teploty s rostoucí

nadmořskou výškou. Mezi nejvýznamnější faktory patří albedo sněhu, zeměpisná šířka a nadmořská výška. Avšak ne vždy je k dispozici dostatek dat pro vyhodnocení daného jevu (Pepin et al., 2022).

### **Oteplování horských jezer**

S klimatickými změnami spojenými s oteplováním na většině míst planety roste i povrchová teplota většiny jezer na světě. Od roku 1985 až do roku 2009 se globálně zvýšila letní povrchová teplota jezer o 0,34 °C za každých 10 let (O'Reilly et al., 2015; Williamson et al., 2009). Výjimkou nejsou ani horská a polární jezera, kde s nárůstem teploty vzduchu v horských a polárních oblastech dochází k oteplení těchto jezer (Niedrist et al., 2018; Roberts et al., 2017) a i drobné toky v horách vykazují oteplení, zejména během letních měsíců (Beniston et al., 2018). S oteplením vzduchu o 2 °C až 4 °C se mohou horská jezera na Tibetské plošině oteplít o 1,29 °C až 2,64 °C, oteplení povrchové vrstvy jezer koreluje s oteplením vzduchu. Výrazné oteplení těchto jezer už nastalo na konci 90. let 20. století (You et al., 2019).

Teplota horských jezer nejenže vzrostla, ale podle předpovědí bude i nadále vzrůstat. V některých horských oblastech ve spojitosti s úbytkem sněhu vzroste teplota až o 6 °C a s oteplením vzduchu vzroste až o dalších 6 °C, díky čemuž se mohou některá jezera v extrémním případě oteplít až o 12 °C do konce 21. století. Náchylná k oteplení mohou být v některých oblastech hlavně jezera v nižších a středních nadmořských výškách (Thompson et al., 2005).

K oteplení dochází a bude docházet i u vysokohorských jezer ve Skalnatých horách. Podle předpovědi do roku 2080 naroste průměrná roční teplota hladiny některých jezer o 0,25 °C za každých 10 let a průměrná letní teplota hladiny jezer naroste o 0,47 °C také za každých 10 let (Roberts et al., 2017). K největšímu nárůstu dochází v letních měsících a zejména epilimnion se otepluje v dlouhodobém horizontu. Zpožďuje se i nástup ledové pokrývky (Niedrist et al., 2018). U většiny jezer platí, že se jezero může oteplít až o 77 % z celkového oteplení vzduchu a až o 36 % pro jezera s dlouho trvající sněhovou a ledovou pokrývkou. Hlavním činitelem v oteplení většiny jezer je tedy oteplení vzduchu, avšak délka zámrzů je pro oteplení jezer také důležitá

(Butcher et al., 2015; Schmid et al., 2014). S menší tloušťkou ledu bude také přibývat intenzita slunečního záření ve vodním sloupci (Butcher et al., 2015).

Ne všechna horská jezera jsou tedy ovlivněna oteplením vzduchu přímo. U některých horských jezer platí, že teplota jezerní vody je ovlivněna primárně mocností ledové a sněhové pokrývky a množstvím sněhu v povodí jezera. Horská jezera se mohou oteplovat primárně kvůli nedostatku sněhových srážek. U některých jezer se korelace letního oteplení vzduchu s letním oteplením vody může objevit jen během let charakterizovaných jako suché a průměrné letní oteplení vody jezer stoupne hlavně během suchých let o 0,4 °C za každých 10 let (Sadro et al., 2019), což odpovídá oteplení většiny světových jezer (O'Reilly et al., 2015; Williamson et al., 2009b). Za pozornost stojí fakt, že zejména během let, kdy je sněhu hodně, dochází k oteplení jezer mnohem pomaleji a oteplení může být mnohem menší, než během suchých let a o 50 dní v průměru později dojde k vrcholu nárůstu teploty. Suché roky mohou mít v některých případech měsíční oteplení o 1 °C vyšší, než roky s dostatkem sněhu (Sadro et al., 2019).

Avšak je i mnoho dalších faktorů ovlivňujících teplotu vodního sloupce jezer. Hlubší jezera jsou méně náchylná na oteplení dna. Jezera se sníženou průhledností vodního sloupce se budou oteplovat zejména na hladině. Jezera se sněhovou a ledovou pokrývkou přetrvávající i v letním období, budou méně náchylná na oteplení vody díky nízkému či nulovému průniku slunečních paprsků do vodního sloupce (Butcher et al., 2015).

#### **4. Teplotní režim a ledová pokrývka jezer**

Podle toho, v jaké zeměpisné šířce a nadmořské výšce se nacházejí, mají horská jezera odlišný teplotní režim. Velmi extrémními abiotickými podmínkami se vyznačují amiktická jezera, která jsou trvale zamrzlá, izolovaná od vlivu větru a míchání vodního sloupce je ve srovnání s jinými typy jezer velmi omezené. Monomiktická jezera se míchají jen jednou během roku, v dimiktických jezerech se vytváří letní a zimní stratifikace a polymiktická jezera se míchají několikrát za rok a většinou se jedná o mělká jezera (Lewis, 1983).

Horská jezera v různých nadmořských výškách mohou mít v období zámrazu během zimních měsíců stejnou povrchovou teplotu vody (blízkou 0 °C). Největší rozdíl v teplotě

vrchních vrstev vodního sloupce je v letních měsících, přičemž platí, že s rostoucí nadmořskou výškou klesá. S rostoucí nadmořskou výškou se naopak zvětšuje počet dní, kdy je na jezerech ledová pokrývka. Pro dimiktická jezera platí, že během letních měsíců klesá teplota ve vodním sloupci jezera s hloubkou. Pokud je jezero dostatečně hluboké, v určité hloubce se teplota ustálí na 4 °C a dále už neklesá. Opačný efekt je během zimních měsíců, u zamrzlých jezer stoupá teplota s hloubkou jezera, teplotní maximum je 4 °C pokud je jezero dostatečně hluboké (Šporka et al., 2006).

V současnosti dochází vlivem klimatických změn k významným změnám teplotního režimu jezer. U dimiktických jezer má na průběh letní teplotní stratifikace obecně vliv především teplota vzduchu, síla větru a počet dní, kdy je na jezeře led. U mělkých jezer častěji dochází ke sjednocení teploty ve všech vrstvách kvůli promíchání vodního sloupce vlivem větru. U hlubších jezer nastane konec stratifikace později než u těch mělkých. Nejsilnější vliv na začátek teplotní stratifikace má teplota vzduchu během chladných měsíců, následována intenzitou větru. Na ukončení teplotní stratifikace má nejsilnější vliv intenzita větru, který napomáhá k ochlazení vody a k rozmíchání vytvořených vrstev na jezerech. Jak se ukázalo pro jezera na severní polokouli, teplota během letních měsíců má na intenzitu a počet dní teplotní stratifikace jen malý vliv. Do konce tohoto století podle předpovědi v jezerech začne stratifikace o  $22.0 \pm 7.0$  dní dříve a skončí o  $11.3 \pm 4.7$  dní později. K největším změnám začalo docházet od roku 1980 (Woolway et al., 2021).

Tyto změny se samozřejmě týkají i horských oblastí. Teplotní stratifikace se prodlužuje s oteplením vzduchu, snížením intenzity větru a zkrácením období zámrazu jezer (Labaj et al., 2018; Michelutti et al., 2016; O'Reilly et al., 2015). Důsledkem postupného oteplování horských oblastí budou i teplejší zimy, což bude mít za následek prodloužení období teplotní stratifikace jezer. Na charakteru a délce teplotní stratifikace se projevuje i nadmořská výška, hloubka jezer a zvýšení počtu dní. Jezera ve stejné oblasti, ale jiné nadmořské výšce, mají různě dlouhá období teplotní stratifikace (Michelutti et al., 2016). U některých horských jezer může do konce 21. století dojít k prodloužení období letní teplotní stratifikace až o 50 dní a zkrácení zimní teplotní stratifikace. Největší nárůst počtu dní letní teplotní stratifikace bude u jezer s nejvyšší nadmořskou výškou a nejmenší nárůst u jezer s nejnižší nadmořskou výškou (RåmanVinnå et al., 2021).

V některých horských jezerech může teplotní stratifikaci významně ovlivňovat tavná voda z ledovce (viz kap. 4.3). V těchto jezerech nemusí docházet ke stratifikaci, na rozdíl od jezer ve stejné nadmořské výšce nacházejících se ve stejném pohoří, které nebyly v kontaktu s vodou z ledovce. Voda z tajícího ledovce ochlazuje jezera a zabraňuje teplotní stratifikaci (Tiberti et al., 2020).

Specifickým případem jsou tropická horská jezera v Andách, která byla dříve definována jako polymiktická. V důsledku klimatických změn se zde objevila teplotní stratifikace v letních měsících, kdy je teplota vzduchu nejvyšší a intenzita větru nejnižší. To má vliv na celý ekosystém horských tropických jezer (Labaj et al., 2018; Michelutti et al., 2016).

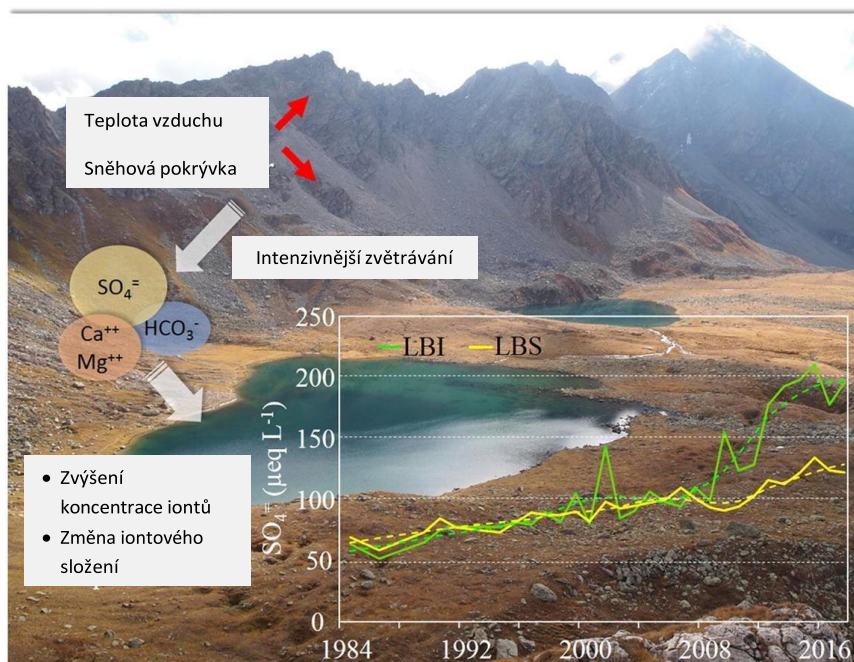
Jak již bylo zmíněno, v důsledku oteplování dochází také k výrazným změnám ledové pokrývky jezer. Dlouhotrvající zámrz je jednou z hlavních charakteristik horských jezer, která zásadním způsobem ovlivňuje fungování těchto ekosystémů (Catalán et al., 2006). V závislosti na nadmořské výšce a dalších faktorech se délka zámrz může významně lišit i na relativně malém území – např. v Tatrách se pohybovala od 136 do 232 dní (Šporka et al., 2006). Pro posouzení trendů v trvání ledové pokrývky vlivem klimatických změn jsou nutná dlouhodobá data, která však vzhledem k odlehlosti lokalit často nejsou k dispozici (Rogora et al., 2020). Studie zaměřená na posouzení změn parametrů sedmi vysokohorských jezer (> 3000 m n. m.) ve Skalnatých horách v období 1981–2014 ukázala, že led mizí o sedm dní dříve (Preston et al., 2016). Změny v níže položených jezerech mohou být podstatně výraznější. Modelování citlivosti ledové pokrývky jezer v rakouských Alpách ve vztahu na různé klimatické scénáře naznačilo, že nejcitlivější oblast je rozmezí 1500–2000 m n. m., kde nárůst teploty vzduchu o 1 °C může znamenat zkrácení zámrz až o 30 dní (Thompson et al., 2018).

