

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta  
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky



## **Vliv stlačení na rychlost solného zvětrávání pískovce**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Jana Vaculíková

**Vedoucí: RNDr. Jiří Bruthans, PhD.**

Praha, Srpen 2012

## Obsah:

Seznam obrázků a tabulek.....	3
1. Úvod .....	4
2. Definice solného zvětrávání .....	4
2.1. Stručný přehled prací zkoumajících solné zvětrávání v laboratorních podmínkách.....	5
3. Experimentální sledování vlivu zatížení na solné zvětrávání.....	10
3.1. Popis zkoumaných hornin .....	10
3.2. Metodika.....	12
3.3. Výsledky výpočtů porozity.....	16
3.4. Výsledky zkoušek na vodou erodovatelném pískovci Q.....	16
3.4.1. Výsledky zkoušky s $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .....	16
3.4.2. Výsledky zkoušky s $\text{NaCl}$ .....	16
3.4.3. Výsledky zkoušek s $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ .....	16
3.5. Výsledky zkoušek na ostatních horninách.....	17
3.5.1. Výsledky zkoušky s $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	17
4. Diskuze .....	20
5. Závěr .....	21
Seznam použité literatury.....	22

## Seznam obrázků a tabulek

<i>Obrázek 1: Vývoj hmotnosti vzorků v suchém stavu. (angeli et al,2010)</i> .....	6
<i>Obrázek 2: Vzorky podrobené krystalizační zkoušce Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, na začátku a po 11 cyklech (Rothert et al.(2007).</i> .....	7
<i>Obrázek 3: Váhový úbytek pro tři vzorky leinsterského granitu po padesáti cyklech saturace v 10 % síranu sodném. (A)nestažený vzorek, (B) vzorek stažený silou 900 kNm-2, (C) vzorek stažený silou 1800 kNm.2 (Smith et al. 2005)</i> .....	8
<i>Obrázek 4: Změny hmotnosti vzorků při zkoušce odolnosti proti krystalizaci solí. (Šimková a Durmeková, 2010)</i> .....	9
<i>Obrázek 5: Ukázka stažení vzorků H 6, 13, 15 a 17. (foto J. Soukup)</i> .....	13
<i>Obrázek 6: Ukázka stažení vzorků H 22, 25, 27 a 29. (foto J. Soukup)</i> .....	14
<i>Obrázek 7: Ukázka metody stažení vzorku. (foto J.Soukup)</i> .....	14
<i>Obrázek 8: Graf množství přidaného roztoku CaSo<sub>4</sub> . H<sub>2</sub>O, NaCl a KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> . 12 H<sub>2</sub>O</i> .....	17
<i>Obrázek 10: Stažené a nestažené vzorky, průměry ze 3 vzorků stažených a 3 vzorků stažených od hornin K, T, V.</i> .....	18
<i>Obrázek 11: Stažené a nestažené vzorky, ze 3 vzorků stažených a 3 vzorků stažených od hornin P, UP, UT.</i> .....	18
<i>Obrázek 12: Stažené a nestažené vzorky H 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 (zatím 52 cyklů).</i> .....	19
<i>Obrázek 13: Stažené a nestažené vzorky H 1, 6, 13, 14, 15, 16, 17, 18 (zatím 72 cyklů)</i> .....	19
<i>Tabulka 1: Charakteristika zkoumaných hornin Q, H, K, P, T, V, UP, UT</i> .....	10
<i>Tabulka 2: přehled parametrů pro zkoušky na hruboskalském pískovci (míra vysušení před zkouškou- suchý=sušeno v peci při 105°C 2 dny, -vlhký=přirozená vlhkost z lomu)</i> .....	12
<i>Tabulka 3: Porozita zkoumaných hornin odvozená z hustoty materiálu.</i> .....	16

## 1. Úvod

Vlhkost či kapilární roztoky jsou nejdůležitějším faktorem, působícím zvětrávání hornin. Vlhkost nikdy nepůsobí sama o sobě, ale je nositelem solí, živým médiem mikroorganismů a příčinou mrazového zvětrávání. Dnes uvažujeme o solném zvětrávání v přirozeném prostředí skalních měst české křídové pánve i v umělém prostředí měst a obcí (Cílek et al., 1998). Ačkoliv je existence solného zvětrávání a jeho vliv na rozpad porézních stavebních materiálů známá již dlouho, průběh a řídicí síly solí vyvolaného zvětrávání je stále předmětem mnoha diskuzí (Ruedrich a Siegesmund, 2007). Solným zvětráváním se zabývá množství autorů, například Angeli et al., (2010); Bonn et al., (2010); Rothert et al., (2007); Ruedrich a Siegesmund (2007); Smith et al., (2005); Yu a Oguchi (2010); Šimková a Durmeková, (2010) a další. Jimi provedené zkoušky vedly jak ke zjištění technických vlastností stavebních materiálů, tak k posouzení vlivu solných roztoků na různé typy hornin.

Co se týká solného zvětrávání různých typů hornin, všichni citovaní autoři dochází k podobným závěrům. Zjistili například, že rozdíl v chování jednotlivých vzorků je dán odlišnou mineralogií, či heterogenitami ve vzorcích. Chemické složení solného roztoku má vliv na různou distribuci solí ve vzorku, určuje, zda se budou tvořit solné výkvěty na povrchu, nebo bude docházet k akumulaci solí uvnitř. Vliv má také koncentrace solného roztoku, k čemuž jsem došla i při svém zkoumání. Kromě Smithe et al. (2005) žádný z autorů zatím nezkoumal vliv zatížení na solný rozpad, přičemž ani zkoušky na pouhých dvou zatížených vzorcích, které prováděl Smith et al. (2005) se nezdají být dostatečné k prokázání vztahu mezi mírou zatížení a intenzitou solného rozpadu. V rámci projektu výzkumu pískovcového reliéfu v ČR a Colorado Plateau (USA) prováděného ve spolupráci s výzkumníky z Brigham Young University jsem se zabývala vlivem jednoosého stlačení na solný rozpad. Pomocí laboratorních metod jsem solný rozpad studovala na několika typech hornin, převážně na pískovcích, z různých lokalit. Cílem bylo zjistit, zda zatížení rozpad zrychluje, jak tvrdí Smith et al. (2005) či naopak zpomaluje, případně nemá měřitelný vliv.

## 2. Definice solného zvětrávání

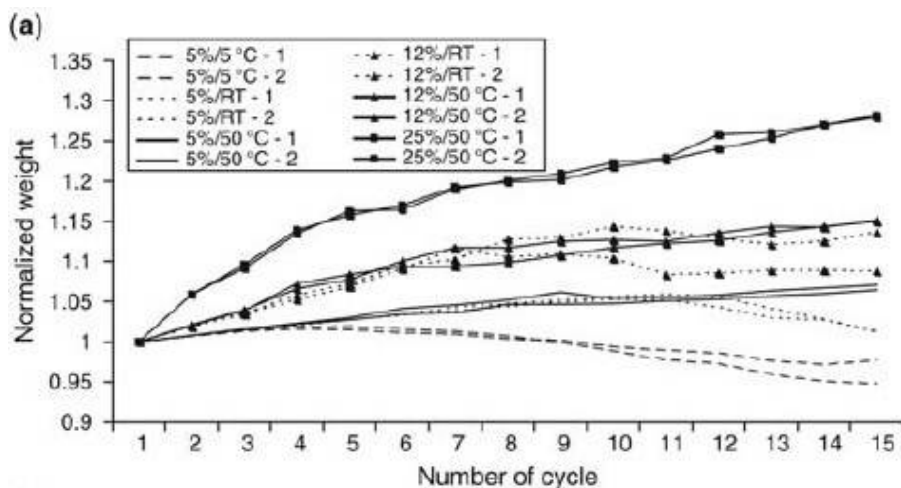
Solné zvětrávání je forma mechanického nebo fyzikálního zvětrávání hornin, kdy zvětšující se solné krystaly vyvíjejí tlak na stěny pórů horniny, který překračuje pevnost v tahu dané horniny (Kwaad, 2012). Jak již zjistil Kwaad (1970), nejintenzivnější rozpad ze zkoumaných solí způsobuje  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Nejčastěji používaná sůl pro rychlé testování solného zvětrávání přírodních hornin a stavebních materiálů je proto síran sodný (Steiger a Asmussen 2008). Na – sírany vznikají nejčastěji reakcí kyselých dešťů s jílovými minerály (Cílek et al., 1998).  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  je bílá krystalická látka známá jako

minerál thenardit. Tato sůl je bezvodá, ale velmi rychle se může změnit na solnou fázi bohatou na vodu s názvem mirabilit ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ). Hygroskopické chování solí je velmi důležité, protože při dané přeměně dokáže sůl zvýšit svůj objem o 300 % (Ruedrich a Siegesmund, 2007); (Šimková a Durmeková, 2010). Mirabilit a thenardit mají tendenci srážet se uvnitř pórů, kde vytvářejí krystaly (Rodriguez – Navarro a Doehne, 1999). Avšak základní chování při krystalizaci siranu sodného a jeho vliv na rozpad je stále ne zcela pochopen a vede tedy k nesprávným výkladům a polemikám. Jak uvádí Rodriguez – Navarro et al. (2000), je krystalizační tlak při srážení thenarditu za rozpad zodpovědný více než tlaky hydratační.

