

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta,
Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů

In situ zvětrávací experimenty sulfidů a silikátů

Bakalářská práce

Alice Jarošíková



Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Martin Mihaljevič CSc.

Praha 2011

Poděkování

Tuto bakalářskou práci jsem napsala pod vedením svého školitele, prof. RNDr. Martina Mihaljeviče CSc., kterému tímto velice děkuji za trpělivost a rady, které mi v průběhu jejího zpracování poskytl.

ABSTRAKT

Zvětrávání je přirozený proces probíhající na zemském povrchu. Jeho efekt na minerály a další materiály je významný. Kromě mechanického rozrušování může důsledkem zvětrávání dojít k chemickým reakcím, které mohou vést ke kontaminaci životního prostředí (např. podzemních vod a půd). Nejen z tohoto důvodu se stalo zvětrávání předmětem intenzivního studia. Jeden ze způsobů výzkumu jsou in situ zvětrávací experimenty. Cílem této práce je posoudit jejich výhody a nevýhody a popsat jejich průběh a komplikace, které mohou během experimentu nastat, a k čemu lze poznatky těchto studií dále využít. Pozornost je soustředěna i na několik konkrétních experimentů, které se zabývaly zvětráváním sulfidů či silikátů in situ a na nichž lze tyto věci pozorovat.

Klíčová slova:

zvětrávání, in situ, sulfidy, silikáty

SUMMARY

Weathering is a natural process which is occurring on the Earth's surface. Its effect on minerals and other materials is significant. Besides mechanical alteration, the result of weathering can reach the chemical reactions, which can lead to contamination of the environment (e.g. ground water and soils). Not only for this reason has weathering become an object of intensive studies. In situ weathering experiments are one way of research. The aim of this bachelor thesis is to review the advantages and disadvantages of these experiments, to describe their course and the complications which can happen during the experiments, and how to use knowledge of these observations. Attention is also focused on several concrete experiments which were concerned with the weathering of sulphides and silicates, and where it is possible to observe these things on them.

Key words:

weathering, in situ, sulphides, silicates

OBSAH

ÚVOD	1
1. CHARAKTERISTIKA ZVĚTRÁVÁNÍ.....	2
1.1. Jednotlivé typy zvětrávání	4
1.1.1 Mechanické zvětrávání	5
1.1.2 Chemické zvětrávání	5
1.1.3 Biologické zvětrávání	6
2. ZVĚTRÁVÁNÍ SULFIDŮ A SILIKÁTŮ	9
2.1 Silikáty	9
2.2 Sulfidy	9
2.2.1 Zvětrávání pyritu	10
3. ZVĚTRÁVACÍ EXPERIMENTY	11
3.1 Zkoumání arsenových minerálů.....	11
3.1.1 Sorpce arsenu na jiné minerály.....	11
3.1.2 Mineralogický vývoj arsenových minerálů	11
3.2 Vliv vegetace na zvětrávání	12
3.2.1 Vliv vegetace na alteraci arsenopyritu.....	12
3.2.2 Vliv různých druhů stromů na zvětrávání živce	12
ZÁVĚR.....	14
POUŽITÁ LITERATURA.....	15

ÚVOD

Stabilita minerálů závisí na jejich chemickém složení, krystalové struktuře a také na prostředí, ve kterém se nacházejí. Jsou-li podmínky v místě jejich současného výskytu odlišné od těch panujících v místě vzniku, stává se takový materiál nestabilní a dochází k jeho alteraci. Ve svrchní části zemského povrchu se tomuto procesu říká zvětrávání a podílí se na něm zároveň mnoho různých činitelů. Zejména působení atmosféry, hydrosféry a biosféry vede k velkým geochemickým změnám, které mají velký vliv nejen na přírodu a vývoj krajiny, ale i na člověka a jeho aktivity. Zvětrávání významně ovlivňuje rozmístění nerostných surovin, kvalitu vod, podmínky k zemědělství či lesnictví a stav architektonických objektů.

Zvětrávání bylo zpočátku studováno za účelem poznání evoluce půd, zatímco dnešní výzkum se zabývá alterací minerálů z hlediska environmentálních procesů, kvůli pochopení geochemických cyklů a dlouhodobých globálních změn (Marshall a Fairbridge 1999). Potenciální riziko znečištění různými látkami je v současné době jedním z hlavních důvodů, proč je značná pozornost věnována studiu mechanismů zvětrávání a dalších procesů s tím spojených. Správné pochopení všech souvislostí je velmi důležité k tomu, aby bylo možné dalším kontaminacím předcházet a v případě již znečištěného místa efektivně provést jeho sanaci.

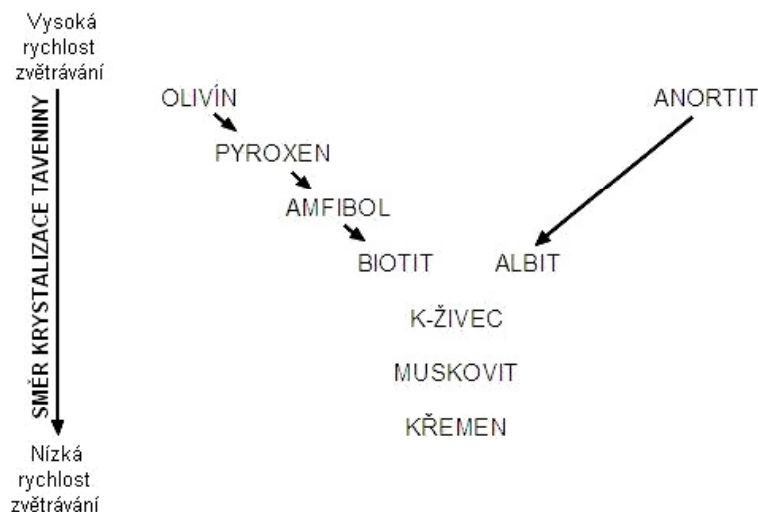
Zabývat se danou problematikou lze různými způsoby. Výsledky získané vyhodnocením dat z laboratorních výzkumů jsou však často velmi odlišné od těch prováděných přímo v terénu, a proto se jako optimální způsob studia nabízejí in situ experimenty. Jedná se totiž o metodu dosahující v tomto směru nejpřesnějších výsledků, protože je jinak prakticky nemožné vytvořit v laboratoři veškeré podmínky totožné s těmi panujícími v přírodě, zejména pokud jde o biologické faktory.

1. CHARAKTERISTIKA ZVĚTRÁVÁNÍ

Zvětrávání je zásadní proces, který utváří ráz krajiny. Je to děj probíhající v blízkosti zemského povrchu, během něhož dochází k rozrušování a přeměně materiálů na produkty, které jsou za nových fyzikálně-chemických podmínek více stabilní. V největší míře se na tomto procesu podílejí složky atmosféry, hydrosféry a biosféry.

Minerály na zemském povrchu zvětrávají, protože jsou zde vystaveny podmínkám odlišným od místa jejich vzniku, a jejich složení už tak není v rovnováze s okolní teplotou a tlakem (Goldich 1938). Mnoho hornin totiž vzniklo za vysokých teplot a tlaků bez účasti vody a vzduchu, takže zvětrávání je v podstatě reakcí na přítomnost těchto dvou složek a na nižší teplotu a tlak (Ollier 1969). Jinak řečeno, zvětrávání je proces, během něhož se horninový materiál přizpůsobuje podmínkám panujícím na zemském povrchu, protože se tyto podmínky často liší od těch, v nichž horniny původně vznikly.

