

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Přírodovědecká Fakulta

**Nevyvinuté půdy suťových polí Vysokých Tater:
množství, chemismus a ekologický význam**

Bakalářská práce

Jan Šmejkal

Školitel: RNDr. Jiří Kaňa, PhD.

České Budějovice 2019

Šmejkal, J. 2019: Nevyvinuté půdy suťových polí Vysokých Tater: množství, chemismus a ekologický význam [Undeveloped soils of scree slopes in Tatra mountains: quantity, chemical regime and ecological importance; Bc. Thesis in Czech] -31 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace: Bakalářská práce se zabývá půdami suťových polí v alpínských ekosystémech Vysokých Tater. Zaměřuje se na procesy zvětrávání a vývoje půd, kterými se do prostředí uvolňuje fosfor a další živiny. Práce obsahuje návrh výzkumného projektu, který řeší množství a chemismus půd suťových polí v povodí Ľadového plesa s bližším zaměřením na sezónní dynamiku fosforu a dalších živin.

Annotation: Bachelor's thesis deals with soils of scree slopes in alpine ecosystems of Tatra mountains. It focuses on processes of rock weathering and soil development which lead to release of phosphorus and other nutrients. This thesis contains a proposal of research project focused on quantity and chemical regime of scree slope soils in Ľadové lake catchment with special interest in seasonal dynamics of phosphorus and other nutrients.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. V platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

České Budějovice, 17. 4. 2019

.....

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat především Jirkovi Kaňovi za vedení této práce a čas, který mi obětoval. Dále bych chtěl poděkovat kolegům z Katedry biologie ekosystémů za hodnotné rady k dokončení práce. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu.

Obsah

1.	Literární rešerše.....	1
1.1	Úvod.....	1
1.2	Zvětrávání	1
1.2.1	Fyzikální zvětrávání	2
1.2.2	Chemické zvětrávání	4
1.2.3	Biologické zvětrávání	6
1.2.4	Měření rychlosti a stupně zvětrávání.....	11
1.3	Suťová pole.....	11
1.3.1	Půdy suťových polí.....	12
1.3.2	Tvorba půdy v alpinských ekosystémech.....	13
1.3.3	Význam půd suťových polí pro chemismus a oživení tatranských jezer	15
2.	Projektová část	19
2.1	Úvod.....	19
2.2	Cíle projektu	19
2.3	Aktivity projektu.....	19
2.3.1	Analýza GIS (cíl 1).....	19
2.3.2	Terénní odběry a laboratorní analýzy vzorků půd (cíle 2 a 3).....	20
2.4	Metodika	20
2.5	Geologická charakteristika Tater	20
2.5.1	Výběr odběrových míst	20
2.5.2	Provedení sondy a odběru vzorků	21
2.5.3	Výpočet celkového množství půdy	21
2.5.4	Metodika laboratorních stanovení	22
2.5.5	Rozsah laboratorních analýz.....	22
2.6	Harmonogram projektu.....	23
2.7	Rozpočet projektu	23

3. Literatura.....	25
--------------------	----

1. Literární rešerše

1.1 Úvod

Zvětráváním hornin jsou do prostředí uvolňovány živiny a prvky důležité pro fungování ekosystémů. Tento proces je zásadní hlavně v živinami chudých, antropicky minimálně ovlivněných a iniciálních stádiích ekosystémů. Díky srážkám a povrchovému i podpovrchovému splachu má chemismus zvětrávání hornin a vznik půd v těchto oblastech zásadní význam i pro vývoj vodních ekosystémů. V alpinských vysokohorských ekosystémech Vysokých Tater jsou látky uvolněné z hornin hlavním zdrojem živin pro ledovcová jezera. V povodí těchto vodních ploch jsou často zastoupeny svahy pokryté sutí, pod kterými vzniká půda. Půdotvorný proces je ale na morénách vzniklých ledovcovou činností limitován minimálním vstupem primární organické hmoty, nízkými teplotami a krátkým časem, který uplynul od ústupu horského ledovce po poslední době ledové. Studium chemických procesů probíhajících při rozpadu hornin a vzniku půd nám může pomoci pochopit, jak živiny a prvky z litosféry vstupují do terestrických a následně i vodních ekosystémů.

Cílem literární rešerše je poskytnout přehled současného poznání v oblasti zvětrávání se zaměřením na granitoidní horniny jako zdroj živin pro půdy suťových polí vznikající v alpinských horských ekosystémech. Dalším cílem je zmapovat možnosti studia těchto útvarů se zaměřením na chemismus a dynamiku procesů probíhajících v iniciálních stádiích vývoje půd.

1.2 Zvětrávání

Zvětrávání je proces přeměn původní vyvřelé horniny vlivem fyzikálních a chemických jevů, které vedou ke vzniku sekundárních materiálů jako jsou štěrky, písky a jíly. Ty pak stojí na počátku tvorby půd, nebo se z nich vlivem tlaku, teploty a času mohou stát metamorfované horniny. Obvykle se rozlišují dva druhy tohoto mechanismu: zvětrávání fyzikální, které je spjato především s tepelnou roztažností různých látek a zvětrávání chemické, v rámci něhož dochází k chemickým reakcím vedoucím nejen k oddělení částí horninového masivu, ale i k vzniku nových sloučenin. Tyto jevy ve většině případů působí souběžně a navzájem se ovlivňují. Výsledná rychlost a povaha zvětrávání se na povrchu Země liší zejména v závislosti na druhu zvětrávané horniny a zeměpisné poloze, kde se zvětrávací proces odehrává. Klima

určuje chod teplot a hydrický režim, které jsou pro většinu druhů zvětrávání klíčové (Brady *et* Weil, 2017; Kachlík *et* Chlupáč, 2001).

1.2.1 Fyzikální zvětrávání

Zvětrávání vlivem tepelné roztažnosti probíhá díky změnám teploty vzduchu a povrchu Země v závislosti na ročním období a denní době. Tyto změny probíhají opakovaně a vedou k rozrušení materiálu. Podmínkou únavy materiálu vlivem střídání teplot je heterogenní složení zvětrávaného materiálu. Při zahřívání nebo chladnutí jednotlivé krystaly různých minerálů, ze kterých je hornina složena zvětšují, respektive zmenšují svůj objem různě, čímž vzniká pnutí na hranici minerálů a dochází eventuelně k vzniku praskliny na pomezí krystalů různých minerálů (Hall, 1999).

Konkrétními hodnotami tepelné roztažnosti se zabývali Johnson *et* Parsons (1944 *in* Hall, 1999), když testovali 123 materiálů v rozsahu teplot $-20 - 60$ °C, přičemž zjistili, že chování materiálu při zahřátí/chladnutí je ovlivněno orientací krystalů. Minerály o stejném chemickém složení mohou mít díky vnitřní struktuře různou tepelnou roztažnost a může tedy k fyzikálnímu zvětrávání změnami teploty docházet i v materiálech chemicky homogenních.

Johnson *et* Parsons (1944 *in* Hall, 1999) rovněž zaznamenali nelineární vztah mezi změnou teploty a změnou objemu zahříváné/chladnoucí horniny. Žula se v jejich experimentu roztahovala při zvyšování teploty od 0 °C do 10 °C, při dalším zahřívání se roztahování výrazně zpomalilo nebo se s dalším ohříváním dokonce zastavilo a vzorek horniny se začal smršťovat.

Poltivé síly mohou vznikat i v rámci jednotlivých bloků kvůli nerovnoměrnému ohřevu/chladnutí. Zahřívání bloku horniny od povrchu vede k zvětšování jeho objemu, vzniká tak síla, která může způsobit oddělení horní vrstvy od jádra bloku. Tento jev nazýváme exfoliace. V opačném případě: při chladnějším povrchu a teplejším jádru dojde ke kompresi středu bloku horní vrstvou (Kingery, 1955 *in* Hall, 1999).

Pojem *insolation weathering* (zvětrávání osluněním) se v literatuře vyskytuje jako název zvětrávání tepelnou roztažností v horninách přímo vystavených slunečnímu záření. Rautureau *et al.* (1991 *in* Hall, 1999) naměřili na dvou masivech stejné horniny orientovaných do různých světových stran rozdíl teplot až 50 °C. Ve stejné práci došli k závěru, že desintegraci materiálu v podmínkách periodického střídání teplot určuje také množství a rozmístění vody v hornině.

Režim ohřívání a chladnutí hornin způsobuje, že kapalná voda mechanicky narušuje vnitřní strukturu kamene rozpínáním a smršťováním v prostorech mikropórů. Přítomnost vody a její proudění je navíc doprovázeno zvětráváním chemickým. V případě oslunění horniny hraje velkou roli její albedo neboli odrazivost, tedy poměr množství záření, které povrch horniny odrazí a množství záření, které pohltí. Albedo je dáno především barvou a drsností povrchu. Hall (1999) konstatuje, že faktor oslunění může mít v případě nízkého albeda povrchu horniny zásadní vliv zejména v prostředích o průměrně nižších teplotách a/nebo nižších výkyvech teplot vzduchu. Zvětrávání teplotním stresem může tedy paradoxně hrát větší roli v ekosystémech mírného pásu než na pouštích, kde jsou výkyvy teplot vzduchu díky chybějící vegetaci obrovské.

