

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Aplikovaná geologie



Bc. Martin Slavík

**Propustnost přírodních povrchů hruboskalského pískovce ve skalních
městech pro vodní páru a intenzita výparu**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jiří Bruthans Ph.D.

Praha, 2014

Prohlášení

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

V Praze dne

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce J. Bruthansovi, který mi byl ochoten poskytovat konzultace, vhodné zázemí pro laboratorní práce, prostředky potřebné pro terénní práce a v neposlední řadě také cenné rady pro psaní vědecké práce. Velký dík patří také J. Soukupovi za pomoc s měřením kapilární nasákavosti, J. Vaculíkové, M. Filippimu, E. Svobodové a především J. Schweigstillové za spolupráci při měření dat jak v laboratoři, tak v terénu.

Práce byla financována z grantového projektu GAČR číslo 13-28040S.

Abstrakt

Cílem diplomové práce bylo charakterizovat transport kapilární vody a vodní páry v přípovrchové zóně hruboskalského pískovce v Českém ráji.

Pomocí metody „wet cup“ jsem kvantifikoval propustnost hruboskalských pískovců pro vodní páru. Dále jsem určil rychlost saturace vrtných jader pískovce vodou vlivem kapilárního nasákávání, zjistil jsem míru výparu z několika výchozů hruboskalského pískovce za skutečného mikroklimatu a pravidla, kterými se výpar řídí. Také jsem se pokusil rozhodnout, zda a popřípadě jakou roli hraje přítomnost krusty u zkoumaných parametrů.

Z velkého množství zpracovaných vzorků vyplývá, že propustnost různých typů hruboskalských pískovců pro vodní páru nevykazuje významné odlišnosti, na rychlost difúze vodních par navíc nemá vliv, zda je na výparné ploše krusta či ne.

Na rychlost saturace pískovců vlivem kapilárního nasákávání má vliv přítomnost krusty, která saturaci zpomaluje. Zkoumané pískovce se řadí mezi materiály se střední až vysokou absorpcí.

Prokázal jsem, že výpar z porézního prostředí lze poměrně přesně aproximovat jednoduchou exponenciální funkcí. Rychlost výparu z pískovcového prostředí je v přirozených podmínkách silně ovlivněna klimatickými poměry, zejména relativní vlhkostí.

Summary

Aim of this study was to describe capillary water and vapor transport in shallow subsurface of Hrubá Skála sandstone in the Bohemian Paradise.

I have quantified permeability of Hrubá Skála sandstone for water vapor using “wet cup” method and also capillary water absorption of sandstone drill cores. I have found out general rules of evaporation and rate of evaporation from several sandstone outcrops in real microclimate. Important part of my work was to determine whether surface crust plays some role in studied parameters.

Based on my results, permeability of different types of sandstones for water vapor does not vary significantly and surface crust has no effect on rate of water vapor diffusion.

Rate of capillary water absorption is reduced by surface crust. Hrubá Skála sandstone is classified as medium or highly absorbing material.

I have proved that evaporation from porous medium can be approximated by exponential function. Rate of evaporation is strongly controlled by climatic conditions, especially by relative humidity.

OBSAH

1. ÚVOD	1
2. METODIKA	2
2.1. Charakteristika použitých nástrojů	2
2.2. Odběr vzorků	2
2.3. Stanovení vlhkosti	3
2.4. Úprava vzorků pro stanovení evapotranspirace	3
2.5. Měření evapotranspirace na výchozech	4
2.6. Měření vlhkosti a teploty in situ	6
2.7. Umístění tablety v klimakomoře	6
2.8. Příprava jader pro měření paropropustnosti	7
2.9. Paropropustnost	10
2.10. Ověření homogenity výparu v klimakomoře	11
2.11. Zjištění podílu difúze par na celkovém transportu vody	11
2.12. Měření nasákavosti pískovce	12
3. POPIS STUDOVANÝCH MATERIÁLŮ A KRUST	15
3.1. Hruboskalské pískovce a jejich pozice v české křídové pánvi	15
3.2. Skalní kůra a další druhy zpevnění povrchu pískovců	15
3.3. Seznam studovaných lokalit	16
3.3.1. Lom Střeleč	19
3.3.2. Lokalita Mladějov 1	21
3.3.3. Lokalita Mladějov 2	21
3.3.4. Lokality Malobratřice 1 a Malobratřice 2	22
3.3.5. Lokalita Drábovna	23
3.4. Charakterizace skalních kůr pomocí drilling resistance	24
3.5. Další poznatky o studovaných materiálech	26
4. VÝSLEDKY A DISKUZE	28
4.1. Rozdíly v klimatu napříč lokalitami a jejich vývoj	28
4.1.1. Lom Střeleč	28
4.1.2. Mladějov 1	29
4.1.3. Mladějov 2	33
4.1.4. Malobratřice 2	36
4.1.5. Drábovna	37
4.1.6. Porovnání lokalit	38