## 5. Chemismus jezerní vody

Současné klimatické změny způsobují také významné změny chemismu vody horských jezer, která mají vliv na celý ekosystém. Jedním z důležitých faktorů, které v tom hrají roli, je zkrácení období zámru. Jezera se tak stávají přístupná prachovým částicím z atmosférické depozice více dní během roku než dříve. Zvýšený přísun těchto částic do jezer mění chemismus vody a ovlivňuje tak jezerní biotu (Mast et al., 2011; Rogora et al., 2003). Dochází ke zvýšení konduktivity a koncentrace některých iontů (Rogora et al., 2020). Atmosférická depozice pocházející ze severní Afriky se měnit kvůli klimatickým změnám, protože je závislá na srážkách a atmosférické cirkulaci. Odhaduje se, že v posledních dekadách se množství prachových částic pocházejících ze Sahary exponenciálně zvýšilo. To může představovat problém pro evropské ekosystémy závislé na tomto jevu (Moulin et al., 1997). Vliv depozice prachu na chemismus i biotu vysokohorských jezer je asi nejlépe zdokumentován pro pohoří Sierra Nevada v jižním Španělsku. Pro jezera v této oblasti je prach důležitým zdrojem prvků, jako je fosfor a vápník, a ovlivňuje tak mimo jiné i produktivitu těchto ekosystémů. Předpovídané budoucí změny v přísunu prachových částic tak budou mít nepochybně další dopady na podmínky a fungování tammích jezer (Jiménez et al., 2017; Morales-Baquero, Pulido-Villena et al., 2006).

U některých horských jezer hraje ve změnách chemismu vody větší roli zvětrávání hornin v povodí spíše než atmosférická depozice. Obecně se jedná o jezera, jejichž povodí jsou z větší části tvořena dobře rozpustnými horninami, jako je např. vápenec. Zvětrávání je vlivem oteplení velké části planety intenzivnější než dříve a prvky obsažené v horninách v povodí se do jezer dostávají ve větším množství. Kromě vlivu vyšších teplot jako takových hraje důležitou roli delší doba expozice hornin kvůli zkrácení období se sněhovou pokrývkou (Mast et al., 2011; Rogora et al., 2003). Jelikož je v okolí horských jezer nad hranicí lesa řídký vegetační porost, prvky nejsou v takové míře zachytávány touto vegetací a dostanou se do horských jezer ve větší míře než v případě jezer s povodím s hustší vegetací, případně v lesním pásmu (Kopáček et al., 2019).

V těchto procesech je samozřejmě klíčové také konkrétní chemické složení hornin a také jejich odolnost vůči zvětrávání. Například zvětráváním granodioritu se do vodních ekosystémů dostává větší množství vápníku, zvětráváním pyritu síra a u apatitu je to fosfor (Kopáček et al., 2019). S přibývajícím intenzitou zvětrávání hornin obsahujících síru, se tento prvek dostává do horských jezer nadále i přes snížení antropogenního oxidu siřičitého v atmosféře, který byl zdrojem dříve a stal se hlavní příčinou acidifikace horských jezer nacházejících se na citlivém geologickém podloží (Kopáček et al., 2019; Mast et al., 2011; Mitchell et al., 2013). V některých jezerech tedy dochází ke zvyšování koncentrace síranů, jak bylo prokázáno např. pro jezera v centrálních a východních Alpách (Rogora et al., 2003; Sommaruga-Wögrath et al., 1997). Díky dlouhodobému výzkumu tavných jezer pochází řada důkazů o celkových změnách v chemismu vody v důsledku intenzivnějšího zvětrávání z oblasti Alp. Například studie srovnávající chemismus 35 jezer v údolích Ossola a Sesia v centrálních Alpách prokázala zvýšení koncentrace rozpuštěných látek v jezerech s bazickými, dobře rozpustnými horninami v povodí (vápenec, dolomit) období od 80. let 20. století do 2000-2001, zvýšila se konduktivita, koncentrace bazických iontů a alkalita (Rogora et al., 2003). Podobné trendy byly potvrzeny i ve dlouhodobější studii jezer v téže oblasti, která zahrnovala data až do roku 2017 (Obr. 1). Pozorované změny byly srovnatelné nebo dokonce větší než změny způsobené kyselou



Obr. 1. Změny chemického složení vody v jezerech Boden Inferiore (LBI) a Boden Superiore (LBS) v západních italských Alpách. LBI má několik drobných přítoků, zatímco LBS žádné viditelné nemá. Vlivem klimatických změn dochází k intenzivnějšímu zvětrávání hornin, což v období 1984–2017 vedlo k postupnému zvýšení koncentrace síranů a celkovým změnám iontového složení vody (upraveno podle Rogora et al., 2020).

atmosférickou depozicí v 80. a 90. letech 20. století. To platí zejména pro jezera s vysokou pufrací kapacitou, u kterých lze předpokládat, že chemické složení vody bude i v budoucnu řízeno klimatickými změnami, a to jak z dlouhodobého hlediska, tak v rámci sezónních změn. Rozdíl v chemickém složení jezer může být ovlivněn i množstvím přítoků (Rogora et al., 2020). Zvyšování koncentrace rozpuštěných látek ve vysokohorských jezerech bylo prokázáno i mimo Evropu, např. v Coloradu nebo v Himalájích (Preston et al., 2016; Salerno et al., 2016) viz též kapitola 5.3).

Nápadnou změnou chemismu v jezerech na severní polokouli je také nárůst koncentrace rozpuštěného organického uhlíku (DOC). Důvodem je globální klimatická změna společně se změnami v obhospodařování půdy a vysoká depozice dusíku. Zvýšená koncentrace DOC způsobuje hnědnutí vody, sníží dostupnost světla ve vodním sloupci a ovlivní chemické vlastnosti vody (Sawicka et al., 2016). Tyto změny jsou zdokumentovány především v boreálních jezerech v severní Evropě a severovýchodní Americe a ovlivňují komplexně biotu těchto jezer. Jezera s dříve sníženým pH vlivem antropogenních emisí jsou po navrácení pH do optima ovlivněna nárůstem DOC více než jezera, která nebyla zasažena antropogenní acidifikací. Otázkou zůstává, zda obsah DOC se v některých jezerech vrací do optima, v kterém byly před změnou pH, nebo jezera přecházejí do nového ekologického stavu (Meyer-Jacob et al., 2019).

Pokud jde o horská jezera, zvyšování koncentrace DOC se vzhledem k charakteru vegetace v povodí týká především jezer v montánním stupni. Například v tatranských jezerech nad hranicí lesa během zotavování z acidifikace období 1994–2004 koncentrace DOC stagnovala a zvýšila se pouze v jezerech se zalesněnými povodími v důsledku vyššího exportu z půd v povodí (Kopáček et al., 2006). Vzestup koncentrace DOC byl zaznamenán také v šumavských jezerech, jejichž voda byla přirozeně hnědá před nástupem acidifikace (Vrba et al., 2000).

Lze shrnout, že současné změny v chemismu vody horských jezer jsou komplexní a kromě vlivu složení hornin v povodí, zvýšení teploty vzduchu a s tím spojené zvýšené intenzity zvětrávání, zkrácení období sněhové a ledové pokrývky a změn v atmosférické depozici zahrnují i významný vliv aktivity organismů jak v povodí, tak v jezerech samotných (Rofner et al., 2017; Rogora et al., 2003).

## 6. Vliv tajících ledovců

Současné klimatické změny v horských oblastech akcelerují tání ledovců. Ve většině oblastí ledovců ubývá, což může do jisté míry ohrozit ekosystémy horských jezer na mnoha úrovních (IPPC, 2019). Na některých místech světa dochází až ke 2 % úbytku ledovců ročně a celosvětově k 1 % úbytku. Od roku 1980 zmizelo přes 30 % objemu ledovců celosvětově (Haeberli & Weingartner, 2020). Avšak tempo ubývání ledovců se zrychluje, k největšímu úbytku dochází v současnosti (Zemp et al., 2015) a ledovce tají v čím dál vyšších nadmořských výškách (Wang et al., 2013). Rozloha horských ledovců je ve srovnání s polárními mnohem menší, avšak jejich tání je hrozbou pro zdroje pitné vody v mnoha zemích a může mít celkově významný vliv i na koloběh vody, tj. včetně světového oceánu. V některých oblastech navíc častěji prší než dříve na úkor sněžení, což ještě urychluje proces tání ledovců (Rasul et al., 2011).

Voda z tajících ledovců ovlivňuje ekosystémy horských jezer a má dopad i na ekosystémy horských pramenů a toků. Kromě již zmíněného zvětšování jezer, případně vzniku nových jezer, mění teplotu, průhlednost, chemické složení vody včetně obsahu živin či polutantů a zprostředkovaně i primární producenty a tedy i celé potravní řetězce. Záleží ovšem na množství přitékající vody z ledovců a velikosti tajícího ledovce. Porozumění tomu, jak ledovce ovlivňují ekosystémy horských jezer je důležité pro odhad, co se s nimi stane, až ledovce v těchto oblastech roztají nebo teprve začnou tát ve větší míře než doposud. Jezera s přítokem tavné ledovcové vody existovala i před nástupem současných klimatických změn, avšak nyní je ten proces akcelerovaný a spolu s přímým vlivem růstu teplot vzduchu významně přispívá k proměně horských ekosystémů (Slemmons et al., 2013).