Extrémním, avšak na některých místech planety významným činitelem na poli fyzikálního zvětrávání, je oheň. Allison *et* Bristow (1999) opakovaně testovali různé druhy hornin zahřátím na teplotu 500 °C během 5 minut. Mechanickou odolnost vzorků testovali pomocí modulu elasticity a zaznamenali dva rozporuplné efekty působení žáru: 1) oslabení materiálu teplotním šokem, 2) zvýšení tvrdost povrchu materiálu. Tento mechanismus není zcela vysvětlen a je předmětem dalších studií (McCabe *et al.*, 2007).

Především v přímořských oblastech má velký vliv zvětrávání prostřednictvím krystalizace solí z vody obsažené v pórech horniny. Experimentálně byl ověřen vliv krystalizace roztoku chloridu sodného (Vázquez-Nion *et al.*, 2018) a síranu sodného (Sousa *et al.*, 2018) zkoumali návaznost procesu zvětrávání formováním solných krystalů při povrchu na pozdější kolonizaci povrchu horniny mikroorganismy. Vhodnost ke kolonizaci je v pozitivní korelaci s pórovitostí, která je solným zvětráváním zvyšována (Hall, 1999).

Častou příčinou rozpadu materiálu mechanickou cestou je kolísání teplot horniny kolem 0 °C a s tím spojené mrznutí vody v pórech a spárách v anglicky psané literatuře označované za *freeze-thaw activity*. Zásadní je přitom uvažovat teplotu horniny, která kromě teploty vzduchu závisí na expozici/zastínění horniny ale i na jeho albedu či velikosti bloku. Při teplotách vzduchu pod 0 °C nemusí nutně v hornině docházet k vzniku ledových krystalů. Teplota horniny se během dne o průměrné teplotě vzduchu -10°C může pohybovat v rozmezí +15°C do -20°C a to vlivem slunečního záření nebo větru, který může přispívat k ochlazení horninového blok pod teplotu vzduchu (Hall, 1999; Hall *et al.*, 2002).

Velkou skupinou vlivů mechanického působení prostředí na horninu jsou abraze – obrušování povrchu horniny vedoucímu k odlamování mikroskopických částí masivu a k obnažování spodnějších méně zvětralých vrstev horniny, na které vnější prostředí zatím bezprostředně nepůsobilo. Větrná abraze je dominantním jevem aridních oblastí jako jsou pouště či pláže. Dopad nárazů zrn písku se pokusili kvantifikovat Bridges *et al.* (2010) za použití sádrových terčů, které ve větrném tunelu testovali pomocí písku při různých úhlech dopadu.

Feal-pérez *et Blanco-chao* (2013) se zabývali měřením abraze na mořském pobřeží, kde se částice způsobující obrus pohybují ve vodě díky silám mořského vlnobití. Dospěli k závěru, že abraze působí odlišně na horizontální a vertikální plochy hornin, protože plochy horizontální (rovnoběžné se směrem šíření vlny) vyhlazuje a tím i zvyšuje tvrdost jejich povrchu, zatímco na plochy vertikální, do kterých naráží vlna čelem, působí efekt opakovaných nárazů jednotlivých abrazivních částic nesených vodou. Takovéto povrchy vyhlazovány nejsou, naopak dochází k jejich zdrsňování a odlamování drobných částic. Abraze horizontálních povrchů ale co do rychlosti eroze a množství uvolněného materiálu dominuje.

1.2.2 Chemické zvětrávání

Chemickým zvětráváním rozumíme přeměny horniny prostřednictvím chemických reakcí, do kterých vstupují minerály, ze kterých se hornina skládá a různé aktivní látky, které se v prostředí vyskytují. Původ těchto reaktantů je buďto geologický (např. anorganické kyseliny) nebo biologický (např. organické kyseliny nebo extracelulární enzymy). Pro chemické zvětrávání je nezbytná přítomnost vody, tedy prostředí, ve kterém chemické reakce probíhají. Vzhledem k potřebě kapalné vody a rychlostní závislosti chemických reakcí na teplotě, dominují tyto děje v teplých a vlhkých částech světa, zatímco fyzikální zvětrávání převládá v oblastech chladnějších. Reakce lze podle chemické povahy dělit na:

- Hydratace
- Hydrolýzy
- Rozpouštění
- Reakce s kyselinami
- Oxidačně-redukční reakce
- Vznik komplexů

(Brady *et Weil*, 2017; Dixon *et Thorn*, 2005)

Hydratací chápeme reakci, při které se daná chemická látka váže s molekulami vody a tvoří tak hydráty. Této reakce se využívá například při tuhnutí sádry, kde se hemihydrát síranu vápenatého hydratací mění na dihydrát. Hydratace je důležitým procesem například při zvětrávání uranové rudy uraninitu (smolince), kde se podílí na změně krystalické struktury této uranové rudy (Prášil, 2014).

Hydrolyza je reakce, při které se voda rozštěpí na hydroxylovou skupinu a vodíkový iont. Ten většinou nahrazuje kationt v minerálu. Tomuto zvětrávání podléhají například draselné živce podle rovnice 1:



(Brady *et* Weil, 2017).

Rozpouštění vodou významně podléhají zejména snadno rozpustné horniny či minerály. Zásadní pro geomorfologii jsou krasové jevy, při kterých dochází k rozpouštění a rekrystalizaci uhličitanu vápenatého. Snadno rozpustné minerály jako je například halit, mohou být zcela převedeny do roztoku a odneseny vodou (Kachlík *et* Chlupáč, 2001).

Mezi dominantní formy chemického zvětrávání patří rozpouštění minerálů kyselinami. V prostředí se může vyskytovat více druhů kyselin a většinou působí na minerál současně. Sand (1997) dělí zvětrávání kyselinami podle jejich původu na rozpouštění v kyselinách anorganických (kyselina uhličitá, kyselina sírová, kyselina dusičná) a v kyselinách organických (kyselina octová, kyselina šťavelová, kyselina citronová, kyselina glukonová a další).

Anorganické kyseliny se do prostředí dostávají z nejen antropicky ovlivněných procesů probíhajících v atmosféře (kyselina sírová a dusičná; (Rodhe *et al.*, 1981). Rozpouštěním atmosférického CO₂ ve vodě vzniká slabá kyselina uhličitá, vzhledem k její všudypřítomnosti snadnému vzniku a neustálému působení se řadí mezi důležité činitele chemického zvětrávání i přes to, že se jedná o slabou kyselinu. Spotřeba oxidu uhličitého zvětráváním hornin touto cestou globálně dosahuje přibližně 4 Tg uhlíku ročně a je zásadním prvkem globálního cyklu uhlíku (Sun *et al.*, 2017). Všechny anorganické kyseliny ale mohou vznikat také prostřednictvím organismů. Kyselina uhličitá vzniká přímo v pórech horniny osídlených heterotrofními organismy. Ty uvolňují CO₂ jako konečný produkt svého heterotrofního

metabolismu. Při dostatečné vlhkosti v pórech dochází k rozpouštění plynu a vzniku kyseliny uhličité (Barker *et al.*, 1998). Kyselinu sírovou mohou produkovat lithoautotrofní bakterie rodu *Thiobacillus*, kyselina dusičná pochází z některých nitrifikačních bakterií např. rodu *Nitrosomonas* (Egli *et al.*, 2014; Colmer *et Hinkle*, 1947 *in Sand*, 1997).

Výše zmíněné organické kyseliny souhrnně v literatuře často nazývané LMWAs = *low molecule weight acids* do prostředí vypouští celá řada organismů: bakterie, řasy, lišejníky i houby. Ve většině případů se vyskytují společně a mají i z hlediska zvětrávání podobné vlastnosti.

Oxidačně redukční reakce probíhají hlavně vlivem přístupu či absence vzduchu u hornin obsahujících železo, mangan nebo síru. Typickým příkladem je přeměna dvojmocného železa, které se vyskytuje v primárních horninách oxidací na železo trojmocné vlivem vystavení aerobnímu prostředí. Vznikají tak metamorfované horniny obsahující oxidy železité (Brady *et Weil*, 2017).

Vznik komplexů v podmínkách zvětrávání probíhá zejména za působení organických kyselin. Brady *et Weil* (2017) uvádí příklad v podobě rozpouštění muskovitu kyselinou šťavelovou za vzniku hydroxidu draselného, organického komplexu obsahující hliník a hydroxidu křemičitého.

1.2.3 Biologické zvětrávání

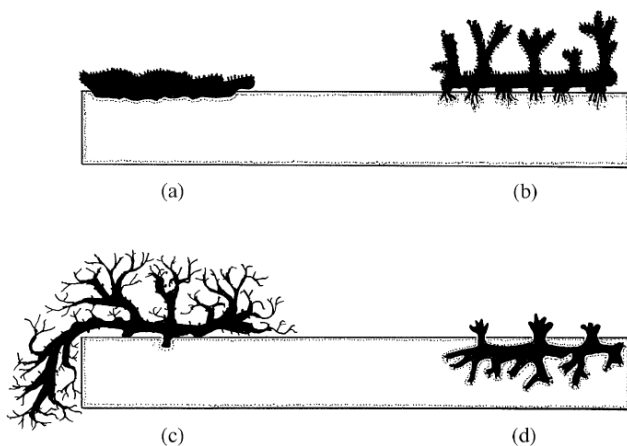
Biologické zvětrávání je zvětrávání způsobené živými organismy, které svou činností kombinují vlivy fyzikální i chemické. Organismy žijící v bezprostřední blízkosti horniny na ni působí mechanicky při růstu a pohybu i chemicky – vypouštěním chemicky aktivních metabolitů do prostředí. Oddělit fyzikální a chemický vliv organismů je často nesnadné, protože působí synergicky (Brady *et Weil*, 2017).