## 2.1. Stručný přehled prací zkoumajících solné zvětrávání v laboratorních podmínkách

Angeli et al. (2010) použil ke své studii solného rozpadu lutetiánský vápenec z Pařížské pánve, známý jako „roche fine“. Tento materiál si vybral z několika důvodů. Především proto, že je homogenní, zkoušky tedy lze dobře reprodukovat, není příliš odolný vůči solnému rozpadu, takže jsou testy poměrně rychlé, navíc byl v minulosti použit pro výstavbu mnoha pařížských památek. Jedná se o jemnozrnný vápenec složený z kalcitu (90%) a křemene (10%) s vysokou porozitou (37,2 %) a velmi nízkou pevností v tahu (1.5 MPa). Dvanáct vzorků o velikosti 7x7x7 cm bylo podrobeno zkouškám přejatých z EN 12370. Tyto testy byly provedeny při třech rozdílných teplotách, 5°C, 25°C (RT, pokojová teplota) a 50°C. Zároveň byly použity tři různé koncentrace  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ , 5, 12 a 25%. Nakonec bylo testováno 6 termodynamických podmínek, 5%/5°C, 5%/25°C, 5%/50°C, 12%/25°C, 12%/50°C a 25%/50°C. Test se skládá z cyklů, které trvají 24 hodin a zahrnují tři fáze: saturace při dané teplotě (5,25 a 50°C), vzorky sáknou z nádoby s 1 cm solného roztoku, sušení při teplotě 105°C 16 hodin a chladnutí na původní teplotu (5,25 a 50°C). Doba jednotlivých fází je upravena podle EN 12370. Bylo provedeno 16 cyklů, během kterých byly vzorky pravidelně váženy.

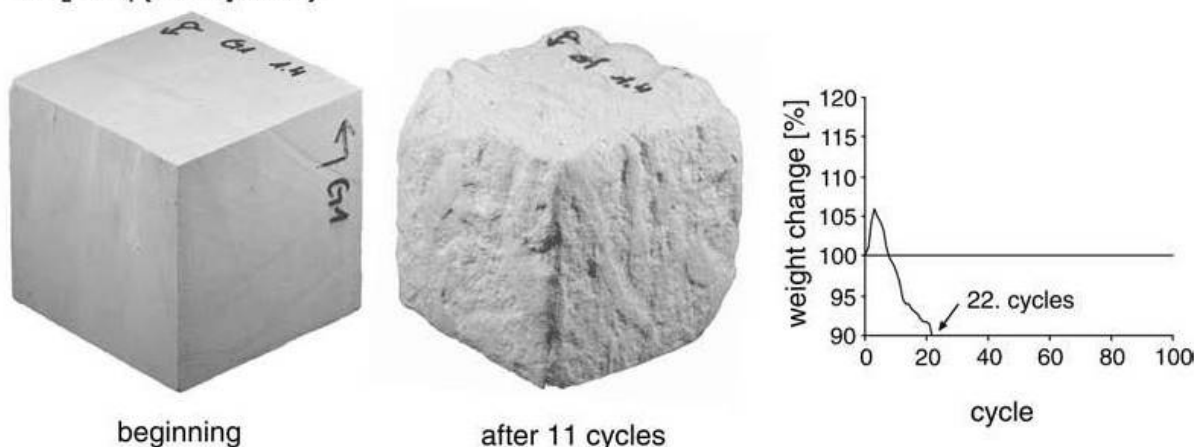
Vzorky ukazují různou úroveň rozpadu, ta se liší v průběhu různých termodynamických podmínek. Ačkoliv je na vzorcích patrný rozpad, hmotnost se během cyklů u většiny vzorků zvyšuje, jak ukazuje Obr. 1. Toto je dáno akumulací soli ve vzorcích. Při 50°C nebylo příliš zřejmé poškození na žádném z šesti vzorků, po stranách se objevily pouze neškodné výkvěty. Při 5°C je rozpad viditelný již od druhého cyklu, kdy začne vzorek opadávat, od třetího cyklu začíná opadávat intenzivněji, což se děje až do konce zkoušky. Při 25 °C (RT) je rozpad trochu odlišný. Během prvních 5-6 cyklech jsou vzorky pomalu poškozovány, vznikají výkvěty a je sledován opad spodní části vzorků, které byly ponořeny v roztoku. Po šestém cyklu se vzorek v 12 % roztoku začíná rozpadat více než v 5%. Z těchto zkoušek vyplývá, že rozpad v těchto podmínkách je velmi závislý na heterogenitách ve vzorku, a že koncentrace solného roztoku má významný vliv na solné zvětrávání (Angeli et al, 2010).



Obrázek 1: Vývoj hmotnosti vzorků v suchém stavu. (angeli et al, 2010)

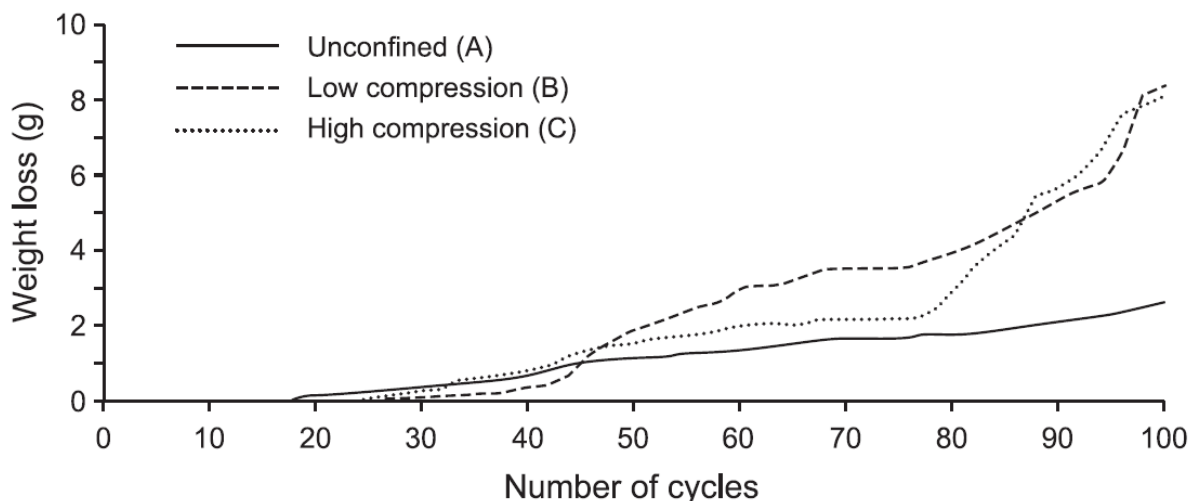
Zkoušky na vápenci prováděl také Rothert et al. (2007). Jednalo se o dva druhy maltského globigerinského vápence, odebrané z lomu. Jeden „dobrý“ – Franka, Type I a druhý „špatný“ - Soll, Type II. Lze jej popsat jako měkký, jemnozrný, homogenní a téměř čistý vápenc bledě smetanovo – žluté barvy. Pro zjištění náchylnosti k solnému zvětrávání dvou typů globigerinského vápence, z něhož je postaveno mnoho historických maltských staveb, zvolil krystalizační zkoušky za použití  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  a  $\text{NaCl}$ . Z vápence byly vyřezány kostky o hraně 6,5 cm, poté 4 hodiny saturovány v 10 % solném roztoku a následně sušeny 16 hodin při teplotě  $60^\circ\text{C}$ . Po zchladnutí na pokojovou teplotu byla zaznamenána váhová změna. Již po dvou cyklech v  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  vzorky začaly viditelně opadávat, po šestém cyklu byl zjištěn nejvýraznější rozpad rovnoběžně s existujícími sedimentárními strukturami. Zkoušky byly ukončeny, jakmile vzorky dosáhly 90 % původní hmotnosti (Obr. 2). Konečným výsledkem bylo, že všechny vzorky Type II vydrží 22-24 cyklů, zatímco jednotlivé vzorky Type I se chovaly různě. Jeden vzorek Type I například vydržel jen 17 cyklů, kdežto jiný dosáhl kritické hmotnosti až po 51 cyklech. To ukazuje na značnou heterogenitu zkoumaného materiálu. Při zkouškách s  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  byly výsledky podobné, u zkoušek s  $\text{NaCl}$  nebyly patrné výrazné změny, po 100 cyklech pouze pozorovali nárůst váhy díky obohacení solí a mírné porušení hran vzorků. Z těchto zkoušek vyplývá, že rozpad díky  $\text{NaCl}$  je velmi mírný ve srovnání s účinky  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Tyto laboratorní zkoušky a obsah solí ve vzorcích materiálu ze stěn budov ukazují, že solné zvětrávání, především díky  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , je hlavní proces, který vede k porušení globigerinského vápence na Maltě.

## Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (sample II)



Obrázek 2: Vzorky podrobené krystalizační zkoušce Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, na začátku a po 11 cyklech (Rothert et al. (2007)).

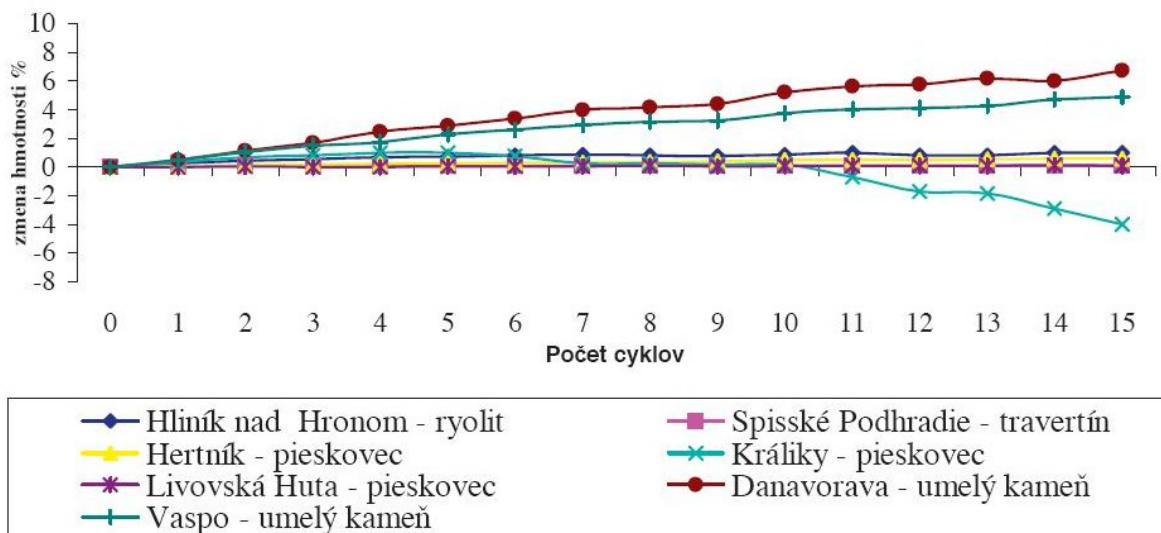
Smith et al. (2005) použil válečky granitu (Paleozoický Leinsterský granit) odebrané v lomu o délce 10 cm a průměru 5 cm, které umístil mezi dvě kruhové ocelové desky oddělené tenkými teflonovými membránami od vzorku. Desky byly staženy pomocí čtyř nerezových šroubů umístěných na okraji. Každá tato souprava byla umístěna pod hydraulický lis a stlačena na předem určené zatížení (900 a 1800 kNm<sup>-2</sup>, tj. 0,9 a 1,8 MPa). Šrouby byly dotaženy pomocí momentového klíče, aby se zamezilo nadměrnému dotažení a další kompresi jádra. Jakmile byly staženy, soupravy byly ponořeny do 10 % roztoku síranu sodného nebo chloridu sodného a následně umístěny na 24 hodin do pece, kde se dvakrát měnila teplota z 10 na 40 °C. Po každém cyklu se soupravy opět ponořovaly do roztoků a opadaný materiál se shromažďoval pro posouzení váhového úbytku (Obr. 3). Tato procedura byla opakována po 100 tepelných cyklů, což znamená 50 ponoření do roztoků. Zároveň tím samým postupem prošly nestažené vzorky. Kromě toho byly testovány dva kontrolní vzorky. Jeden zůstal po dobu testování suchý a druhý prošel cykly s destilovanou vodou. Oba kontrolní vzorky nevykazovaly žádné váhové změny.



Obrázek 3: Váhový úbytek pro tři vzorky leinsterského granitu po padesáti cyklech saturace v 10 % síranu sodném. (A) nestlažený vzorek, (B) vzorek stažený silou 900 kNm<sup>-2</sup>, (C) vzorek stažený silou 1800 kNm<sup>-2</sup> (Smith et al. 2005)

Chování jednoose stlačeného a nestlačeného materiálu může podle Smithe et al (2005) vysvětlit pozorování Batzle et al. (1980): Pokud jsou horniny jako granit podrobeny kompresi, trhliny kolmo k aplikovanému napětí mají tendenci k uzavření a to i při relativně nízkém napětí. To má velký vliv na fyzikální chování horniny, která je neelastická. Naproti tomu se nestlažené vzorky chovají elasticky, přičemž napětí vytvořené solně zvětrávacími procesy se projevuje v síti při povrchových mikrofraktur, což vede k uvolnění a opadávání jednotlivých zrn. (Smith et al., 2005)

Šimková a Durmeková (2010) se zabývaly odolností různých typů hornin proti různým vnějším vlivům, včetně stanovení odolnosti proti krystalizaci solí podle technické normy EN 12370. Ke zkouškám použily tyto horniny: ryolit (Hliník nad Hronom), travertin (Spišské Podhradie), pískovec (Hertník, Králiky, Livovská Huta) a dva typy umělého kamene. Po zkoušce byla patrná změna hmotnosti většiny vzorků, viditelné byly i solné výkvěty na povrchu. Postupná akumulace solí z roztoku v otevřených pórech se projevila nárůstem hmotnosti (Obr. 4), vzorky si po celou dobu zachovaly celistvost. Výjimkou byl pískovec z lokality Králiky, u kterého začal úbytek hmotnosti při 11. cyklu v důsledku oslabování pevnosti strukturálních vazeb a opadáváním jednotlivých zrn z povrchu.



Obrázek 4: Změny hmotnosti vzorků při zkoušce odolnosti proti krystalizaci solí. (Šimková a Durmeková, 2010)

Ruedrich a Siegesmund (2007) prováděli své zkoušky na několika typech pískovců. Ty se lišili zrnitostí, zaoblením zrn, mineralogicky i obsahem jílové složky. Laboratorní testy prováděli na vzorcích o hraně 65 mm, od každého typu testovali dva vzorky. Ty byly cyklicky saturovány 10% roztokem  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  pomocí kapilární absorpce po 4 hodiny a následně sušeny v peci při teplotě  $60^\circ\text{C}$  po dobu 16 hodin. Po 2 hodinách chladnutí vzorky zvažili. Hlavní kritéria odolnosti proti zvětrávání byla změna hmotnosti po každém cyklu a viditelné změny na povrchu. Během testu bylo pozorováno různé chování vzorků, jež je dáno rozdíly v mineralogickém složení. Například různá distribuce solí ve vzorcích (výkvěty na povrchu, krystalizace uvnitř), různě intenzivní opadávání materiálu z povrchu vzorků, a podobně. U většiny vzorků však zvětrávání vedlo k obrušování a zaoblování hran a postupné ztrátě hmotnosti.

### 3. Experimentální sledování vlivu zatížení na solné zvětrávání

První pokusy jsem provedla na blocích vodou erodovatelného (sensu Bruthans et al., 2012) Hruboskalského pískovce (teplické souvrství) z lomu Střeleč (Q) za pomoci třech typů solí, a to  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (sádrovec),  $\text{NaCl}$  a  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$  (kamenec draselný). Další zkoušky byly prováděny na pěti typech pískovce (H, K, T, V, UP), arkóze (P) a tufu (UT) pomocí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

#### 3.1. Popis zkoumaných hornin

Zkoušky jsem prováděla celkově na osmi typech hornin. Jejich charakteristiku lze najít v tabulce 1.