### Vznik nových jezer a zvětšování jezer

V mnoha horských oblastech, ve kterých se v současnosti nacházejí ledovce, a je zde permafrost, se očekává vznik nových jezer. Vlivem tání ledovců vznikají nová jezera a budou se zvětšovat společně s již existujícími jezery (IPPC, 2019; Shugar et al., 2020). Nová ledovcová jezera se již objevila např. ve střední části Tibetské plošiny, kde se od roku 1977 do roku 2010 zmenšila plocha ledovců o 22 %, a od roku 1972 do roku 2009 se v této oblasti objevilo 150

nových jezer. Za posledních 40 let zde stoupla teplota i množství srážek. Silně koreluje vztah mezi ubývajícím ledovcem a vznikem nových jezer v dané oblasti. Ledovce tají nejvíce v rozmezí od 5600 m n. m. do 5800 m n. m. a nejvíce nových jezer vzniklo v rozmezí od 5500 m n. m. do 5700 m n. m. (Lei et al., 2014). Nová jezera se objevují v čím dál vyšších nadmořských výškách, kdy rozdíl mezi lety 1990 a 2018 může být až 200 metrů (Wang et al., 2020). Také ve střední Asii v pohoří Pamír dochází ke vzniku nových jezer a zvětšení jezer stávajících současně s úbytkem ledovců v okolí jezer (Mergili et al., 2013).

V Evropě budou vznikat nová ledovcová jezera v Alpách (Gharehchahi et al., 2020; Viani et al., 2020). Na základě zmapovaného podloží a předpokladu tání ledovce se v jihozápadních švýcarských Alpách v budoucnu vytvoří minimálně 100 nových jezer, avšak vytipované lokality vzniku nových jezer představují jen 1,8 % až 2,1 % z objemu ledovce v dané oblasti (Gharehchahi et al., 2020). V západních italských Alpách je odhad objemu vody v budoucích jezerech ještě menší, kdy předpokládaná nově vzniklá jezera by měla představovat jen 0,8 % objemu vody současné masy ledovce v dané oblasti. Předpokládá se, že by se mělo objevit až 46 nových jezer (Viani et al., 2020). Některá jezera mohou rychle vznikat a zanikat. Ve švýcarských Alpách během dubna 2022 díky intenzivním dešťovým srážkám vzniklo jezero. Bylo udržováno tajícím sněhem, po měsíci však zmizelo, což není ojedinělý případ v této oblasti (Pandey & Kropáček, 2023).

Nová jezera budou vznikat i v Andách. Podle rychlosti odtávání ledovce v období 2003 až 2010 bylo spočítáno, že v budoucnu by se zde mohlo objevit více než 200 nových jezer a z toho polovina v jižních peruánských Andách (Colonia et al., 2017). Vznik nových jezer v kontaktu s ledovcem, zejména u termokrasových jezer, může spustit pozitivní zpětnou vazbu. Voda v jezerech má větší konduktivitu a menší albedo než sníh a ledovec a její teplota je více než 0 °C, což ještě urychlí tání a podpoří zvětšení a vznik dalších jezer (Carrivick et al., 2022; Käab & Haeberli, 2001). Nově vzniklá horská jezera zachytí sediment, který by se jinak dostal do níže položených ekosystémů. Zároveň se vznikem nových jezer se zvýší tepelná kapacita, což spustí pozitivní zpětnou vazbu v dané oblasti (Schomacker, 2010).

Nově vznikající jezera mohou přinést horským oblastem nové možnosti, mohou sloužit jako zdroj pitné vody a nahradit tak stávající ledovce nebo sloužit jako hydroelektrárny, avšak

mohou být v podobě záplav i hrozbou pro města a vesnice, které se nacházejí níže v údolích. Několik případů protržení nových horských jezer již bylo zaznamenáno (Haeberli et al., 2016).

Kromě vzniku nových jezer se kvůli přibývajícím dešťovým srážkám a tajícím ledovcům zvětšují i ta stávající. Celosvětově se mezi lety 1990 a 2018 zvětšila ledovcová jezera svůj objem o 48 %. Mnoho těchto jezer je v arktických a horských oblastech. Až 95 % ledovcových jezer se zvětšilo skoro o 10 %. V Andách se jezera mezi lety 1990 a 1999 zvětšila o 35 % a jezera se objevují ve vyšších nadmořských výškách než dříve (Shugar et al., 2020).

Ve střední Asii se mezi lety 2008 a 2016 zvětšila horská jezera o 1,38 % ročně, nejvíce v Himalájích. Hlavním důvodem jsou tající ledovce v těchto oblastech. Týkalo se to 17 000 horských jezer. Jezera se tedy zvětšují a zvyšuje se jejich počet kvůli klimatickým změnám. Dále se očekává, že ledovcová jezera v některých horských oblastech se i dále zvětší. V některých případech až o 120 až 210 % do roku 2100, avšak odhadovaná velikost změn záleží na konkrétní oblasti, ve které se nacházejí (Furian et al., 2022).

Trendy ve velikost jezer se mohou během let měnit. Jezera na Tibetské plošině se v dřívějším období zmenšovala, nebo jejich velikost zůstala stejná. Od roku 2000 se jezera zvětšují, avšak ne vždy víme přesný důvod. Zvětšení jezer koreluje s dešťovými srážkami a jezera poblíž tajících ledovců zaznamenala větší nárůst velikosti než jezera, která nebyla poblíž tajících ledovců (Song et al., 2014). Pokud srovnáme horská jezera s přitékající vodou z ledovce a jezera bez kontaktu s vodou z ledovce, tak obě skupiny zaznamenaly nárůst objemu a zvětšení plochy, ale jezera s vodou z ledovce mají větší a stabilnější nárůst. Tavná voda z ledovců může tvořit někdy až polovinu nárůstu objemu jezer (Song & Sheng, 2016).

### **Teplotní režim a průhlednost vody**

Tavná ledovcová voda ovlivňuje teplotu vody horských jezer a potoků, což nutně způsobí teplotní změny po odtání horských ledovců. Během letních měsíců, kdy ledovce tají nejvíce a teplota horských jezer je nejvyšší, tavná ledovcová voda udržuje jezera v teplotním optimu (Saros et al., 2010; Slemmons et al., 2013; Warner et al., 2017). Teplota jezer s přitékající vodou z ledovce může být až o 3 °C nižší ve srovnání s jezery, kde tento zdroj vody chybí. Přítok chladné ledovcové vody může zabraňovat teplotní stratifikaci nejen v horských jezerech (Peter &

Sommaruga, 2017; Tiberti et al., 2020) ale i v těch subartických (Edmundson & Mazumder, 2002). Teplota se liší i mezi horskými toky, do kterých přitéká voda z ledovce a sněhu nebo jen sněhu, přičemž chladnější budou vždy toky, do kterých teče voda z ledovců (Edmundson & Mazumder, 2002; Warner et al., 2017).

Tání ledovců může ovlivnit vzhled a fungování horských jezer skrze zákal způsobený jemnozrnnými částicemi hornin, které se do jezera dostanou s přitékající vodou (Saros et al., 2010). Zákal se může u některých jezer zvětšovat a až zdvojnásobit v létě, kdy je tání ledovců největší a do jezer přitéká velké množství tavné vody spolu se sedimenty způsobujícími zákal. Zákal jezer se zvyšuje i při silném větru, který způsobí intenzivní míchání celého vodního sloupce. Průhlednost vody může klesat i u zvětšujících se jezer, kvůli přítoku velkého množství tavné vody se sedimenty, příkladem je např. Tibetská plošina (Mi et al., 2019).

### **Dusík a další prvky**

Dusík z atmosférického znečištění se od průmyslové revoluce naakumuloval v ledovcích, a když nyní ledovce tají, mohou uvolnit velké množství tohoto prvku do horských jezer a toků. Primární produkce některých horských jezer je limitována dusíkem a tající ledovce tedy mohou tyto ekosystémy výrazně změnit, protože jsou jeho významným zdrojem. Voda z tajících ledovců obsahuje mnohem větší množství dostupného dusíku, než jezerní voda, což může způsobit v oligotrofních nebo ultraoligotrofních jezerech mnoho ekosystémových změn a přinést do nich mnohem větší množství dusíku než voda z tajícího sněhu (Saros et al., 2010; Warner et al., 2017). Dusík v ledovcích je hlavně ve formě dusičnanů ( $\text{NO}_3^-$ ), což je jeden z prvních iontů, který se při tání z ledovce uvolňuje (Brimblecombe et al., 1987). V důsledku toho je koncentrace dusičnanů mnohem vyšší v jezerech s přitékající ledovcovou vodou. Toto platí i za podmínky, že pouze malá část povodí obsahuje ledovec, jak bylo pozorováno ve Skalnatých horách (Slemmons & Saros, 2012; Warner et al., 2017). Zvýšená koncentrace dusičnanů byla pozorovaná i v horských tocích s přitékající vodou z ledovce.

V případě, že je dusík limitující prvek, může jeho zvýšené množství pozitivně ovlivnit produktivitu. Někdy však může být v jezerech s vyšší koncentrací dusíku, tedy v jezerech s tavnou ledovcovou vodou, biomasa řas a sinic nízká. V jezerech s přitékající tavnou ledovcovou

vodou je pravděpodobně limitující prvek fosfor a v jezerech bez tavné ledovcové vody je to většinou fosfor a dusík, protože dusík není dopraven tavnou ledovcovou vodou do horských jezer, čímž se stává společně s fosforem limitujícím prvkem (Saros et al., 2010; Warner et al., 2017).

Avšak citlivost ekosystému na přísun dusíku se může výrazně geograficky lišit a záleží na mnoha faktorech a konkrétních lokalitách. Ve srovnání s evropskými jezery jsou severoamerická jezera mnohem citlivější (Burpee et al., 2022). Pro evropská jezera je typická spíše limitace fosforem (Elser et al., 2009; Kopáček et al., 2005). Severoamerická jezera jsou limitována převážně dusíkem a řada studií týkajících se ovlivnění ekosystémů horských jezer tajícím ledovcem uvolňujícím dusík pochází primárně právě ze severní Ameriky (Burpee et al., 2022).

Pokud jde o chemické složení jezerní vody, ne vždy musí být množství dusíku ve vodě jediný rozdíl mezi jezery s tavnou ledovcovou vodou a bez ní. Jezera se mohou lišit i koncentrací fosforu a DOC. Nedávné studie ukázaly, že horské ledovce jsou mnohem významnějším zdrojem DOC, než jsme se domnívali a měly být tedy brány v potaz v kontextu globálního cyklu uhlíku (Hemingway et al., 2019; Li et al., 2018). V některých horských oblastech se však oba typy jezer mohou lišit jen množstvím dusíku (Tiberti et al., 2020; Warner et al., 2017) a koncentrace fosforu a pH jezerní vody mohou být podobné (Slemmons et al., 2017; Tiberti et al., 2019).

### **Mikroplasty a další polutanty**

V horských jezerech se nacházejí i mikroplasty a jejich koncentrace může být podobná nebo dokonce vyšší než v jezerech v nížinách (Liang et al., 2022; Malygina et al., 2021). Zdrojem mikroplastů pro horská jezera mohou být tající ledovce, které je zachytávají z atmosférické depozice. Mikroplasty se mohou v ledovcích naakumulovat a při postupném tání se stát jejich důležitým zdrojem (Liang et al., 2022; Liu et al., 2021; Pastorino et al., 2021).