1.2.3.1 Lišejníky

Mezi první kolonizátory horninových povrchů patří lišejníky-mutualistické organismy hub a řas (nebo sinic), které jsou vzhledem ke své životní strategii závislé na příjmu živin z podkladu, na kterém rostou nebo z vody, která k nim přitéká po jeho povrchu. Lišejníky přitom dokáží žít nejen na povrchu (epilitické), ale i uvnitř pórů horniny (endolitické, viz Obr. 1). Epilitické lišejníky přitom zasahují do pórů při povrchu hyfovými vlákny, kterými se kotví k podkladu a

druhy endolitické přestože žijí v mikroskopických spárách, na povrch horniny vystupují svými plodnicemi. Některé lišejníky mohou tato dvě prostředí během svého životního cyklu střídat (Chen *et al.*, 2000).

Primárním fyzikálním faktorem, kterým lišejník horniny rozrušuje, je průnik hyfového vlákna do póru horniny. Sekundárně pak na horninu působí výše popsané mechanismy způsobené změnou objemu (změna objemu hyfového vlákna vlivem vysychání a nasycení vodou nebo vlivem mrznutí a rozmrzání) nebo krystalizací látek, které z vlákna do prostředí unikly (Chen *et al.*, 2000).



Obrázek 1 Různé typy růstu stélek lišejníků: korovitá stélka (a), lupenit stélka (b), keříčkovitá stélka (c), stélka endolitického lišejníku (d) (Lisci

Stélka druhu *Lecidea sarcogynoides* může prorůst do hloubky 3,21 mm v pískovci, a 1,12 mm v kvarcitu (Wessels *et* Schoeman, 1988; Cooks *et* Otto, 1990 *in* Chen *et al.*, 2000). Bodově narušený povrch může být způsoben formováním plodnice lišejníku (Ariño, 1995 *in* Hoffland *et al.*, 2004).

Mechanický vliv střídání vlhkosti stélky lišejníku potvrdil experiment s cykly namáčení a vysoušení vzorku vápence s lišejníkem *Collema auriforma*, za vzniku fragmentů o velikost několik desítek mikrometrů (Moses *et* Smith, 1993 *in* Chen *et al.*, 2000).

Mrznutím stélky lišejníku v pórech hornin na chladných a suchých oblastech antarktidy se zabývali Moses *et* Smith (1993 *in* Chen *et al.*, 2000.) a Friedman *et* Weed (1987 *in* Etienne *et*

Dupont, 2002). Tento jev může mít ve velmi chladných prostředích roli dominantního činitele v narušování povrchu hornin (Lisci *et al.*, 2003).

Zvětrávání vlivem krystalizujících exudátů lišejníkové stélky, zejména solí kyseliny šťavelové nastínil Sand (1997), experimentálně se tímto tématem nicméně zatím nikdo nezabýval.

Chemicky působí lišejníky na horniny hlavně organickými kyselinami, zejména kyselinou šťavelovou. Reakce kyseliny s horninou dává vznik šťavelanům nebo organokomplexům, kde jako ligand působí atom kovu pocházející z horniny. Kyselina šťavelová ale není jediným významným činitelem těchto chemických přeměn, některé skupiny lišejníků kyselinu šťavelovou vůbec neprodukují. Houby lišejníků ale produkují některé další organické kyseliny, jako jsou kyselina citronová nebo kyselina glukonová. Produkce kyseliny šťavelové zároveň také není doménou pouze lišejníků. Je prokázaným metabolitem mnoha druhů hub, bakterií a zelených řas (Chen *et al.*, 2000; Barker *et al.*, 1998).

Efekt růstu lišejníků může mít na zvětrávání povrchu hornin i opačný, tedy ochranný, vliv. Zejména stélka korovitých lišejníků chrání povrch před mechanickou abrazí či před dopadem kapek vody ze srážek. Korovitá stélka při vysokých pokryvnostech povrchu může zpomalovat zahřívání sluncem (zejména má-li povrch lišejníku vysoké albedo) a tím snížit tepelný stres (Hoffland *et al.*, 2004).

1.2.3.2 Mikroorganismy

Bakterie chemické zvětrávání podporují zejména produkcí kyselin. Fyzikální aspekt přítomnosti mikroorganismů je minoritní. Mohou přesto působit jako prostředník zvětrávání teplotní roztažností, ve vnitřních strukturách, drží vodu obsaženou ve svých buňkách, nebo v případě řas, podobně jako lišejníky, chránit povrch proti dopadu dešťových kapek nebo ovlivňovat teplotní režim povrchu při oslunění (Hoffland *et al.*, 2004).

Vlivem bakterií na zvětrávání aluminosilikátů se zabývali (Šrytiaková *et al.*, 2012). Zaznamenali vyluhování iontů Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Si^{4+} , K^+ (seřazeno od nejhojnějších) z bazaltu způsobené činností bakterie rodu *Bacillus* spp., kterou byl vzorek horniny naočkován při teplotě 4 °C. Stejným postupem otestovali i žulu a rulu, vše v teplotách 4 a 18 °C. Každá varianta byla porovnána s kontrolou v podobě vzorku zvětrávajícím ve sterilním prostředí o stejných tepelných a vlhkostních parametrech. Ve všech variantách obsahujících bakterie bylo

pozorováno násobně větší množství vyluhovaných iontů v porovnání s kontrolou. Zaznamenán byl i pozitivní vliv teploty. Při teplotě 18 °C všechny experimenty vykazovaly násobné (u bazaltu až 44 x vyšší) hodnoty uvolněných iontů. Změnil se také jejich poměr. Zatímco ve většině nízkoteplotních variant byl nejhojnějším prvkem vápník, při teplotě 18 °C u bazaltu a žuly převažovalo železo, u ruly byl pak na prvním místě křemík. V těchto variantách byl ve značné míře detekován i hliník, který při nízkých teplotách detekovatelný nebyl (Štyriaková *et al.*, 2012).

Príspevek mikrobiálných společenstev k zvětrávání se projevuje v podstatě všude, kde se vyskytuje jedna z vyšších forem života (zejména rostliny a lišejníky), která je mikrobiálním společenstvem doprovázena (například mikrobiální společenstvo rhizosféry rostlin) (Lisci *et al.*, 2003).

Fosfor je nenahraditelnou součástí nukleových kyselin, ATP či fosfolipidů v buněčné membráně a často limitujícím prvkem ekosystémů zejména v iniciálních stádiích vývoje. Mikrobiální společenstva zejména ve rhizosféře rostlin dokáží získávat fosforečnany z apatitu pomocí produkce organických či anorganických kyselin. Apatit je ve vodě relativně málo rozpustný (avšak v závislosti na konkrétním chemickém složení), organismy jeho rozpustnost zvyšují snížením pH prostředí (Aghamiri *et Schwartzman*, 2002). Welch *et al.* (2002 *in* Štyriaková *et al.*, 2012) měřili koncentraci fosforečnanů, které se z apatitu uvolnily pomocí roztoků anorganických (chlorovodíkové) a organických kyselin (octové a šťavelové) při různých hodnotách pH. Do tohoto experimentu zařadili variantu, která byla naočkována mikrobiální kulturou odebranou z *in situ* zvětrávané žuly. Při hodnotě pH 2 fosforečnany nejrychleji uvolňovala kyselina chlorovodíková. Při vyšších hodnotách pH (3; 4 a 5,5) byla nejúčinnější kyselina šťavelová. Absolutní rychlost uvolňování fosforečnanů se stoupajícím pH ale klesala.

1.2.3.3 Houby

Hoffland *et al.* (2004) diskutoval účelnost schopnosti hub vypouštět organické kyseliny, tedy jestli má tento děj vliv na fitness daného organismu a mohl v průběhu evoluce hrát roli výhody při darwinistické selekci organismů prostředím. Houby mají relativně nízkou potřebu bazických kationtů (K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+), do produkce organických kyselin, které pomáhají jejich uvolňování, ale musí vkládat velké množství energie. I přesto, že houby mají na uvolňování

těchto kationtů z horniny vliv, jejich ekologickou úspěšnost způsobuje spíše fosfor, který ze svého okolí získávají obdobným způsobem.

Schopnost zpřístupňování fosfor a jeho transport pomocí sítě hyfových vláken má velký vliv na celý ekosystém. Experimenty Roslinga *et al.* (2007) ukázaly, že houby jsou schopné aktivně přispívat k rozpouštění apatitu v závislosti na aktuální dostupnosti fosforu v prostředí.

1.2.3.4 Vyšší rostliny

Kořeny vyšších rostlin mají více funkcí, jejichž prostřednictvím komunikují se svým podkladem mechanicky i chemicky. Vzájemný poměr těchto vlivů se mění prostorově i v čase. Tradičně popisovaný mechanický vliv kořenů na rozlamování bloků hornin tloušťnutím kořenů uvnitř spár je podle Pawlika (2016) relativní. Síla působící příčným směrem, kterou je kořen většiny dřevin schopen vyvinout je totiž daleko menší, než je síla běžně potřebná k rozdělení bloku horniny. Kořen zaklíněný ve spáře ale může desintegraci zprostředkovávat při dilataci změnou teploty.

K dynamice zvětrávání může přispívat i disturbance. Kořeny stromů při vyvrácení vlivem silného větru vyzvednou fragmenty hornin, které se vyskytovaly v jejich blízkosti. Tím dojde k částečnému promíchání vznikajícího půdního profilu. Část materiálu je pohřbena pod materiálem z vývratu, část je obnažena a vystavena vlivům, před kterými ji do té doby chránila vrstva půdy (Phillips *et al.*, 2008).