Tabulka 1: Charakteristika zkoumaných hornin Q, H, K, P, T, V, UP, UT

stát	lokality	typ horniny	erodovatelnost vodou	místo odběru vzorku	souvrství nebo člen	litologie/pojivo	prostředí. (M=marinní, F=fluviální, E=eolické, V=vulkanosedimentární)	stáří (T=terciér, K=křída, J=Jura, C=karbon)
ČR	Střeleč	Q	ANO	N50.4936 E15.2460	Hruboskalský pískovec	křeměnný p./kaolinický	M	K
ČR	Valdstejn	H	NE	N50.5617 E15.1664	Hruboskalský pískovec	křeměnný p./kaolinický	M	K
ČR	Kyjov	K	NE	N50.9115 E14.4506	Jizerské souvrství	křeměnný p./kaolinický	M	K
ČR	Plzeň	P	NE	N49.7578 E13.3401	kladenské souvrství	arkóza./Feox.	F	C
ČR	Teplice	T	NE	N50.5877 E16.1386	pískovec Adršpašských skal	křeměnný p./kaolinický	M	K
ČR	Vsemily	V	NE	N50.8377 E14.3737	Jizerské souvrství	křeměnný p./kaolinický	M	K
USA	Glen Canyon	UP	NE	N37.4605 W110.5317	souvrství Navaho.	křeměnný p./karbonátový a Feox.	E	J
USA	Crystal Peak	UT	NE	N38.7943 W113.5956	Crystal Peak tuf	tuf	V	T

Hruboskalský pískovec z lokality Střeleč (Q) je marinního původu a byl ukládán v mělkém prostředí během svrchní křída (Uličný, 2001). Náleží teplickému souvrství. Jedná se o křeměnný pískovec s kaolinickým tmelem (Bruthans et al. 2012).

Vzorky z lokality Valdštejn (H) jsou zpevněné křemenné pískovce teplického souvrství, které vznikly marinní sedimentací ve svrchní křídě. Jedná se o hruboskalský pískovec, který je jemnozrný až hrubozrný, hrubozrné polohy nejsou příliš dobře vytříděny. Je tvořen především křemenem a poji ho kaolinický tmel ([www.geology.cz](http://www.geology.cz), [www.geopark-ceskyraj.cz](http://www.geopark-ceskyraj.cz)).

Horniny z lokalit Kyjov (K) a Všemily (V), křemenné pískovce jizerského souvrství, vznikající v období svrchní křídě. Nalézt je lze většinou na vrcholu progradačního cyklu. Tyto zpevněné sedimenty jsou tvořené především křemenem a podíl jílovité frakce je minimální. Horniny jsou jemnozrné až hrubozrné a obsahují větší zrna křemene ([www.geology.cz](http://www.geology.cz)).

Plzeňský arkózový pískovec (P) pochází z karbonu a je součástí svrchní části nýřanských vrstev kladenského souvrství. Skládá se převážně z křemene, živce a železitého tmelu. Tyto arkózovité pískovce jsou korytovitě šikmo zvrstvené a jsou interpretovány jako říční sedimenty (Drábková a kol. 2005). Výchozy pískovce jsou pokryty řadou forem zvětrávání, jako jsou výklenky, dutiny, skalní okna a voštiny (Vítek 1987). Není příliš dobře vytříděn, patří k větší klasty, které napomáhají k rychlejšímu rozpadu.

Vzorky z lokality Teplice (T) jsou zpevněné křemenné pískovce teplického souvrství, stejně jako vzorky H. Vznikly marinní sedimentací ve svrchní křídě. Jedná se o pískovec Adršpašských skal, který je jemnozrný až hrubozrný. Vzorky použité k experimentům jsou jemnozrné. Tuto horninu tvoří především křemenem a poji ji kaolinický tmel. ([www.geology.cz](http://www.geology.cz), [www.geopark-ceskyraj.cz](http://www.geopark-ceskyraj.cz)).

Tuf z lokality Crystal Peak (UT) je směsí vulkanosedimentárního materiálu (pemza, popel, křemen, alkalický živec, biotit) a úlomky hornin (dolomit, vápenec, křemenec), které tvoří pouze 5 – 25% celkového objemu horniny. Tento oligocénní tuf tvoří netříděná zrna velikosti prachu až po velmi hrubý štěrky, mající různou orientaci. Okolo 43% zaujímá pemza, 40% ostrohranné krystaly křemene, živce a biotitu, 7% zaoblený dolomit a 10% póry mezi zrny horniny. Celková pórovitost je však vyšší než 30% díky přítomnosti pemzy, která má sama o sobě vysokou pórovitost (McBride a Picard, 2000). Blok, ze kterého byly vzorky nařezány, byl mírně navětralý.

Navajo sandstone je jednou z nejznámějších stratigrafických jednotek na světě. Tento pískovec z lokality Glen Canyon (UP) je eolického původu a byl ukládán během spodní jury do obrovských dun, na kterých je pozorovatelné každoroční cyklické ukládání materiálu. (Hintze, 2005). Díky větru je ukládaný materiál, tvořící horninu, velmi dobře vytříděn. Většina zrn je zaoblená, mnohá z nich kulovitá. Horninu tvoří hlavně křemen, dále se může vyskytnout malé množství živců, slíd, magnetitu, zirkonu, nebo turmalínu. Tento pískovec má vápnitý a železitý tmel, které křemenná zrna obalují a tím dává hornině červené zabarvení (Chan a Parry 2002).

### 3.2. Metodika

Vzorky pískovce Q jsem nařezala pilou a rozdělila je na 3 dvojice, každá z nich byla saturována jiným solným roztokem pomocí pipety. Roztok jsem přidávala jen tak rychle, jak rychle byl vzorek schopný nasávat – vzorek stál v misce a samovolně nasával z misky roztok. Při tom jsem udržovala výšku hladiny v misce na úrovni < 2 mm, aby spodní část vzorku nezůstávala stát v roztoku, což by mohlo vést k opadávání spodní podstavy vlivem výšky hladiny. Do mísy jsem roztok pipetovala jen do té doby, dokud vzorek roztok nasával. Množství přidaného roztoku byl u obou vzorků z dvojice stejný. Poté vzorky minimálně 2 dny vysychaly při pokojové teplotě za pomoci ventilátoru. Jeden cyklus znamená saturaci a následné sušení. Vždy jeden vzorek z dvojice byl zatížen olověným závažím a druhý ponechán nezatížený. Vzorky nesou názvy Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 a Q6, (Tab. 2).

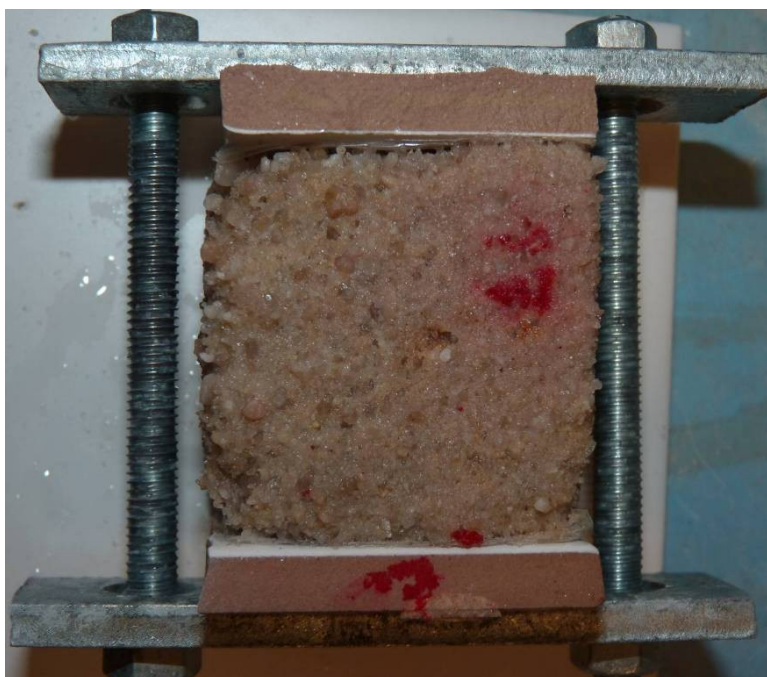
Tabulka 2: přehled parametrů pro zkoušky na hruboskalském pískovci (míra vysušení před zkouškou- suchý=sušeno v peci při 105°C 2 dny, -vlhký=přirozená vlhkost z lomu)