4.2.	Paropropustnost.....	39
4.3.	Saturace pískovcových válců vlivem kapilárního nasákávání.....	55
4.4.	Výpar z pískovcových tablet v klimakomoře.....	60
4.5.	Hodnoty výparu za přirozeného mikroklimatu	70
4.6.	Podíl difúze par na celkovém transportu vody v přípovrchové zóně pískovce	73
5.	ZÁVĚR	75
6.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	77
7.	SEZNAM PŘÍLOH.....	80

1. ÚVOD

Pro pískovcová skalní města, která jsou jedním z nejosobitějších krajinotvorných prvků, je typické výrazné mikroklima (Cílek 2007). Pískovcové stěny jsou pokryty specifickými tvary, jako jsou například voštiny, které jsou souhrnně nazývány pseudokrasem (Young et al. 2009). Původ těchto tvarů je předpokládán v destrukční činnosti solného a mrazového zvětrávání a v biodegradaci (Young et al. 2009), což jsou procesy silně spjaté s transportem vody a jejím obsahem v pórech. Vypařováním vody z porézního prostředí dochází ke zvyšování koncentrace roztoků v pórech horniny až do dosažení rovnováhy vůči jedné či více pevným fázím, což má za následek krystalizaci solí, které svým růstem mohou vytvořit tlak na okolní horninu a tím ji rozrušit. Krystalizace solí je ovlivněna dostupným množstvím vody, které záleží na pórovitosti a klimatických poměrech prostředí (Arnold a Küng 1985). Voda a její transport tak představují zásadní faktor při vzniku skalních měst.

Při studiu jevů ve skalních městech dosud převažoval spíše popisný přístup, kdy byly popisovány a fotograficky dokumentovány skalní útvary (Cílek a Langrová 1994, Adamovič et al. 2010). V některých novějších pracích (Vavřilová et al. 2011, Schweigstilllová et al. 2013) se studium zaměřilo i na určení minerálního složení solí, pohybu bloků a složení vod okapávajících z převisů (Patzelt 2007, Bruthans a Schweigstilllová 2009). Měření pevnosti povrchů a loužící experimenty byly použity k rozlišení různých typů skalních kůr (Schweigstilllová et al. 2013).

Znalosti o množství vody v pórech pískovce, jejím transportu a intenzitě výparu v přírodním prostředí jsou nicméně stále mizivé. Okrajově byla v laboratoři studována propustnost mšenského křídového pískovce (Pavlík et al. 2008). Nebyl však dosud studován pohyb vody *in situ* za přírodního mikroklimatu a ani velmi zhruba nejsou známy hodnoty výparu. Není proto jasné, v jakých hloubkách leží výparová fronta, a tedy ani v jaké hloubce a jak rychle se mohou deponovat soli. Stejně tak nebyl studován vliv krusty na pohyb vody a vodních par.

Ve své diplomové práci jsem si proto stanovil dosáhnout pomocí terénních a laboratorních měření těchto cílů: 1) kvantifikace propustnosti povrchu pískovců pro vodní páru, 2) určení rychlosti saturace pískovců vodou vlivem kapilárního nasákávání, 3) hrubé určení míry výparu za skutečného mikroklimatu na několika výchozech pískovce, 4) u všech výše uvedených bodů rozhodnout, zda a popřípadě jakou roli hraje přítomnost skalní kůry (dále krusty).

2. METODIKA

V této kapitole popisují odběr vzorků, prováděná měření a postup vyhodnocení naměřených dat. Pro přehlednost dělím kapitolu na dvě části, z nichž první se věnuje práci v terénu a druhá laboratorním pracím.

2.1. Charakteristika použitých nástrojů

Pro odběr vzorků jsem používal akumulátorovou příklepovou vrtačku DeWalt (dále příklepová vrtačka) s jádrovými vrtáky určenými původně do zdiva o průměru 67 mm a 83 mm.