Biochemický vliv rostlin je způsoben především mikrobiálními společenstvy, které žijí ve rhizosféře rostlin. Jde o společenstvo organismů, které se živí odlupujícími se mrtvými buňkami kořene a jejich predátorů. Toto společenstvo svým metabolismem silně ovlivňuje mikroprostředí a na chemismus zvětrávání má nezanedbatelný vliv. Organismy vypouští do prostředí kyseliny, oxid uhličitý, podílí se na vlhkostním režimu i na pH prostředí (Pawlik *et al.*, 2016).

1.2.3.5 Živočichové

Na vývoj půdou nepokrytého horninového povrchu země mohou mít nezanedbatelný vliv i obratlovci – ovce či kozy zejména pasené člověkem. Prokazatelný vliv pohybu zvířat na pohyb suti ze svahu dolů a třídění jednotlivých kamenů podle jejich velikosti byl prokázán experimentálně. V tureckých horách byla měřena změna polohy barevně označených fragmentů

po několika přechodech skupiny zvířat (ovcí i koz). Výsledky prokázaly, že stádo iniciuje sesouvání sutí. Tento fenomén může tak mít v oblastech s častým výskytem divokých či pasených zvířat nemalou roli ve formování místní geomorfologie (Govers *et Poesen*, 1998).

1.2.4 Měření rychlosti a stupně zvětrávání

Potřeba studovat stupeň či rychlost zvětrávání je v přírodních vědách zaměřena zejména na živiny, které se tímto procesem uvolňují z horniny. Nepřímými metodami se zjišťují tvrdost, porozita či další vlastnosti, ze kterých lze zvětralost horniny odvodit (Procházková, 2012). Přímé měření iontů uvolněných z horniny do prostředí ale poskytne kvalitativní i kvantitativní pohled na přeměnu horniny a uvolňování živin do prostředí (Moses *et al.*, 2014).

1.3 Suťová pole

Pojem „suťové pole“ je mnohoznačný. Jde o plochu pokrytou sypkým materiálem zvětralé horniny vzniklou různými způsoby. V anglické literatuře se nejčastěji můžeme setkat s pojmy *scree slope*, *stone run*, *block stream*, *block field* nebo *talus*. Tyto všechny pojmy označují území pokryté horninovou drtí. Výrazy *block* nebo *stone* odkazují na relativně větší velikost částic a pojem *blockfield* nejlépe odpovídá českému pojmu kamenné moře. Slovo *scree* označuje suť, tedy materiál relativně jemnější zrnitosti. Suťová pole mohou být autochtonního nebo alochtonního původu. Autochtonní suťová pole vznikla na místě, kde se nachází, alochtonní útvary vznikly nakupením materiálu pohybujícího se například vlivem gravitace nebo činností ledovce. Slova jako *stream*, *slope* nebo *run* označují vznik suťového pole pohybem vlivem gravitace. Speciálním případem suťového pole je *talus*, česky osyp, což je suťový svah na úpatí skalnatého útvaru vzniklý odlupováním kusů horniny z jejího povrchu. (Wilson *et al.*, 2008; Goodfellow, 2012; Bithell *et al.*, 2014; Bieber *et al.*, 1998).

Autochtonní suťová pole vznikají na náhorních plošinách, kde silně působí fyzikální faktory zvětrávání. Klimatické podmínky nepříznivé pro růst vegetace mají za následek absenci primární organické hmoty – rostlinného opadu. Díky tomu je na těchto místech tvorba půdy velmi pomalá, suťová pole tedy zůstávají i přes své značné stáří odkrytá (Ballantyne, 2010).

Suťová pole na svazích mohou vznikat různými způsoby. V evropských horách, ve kterých docházelo v k zalednění, je jejich častým původcem ledovcová činnost. Suť byla vytvořena mechanickým odíráním masivu horniny při pohybu ledovce a postupným nahromaděním

materiálu na svazích ledovcem vytvářeného údolí či v čele ledovce, kde se taková akumulace označuje jako moréna (Kachlík *et* Chlupáč, 2001).

Mechanismem třídění materiálu při gravitačním pohybu horniny po svahu se zabývali Blasio *et* Sæter (2009), kteří laboratorním experimentem prokázali akumulaci větších částic suťového materiálu ve spodních částech svahu vlivem gravitace. Kámen při pohybu ze svahu uvádí do pohybu i ostatní částice a může způsobit sesuv suti.

Důležitým fenoménem ovlivňujícím biologické a chemické procesy uvnitř suti je teplotní režim suťového svahu. Velká tepelná kapacita granitoidních hornin, chladné klima ale zvláště pohyby studeného vzduchu po svahu umožňují výskyt trvale zmrzlých spodních vrstev. Hustota vzduchu je nepřímo úměrná jeho teplotě, studený vzduch tedy stéká po svahu dolů a vzhledem k velké porositě suti promývá prostory mezi jednotlivými částmi horniny a vyměňuje tak vzduch za chladnější. Stejný efekt má tzn. komínový efekt, díky kterému jsou makropóry neustále ventilovány od paty svahu, kde je do těchto pórů nasáván studený vzduch směrem nahoru. Permafrost se díky těmto jevům může lokálně vyskytovat i mimo alpínskou zónu v nadmořských výškách o stovky metrů nižších, než ve kterých je výskyt permafrostu běžný (Zacharda *et al.*, 2007).

1.3.1 Půdy suťových polí

Základní charakteristikou půd vznikajících na morénách po odstupu ledovce na Špicberkách v závislosti na stáří odledněných území se zabývali Kabala *et* Zapart (2012). Jejich práce zahrnuje stanovení základních chemických vlastností půd, obsahu bazických kationtů (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ a Na^+), obsahu spalitelných látek a distribuce velikosti půdních částic. Na studovaných územích klasifikovali lehké vysoce skeletovité půdy s 3–6 cm mocnou vrstvou akumulace organické hmoty na povrchu půdy, která byla přikryta vrstvou ledovcem přemístěné suti. Celková mocnost půd vznikajících 1 rok – 80 let po odstupu ledovce se pohybovala od 18 do 90 cm respektive. Kabala *et* Zapart (2012) potvrdili, že tvorba tamějších půd je funkcí času, přičemž většina půdních vlastností má v závislosti na čase logaritmický vývoj.

Meynier *et* Brun (2018) se zabývali klasifikací humusu z pěti různých lokalit ve Francii. Druhy humusu, se lišili podle obsahu uhličitánů v matečné hornině. pH prostředí má zásadní vliv na rychlost a způsob přeměny primární organické hmoty na humus. Formy humusu se ale různily i v rámci jedné lokality vlivem heterogenity podmínek v mikroprostředí suti. Mezi

nejproměnlivější faktory mající vliv na formy humusu patřili teplota, aerace, vlhkost a množství organické hmoty.

1.3.2 Tvorba půdy v alpinských ekosystémech

Vznik půdy je proces zahrnující přeměnu litosféry, rozklad a transformaci neživého biologického materiálu, transformaci živin a vznik stabilní půdní organické hmoty za určitých podmínek určených klimatem, povahou matečné horniny i biologickou aktivitou, umístění na Zemi a časem. V místě vzniku půdy se setkává atmosféra, hydrosféra, litosféra i biosféra Země, jak popsal již roku 1897 Vasyly Dokuchaev rovnicí 2:

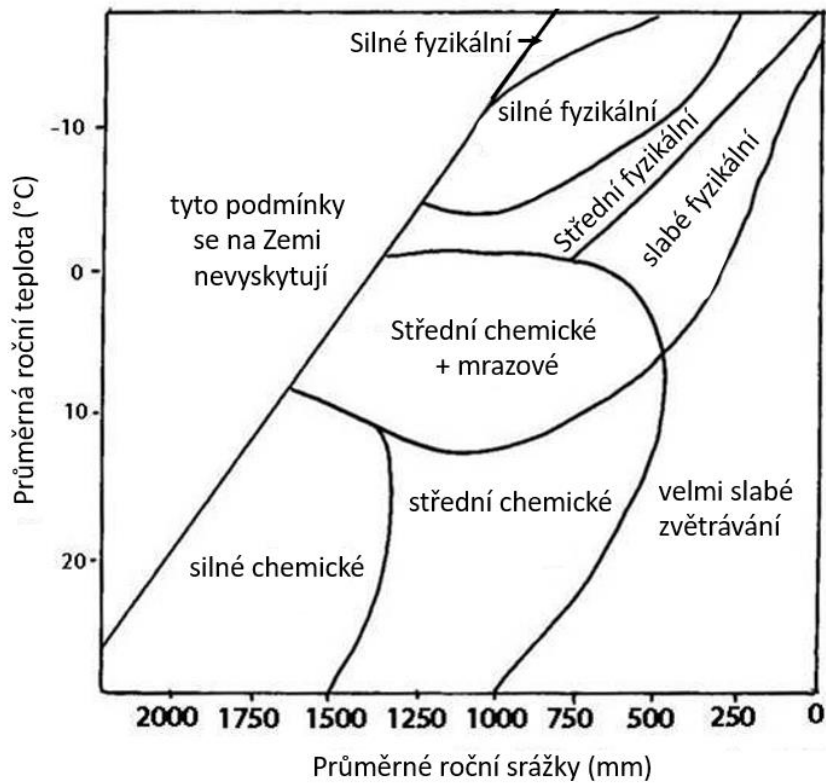
$$Půda = f(\text{klima, flóra a fauna, matečná hornina}) \times \text{čas} \quad (2)$$

(Šantrůčková *et al.*, 2018)

Jedním ze dvou hlavních vstupních materiálů je hornina. Kolonizující organismy a fyzikálně-chemické vlivy jsou původci zvětrávání, kterým dochází k uvolňování minerálních živin potřebných pro fungování terestrických i vodních ekosystémů. Zvětráváním způsobená fragmentace horniny umožní kolonizaci rostlinami, které do prostředí přinášejí druhý hlavní zdroj – primární organickou hmotu, rostlinný opad. Kořeny rostlin přispívají k půdotvornému procesu obohacením prostředí o mikroorganismy žijící na kořenech rostlin a v jeho bezprostřední blízkosti – rhizosféře. Zvětráváním vznikající minerální částice a neživá organická hmota dohromady vytváří půdní sorpční komplex, který se postupně zaplňuje ionty uvolněnými z horniny či rozkladu organické hmoty (Brady *et* Weil, 2017)

Mezi faktory silně ovlivňující vývoj půd, jak vychází z rovnice 2 je velmi významné klima reprezentované chodem teplot a srážek. Průměrná roční teplota prostředí ovlivňuje jak živou, tak neživou složku vznikajících půd.