Odolnost horninotvorných minerálů vůči chemickému zvětrávání představuje tzv. Goldichovo schéma, které se shoduje s převráceným Bowenovým reakčním schématem krystalizace magmat. Toto schéma (znázorněné na Obr.1.) ukazuje, že nejlépe zvětrává olivín a plagioklas (Ca-Na živce), zatímco křemen je nejdolnější.



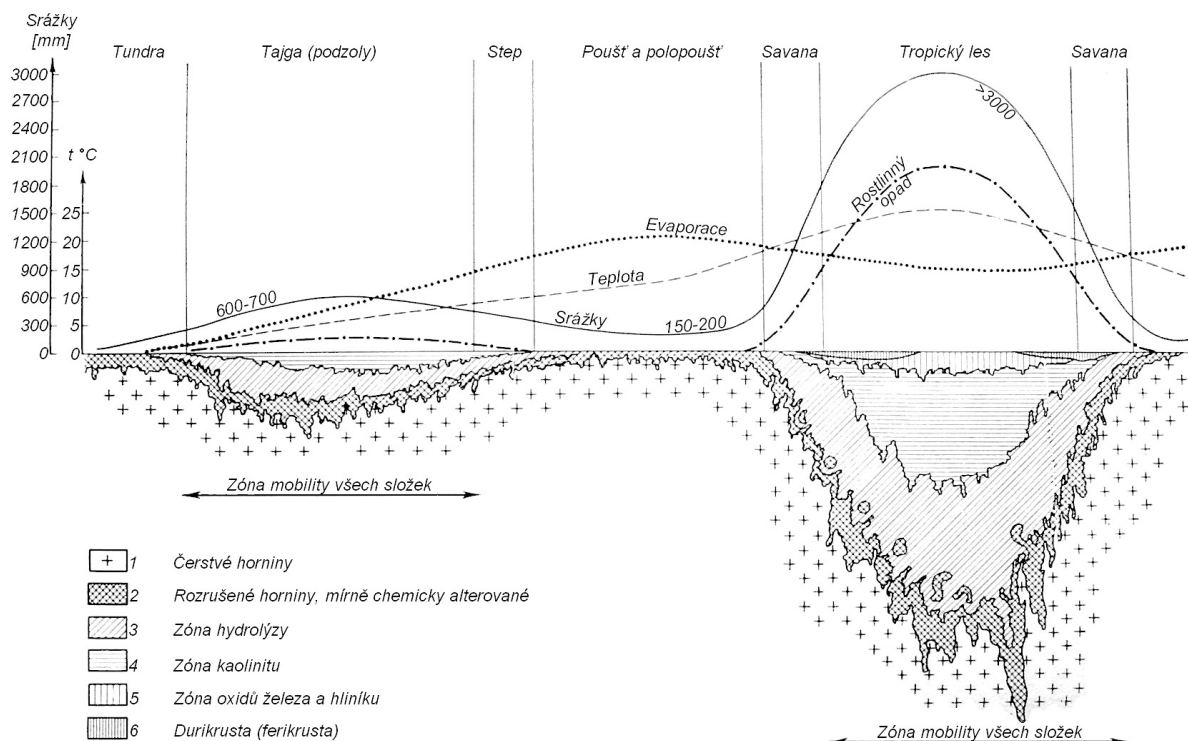
Obr.1. Odolnost minerálů k zvětrávání v závislosti na podmínkách jejich vzniku (upraveno podle Goldicha 1938)

Výsledky laboratorních experimentů jsou z větší části ve shodě s tímto schématem, ale v přírodě se díky různorodým činitelům a odlišným podmínkám zvětrávání nelze vždy spoléhat na jeho stoprocentní platnost (Goldich 1938). Ačkoliv je snaha dodržet během laboratorních testů stejné podmínky odpovídající těm reálným, povrch experimentálních minerálů se nikdy nebude chovat přesně tak jako při zvětrávání probíhajícím přirozenými procesy (Marshall a Fairbridge 1999).

Výsledky laboratorních a terénních experimentů se často výrazně liší (Appelo a Postma 2005). Je to dáno tím, že se jedná o porovnávání otevřeného a uzavřeného systému, které se odlišují zejména odnosem produktů zvětrávání, ale také různorodým povrchem minerálů a tvorbou sekundárních fází, a proto je třeba pečlivé vyhodnocení všech vstupních a výstupních složek (Kelly a kol. 1998). Rozdíl je také v rychlosti reakcí. Průběh zvětrávání v přírodě je totiž mnohem pomalejší než v laboratorních podmínkách (Kump a kol. 2000). Posuzování průběhu reakcí v přírodě pouze na základě laboratorních výsledků tak může být zcela zavádějící. Spolehlivější predikce vývoje půd a vod v daném prostředí by tedy měla být stanovena především z výzkumů zaměřených na experimenty prováděné v terénu (Marshall a Fairbridge 1999).

Míra zvětrávání minerálů není dána pouze jejich chemickým složením, jelikož mnoho minerálů stejného chemického složení zvětrává odlišně. To je způsobeno krystalovou strukturou, jak vysvětluje jedno z Paulingových pravidel, podle kterého jsou stabilnější právě ty struktury, které mají menší počet společných hran a ploch koordinačních polyedrů. Kromě struktury závisí stabilita minerálů také na velikosti krystalů (menší zrna mají větší povrch a zvětrávají lépe), tvaru krystalů (rohy a hrany zvětrávají lépe než plochy), množství defektů ve struktuře krystalu (atomy nejsou pevně vázány), dostupnosti k činitelům působícím zvětrávání (porosita horniny poskytuje lepší přístup vody k materiálu) a odnosu produktů zvětrávání (nedojde ke zpomalení či zastavení reakce) (Ollier 1969). Na základě těchto vlastností je pak možné například vysvětlit, proč jsou větší bloky hornin zaoblovány, což dává vzniknout obrovským valounům objevujícím se v krajině.

Závislost intenzity zvětrávání na klimatu a tím i na zeměpisné šířce je dalším důležitým faktorem ovlivňujícím průběh reakcí. Jak ukazuje Obr.2., hlavní roli hraje teplota, úhrn srážek, míra evaporace a množství vegetačního opadu.



Obr. 2. Vliv zeměpisné šířky na zvětrávání dle Strakhova (upraveno podle Olliera 1969)

Zvětrávání je závislé na množství dostupné vody a vyšších teplotách, a proto tedy probíhá lépe v humidním klimatu v tropických oblastech, než v polárních regionech, kde jsou nízké teploty a voda se vyskytuje pouze ve formě ledu (Plummer a Carlson 2008). Hloubka, do které se účinky zvětrávání projeví, roste s vyšší porositou, permeabilitou a chemickou neodolností hornin (Ollier 1969). Ke zvětrávání ovšem dochází nejen na souši, ale i pod vodou (Ollier 1969). Zvětrávání na mořském dně se říká halmyrolýza (Petránek 1993).

Zvětráváním v tropických oblastech vzniká největší množství půdy, která je ale téměř neúrodná, protože je složena z oxidů železa a hliníku - jedná se o laterity, směs hydroxidů železa, jejichž červená barva je dána vysokým obsahem Fe, a žlutohnědé bauxity složené z hydroxidů hliníku (Plummer a Carlson 2008). Laterity (obsahující zejména hematit, maghemit a goethit) vznikají tzv. laterizací, tj.

vyluhování SiO_2 , alkálií a alkalických zemin a obohacením o Fe a Al oxidy (Petránek 1993). Bauxity se tvoří v tropických oblastech s teplotami povětšinou časně nad 25°C a jedná se v podstatě o laterity obsahující vysoký podíl hydroxidů hliníku (gibbsit, boehmit či diaspor) (Ollier 1969).