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
velikost (cm)	10x10x10	10x10x10	5,5x9x9	5x9x9	10x10x10	10x10x10
hmotnost vzorku (kg)	1,85	1,93	0,95	0,92	2,52	2,44
hmotnost zátěže (kg)	0	18	0	6	24	0
míra vysušení před zkouškou	suchý	suchý	suchý	suchý	vlhký	vlhký
typ soli	CaSO <sub>4</sub> * H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> * H <sub>2</sub> O	NaCl	NaCl	KAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *12 H <sub>2</sub> O	KAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *12 H <sub>2</sub> O
koncentrace roztoku soli (%)	2,1	2,1	30	30	13	13
počet cyklů (sůl/destil. H <sub>2</sub> O/sůl)	13/5/9	13/5/9	14/5/9	14/5/9	10/5/9	10/5/9

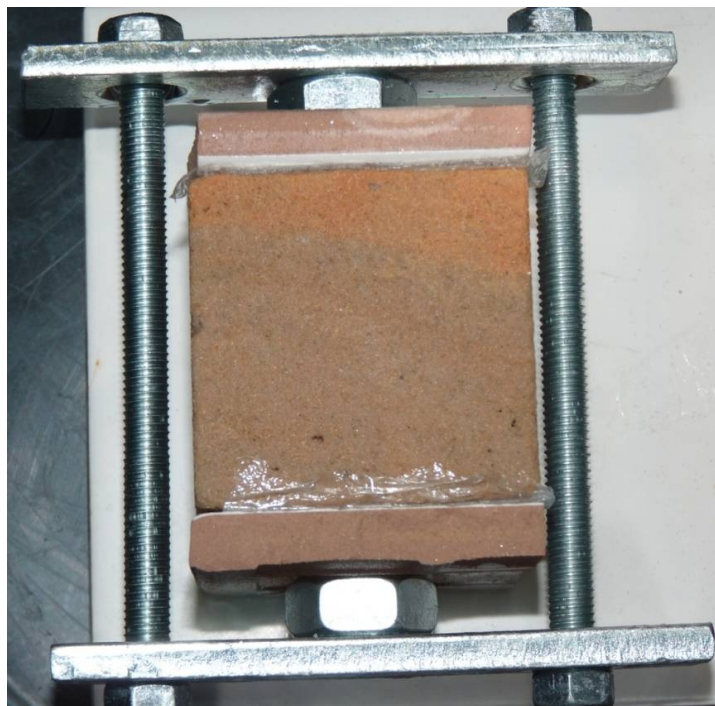
Při zkouškách s CaSO<sub>4</sub>\*H<sub>2</sub>O jsem vzorky saturovala 2,1 % roztokem po 13 cyklů, následovalo 5 cyklů s destilovanou H<sub>2</sub>O a dalších 9 cyklů sádrovce, s NaCl jsem vzorky saturovala 30 % roztokem po 14 cyklů, následovalo 5 cyklů s destilovanou H<sub>2</sub>O a dalších 9 cyklů NaCl. Při zkouškách s KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>\*12 H<sub>2</sub>O jsem vzorky saturovala 13 % roztokem po 10 cyklů, následovalo 5 cyklů s destilovanou H<sub>2</sub>O a dalších 9 cyklů saturace roztokem kamence.

Materiál H, K, P, T, V, UP, UT byl nařezán diamantovým kotoučem na krychle o hraně 4 cm (S. Šlechta, GLI CAS). Z každého materiálu byly vylosovány 3 dvojice, jedna krychle z dvojice určena pro jednoosé stlačení a druhá zůstala nestlačená. Poté byly vzorky vysušeny na konstantní hmotnost.

První vzorky H 6, 13, 15 a 17 byly staženy pomocí dvou ocelových destiček, které přenáší stažení na kachličku a přes plastovou fólii na vzorek (Obr. 5). Destičky jsou spojeny závitovými tyčemi a ručně utaheny na hodnotu přibližně 0,75 Nm. U vzorků H 22, 25, 27 a 29 byla metodika vylepšena o matku, která rovnoměrněji přenáší stažení z ocelových destiček na kachličky, které opět dosedají na vzorek přes plastovou fólii (Obr. 6). Destičky jsou staženy závitovými tyčemi momentovým klíčem na hodnotu 1 Nm. U poslední sérii vzorků, byla metodika opět vylepšena, protože přenášení stažení pomocí kachličky se po více cyklech ukázalo jako nevyhovující, kachlička se u několika vzorků začala rozpadat. Vzorky K1, K3, K6, P1, P2, P3, T1, T2, T3, UP3, UP4, UP5, UT1, UT4 a UT5 byly staženy pomocí dvou ocelových destiček, které přenáší zatížení přes kuličku na ocelovou desku, ta dosedá přes plastovou fólii na vzorek (Obr. 7). Destičky jsou spojeny závitovými tyčemi, které byly utaheny momentovým klíčem na hodnotu 0,75 Nm u vzorků. Utahovací moment 0,75 Nm znamená tlak zhruba 1,2 MPa (Jiří Bruthans, ústní sdělení.), tj. 12 kg/cm<sup>2</sup>. Poté byly stažené i nestažené vzorky dvě hodiny saturovány 16 % roztokem a vzorky H2 a H5 10% roztokem Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, následně vloženy do pece a 7 hodin postupně zahřívány až na teplotu 105 °C, ve které setrvaly po dobu 13 hodin. Po této době jsou vzorky z pece vyndány a dvě hodiny ponechány zchladnout. Po každém cyklu se vysušené vzorky váží a úbytek váhy se vynáší do grafu. Pokud hmotnost vzorku klesne pod 10 g, je vyřazen.



Obrázek 5: Ukázka stažení vzorků H 6, 13, 15 a 17. (foto J. Soukup)



*Obrázek 6: Ukázka stažení vzorků H 22, 25, 27 a 29. (foto J. Soukup)*



*Obrázek 7: Ukázka metody stažení vzorku. (foto J.Soukup)*

Tento postup byl přejet a upraven podle evropské normy EN 12370 pro stanovení odolnosti hornin vůči krystalizaci solí. Test je určen pro horniny s otevřenou porozitou větší než 5 %, měřenou podle normy EN 1936. Testovaná hornina se nařeže na kostky o hraně  $40 \pm 1$  mm a vysuší se na konstantní hmotnost. Samotná zkouška spočívá v ponoření vzorků na 2 hodiny do 14 % roztoku  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  při teplotě  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ , poté jsou vzorky přemístěny do pece, kde se 10 – 15 hodin postupně zvyšuje teplota až na  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Vzorky jsou v peci sušeny 16 hodin, následně vyjmuty a ponechány v pokojové teplotě  $2 \pm 0,5$  hodiny před dalším ponořením. Tento cyklus se podle normy opakuje patnáctkrát, na konci každého cyklu je vzorek zvážen a zaznamená se váhový úbytek. Po patnácti cyklech jsou vzorky  $24 \pm 1$  hodin máčeny v čisté vodě o teplotě  $23 \pm 5^\circ\text{C}$  a nakonec jsou promyty proudící vodou. Po následném vysušení na konstantní váhu se vzorky opět zváží, pokud jsou dostatečně soudržné. Výsledek je vyjádřen jako relativní rozdíl v % mezi hmotností vzorku před zkouškou a hmotností vzorku po patnácti cyklech.

Na rozdíl od normy jsem použila koncentrovanější roztok, protože koncentrace roztoku, udávaná v normě, vyvolává příliš pomalé zvětrávání. Dále jsem použila mnohem vyšší počet cyklů, protože cílem mého pozorování bylo porovnat rychlost rozpadu stažených a nestažených vzorků. Stojí za zmínku, že téměř žádný z autorů citovaných výše tuto normu nedodržel přesně, postup vždy přizpůsobili cílům svého pozorování.

