**Univerzita Karlova**

**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Biologie

Studijní obor: Biologie

Alžběta Prüherová

# Vliv odtáté ledovcové vody na bentická společenstva řas v alpinských potocích

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Jana Kulichová, Ph.D.

Praha, 2020

**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.

V Praze, 14. 8. 2020

Podpis

**Poděkování**

Velký dík patří mé školitelce **Mgr. Janě Kulichové, Ph.D**.

Děkuji za spoustu cenných rad, pomoc s technickými problémy, trpělivost a za podporu při vedení mé bakalářské práce.

Poděkování patří i mé rodině a přátelům za snášení výkyvů nálad, které museli během mého psaní trpět a za celkovou pomoc a podporu během mého studia.

**Abstrakt**

Specifikem glaciálních potoků, jako toků napájených a ovlivňovaných ledovcem jsou velmi drsné podmínky, které v těchto horských habitatech panují po celý rok. Typické rysy glaciálního toku jsou chladné teploty, oligotrofie, rychlý průtok (s ním spojená dobrá saturace kyslíkem) a kolísání hladiny na škále jak celého roku, tak i v rámci několika hodin. Organismy osidlující takové habitaty musí být tedy na nehostinné prostředí dostatečně adaptováni, aby dokázali místní podmínky nejen přežít, ale hlavně využít pro úspěšné rozmnožování a osídlování omezeného prostoru. Tato práce je zaměřená na bentická společenstva těchto toků a shrnuje poznatky ze studií prováděných především v Italských, Rakouských a Švýcarských Alpách. Diskutovány jsou typy toků alpinské zóny (prvotní rozdělení je na tři hlavní typy podle zdroje vody, dále v práci ještě rozdělení Alpských potoků dle podloží a dalších geografických specifik), sezónní vlivy ledovce a působení klimatických změn na křehká společenstva obývající glaciální potoky vyšších nadmořských výšek. Glaciální toky jsou v současnosti předmětem výzkumu v souvislosti se studiem klimatických změn a jejich vlivu na druhové složení potoků alpinských areálů, díky jejich bezprostřednímu kontaktu s ledovcovou masou, na které jsou fenomény globální změny klimatu vidět rychleji než na nížinných tocích. Výběr periphytonu jako modelových organismů je odůvodněn jejich krátkou generační dobou, díky které lze rychle pozorovat environmentální změny v čase, kdy probíhají, a ne čekat až na odpověď větších organismů (makroskopická flora i fauna), které mají generační dobu výrazně delší. Nemalou roli ve výhodě periphytonu jako souhrnného názvu modelových organismů této práce, hraje i fakt, že skupiny patřící mezi periphyton glaciálních potoků, jsou velmi dobrými bioindikátory mnoha environmentálních faktorů.

**Klíčová slova:** časová dynamika, klimatické změny, prostorová heterogenita

**Abstract**

The specifics of glacial streams, as streams fed and influenced by mountain glacier are very tough conditions that, in these alpine habitats, last all year long. Typical features of a glacial stream are cold temperatures, oligotrophic water, high flow rate which is connected to a very good oxygen saturation and the stream level fluctuations, not only visible during the year, but also in a scope of a few hours of one day. Therefore populations of organisms living in these habitats have to be sufficiently adapted to such harsh environment, in order not just to survive local harsh conditions, but effectively use them to reproduce and inhabit the limited space. This thesis is focused on benthic communities of these water bodies and is a summary of knowledge from studies done mainly in Italian, Austrian and Swiss Alps. Seasonal influence of the glacier and the influence of climate change on the fragile communities inhabiting glacial streams in higher altitudes is then discussed as well as the types of streams in the alpine zone dividing said streams into several types, first into three main types according to their water source and later on into more specific types of the Alps streams according to their bed rock and other geographic variables. Glacial streams are nowadays the subject of research connected with the research of climate change and its influence on alpine streams species assemblages. Thanks to the stream being in immediate contact with glacier mass, the stream become a great (and relatively fast, compared to low altitude water bodies) marker of global climate change. The choice of periphyton as a group of model organisms is supported by their short generation time, which allows researchers to monitor environmental changes in present time without the need to wait for response of the macroorganisms (flora and fauna both) whose generation time is distinctively longer. Big role in the advantage of using periphyton species is also in the fact that these species are very good bioindicators of many factors influencing the stream.

**Key words:** climatic changes, spatial heterogeneity, temporal dynamics

# Obsah

**1 Úvod ..... 6**

**2 Alpinské toky ..... 11**

2.1 Typ Kryal ..... 13

2.2 Typ Krenal ..... 14

2.3 Typ Rhithral ..... 14

2.4 Prostorová heterogenita ..... 15

**3 Skupiny řas glaciálních toků ..... 17**

3.1 Typické skupiny pro ekosystémy potoků vyšších poloh ..... 18

3.2 Abiotické a biotické faktory výskytu řas ..... 19

3.3 Adaptace řasových společenstev v alpinských tocích a jejich bioindikátory ..... 19

**4 Periphyton alpinské zóny ..... 22**

4.1 Autoekologie vybraných druhů ..... 24

**5 Závěr ..... 26**

**6 Reference ..... 28**

**7 Seznam obrázků a tabulek ..... 34**

# 1 Úvod

Klimatické změny. Sousloví, které mnoha lidem vžene barvu do tváří. Skupiny, které aktivně bojují za klimatickou spravedlnost, tvrdí, že lidé zlikvidovali planetu, že není cesty zpět a bez větších či menších kontribucí k záchraně biodiverzity se lidstvo samo žene do záhuby. Na opačném břehu stojí skupiny lidí, kteří v žádné větší klimatické změny nevěří, naopak věří, že příroda si sama poradí a že skupiny výše zmíněné, malují takzvaně čerta na zeď. Kde je ale v tomto sporu pravda?

Klimatické změny probíhaly v historii planety Země odjakživa (IPCC 2007), takže se mnohdy může zdát, že nynější probíhající změny jsou jen dalšími přirozenými změnami, které mohly být očekávatelné. V tomto bodě se však dostáváme k jádru problému, na scénu totiž přichází lidé a jejich vliv na planetu Zemi, tedy vliv nazýván antropogenním vlivem. Klimatické změny vymykající se očekávatelnému průběhu tedy probíhají (Stocker et al. 2013), za výrazného přispění lidské populace. Možnost potvrzení (nepřímého) antropogenního vlivu na vysokohorská společenstva vodních habitatů je možné, díky relativní nedostupnosti těchto habitatů lidem samotným (především turistům) což znamená minimální kontaminaci z jiných prostředí a jejich vysokou sensibilitou na environmentální změny (Brighenti et al. 2019), které společnost nepocítí tak rychle a může být falešně ukolébána hudbou nevědomosti. Klimatické změny a je podporující antropogenní vliv jsou už ale v moderní době nevyvratitelné (Marzeion et al. 2014) a tato práce se tedy zaměřuje na habitaty nejvíce trpící působením lidí, tedy antropogenním působením i v nižších nadmořských výškách než se nachází samotné dotčené ekosystémy.

Jedna z možností, jak zkoumat probíhající klimatické změny, předvídat jejich vliv na planetu Zemi a osvětlit fenomény, které momentálně na světě probíhají, je takzvaný biomonitoring. Biomonitoring je definicí vysvětlen jako proces pozorování a vyhodnocování současného ekologického stavu ekosystému. A navíc je i nástrojem monitoringu v něm probíhajících změn, biodiverzity a okolní krajiny, využívající typy původních habitatů s původními populacemi a druhy (Phillips and Rainbow 1993). Biomonitoring jako takový je komplexní proces, který se skládá z několika kroků: 1) pozorování organismů v jejich přirozeném prostředí a jejich následný odběr 2) určení a kvantifikace odebraných organismů a jejich zařazení 3) vypočtení a kalibrace indexu odrážející působení abiotických faktorů na pozorované prostředí 4) a nakonec porovnání a vyhodnocení celkového stavu zkoumaného ekosystému (Birk et al. 2012, Pawlowski et al. 2018).

Počátky využití živých organismů jako bioindikátorů začaly po publikaci práce Kolkowitze a Marssona v roce 1909, kteří vytvořili saprobický systém jako systém měřící saprobitu vody, jinými slovy systém, měřící znečištění pozorovaných toků organickým materiálem a touto prací tak položili základy k možnosti využití živých organismů jako specifických bioindikátorů k monitorování stavu vodních toků v různých částech světa (Lobo et al. 2016).

S přispěním paleolimnologie, která využívá zbytky, stopy a jiné pozůstatky živých organismů, pak lze biomonitoring použít i k vyhodnocení klimatických změn na časové škále několika desítek let. Využívají se vzorky odebrané ze stejné lokality v minulosti vyhodnocenými a porovnanými v současnosti, nebo naopak vzorky v současnosti odebrané a uložené na pozorování a vyhodnocení v budoucnu. Bioindikace je využívaná jako jedna ze základních metod biomonitoringu, jelikož výskyt a hojnost organismů nazývaných bioindikátory je důležitým (ne-li nejhlavnějším) faktorem k determinaci stavu (nejen) vodních prostředí (Pawlowski et al. 2018).