Z abiotických procesů je nejzásadnější změna rychlosti chemických reakcí i fyzikálních jevů, které probíhají při zvětrávání horniny. Teplota je rovněž limitujícím faktorem primární produkce rostlin i rychlosti metabolismu rozkladačů. Tyto dva procesy přitom zajišťují vnos a přeměnu pro půdu nezbytného organického uhlíku. Množství srážek je určující jak z hlediska



Obrázek 2: Schéma převládajícího typu zvětrávání v závislosti na průměrných ročních teplotách a srážkách (Peltier, 1950, upraveno)

dostupnosti vody pro biochemické reakce probíhající při zvětrávání či přeměně organické hmoty, tak jako fyzikální činitel zvětrávání hornin mrazem. Poměr fyzikálního a chemického zvětrávání na Zemi se obecně řídí právě klimatem. Převládající formu zvětrávání na Zemi v závislosti klimatu zobrazuje Peltierův diagram (Obr. 2).

V prostředí alpinských ekosystémů, kterými se tato práce zabývá je půdotvorný proces limitován několika faktory. Stávající podoba pohoří vznikla převážně ledovcovou činností v poslední době ledové asi před 10 000 lety. Horské ledovce strhly tehdejší povrchy a obnažily čerstvé horninové podloží, které od té doby podléhá zvětrávacím procesům vlivem kontaktu s atmosférou. Odkrytá hornina nezpevněná vegetací zároveň prochází procesem vodní eroze, který spolu s gravitací způsobuje pohyb částí horniny po svahu. Tak přichází prostředí o

nejmenší minerální částice – půdotvorný substrát i o organickou hmotu (Chesworth *et al.*, 2007).

Klima vysokých tater je velmi chladné. Roční průměrná teplota v 1751 m n. m., kde se nachází meteorologická stanice, se pohybuje kolem 2 – 3 °C. To limituje jak rychlost chemického zvětrávání, tak rozvoj vegetace, která by produkovala opad – zdroj primární organické hmoty pro vývoj půd. Dlouhodobý průměr ročních srážek se pohybuje kolem 1350 mm (Kopáček *et al.*, 2017).

1.3.3 Význam půd suťových polí pro chemismus a oživení tatranských jezer

Dlouhodobý výzkum chemismu a oživení tatranských jezer probíhá již od osmdesátých let minulého století (Kopáček *et al.*, 2015a). Výzkum byl prováděn zejména s ohledem na acidifikaci vlivem depozic sloučenin dusíku a síry a zotavování z acidifikace, která v tomto regionu vrcholila na přelomu osmdesátých a devadesátých let dvacátého století.

V odlehlých, antropogenně jinak minimálně ovlivněných horských povodích, je chemismus (a následně i oživení) jezer do velké míry ovlivněn půdami a procesy v nich probíhajícími. Detailnější studie půd tatranských povodí a jejich vlivu na chemismus jezer (Kopáček *et al.*, 2004; 2006) ukázaly, že koncentrace rozpuštěného fosforu a organického uhlíku v jezerech byla v korelaci s celkovým množstvím půd v povodí i se zásobou organické hmoty v těchto půdách. Na chemismus jezer měl zásadní vliv fosfor, který je v těchto ekosystémech limitujícím prvkem a který se uvolňoval do jezer v závislosti na jeho zásobě v půdách. Kromě toho studie poukázaly na vyšší koncentraci všech forem fosforu v suťových půdách ve srovnání s půdami luk. Suťové půdy i přes malé množství (průměrně 13 kg/m² ve srovnání s 121 kg/m² lučních půd) mohou hrát významnou roli v cyklu živin v ekosystému povodí.

Zotavování z acidifikace mělo pravděpodobně vliv na zadržování fosforu v půdách, a tím i na chemismus jezer. Vazba fosforu v kyselých půdách, která je zprostředkována oxidy železa a hliníku (Kaňa *et al.*, 2011) závisí zejména na obsahu organické hmoty a pH. Například v šumavských lesních půdách se fosfor touto formou vázal nejvíce při pH 3 (Kaňa *et al.*, 2006). Při zvýšení nebo snížení pH docházelo k uvolňování fosforu. Nárůst uvolňování fosforu byl zaznamenán i v tatranských půdách při hodnotách pH >3,5 (Kopáček *et al.*, 2015b). Zvyšování pH vlivem zotavování půd z acidifikace tak může způsobit sníženou schopnost

vazby fosforu na oxidy hliníku a železa, a tedy i zvýšenou rychlost uvolňování fosforu z půd. Vyšší míra uvolňování fosforu (ve srovnání s lučnými půdami) spojená se změnou pH pak byla pozorována v suťových půdách tatranských povodí (Kopáček *et al.*, 2015c).

Okyselení prostředí atmosférickými depozicemi vedlo ke zvyšování koncentrace bazických kationtů ve vysokohorských jezerech vlivem jejich vyplavování z půd. Vyplavování iontů hořčíku a vápníku do jezer se během zotavování z acidifikace v některých případech nezastavilo, ačkoliv se rapidně snížila koncentrace síranů a dusičnanů. Zatímco koncentrace Ca a Mg rostly v jezerech, v jejichž povodí byl větší podíl suťových polí, v povodích, kde dominovaly luční půdy, koncentrace Ca a Mg v jezerech naopak klesaly, v souladu s předpokládaným vlivem poklesu kyselých depozic (Kopáček *et al.*, 2017). Podobný nárůst byl pozorován i u koncentrací fosforu, které rovněž rostly v jezerech s větším podílem suťových polí (Kopáček *et al.*, *submitted*). Změny chemismu jezer v povodích s větším zastoupením suťových polí jsou prisuzovány probíhající změně klimatických faktorů, které mají vliv na fyzikální zvětrávání (Kopáček *et al.*, 2017).

Z dat vyplývá, že za posledních 20 let stoupla průměrná roční teplota v Alpinské oblasti Vysokých Tater až o 3 °C, přibývá zároveň dní bez sněhové pokrývky a dní, kdy teplota kolísá kolem 0 °C. Dále se změnila roční distribuce srážek: zvýšil se počet dní bez srážek a dní kdy srážky přesáhly 30 mm. Srážky jsou tedy průměrně méně časté, zato silnější.

Nárůst průměrné teploty může znamenat vyšší účinnost chemického zvětrávání (viz Obr. 2) Zvýšení výskytu kolísání teplot kolem bodu mrazu naopak podporuje zvětrávání mrznutím a rozmrazáním horniny (*freeze-thaw weathering*). Úbytek sněhové pokrývky rovněž podporuje zvětrávací procesy, protože vrstva sněhu chrání horninu před vlivy atmosféry, osluněním a stabilizuje teplotu. Tyto změny zintenzivnily fyzikální zvětrávání probíhající v suťových polích, zároveň ale stoupla i erozní aktivita vlivem zvýšení počtu dní, kdy srážky přesáhly 30 mm a měly tedy větší erozní efekt.

Oblasti suťových polí tak pravděpodobně představují důležitý prvek v cyklu živin alpinských ekosystémů. Z předběžných dat, srovnávajících chemismus půd suťových půd s půdami alpinských luk (Tab. 1; Kaňa *et al.*, nepublikováno) vyplývá, že půdy suťových polí mohou být zdrojem fosforu pro povodí. I přes malý podíl organické hmoty suťové vykazovaly srovnatelné koncentrace celkového (TP), dostupného (SRP_{ox}) fosforu i fosforu obsaženého v

mikrobiální biomase. Nízký poměr $Al_{ox} + Fe_{ox} : P$ ukazuje, že se fosfor v půdě vyskytuje ve velké míře navázaný na oxidy železa a hliníku, přičemž obsah těchto oxidů zde byl výrazně nižší než v lučních půdách.