Klima a zvětrávání se ovlivňují vzájemně. V průběhu historie Země se klima v různých oblastech měnilo, a to mělo vliv na průběh zvětrávání. ale z geologických záznamů také vyplývá, že naopak se změnou kontinentálního zvětrávání (např. tektonickým výzdvihem kontinentů, biologickými změnami apod.) došlo následně ke kolísání klimatu (Kump a kol. 2000).

Pro zvětrávání je velice podstatné pH, jehož hodnota významně determinuje průběh dalších reakcí. Hodnota pH ve vodě a půdních systémech může být změněna atmosférickou depozicí v podobě tzv. kyselého deště, který může obsahovat H_2SO_4 , HNO_3 , HCl , NH_4^+ nebo různé organické kyseliny (Stumm a Morgan 1996). Vliv organismů na pH ale není jediný způsob, jakým se na zvětrávání podílejí.

Čas je dalším faktorem hrajícím výraznou roli v procesu zvětrávání. Pro správné vyhodnocení experimentů bývá volena delší doba, po kterou by měl experiment probíhat, většinou v řádu několika let (Augussto a kol. 2000; Matsukura a kol. 2007). S časem rychlost rozpustnosti minerálu klesá, protože snadno rozpustná místa jako hrany a porušené oblasti postupně ubývají (Augussto a kol. 2000). Proto nelze proces reakce posuzovat jen podle jeho rychlého průběhu na začátku. Ale ani po několika letech nemusí dojít k ustálení reakcí.

Ke správnému porozumění procesů odehrávajících se na zemském povrchu lze dospět pouze s využitím kombinace více vědních disciplín, zejména mineralogie, geochemie a biologie (Banfield a kol. 1999). Je třeba posoudit značné množství rozličných faktorů, což klade na vědce vysoké nároky, a je tedy zřejmé, že vyhodnocování takového experimentu není zcela jednoduché. Výsledky získané zkoumáním zvětrávání mohou být v praxi využity například v otázkách udržitelnosti úrodnosti zemědělských půd, při předcházení nežádoucím vlivům na ŽP, ale také při navrhování ekonomicky příznivých cest remediace kontaminovaných půd, sedimentů či vod (Banfield a kol. 1999).

Účinky zvětrávání je možné běžně pozorovat na sochách a architektonických stavbách, které jsou povětšinou zcela vystaveny přírodním vlivům. Použité materiály se tak v podstatě stávají objektem, na němž je možné také sledovat důsledky zvětrávání. i když degradace materiálu v tomto případě není zrovna žádoucí. Znalost odolnosti různých materiálů je tedy pro sochaře s stavitele důležitá, aby tvořili dlouhotrvající odolná díla. Klíčovou roli hrají tyto poznatky i při účelových stavbách, jako je řešení neporušitelnosti úložišť nukleárního odpadu (Banfield a kol. 1999).

1.1. Jednotlivé typy zvětrávání

Podle činitelů podílejících se na zvětrávacích procesech lze rozlišit zvětrávání mechanické (fyzikální) a chemické. Zvláštním typem je pak zvětrávání biologické, které úzce souvisí se dvěma předchozími typy a liší se jen tím, že je zapříčiněno živými organismy. V přírodě se všechny tyto typy kombinují a jejich účinky se mohou vzájemně podporovat. Když například dojde k rozpadu hornin na menší části v důsledku mechanického rozrušení, zvětší se tím jejich celkový povrch, který je pak dostupný pro vodu a vzduch, a tím i pro zvětrávání chemické. K odnosu zvětralin pak dochází buď chemickou cestou v roztoku, nebo vlivem mechanického transportu zvětralých částic na jiné místo, tedy erozí (Ollier 1969). Veliký význam má v tomto ohledu topografie, kdy na příkrých svazích dochází především k mechanickému rozrušování, zatímco chemické působení se důsledkem rychlého odtoku vody projevuje méně a spíše jen při povrchu (Loughnan 1969).

1.1.1 Mechanické zvětrávání

Mechanické zvětrávání (neboli fyzikální rozpad, desintegrace) je proces rozrušování horniny na menší části, při kterém se nemění její chemické složení. Dochází k němu vlivem několika faktorů, z nichž nejvýznamnější je teplota a její proměnlivost, ať už se jedná o kolísání v průběhu ročních období, nebo rozdíl teplot během dne a noci, nebo třeba vystavení horniny prudkému slunci či ohni. K rozpukání materiálu může nastat vlivem mrznoucí vody, kdy led v puklinách zvětšuje svůj objem zhruba o 10 % (Hefferan a O'Brien 2010). Kromě ledu může mít takový efekt krystalizace solí nebo jiných minerálů (Ollier 1969). Podobný účinek mohou mít i kořeny rostlin prorůstající puklinami. Změny teplot se mohou na horninách projevit jako gelivace (gelifrakce), kdy jde o působení mrazu a zvětšování objemu zmrzlé vody v puklinách, a nebo jako exfoliace (deskvamace), což je odprýskávání slupek z horniny v teplých (často pouštních) oblastech (Petránek 1993). Dalším faktorem je snížení hydrostatického tlaku (působícího v místě vzniku horniny) poté, co se dostane hornina k povrchu, a vzniknou v ní tak trhliny znamenající počátek zvětrávání (Mihaljevič a Moldan 2000). Také změna litostatického tlaku, například vlivem ztráty nadloží či při výstupu horniny směrem k povrchu, vede ke vzniku různě orientovaných puklin a následnému rozpadu horniny na menší části (Hefferan a O'Brien 2010). Gravitace usnadňuje odlamování částí hornin, takže větší sklon svahu může přispět k rychlejšímu rozrušování (Hefferan a O'Brien 2010). Dále může mít vliv střídání mokra a sucha či změna vlhkosti vzduchu.

1.1.2 Chemické zvětrávání

Chemické zvětrávání (rozklad, dekompozice) je rozrušování hornin, při kterém se mění chemické složení původního materiálu. Jedná se o důležitý proces, který kontroluje celkový hydrogeochemický cyklus prvků. Nejdůležitější roli při tom hrají voda jako rozpouštěcí a transportační činidlo a atmosféra jako zásobník plynů (vodních par, CO_2 a kyslíku).

Nejvýznamnějším činitelem chemického zvětrávání jsou reakce s kyselinami, které vlivem H^+ ovlivňují prostorové uspořádání atomů mnoha minerálů a mění tím jejich chemické složení (Plummer a Carlson 2008). Tím vznikají nové minerály. Nejčastějšími produkty zvětrávání jsou roztoky (obsahující kationty, anionty, H_2SO_4) a minerály (např. křemen, jílové minerály, oxidy železa), ale také půda nezbytná pro růst většiny rostlin (Plummer a Carlson 2008).