Vzorky do hmotnosti 200 g jsem v terénu vážil pomocí přenosné váhy Joshs Z series s udávanou citlivostí měření 0,05 g. Vzorky s hmotností nad 200 g jsem v terénu vážil přenosnou vahou Voltcraft PS-500C s udávanou citlivostí 0,05 g. Při zjišťování hmotnosti v terénu jsem vodorovnou polohu váhy kontroloval deskou s vodováhou.

Vzorky umístěné v klimakomoře jsem vážil pomocí váhy Kern PCB2500-2 s udávanou citlivostí 0,01 g.

Pro záznam vlhkosti a teploty v terénu a v klimakomoře jsem využíval čidla s datalogery DL-121TH Voltcraft (dále čidlo).

Konstantní teplotu a vlhkost v okolí vzorků zajišťovala klimakomora Memmert Climatic Test Chamber CTC 256 (dále klimakomora) na Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR.

Hmotnost vzorků, u kterých byla měřena rychlost saturace vlivem kapilárního nasákávání, byla zjišťována siloměrem Sauter FH 50 s citlivostí 1 g a maximálním zatížením 50 N (dále siloměr).

TERÉNNÍ PRÁCE

2.2. Odběr vzorků

Vzorky jsem odebíral z pískovcových výchozů pomocí příklepové vrtačky s jádrovými vrtáky určenými původně do zdiva o průměru 67 mm (jádro ~59 mm a menší) a 83 mm (jádro ~76 mm a menší). Výška jader závisela na odlomení jádra od pískovcového masivu, avšak nikdy nepřesáhla 6 cm, protože to nedovolovala délka použitých vrtáků.

Odebrané jádro jsem zvážil v terénu nebo během 24 h, kdy bylo udržováno zabalené mikrotenovou folií pro zabránění výparu. Počáteční hmotnost jádra označuji m_p . Hmotnost jsem měřil pro stanovení přirozené vlhkosti pískovce.

LABORATORNÍ PRÁCE

2.3. Stanovení vlhkosti

Jádra pískovce jsem nechal vysychat v laboratoři s relativní vlhkostí (dále RH, zkratka z anglického relative humidity) vzduchu ~50 %, dokud se hmotnost nepřestala měnit. Konečnou váhu jsem označil m_{pl} .

2.4. Úprava vzorků pro stanovení evapotranspirace

Jádra jsem po vyschnutí v laboratoři rašplí upravil pro odstranění nerovností a jádra ubrousil z vnitřní strany tak, aby jejich mocnost byla 1, 2, 3 nebo 4 cm, a výsledky tak byly v každé takové kategorii porovnatelné. Svrchní podstavou válce označuji tu podstavu, která tvořila povrch výchozu (např. krusta). Naopak spodní podstavou označuji tu část, kterou jsem odlomil z podloží. Mocnost jader označuji d . Váhu takto upraveného vzorku jsem označil m_1 .

Po zvážení jsem spodní podstavu a plášť jádra zalil do dvousložkového epoxidového lepidla EPOXY 1200 (dále epoxid). K svrchní podstavě jsem pomocí rozehrátého vosku ze svíčky přilepil kolečko potravinářské fólie o stejném průměru jako podstava vzorku. Fólií jsem tak chránil podstavu před kontaminací epoxidem. Jádro jsem poté položil svrchní podstavou dolů a špejlí jsem roztíral lepidlo po jádře do té doby, než byl pokryt celý jeho povrch kromě podstavy chráněné fólií. U jemnozrnných rozpadavých vzorků jsem věnoval pozornost tomu, aby se lepidlo nenabalilo jen na povrchovou vrstvu zrn, protože ty by následně tíhou lepidla opadaly a vzorek by se porušil.

Impregnace vrstvičkou epoxidu by měla zaručit nepropustnost pro vodu a pro vodní páru. Jádro po impregnaci tak může se svým okolím vyměňovat vlhkost jen prostřednictvím své svrchní podstavy.

Po zaschnutí epoxidu (48 hodin) jsem z povrchu jádra odstranil výčnělky nepotřebného lepidla. Poté jsem jádro zvážil a hmotnost označil m_2 . Hmotnost použitého epoxidu (m_e) odpovídá rozdílu hmotností m_2 a m_1 .

V některých případech došlo ke kontaminaci části svrchní podstavy epoxidem. Obkreslil jsem proto tvar neizolované části svrchní podstavy na milimetrový papír a spočítal její plochu v cm^2 . Plochu této podstavy jsem označil S_{svrch} . Výsledná podoba vzorku pro měření evapotranspirace (dále ET) je zachycena na obrázku Obr. 2.4.1. Takto upravená jádra dále v textu označuji jako pískovcové tablety, popř. tablety.