Tabulka 1: Povovnění některých půdních vlastností mezi půdami sutí a lučními půdami v tatranských povodích. (Kaňa et al., nepublikováno)

Měřený ukazatel	jednotka	Půdy sutí	Organický horizont lučních půd	Minerální horizont lučních půd
		<i>n</i> =14	<i>n</i> =16	<i>n</i> =9
TP	mmol kg ⁻¹	27	31	21
P _{ox}	mmol kg ⁻¹	15	14	10.5
SRP _{ox}	mmol kg ⁻¹	10	4	5.4
P _{H2O}	mmol kg ⁻¹	0.012	0.018	0.002
P _{olsen}	mmol kg ⁻¹	1.9	0.16	0.15
P _{mic}	mmol kg ⁻¹	2.5	6.5	1.2
C _{mic}	mmol kg ⁻¹	32	162	27
N _{mic}	mmol kg ⁻¹	2.6	14.8	2.3
C _{mic} :P _{mic}		12.8	24.9	22.5
C _{mic} :N _{mic}	mmol kg ⁻¹	12.2	10.9	11.7
TC	mmol g ⁻¹	4.9	9.2	3.9
TN	mmol g ⁻¹	0.3	0.6	0.2
C:P		181	297	186
Al _{ox} +Fe _{ox}	mmol kg ⁻¹	87	146	209
(Al _{ox} +Fe _{ox}):P _{ox}		5.8	10.4	20
pH		4.56	4.65	4.77

TP = celkový fosfor, P_{ox} = celkový fosfor v oxalátovém extraktu, SRP_{ox} = rozpustný reaktivní fosfor v oxalátovém extraktu, P_{H2O} = vodou extrahovatelný fosfor, P_{olsen} = dostupný fosfor extrahovaná NaHCO₃, C_{mic}/N_{mic}/P_{mic} = uhlík/dusík/fosfor obsažený v mikrobiální biomase, TC = celkový uhlík, TN = celkový dusík, Al_{ox} + Fe_{ox} = oxidy železa a hliníku extrahované oxalátovým činidlem.

Zásadním faktorem pro zadržování fosforu je množství půd v povodí (Kaňa *et* Kopáček, 2006). Větší celkové množství oxidů hliníku a železa, které vznikají zvětráváním, se vyskytuje v lučních půdách. v porovnání s půdami sutí. Je zde tedy větší počet vazebních míst pro fosfor uvolněný ze zvětrávající horniny (Kopáček *et al.*, 2017). Menší množství půd v suťových polích ve srovnání s alpskými loukami (Kopáček *et al.*, 2006) tak pravděpodobně představuje menší „překážku“ pro tok fosforu a bazických kationtů z horniny do povrchových vod.

Půdy, které jsou “skryté” mezi kameny suťových polí, představují zatím nepříliš probádanou součást ekosystémů alpských povodí, která zde však může hrát významnou roli v cyklu živin. Navrhovaný projekt proto bude řešit právě tyto půdy a jejich chemismus zejména s ohledem na sezónní dynamiku fosforu a dalších živin. Součástí předkládaného projektu není charakteristika mikrobiálního společenstva ani vyhodnocení jeho role v tamním cyklu živin, ačkoliv, jak vyplývá z předběžných dat (Tab. 1), mikrobiální společenstvo má velký vliv zejména na cyklus fosforu, jehož značná zásoba je uložena právě v mikrobiální biomase. Výzkum půdní mikrobioty bude probíhat paralelně v rámci jiného projektu.

2. Projektová část

2.1 Úvod

Nevyvinuté půdy suťových polí jsou podle posledních výzkumů důležitým článkem cyklu živin ve vysokohorských ekosystémech zejména ve vztahu ke klimatickým změnám, které vedou ke zrychlování zvětrávacích procesů a s nimi spjatého uvolňování živin z horniny. Tento proces zasahuje do zotavování těchto ekosystému z acidifikace a pravděpodobně bude mít v budoucnu velký vliv na zásobení jezer živinami a jejich oživení. Detailnější studie věnující se sezónním změnám v zásobách fosforu, dusíku a dalších živin a jejich proměnlivosti v rámci jednoho povodí zatím nebyla provedena.

Předkládaný projekt je zaměřen na chemickou část cyklu živin. Charakteristika mikrobiálního společenstva půd suťových polí a vyhodnocení jeho role v uvolňování či zadržování živin je předmětem paralelního výzkumného projektu.

2.2 Cíle projektu

Cílem projektu je zmapovat plošné zastoupení suťových polí (1), kvantifikovat celkové množství půd (2) a pomocí terénních odběrů a laboratorních analýz prozkoumat sezónní dynamiku fosforu a dalších živin v půdách (3) povodí Ladového plesa v Tatrách.

Výstupem projektu bude článek do odborného časopisu o množství půd a sezónní dynamice chemismu půd v povodí Ladového plesa. Výsledky poskytnout detailnější vhled do prostorové a časové variability chemismu půd tohoto povodí.

2.3 Aktivity projektu

2.3.1 Analýza GIS (cíl 1)

Pomocí leteckých snímků modelové lokality a geologických map bude pomocí počítačových technologií GIS vymezeno povodí jezera a zastoupení suťových svahů a lučních půd v rámci tohoto povodí. Podle reliéfu terénu budou vybrány reprezentativních odběrová místa.

2.3.2 Terénní odběry a laboratorní analýzy vzorků půd (cíle 2 a 3)

Během řešení projektu budou provedeny 3 terénní výjezdy do povodí Ladového plesa: jarní, letní a podzimní. Při každém výjezdu bude vykopáno přibližně 30 sond, ze kterých budou odebrány vzorky půdy a horniny. Na těchto vzorcích budou provedeny laboratorní analýzy a získaná data budou použita pro porovnání dynamiky živin lučních a suťových půd.

2.4 Metodika

2.4.1 Geologická charakteristika Tater

Pohoří Tatry je součástí západní části pásmového pohoří Karpaty, jejichž vznik započal již procesem Hercynského (Variského) vrásnění. Do dnešní podoby je ale významně dotvořilo třetihorní vrásnění a zejména pak činnost ledovců, která se odehrávala ve čtvrtohorách. K Tatrám tou dobou ze severu dosahoval pevninský ledovec, který přispíval k vzniku horských ledovců Tater, které svým pohybem během čtvrtohor formovaly kary, horské štíty a plesa, která známe dnes (Vološčuk, 1994).

Ledovcová činnost měla Tatrách a za následek přesun velkého množství materiálu. Pohyby ledovců mechanicky rozrušily horninové podloží a vytvořily nánosy sypkého materiálu – morény. Sypký, zrnitostně různorodý materiál morén tvoří okraje celého pohoří.

Horninové složení tater je různorodé: Jejich centrální a jižní část je tvořena horninami krystalinika, kde dominují především granitoidy, na západě a severozápadě pak převládají horniny mezozoické zastoupené slepenci, křemičitými pískovci a dalšími sedimentárními horninami (Vološčuk, 1994).

Lokalita Ladového plesa se nachází v centrální části pohoří, kde jsou převažujícím horninovým typem žuly. V povodí Ladového plesa jsou suťové půdy zastoupeny asi ze 60 % (Kopáček *et al.*, 2017), proto bylo vybráno jako modelové povodí.

2.4.2 Výběr odběrových míst

V povodí bude na základě mapové analýzy vybráno 30 odběrových míst zahrnujících jak suťové, tak luční půdy. Odběrová místa budou vybrána po trojicích tak, aby ležela vždy na spádnicí, a to jedna v horní části, druhá uprostřed a třetí na patě svahu. Důvodem tohoto

rozmístění sond je snaha zachytit rozdíly chemických vlastností a množství půdy ovlivněné gravitací a vymýváním částic půdy pohybem vody ze svahu dolů.

2.4.3 Provedení sondy a odběru vzorků

Každá sonda bude zaměřena pomocí GPS. Na odběrovém místě bude popsána přítomnost případné vegetace včetně lišejníků a mechů. Reliéf terénu bude popsán sklonem a expozicí. Bude vyhloubena sonda pro odběr vzorků v potřebné hloubce na ploše 0,25 m².

U suťových půd budou kameny nad 5 cm ze svrchní vrstvy na ploše sondy odebrány, zváženy a spočteny a bude z nich odebrán reprezentativní vzorek o hmotnosti 0,5 - 1 kg pro stanovení vlastností horniny. Bude změřena mocnost organického horizontu, který bude poté z plochy sondy odebrán, zvážen a bude z něj odebrán reprezentativní vzorek o hmotnosti cca 1 kg. Totéž bude provedeno pro minerální horizont. 0,5 - 1 kg vzorek horniny bude odebrán rovněž ze skeletu minerálního horizontu. Hloubky výskytu půdních horizontů pod povrchem suti budou změřeny a zaznamenány.

U lučních půd bude odebrán a zvážen organický horizont, po jeho homogenizaci z něj bude odebrán vzorek o hmotnosti cca 1 kg. Stejně bude změřen a ovzorkován i minerální horizont. Z kamenů v minerálním horizontu větších než 5 cm bude odebrán 0,5 - 1 kg vzorek pro stanovení chemického složení horniny.

Vzorky hornin suti z povrchu suťových oblastí i z minerálních horizontů suťových i lučních půd budou na daném místě odebrány vždy jen jednou (v rámci prvního výjezdu). Nepředpokládáme změnu chemického složení horniny během jednoho roku. Půdní horizonty budou měřeny a odebírány stejným způsobem ve všech termínech terénních výjezdů.

Z každého odebraného půdního horizontu bude oddělen čerstvý vzorek cca 100 g pro stanovení C, N a P v mikrobiální biomase.

2.4.4 Výpočet celkového množství půdy

Ze získané hmotnosti a mocnosti jednotlivých půdních horizontů bude odhadnuta celková zásoba luční nebo suťové půdy v povodí (Kopáček *et al.*, 2006). Díky rozmístění sond v různých pozicích na svahu bude možné vyhodnotit vliv sklonitosti na distribuci celkového

množství půd v povodí. Této znalosti bude v budoucnu možno použít pro GIS modelování a předpověď množství a distribuce půd ve srovnatelných povodích vysokohorských jezer.