V ledovcích se akumuluje i řada jiných antropogenních polutantů z atmosféry a s přibývajícím intenzitou tání mohou podobně jako v případě mikroplastů sloužit jako zdroj pro horská jezera (Bogdal et al., 2009; Machate et al., 2023).

V tavné ledovcové vodě v horských oblastech se nalézají obrovské množství dalších perzistentních organických látek (POPs), což může být problém pro jezera do kterých přitéká

výhradně voda z ledovců. Příkladem může být jedno ze subalpínských jezer v kanadské Albertě, kde bylo zjištěno, že z ledovce pochází 50 až 98 % chlorovaných uhlovodíků, které se dostávají do jezerní vody. S pokračující klimatickou změnou je tedy třeba počítat s tím, že se význam ledovců jako zdroje znečištění horských vod bude zvyšovat (Blais et al., 2001; Machate et al., 2023).

V horských jezerech byl nalezen i dichlordifenyltrichlorethan (DDT). DDT byl detekován v sedimentu těchto jezer a tělech organismů, a to i v oblastech, kde je používání DDT už dlouho zakázáno. Zdrojem jsou opět tající ledovce, do kterých se tato látka dostala atmosférickou depozicí v době, kdy se hojně používala, a následně se dostává do jezer s tavnou ledovcovou vodou (Bettinetti et al., 2008; Schmid et al., 2011).

Nízké teploty vody v horských jezerech brání účinné biodegradaci výše zmíněných škodlivých látek. Avšak většina horských jezer je oligotrofních a průhledná voda v kombinaci s vysokými intenzitami UV záření v horských oblastech může napomoci fotodegradaci některých těchto látek (Machate et al., 2023).

## **7. Biota horských jezer**

V horských jezerech dochází vlivem klimatických změn ke změnám druhového složení některých skupin organismů (Labaj et al., 2016; Nevalainen et al., 2014; Rühland et al., 2008; Weckström et al., 2016). Zvýšení teploty a s ním spojené komplexní změny abiotických podmínek mají vliv na potravní řetězce a interakce mezi jednotlivými druhy, jejich životní cykly a fenologii a v neposlední řadě také na produktivitu těchto ekosystémů (Durán-Romero et al., 2020; González-Olalla et al., 2018). Klimatické změny mohou mít někdy i větší vliv na biotu jezer než introdukce ryb, zejména na zooplankton (Loewen et al., 2019). Potvrzením o probíhajících ekosystémových změnách v horských jezerech způsobených globální klimatickou změnou, může být porovnání horských jezer s arktickými a temperátními jezery. U všech těchto jezer dochází k prodloužení letní teplotní stratifikace a postupnému oteplení se zkrácením počtu dní zámrazu jezer a dále k obměně druhů (Rühland et al., 2008).

### **Vliv tajících ledovců na druhové složení a diverzitu**

Tající ledovce mají nepřímý vliv na druhovou diverzitu v jezerech prostřednictvím změn teploty vody, přísunu živin a průhlednosti. Ovlivněna jsou bakteriální společenstva, jejichž druhové složení a bohatost se sezónně liší. Pro bakteriální druhy je důležitá zejména teplota, konduktivita a chemické složení jezerní vody. Nejdůležitějším faktorem určujícím diverzitu bakterií může být konduktivita, kterou tavná ledovcová voda přitékající do jezer snižuje. To bylo prokázáno např. v tibetském jezeře Ranwu, kde byla bakteriální alfa diverzita silně negativně korelovaná s konduktivitou a nejvyšší byla v letním období, kdy je tání ledovců nejintenzivnější (Liu et al., 2019). Studie srovnávající jezera v rakouských Alpách s gradientem turbidity také prokázala pozitivní vztah mezi mírou ovlivnění ledovcem a taxonomickou diverzitou bakteriálních společenstev, v případě metabolické diverzity byl však vztah opačný. Někdy může tavná ledovcová voda do níže položených jezer přinést nové druhy například ze skupin Alphaproteobacteria a Betaproteobacteria (Peter & Sommaruga, 2016).

I rozsivky (Bacillariophyceae) reagují na přítok tavné ledovcové vody. Jejich druhová bohatost může být menší v jezerech s tavnou vodou a to v některých případech až o polovinu

(Saros et al., 2010; Slemmons et al., 2017; Slemmons & Saros, 2012). Jezera bez tavné vody mohou mít větší druhovou diverzitu nejen rozsivek, ale i jiných skupin, například zlativek (Chrysophyceae) a zelených řas (Chlorophyta) (Tiberti et al., 2019; Warner et al., 2017).

Pokud jde o heterotrofní organismy, jejich biomasa je nižší v jezerech s tavnou ledovcovou vodou než v jezerech bez tavné vody. Potravní řetězec zde může být zjednodušený a mohou chybět vrcholoví predátoři (Peter & Sommaruga, 2016; Tiberti et al., 2019).

Tavná ledovcová voda má vliv také na distribuci planktonních organismů v jezerech, protože snižuje průhlednost vodního sloupce. V období, kdy jezero není zakalené tavnou vodou, může UV záření a fotosynteticky aktivní záření proniknout hlouběji než v období zálaku, což způsobí přesun organismů do větší hloubky. Ve velkých jezerech, jako je např. Mascaridi v argentinských Andách se může vytvářet i výrazný horizontální gradient turbidity. Jak bylo zjištěno, některým organismům, jako zlativce *Chrysochromulina parva*, pikosiniciím a klanonožcům se dařilo spíše na odběrových místech s vysokou průhledností a při vyšším zálaku vody mohou vymizet. Zálak vody naopak napomáhá organismům citlivým na UV záření, zejména některým zástupcům zooplanktonu. Po odtání ledovců mohou tyto organismy z horských jezer úplně vymizet. Současně však vznikají nová jezera v kontaktu s ledovcem, která mohou sloužit alespoň jako dočasné refugium pro druhy preferující vysoký zálak (Hylander et al., 2011).

### **Vliv oteplení jezer na druhové složení a diverzitu**

Plankton v horských jezerech prochází změnami také vlivem oteplení vody v jezerech bez kontaktu s ledovcem. V tomto ohledu máme k dispozici nejvíce dat o fytoplanktonu, která ukazují na to, že začínají převládat druhy preferující teplejší prostředí nebo indukující klimatickou změnu (Michelutti et al., 2016; Rühland et al., 2015). Jedná se zejména o rozsivky z rodu *Cyclotella* (více druhů, např. *C. stelligeroides* a *C. aff. gordonensis*), které se začínají objevovat v horských jezerech nově nebo roste jejich biomasa na úkor jiných druhů (Bayer et al., 2016; Karst-Riddoch et al., 2005; Saros & Anderson, 2015; Weckström et al., 2016). Tyto malé centrické rozsivky reagují na změnu teplotní stratifikace jezer, dostupnosti živin a prodloužení vegetačního období nejen v horských jezerech ale i v arktických, díky čemuž jsou považovány za

indikátor klimatických změn sladkovodních ekosystémů (Saros & Anderson, 2015). Další druh rozsivky, *Asterionella formosa*, se začíná hojně objevovat v oteplujících se horských jezerech s nárůstem dostupnosti živin, ale i v těch, kde se dostupnost živin nezměnila nebo zmenšila (Rühland et al., 2015; Weckström et al., 2016). Např. studie jezer v Nízkých Tatrách prokázala, že s přibývajícím počtem dní letní teplotní stratifikace v pomalu mizely vláknité druhy rozsivek z rodu *Aulacoseira* preferující hluboké míchání vody a bentické penátní druhy z rodu *Staurosira*, které preferují dlouhé období s ledovou pokrývkou. Současně se objevily se menší druhy jako například z již zmíněného rodu *Cyclotella*, pro které jsou tyto podmínky příhodnější, než pro větší druhy (Weckström et al., 2016). Délka teplotní stratifikace je obecně velmi důležitý faktor, který do značné míry určuje strukturu, funkci a produktivitu celého ekosystému horských jezer (O'Reilly et al., 2003).

Mělká jezera jsou náchylnější na změny teplot, což může být pro fytoplankton horských jezer problém, protože většina těchto jezer je relativně mělká a největšímu nárůstu teploty dochází v epilimnionu. Zvětšuje se také množství fytoplanktonu v sedimentu kvůli prodloužení vegetačního období horských jezer (Kuefner et al., 2020; Szabó et al., 2020). Na základě analýzy sedimentu bylo zjištěno, že v jezerech ve Skalnatých horách dochází od roku 1950 k nárůstu planktonních rozsivek. Sice dochází ke změně druhů rozsivek z bentických na planktonní druhy, ale biomasa rozsivek celkově ubývá. Dochází k nárůstu zelených řas právě na úkor rozsivek, a to až o 200–300 %a celková biomasa řas se zdvojnásobila. To může být způsobeno i tím, že zelené řasy mohou stínit bentickým rozsivkám a být silnějšími v kompetici o živiny (Oleksy et al., 2020).

I perloočky (Cladocera) jsou ovlivněny klimatickými změnami v horských jezerech a některé druhy mohou úplně vymizet vlivem oteplení vody (Jiménez et al., 2018; Kamenik et al., 2007; Labaj et al., 2016). V horských tropických jezerech a horských temperátních jezerech reagují perloočky na klimatické změny odlišně a i obměna druhů se liší nebo může jít opačným směrem. Týká se to zejména druhů z rodů *Bosmina* a *Daphnia*. V zkoumaných temperátních jezerech došlo ke změně míchání vodního sloupce a nárůstu množství biomasy řas, které slouží perloočkám jako hlavní zdroj potravy (Labaj, 2016; Nevalainen et al. 2014). Změny ve složení druhů perlooček jsou i patrné v arktických jezerech (Thienpont et al., 2015).

Dalším důkazem o probíhajících klimatických změnách v horských jezerech jsou pakomárovití (Chironomidae). Objevují se druhy, které na těchto lokalitách dříve vyskytovaly jen zřídka, nebo v menším množství například druh *Tanytarsus lugens* (Szabó et al., 2020). Začínají převládat teplomilné druhy a druhy z nižších nadmořských výšek, pakomárovití jsou teplotou ovlivněni i nepřímo skrze dostupnost živin a produktivitu (Eggermont et al., 2010). Avšak spolehlivější skupinou sloužící jako indikátor klimatické změny jsou rozsivky, kvůli velkému množství dat a detailnímu záznamu rozsivek v sedimentu (Weckström et al., 2016). Bentické druhy pakomárovitých kvůli stabilnějšímu teplotnímu prostředí (minimálnímu oteplení hypolimnionu v porovnání s epilimnionem) prochází obměnou spíše kvůli změnám v dostupnosti živin a chemismu vody než změnou teploty vody (Čiamporová-Zaťovičová et al., 2010).