Obr. 2.4.1. Výsledná podoba jádra (tablety) zalitého do epoxidu. Svrchní podstava jádra (vpravo) zůstává nezatěsněna epoxidem, zatímco spodní podstava (vlevo) je utěsněna.

Pro ověření, do jaké míry proniká epoxid do vzorku, jsem některé tablety pískovce obalené epoxidem rozřízl a zjišťoval mocnost zóny impregnované epoxidem. To jsem provedl jak pro běžný pískovec, tak i pro hrubozrnnou variantu, kde bylo možné očekávat, že epoxid pronikl hlouběji. Výsledek uvádím v Příloze 1.

Na upozornění F. Pastuszka jsem ověřil, do jaké míry je použitý epoxid nasákavý. Výsledky tohoto ověření a diskuzi uvádím v Příloze 1.

Po zaschnutí epoxidu jsem po dobu nejméně 24 hodin saturoval tablety ve vodě z kohoutku v plastové nádobě v hloubce 40-60 cm pod hladinou a jejich váhu poté označil m_{sat} .

TERÉNNÍ PRÁCE

2.5. Měření evapotranspirace na výchozech

Tablety jsem umístil na vybrané lokality v Českém ráji. Tablety pro tato měření pocházely zejména ze dvou lokalit: 1) vertikální puklinová plocha s biokrustou, SZ stěna lomu Střeleč, a 2) biokrusta na horizontálním povrchu u čerpací stanice v lomu Střeleč (podrobněji v kapitole 3).

Tablety jsem umístil přednostně do otvorů po jádrech pískovce, aby byly vzorky součástí pískovcového masivu a ET tak co nejlépe odpovídala přírodním podmínkám. Tabletou jsem do otvoru umístil tak, aby její svrchní podstava tvořila souvislou plochu se stěnou výchozu (tj. aby nepřechývala povrch výchozu ani pod něj nebyla zapadlá). Pokud byla tableta menší než otvor, vyplnil jsem volné prostory listím nebo hlinou. Způsob umístění tablety je znázorněn na obrázcích Obr. 2.4.2a., Obr. 2.4.2b. V okamžiku umístění hmotnost tablety odpovídala m_{sat} .



Obr. 2.4.2a. Umístění tablety do povrchu přirozeného výchozu. Vzorek a výchoz tvoří souvislou plochu.

Foto: J. Bruthans

Poté jsem v nepravidelných intervalech v řádu dnů až týdnů měřil hmotnost vzorků, přičemž jsem z epoxidového obalu tablety před zvážením nejprve setřel zkondenzovanou vodu, která se srážela v otvoru mezi stěnou tablety a otvorem po jádře pískovce. Hmotnost tablety jsem měřil do doby, než se přiblížila m_2 .



Obr. 2.4.2b. Umístění tablety do povrchu přirozeného výchozu. Vzorek a výchoz tvoří souvislou plochu.

Foto: J. Bruthans

Pak jsem vzorek znovu saturoval a pokus opakoval na jiné lokalitě. Místa odebrání se ve většině případů neshodovala s místy umístění vzorku zpět do výchozu. Stejně tak se mohla lišit místa umístění daného vzorku mezi jednotlivými pokusy. Pro zjištění rozdílu v chování vzorků odebraných z různých lokalit jsem poté na stejné lokality umísťoval vedle sebe zároveň dva různé typy vzorků (PPx a ČERx, podrobněji v kapitolách 3 a 4).

Tato terénní měření nesloužila jako podklady k nalezení pravidel, kterými se výpar z pískovců řídí, ale pouze k určení hodnot výparu v přirozeném prostředí.

Protože se ukázalo, že ani tablety ze zdánlivě homogenních povrchů z lomu Střeleč nevykazují stejné rychlosti vysychání na stejných lokalitách, přistoupil jsem ve druhé fázi k použití jader přesně v místech, ze kterých byly odebrány. K tomu bylo třeba minimalizovat poškození a zničení jádra. Ve druhé fázi jsem proto použil tablety o větším průměru, protože při jejich vrtání docházelo k mnohem menšímu poškození než při vrtání menších jader. Tablety jsem po obalení epoxidem umístil na stejné místo, ze kterého byly odebrány. Poté jsem opět v nepravidelných intervalech v řádu dnů až týdnů měřil hmotnost vzorků pro stanovení ET v přirozeném prostředí.