Protože je test určen pro horniny s otevřenou porozitou větší než 5 %, bylo třeba tuto hodnotu alespoň orientačně zjistit. Při výpočtu porozity u vzorků Q, H, K, P, T a V jsem vycházela z toho, že tyto horniny se skládají převážně z křemene, který má hustotu  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , přičemž objem vzorků je  $64 \text{ cm}^3$  a hmotnost vzorku složeného pouze z křemene by byla 169,9 g. Tuto hmotnost jsem určila jako 100%, od níž jsem odečetla hmotnosti vysušených vzorků ( $V_v$ ), dělila jedním procentem a tím jsem zjistila, kolik procent celkového objemu přibližně zaujímají póry ( $V_p$ ). (1)

$$V_p = \frac{(64 \cdot 2,65) - V_v}{(64 \cdot 2,65) / 100} \quad (1)$$

### 3.3. Výsledky výpočtů porozity

Z orientačních výpočtů vyplývá, že porozita všech zkoumaných hornin je vyšší, než požaduje norma (Tab. 3), jsou tedy vhodné pro mé zkoumání.

Tabulka 3: Porozita zkoumaných hornin odvozená z hustoty materiálu.

hornina	Q	H	K	P	T	V	UT	UP
porozita %	30	23	23	8	20	21	>30	

### 3.4. Výsledky zkoušek na vodou erodovatelném pískovci Q

#### 3.4.1. Výsledky zkoušky s $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Nezatížený vzorek sákl roztok více a rychleji než zatížený. Podstava zatíženého vzorku oproti nezatíženému opadáva. Nezatížený vzorek je po saturaci na omak „měkký“ (tj. při doteku opadáva), naopak zatížený zůstává pevný. Oba vzorky jsou v suchém stavu na dotek pevné. Po pěti cyklech s destilovanou vodou byly patrné změny. Na vzorcích lze zřejmě sledovat vliv povětrnostních podmínek (sušeny ventilátorem), na „závětrné“ straně se vzorky zdají pevnější než na „návětrné“. Dále jsem zjistila, že množství přijatého roztoku se v průběhu času nemění, jen závisí na míře vysušení vzorků (Obr. 8); pokud byly vzorky důkladně vysušené, množství roztoku, potřebného k plné saturaci, bylo při jednotlivých cyklech velmi podobné.

#### 3.4.2. Výsledky zkoušky s NaCl

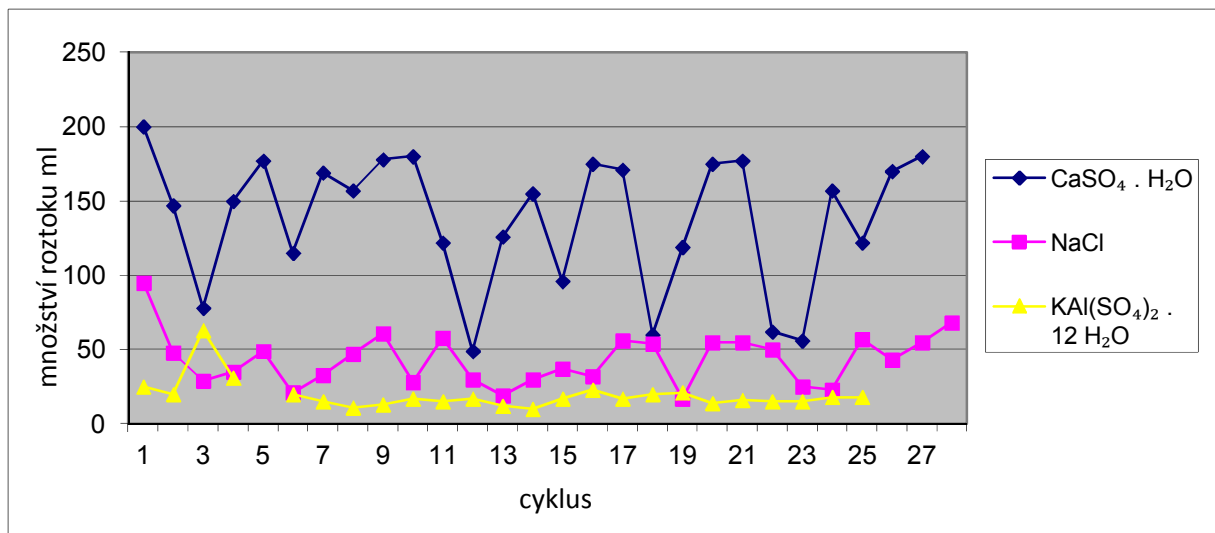
Před saturací destilovanou vodou sákné nezatížený vzorek lépe než zatížený, po 5ti cyklech s destilovanou vodou je tomu naopak. Na obou vzorcích se NaCl sráží na povrchu, u nezatíženého vzorku po celém povrchu, na zatíženém vzorku lze sledovat srážení více na hranách (zde se zdá, že vysrážený NaCl vzorek zpevňuje). Jak již zjistil Rodriguez – Navarro a Doehne (1999), halit má sklon srážet se na rozhraní vzduchu a roztoku a přednostně vytvářet neškodné výkvěty na povrchu vzorku. Při odstranění odlupující se vysrážené vrstvy NaCl ze vzorku, lze sledovat její přírůstek po vrstvách. Stejně jako u zkoušek s vápencem, množství přijatého roztoku závisí na míře vysušení vzorků, pokud byly vzorky důkladně vysušené, množství roztoku, potřebného k plné saturaci, bylo velmi podobné (Obr. 8).

#### 3.4.3. Výsledky zkoušek s $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$

Již při prvním cyklu vzorky nasakovaly oproti předchozím případům velmi málo, pravděpodobně vlivem původní vlhkosti, po dalších cyklech se množství přijímaného roztoku víceméně ustaluje, roztok zřejmě zablokoval póry, jak popisuje Schweigstillová (2008). Kamenec se nedostal výše než do

cca 1/2 vzorku podle vysrážených solí na povrchu. Na zatíženém vzorku je patrné, že kamence krystalizuje na povrchu, u nezatíženého je krystalizace na povrchu pozorovatelná v menší míře. Saturace kamencem nemá u těchto vzorků viditelný negativní vliv na soudržnost.

Množství přijatého roztoku závisí na míře vysušení vzorků stejně jako u sádrovce a NaCl. Pokud byly vzorky důkladně vysušené, množství roztoku, potřebného k plné saturaci, bylo velmi podobné ve všech cyklech (Obr. 8).

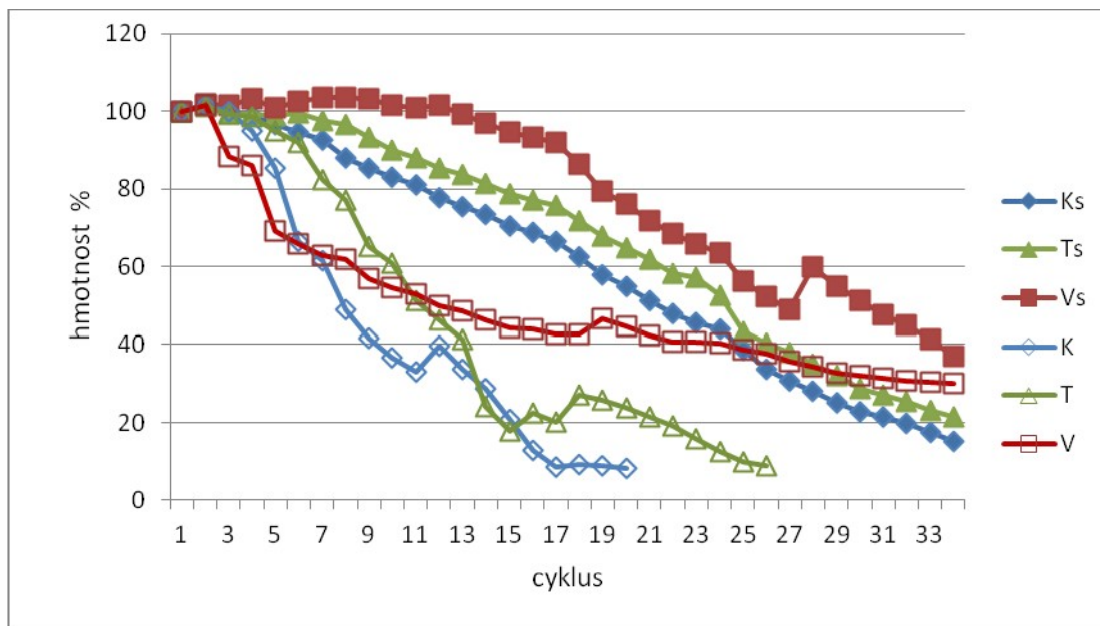


Obrázek 8: Graf množství přidaného roztoku CaSO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O, NaCl a KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> · 12 H<sub>2</sub>O