Voda je jeden z hlavních činitelů zvětrávání. Vlivem působení vody může nastat několik typů reakcí, které se pak mohou účastnit narušování struktur hornin. Jsou to zejména:

- *hydratace* - navázání vody na minerál; důležitý proces při vzniku jílových minerálů, kdy se voda stane součástí krystalové mřížky; jedná se o exotermickou reakci; dochází ke změně objemu horniny (exfoliace, rozdrobení)
- *hydrolýza* - chemická reakce mezi minerálem a vodou (ionty minerálu a H^+ či OH^-)
- *rozpouštění* - různá rozpustnost v různých klimatických podmínkách má vliv na různou mobilitu prvků
- *oxidačně redukční reakce* - redukce v anaerobním prostředí; oxidace zejména jako reakce s atmosférickým kyslíkem (železité oxidy a hydroxidy), ale i bez kyslíku pouze změnou náboje (Fe na FeS a na FeS_2)
- *iontovýměnné reakce* - přímá výměna iontů mezi minerálem a roztokem

Rozpustnost látek závisí především na koncentraci vodíkových iontů (pH), redox potenciálu (Eh) a iontovém potenciálu (Z/r, velikost náboje/iontový poloměr) (Ollier 1969). Ionty v roztoku přitahují molekuly vody v závislosti na iontovém potenciálu - prvky s nízkým iontovým potenciálem (např. Na, K, Mg) zůstávají během zvětrávání v roztoku, prvky se středním Z/r se srážejí hydrolyzou a prvky s velkým Z/r (S, P, N, Si, C) tvoří znovu rozpustné komplexy s kyslíkem (Ollier 1969).

Oxid uhličitý je jedním z nejdůležitějších plynů ovlivňujících pH prostředí (Mihaljevič a Moldan 2000). Parciální tlak CO₂ v půdě může být až 100x větší než v atmosféře, a to napomáhá snižovat pH (Kelly a kol. 1998). Do půdy se CO₂ dostává buď z atmosféry nebo přirozenou produkcí organismů v půdě a z kořenů rostlin. Nejnižší dosažitelné pH jako důsledek těchto procesů je 4,6 (Appelo a Postma 2005). Většinou se jedná o reakci, kdy CO₂ reaguje s vodou, a tím vzniká kyselina uhličitá (H₂CO₃). Ta je ale nestabilní a disociuje na hydrogenuhličitan (HCO₃⁻) a vodíkový iont.

Povrchové minerály jsou důsledkem chemického zvětrávání hydrolyzovány a oxidovány půdními roztoky. Pokud nedojde k vysrážení všech rozpuštěných iontů, vede to následně k tomu, že jsou řeky a oceány zásobovány vzniklými rozpuštěnými solemi (Marshall a Fairbridge 1999). Rozpuštěné látky z minerálů jsou transportovány řekami v suspenzi či roztoku, a tak přinášejí do moře minerály a živiny (Plummer a Carlson 2008). Proto mají moře a oceány vyšší salinitu. Odhaduje se, že zvětralé silikátové minerály se podílejí na celkovém množství rozpuštěných látek v řekách ze 45 % (Stumm a Wollast 1990).

1.1.3 Biologické zvětrávání

Při tomto zvětrávání se kombinují předchozí dva typy zvětrávání s tím, že zde působí jako činitelé živé organismy (včetně člověka) a jejich různé aktivity. Příčinou mechanického působení mohou být například hlodavci při hloubení svých nor, prorůstající kořeny rostlin nebo člověk a jeho těžební činnost. Chemické zvětrávání zahrnuje třeba dýchání půdní fauny a flory, produkci různých látek rostlinami a činnost mikroorganismů.

Mikroorganismy obývají nejrůznější prostředí, od ledových oblastí Antarktidy po vroucí vody hydrotermálních pramenů, a proto je potenciální vliv mikrobů na geochemické změny významný (Banfield a kol. 1999). Výraznou úlohu hrají bakterie. Nejdůležitějším typem bakterií pro zvětrávání jsou bakterie chemotrofní, které získávají energii oxidací anorganických látek jako síra a železo, nebo bakterie vázající dusík (azobacter) přeměňující N a NO₃⁻ na NH₄⁺, čímž mohou ovlivnit pH půdy (Ollier 1969).

Organismy mají na zvětrávací procesy značný vliv, ale ten je přesto poměrně malý ve srovnání s člověkem (Hefferan a O'Brien 2010). Činnost člověka například podporuje vznik acidifikace, která může ovlivnit kvalitu podzemní vody. Zejména obsah NO₃⁻, SO₄²⁻ a Al³⁺ mohou způsobit, že taková voda již nebude pitná (Anbeek 1994). Jednou z příčin acidifikace je používání amonných hnojiv a chlévského hnoje, které vede k nitrifikaci amoniaku (Appelo a Postma 2005). Důsledkem spalování fosilních paliv vznikají oxidy dusíku a síry, které jsou pak oxidovány v atmosféře a vysrážejí se v podobě roztoků kyseliny dusičné a sírové, což je příčina kyselých srážek. Veliký acidifikační efekt je dosažen také těžbou nerostných surovin, a to zejména sulfidů, kdy jejich následná oxidace vede k produkci velkého množství protonů, zejména jedná-li se o pyrit.

Horniny jako granity, vyvřelé horniny a křemenné pískovce jsou velice náchylné k acidifikaci, protože obsahují málo rozpustné silikáty, zatímco bazické a ultrabazické horniny s rychle rozpustnými silikáty jsou k acidifikaci citlivé méně (Appelo a Postma 2005). Alkalinita produkovaná rozpouštějícími se vápenci je také zásadní faktor ovlivňující citlivost daného regionu vůči kyselým srážkám, protože jejich přítomnost má v krátké době velikou neutralizační schopnost (Marshall a Fairbridge 1999).

Rostliny a mikrobiální flóra ovlivňují zvětrávání minerálů několika způsoby. Podle Drevera (1993) to jsou zejména:

- tvorba ligandů a chelátů
- změna pH produkcí CO₂ a organických kyselin
- změna fyzikálních vlastností půd
- úprava doby setrvání vody v půdě (prodlužuje se doba reakce mezi minerály a vodou)
- vázání a zadržování jemných částic, čímž se zvětšuje povrch minerálu vystaveného zvětrávání
- vliv na hydrologické podmínky v lokálním i regionálním měřítku
- účinek na mechanický rozpad podloží

Hlavními faktory zvětrávání produkované rostlinami jsou CO₂, organické kyseliny a ligandy (působící převážně v horizontu 0, horizontu A a v půdě v okolí kořenů rostlin - rhizosféře) a kromě toho jsou s rostlinami spojené i další procesy jako oxidace, redukce a nitrifikace (Kelly a kol. 1998). Biologické procesy jsou velmi důležité například v udržování hladiny pH. Zejména rostliny, které při svém růstu spotřebovávají živiny v podobě kationtů, a při tom uvolňují H⁺ svými kořeny. Vodíkové ionty potom reagují s okolními minerály, které zvětrávají a uvolňují rostlinám živiny v podobě dalších kationtů jako K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺. Výsledné pH půdy je pak dáno charakterem převažujících složek. Budou-li například převládat karbonáty, zůstane půda alkalická. V opačném případě, kdy okolní minerály nemají takovou pufrací schopnost a uvolněné H⁺ převládají, bude půda kyselá. Jedná se o reakce, které jsou poměrně v rovnováze, ale ta může být narušena například kyselou atmosférickou depozicí (Stumm a Morgan 1996).

Rostliny i živočichové se ale mohou podílet na procesu zvětrávání i po odumření, protože během svého rozkladu se stanou zdrojem vody a CO₂, čímž se pH v půdě sníží (Plummer a Carlson 2008). Jako konečný produkt rozkladu rostlin vznikne organická hmota a různé organické kyseliny (Kelly a kol. 1998). Tlející rostliny a opad tvoří humus zadržující vlhkost, což napomáhá zvětrávání (Ollier 1969). Významným procesem je chelace, při níž dochází ke tvorbě komplexů. Jedná se o zachycení iontu (kovu) do struktury organického materiálu, a využity při tom mohou být i ionty z pevných nerozpustných látek. Při fermentaci organické hmoty (humusu) dochází ke zvýšení teploty, což je také důležitý faktor (Ollier 1969).