2.6. Měření vlhkosti a teploty in situ

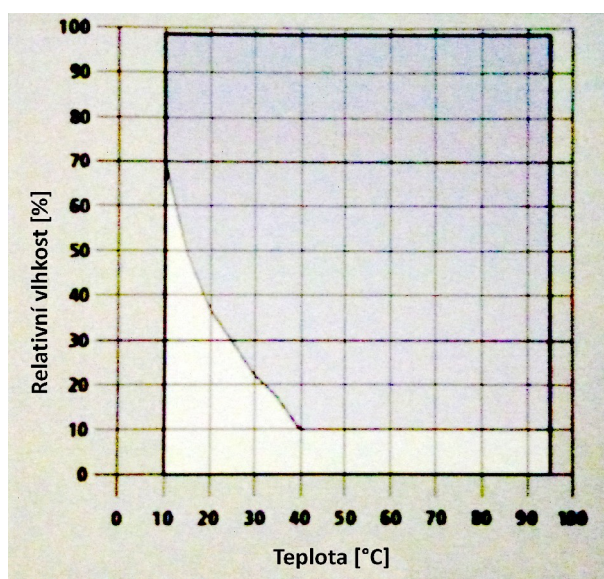
Pomocí čidel s automatickým záznamem po 30 minutách jsem na lokalitách měřil relativní vlhkost vzduchu a teplotu.

LABORATORNÍ PRÁCE

2.7. Umístění tablety v klimakomoře

Tablety pískovce jsem kromě terénu umísťoval i do klimakomory v Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR. Klimakomora umožňuje nastavit konstantní RH v rozsahu 10-98 % a konstantní teplotu (dále T) v rozsahu -42-190 °C. RH zároveň s T lze nastavit pouze v poli omezeném vlhkostí 10-98 % a teplotou 10-95 °C tak, jak udává obrázek Obr 2.7.1. Seznam vzorků umístěných do klimakomory uvádím v kapitole 3. V zásadě jsem používal tři nastavení klimakomory: 1) RH 50%, T 20 °C; 2) RH 70%, T 20 °C; 3) RH 90%, T 20 °C.

Vnitřní rozměry komory jsou 64 cm x 67 cm x 59,7 cm.



Obr. 2.7.1. Rozsah teploty a relativní vlhkosti vzduchu, který se dá nastavit v klimakomoře.

(Memmert 2013).

Každou tabletu jsem nejdříve po dobu nejméně 24 hodin umístil do nádoby zaplněné 40-60 cm sloupcem vody z vodovodu a její hmotnost po vyjmutí z vody a okapání (5 s po vyndání) označil m_{sat} .

Po ustálení hodnot RH a T v klimakomoře jsem do ní tabletu umístil. Vzorek jsem vážil s časovým krokem nejprve cca 1 hodiny a poté jsem časový krok prodlužoval až na cca 90 hodin až do doby, kdy se hmotnost tablety ustálila.

Podle rovnice (2.7.1) jsem počítal hodnotu z:

$$z = \log \frac{m - m_2}{m_{sat} - m_2} \quad (2.7.1)$$

m v této rovnici představuje aktuální hmotnost v čase, m_2 reprezentuje hmotnost tablety za přirozené vlhkosti a m_{sat} je dána hmotností tablety za maximální možné saturace, tedy na počátku měření.

Vlhkost vzorku jsem počítal podle rovnice (2.7.2):

$$\theta = \frac{m_w}{m_2} [\%] \quad (2.7.2)$$

kde m_w představuje aktuální hmotnost vody ve vzorku a m_2 celkovou hmotnost vzorku za přirozené vlhkosti. Vlhkost udávám v procentech.

2.8. Příprava jader pro měření paropropustnosti

Metoda pro měření paropropustnosti je v angličtině označována jako „wet cup“, proto v textu používám pro označení upravených jader slovo „šálek“. Jádra jsem upravil na mocnost 1-6 cm a tuto mocnost jsem označil d. Rozsah mocností jsem zvolil z toho důvodu, abych prověřil, zda pro různě mocné vzorky vycházejí podobné hodnoty, tedy zda je tato metoda využitelná pro vyšší rozsah mocností.

Do dolní podstavy kruhového PVC víčka s průměrem 63 mm jsem pomocí jádrového vrtáku průměru 47 mm vyvrtal kruhový otvor tak, aby se střed tohoto otvoru shodoval se středem podstavy víčka. Takto upravené víčko jsem z vnitřní části jeho pláště obrousil rašplí a smirkovým papírem, abych zdrsněním povrchu zlepšil jeho přilnavost k epoxidu. Hmotnost provrtaného víčka jsem označil m_v .