Oteplení horských oblastí samozřejmě ovlivňuje i ryby jako nejvyšší článek potravního řetězce. Na základě studie provedené ve Skalnatých horách bylo zjištěno, že při oteplení vzduchu o 2 až 5 °C se zvýšily energetické nároky o 13,8 až 29,9 % u pstruha žlutohrdlého (*Oncorhynchus clarkii*) a o 23,8 až 37,4 % u sivena amerického (*Salvelinus fontinalis*). Potravní nároky se mohou téměř zdvojnásobit u obou druhů ryb, přičemž větší vliv než vzestup teploty jako takový má dřívější tání sněhu, což znamená prodloužení období růstu (Christianson & Johnson, 2020).

### **Vliv na produktivitu a potravní síť**

Nárůst produktivity horských jezer v důsledku klimatických změn má komplexní příčiny. Mezi nejdůležitějšími faktory patří zvýšení teploty vody, změna teplotního režimu a prodloužení vegetačního období v důsledku kratšího období s ledovou pokrývkou (Arvola et al., 2009; Moser et al., 2019). Zásadní je také zvýšení dostupnosti živin, ať už v důsledku intenzivnějšího zvětrávání nebo přítoku ledovcové vody bohaté na dusík (viz část 6.3). V jezerech ve Skalnatých horách byla koncentrace chlorofylu v jezerech s tavnou ledovcovou vodou až 2x vyšší, ale snižovala se směrem od nejvýše položených jezer po ty nejnižše položená. To platilo také pro jezera bez přítoku ledovcové vody (Warner et al., 2017). Primární produkce v epilimnionu a metalimnionu byla vyšší v jezerech s tavnou ledovcovou vodou, což může být způsobeno menší

průhledností těchto jezer, hypolimnion u obou typů jezer nevykazoval žádný zásadní rozdíl (Slemmons & Saros, 2012).

Nástup teplotní stratifikace spolu s oteplením a snížením intenzity větru může být naopak příčinou poklesu primární produkce v jezerech ve středních nadmořských výškách, protože dojde k vyčerpání živin ve vrchních vrstvách vodního sloupce. To ovlivní celý potravní řetězec jezer (O'Reilly et al., 2003). Vlivem teplotní stratifikace může také dojít k anoxii v hypolimnionu horských jezer (Sánchez-España et al., 2017).

Oteplení a eutrofizace horských jezer může zlepšit podmínky pro některé druhy zooplanktonu. Například nástup perlooček, pokud se v jezerech dříve nevyskytovaly, může pozměnit celý potravní řetězec (Weckström et al., 2016). Vlivem hnědnutí vody v jezerech jsou úspěšné mixotrofní řasy, například zlativky (Parker et al., 2008). Potravní síť se také může v horských jezerech pozměnit vlivem zvýšení teploty a atmosférické depozice prachu, což může vést k opačnému efektu. Jak ukázal výzkum mezi lety 2005 a 2015 v pohoří Sierra Nevada, bakteriovní strategie řas se změnila vlivem zlepšení dostupnosti fosforu na komenzální. To může vést ke zvýšení komplexity potravních sítí a dochází také k nárůstu biomasy autotrofních organismů hlavně zelených řas, jelikož zelené řasy preferují vyšší teplotu a množství živin (González-Olalla et al., 2018).

Do mnoha horských jezer byly vysazeny ryby, což má dopad na celý ekosystém (Ventura et al., 2017). Introdukce ryb má vliv na velikost zooplanktonu, menší druhy zooplanktonu jsou ve výhodě a zvyšuje se jejich biomasa, dochází k redukci velikosti zooplanktonu v reprodukčním stádiu, avšak celková biomasa zooplanktonu zůstane stejná. Některé druhy nebo ekologické skupiny litorálních makrobezobratlích mohou úplně vymizet (Tiberti et al., 2014). S oteplením jezer rostou i energetické nároky ryb (Christianson & Johnson, 2020), což by mohlo v budoucnosti ještě více ovlivnit zooplankton než doposud. Chladné počasí během zimy, by mohlo mít dopad na morfologii některých zavlečených druhů, například u vranky obecné (*Cottus gobio*) zavlečené do jezer v Karnských Alpách byla prokázána steatóza jater, což by mohlo sloužit jako adaptace na chladné zimy nebo by to mohl být důsledek jídelníčku zahrnujícího stravu složenou pouze z pakomárovitých (Pastorino et al., 2019).

## 8. Závěr

Horská jezera prochází vlivem současných klimatických změn mnoha ekosystémovými změnami. Dochází k oteplení jezerní vody a v důsledku toho i zkrácení období zámruzu a prodloužení počtu dní teplotní stratifikace, v některých jezerech je tento jev zaznamenán úplně poprvé. Intenzivnější zvětrávání hornin a změna v cirkulaci atmosférické depozice mají za následek zvýšení přísunu živin do horských jezer, která jsou charakterizována jako oligotrofní případně ultraoligotrofní. Zejména v jezerech se zalesněnými povodími dochází k hnědnutí vody v důsledku nárůstu koncentrace rozpuštěného organického uhlíku a nižší průhlednost pak může podpořit rozvoj mixotrofních řas.

Díky tajícím ledovcům vznikají nová jezera ve stále vyšších nadmořských výškách a zvětšují se i jezera stávající. Tavná ledovcová voda zvyšuje koncentrace dusíku a dalších prvků v jezerech a může být sekundárním zdrojem mikroplastů a jiných polutantů. Během letního období může výrazně snižovat teplotu jezerní vody a způsobuje i zákal, což napomáhá organismům citlivým na UV záření, ale zhoršuje dostupnost světla pro fotosyntetizující organismy. Mezi jezery s přítokem tavné ledovcové vodou a něj jsou tedy značné rozdíly v abiotických podmínkách a mohou se lišit i druhovou diverzitou.

V horských jezerech se začínají objevovat druhy preferující teplejší vodu s větším obsahem živin, případně delší období letní stratifikace. Nejlépe jsou zdokumentovány změny fytoplanktonu, např. rozsivky z rodu *Cyclotella* a *Asterionella formosa* se objevují nově nebo jejich biomasa narůstá. Ke změnám dochází i v rámci jiných skupin planktonních a bentických organismů (bakterioplankton, zooplankton, pakomárovití). Prodlužuje se vegetační období a v některých jezerech dochází k nárůstu biomasy fytoplanktonu, zejména zelených řas. Dochází i ke změnám v potravních sítích a posouvá se horní hranice lesa do stále vyšších nadmořských výšek, což ovlivňuje jezera v její blízkosti.

V kontextu očekávaných dalších významných změn klimatu, které nastanou do konce 21. století, je důležité zaměřit se na dokumentaci stávajícího ekologického stavu horských jezer a podporovat jejich dlouhodobý výzkum tak, aby bylo možné vyhodnotit dopad měnících se abiotických podmínek na všechny trofické úrovně jezer. Tam, kde je k dispozici, je pro porovnání ekosystémových změn třeba též maximálně využít paleolimnologický záznam.

## 9. Použitá literatura

- Arvola, L., George, G., Livingstone, D. M., Järvinen, M., Blenckner, T., Dokulil, M. T., Jennings, E., Aonghusa, C. N., Nöges, P., Nöges, T., & Weyhenmeyer, G. A. (2009). The Impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes. In G. George (Ed.), *The Impact of Climate Change on European Lakes* (pp. 85–101). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2945-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2945-4_6)
- Battarbee, R. W., Grytnes, J.-A., Thompson, R., Appleby, P. G., Catalan, J., Korhola, A., Birks, H. J. B., Heegaard, E., & Lami, A. (2002). Comparing palaeolimnological and instrumental evidence of climate change for remote mountain lakes over the last 200 years. *Journal of Paleolimnology*, 28(1), 161–179. <https://doi.org/10.1023/A:1020384204940>
- Bayer, T. K., Schallenberg, M., & Burns, C. W. (2016). Contrasting controls on phytoplankton dynamics in two large, pre-alpine lakes imply differential responses to climate change. *Hydrobiologia*, 771(1), 131–150. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2625-2>
- Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., Fantini, A., Giacona, F., Hauck, C., Huss, M., Huwald, H., Lehning, M., López-Moreno, J.-I., Magnusson, J., Marty, C., Morán-Tejeda, E., Morin, S., Naaim, M., Provenzale, A., ... Vincent, C. (2018). The European mountain cryosphere: A review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12(2), 759–794. <https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018>
- Bettinetti, R., Quadroni, S., Galassi, S., Bacchetta, R., Bonardi, L., & Vailati, G. (2008). Is meltwater from Alpine glaciers a secondary DDT source for lakes? *Chemosphere*, 73(7), 1027–1031. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.08.017>
- Blais, J. M., Schindler, D. W., Muir, D. C. G., Sharp, M., Donald, D., Lafrenière, M., Braekevelt, E., & Strachan, W. M. J. (2001). Melting glaciers: A major source of persistent organochlorines to subalpine Bow lake in Banff National Park, Canada. *Ambio*, 30(7), 410–415.
- Blumthaler, M., Ambach, W., & Ellinger, R. (1997). Increase in solar UV radiation with altitude. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 39(2), 130–134. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(96\)00018-8](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(96)00018-8)
- Bogdal, C., Schmid, P., Zennegg, M., Anselmetti, F. S., Scheringer, M., & Hungerbühler, K. (2009). Blast from the past: Melting glaciers as a relevant source for persistent organic pollutants. *Environmental Science & Technology*, 43(21), 8173–8177. <https://doi.org/10.1021/es901628x>
- Bradley, R. S., Keimig, F. T., & Diaz, H. F. (2004). Projected temperature changes along the American cordillera and the planned GCOS network. *Geophysical Research Letters*, 31(16), 2004GL020229. <https://doi.org/10.1029/2004GL020229>
- Brimblecombe, P., Clegg, S. L., Davies, T. D., Shooter, D., & Tranter, M. (1987). Observations of the preferential loss of major ions from melting snow and laboratory ice. *Water Research*, 21(10), 1279–1286. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(87\)90181-3](https://doi.org/10.1016/0043-1354(87)90181-3)
- Burpee, B. T., Saros, J. E., Nanus, L., Baron, J., Brahney, J., Christianson, K. R., Ganz, T., Heard, A., Hundey, B., Koinig, K. A., Kopáček, J., Moser, K., Nydick, K., Oleksy, I., Sadro, S., Sommaruga, R., Vinebrooke, R., & Williams, J. (2022). Identifying factors that affect mountain lake sensitivity to atmospheric nitrogen deposition across multiple scales. *Water Research*, 209, 117883. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117883>
- Butcher, J. B., Nover, D., Johnson, T. E., & Clark, C. M. (2015). Sensitivity of lake thermal and mixing dynamics to climate change. *Climatic Change*, 129(1–2), 295–305. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1326-1>