Stanovení vlivu rostlin na zvětrávání je obtížné. Evidentně se bude vliv rostlin na zvětrávání lišit v závislosti na klimatických, geologických a pedologických podmínkách. Obecně se má za to, že celkový efekt rostlin na chemické zvětrávání je malý (Drever 1993). Přesto je ale nutné s jejich vlivem počítat. Rostliny hrají důležitou roli v přenosu atmosférického CO₂ do zvětrávacího cyklu minerálů (Kelly a kol. 1998). Kořeny vyšších rostlin mohou působit mechanickou silou při prorůstání puklinami hornin, a zároveň vylučují další látky mající vliv na chemické složení ve svém okolí. V rámci fotosyntézy a respirace ovlivňují bilanci CO₂, a tím mají vliv na kolísání pH (vlivem fotosyntézy panuje rozdíl mezi dnem, kdy je oxid uhličitý pohlčován, a nocí, kdy jeho obsah roste). Kořeny rostlin mohou sahát do velké hloubky a tím napomáhat koloběhu prvků (živin) z minerálů, což také podporuje další zvětrávání (Ollier 1969). Lišejníky na horninu působí organickými kyselinami jen v jejich těsné blízkosti, už ne do hloubky, a tak je jejich podíl na celkovém zvětrávání nepatrný (Drever 1993).

Lesy představují jeden z nejsložitějších ekosystémů na naší planetě. Při jejich poznávání je třeba vnímat pestrost podmínek a složitost vztahů, které zde panují a na nichž jsou všechny zde probíhající procesy závislé. Zvětrávání se může stát důležitým mechanismem neutralizujícím aciditu v lesních půdách a stromy mohou mít na tento proces různý vliv. Liší se například i mezi jednotlivými druhy. Celkový efekt stromů je ale spíše malý a primárně má největší vliv zvětrávání hornin a jejich původní

složení (Dijkstra a kol. 2002). Z určitého pohledu ale nelze jejich účinek opomíjet. Menší je vliv organických kyselin, ale to neznamená, že by byl malý i samotný vliv rostlin. Ty mají veliký podíl na fyzikální vlastnosti půd vázáním jemných částic a rozměňováním podložních hornin, tedy spíše mechanickým působením než chemickým vlivem (Drever a Stillings 1996).

Také evapotranspirace může být ovlivněna lesním porostem. Evapotranspirace zvyšuje koncentraci roztoků a to má vliv na změnu pH (Appelo a Postma 2005). Důsledek evapotranspirace ale také není zcela jednoznačný. V lokálním měřítku větší evapotranspirace snižuje povrchový odtok a může tak snížit zvětrávací procesy, zatímco z regionálního pohledu se může voda odpařená během evapotranspirace v podobě srážek vracet zpět do půdy i v několika cyklech, než odeče do oceánu, a s každým opětovným vstupem do půdy se podílí na zvětrávání (Drever 1993).

2. ZVĚTRÁVÁNÍ SULFIDŮ A SILIKÁTŮ

2.1 Silikáty

Silikáty jsou nejčastěji zastoupené minerály na Zemi. Základní složkou silikátů je silikátový tetraedr (čtyři atomy kyslíku s poloměrem 1,32 Å obklopující jeden atom křemíku o poloměru 0,39 Å). Podle uspořádání těchto tetraedrů se pak silikátové minerály dělí do několika skupin. Stabilita silikátů většinou roste s vyšším stupněm jejich uspořádání (tedy takto: nesilikáty < sorosilikáty < cyklosilikáty < inosilikáty < fylosilikáty < tektosilikáty), ale strukturní uspořádání nemusí být vždy nejdůležitějším faktorem pro stabilitu, jak dokazuje například zirkon, který patří mezi nejstabilnější silikátové minerály, ačkoliv je jeho struktura složena z jednotlivých SiO₄ tetraedrů (Ollier 1969). Další silikát velice odolný chemickému i mechanickému zvětrávání je křemen, který je díky své struktuře řazen mezi tektosilikáty, přestože se jedná z chemického hlediska o oxid. Křemen je poměrně odolný vůči chemickému zvětrávání díky silné vazbě křemíku a kyslíku, zatímco železo-hořečnaté minerály jako olivín, pyroxen a amfibol obsahují další pozitivně nabitě ionty (Al, Fe, Mg, Ca), jejichž přítomnost v krystalové mřížce způsobuje slabší vazbu s kyslíkem a tím i nižší odolnost vůči chemickému zvětrávání (Plummer a Carlson 2008). Plagioklasy jsou velmi štěpné, a proto dochází k jejich rychlé alteraci, zejména těch vápenatých (Ollier 1969).

Neexistuje žádná reakce jednoznačně charakterizující zvětrávání silikátů, protože se od sebe jednotlivé případy liší. Vždy záleží na složení původního minerálu, hydraulickém režimu a následně vzniklých sekundárních minerálech. V případě silikátů má veliký význam rozmístění silikátových tetraedrů a druh kationtů. Ve většině případech hraje velkou roli voda a kyselina uhličitá jako hlavní reaktanty. Rozrušování silikátů činností vody probíhá třemi souběžnými procesy: nahrazení kationtů vodíkovým iontem z vody, oxidace železnatých iontů na železité a hydratace nestabilních částí krystalové mřížky vystavených vodě (Ollier 1969). Při zvětrávání většiny silikátů vznikají zejména jílové minerály, ale při působení většího množství roztoků také hydratované oxidy hliníku a železa (Mihaljevič a Moldan 2000).

Zvětrávání silikátů má vliv na úrodnost půdy, protože při něm dochází k uvolňování živin (White a Brantley 1995). Chemické zvětrávání silikátových minerálů hraje hlavní roli v geochemických cyklech, zejména CO₂, a tak může mít tento proces v delším časovém horizontu vliv na klima (Drever 1993). Zvětrávání Ca a Mg silikátů zásobuje těmito prvky oceán - ty se mohou následně vysrážet v podobě karbonátů a snížit množství CO₂ v atmosféře (Banfield a kol. 1999).

Zvětrávání silikátů je nejdůležitější pH-pufrační mechanismus v sedimentech neobsahujících karbonáty, protože má schopnost v dlouhodobém měřítku neutralizovat kyselost a vede ke zvyšování pH. Jelikož je ale tato reakce pomalá, jsou zvodně v silikátových horninách náchylné k acidifikaci v případě, že dochází k přínosu kyselých složek rychle (Appelo a Postma 2005).

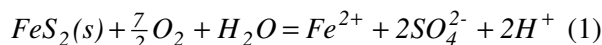
2.2 Sulfidy

Těžba má značný podíl na tom, že jsou některé podzemní materiály lépe zpřístupněny zvětráním, než by tomu bylo za normálních podmínek. Příkladem mohou být některá ložiska sulfidů, která se dříve nalézala v redukčních podmínkách pod hladinou podzemní vody, ale v současnosti se minerály objevují na zemském povrchu v oxidační zóně, kde dochází k jejich zvětrávání. Sulfidy jsou také velmi často součástí skrývky či upravárenských odpadů vznikajících během těžební činnosti a obvykle se ukládají v blízkosti ložiska na haldy. Nejčastějším typem sulfidových minerálů je pyrit, který je přítomný ve většině hornin a ložisek (Wenk a Bulakh 2004) a oxidace pyritu je hlavní příčinou vzniku kyselých důlních vod (Šrámek 1997).