Poté jsem do tohoto víčka umístil jádro pískovce tak, aby svou svrchní podstavou zapadlo do provrtaného otvoru – pokud to tvar vzorku dovolil, snažil jsem se, aby svrchní podstava jádra (např. krusta) tvořila souvislou plochu s podstavou víčka (Obr. 2.8.1.). Některým vzorkům jsem mírně zmenšil rašplí obvod, aby vždy mezi PVC víčkem a jádrem byl prostor 1-3 mm pro dokonalé zatěsnění epoxidem. Hmotnost takto upraveného jádra jsem označil m_1 .



Obr. 2.8.1. Svrchní podstava jádra tvoří u šálků souvislou plochu s podstavou PVC víčka.

Poté jsem jádro z trubky vyňal, po obvodu otvoru ve víčku jsem natřel 2-5 mm tenkou vrstvou dvousložkového epoxidového lepidla UBU PLUS 5min (dále pětiminutové lepidlo) a jádro jsem umístil zpět tak, aby opět svou svrchní podstavou zapadlo do provrtaného otvoru. Tím byl otvor zatěsněn pro aplikaci tekutějšího epoxidu pro vyplnění mezikruží mezi jádrem a stěnami PVC víčka.

Po úplném zaschnutí pětiminutového lepidla jsem pomocí tekutějšího, ale pomalu tuhajícího lepidla EPOXY 1200 (epoxidu) a injekční stříkačky vyplnil prostor mezi vzorkem a stěnami víčka. Podoba vzorku v této fázi přípravy je znázorněna na obrázku Obr. 2.8.2. Tuto část šálku označuji A.

Po zaschnutí epoxidu (48 hodin) jsem celý vzorek zvážil a hmotnost označil m_2 . Z rozdílu hmotností m_2 a m_1 a při znalosti hmotnosti víčka (m_v) je patrná hmotnost lepidel použitých k lepení a těsnění m_e . Z důvodu případné kontaminace obou podstav lepidly jsem vypočítal jejich plochy v cm^2 a označuji je jako S_{svrch} , resp. S_{spod} .



Obr. 2.8.2. Podoba části A šálku. Svrchní podstava jádra (na obrázku vlevo) je umístěna v PVC víčku tak, aby zapadla do otvoru. Vnitřní podstava jádra je znázorněna na obrázku vpravo.

Poté jsem další PVC víčko o stejném průměru jako u části A položil podstavou na podložku a nalil do něj 40-60 ml destilované vody. Hmotnost použité vody jsem označil m_w a váhu víčka m_{v2} . Toto víčko s vodou označuji jako část B.

Na část B jsem umístil část A a spoj mezi A a B jsem omotal třikrát až čtyřikrát kolem dokola silně utahovanou elektrikařskou izolační páskou (dále el. páska). Tím byl šálek připravený a jeho konečná podoba je zobrazena na obrázku Obr. 2.8.3.

Předběžné testy ukázaly, že el. páska má mnohem lepší parotěsnost než jiné myslitelné způsoby izolace a jde přitom o jednoduchý a dobře opakovatelný postup (viz Příloha 1). El. páska zabezpečila parotěsnost šálku s výjimkou svrchní podstavy, která slouží k měření výparu. Hmotnost celého šálku jsem označil m_c .



Obr. 2.8.3. Konečná podoba šálku použitého k měření paropropustnosti pískovců. V horním PVC víku (část A) se nachází pískovcové jádro, v dolním PVC víku (část B) je destilovaná voda.

Se vzorkem jsem pohyboval opatrně (bez větších náklonů a pomalými pohyby), aby nedošlo k zmáčení jádra vodou.

2.9. Paropropustnost

Účelem metody wet cup je kvantifikovat transport par v pórovém prostředí upraveném tak, že se transport bude blížit 1D geometrii. Získané parametry jsou: součinitel difúzní vodivosti, součinitel difúze vodní páry a faktor difúzního odporu (viz dále) (Pavlík et al. 2008, Bear a Bachman 1990).

Šálek jsem po zjištění m_c (celkové hmotnosti) umístil do klimakomory a následně zjišťoval změnu jeho hmotnosti v čase a kontroloval jsem, zda je úbytek hmotnosti lineární.