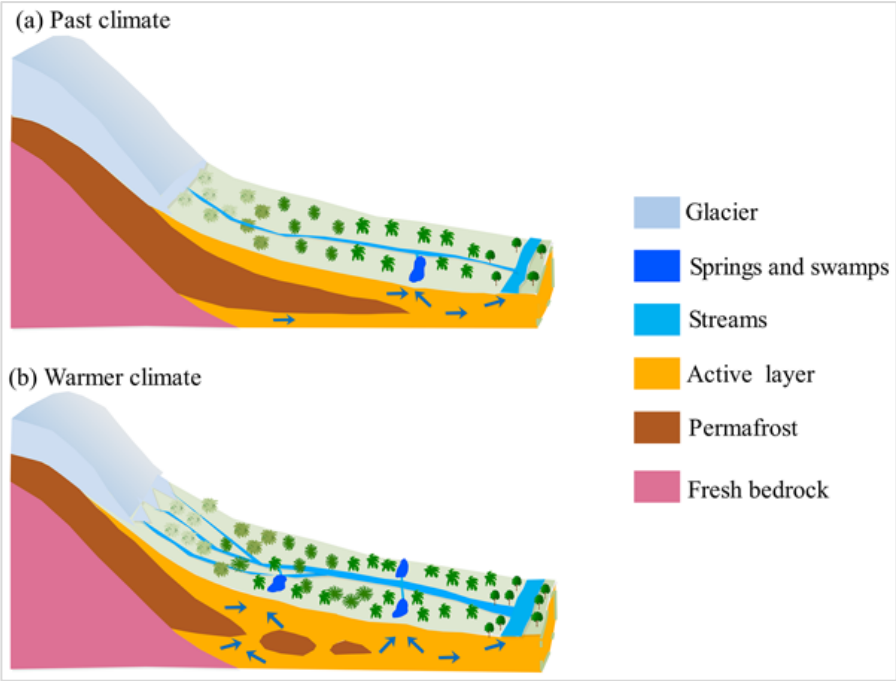
Determinace stavu prostředí vyhodnocována na základě dat získaných z pozorování živých organismů je daleko přesnější, než využití čistě jen fyzikálních a chemických analýz prostředí. Determinaci živými organismy můžeme nazvat přesnější, protože organismy mapují vnější faktory ovlivňující celý tok na jiné škále, než dokážou samotná měření fyzikálních a chemických hodnot (Bondaruk et al. 2015). Chemická i fyzikální analýza se může velmi lišit v různých částech toku, jelikož se může měnit podloží nebo okolní flora, na tyto okolnosti mohou reagovat i živé organismy, na těch ale, v porovnání s vodním tokem, můžeme sledovat a zaznamenat adaptaci na různé chemické či fyzikální změny v místě výskytu a může tedy být přínosnější ve více ohledech. Organismy jsou schopny zaznamenat například vtok toxických látek nebo vyschnutí v minulosti (Phillips and Rainbow 1993). Další výhodou biomonitoringu je i možnost sledování dlouhodobějšího působení faktorů na tok, oproti fyzikálně/chemickým analýzám které se měří aktuálně. Se zvětšujícím dopadem klimatických změn na moderní populace, roste poptávka po předpovědích vývinu globálního klimatu a nevyhnutelných následků z nich vyplývajících jak pro současné generace, tak i pro generace následující, a právě tak může biomonitoring dobře sloužit k předpovídání nejpřesnějších prognóz budoucích změn a odpovědí žijící fauny a flóry na ně.

Velmi dobrým nástrojem biomonitoringu jsou eukaryotické fotosyntetizující organismy, řazené mezi protista, tradičně nazývány řasy (a sinice). Mezi řasy patří mnoho skupin, morfologicky velmi diverzifikovaných. Od jednobuněčných mikroorganismů jako je např. *Chlorella*, přes rozsivky s typickou křemičitou schránkou po mnohobuněčné formy jako je

např. *Macrocystis pyrifera*, která tvoří tzv. kelpové lesy. Pro řasy jako skupinu obecně platí, že obývají téměř každé prostředí, kde je alespoň minimální vlhkost, to zahrnuje sladkovodní i mořské habitaty, vlhké terestrické habitaty, jako je například vlhká půda nebo periodicky zaplavované kameny, ale i živé povrchy, jako jsou například části rostlinného těla vyšších rostlin nebo i srst zvířat (Lee 2018). Tento fakt v kombinaci s dalšími, např. velmi typickou krátkou generační dobou, která umožňuje sledovat mnohdy i velmi dynamické změny, osvětluje důvody výběru právě skupin mikroskopických řas, jako modelových organismů v této práci pro monitoring dlouhodobých i krátkodobých změn v uspořádání bentických společenstev vodních habitatů ve vyšších nadmořských výškách.

Alpinské toky a jejich ekosystémy jsou obecně brány jako zdroje velmi bohaté na bioindikátory environmentálních změn (Cantonati et al. 2006). Možnost zkombinovat výzkum alpinských toků ovlivněných ledovcem s výzkumem skupin řas (mnohdy adaptovanými přímo na podmínky vyšších nadmořských výšek) se tedy přímo nabízí pro sledování jak dlouhodobých tak i krátkodobých změn, jelikož habitaty vyšších nadmořských výšek vykazují pozorovatelné změny, které jsou následky environmentálních výkyvů, relativně brzy. Reakce ledovce na environmentální výkyvy se sezónně projevuje především cykly tání a mrznutí. Tání se projeví zvýšením hladiny, vytvoření nových ramen toků či jejich přetvoření (tvorba slepých ramen, lagun apod.) a je tedy snazší změny (např. klimatické) pozorovat (Douglas et al.2004).

**Obrázek č. 1** schematicky ukazuje dvě varianty klimatu (chladnější a) past climate a teplejší warmer climate b)) a výsledek přechodu z chladnějšího klimatu do teplejšího. Varianta b) ukazuje ústup ledovce a vznik nových ramen potoků v důsledku zmenšování (tání) ledovce a tedy navýšení hladiny sběrných toků v nižších nadmořských výškách, vznik vlhčího klimatu v sekci dále od ledovce pod hranicí lesa, který je demonstrován vznikem bažinatých oblastí a nárostu flóry a v neposlední řadě velký úbytek permafrostu.




Obrázek 1: Převzato z Lin et al. 2020

Ward (1994) označil pohled moderní vědy na ekosystémy alpinských toků jako velmi zjednodušený a zdůraznil neobvyklou heterogenitu prostředí, která je v těchto podmínkách neočekávaná a tedy staví alpinské habitaty jako zajímavý cíl výzkumu právě environmentálních výkyvů.

Cílem předložené práce je kriticky zhodnotit studie zabývající se alpinskými habitaty se zaměřením na bentická společenstva řas a jejich život ovlivněný vodou z ledovce, který, jak bylo zmíněno výše, reaguje velmi rychle na klimatické změny a dokáže je tedy dlouhodobě mapovat. První část práce pojednává o fenoménu alpinských toků. Diskutovány jsou geografická a hydrologická specifika daných toků, jejich mikrohabitaty a prostorová heterogenita. Dále jsou v práci zmíněny skupiny řas vyskytujících se ve vysokohorských potocích, abiotické a biotické faktory mající vliv na výskyt daných druhů a výběr druhů, které se dají považovat za indikátory zkoumaných toků. Skupinou řas, na kterou se tato práce v určitých částech zaměřuje, jsou rozsivky, jako velmi častou dominující složkou fytobentosu vodních toků celého světa (Lowe 1979). V poslední části se práce zaměřuje na vysokohorské potoky evropských Alp. Diskutovány jsou specifika Italského úseku alpského pohoří, se specifickými druhy pro dané prostředí a stručným shrnutím abiotických a biotických podmínek ve sledovaných potocích.

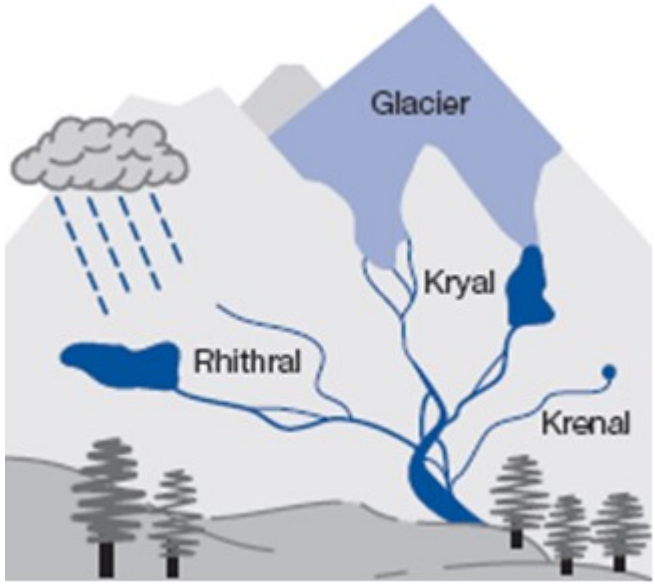
Glaciální potoky, jako toky, které mají přímou souvislost s ledovcem, se nacházejí nejen v alpinské zóně ale i v polárních oblastech (Izaguirre and Pizarro 1998, Gooseff et al. 2002,

Hodgson 2004). Ledovcovými toky polárních oblastí se ale v této práci nebudu detailněji zaobírat, jelikož by jejich začlenění přesahovalo původní téma mé práce, která je zaměřená na toky alpinské zóny. Protože jsou ale glaciální potoky nedílnou součástí rozebíraného tématu, jsou napříč kapitolami předložené práce zmíněné pro doplnění, či porovnání s jejich alpinskými protějšky.