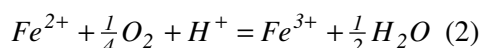
2.2.1 Zvětrávání pyritu

Pyrit FeS_2 je stabilní v redukčním prostředí, ale v oxidačních podmínkách se velice rychle a intenzivně mění. Mechanismus zvětrávání pyritu popisují Stumm a Morgan (1996) následovně:

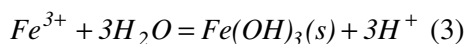
- Nejprve dojde k přímé oxidaci sulfidu působením kyslíku a vody, kdy vznikne z pyritu síran a dojde k uvolnění dvojmocného železa a vodíkových iontů do vody (1).



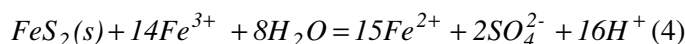
- Dvojmocné železo je pak následně oxidováno na trojmocné (2).



- Trojmocné železo může být hydrolyzováno a dojde k vysrážení poměrně nerozpustného hydroxidu železitého (3). Při této reakci se uvolní kyselost.



- Hydroxid železitý ale vzniká při $pH > 3$ v oxidačním prostředí, při pH menším než 3 se hydroxid železitý nevysráží a trojmocné železo pak jako silný oxidant může oxidovat pyrit (Šrámek 1997). To vyjadřuje poslední rovnice (4). Tato reakce je mnohem rychlejší oproti oxidaci pyritu atmosférickým kyslíkem (McKibben a kol. 2008).



Kinetika oxidace Fe^{2+} na Fe^{3+} je limitujícím faktorem při formování kyselých důlních vod, při čemž je tato reakce při nízkých hodnotách pH relativně pomalá, ale její průběh může být urychlen katalýzou prováděnou bakteriemi *Thiobacillus ferrooxidans* (Šrámek 1997). Bakteriální oxidace dvojmocného železa uvolněného z povrchu pyritu může být až milionkrát rychlejší než oxidace anorganická (Banfield a kol. 1999).

Kyslík je nezbytný k zahájení oxidace pyritu a k opětovné oxidaci redukováného Fe^{2+} na Fe^{3+} , ale pokud už halda obsahuje větší množství Fe^{3+} , bude pyrit dál oxidovaný i bez přístupu vzduchu jen pomocí Fe^{3+} , a tak se mohou kyselé důlní vody tvořit s velkou setrvačností po mnoho dalších let (Šrámek 1997).

Doly a s nimi spojený vznik kyselých důlních vod o $pH < 3$ jsou v současnosti důležitým environmentálním problémem (Marshall a Fairbridge 1999). V některých oblastech dosáhlo pH takové kyselé důlní drenáže i záporných hodnot. Nejnižší dosud zjištěné pH bylo -3,6 v kalifornském dole Richmond v Iron Mountains (Nordstrom a kol. 2000).

Karbonáty (kalcit či dolomit) mohou zachytávat H^+ ionty uvolněné při oxidaci sulfidů, a mají tak neutralizační efekt. V případě těžebních odpadů jsou však obsaženy spíše v nízkých koncentracích, a tak jsou tyto minerály v krátkém čase zcela zkonsumovány (Šrámek 1997). Většina remediačních technik využívá pasivního zvětrávání technického vápence, který po přidání k sulfidům zvyšuje alkalinitu a zmírňuje degradaci prostředí (Marshall a Fairbridge 1999). Další neutralizační reakce přispívajících ke zpomalení poklesu pH může být rozpouštění hydroxidů (např. $Al(OH)_3$) a silikátů (např. slídy a živce), avšak tyto reakce jsou mnohem pomalejší než rozpouštění karbonátů a nemohou udržet pH v neutrální oblasti (Šrámek 1997). V Iron Mountains je přítomno velice málo neutralizačního materiálu, převážná část sulfidu se nachází v zóně nenasycené vodou (s velmi snadným přístupem kyslíku), je zde vysoká teplota v průběhu celého roku, která je ještě zvýšena teplem produkovaným při oxidaci pyritu, což má za následek vysoký výpar důlních vod a následně i jejich vyšší koncentraci (Šrámek, 1997). Proto je zde tak extrémně nízké pH .

3. ZVĚTRÁVACÍ EXPERIMENTY

3.1 Zkoumání arsenových minerálů

Sulfidy jsou v blízkosti zemského povrchu značně nestabilní a v kyselých oxidačních podmínkách dochází k jejich zvětrávání. Pokud navíc obsahují toxický arsen, je studium takovýchto minerálů a jejich chování velice významné zejména z environmentálního hlediska. Běžně se vyskytující sulfidy s obsahem arsenu jsou kromě jiných také arsenopyrit, realgar či löllingit, ale As se může vyskytovat jako stopová složka i v minerálech, které ho ve své struktuře primárně neobsahují, jak tomu často bývá například u pyritu (Drahota a Filippi 2009). Jedním z hlavních důvodů, proč je velká pozornost věnována zvětrávání arsenových minerálů, je pochopení mobility arsenu za různých podmínek a možnosti jeho stabilizace v málo rozpustné podobě tak, aby byl co nejméně toxický pro životní prostředí (Pertold 1998).

3.1.1 Sorpce arsenu na jiné minerály

Migrace arsenu je nejvyšší v přechodné zóně mezi oxidačním a redukčním prostředím (Šráček 1997). V redukčním prostředí dochází k redukci síranů na sulfidy, a tak může být arsen vysrážen v podobě sekundárního minerálu. V oxidačním prostředí je mobilita As značně určována jeho adsorpcí na hydroxidy železa, což je důležitý proces ovlivňující koncentraci arsenu ve vodních systémech.

Sorpční vlastnosti minerálů se staly předmětem studia kyselých důlních vod v opuštěném finském dole Paroistenjärvi, kde dříve probíhala těžba mědi (Carlson a kol. 2002). Cílem výzkumu bylo zjistit, zda jsou přítomné sraženiny schwertmannitu, ferrihydritu a goethitu primárními sorbenty arsenu. Porovnávány byly přírodní a synteticky vyrobené vzorky. Bylo zjištěno, že za určitých hodnot pH může být koncentrace arsenu tímto způsobem snížena. Například schwertmanit je důležitým minerálem pro sorpci arseničnanů v kyselých důlních vodách o pH 2 - 4. Za normálních podmínek má schwertmanit veliký povrch tvořený jehličkami, které byly s narůstající koncentrací arsenu rozrušovány vznikem FeOHAs. FeOHAs byl však prokázán jen na synteticky vyrobených vzorcích v laboratoři, v přírodních vzorcích nalezen nebyl, což je příkladem toho, jak se výsledky laboratorních a terénních experimentů liší a je třeba dalšího studia.