K vypočtení parametrů jsem použil metodiku Pavlíka et al. (2008), kterou jsem zčásti modifikoval. Zatímco Pavlík et al. (2008) pro stanovení parametrů využili pouze směrnici posledních pěti měření, já jsem pro vyhodnocení využil hodnoty získané v průběhu celého pokusu, a to z toho důvodu, že rychlost úbytku destilované vody se téměř neměnila v čase (viz Příloha 2) a výsledky se pro obě metody vyhodnocení téměř neliší. Nicméně i tak hodnoty získané z delšího měření považuji z principu za reprezentativnější.

Součinitel difúzní vodivosti δ jsem počítal podle rovnice (2.9.1) (Pavlík et al. 2008):

$$\delta = \frac{\Delta m d}{S \tau \Delta p_p} \quad (2.9.1)$$

kde Δm je množství páry difundující vzorkem [kg], d je mocnost vzorku [m], S představuje měrnou plochu vzorku [m^2], τ reprezentuje časové období, během kterého byla transportována vodní pára [s], a Δp_p je rozdíl parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu pod a nad vzorkem [Pa].

Parciální tlak pro nasycené vodní páry za dané teploty jsem odečetl z tabulek (Guyot et al. 1983). Jestliže RH byla např. 90 %, parciální tlak byl 90 % z hodnoty pro nasycenou vodní páru. Součinitel difúzní vodivosti δ rozměrově odpovídá [s].

Jelikož se zde počítá s měrnou plochou vzorku a vlivem zalití části plochy epoxidem se velikost ploch S_{svr} a S_{spod} lišila o cca 2-37 % (v průměru o 15,7 %), bylo zapotřebí se rozhodnout, se kterou plochou budu počítat. Používal jsem 1) S_{svrch} , protože u ní lze očekávat vyšší těsnící účinky a tím i větší vliv na transport, 2) průměr S_{svrch} a S_{spod} .

Součinitel difúze vodní páry D_v jsem spočítal podle rovnice (2.9.2) (Pavlík et al. 2008):

$$D_v = \frac{\delta R T}{M} \quad (2.9.2)$$

kde δ je součinitel difúzní vodivosti [s] získaný z předchozího vztahu, R je univerzální plynová konstanta $8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$, T odpovídá termodynamické teplotě [K], za které byl pokus prováděn, a M značí molární hmotnost vody ($0,018 \text{ kg.mol}^{-1}$). Rozměrově součinitel difúze vodní páry odpovídá [$m^2.s^{-1}$].

Faktor difúzního odporu μ jsem spočítal podle rovnice (2.9.3) (Pavlík et al. 2008):

$$\mu = \frac{D_a}{D_v} \quad (2.9.3)$$

kde D_a odpovídá součiniteli difúze vodní páry ve vzduchu ($2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) a D_v je součinitel difúze vodní páry ve vzduchu podle rovnice (2.9.2). Faktor difúzního odporu μ tedy značí, kolikrát lépe propouští vodní páru nehybná vrstva vzduchu než stejná mocnost vzorku. Tato veličina je bezrozměrná.

2.10. Ověření homogenity výparu v klimakomoře

Abych mohl porovnávat, do jaké míry je rychlost výparu tablet a šálků v klimakomoře dána vlastnostmi pískovce, bylo nutné ověřit, zda v různých částech klimakomory je při stejné geometrii vzorků stejná rychlost výparu, a pokud by byly zjištěny rozdíly, pak najít nastavení klimakomory, které bude rozdíly co nejvíce potlačovat. K tomu jsem použil slepé vzorky, viz popis Příloha 1.

Slepé vzorky jsem do klimakomory nejprve rozmísťoval náhodně a jejich pozice se v čase měnila. Vzorky jsem vážil po časových intervalech, čili jsem mohl provést první hrubý odhad nehomogenity výparu v klimakomoře a určit tak kritická místa.

Poté jsem již slepé vzorky umístil do klimakomory na pevně stanovená místa vybraná podle dvou kritérií: 1) kde jsem očekával největší odchylky výparu od průměru, 2) tak, aby ze slepých vzorků bylo možné odhadnout nerovnoměrnost výparu v celém prostoru každého patra. Na každém patře klimakomory jsem předpokládal, že změny v rychlosti výparu se řídí principem rovinné souměrnosti. Rozmístění těchto vzorků uvádím v Příloze 1.