# 2 Alpinské toky

J. V. Ward v roce 1994 definoval alpinské toky jako tekoucí vody alpinské zóny. Jsou to tedy toky nad hranicí lesa, ale pod hranicí trvalé sněhové pokrývky, což tyto toky výrazně odlišuje od potoků zalesněných vysokohorských areálů (liší se např. ve stupni zastínění toku, opadem organického materiálu z okolí toku nebo narušováním okolní faunou). Potoky alpinské zóny jsou celoročně velmi chladné habitaty a v mírném pásmu jsou to poslední refugia na chlad adaptovaných organismů z poslední doby ledové (Uehlinger et al. 2010). Alpinské potoky jsou většinou malé, v porovnání s ostatními tekoucími vodami ve světě, ale i tak jsou druhově bohaté a komplexní, komplexivitou je zde míněna struktura toku, která se výrazně odlišuje nejen mezi horní a spodní částí toku, ale i mezi jednotlivými úrovněmi v menších úsecích toku, nebo se může lišit i rozložení organismů v rámci jednoho kamene (Cantonati et al. 2006). Hlavními rysy alpinského potoku jsou, jak již bylo zmíněno, velmi nízké teploty vody, výrazné kolísání průtoku způsobené např. jarním táním nebo nedostatkem srážek v zimních měsících a rychlý proud, který zajišťuje velmi dobré okysličení ale zároveň i zvyšuje odnos nahromaděného materiálu (Hieber et al. 2001). Další charakteristikou je nízký obsah živin v těchto tocích a koryto skalnatého charakteru, což zabraňuje výskytu vyšších rostlin v nejbližším okolí toků. Ve většině případů je vegetace obklopující alpinské toky velmi chudá (např. rostliny bylinného nebo keřovitého charakteru) nebo žádná, což také odpovídá nízké koncentraci živin i proti potokům zalesněných areálů, jelikož v alpinských tocích není přímý a tak veliký opad jako v zalesněných areálech. Alpinské toky lze rozdělit do tří určitých typů dle jejich abiotických vlastností, mezi které se počítají například teplota vody, stálost dna, zakalení a sezónní zaplavování. Alpinské toky mohou být tedy, na základě těchto vlastností, trojího charakteru *kryal, krenal* nebo *rhithral* (Ward 1994).

**Obrázek č. 2** je schématem alpinské zóny se třemi typy alpinských potoků, vidíme hranici lesa ve spodní části a lze odvodit i hranici trvalé sněhové pokrývky, jež bude na pomezí vyznačeného potoku typu kryal a začátkem ledovce.



Obrázek 2: převzato z Ward 1994

Na výše zmíněném obrázku je ilustrován hlavní rozdíl mezi těmito třemi typy vodních toků alpinské zóny, a to jejich prameniště a zdroj vody. Potok typu kryal je napájen přímo odtátou vodou z ledovce, typ krenal je napájen podzemní vodou a typ rhithral je napájen deštěm a odtátým sněhem. Potoky typu kryal a krenal se ale poměrně rychle změní na typ rhitral jejich postupným vzdalováním od zdroje, tedy ledovce. Alpinská krajina bývá ve valné většině složená ze všech typů výše zmíněných toků a poskytuje tedy různorodé podmínky pro faunu a floru vodních habitatů (Milner a Petts 1994, Ward 1994).

Alpinské potoky jsou všechny charakterizovány určitou spojitostí s ledovcem. Buď je ledovec přímý zdroj vody toků v jeho okolí, nebo nepřímě ovlivňuje toky v jeho okolí. Takovým vlivem může být například ovlivňování délky trvalé sněhové pokrývky v místě sledovaného potoku a tím způsobené kolísání hladiny takových toků. U všech toků vyšších nadmořských výšek lze také pozorovat výraznou sezónní variabilitu závislou hlavně na změně teploty a tím podmíněné tání/zadržování vody ledovcem a lze tedy pozorovat výraznou změnu průtoku, vázanou na roční období. Sezónní změny periphytonu[1] jsou charakteristické nízkou schopností tvořit větší nárosty biomasy během léta, kdy je nejvyšší okolní teplota a tedy i největší tání a nejvyšší rychlost průtoku vody. Na podzim, když přestane ledovec odtávat, biomasa periphytonu vzroste, což koreluje s nižší teplotou a nižší rychlostí průtoku. Největší nárost biomasy lze zaznamenat od pozdního září do ledna. Sezónní variabilita typická pro

[1]společné označení nárostu na substrátu vodních prostředí; společenstvo řas, bakterií, a přidruženého organického materiálu (Lamberti and Resh 1983)

glaciální potoky je pozorovatelná i u potoků nižších nadmořských výšek, ale s výrazně vyššími výkyvy v tvorbě biomasy během celého roku (Uehlinger et al. 2010).

## 2.1 Typ Kryal

Potoky typu kryal mají ze tří uvedených typů vysokohorských toků nejvíce specifickou faunu a největší projev změny související s postupným vzdalováním se od zdroje (Ward et al. 1998). Dle Warda (1994) můžeme typ kryal od ostatních typů alpinských potoků rozlišit podle určitých typických vlastností. První vlastnost, která jistě odlišuje typ kryal od zbylých dvou typů, je teplota vody. Potok typu kryal je přímo napájený ledovcem a tedy teplota vody toku u paty ledovce dosahuje téměř 0°C i když se mírně zvyšuje s postupným odtokem od zdroje, letní teploty ve zmíněném toku nedosahují více než 4°C a tato teplota se tedy bere jako hraniční teplota pro determinaci potoku typu kryal (Hieber et al. 2001). Další pozorovaná vlastnost, je zakalení vody, které je u typu kryal výrazné, díky jeho zdroji, kterým, jak je zmíněno výše, je přímo ledovec. Třetí vlastnost je měření kolísání průtoku, které je výrazně ovlivněné ročními obdobími (jarní tání, zimní nedostatek srážek). Pro typ kryal jsou typické velké denní výkyvy hladiny, které jsou důsledkem opakujících se cyklů mrznutí a tání. Cykly mrznutí a tání neovlivňují toky jen v průběhu celého roku, ale v alpinské zóně jsou výrazné změny viditelné i na tak malém časovém úseku jako je jeden den (Burgherr 2000).

Čtvrtou vlastností je stabilita, nebo spíše nestabilita, podloží. Odtávající ledovcová voda si často z ledových vršků hledá cestu do nížiny bez jasně vyznačeného koryta (Brown et al. 2007) a vytváří tedy prvotní ramena toku, která se až po stoku ze skalnatého nestabilního podloží spojí z více pramínků do jednoho většího na stále velmi nestabilním podloží a vytvoří tak ve spárách skalnatého podkladu potok finálního kryal typu. Pátou charakteristickou vlastností je extrémně krátká vegetační sezóna (zkrácení vegetační sezóny je částečně ovlivněno nadmořskou výškou a částečně výskytem trvalé sněhové nebo ledové pokrývky), což výrazně ovlivňuje možný výskyt organismů (Milner and Petts 1994). Potoky typu kryal jsou pro své extrémní podmínky obývané jen velmi omezeným množstvím zoobentosu a jen málo řasami, i když s postupným odtokem od paty ledovce je možné sledovat relativně výraznou změnu ve druhovém složení sledovaného potoku (Burgherr 2000).

## 2.2 Typ Krenal

Potoky typu krenal mají jako zdroj podzemní vodu. Tento fakt zajišťuje potokům typu krenal nejstabilnější podmínky ze všech typů alpinských toků (Milner and Petts 1994). Vyskytují se ve všech nadmořských výškách a vyznačují se chladnějšími letními teplotami vody a teplejšími zimními teplotami vody v porovnání s ostatmími dvěma typy alpinských toků, které jsou více či méně ovlivňovány aktivním táním ledovce a sněhu v jejich okolí (Ward 1994). Teplota vody se pohybuje mezi 0°C – 9°C, je nezakalená a velmi dobře okysličená. V místě pramene potoku typu krenal se průměrná teplota vody odlišuje maximálně o 1 až 2°C oproti zbytku toku a tak díky zdroji vody potoků typu krenal je průtok i teplota víceméně konstantní a zajišťuje tak výrazně příznivější podmínky pro bohatší výskyt fauny a flóry. Dalšími faktory podporujícím větší druhovou bohatost je stabilní podloží (minimální eroze dna a břehů), absence sněhové pokrývky a ledu a bohatší flóra (větší nárosty řas a mechů) v okolí potoků typu krenal, která může i ve vysokých nadmořských výškách existovat díky teplotě vody, která v těchto potocích může dosahovat až 10°C (Ward 1994). V potocích typu krenal zoobentosu dominují larvy hmyzu (např. Chironomids)(Ward 1994) a fytobentosu dominují rozsivky a zelené řasy (Burgherr 2000).