2.4.5 Metodika laboratorních stanovení

Chemické vlastnosti hornin budou stanoveny u vzorku horniny tvořící povrch suťových polí a skeletu minerálních horizontů luční i suťové půdy. Složení hornin bude stanoveno silikátovou analýzou v akreditovaných laboratořích České geologické služby.

Půdní analýzy: celková sorpční kapacita, nasycenost sorpčního komplexu, a dusík, uhlík a fosfor mikrobiální biomasy a celkový uhlík a celkový dusík budou stanoveny akreditovanou laboratoří Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy.

Stanovení pH, ztráty žiháním, bazických kationtů, dostupných forem fosforu a dusíku, stanovení rozpustného reaktivního fosforu a oxidů železa a hliníku z oxalátového výluhu bude provedeno realizátory projektu v laboratořích Biologického centra Akademie věd ČR a Přírodovědecké fakulty Jihočeské Univerzity.

2.4.6 Rozsah laboratorních analýz

Tabulka 2: Soupis laboratorních analýz plánovaných pro vyhodnocení vlastností půd.

stanovení	Princip metody	Metodika podle	zhotovení
chemické složení horniny	silikátová analýza	interní ČGS	ČGS
celková sorpční kapacita	extrakce chloridem barnatým	ISO 13536	VÚMOP
nasycenost sorpčního komplexu	extrakce chloridem barnatým	ISO 11260	VÚMOP
pH _{H2O}		Kopáček et al, 2004	vlastní
pH _{CaCl2}		Kopáček et al, 2004	vlastní
ztráta žiháním	žihání při 550°C		vlastní
Ca, K, Mg, Na,	Atomová absorpční spektrometrie	výluh podle Kopáček et al, 2016	vlastní
Dostupný fosfor	kalorimetricky	Wolf et Barker, 1990	vlastní
dostupný dusík		Vance et al, 1987, Kopáček et al, 2016	vlastní
celkový fosfor	Fosfomolybdenová modř	Kopáček et al, 2001b	vlastní
celkový dusík	Modifikovaná Kjeldahlova metoda	ISO 11261	VÚMOP
celkový uhlík	rozklad lučavkou, fotometricky	interní	VÚMOP
Oxidy železa a hliníku	extrakce oxalátovým činidlem	Cappo et al, 1987, Kopáček et al, 2016	vlastní
Celk. fosfor v oxalátovém extraktu	extrakce oxalátovým činidlem	Cappo et al, 1987	vlastní
Rozpustný reaktivní fosfor v oxal. extraktu	extrakce oxalátovým činidlem	Cappo et al, 1987	vlastní
Uhlík, fosfor a dusík mikrobiální biomasy	fumigačně extrakční metoda, dichromátová oxidace	ISO 14240	VÚMOP
suchá hmotnost půdy	sušení 2h při 105°C	ISO 11 465	vlastní

Ukazatel pH je základní chemickou charakteristikou půdy. Na jeho hodnotě závisí výskyt forem fosforu nebo pohyblivost iontů v půdě. Dalším široce užívaným obecným ukazatelem je ztráta žiháním pro stanovení celkového množství půdní organické hmoty.

Analýza velikosti a obsazenosti sorpčního komplexu je potřebná k vysvětlení dostupnosti a vyplavování některých živin. Předpokládáme i její proměnlivost v rámci povodí zejména spjatou s efektem vymývání nejjemnějších částic z horních částí svahu a jejich usazování pod svahem.

Pro vyhodnocení dynamiky živin jsou zásadními stanoveními celkové koncentrace uhlíku, dusíku a fosforu jakož i koncentrace jejich dostupných forem. Pro popsání chování fosforu je navíc v projektu zařazeno stanovení oxidů železa a hliníku, na které se fosfor v kyselých půdách váže.

2.5 Harmonogram projektu

Tabulka 3: Přibližný harmonogram projektu formou Ganttova diagramu.

Aktivita	VI.19	VII.19	VIII.19	IX.19	X.19	XI.19	XII.19	I.20	II.20	III.20	IV.20	V.20	VI.20	VII.20
Shromáždění podkladů														
Analýza GIS														
Terénní odběry														
Laboratorní analýza														
Vyhodnocení výsledků a sepsání odborného článku														

Celkové trvání projektu je 14 měsíců, během kterých jsou naplánovány 3 výjezdy do zkoumané lokality, provedení laboratorních analýz a vyhodnocení výsledků a sepsání odborného článku.

2.6 Rozpočet projektu

Tabulka 4: Rozpočet projektu podle kategorií.

Položka	tis. Kč
Mzdové náklady	419
Povinné zákonné odvody	142
Drobný dlouhodobý majetek	5
Spotřební materiál	84
Cestovné	100
Služby	309
Režijní náklady	160
Celkem	1220

Celkové finanční náklady na projekt tvoří 1 220 000 korun. Nejvýznamnější položkou rozpočtu jsou mzdové náklady včetně povinných zákonných odvodů na financování 1 řídicího pracovníka zaměstnaného na 100 % po celou dobu trvání projektu a 3 technických pracovníků provádějící terénní odběr vzorků a laboratorní analýzu. Techničtí pracovníci budou zaměstnáni formou Dohody o provedení práce v obdobích příprav, terénních výjezdů a laboratorních analýz. Do položky služby spadá zhotovení některých nákladných laboratorních analýz. Spotřební materiál zahrnuje především nákup pomůcek pro odběr vzorků a spotřební materiál a chemikálie potřebné pro laboratorní stanovení. Náklady na cestovné jsou tvořeny zejména náklady na pohonné hmoty pro 3 terénní výjezdy. Významnou část cestovného tvoří také náklady na ubytování a cestovní náhrady pracovníků provádějících odběr vzorků.

3. Literatura

Aghamiri, R. R., Schwartzman, D. W. (2002) „Weathering rates of bedrock by lichens: a mini watershed study“, *Chemical geology*, 188, 249-259.

Allison, R. J., Bristow, G. E. (1999) „The Effects of Fire on Rock Weathering: Some Further Considerations of Laboratory Experimental Simulation“, *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 707-713.

Ariño, X., Ortega-Calvo, J. L. Gomez-Bolea, A., Saiz-Limenez, C. (1999) „Lichen colonization of the Roman pavement at Baelo Claudia (Cadiz, Spain)“, *Biodeterioration vs. Bioprotection*“, *Science of the Total Environment*, 167, 353-363.

Ballantyne, C. K. (2010) „A General Model of Autochthonous Blockfield Evolution“, *Permafrost and Periglacial Processes*, 21, 289-300.

Barker, W. W., Welch, S. A., Chu, S., Banfield, J. F. (1998) „Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering“, *American Mineralogist*, 83, 1551-1563.

Bieber, A. J., Williams, M. W., Johnsson, M. J., Davinroy, T. C. (1998) „Nitrogen Transformations in Alpine Talus Fields, Green Lakes Valley, Front Range, Colorado, U.S.A.“, *Arctic and Alpine Research*, 30(3), 266-271.

Bithell, M., Richards, K. S., Bithell, E. G. (2014) „Simulation of scree-slope dynamics: investigating the distribution of debris avalanche events in an idealized two-dimensional model“, *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, 1601-1610.

Blasio, F. V. D., Særter, M. B. (2009) „Small-scale experimental simulations of talus evolution“, *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1685-1692.

Brady, N. C., Weil, R. R. (2017) „The Nature and Properties of Soils, fifteenth edition“, Pearson Education Limited, ISBN: 9780133254556.

Bridges, N. T., Razdan, A., Yin, X., Greeley, R., Ali, S., Kushunapally, R. (2010) „Quantification of shape and texture for wind abrasion studies: Proof of concept using analog targets“, *Geomorphology*, 114, 213-226.

Cappo, K. A., Blume, L. J., Raab, G. A., Bartz, J. K., Engels, J. L. (1987) „Analytical Methods Manual for Direct/Delayed Response Project Soil Survey“, United States Environmental Protection Agency, 8-11.

Colmer, A. R., Hinkle, M. E. (1947) „The role of microorganisms in acid mine drainage; a preliminary report“, *Science*, 106, 253.

Cooks, J., Otto, E. (1990) „The weathering effects of the Lichen *Lecidea* aff. *Sarcogynoides* (Koerb) on Magaliesberg Quartzite“, *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 491-500.

Dixon, J C., Thorn, C. E., (2005) „Chemical weathering and landscape development in mid-latitude alpine environments“, *Geomorphology*, 67, 127-145.

Egli, M., Dahms, D., Norton, K. (2014) „Soil formation rates on silicate parent material in alpine environments: Different approaches-different results?“, *Geoderma*, 2013, 320-333.

Etiene, S., Dupont, A. J. (2002) „Fungal weathering of basaltic rocks in cold oceanic environment (Iceland): Comparison between experimental and field observations“, *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 737-748.

Feal-Pérez, A., Blanco-Chao, R. (2013) „Characterization of abrasion surfaces in rock shore environments on NW Spain“, *Geo-Marine Letters*, 33, 173-181.

Friedman, E. I., Weed, R. (1987) „Microbial trace-fossil formation, biogenous, and abiotic weathering in the Antarctic cold desert“, *Science*, 193, 1247-1249.

Goodfellow, B. W. (2012) „A granulometry and secondary mineral fingerprint of chemical weathering in periglacial landscapes and its application to blockfield origins“, *Quaternary Science Reviews*, 57, 121-135.