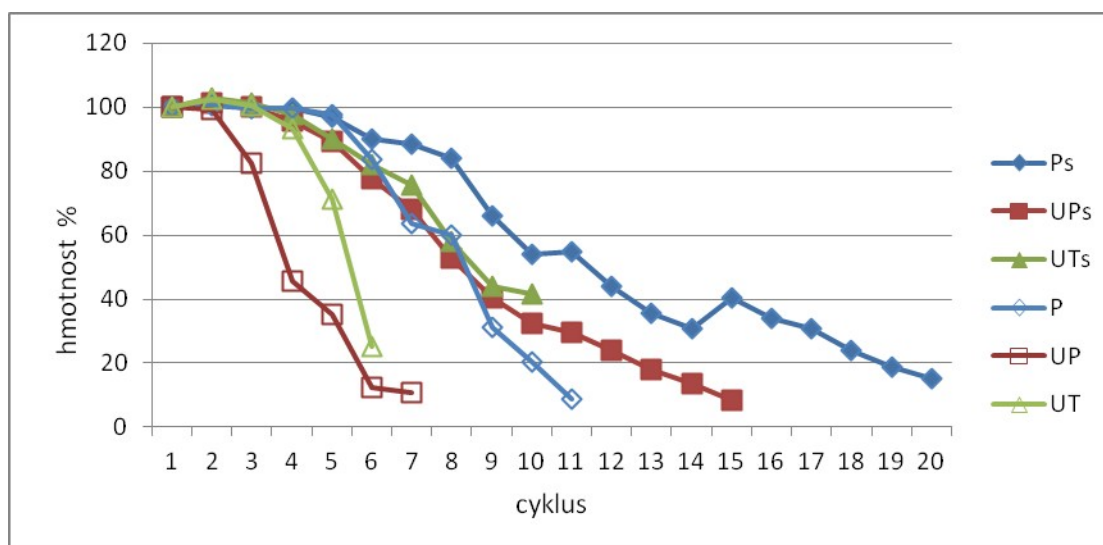
### 3.5. Výsledky zkoušek na ostatních horninách

#### 3.5.1. Výsledky zkoušky s Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

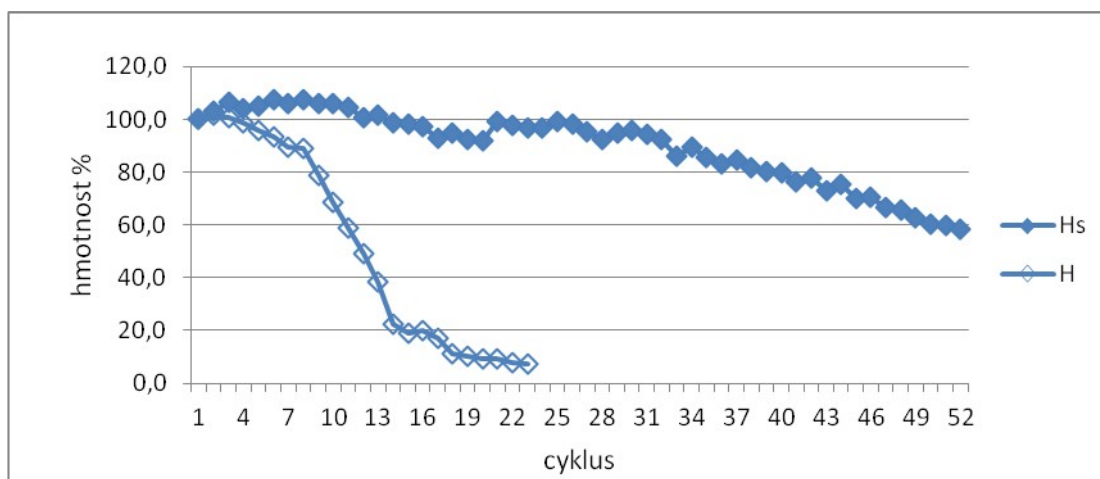
Při prvních cyklech u zatížených i nezatížených vzorků dochází k nárůstu hmotnosti díky krystalizaci soli v pórech, v cyklech následujících začne převládat vliv krystalizačního tlaku, vzorek začne opadávat a tím snižovat svou hmotnost, jak je vidět na obrázku 9, 10, 11 a 12. Tento jev pozorovali při svých měření Rothert et al. (2007) i Smith et al. (2005).



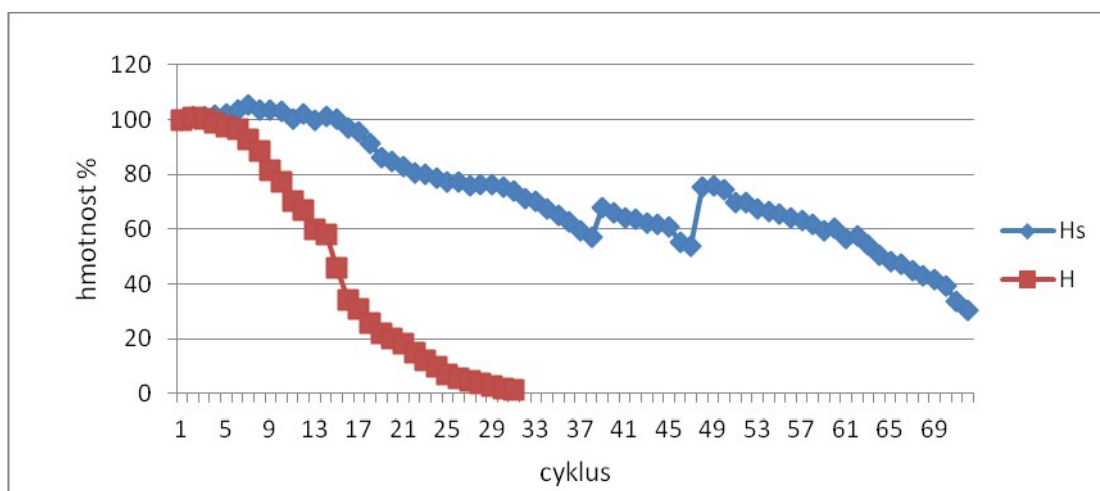
Obrázek 9: Stažené a nestažené vzorky, průměry ze 3 vzorků stažených a 3 vzorků stažených od hornin K, T, V.



Obrázek 10: Stažené a nestažené vzorky, ze 3 vzorků stažených a 3 vzorků stažených od hornin P, UP, UT.



Obrázek 11: Stažené a nestažené vzorky H 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 (zatím 52 cyklů).



Obrázek 12: Stažené a nestažené vzorky H 1, 6, 13, 14, 15, 16, 17, 18 (zatím 72 cyklů).

Nestažené vzorky H dosáhly 50% své hmotnosti již po 13 cyklech (vzorky 1-18), respektive po 11 cyklech (vzorky 21-30) a v průměru se po 30, resp. 22 cyklech zcela rozpadly. Naproti tomu stažené vzorky dosáhly 50% své původní hmotnosti v průměru až při 46 cyklu a většina z nich celkovému rozpadu stále odolává (nyní cyklus 74), hmotnost vzorků 21-30 zatím neklesla pod 58 % hmotnosti původní (nyní cyklus 54).

Nestažené vzorky K dosáhly 50% své hmotnosti po 7 cyklech, po 20. cyklu došlo k úplnému rozpadu, stažené vzorky 50% původní hmotnosti dosáhly po 21 cyklech a celkovému rozpadu zatím všechny odolávají (nyní cyklus 35).

Nestažené vzorky P dosáhly 50% své hmotnosti po 8 cyklech a po 11 se rozpadly, stažené vzorky dosáhly 50% po 11 cyklech a zcela se rozpadly v průměru po 20. cyklu.

Nestažené vzorky T dosáhly 50% své hmotnosti po 10 cyklech, k úplnému rozpadu došlo po 26. cyklu. Stažené vzorky dosáhly 50% po 24 cyklech a celkovému rozpadu zatím všechny odolávají (nyní cyklus 35).

Nestažené vzorky V dosáhly 50% své hmotnosti po 11. cyklu, stále opadávají, ale k celkovému rozpadu všech vzorků ještě nedošlo, Stažené vzorky dosáhly 50% po 26 cyklu a celkovému rozpadu stále většina odolává (nyní cyklus 35).