## 2.3 Typ Rhithral

Potoky typu rhitral se nacházejí pod hranicí trvalé sněhové pokrývky a mají jako hlavní zdroj vody sezónní tání. Jsou charakterizovány měkkou, čistou vodou a typické je i delší období sběru odtokové tající vody (Poff and Ward 1989). Další charakteristikou je i větší rozmanitost teploty vody, tyto potoky se pohybují v teplotách mezi 5-10°C a často vznikají a odtékají z ledovcových jezer vzniklých po ledovcové erozi (Ward 1994). Potoky typu rhitral jsou typické kolísáním průtoku, ale nejedná se o kolísání v průběhu dne jako u potoku typu kryal ale o sezónní kolísání průtoku ovlivňované hlavně kolísáním teplot. Typ rhitral má také stabilnější podloží a rozpoznatelné vymezení oproti typu kryal z vyšších poloh. Flóra potoků typu rhitral je charakteristická výskytem mechorostů, lišejníků a je poměrně bohatá na řasová společenstva, dominujícím druhem alpinských potoků typu rhitral je řasa *Hydrurus foetidus.* V potocích typu rhitral se také často vyskytuje rybí fauna reprezentovaná hlavně lososovitými i když vyskytující druhy se mohou lišit region od regionu (Ward 1994).

## 2.4 Prostorová heterogenita

Prostorová heterogenita je ekologický faktor, který výrazně ovlivňuje distribuci druhů v rámci prostoru zkoumaného habitatu. K vyhodnocení prostorové heterogenity, na největší škále, tedy k posouzení heterogenity areálu, jsou potřeba zejména geografická data, dle kterých lze vyhodnotit jaké dopady na rozložení druhů v rámci jednoho vodního toku, mají geografické rozdíly mezi různými částmi toku. K ucelenému obrázku o takových dopadech je tedy nejlepší zkombinovat mapu rozložení druhů a fyzikálně – chemické hodnoty naměřené ve zkoumaném prostředí, z této kombinace jsme schopni dostat nejucelenější informace o rozložení druhů v rámci prostoru a faktorů, které je ovlivňují (Cooper et al. 1997). K mapování prostorové heterogenity se používá Geographical Information System (GIS), do kterého se dají zanášet data jako je například: typ podloží, hustota osídlení určitého druhu či teplota vody, z těchto dat pak GIS vytváří mapy, které sledují určitý faktor a po seskládání více takových map pak dává výsledný obrázek prostorové heterogenity zkoumaného areálu (Liebhold et al. 1993).

Prostorová heterogenita řešená v této práci se netýká celého areálu, ale nejvyšší řešená škála je celý jeden tok vyskytující se v areálu alpinské zóny. Hlavními rozdíly mezi jednotlivými úseky toku je teplota vody (graduálně se zvyšuje s odtokem od zdroje), rychlost průtoku, kolísání hladiny a zakalenost vody (záleží na ročním období; kolísání hladiny a rychlost toku se bude zvyšovat v létě kdy je rozdíl denních a nočních teplot největší, a ledovec taje/zamrzá v rámci hodin a bude se projevovat nejvýrazněji v horní a střední části toku) a v neposlední řadě možnost sedimentace a obydlení toku makro florou a faunou (nejvyšší ve spodních částech toku)(Brown et al. 2010).

Prostorovou heterogenitu lze zkoumat i na menší škále než je celý areál či (v kontextu této práce) celý tok, a to v rámci jednotlivých mikrohabitatů, vyskytujících se ve zkoumaném toku (Sparrow 1999). Lze tedy pozorovat rozdíly například mezi habitaty horních částí toku a habitaty dále od zdroje, habitaty v nižších polohách nebo dokonce i mezi jednotlivými nárosty řasových společenstev na kamenech rozložených po šířce toku, mezi nánosy substrátu v lagunách (čili v klidnějších a hlubších místech) v porovnání s exponovanými místy s dynamičtějším průtokem (Palmer and Poff 1997b). Důkaz vlivu takové heterogenity na společenstva obývající zkoumaný tok vyžaduje více dat a celkově podrobnější zaměření na toto téma, ale obecně lze říci, že členění terénu čili prostorová heterogenita v rámci areálu,

habitatu i mikrohabitatu náležícímu zkoumanému ekosystému je pro většinu organismů prospěšná a zajišťuje vyšší diverzitu druhů (Sparrow 1999).

# 3 Skupiny řas glaciálních toků

Vysokohorské toky tvoří díky svým specifickým podmínkám charakteristické biotopy, které se vyznačují skupinami na tyto podmínky přizpůsobené. Hlavní charakteristikou vysokohorských potoků jsou nízké teploty vody, které se často blíží až k 0°C (Ward 1994, Hieber et al. 2001) proto můžeme obecně nazývat společenstva těchto toků jako krenofily nebo krenobionty podle toho, zda chladné podmínky přímo vyžadují k životu, nebo jestli chladné vody preferují nad teplejšími. Organismy, které se vyskytují pouze v chladných vysokohorských potocích, jsou označovány jako krenobionti a organismy, které vysokohorské potoky preferují nad potoky nižších nadmořských výšek, jsou nazýváni krenofily (Martin and Brunke 2012, Cantonati et al. 2012). Dominantními skupinami řas vysokohorských potoku jsou zejména rozsivky a sinice (Hieber et al. 2001). Rozsivkové nárosty se projevují především vznikem mikrobiálních biofilmů, které jsou, jako společenstva mikroorganismů pevně vázané k povrchu, schopné vznikat i v rychlém a chladném proudu vysokohorských potoků a jsou tak hlavními primárními producenty takových toků (Battin et al. 2016). Některé druhy řas, přímo využívají mikrobiální biofilmy jako ideální povrch pro svůj vlastní růst, jelikož jsou tyto biofilmy dobrým zdrojem živin. Dalším důvodem, proč využít již existující nárost organismu pro svůj vlastní růst je odpadající kompetice o světlo, která by, bez schopnosti tvořit pokryvy organismů již osídlujících pozorovaný prostor, znamenala téměř neobyvatelný prostor. A tak jsou vysokohorské potoky typické řasovými nárosty buď biofilmy tvořící, nebo biofilmy využívající jako substrát pro svůj vlastní růst. Biofilmy v horských potocích jsou tvořeny především na kamenech nebo spadaném dřevě a jsou občas také nazývány „mikrobiální pokožkou“ (Battin et al. 2016).

Alpinské potoky včetně potoků v polárních oblastech jsou i přes své extrémní podmínky obývány relativně vysokým množstvím druhově rozmanitých mikrobiálních (a prokaryotických) společenstev, která jsou často důležitá nejen pro místo jejich výskytu (místní význam může být například v tom, že jde o hlavní a jediný zdroj potravy pro zooplankton, který podmiňuje výskyt další fauny), ale i pro celoplanetární fenomény, jako je například fixace dusíku. Hlavní rozdíl mezi ledovcovými potoky alpinské zóny a polární zóny je hlavně v podobě ledovce a tedy i ve výsledné podobě složení organismů v potocích z něho odtékajících (Hotaling et al. 2017).

Hotaling (2017) popisuje ledovce alpinské zóny jako velmi strmé, z čehož lze odvodit i rychlejší pohyb alpinského ledovce oproti širším a pomalejším ledovcovým pokrývkám

v polárních oblastech. Alpinské ledovce mají také vyšší schopnost akumulace sněhové pokrývky. Všechny tyto faktory ohledně ledovce, který je významným zdrojem vody toků řešených v této práci, pak přímo ovlivňují ledovcové potoky ať už ve stabilitě podloží, zdroji živin, průhlednosti vody, rychlosti toku či druhovém složení. Z těchto charakteristik lze uvozovat, že ledovcové potoky alpinské zóny budou daleko členitější oproti jejich polárním protějškům, protože si odtávající ledovcová voda musí hledat cestu dolů různými puklinami a spárami na nestálém skalnatém podloží (Brown et al. 2007).Z těchto charakteristik můžeme poté odvodit i četnost skupin vodních organismů. Které se mohou ve zkoumaných potocích vyskytovat či v nich výrazně dominovat.