Govers, G., Poesen, J. (1998) „Field experiments on the transport of rock fragments by animal trampling on scree slopes“ *Geomorphology*, 23, 193-203.

Hall, K. (1999) „The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions“, *Geomorphology*, 31, 47-63.

Hall, K., Thorn, C. E., Matsuoka, N., Prick, A. (2002) „Weathering in cold regions: some thoughts and perspectives“, *Progress in Physical Geography*, 26, 577-603.

Hoffland, E., Kuyper, T. W., Wallander, H., Plassard, C., Gorbushina, A. A., Haselwandter, K., Hlomstrom, S., Landeweert, R., Lundstrom, U. S., Rosling, A., Sen, R., Smits, M. M., van Hees, P. A. W., Van Breemen, N. (2004) „The Role of fungi in Weathering“, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(5), 258-264.

Chen, J., Blume, H. P., Beyer, L. (2000) „Weathering of rocks induced by lichen colonization“, *Catena*, 39, 121-146.

Chesworth, W. (2007) „Encyclopedia of Soil Science“, Springer, ISBN: 978-1-4020-3994-2.

Johnson, W. H., Parsons, W. H. (1944) „Thermal expansion of concrete aggregate materials“, *Journal of Research of the U.S. National Bureau of Standards*, 32, 101-126.

Kabala, C., Zapart, J. (2012) „Initial soil development and carbon accumulation on moraines of the rapidly recreating Werenskiold Glacier, SW Spitsbergen, Svalbard archipelago“, *Geoderma*, 175-176, 9-20.

Kachlík, V., Chlupáč, I. (2001) „Základy geologie, Historická geologie“, Karolinum. ISBN: 382-156-00.

Kaňa, J., Kopáček, J., Camarero, L., Garcia-Pausas, J. (2011) „Phosphate Sorption Characteristics of European Alpine soils“, *Soil Science Society of America Journal*, 75, 862-870.

Kaňa, J., Kopáček, J. (2006) „Impact of Soil Sorption Characteristics and Bedrock Composition on Phosphorus Concentrations in two Bohemian Forest Lakes“, *Water, Air and Soil Pollution*, 173, 243-259.

Kingery, W. D. (1955) „Factors affecting thermal stress resistance of ceramic materials.“, *Journal of the American Ceramic Society*, 38, 3-17.

Kopáček, J., Bičárová, S., Hejzar, J., Hynštová, M. M., Kaňa, J., Mitošinková, M., Porcal, P., Stuchlík, E., Turek, J. (2015a) „Catchment biogeochemistry modifies long-term effects of acidic deposition on chemistry of mountain lakes“, *Biogeochemistry*, 125, 315-335.

Kopáček, J., Borovec, J., Hejzar, J., Porcal, P. (2001) „Parallel spectrophotometric determination of iron, aluminium, and phosphorus in soil and sediment extracts“, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32, 1431-1443.

Kopáček, J., Hejzar, J., Kaňa, J., Norton, S., Stuchlík, E. (2015b) „Effects of acidic deposition on in-lake phosphorus availability: A lesson from lakes recovering from acidification“, *Environmental Science & Technology*, 49, 2895-2903.

Kopáček, J., Kaňa, J., Bičárová, J., Brahney, J., Navrátil, T., Norton, S. A., Porcal, P., Stuchlík, E. „Increasing productivity of the Tatra Mountain lakes: An effect of recovery from acidification, climate change or both?“, *Aquatic Science* (submitted in March 2019).

Kopáček, J., Kaňa, J., Bičárová, S., Fernandez, I. J., Hejzar, J., Kahounová, M., Norton, S. A., Stuchlík, E. (2017) „Climate Change Increasing Calcium and Magnesium Leaching from Granitic Alpine Catchments“, *Environmental Science & Technology*, 51, 159-166.

Kopáček, J., Kaňa, J., Šantrůčková, H., Pícek, T., Stuchlík, E. (2004) „Chemical and Biochemical Characteristics of Alpine Soils in The Tatra Mountains and Their Correlation With Lake Water Quality“, *Water, Air and Soil Pollution*, 153, 307-327.

Kopáček, J., Kaňa, J., Šantrůčková, H. (2015c) „Pools and composition of soils in the alpine zone of the Tatra mountains“, *Biologia*, 61, S35-S49.

Kopáček, J., Stuchlík, E., Hardekopf, D. (2006) „Chemical composition of the Tatra Mountain lakes: Recovery from acidification“, *Biologia*, 61, S21-S33.

Lisci, M., Monte, M., Pacini, E. (2003) „Lichens and higher plants on stone: a review“, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 51, 1-17.

McCabe, S., Smith, B. J., Warke, P. A. (2007) „Sandstone response to salt weathering following simulated fire damage: a comparison of the effects of furnace heating and fire“, *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1874-1883.

Meynier, S., Brunt, J. J. „Humus forms pathways in low-elevation cold scree slopes: Tangel or Mor?“, *Applied Soil Ecology*, 123, 572-580.

Moses, C. A., Smith, B. J. (1993) „A note on the role of lichen *Collema auriforma* in solution basin development on a carboniferous limestone substrate“, *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, 363-368.

Moses, C., Robinson, D., Barlow, J. (2014) „Methods for measuring rock surface weathering and erosion: A critical review“, *Earth-Science Reviews*, 135, 141-161.

Pawlik, L., Phillips, J. D., Šamonil, P. (2016) „Roots, rock, and regolith: Biomechanical and biochemical weathering by trees and its impact on hillslopes-A critical literature review“, *Earth Science Reviews*, 159, 142-159.

Peltier, L. (1950) „The geographic cycle in periglacial regions as it is related to climatic geomorphology“, *Annals of the American Association of Geographers*, 40, 214-236.

Phillips, J. D., Marion, D. A., Turkington, A. V. (2008) „Pedologic and geomorphic impacts of a tornado blowdown event in a mixed pine-hardwood forest“, *Catena*, 75, 278-287.

Prášil, J. (2014) „Oxidation-hydration weathering of uraninite: the current state-of-knowledge“, *Journal of Geosciences*, 59, 99-114.

Procházková, B. (2012) „Využití Schmidt hammeru jako nástroje pro určení relativního věku glacigenních sedimentů“, Bakalářská práce, univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta.

Rautureau, M. (1991) „Tendre Comme la Pierre“, Monuments en tuffeau, guide pour la restauration et l'entretien, Universite D'Orleans et Région Centre, France, 97 pp.

Rodhe, H., Crutzen, P., Vanderpol, A. (1981) „Formation of sulfuric and nitric acid in the atmosphere during long-range transport“, *Tellus*, 33, 132-141.

Rosling, A., Suttle, K. B., Johansson, E., Van Hees, P. A. W., Banfield, J. F. (2007) „Phosphorus availability influences the dissolution of apatite by soil fungi“, *Geobiology*, 5, 265-280.

Sand, W. (1997) „Microbial Mechanisms of Deterioration of inorganic Substrates-A general Mechanistic overview“, *International Biodeterioration and Biodegradation*, 40, 183-190.

Sousa, L. Siegesmund, S., Wedekind, W. (2018) „Salt weathering in granitoids: an overview on the controlling factors“, *Environmental Earth Sciences*, 77, 502,

Sun, X., Morth, C. M., Huimborg, C., Gustaffson, B. (2017) „Temporal and spatial variations of rock weathering and CO₂ consumption in the Baltic Sea catchment“, *Chemical Geology*, 466, 57-69.

Šantrůčková, H., Kaštovská, E., Bárta, J., Miko, L., Tajovský, K. (2018) „Ekologie půdy“, EPISTEME, ISBN: 978-80-7394-695-1.

Štyriaková, I., Štyriak, I., Oberhansli, H. (2012) „Rock weathering by indigenous heterotrophic bacteria of bacillus spp. at different temperature: a laboratory experiment“, *Mineralogy and Petrology*, 105, 135-144.

Vázquez-Nion, D., Troiano, F., Sanmartín, P., Valagussa, C., Cappitelli, F., Prieto, B. (2018) „Secondary bioreceptivity of granite: effect of salt weathering on subaerial biofilm growth“, *Materials and Structures*, 51, 158, 13 pp.

Vance, E. D., Brookes, P. C., Jenkinson, D. S. (1987) „An extraction method for measuring soil microbial biomass C“, *Soil Biology and Biochemistry*, 19, 703-707.

Vološčuk, I. (1994) „Tatranský národný park“, Gradus, Slovakia, 551 pp.

Welch, S. A., Banfield, J. F. (2002) „Modification of olivine surface morphology and reactivity by microbial activity during chemical weathering“, *Geochimica et Cosmochimica acta*, 66, 213-221.

Wessels, D. C. J., Schoeman, B. (1988) „Mechanism and rate of weathering of Clarens sandstone by an endolithic lichen“, *South African Journal of Science*, 84, 274-277.

Wilson, P., Netley, M. J., Schnabel, C., Clark, R., Xu, S. (2008) „Stone run (block stream) formation in the Falkland Islands over several cold stages, deduced from cosmogenic isotope (^{10}Be and ^{26}Al) surface exposure dating“, *Journal of Quaternary Science*, 23(5), 461-473.

Wolf, A. M., Baker, D. E. (1990) „Calorimetric method for phosphorus measurement in ammonium oxalate soil extracts“, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 21, 2257-2263.

Zacharda, M., Gude, M., Růžička, V. (2007) „Thermal Regime of Three Low Elevation Scree Slopes in Central Europe“, *Permafrost and Periglacial Processes*, 18, 301-308.