3.1.2 Mineralogický vývoj arsenových minerálů

Pochopení procesů v rámci oxidace arsenových rud následované vysrážením sekundárních minerálů také pomáhá rozšířit dosavadní znalosti o chování arsenu v přírodě. Studium vzniku sekundárních minerálů se tak stalo cílem mnoha experimentů. Filippi (2004) se zabýval mineralogickým vývojem arsenových minerálů v opuštěném lomu v Přebuzi (Krušné hory). Předmětem studia byl jemně mletý rudní koncentrát, který vznikl jako vedlejší produkt těžby kasiteritu, jež zde v minulosti probíhala. Převažujícími rudními minerály byly arsenopyrit a löllingit, jejichž oxidace vedla ke kontaminaci okolí arsenem. Jemně namletý arsenový koncentrát byl sice uzavřen do betonového bunkru, který částečně bránil jakýmkoliv změnám rudních minerálů, ale po jeho zbourání byl koncentrát vystaven po dvacet let klimatickým vlivům, což způsobilo veliké změny primárních minerálů. Těleso tak bylo silně zpevněno a překryto minerály sekundárními jako arsenolit, skorodit, kaatialait a síra. Tyto sekundární minerály se nacházely v podobě vrstvičky na povrchu koncentrátu anebo jako cement mezi primárními zrny v podpovrchových částech tělesa. Nález kaatialaitu v ložisku Přebuz byl dokonce teprve druhým zaznamenaným výskytem tohoto minerálu na území ČR (poprvé v Jáchymovském rudním okrsku) a potvrzení jeho výskytu v lomu rozšířilo výčet minerálů, které mohou být považovány za faktory

ovlivňující mobilitu arsenu v ŽP. Bylo provedeno detailní vzorkování a dokumentace povrchových a podpovrchových vzorků a velmi zvětralých vzorků z blízkosti bunkru. Studované vzorky naznačují, že roztoky vzniklé rozpuštěním rudních minerálů pronikly do větších hloubek a vysrážely se zde v podobě sekundárního cementu obklopujícího zrna rudy, čímž došlo ke zpomalování procesu zvětrávání uvnitř rudního tělesa. To je také důvod, proč zrna rud v mírně zvětralých vzorcích z podpovrchových částí nenesla známky rozpouštění, ačkoliv byla obklopená cementem ze sekundárních minerálů. Oxidace sulfidů zapříčinila nízké pH, které bylo na povrchu haldy pravděpodobně umocněno také vlivem podkorunových srážek. To vedlo k rozpouštění arsenolitu a skoroditu, a došlo tak ke kontaminaci okolí arsenem, což bylo potvrzeno zvýšenou koncentrací arsenu zaznamenanou v těsné blízkosti koncentrátu. Biologická oxidace bakteriální činností zde nebyla studována, ale pravděpodobně hraje také významnou roli.

Tvorba sekundárních minerálů tedy hraje významnou roli v migraci arsenu a jeho chování v ekosystému. Z mineralogického hlediska však bývají sekundární fáze vznikající během oxidace rudních minerálů identifikovatelné jen obecně, a to může být problém při porovnávání s laboratorními experimentálními daty a je třeba brát na to zřetel (Filippi 2004).

3.2 Vliv vegetace na zvětrávání

Určit vliv vegetace na minerály ze stávajících minerálů je velice obtížné, protože ty zvětrávaly ještě před tím, než se v jejich blízkosti objevil současný porost, a proto je lepší do půd vložit „čerstvé“ minerály, pomocí nichž lze poměrně dobře stanovit aktuální dynamiku rozpustnosti, jsou-li ponechány nějakou dobu v půdě (Augussto a kol. 2000). Intenzita zvětrávání minerálů totiž klesá se stářím materiálu - čerstvá minerální zrna se rozpouštějí rychleji než ta starší (Appelo a Postma 2005).

3.2.1 Vliv vegetace na alteraci arsenopyritu

V Načetíně (Krušné hory) proběhl experiment, jehož cílem bylo zjistit, co se stane s arsenopyritem, bude-li se nalézat v místech s odlišným typem vegetačního porostu (Mihaljevič a kol. 2010). Do půd tří odlišných lokalit (smrkový les, bukový les a nezalesněná louka) tak byly v různých hloubkách kopaných sond uloženy nylonové sáčky s nadrceným arsenopyritem. Po uplynutí jednoho roku byly vzorky vyjmuty ze země a převezeny do laboratoře, kde proběhla pomocí mnoha různých metod jejich analýza. V kyselém oxidačním prostředí vzniká jako nejčastější sekundární minerál arsenu skorodit (Vink 1996). Tak tomu bylo i v tomto případě. Podmínky vhodné pro vznik skoroditu v těchto třech lokalitách byly dány vlastnostmi půd. Ty se od sebe vzájemně lišily množstvím stromového opadu, jeho složením a různou schopností jednotlivých druhů stromů zachytávat atmosférické depozice. Také odlišné složení půdních roztoků přicházejících do kontaktu s minerálem na jednotlivých plochách mělo vliv na různou intenzitu zvětrávání. Nejrychleji arsenopyrit zvětrával v půdě bukového lesa, kde se vytvořilo největší množství skoroditu, a to v hloubce 3-10 cm, což zahrnuje vrstvu opadu a horizont A. Je to přisuzováno rychlé mineralizaci organické hmoty a následné tvorbě dusičnanů, dobrým průsakovým podmínkám a kvalitě a množství listového opadu v horizontu 0. Nejméně skoroditu vzniklo v nezalesněné oblasti. Byl tak prokázán jasný účinek přítomné vegetace na rychlost zvětrávání minerálů a míru jejich stability v daném prostředí.

3.2.2 Vliv různých druhů stromů na zvětrávání živce

In situ experiment který provedli Augussto a kol. (2000) měl za cíl posoudit dopad lesního porostu na rozpustnost plagioklasu. Rozpouštěcí dynamika půdních minerálů byla tímto experimentem objasněna,

ale byla k tomu potřeba poměrně delší doba, po jakou experiment probíhal. Určité množství testovaného minerálu bylo uloženo do půdy jednotlivých stanovišť po 3 a 9 let. Jednalo se o směs labradoritu a křemene pod porostem smrku, borovice, buku a dubu. Rozpustnost minerálu a následná ztráta jeho hmoty se odvíjely zejména od typu půdy a jejího pH. Vliv doby působení zvětrávání byl patrný, jelikož vzorky ponechané v půdě po 9 let měly větší hmotnostní ztráty než vzorky 3leté. Odlišné známky zvětrávání byly pozorovány i v závislosti na hloubce, kdy s narůstající hloubkou jeho intenzita klesala.

Rychlost rozpouštění minerálu v průběhu času klesala, patrně díky úbytku snadno zvětrávajících míst a vznikem tenké vrstvičky na povrchu minerálu, která snížila reaktivitu povrchu minerálu. Možný je také vliv nylonových sáčků, které mohly snížit rozpustnost tím, že se k minerálu nedostalo tolik vody, kolik by jí jinak opravdu bylo. K největším změnám minerálu došlo v opadové vrstvě ve vyšších částech půdy, protože jsou nejbližší ke zdroji acidity a humidity ekosystému (podkorunové srážky, atmosférická depozice, mineralizace organické hmoty, nitrifikace a jiné biologické faktory).

Rozpustnost živců je závislá na několika faktorech. V laboratorních podmínkách to byly zejména pH (mezi pH 4,5 a 8 je rozpustnost nejnižší), teplota (čím vyšší teplota, tím lepší rozpustnost), množství vody, míra koncentrace iontů v roztoku (rozpustnost klesá se vzrůstajícím množstvím kationtů K, Na a Ca), přítomnost ligandů (jejich množství napomáhá minerály rozpouštět), velikost povrchu na kontaktu s roztoky a celkový stav minerálu. Vliv na zvětrávání minerálů v půdě zaznamenané v terénu mělo zejména pH, hloubka, typ půdy, druh stromového porostu, podkorunové srážky, atmosférická depozice, mineralizace organické hmoty, nitrifikace a jiné biologické faktory. Teplota nebyla v tomto experimentu zásadním faktorem, protože byla na všech stanovištích podobná.