## 3.1 Typické skupiny pro ekosystémy potoků vyšších poloh

Vysokohorské potoky nejsou v úplném středu zájmu výzkumných skupin, když porovnáme prostudovanost těchto lokalit oproti dalším, sladkovodním tokům světa (Ward 1994), a tak znalosti o biodiverzitě těchto specifických ekosystémů mohou být v budoucnu jen prohloubené. Z dosavadních studií alpinské zóny, byla většina provedena v Rakouských Alpách (Wilhelm et al. 2013), Italských Alpách (Rott et al. 2006, Cantonati et al. 2012), Švýcarských Alpách (Freimann et al. 2014) a v Severní Americe (Fegel et al. 2016). Z těchto studií bylo potvrzeno, že dominantní skupiny těchto extrémních toků jsou heterotrofní bakterie (Proteobacteria, Bacteroidetes (často typická střevní flóra člověka), Aktinobakteria, řasy a sinice. V těchto studiích byl také sledován trend ubývající diverzity, a to buď za A)se zvyšující se nadmořskou výškou nebo za B)se zvyšující se teplotou vody se vzdálením od ledovce (Hotaling et al. 2017). Podle Hotalinga et al. (2017) lze také odvodit, že bakteriální osídlení a celková diverzita velmi záleží na mikrohabitatech v rámci celého toku a to hlavně na typu sedimentu, chemických vlastnostech vody a možnosti tvořit biofilmy. Glaciální potoky polární zóny jsou zkoumány především na Antarktidě (Bentley 1987, Gooseff et al. 2004, McKnight et al. 2004, Stumpf et al. 2012). Antarktické ledovcové potoky jsou podle Bentleyho (1987) typické nízkým výškovým profilem celého toku a pak v rámci toku mělkým pozvolným dnem a relativně pomalu tekoucí vodou, která monotónně stéká od paty ledovce. Další typický rys polárního ledovcového potoku je v jeho vymezení, které je v polárních oblastech složitější než v alpinské zóně, glaciální potoky polárních areálů mají břehy z ledu a tečou jiným směrem, než se pohybuje ledovec. V porovnání s vysokohorskými potoky alpinské oblasti, jsou tedy většinu jejich existence v přímém kontaktu s ledovou pokrývkou a jsou výrazně širší a mělčí.

## 3.2 Abiotické a biotické faktory výskytu řas

Ledovcové toky poskytují z ekologického hlediska velmi drsné podmínky pro organismy v nich žijící. Tyto podmínky jsou, kromě těch zřejmých, jako velmi chladné teploty, například velmi limitované zdroje živin v takových tocích nebo prodloužené období tmy, které je ovlivněno trvalou sněhovou či ledovou pokrývkou vyskytující se po většinu roku (Ren et al. 2019). Navzdory těmto omezením, jsou ale ledovcové potoky obývané rozmanitými, převážně mikrobiálními společenstvy ale i druhy z řad bezobratlých a obratlovců.

Abiotické faktory, tedy faktory přímo ovlivňující, ale nesouvisející s fenomény výskytu živých organismů (např. kompetice, predace aj.), jsou v potočních habitatech (v souvislosti s výskytem řas) hlavně: rychlost průtoku – od rychlosti průtoku se odvíjí saturace kyslíkem, dostupnost světelného záření – ve vyšších polohách je sluneční záření silnější a tak organismy obývající taková prostředí musí být adaptovaní na vyšší UV, teplota vody i okolí – chladnomilné organismy, pH a dostupnost živin ve vodě (koncentrace prvků P a N) – odvíjí se od podloží, tato vlastnost lze shrnout pojmem konduktivita vody (jinými slovy vodivost) což je ukazatel celkového množství rozpuštěných minerálů obsažených ve vodě (Hieber et al. 2001).

Biotické faktory ovlivňující organismy potočních habitatů, jsou pak logicky faktory související s výskytem živých organismu, tedy rostlin a živočichů. Mezi zjevné potoční organismy ovlivňující habitaty alpinských potoků jako např. řasy a sinice jako primární producenti a na nich závislí menší bezobratlí a obratlovci, pak jsou pro habitaty alpinských potoků důležití i velcí savci, kteří se chodí k těmto tokům napojit a jsou tak zdrojem důležitých živin pro jinak velmi chudé habitaty.

## 3.3 Adaptace řasových společenstev v alpinských tocích a jejich bioindikátory

Jelikož glaciální potoky jsou ve větší či menší míře napájeny odtávajícím ledovcem či odtávající sněhovou pokrývkou, musí být řasy obývající takovéto habitaty přizpůsobené na místní extrémní podmínky. Vzhledem k tomu, že valná většina ledovců se vyskytuje ve vyšších nadmořských výškách lze odvodit, že je i vyšší intenzita sluneční záření. Hlavními faktory ovlivňující existenci organismů ve vysokohorských potocích je tedy hlavně výše zmíněná vysoká intenzita slunečního záření a UV, a již několikrát zmíněné chladné teploty

ovlivňující případné zamrzání a tání vodního prostředí jak extracelulárního tak intracelulárního (Rothschild and Mancinelli 2001). Organismy obývající takové prostředí musí být přizpůsobeny podobně jako tzv. sněžné řasy, obývající podobně extrémní podmínky (Dove et al. 1938).

Nejdůležitější adaptace mikroorganismů obývající pozorované toky vyšších nadmořských výšek je na velmi nízkou teplotu. Chladnomilné organismy se dají rozdělit do dvou skupin podle jejich teplotní tolerance a podle teploty, která odpovídá optimu pro jejich růst na psychrofilní a psychrotrofní[2]. Teplotní optimum růstu řas spadajících do kategorie psychrofilních organismů je na škále 1-10 °C, a u psychrotrofní kategorie se optimum pohybuje mezi 10-20°C (Komárek and Nedbalová 2007). Pro obě výše zmíněné skupiny organismů, díky jejich adaptacím, nejsou chladné teploty extrém, problém se ale objeví v případě, že se vyskytnou faktory zhoršující, již tak velmi drsné, podmínky, jako je například nedostatek kapalné vody nebo nedostatek živin (Gaunot 1986). Zajímavé závěry sepsal Sutton (1972), ve své studii zkoumal optima sněžné řasy druhu *Chlamydomonas nivalis* a měřil rychlost fotosyntézy při vyšších teplotách (0-25°C). Z výsledků neočekávaně vyšlo zrychlení fotosyntézy a ne očekávané snížení, a tak bylo v této studii odvozeno, že druh *Chlamydomonas nivalis* se nevyskytuje striktně v okolí sněhové nebo ledové pokrývky, jak bylo dříve myšleno, ale že pravděpodobně alpinské prostředí s nižší kompeticí jak o prostor, tak o světlo, obsadil sekundárně a adaptoval se na místní horší podmínky. Porovnání s druhy přímo sněžných řas je uváděno pro ukázku adaptace na chladné teploty (často) efemérních biotopů.

Další adaptací na život v blízkosti ledových plání vyšších nadmořských výšek, je akumulace sekundárních karotenoidů. Karotenoidy jsou pigmenty organického původu dělící se do dvou skupin, podle obsahu kyslíku v jejich molekulách: xantofyly (s kyslíkem) a karoteny (bez kyslíku). Karotenoidy jsou zodpovědné za žluté, oranžové a červené zbarvení buněk, které je obsahují (Britton 1995) a v místě výskytu pak vytvářejí obrovské, červeně zbarvené nárosty. Tyto řasové trávníky pak dokreslují ledovcovou krajinu nečekaně zbarvenými ostrůvky života. Výzkum pigmentu právě u sněžných řas zkoumal Bidigare a kolektiv (1993), kteří přišli na to, že nejvýznamnějším karotenoidem izolovaným ze zkoumaných organismů je astaxanthin. Pigment astaxanthin zajišťuje výrazné červené zabarvení buňky (např. již výše

[2] Psychrofilní a psychrotrofní – jinými slovy chladnomilný, specifičtější rozdělení než dříve zmíněný krenobiont a krenofil. U rozdělení na psychrofily a psychrotrofy je důležitá přesná teplota okolního prostředí.

zmíněného druhu *Chlamydomonas nivalis*). Funkce karotenoidů v buňkách sněžných řas je hlavně ochranná, jelikož limitují množství světla, které je nadále zpracováváno dalšími pigmenty fotosyntetického aparátu a tak díky jejich schopnosti absorpce fotonů zabraňují fotoinhibici a jakékoliv dalšího poškození buňky způsobené nadměrným ozářením (Bidigare et al. 1993).

Neopomenutelnou adaptací na život v extrémně chladných podmínkách je i obsah a složení mastných kyselin uvnitř buněk pozorovaných řas, které tvoří ojedinělé pokryvy polárních planin. Lipidy jsou jednou z hlavních složek buněčných membrán, a hlavními membránovými lipidy je skupina nazývaná fosfolipidy. Lipidy tvořící membrány rozdělující jednotlivé kompartmenty buněk mají dva hlavní úseky, hydrofilní hlavičku a hydrofobní konec. Řetězce lipidových molekul se k sobě přikládají (přítomnost dvojité vazby toto přikládání znesnadňuje) a zajišťují tak fluiditu membrány (Alberts et al. 2004).

# 4 Periphyton alpinské zóny

Největší rozdíl mezi nárosty řas v alpinské zóně a v polárních oblastech je v možnosti existence makroskopických nárostů. Ve vysokohorských potocích alpinského areálu, jsou sice podmínky extrémní ale v porovnání s podmínkami polárních areálů znatelně mírnější. Tento fakt je podpořený výskytem makroskopických nárostu zlativky (třída Chrysophycae) *Hydrurus foetidus,* která dominuje makroskopické flóře alpinských vysokohorských potoků (Hieber et al. 2001), ale ve vysokohorských potocích polárních oblastí už tuto řasu nenajdeme. V polárních areálech najdeme především rozsivková společenstva, nebo mikroskopické nárosty zelených řas. Výjimkou potvrzující pravidlo v polárních oblastech pak mohou být makroskopické nárosty řasy *Prasiola* sp.(třída Trebouxiophyceae), která prospívá jak v terestrických habitatech omývanými chladnou vodou Atlantiku tak v habitatech polárních potoků a vytváří tak překvapivě zelené scenérie ledových plání (Jacob et al. 1991).