- Carrivick, J. L., Sutherland, J. L., Huss, M., Purdie, H., Stringer, C. D., Grimes, M., James, W. H. M., & Lorrey, A. M. (2022). Coincident evolution of glaciers and ice-marginal proglacial lakes across the Southern Alps, New Zealand: Past, present and future. *Global and Planetary Change*, *211*, 103792. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103792>
- Catalán, J., Camarero, L., Felip, M., Pla, S., Ventura, M., Buchaca, T., Bartumeus, F., Mendoza, G. de, Miró, A., Casamayor, E. O., Medina-Sánchez, J. M., Bacardit, M., Altuna, M., Bartrons Vilamala, M., & Quijano, D. D. de. (2006). High mountain lakes: Extreme habitats and witnesses of environmental changes. *Limnética*, *25*(1–2), 551–584.
- Ceppi, P., Scherrer, S. C., Fischer, A. M., & Appenzeller, C. (2012). Revisiting Swiss temperature trends 1959–2008. *International Journal of Climatology*, *32*(2), 203–213. <https://doi.org/10.1002/joc.2260>
- Christianson, K. R., & Johnson, B. M. (2020). Combined effects of early snowmelt and climate warming on mountain lake temperatures and fish energetics. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, *52*(1), 130–145. <https://doi.org/10.1080/15230430.2020.1741199>
- Čiamporová-Zaťovičová, Z., Hamerlík, L., Šporka, F., & Bitušík, P. (2010). Littoral benthic macroinvertebrates of alpine lakes (Tatra Mts) along an altitudinal gradient: A basis for climate change assessment. *Hydrobiologia*, *648*(1), 19–34. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0139-5>
- Durán-Romero, C., Medina-Sánchez, J. M., & Carrillo, P. (2020). Uncoupled phytoplankton-bacterioplankton relationship by multiple drivers interacting at different temporal scales in a high-mountain Mediterranean lake. *Scientific Reports*, *10*(1), 350. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57269-y>
- Dyrurgerov, M. (2003). Mountain and subpolar glaciers show an increase in sensitivity to climate warming and intensification of the water cycle. *Journal of Hydrology*, *282*(1–4), 164–176. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00254-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00254-3)
- Edmundson, J. A., & Mazumder, A. (2002). Regional and hierarchical perspectives of thermal regimes in subarctic, Alaskan lakes. *Freshwater Biology*, *47*(1), 1–17. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00775.x>
- Eggermont, H., Verschuren, D., Audenaert, L., Lens, L., Russell, J., Klaassen, G., & Heiri, O. (2010). Limnological and ecological sensitivity of Rwenzori mountain lakes to climate warming. *Hydrobiologia*, *648*(1), 123–142. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0140-z>
- Elser, J. J., Andersen, T., Baron, J. S., Bergström, A.-K., Jansson, M., Kyle, M., Nydick, K. R., Steger, L., & Hessen, D. O. (2009). Shifts in lake N:P stoichiometry and nutrient limitation driven by atmospheric nitrogen deposition. *Science*, *326*(5954), 835–837. <https://doi.org/10.1126/science.1176199>
- Furian, W., Maussion, F., & Schneider, C. (2022). Projected 21st-century glacial lake evolution in high Mountain Asia. *Frontiers in Earth Science*, *10*, 821798. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.821798>
- Gao, Y., Chen, F., Lettenmaier, D. P., Xu, J., Xiao, L., & Li, X. (2018). Does elevation-dependent warming hold true above 5000 m elevation? Lessons from the Tibetan Plateau. *Npj Climate and Atmospheric Science*, *1*(1), 19. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0030-z>
- Gharehchahi, S., James, W. H. M., Bhardwaj, A., Jensen, J. L. R., Sam, L., Ballinger, T. J., & Butler, D. R. (2020). Glacier ice thickness estimation and future lake formation in Swiss Southwestern Alps—The Upper Rhône catchment: A VOLTA Application. *Remote Sensing*, *12*(20), 3443. <https://doi.org/10.3390/rs12203443>

- Giorgi, F., Hurrell, J. W., Marinucci, M. R., & Beniston, M. (1997). Elevation dependency of the surface climate change signal: A model study. *Journal of Climate*, *10*(2), 288–296. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<0288:EDOTSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<0288:EDOTSC>2.0.CO;2)
- González-Olalla, J. M., Medina-Sánchez, J. M., Lozano, I. L., Villar-Argaiz, M., & Carrillo, P. (2018). Climate-driven shifts in algal-bacterial interaction of high-mountain lakes in two years spanning a decade. *Scientific Reports*, *8*(1), 10278. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28543-2>
- Haerberli, W., & Weingartner, R. (2020). In full transition: Key impacts of vanishing mountain ice on water-security at local to global scales. *Water Security*, *11*, 100074. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100074>
- Haerberli, W., Buetler, M., Huggel, C., Friedli, T. L., Schaub, Y., & Schleiss, A. J. (2016). New lakes in deglaciating high-mountain regions – opportunities and risks. *Climatic Change*, *139*(2), 201–214. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1771-5>
- Hemingway, J. D., Spencer, R. G. M., Podgorski, D. C., Zito, P., Sen, I. S., & Galy, V. V. (2019). Glacier meltwater and monsoon precipitation drive Upper Ganges basin dissolved organic matter composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *244*, 216–228. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.10.012>
- Hylander, S., Jephson, T., Le Bret, K., Von Einem, J., Fagerberg, T., Balseiro, E., Modenutti, B., Souza, M. S., Laspoumaderes, C., Jönsson, M., Ljungberg, P., Nicolle, A., Nilsson, P. A., Ranåker, L., & Hansson, L.-A. (2011). Climate-induced input of turbid glacial meltwater affects vertical distribution and community composition of phyto- and zooplankton. *Journal of Plankton Research*, *33*(8), 1239–1248. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbr025>
- IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001
- IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1–34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Jiménez, L., Rühland, K. M., Jeziorski, A., Smol, J. P., & Pérez-Martínez, C. (2018). Climate change and Saharan dust drive recent cladoceran and primary production changes in remote alpine lakes of Sierra Nevada, Spain. *Global Change Biology*, *24*(1). <https://doi.org/10.1111/gcb.13878>
- Kääb, A., & Haerberli, W. (2001). Evolution of a high-mountain thermokarst lake in the Swiss Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, *33*(4), 385–390. <https://doi.org/10.1080/15230430.2001.12003445>
- Kamenik, C., Szeroczyńska, K., & Schmidt, R. (2007). Relationships among recent Alpine Cladocera remains and their environment: Implications for climate-change studies. *Hydrobiologia*, *594*(1), 33–46. <https://doi.org/10.1007/s10750-007-9083-4>

- Karst-Riddoch, T. L., Pisaric, M. F. J., & Smol, J. P. (2005). Diatom responses to 20th century climate-related environmental changes in high-elevation mountain lakes of the northern Canadian Cordillera. *Journal of Paleolimnology*, *33*(3), 265–282. <https://doi.org/10.1007/s10933-004-5334-9>
- Kopáček, J., Borovec, J., Hejzlar, J., Ulrich, K.-U., Norton, S. A., & Amirbahman, A. (2005). Aluminum control of phosphorus sorption by lake sediments. *Environmental Science & Technology*, *39*(22), 8784–8789. <https://doi.org/10.1021/es050916b>
- Kopáček, J., Kaňa, J., Bičárová, S., Brahney, J., Navrátil, T., Norton, S. A., Porcal, P., & Stuchlík, E. (2019). Climate change accelerates recovery of the Tatra Mountain lakes from acidification and increases their nutrient and chlorophyll a concentrations. *Aquatic Sciences*, *81*(4), 70. <https://doi.org/10.1007/s00027-019-0667-7>
- Kuefner, W., Hofmann, A. M., Geist, J., & Raeder, U. (2020). Evaluating climate change impacts on mountain lakes by applying the new silicification value to paleolimnological samples. *Science of The Total Environment*, *715*, 136913. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136913>
- Labaj, A. L., Michelutti, N., & Smol, J. P. (2016). Changes in cladoceran assemblages from tropical high mountain lakes during periods of recent climate change. *Journal of Plankton Research*, plankt;fbw092v1. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbw092>
- Labaj, A. L., Michelutti, N., & Smol, J. P. (2018). Annual stratification patterns in tropical mountain lakes reflect altered thermal regimes in response to climate change. *Fundamental and Applied Limnology*, *191*(4), 267–275. <https://doi.org/10.1127/fal/2018/1151>
- Lei, Y., Yang, K., Wang, B., Sheng, Y., Bird, B. W., Zhang, G., & Tian, L. (2014). Response of inland lake dynamics over the Tibetan Plateau to climate change. *Climatic Change*, *125*(2), 281–290. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1175-3>
- Lewis Jr., W. M. (1983). A revised classification of lakes based on mixing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *40*(10), 1779–1787. <https://doi.org/10.1139/f83-207>
- Li, X., Ding, Y., Xu, J., He, X., Han, T., Kang, S., Wu, Q., Mika, S., Yu, Z., & Li, Q. (2018). Importance of mountain glaciers as a source of dissolved organic carbon. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *123*(9), 2123–2134. <https://doi.org/10.1029/2017JF004333>
- Liang, S., Fang, H., Chen, M., Shuey, C. J., Walthall, C., Daughtry, C., Morisette, J., Schaaf, C., & Strahler, A. (2002). Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: Methods and preliminary results. *Remote Sensing of Environment*, *83*(1–2), 149–162. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00092-5)
- Liang, T., Lei, Z., Fuad, Md. T. I., Wang, Q., Sun, S., Fang, J. K.-H., & Liu, X. (2022). Distribution and potential sources of microplastics in sediments in remote lakes of Tibet, China. *Science of The Total Environment*, *806*, 150526. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150526>
- Liu, K., Liu, Y., Han, B.-P., Xu, B., Zhu, L., Ju, J., Jiao, N., & Xiong, J. (2019). Bacterial community changes in a glacial-fed Tibetan lake are correlated with glacial melting. *Science of The Total Environment*, *651*, 2059–2067. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.104>
- Liu, R., Dong, Y., Quan, G., Zhu, H., Xu, Y., & Elwardany, R. M. (2021). Microplastic pollution in surface water and sediments of Qinghai-Tibet Plateau: Current status and causes. *China Geology*, *4*(1), 178–184. <https://doi.org/10.31035/cg2021011>
- Loewen, C. J. G., Strecker, A. L., Larson, G. L., Vogel, A., Fischer, J. M., & Vinebrooke, R. D. (2019). Macroecological drivers of zooplankton communities across the mountains of western North America. *Ecography*, *42*(4), 791–803. <https://doi.org/10.1111/ecog.03817>