Rozpustnost minerálu v lesních půdách je dána zejména jejich pH. Tu významně ovlivňují stromy. V tomto případě se jednalo o jehličnany, které zde podpořily rozpustnost mnohem více než stromy listnaté, což je přisuzováno schopnosti jehličnanů lépe zachytit atmosférickou depozici (která bývá často kyselá) a také kyselejšímu charakteru jehličí. Roli hraje i voda stékající po kmenech stromů. Rozdílný efekt jednotlivých druhů stromů na zvětrávání byl dán tím, že pH půd pod nimi se lišilo. Bylo tedy prokázáno, že vliv vegetace napomáhá více či méně zvětrávacím podmínkám, i když je dynamika zvětrávání ovlivněna především klimatem a charakterem půdy. Přestože má tedy vliv vegetace na zvětrávání jen menší podíl, jsou jednotlivé druhy stromů důležitým faktorem, na který by měl být brán zřetel při posuzování odolnosti půdních minerálů.

ZÁVĚR

Zvětrávání hornin a minerálů je důležitý proces probíhající na zemském povrchu, během něhož je původní materiál působením nejrůznějších činitelů přeměněn, a při tom může dojít k uvolnění látek, které mohou unikat do okolí a případně ho ohrožovat svou toxicitou. Nejen proto jsou prováděné experimenty zabývající se chováním minerálů v různém prostředí velice důležité. Jedná se o složitý výzkum, jehož cílem je pochopení širokého komplexu mnoha různých procesů a reakcí, a je třeba vnímat veškeré aspekty, které mohou mít na jejich průběh vliv.

Protože je každá lokalita jedinečná a specifická zejména svými geologickými, klimatickými a biologickými parametry, je nezbytné provádět experimenty nejen modelově v laboratoři, ale také přímo ve zkoumané oblasti takzvaně in situ, aby jejich celkový výsledek co nejlépe odpovídal skutečným podmínkám panujícím na daném místě. Nevýhodou takového výzkumu je dlouhá doba potřebná k tomu, aby se výsledky prováděného experimentu nejvíce blížily skutečnosti, a také fakt, že se během této doby mohou podmínky zvětrávání průběžně měnit, což může cestu ke správným výsledkům komplikovat. Dalším nedostatkem může do jisté míry být také to, že poznatky vyplývající z takovýchto studií konkrétní lokality nemusejí být kvůli jejich specifickým vlastnostem obecně aplikovatelné na jiném místě.

Pro pochopení chování nejrůznějších látek a jejich toků v daném ekosystému jsou tyto výzkumy ale nesmírně významné. Praktické využití nalézají například tam, kde se jedná o řešení otázky sanace či rekultivace dané lokality po těžbě a prevenci dalšího znečištění, což je jedna z významných činností, na kterou se v současné době klade veliký důraz. Evidentní pozitivní přínos těchto nezaměnitelných experimentů je tak jasným signálem toho, že se bez nich současný a nejspíše ani budoucí výzkum neobejde.

POUŽITÁ LITERATURA

- Anbeek C., 1994. *Mechanism and kinetics of mineral weathering under acid conditions*. CIP-Data Koninklijke Bibliotheek, Haag, 210 str.
- Augussto L., Turpault M. P., Ranger J., 2000. Impact of forest tree species on feldspar weathering rates. *Geoderma*, 96: 215-237
- Banfield J. F., Barker W. W., Welch S. A. a Taunton A., 1999. Biological impact on mineral dissolution: Application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96: 3404-3411.
- Carlson L., Bigham J. M., Schwertmann U., Kyek A. a Wagner F., 2002. Scavenging of As from acid mine drainage by schwertmannite and ferrihydrite: a comparison with synthetic analogues. *Environ. Sci. Technol.*, 36: 1712-1719
- Dijkstra F. A., Breemen N. V., Jongmans A. G., Davies G. R. a Likens G. E., 2002. Calcium weathering in forested soils and the effect of different tree species. *Biogeochemistry*, 62: 253-275.
- Drahota P. a Filippi M., 2009. Secondary arsenic minerals in the environment: A review. *Eviron. Int.*, 35: 1243-1255.
- Drever J. I., 1993. The effect of land plants on weathering rates of silicate minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58: 2325-2332.
- Drever J. I. a Stillings L. L., 1996. The role of organic acids in mineral weathering. *Physicochem. Eng. Aspects*, 120: 167-181.
- Filippi M., 2004. Oxidation of the arsenic-rich concentrate at the Přebuz abandoned mine (Erzgebirge Mts., CZ): mineralogical evolution. *Sci. Total Environ.*, 322: 271-282.
- Goldich S. S., 1938. A study in rock-weathering. *J. Geol.*, 46: 17-58.
- Hefferan K. a O'Brien J., 2010. *Earth materials*. UK, Wiley-Blackwell, 612 str.
- Kelly E. F., Chadwick O. A. a Hilinski T. E., 1998. The effect of plants on mineral weathering. *Biogeochemistry*, 42: 21-53.
- Kump L. R., Brantley S. L. a Arthur M. A., 2000. Chemical weathering, atmospheric CO₂ and climate. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 11-667.
- Loughnan F. C., 1969. *Chemical weathering of the silicate minerals*. American Elsevier Publishing Company, Inc., New York, 154 str.
- Marshall C. P. a Fairbridge R. W., 1999. *Encyclopedia of geochemistry*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 712 str.
- Matsukura Y., Hattanji T., Oguchi Ch. T. a Hirose T., 2007. Ten year measurements of weathering rates of rock tablets on a forested hillslope in a humid temperate region, Japan. *Z. Geomorph. N. F.*, 51: 27-40.
- McKibben M. A., Tallant B. A a del Angel J. K., 2008. Kinetics of inorganic arsenopyrite oxidation in acidic aqueous solutions. *Appl. Geochem.* 23:121-135.
- Mihaljevič M. a Moldan B., 2000. *Otázky biogeochemie*. Karolinum, Praha, 105 str.
- Mihaljevič M., Ettler V., Šebek O., Drahota P., Strnad L., Procházka R., Zeman J. a Šrámek O., 2010. Alteration of arsenopyrite in soils under different vegetation covers. *Sci. Total Environ.*, 408: 1286-1294.

- Nordstrom D. K., Alpers Ch. N., Ptacek C. J., Blowes D. W., 2000. Negative pH and Extremely Acidic Mine Waters from Iron Mountain, California. *Environ. Sci. Technol.*, 34(2): 254-258.
- Ollier C., 1969. *Weathering*. Oliver & Boyd, Edinburgh, 304 str.
- Pertold Z., 1998. Arzen v životním prostředí. *Vesmír*, 77(6): 323-325.
- Petránek J., 1993: *Encyklopedie geologie*. Jih, České Budějovice, 246 str.
- Plummer Ch. C. a Carlson D. H., 2008. *Physical Geology (Twelfth Edition)*. McGraw-Hill, New York, 651 str.
- Stumm W. a Morgan J.J., 1996. *Aquatic Chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters (3rd ed.)*, John Wiley & Sons, New York, 1022 str.
- Stumm W. a Wollast R., 1990. Coordination chemistry of weathering: Kinetics of the surface-controlled dissolution of oxide minerals, *Rev. Geophys.*, 28(1): 53-69.
- Šráček O., 1997. Problém důlních odpadů. *Vesmír*, 76(4): 190-191.
- Vink B. W., 1996. Stability relations of antimony and arsenic compounds in the light of revised and extended Eh-pH diagrams. *Chem. Geol.*, 130:21-30.
- Wenk H. R. a Bulakh A., 2004. *Minerals: their constitution and origin*. Cambridge University Press, New York, 668 str.
- White A. F. a Brantley S. L., 1995. Chemical weathering rates of silicate minerals: an overview. *Rev. Mineral.*, 31: 1-22.