Když se potom podíváme zpět na toky proudících alpinskou zónou, naprostou převahu zde mají kolonie sinic, které svými, mnohdy na cyanotoxin bohatými stélkami tvoří zelené až tmavohnědé slizové nárosty. Druhy tvořící typickou a jedinečnou flóru alpinských potoků tak ze skupiny sinic tvoří především druhy patřící mezi Chrococcales a Oscillatoriales (Cantonati et al. 2012).

Pro zkoumání skupin typických pro potoky alpinské zóny, je důležité se dívat na prostorovou heterogenitu (podrobněji probíraná v kapitole 2.4), která se po směru odtoku potoků od zdroje do nížin výrazně mění a znatelně tak ovlivňuje druhové rozložení fauny i flóry pozorovaných oblastí. Části toku ve vyšších nadmořských výškách a blízko zdroji jsou nazývané jako pramenné stružky a jsou charakteristické oligotrofií, rychlým průtokem a střední konduktivitou[3].

Z výše zmíněných faktorů alpinských potoků lze odvodit i hojný výskyt řádu sinic Chroococcales a sinic přizpůsobených rychlému průtoku jako je např. druh *Tapinothrix varians* (Cantonati et al. 2012). Postupný odtok potoku do nižších nadmořských výšek je charakterizován větším zastíněním, vyšší konduktivitou a celkově vyšším obsahem živin, což

[3] hodnotou vyjádřená konduktivita uvádí přibližnou míru koncentrace elektrolytů ve vodě. To odpovídá iontově rozpuštěným látkám, které se dostanou do vody cestou z vyšších nadmořských výšek do nižších především v podloží a těch, co se (opadem) rozpustí (kromě plynů). Vyjadřuje tedy nepřímo obsah minerálních látek (solí), které se ve vodě nacházejí (Edwards 1977, Caspers and Whitton 1978).

je odvozeno od faktu, že potok protéká areálem, který umožňuje hojnější výskyt bohaté fauny (přidávají se organismy žijící v méně extrémních podmínkách v dolních částech toku, oproti nestabilním stružkám položených vysoko v horách) a flóry (přidává se výskyt nejen bylinného a keřového patra v okolí toku ale už i stromového). V této části toku se tedy díky podmínkám vyskytují stínomilné sinice, a začnou se sporadicky vyskytovat zástupci ruduch (Cantonati et al. 2012) i když jsou obecně ruduchy v alpinských tocích spíše vzácné (Rott et al. 2006).

Rozsivková společenstva toků alpinské zóny pak velmi dobře popisuje ve své studii z Italských alp (Cantonati et al. 2012). Cantonati rozděluje alpinské potoky podrobněji do pěti typů na základě poměru druhů reagujících na podloží toku. Všechny tyto potoky jsou tzv. rheokreny[4] a majorita zkoumaných lokalit (více než 120 potoků) byla na vápencovém podloží. Typy Alpských potoků jsou dle Cantonatiho následovné: Typ 1) Rheokreny/ Vápencové podloží; Typ 2) Rheokren/ Vápencové podloží/ Zastínění nebo obohacení $NO_3^-$; Typ 3) Dobře okysličené rheokreny/ Pískovcové podloží/ Konduktivita v normálu; Typ 4) Rheokreny/ Vápencové podloží/ Nižší konduktivita nebo sezónní vysychání; Typ 5) Hygropektrické[5] rheokreny/ Vápencové podloží; Typ 6) Helokreny[6] a Limnokreny[7]/ Pískovcové podloží/ Nízká alkalinita; Typ 7) Železité prameny – Tento typ nebude rozebírán podrobněji, protože v uvedené studii bylo zjištěno, že železité prameny vyšších nadmořských výšek jsou velmi chudé na rozsivky a postrádají druhovou rozmanitost, která je třeba k podrobnějšímu zkoumání.

V **tabulce č. 1** jsou přehledně shrnuty typy Alpských potoků a jejich typičtí zástupci z dominující skupiny rozsivek.

[4] Rheokren= Výstupní pramen

[5] Hygropetrický habitat je tvořený kamenným podložím, přes které přetéká tenká vrstva vody. Jsou to velmi pomalé a malé pramínky, často vytvářeny při sezónním tání.

[6] Helokren= Mokřadní pramen

[7] Limnokren= Pánevní pramen

Tabulka 1: Rozsivkové složení druhů alpinských potoků

| Typ potoku | Charakteristické druhy rozsivek pro daný typ potoku |
|---|---|
| **Typ 1)** | *Nejdůležitějším rodem byl: Achnanthidium (Achnanthidium pyrenaicum, Achnanthidium lineare, Achnanthidium pfister), Gomphonema elegantissimum, Nitzschia fonticola* |
| **Typ 2)** | Nejdůležitějším rodem byl: *Cocconeis (Cocconeis placentula var. euglypta, Cocconeis placentula var. lineata, Cocconeis pseudolineata), Amphora pediculus, Amphora inariensis, Caloneis fontinalis, Eunotia arcubus* |
| **Typ 3)** | Nejdůležitějším rodem byl*: Diatoma (Diatoma mesodon, Diatoma hyemalis), Eunotia minor, Encyonema minutum, Navicula exilis, Planothidium lanceolatum, Eunotia minor, Meridion constrictum* |
| **Typ 4)** | Nejdůležitějším rodem byl: *Diadesmis (Diadesmis perpusilla, Diadesmis contenta), Planothidium frequentissimum, Meridion circulare* |
| **Typ 5)** | Nejdůležitějším rodem byl: *Encyonopsis (Encyonopsis microcephala, Encyonopsis minuta, Encyonopsis krammeri, Encyonopsis cesatii)*<br>*Delicata (Delicata delicatula, Delicata minuta), Gomphonema lateripunctatum, Denticula, Cymbopleura austriaca, Fragilaria distans, Achnanthes trinodis* |
| **Typ 6)** | Nejdůležitějším rodem byl: *Eunotia (Eunotia exigua, Eunotia boreoalpina), Frustulia crassinervia, Tabellaria flocculosa, Psammothidium acidoclinatum, Psammothidium Acidoclinatum* |

(data převzaná z (Cantonati et al. 2012, Rott et al. 2006))

## 4.1 Autekologie vybraných druhů

Z tabulky č. 1 je pro dokreslení podmínek vysokohorských potoků vybráno několik druhů (bioindikátorů) náležící do nejdůležitějších rodů z typů zmíněných toků se stručně popsanou autekologií.

- *Achnanthidium lineare* – sladkovodní druh který se vyskytuje především v bentosu neutrálních až slabě kyselých vod. Typickým prostředím je oligotrofická dobře a stále saturovaná, chladná a rychlá voda potoků vyšších nadmořských výšek. Velikost frustule se pohybuje mezi 11-100 μm3 a tento rozsivkový druh se řadí mezi středně pohyblivé (Potapova and Hamilton 2007). Výskyt v potocích typu 1) odpovídá preferenci vápencového podloží, čehož jsou indikátory, stejně jako oligotrofických vod.

- *Diatoma mesodon* – sladkovodní druh, kterému se daří v chladných vodách horských potoků, kterých je indikátorem. Tomuto druhu se daří v potocích s mechovými nárosty v různých nadmořských výškách, ale dominuje oligotrofickým vodním tokům s nízkou konduktivitou bez větší antropogenní disturbance (Bishop and Spaulding 2015). Velikost frustule záleží na mnoha faktorech, a proto je uváděn rozsah 100-10000 μm3. Tento druh se řadí mezi nepohyblivé druhy a druhy netvořící rozsáhlé kolonie.
- *Eunotia boreoalpina* – sladkovodní bentický druh neutrálních až kyselých toků (Gaiser and Johansen 2000), jejichž je indikátorem. V bentosu se vyskytuje v rychlých, dobře okysličených vodách a druhé typické místo výskytu jsou vlhké mechové habitaty. Velikost frustule je stejně jako u druhu *Diatoma mesodon* 100-10000 μm3 a odráží tedy velký vliv okolních faktorů na růst buňky. Tento druh je mírně pohyblivý a nepřichytává se k podloží

Při výzkumu a klasifikaci potoků vyšších nadmořských výšek, se využití rozsivkových společenstev ukázalo jako velice úspěšné, jelikož každý z typu potoku zmíněný v tabulce výše měl typově specifickou druhovou skladbu, která se odlišovala od skladeb společenstva ostatních typů (Rott et al. 2006). Specifické druhové skladby (se specifickými bioindikátory) lze tedy využívat k měření kontrolních hodnot pro vyhodnocování biotických a abiotických podmínek vysokohorských toků a lze z nich i usuzovat ekologické fenomény a metodické faktory z environmentálního sekvenování. S narůstající pozorností věnované alpinským potokům, jsou i nadále objevované nové rozsivkové druhy a to i, do dnešního dne, ve velmi dobře prozkoumaných geografických areálech a otvírají tak dveře dalším možným výzkumům a prohlubování znalostí o těchto specifických alpinských habitatech (Cantonati et al. 2012).