- Machate, O., Schmeller, D. S., Schulze, T., & Brack, W. (2023). Review: Mountain lakes as freshwater resources at risk from chemical pollution. *Environmental Sciences Europe*, 35(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00710-3>
- Malygina, N., Mitrofanova, E., Kuryatnikova, N., Biryukov, R., Zolotov, D., Pershin, D., & Chernykh, D. (2021). Microplastic pollution in the surface waters from plain and mountainous lakes in Siberia, Russia. *Water*, 13(16), 2287. <https://doi.org/10.3390/w13162287>
- Mast, M. A., Turk, J. T., Clow, D. W., & Campbell, D. H. (2011). Response of lake chemistry to changes in atmospheric deposition and climate in three high-elevation wilderness areas of Colorado. *Biogeochemistry*, 103(1), 27–43. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9443-4>
- McGuire, C. R., Nufio, C. R., Bowers, M. D., & Guralnick, R. P. (2012). Elevation-dependent temperature trends in the Rocky Mountain front range: Changes over a 56- and 20-year record. *PLoS ONE*, 7(9), e44370. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044370>
- Mergili, M., Müller, J. P., & Schneider, J. F. (2013). Spatio-temporal development of high-mountain lakes in the headwaters of the Amu Darya River (Central Asia). *Global and Planetary Change*, 107, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.04.001>
- Meyer-Jacob, C., Michelutti, N., Paterson, A. M., Cumming, B. F., Keller, W. (Bill), & Smol, J. P. (2019). The browning and re-browning of lakes: Divergent lake-water organic carbon trends linked to acid deposition and climate change. *Scientific Reports*, 9(1), 16676. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52912-0>
- Mi, H., Fagherazzi, S., Qiao, G., Hong, Y., & Fichot, C. G. (2019). Climate change leads to a doubling of turbidity in a rapidly expanding Tibetan lake. *Science of The Total Environment*, 688, 952–959. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.339>
- Michelutti, N., Labaj, A., Grooms, C., & Smol, J. (2016). Equatorial mountain lakes show extended periods of thermal stratification with climate warming. *Journal of Limnology*. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1444>
- Micu, D. M., Dumitrescu, A., Cheval, S., Nita, I., & Birsan, M. (2021). Temperature changes and elevation-warming relationships in the Carpathian Mountains. *International Journal of Climatology*, 41(3), 2154–2172. <https://doi.org/10.1002/joc.6952>
- Minder, J. R., Letcher, T. W., & Liu, C. (2018). The character and causes of elevation-dependent warming in high-resolution simulations of Rocky Mountain climate change. *Journal of Climate*, 31(6), 2093–2113. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0321.1>
- Mitchell, M. J., Driscoll, C. T., McHale, P. J., Roy, K. M., & Dong, Z. (2013). Lake/watershed sulfur budgets and their response to decreases in atmospheric sulfur deposition: Watershed and climate controls. *Hydrological Processes*, 27(5), 710–720. <https://doi.org/10.1002/hyp.9670>
- Moser, K. A., Baron, J. S., Brahney, J., Oleksy, I. A., Saros, J. E., Hundey, E. J., Sadro, S., Kopáček, J., Sommaruga, R., Kainz, M. J., Strecker, A. L., Chandra, S., Walters, D. M., Preston, D. L., Michelutti, N., Lepori, F., Spaulding, S. A., Christianson, K. R., Melack, J. M., & Smol, J. P. (2019). Mountain lakes: Eyes on global environmental change. *Global and Planetary Change*, 178, 77–95. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.04.001>
- Moulin, C., Lambert, C. E., Dulac, F., & Dayan, U. (1997). Control of atmospheric export of dust from North Africa by the North Atlantic Oscillation. *Nature*, 387(6634), 691–694. <https://doi.org/10.1038/42679>

- Mountain Research Initiative EDW Working Group. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5), 424–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- Nevalainen, L., Ketola, M., Korosi, J. B., Manca, M., Kurmayer, R., Koinig, K. A., Psenner, R., & Luoto, T. P. (2014). Zooplankton (Cladocera) species turnover and long-term decline of *Daphnia* in two high mountain lakes in the Austrian Alps. *Hydrobiologia*, 722(1), 75–91. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1676-5>
- Niedrist, G. H., Psenner, R., & Sommaruga, R. (2018). Climate warming increases vertical and seasonal water temperature differences and inter-annual variability in a mountain lake. *Climatic Change*, 151(3–4), 473–490. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2328-6>
- Nogués-Bravo, D., Araújo, M. B., Errea, M. P., & Martínez-Rica, J. P. (2007). Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. *Global Environmental Change*, 17(3–4), 420–428. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.11.007>
- Ohmura, A. (2012). Enhanced temperature variability in high-altitude climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 110(4), 499–508. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0687-x>
- Oleksy, I. A., Baron, J. S., Leavitt, P. R., & Spaulding, S. A. (2020). Nutrients and warming interact to force mountain lakes into unprecedented ecological states. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287(1930), 20200304. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0304>
- O'Reilly, C. M., Alin, S. R., Plisnier, P.-D., Cohen, A. S., & McKee, B. A. (2003). Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. *Nature*, 424(6950), 766–768. <https://doi.org/10.1038/nature01833>
- O'Reilly, C. M., Sharma, S., Gray, D. K., Hampton, S. E., Read, J. S., Rowley, R. J., Schneider, P., Lenters, J. D., McIntyre, P. B., Kraemer, B. M., Weyhenmeyer, G. A., Straile, D., Dong, B., Adrian, R., Allan, M. G., Anneville, O., Arvola, L., Austin, J., Bailey, J. L., ... Zhang, G. (2015). Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters*, 42(24). <https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
- Pandey, A., & Kropáček, J. (2023). Rapid formation and drainage of a new glacial lake in the Monte Rosa Massif, Swiss Alps, as observed on Sentinel-2 imagery. *Annals of Glaciology*, 1–3. <https://doi.org/10.1017/aog.2023.19>
- Parker, B. R., Vinebrooke, R. D., & Schindler, D. W. (2008). Recent climate extremes alter alpine lake ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(35), 12927–12931. <https://doi.org/10.1073/pnas.0806481105>
- Pastorino, P., Prearo, M., Pizzul, E., Bertoli, M., Francese, D. R., Menconi, V., Mugetti, D., Bozzetta, E., & Varello, K. (2019). Hepatic Steatosis in a Bullhead (*Cottus gobio*) population from a high-mountain lake (Carnic Alps): Adaptation to an extreme ecosystem? *Water*, 11(12), 2570. <https://doi.org/10.3390/w11122570>
- Pastorino, P., Pizzul, E., Bertoli, M., Anselmi, S., Kušće, M., Menconi, V., Prearo, M., & Renzi, M. (2021). First insights into plastic and microplastic occurrence in biotic and abiotic compartments, and snow from a high-mountain lake (Carnic Alps). *Chemosphere*, 265, 129121. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129121>
- Pepin, N., & Losleben, M. (2002). Climate change in the Colorado Rocky Mountains: Free air versus surface temperature trends. *International Journal of Climatology*, 22(3), 311–329. <https://doi.org/10.1002/joc.740>

- Pepin, N. C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., Palazzi, E., Seibert, P., Serafin, S., Schöner, W., Terzago, S., Thornton, J. M., Vuille, M., & Adler, C. (2022). Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world. *Reviews of Geophysics*, *60*(1), e2020RG000730. <https://doi.org/10.1029/2020RG000730>
- Peter, H., & Sommaruga, R. (2016). Shifts in diversity and function of lake bacterial communities upon glacier retreat. *The ISME Journal*, *10*(7), 1545–1554. <https://doi.org/10.1038/ismej.2015.245>
- Peter, H., & Sommaruga, R. (2017). Alpine glacier-fed turbid lakes are discontinuous cold polymictic rather than dimictic. *Inland Waters*, *7*(1), 45–54. <https://doi.org/10.1080/20442041.2017.1294346>
- Preston, D. L., Caine, N., McKnight, D. M., Williams, M. W., Hell, K., Miller, M. P., Hart, S. J., & Johnson, P. T. J. (2016). Climate regulates alpine lake ice cover phenology and aquatic ecosystem structure. *Geophysical Research Letters*, *43*(10), 5353–5360. <https://doi.org/10.1002/2016GL069036>
- Qin, J., Yang, K., Liang, S., & Guo, X. (2009). The altitudinal dependence of recent rapid warming over the Tibetan Plateau. *Climatic Change*, *97*(1–2), 321–327. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9733-9>
- Qixiang, W., Wang, M., & Fan, X. (2018). Seasonal patterns of warming amplification of high-elevation stations across the globe. *International Journal of Climatology*, *38*(8), 3466–3473. <https://doi.org/10.1002/joc.5509>
- Qu, X., & Hall, A. (2014). On the persistent spread in snow-albedo feedback. *Climate Dynamics*, *42*(1–2), 69–81. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1774-0>
- Rasul, G., Chaudhry, Q. Z., Mahmood, A., Hyder, K. W., & Dahe, Q. (2011). Glaciers and glacial lakes under changing climate in Pakistan. *Pakistan Journal of Meteorology*, *8*(15).
- Roberts, J. J., Fausch, K. D., Schmidt, T. S., & Walters, D. M. (2017). Thermal regimes of Rocky Mountain lakes warm with climate change. *PLOS ONE*, *12*(7), e0179498. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179498>
- Rofner, C., Peter, H., Catalán, N., Drewes, F., Sommaruga, R., & Pérez, M. T. (2017). Climate-related changes of soil characteristics affect bacterial community composition and function of high altitude and latitude lakes. *Global Change Biology*, *23*(6), 2331–2344. <https://doi.org/10.1111/gcb.13545>
- Rogora, M., Mosello, R., & Arisci, S. (2003). The Effect of Climate Warming on the hydrochemistry of alpine lakes. *Water, Air, and Soil Pollution*, *148*(1/4), 347–361. <https://doi.org/10.1023/A:1025489215491>
- Rogora, M., Somaschini, L., Marchetto, A., Mosello, R., Tartari, G. A., & Paro, L. (2020). Decadal trends in water chemistry of Alpine lakes in calcareous catchments driven by climate change. *Science of The Total Environment*, *708*, 135180. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135180>
- Rottler, E., Kormann, C., Francke, T., & Bronstert, A. (2019). Elevation-dependent warming in the Swiss Alps 1981–2017: Features, forcings and feedbacks. *International Journal of Climatology*, *39*(5), 2556–2568. <https://doi.org/10.1002/joc.5970>
- Rühland, K., Paterson, A. M., & Smol, J. P. (2008). Hemispheric-scale patterns of climate-related shifts in planktonic diatoms from North American and European lakes. *Global Change Biology*, *14*(11), 2740–2754. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01670.x>
- Rühland, K. M., Paterson, A. M., & Smol, J. P. (2015). Lake diatom responses to warming: Reviewing the evidence. *Journal of Paleolimnology*, *54*(1), 1–35. <https://doi.org/10.1007/s10933-015-9837-3>