Nestažené vzorky UP dosáhly 50% své hmotnosti po 3. cyklu a nevydržely více než 7 cyklů. Stažené vzorky odolávaly déle, ale 50% dosáhly po již 8 cyklech a po 15 cyklu se zcela rozpadly. Tyto vzorky se rozpadaly podél sedimentárních struktur stejně tak, jak to popsal Rothert et al. (2007).

Nestažené vzorky UT dosáhly 50% své hmotnosti po 5. cyklu a již po 6. cyklu se zcela rozpadly. Stažené vzorky dosáhly 50% po 8 cyklech a k úplnému rozpadu došlo po 10 cyklech. K rychlému rozpadu vedle vysoké pórovitosti přispěla nepříliš dobrá vytríděnost materiálu i míra zvětrání horniny.

Z pozorování je jednoznačně doloženo, že nestažené vzorky poměrně rychle a nekontrolovatelně opadávají, zatímco stažené vzorky vytvářejí sloupek kruhovitěho průřezu. Takové chování materiálu odpovídá teoretickým předpokladům (Bruthans et al. v přípravě).

#### 4. Diskuze

Ačkoliv výsledky prvních měření na erodabilním Hruboskalském pískovci  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , NaCl a  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$  naznačovaly, že zatížení má na solný rozpad určitý vliv, nebyly dostatečně průkazné. Při těchto zkouškách jsem pozorovala jen mírné změny na povrchu všech vzorků, jen u vzorků saturovaných NaCl byly výkvěty velmi výrazné. Po jejich odstranění však nebyly přímo na vzorku viditelné větší změny, byl neporušený. Žádný z pozorovaných rozdílů mezi jednoose stlačenými a nestlačenými vzorky nebylo možné objektivně měřit. U všech vzorků je patrný nárůst hmotnosti díky krystalizaci solí uvnitř a na povrchu, což zjistili i Rodriguez – Navarro a Doehne (1999) při zkouškách na vápenci. Vzhledem k neurčitým výsledkům bylo při dalších zkouškách přikročeno ke změně metodiky, kdy jsme použili agresivnější sůl a upravený postup zkoušky z EN 12370. Dále byl vylepšen princip zatížení – stažení vzorků pomocí konstrukce, což vedlo k dobré manipulaci se vzorky a k lepšímu interpretování výsledků. Oproti měření Smithe et al. (2005) na granitu, jehož stažené vzorky se pravděpodobně díky neelastickému chování rozpadají více než nestažené, jsme u všech druhů námi testovaných hornin zjistili chování opačné. Všechny stažené

vzorky vydrželi více cyklů, než jejich nestažené protějšky, v současnosti pokračuji v experimentech pro zjištění, o kolik cyklů vydrží stažené vzorky déle než nestažené. Takové chování materiálu odpovídá teoretickým předpokladům (Bruthans et al. v přípravě).

## 5. Závěr

Zkoušky solného zvětrání jsem prováděla na osmi typech hornin - šesti různých křemenných pískovcích, arkózovém pískovci, a tufu. Dohromady jsem testovala 60 vzorků, to znamená 30 dvojic, kde jeden vzorek ze dvojice byl jednoose stlačený a druhý nestlačený. Po několika úvodních cyklech byl pozorovatelný nárůst hmotnosti díky krystalizaci solí uvnitř vzorků, po cyklech následujících už vzorky začaly hmotnost ztrácet. Všechny stažené vzorky vydržely více cyklů, než jejich nestažené protějšky, které se velmi intenzivně rozpadaly. Na základě provedených zkoušek mohu jednoznačně říci, že stlačení má na solný rozpad zásadní vliv, přičemž rozpad zpomaluje. Jednoose stlačené vzorky se rozpadají méně než nestlačené.

## Seznam použité literatury

- Angeli M., Hébert R., Menéndez B., David Ch., Bigas J.-P., (2010). Influence of temperature and salt concentration on the salt weathering of a sedimentary stone with sodium sulphate. In: Natural stone resources for historical monuments (2010): 35 – 42
- Batzle M.L., Simmons G., Seigfried R.W., (1980). Micro-crack closure in rocks under stress: direct observation. In: B.J.Smith, Warke P. A., McGreevy J. P., Kane H. L., 2005. Salt-weathering simulations under hot desert conditions: agents of enlightenment or perpetuators of preconceptions? *Geomorphology* 67 (2005): 211 – 227
- Bonn N. S., Bertrand F., Bonn D., (2010). Damage due to salt crystallization in porous media. <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0906/0906.2502.pdf>, 12.8.2012
- Bruthans J., Světlík D., Soukup J., Schweigstillová J., Válek J., Sedláčková M., Mayo A.L. (2012). Fast evolving conduits in clay-bonded sandstone: Characterization, erosion processes and significance for origin of sandstone landforms. *Geomorphology* (in press).
- Bruthans J., Soukup J., Vaculíková J., Schweigstillová J., Řihošek J., Filippi M., Kletetschka G., Mayo A.L. (v přípravě).
- Cílek V., Langrová A., Hrdlička L., (1998). Kámen, sůl a zvětrávání. In: Cílek V., Kopecký J., Pískovcový fenomén: klima, život a reliéf. svazek 32: 154 – 159, ISBN 80-85304-45-7
- EN 12370,(1999). Natural stone test methods – Determination of resistance to salt crystallisation, European standard EN 12370:1999. European committee for standardization.
- Hintze L. F. (2005). Utah's spectacular geology. Department of geology, Brigham Young University: 52-53, ISBN 0-9760722-2-X
- Hruboskalsko, <http://www.geopark-ceskyraj.cz/databaze/mapa/lokalita.php?id=37>, 20.8.2012
- <http://www.geology.cz/>
- Chan M.A., Parry W.T. (2002). Mysteries of Sandstone Colors and Concretions in Colorado Plateau Canyon Country, *Public informatik series – Svazek 77*, ISBN 1557916810
- Drábková J., Lojka R., Šimůnek Z., (2005). Paleoekologie a biostratigrafie jemnozrnných poloh defilé u Radčic (Kantabr, plzeňská pánev). – Zpr. geol. Výzk. v Roce 2004, 30–33
- Kwaad F.J.P.M., (1970). Experiments on the granular disintegration of granite by salt action. Fysisch geografisch en bodemkundig laboratorium from field to laboratory 16: 67 – 80, <http://home.tiscali.nl/~wr2777/Kwaad-Public.htm>, 19.8.2012
- Kwaad F.J.P.M., (2012). Salt weathering. <http://home.tiscali.nl/~wr2777/Salt-weathering.html>, 19.8.2012
- McBride E.F., Picard M.D., (2000). Origin and development of tufoni in tunnel spring tuff, crystal peak, Utah, USA. *Earth Surf. Process. Landforms* 25 (2000): 869 - 879
- Rodriguez - Navarro C., Doehne E., (1999). Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surf. Process. Landforms* 24 (1999): 191 – 209

- Rodriguez - Navarro C., Doehne E., Sebastian E., (2000). How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials. *Cement and Concrete Research* 30 (2000): 1527 - 1534
- Rother E., Eggers T., Cassar J., Ruedrich J., Fitzner B., Siegesmund S., (2007). Stone properties and weathering induced by salt crystallization of Maltese Globigerian Limestone. In Příkryl R., Smith B. J. (eds) *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation*. Geological Society, London, Special Publications, 271: 189–198.
- Ruedrich J., Siegesmund S., (2007). Salt crystallisation in porous sandstone. *Environ. Geol.* 52 (2007): 225 - 249
- Smith B. J., Warke P. A., McGreevy J. P., Kane H. L., (2005). Salt-weathering simulations under hot desert conditions: agents of enlightenment or perpetuators of preconceptions? *Geomorphology* 67 (2005): 211 – 227
- Steiger M., Asmussen S., (2008). Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: The phase diagram Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–H<sub>2</sub>O and the generation of stress. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72 (2008): 4291–4306
- Schwegstillová J., (2008). Mechanismus vzniku síranových výkvětů na pískovcích České křídové pánve, disertační práce, UGMNZ, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze, 85 str. + 6tab
- Šimková I., Durmeková T., (2010). Hodnotenie trvanlivosti prírodného a konglomerovaného kameňa podľa technických noriem. *Acta geologica slovacica* 2 (2010): 77 – 85
- Vítek J. (1987). Pseudokrasové tvary v karbonských sedimentech sz. od Plzně. – Čs. Kras. 38, 125-127
- Yu S., Oguchi C. T., (2010). Is sodium sulphate invariably effective in destroying any type of rock? *Natural stone resources for historical monuments* (2010): 43 – 58