Klasifikace stavu toků vyšších nadmořských výšek založená na mapování rozsivkových společenstev vykazuje určitou podobnost s klasifikací založenou na mapování bentických řas a sinic (i s makroskopickými nárosty)(Cantonati et al. 2012) z čehož vyplívá, že paralelní výzkum obou skupin, nebo následná spolupráce výzkumných týmů při vyhodnocování výsledků, by jistě nesla své ovoce.

# 5 Závěr

Cílem předložené práce bylo kriticky zhodnotit studie zabývající se habitaty glaciálních potoků se zaměřením na bentická společenstva řas a jejich život ovlivněný vodou odtávající z ledovce.

První část pojednává o třech různých typech glaciálních toků v alpinské zóně, rozdělených a pojmenovaných podle pramenného zdroje, podle většího či menšího vlivu ledovce. Diskutovány jsou geografická a hydrologická specifika, která staví toky vysokohorských areálů na zajímavou úroveň v hydrobiologickém výzkumu. I když tento výzkum může být v budoucnosti jen prohlouben, zjištění faktu, že dlouhodobější prodloužení periody tající fáze ledovcového masivu radikálně zvýší hladinu (omezený výskyt více exponovaných ploch v rámci toku), odtok (odnos organického a jiného materiálu směrem po proudu toku do nižších poloh) a pokles možných nárostů biomasy v takových tocích (Uehlinger et al. 2010), je extrémně důležitý při výzkumu probíhajících klimatických změn, ze kterého se předpokládá postupné oteplování planety Země (IPCC 2007).

Alpinské potoky jsou typické velmi komplexní prostorovou heterogenitou, která výrazně odlišuje nejen horní a dolní úseky alpinských toků, ale je viditelná i na daleko menší škále, jako jsou například jednotlivé nárosty v rámci kamene umístěného v proudu tak, že různé rozmístění exponovaných míst zajištuje velkou diverzitu (Brown et al. 2010, Palmer and Poff 1997). Výrazná prostorová heterogenita alpinských toků tak zajišťuje vyšší druhovou diverzitu těchto toků než by se dalo očekávat a je tak zkoumanému ekosystému celkově prospěšná. (Sparrow 1999)

Probírané skupiny řas glaciálních toků čítají zástupce druhů obecně nazývanými jako krenobiont nebo krenofil, podle nutnosti potřeby chladných vod vysokohorských glaciálních toků (Martin and Brunke 2012). Mezi dominující skupiny sledovaných toků (majorita použité literatury pokrývá studie z Italských, Švýcarských a Rakouských Alp) patří rozsivky a sinice a typický je výskyt biofilmů, pokrývající kamenité koryto (Hieber et al. 2001, Battin et al. 2016). Rozsivky, které vodnímu habitatu glaciálních potoků často dominují (Ward 1994), jsou tak důležitými aktéry ve významných lokálních i celoplanetárních fenoménech (Hotaling et al. 2017).

V souvislosti s rozsivkami jsou zmíněné abiotické faktory jejich výskytu. Takovými je například rychlost průtoku alpinských potoků, která je vysoká a zajišťuje tak i výraznou

saturaci kyslíkem ale i velký odnos, což jsou všechno typické znaky vysokohorských potoků. Dalšími faktory jsou nízké teploty, vyšší sluneční záření nebo hodnoty konduktivity vody, která ukazuje celkové množství rozpuštěných minerálu ve vodě (Hieber et al. 2001). Organismy obývající tyto habitaty, se pak museli adaptovat na zmíněné podmínky, vyvinula se adaptace na chlad a některé druhy dokonce bez chladných teplot vůbec nepřežijí. Další zajímavou adaptací se akumulace sekundárních karotenoidů, především pigmentu astaxanthinu, funkce těchto pigmentů je ochrana proti fotoinhibici (Bidigare et al. 1993).

Typickými organismy žijícími v ledových vodách alpinských potoků je pak například zlativka (třída Chrysophyceae) Hydrurus foetidus (Hieber et al. 2001) nebo sinice *Tapinothrix varians* (Cantonati et al. 2012). Oba tyto druhy jsou přizpůsobené drsným podmínkám exponovaným potokům alpinských habitatů, jakmile potok odteče do nižších poloh, druhové složení se změní také díky většímu zastínění nebo zvýšení teploty a zpomalení proudu vody (Rott et al. 2006). Z rozsivkových rodů stojí za zmínku *Achnanthidium, Diatoma* nebo *Eunotia.* Které jsou všechny typické svým výskytem v dobře saturovaných, chladných a rychlých vodách vysokohorských potoků alpinské zóny.

Pro co nejucelenější náhled mé práce na současný výzkum vysokohorských glaciálních potoku, jsou v práci okrajově zmíněny i glaciální potoky polárních oblastí (Izaguirre and Pizarro 1998, Gooseff et al. 2002). Výzkum glaciálních potoků alpinské i polární zóny má do budoucna velký potenciál a i tak je to stále velmi neprostudovaný habitat (Ward 1994). Z použité literatury vyplývalo, že působení klimatických změn na habitaty alpinských potoků je nejlépe pozorovatelné na osídlení toku a druhovém složení. Prodloužené a intenzivnější období ledovcového tání se negativně projeví na tvorbě biomasy sledovaných toků, jelikož se prodlouží doba vegetačního klidu, kdy organismy čekají na příhodnější podmínky pro svůj růst (nižší hladina vody, pomalejší průtok, menší zakalení) které nenastávají tak brzy jako při pozorování stejných lokalit před několika lety. Klimatické změny mají tedy tendence spíše pozorovaným organismům (potažmo celým ekosystémům) škodit nežli přilepšovat příznivějšími podmínkami např. vyšší okolní teplotou a vyšší teplotou vodního toku nebo rychlejším a silnějším průtokem (Uehlinger et al. 2010).

Věřím, že investováním do výzkumu glaciálních potoků a jejich okolí a prohlubováním znalostí o těchto unikátních habitatech, získá moderní věda odpověď aspoň na některé otázky týkající se klimatických změn a co od nich v budoucnu očekávat.

# 6 Reference


Alberts, B., Bray, D. & Johnson, A. (2004): Základy buněčné biologie: úvod do molekulární biologie buňky, český překlad, *Esparo publishing*, pp. 384-369

Battin, T.J., Besemer, K., Bengtsson, M.M., Romani, A.M. & Packmann, A.I. 2016. The ecology and biogeochemistry of stream biofilms. *Nat. Rev. Microbiol.* 14:251–63.

Bentley, C.R. 1987. Antartic ice streams: a review. *J. Geophys. Res. vol. 92, no. B9, pages 8843-8858,*. 92:8843–58.

Bidigare, R.R., Ondrusek, M.E., Kennicutt, M.C., Iturriaga, R., Harvey, H.R., Hoham, R.W. & Macko, S.A. 1993. Evidence for a photoprotective function for secondary carotenoids of snow algae. *J. Phycol.* 29:427–34.

Birk, S., Bonne, W., Borja, A., Brucet, S., Courrat, A., Poikane, S., Solimini, A. et al. 2012. Three hundred ways to assess Europe ' s surface waters : An almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive. *Ecol. Indic.* 18:31–41.

Bishop, I. & Spaulding, S.A. 2015. Tetracyclus hinziae (Bacillariophyta), a new species from the central Cascade Mountains (WA, USA). *Phytotaxa*. 205:197–204.

Bondaruk, J., Janson, E., Wysocka, M. & Chałupnik, S. 2015. Identification of hazards for water environment in the Upper Silesian Coal Basin caused by the discharge of salt mine water containing particularly harmful substances and radionuclides. *Central Mining Institute in Katowice.*

Brighenti, S., Tolotti, M., Cristina, M., Wharton, G., Pusch, M.T. & Bertoldi, W. 2019. Science of the Total Environment Ecosystem shifts in Alpine streams under glacier retreat and rock glacier thaw : A review. *Sci. Total Environ.* 675:542–59.

Britton, G., 1551–1558. doi:10.1096/fasebj.9.15.8529834 1995. Structure and properties of carotenoids in relation to function. *FASEB J.* 1551–8.

Brown, L. E. Hannah, D.M. & Milner, A.. 2007. Vulnerability of alpine stream biodiversity to shrinking glaciers and snowpacks. *Glob. Chang. Biol.* 13(5):958–66.

Brown, L.E., Milner, A.M. & Hannah, D.M. 2010. Predicting river ecosystem response to glacial meltwater dynamics: A case study of quantitative water sourcing and glaciality

index approaches. *Aquat. Sci.* 72:325–34.

Burgherr, P. 2000. Spatio-temporal community patterns of lotic zoobenthos across habitat gradients in an alpine glacial stream ecosystem. *Diss. ETH*. 138.

Cantonati, M., Angeli, N., Bertuzzi, E., Spitale, D. & Lange-Bertalot, H. 2012. Diatoms in springs of the Alps: Spring types, environmental determinants, and substratum. *Freshw. Sci.* 31:499–524.

Cantonati, M., Gerecke, R. & Bertuzzi, E. 2006. Springs of the Alps - Sensitive ecosystems to environmental change: *From biodiversity assessments to long-term studies.* 59–96 pp.

Cantonati, M., Rott, E., Spitale, D., Angeli, N., Komárek, J.. et al. 1899. Are benthic algae related to spring types ? 31:481–98.