- Sadro, S., Melack, J. M., Sickman, J. O., & Skeen, K. (2019). Climate warming response of mountain lakes affected by variations in snow. *Limnology and Oceanography Letters*, 4(1), 9–17. <https://doi.org/10.1002/lol2.10099>
- Salerno, F., Rogora, M., Balestrini, R., Lami, A., Tartari, G. A., Thakuri, S., Godone, D., Freppaz, M., & Tartari, G. (2016). Glacier melting increases the solute concentrations of Himalayan glacial lakes. *Environmental Science & Technology*, 50(17), 9150–9160. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02735>
- Sánchez-España, J., Mata, M. P., Vegas, J., Morellón, M., Rodríguez, J. A., Salazar, Á., Yusta, I., Chaos, A., Pérez-Martínez, C., & Navas, A. (2017). Anthropogenic and climatic factors enhancing hypolimnetic anoxia in a temperate mountain lake. *Journal of Hydrology*, 555, 832–850. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.049>
- Saros, J. E., & Anderson, N. J. (2015). The ecology of the planktonic diatom *Cyclotella* and its implications for global environmental change studies. *Biological Reviews*, 90(2), 522–541. <https://doi.org/10.1111/brv.12120>
- Saros, J. E., Rose, K. C., Clow, D. W., Stephens, V. C., Nurse, A. B., Arnett, H. A., Stone, J. R., Williamson, C. E., & Wolfe, A. P. (2010). Melting alpine glaciers enrich high-elevation lakes with reactive nitrogen. *Environmental Science & Technology*, 44(13), 4891–4896. <https://doi.org/10.1021/es100147j>
- Sawicka, K., Monteith, D. T., Vanguelova, E. I., Wade, A. J., & Clark, J. M. (2016). Fine-scale temporal characterization of trends in soil water dissolved organic carbon and potential drivers. *Ecological Indicators*, 68, 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.028>
- Scherrer, S. C., Wüthrich, C., Croci-Maspoli, M., Weingartner, R., & Appenzeller, C. (2013). Snow variability in the Swiss Alps 1864–2009. *International Journal of Climatology*, 33(15), 3162–3173. <https://doi.org/10.1002/joc.3653>
- Schmid, M., Hunziker, S., & Wüest, A. (2014). Lake surface temperatures in a changing climate: A global sensitivity analysis. *Climatic Change*, 124(1–2), 301–315. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1087-2>
- Schmid, P., Bogdal, C., Blüthgen, N., Anselmetti, F. S., Zwysig, A., & Hungerbühler, K. (2011). The missing piece: Sediment records in remote mountain lakes confirm glaciers being secondary sources of persistent organic pollutants. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 203–208. <https://doi.org/10.1021/es1028052>
- Schomacker, A. (2010). Expansion of ice-marginal lakes at the Vatnajökull ice cap, Iceland, from 1999 to 2009. *Geomorphology*, 119(3–4), 232–236. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.03.022>
- Shugar, D. H., Burr, A., Haritashya, U. K., Kargel, J. S., Watson, C. S., Kennedy, M. C., Bevington, A. R., Betts, R. A., Harrison, S., & Strattman, K. (2020). Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nature Climate Change*, 10(10), 939–945. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0855-4>
- Slemmons, K. E. H., & Saros, J. E. (2012). Implications of nitrogen-rich glacial meltwater for phytoplankton diversity and productivity in alpine lakes. *Limnology and Oceanography*, 57(6), 1651–1663. <https://doi.org/10.4319/lo.2012.57.6.1651>
- Slemmons, K. E. H., Saros, J. E., & Simon, K. (2013). The influence of glacial meltwater on alpine aquatic ecosystems: A review. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15(10), 1794. <https://doi.org/10.1039/c3em00243h>
- Slemmons, K. E. H., Rodgers, M. L., Stone, J. R., & Saros, J. E. (2017). Nitrogen subsidies in glacial meltwaters have altered planktonic diatom communities in lakes of the US Rocky Mountains for at least a century. *Hydrobiologia*, 800(1), 129–144. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3187-2>

- Sommaruga, R. (2001). The role of solar UV radiation in the ecology of alpine lakes. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 62(1), 35–42. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(01\)00154-3](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(01)00154-3)
- Song, C., & Sheng, Y. (2016). Contrasting evolution patterns between glacier-fed and non-glacier-fed lakes in the Tanggula Mountains and climate cause analysis. *Climatic Change*, 135(3–4), 493–507. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1578-9>
- Song, C., Huang, B., Richards, K., Ke, L., & Hien Phan, V. (2014). Accelerated lake expansion on the Tibetan Plateau in the 2000s: Induced by glacial melting or other processes? *Water Resources Research*, 50(4), 3170–3186. <https://doi.org/10.1002/2013WR014724>
- Šporka, F., Livingstone, D. M., Stuchlík, E., Turek, J., & Galas, J. (2006). Water temperatures and ice cover in lakes of the Tatra Mountains. *Biologia*, 61(S18), S77–S90. <https://doi.org/10.2478/s11756-006-0121-x>
- Straškrabová, V., Callieri, C., Carrillo, P., Cruz-Pizarro, L., Fott, J., Hartman, P., Macek, M., Medina-Sánchez, J., Nedoma, J., & Šimek, K. (1999). Investigations on pelagic food webs in mountain lakes—Aims and methods. *Journal of Limnology*, 58, 77–87. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.1999.77>
- Szabó, Z., Buczkó, K., Haliuc, A., Pál, I., L. Korponai, J., Begy, R.-C., Veres, D., Luoto, T. P., Zsigmond, A. R., & Magyari, E. K. (2020). Ecosystem shift of a mountain lake under climate and human pressure: A move out from the safe operating space. *Science of The Total Environment*, 743, 140584. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140584>
- Thienpont, J. R., Steele, C., Vermaire, J. C., Pisaric, M. F. J., Kokelj, S. V., & Smol, J. P. (2015). Synchronous changes in chironomid assemblages in two Arctic delta lake ecosystems after a major saltwater intrusion event. *Journal of Paleolimnology*, 53(2), 177–189. <https://doi.org/10.1007/s10933-014-9815-1>
- Thompson, L. G., Yao, T., Davis, M. E., Mosley-Thompson, E., Wu, G., Porter, S. E., Xu, B., Lin, P.-N., Wang, N., Beaudon, E., Duan, K., Sierra-Hernández, M. R., & Kenny, D. V. (2018). Ice core records of climate variability on the Third Pole with emphasis on the Guliya ice cap, western Kunlun Mountains. *Quaternary Science Reviews*, 188, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.03.003>
- Thompson, R., Kamenik, C., & Schmidt, R. (2005). Ultra-sensitive Alpine lakes and climate change. *Journal of Limnology*, 64(2), 139. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2005.139>
- Tiberti, R., Von Hardenberg, A., & Bogliani, G. (2014). Ecological impact of introduced fish in high altitude lakes: A case of study from the European Alps. *Hydrobiologia*, 724(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1696-1>
- Tiberti, R., Bogliani, G., Brighenti, S., Iacobuzio, R., Liautaud, K., Rolla, M., Von Hardenberg, A., & Bassano, B. (2019). Recovery of high mountain Alpine lakes after the eradication of introduced brook trout *Salvelinus fontinalis* using non-chemical methods. *Biological Invasions*, 21(3), 875–894. <https://doi.org/10.1007/s10530-018-1867-0>
- Tiberti, R., Buscaglia, F., Callieri, C., Rogora, M., Tartari, G., & Sommaruga, R. (2020). Food web complexity of high mountain lakes is largely affected by glacial retreat. *Ecosystems*, 23(5), 1093–1106. <https://doi.org/10.1007/s10021-019-00457-8>
- Tudoroiu, M., Eccel, E., Gioli, B., Gianelle, D., Schume, H., Genesio, L., & Miglietta, F. (2016). Negative elevation-dependent warming trend in the Eastern Alps. *Environmental Research Letters*, 11(4), 044021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/044021>

- Ventura, M., Tiberti, R., Buchaca, T., Buñay, D., Sabás, I., & Miró, A. (2017). Why should we preserve fishless high mountain lakes? In J. Catalan, J. M. Ninot, & M. M. Aniz (Eds.), *High Mountain Conservation in a Changing World* (Vol. 62, pp. 181–205). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-55982-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-55982-7_8)
- Viani, C., Machguth, H., Huggel, C., Godio, A., Franco, D., Perotti, L., & Giardino, M. (2020). Potential future lakes from continued glacier shrinkage in the Aosta Valley Region (Western Alps, Italy). *Geomorphology*, 355, 107068. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107068>
- Vuille, M., & Bradley, R. S. (2000). Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters*, 27(23), 3885–3888. <https://doi.org/10.1029/2000GL011871>
- Wang, X., Siegert, F., Zhou, A., & Franke, J. (2013). Glacier and glacial lake changes and their relationship in the context of climate change, Central Tibetan Plateau 1972–2010. *Global and Planetary Change*, 111, 246–257. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.09.011>
- Wang, X., Guo, X., Yang, C., Liu, Q., Wei, J., Zhang, Y., Liu, S., Zhang, Y., Jiang, Z., & Tang, Z. (2020). Glacial lake inventory of high-mountain Asia in 1990 and 2018 derived from Landsat images. *Earth System Science Data*, 12(3), 2169–2182. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2169-2020>
- Warner, K. A., Saros, J. E., & Simon, K. S. (2017). Nitrogen subsidies in glacial meltwater: Implications for high elevation aquatic chains. *Water Resources Research*, 53(11), 9791–9806. <https://doi.org/10.1002/2016WR020096>
- Weckström, K., Weckström, J., Huber, K., Kamenik, C., Schmidt, R., Salvenmoser, W., Rieradevall, M., Weisse, T., Psenner, R., & Kurmayer, R. (2016). Impacts of climate warming on alpine lake biota over the past decade. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 48(2), 361–376. <https://doi.org/10.1657/AAAR0015-058>
- Wei, Y., & Fang, Y. (2013). Spatio-Temporal Characteristics of Global Warming in the Tibetan Plateau during the Last 50 Years Based on a Generalised Temperature Zone—Elevation Model. *PLoS ONE*, 8(4), e60044. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060044>
- Williamson, C. E., Saros, J. E., Vincent, W. F., & Smol, J. P. (2009). Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6part2), 2273–2282. [https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6\\_part\\_2.2273](https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2273)
- You, Q., Zhang, Y., Xie, X., & Wu, F. (2019). Robust elevation dependency warming over the Tibetan Plateau under global warming of 1.5 °C and 2 °C. *Climate Dynamics*, 53(3–4), 2047–2060. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04775-4>
- You, Q., Chen, D., Wu, F., Pepin, N., Cai, Z., Ahrens, B., Jiang, Z., Wu, Z., Kang, S., & AghaKouchak, A. (2020). Elevation dependent warming over the Tibetan Plateau: Patterns, mechanisms and perspectives. *Earth-Science Reviews*, 210, 103349. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103349>
- Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Hoelzle, M., Paul, F., Haeberli, W., Denzinger, F., Ahlstrøm, A. P., Anderson, B., Bajracharya, S., Baroni, C., Braun, L. N., Cáceres, B. E., Casassa, G., Cobos, G., Dávila, L. R., Delgado Granados, H., Demuth, M. N., ... Vincent, C. (2015). Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61(228), 745–762. <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>