Caspers, H. & Whitton, E.B.A. 1978. River Ecology. *Stud. Ecol. Vol. 2. -Oxford, London, Edinburgh, Melb. Blackwell Sci. Publ.* 2:725.

Cooper, S.D., Barmuta, L., Sarnelle, O., Kratz, K. & Diehl, S. 1997. Quantifying spatial heterogeneity in streams. *J. North Am. Benthol. Soc.* 16:174–88.

Douglas, M.S. V, Hamilton, P.B., Pienitz, R. & Smol, J.P. 2004. Long-term Environmental Change in Arctic and Antarctic Lakes. *Springer*, pp. 117–57.

Dove, A., Heldmann, J., Mckay, C. & Toon, O.B. 1938. Physics of a Thick Seasonal Snowpack with Possible Implications for Snow Algae. *Arctic, Antarct. Alp. Res.* 44:36–49.

Edwards, R.W. 1977. Book reviews. *In Whitton, B. A. 1975, River Ecology*. pp. 565–6.

Fegel, T.S., Baron, J.S., Fountain, A.G., Johnson, G.F. & Hall, E.K. 2016. Signatures of Glaciers and Rock Glaciers. *J. Geophys. Res. Biogeosciences*. 121:919–32.

Freimann, R., Bürgmann, H., Findlay, S.E.G. & Robinson, C.T. 2014. Spatio-temporal patterns of major bacterial groups in alpine waters. *PLoS One*. 9.

Gaiser, E.E. & Johansen, J. 2000. Freshwater diatoms from carolina bays and other isolated wetlands on the atlantic coastal plain of south carolina, U.S.A., with descriptions of seven taxa new to science. *Diatom Res.* 15:75–130.

Gaunot, A.-M. 1986. Psychrophilic and psychrotrophic microorganisms. *Experientia*. 42:1192–7.

Gooseff, M.N., Mcknight, D.M., Lyons, W.B. & Blum, A.E. 2002. Weathering reactions and hyporheic exchange controls on stream water chemistry in a glacial meltwater stream in the McMurdo Dry Valleys. 38.

Gooseff, M.N., McKnight, D.M. & Runkel, R.L. 2004. Reach-scale cation exchange controls on major ion chemistry of an Antarctic glacial meltwater stream. *Aquat. Geochemistry*. 10:221–38.

Hieber, M., Robinson, C.T., Rushforth, S.R. & Uehlinger, U. 2001. Algal communities associated with different alpine stream types. *Arctic, Antarct. Alp. Res.* 33:447–56.

Hodgson, D.A., Doran, P.T., Roberts, D. & McMinn, A. 2007. Paleolimnological studies from the Antartic and Subantartic islands. *In Long-Term Environmental Change in Arctic and Antarctic Lakes*. pp. 419–74.

Hotaling, S., Hood, E. & Hamilton, T.L. 2017. Microbial ecology of mountain glacier ecosystems: biodiversity, ecological connections and implications of a warming climate. *Environ. Microbiol.* 19:2935–48.

IPCC 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. *Rep. Intergov. Panel Clim. Chang.* 21.

Izaguirre, I., Pizarro, H. 1998. Epilithic algae in a glacial stream at Hope Bay ( Antarctica ). 24–31.

Jacob, A., Kirst, G.O., Wiencke, C. & Lehmann, H. 1991. Physiological Responses of the Antarctic Green Alga Prasiola crispa ssp. antarctica to Salinity Stress. *J. Plant Physiol.* 139:57–62.

Komárek, J. & Nedbalová, L. 2007. Green Cryosestic Algae. *Algae and Cyanobacteria in Extreme Environments*. pp. 321–42.

Lamberti, G.A. & Resh, V.H. 1983. Stream periphyton and insect herbivores: an experimental study of grazing by a caddisfly population. *Ecology*. 64:1124–35.

Liebhold, A.M., Rossi, R.E. & Kemp, W.P. 1993. Geostatistics and Geographic Information systems in applied insect Ecology. *Annu. Rev. Entomol.* 38:303–27.

Lin, L., Gao, M., Liu, J., Wang, J., Wang, S., Chen, X. & Liu, H. 2020. Understanding the effects of climate warming on streamflow and active groundwater storage in an alpine

catchment: the upper Lhasa River. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 24:1145–57.

Lobo, E.A., Heinrich, C.G., Schuch, M., Wetzel, C.E. & Ector, L. 2016. Diatoms as Bioindicators in Rivers.

Martin, P. & Brunke, M. 2012. Faunal typology of lowland springs in northern Germany. *Freshw. Sci.* 31:542–62.

Marzeion, B., Jarosch, A.H. & Gregory, J.M. 2014. Feedbacks and mechanisms affecting the global sensitivity of glaciers to climate change. *Cryosphere*. 8:59–71.

McKnight, D.M., Runkel, R.L., Tate, C.M., Duff, J.H. & Moorhead, D.L. 2004. Inorganic N and P dynamics of Antarctic glacial meltwater streams as controlled by hyporheic exchange and benthic autotrophic communities. *J. North Am. Benthol. Soc.* 23:171–88.

Milner, A.M. & Petts, G.E. 1994. Glacial rivers: physical habitat and ecology. *Freshw. Biol.* 32:295–307.

Palmer, M.A. & Poff, L.N. 1997a. The Influence of Environmental Heterogeneity on Patterns and Processes in Streams. *J. North Am. Benthol. Soc.* 16:169–73.

Palmer, M.A. & Poff, N.L. 1997b. The Influence of Environmental Heterogeneity on Patterns and Processes in Streams. *J. North Am. Benthol. Soc.* 16:169–73.

Pawlowski, J., Kelly-quinn, M., Altermatt, F., Apothéloz-perret-gentil, L., Beja, P., Boggero, A., Borja, A. et al. 2018. Science of the Total Environment The future of biotic indices in the ecogenomic era : Integrating ( e ) DNA metabarcoding in biological assessment of aquatic ecosystems. 638:1295–310.

Phillips, D.J.H. & Rainbow, P.S. 1993. Biomonitoring of Trace Aquatic Contaminants.

Poff, N.L. & Ward, J. V. 1989. Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46:1805–18.

Potapova, M. & Hamilton, P.B. 2007. Morphological and ecological variation within the Achnanthidium minutissimum (Bacillariophyceae) species complex. *J. Phycol.* 43:561–75.

Ren, Z., Martyniuk, N., Oleksy, I.A., Swain, A. & Hotaling, S. 2019. Ecological stoichiometry of the mountain cryosphere. *Front. Ecol. Evol.* 7:1–16.

Rothschild, L.J. & Mancinelli, R.L. 2001. Life in extreme environments. *Nature*. 409:1092–101.

Rott, E., Cantonati, M., Füreder, L. & Pfister, P. 2006. Benthic algae in high altitude streams of the Alps - A neglected component of the aquatic biota. *Hydrobiologia*. 562:195–216.

Sparrow, A.D. 1999. A heterogeneity of heterogeneities. *Elsevier Sci. Ltd.* 5347:422–3.

Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M.M.B., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A. et al. 2013. Climate change 2013 the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Clim. Chang. 2013 Phys. Sci. Basis Work. Gr. I Contrib. to Fifth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang.* 9781107057:1–1535.

Stumpf, A.R., Elwood Madden, M.E., Soreghan, G.S., Hall, B.L., Keiser, L.J. & Marra, K.R. 2012. Glacier meltwater stream chemistry in Wright and Taylor Valleys, Antarctica: Significant roles of drift, dust and biological processes in chemical weathering in a polar climate. *Chem. Geol.* 322–323:79–90.

Sutton, E.A. 1972. The physiology and life histories of selected cryophytes of the Pacific Northwest. *Corvallis: Oregon State University*, 98 p p.

Uehlinger, U., Robinson, C.T., Hieber, M. & Zah, R. 2010. The physico-chemical habitat template for periphyton in alpine glacial streams under a changing climate. *Hydrobiologia*. 657:107–21.

Ward, J. V. 1994. Ecology of alpine streams. *Freshw. Biol.* 32:277–94.

Ward, J. V., Blugherr, P., Gessner, M.O., Malard, F., Robinson, C.T., Tockner, K., Uehlinger, U. et al. 1998. The Val Roseg project: Habitat heterogeneity and connectivity gradients in a glacial flood-plain system. *IAHS-AISH Publ.* 248:425–32.

Wilhelm, L., Singer, G.A., Fasching, C., Battin, T.J. & Besemer, K. 2013. Microbial biodiversity in glacier-fed streams. *ISME J.* 7:1651–60.

**OBRÁZKY**

Obr.č. 1: Lin, L., Gao, M., Liu, J., Wang, J., Wang, S., Chen, X. & Liu, H. 2020. Understanding the effects of climate warming on streamflow and active groundwater

storage in an alpine catchment: the upper Lhasa River. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 24:1145–57.

Obr.č. 2: převzato a upraveno z Ward, J. V. 1994. Ecology of alpine streams. *Freshw. Biol.* 32:277–94

# 7 Seznam obrázků a tabulek

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Převzato z Lin et al. 2020 ..... 9
Obrázek 2: převzato z Ward 1994 ..... 12

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozsivkové složení druhů alpinských potoků ..... 24