2.11. Zjištění podílu difúze par na celkovém transportu vody

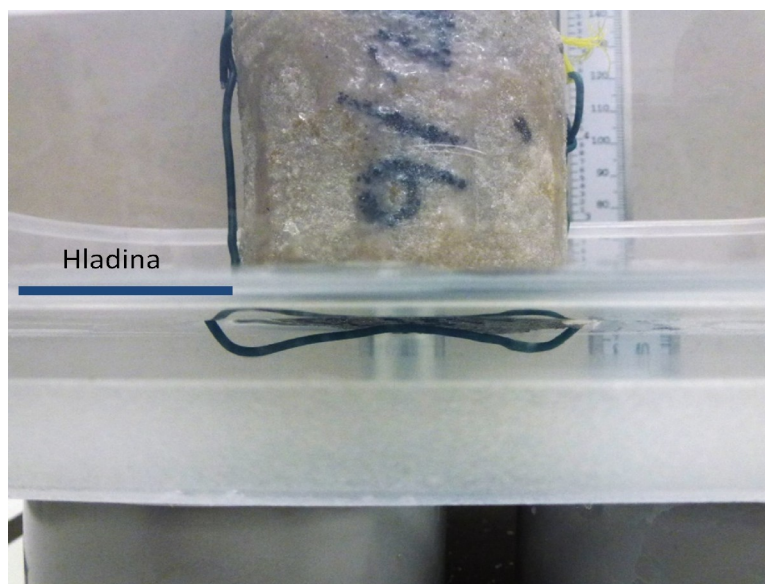
Při porovnání intenzity transportu par v šálcích s transportem kapilární vody \pm páry v tabletách jsem narazil na problém s určením přímé délky dráhy, na které se transport odehrává. Zatímco u šálků je tato dráha jasně definována mocností jádra, u tablet je tato dráha menší než mocnost jádra, protože voda je získávána přímo z tablety, nikoli z prostoru pod ní. Předpokládám, že tok vlhkosti roste lineárně od spodní podstavy (tok 0 %) k svrchní podstavě (tok 100 %). Střední dráha vztahena k toku vlhkosti je za takových podmínek rovna 1/2 z celkové mocnosti pískovcové tablety ($d/2$). V prvním přiblížení však není průměrná mocnost tablet a šálků zásadně odlišná, a proto při vyhodnocování podílu difúze par na celkovém úbytku vody rozdíly v mocnostech mezi pískovcovými jádry v šálcích a tabletami pro řádově podobnou mocnost neuvažuji.

Protože se hodnoty paropropustnosti pro jednotlivé šálky příliš neliší a jelikož s výjimkou některých vzorků (podrobněji v kapitole 4.4) vykazují všechny tablety v klimakomoře podobnou rychlost výparu, spočítal jsem z šálků průměrnou rychlost úbytku hmotnosti za čas (g/h) a z tablet průměrnou rychlost výparu v g/h při takové vlhkosti vzorku, která odpovídá hodnotám naměřeným v přirozeném prostředí (viz kapitola 4.1.). Poté jsem byl schopen určit, kolik procent z celkového úbytku vlhkosti vzorku v čase představuje migrace vodní páry difúzí.

2.12. Měření nasákavosti pískovce

Na jádrech pískovce odebraných způsobem popsaným v kapitole 2.2 jsem měřil nasákavost vlivem kapilárního vztlínání. Jádro jsem upravil rašplí tak, aby jeho spodní podstava (bez krusty) byla co nejvíce plochá. Po úpravě jádra jsem zjistil jeho mocnost d a jádro jsem zvažil (hmotnost m_1). Plášť jádra jsem obalil epoxidem, takže obě podstavy zůstaly volné a pískovec skrz ně mohl komunikovat s prostředím. Po zaschnutí lepidla jsem zjistil hmotnost m_2 a z rozdílu m_2 a m_1 jsem zjistil hmotnost epoxidu m_e . Takto upravená jádra dále označuji jako válce.

Poté jsem válec zavěsil na siloměr, který umožňuje měření hmotnosti v čase s krokem od 0,1 s a její okamžitý zápis do počítače. Pod toto zařízení jsem umístil nádobu s vodou takovým způsobem, aby podstava válce byla v kontaktu s hladinou – vlivem adhezních sil byla hladina v kontaktu s podstavou, tak jak ukazují obrázky Obr. 2.12.1a., Obr. 2.12.1b. Pokud úprava vzorku nedovolovala dokonale plochou podstavu válce, vznikaly tak rozdíly mezi hloubkou ponoření této podstavy. Při úpravě jsem se proto snažil, aby rozdíly byly co nejmenší (cca do 0,4 cm).

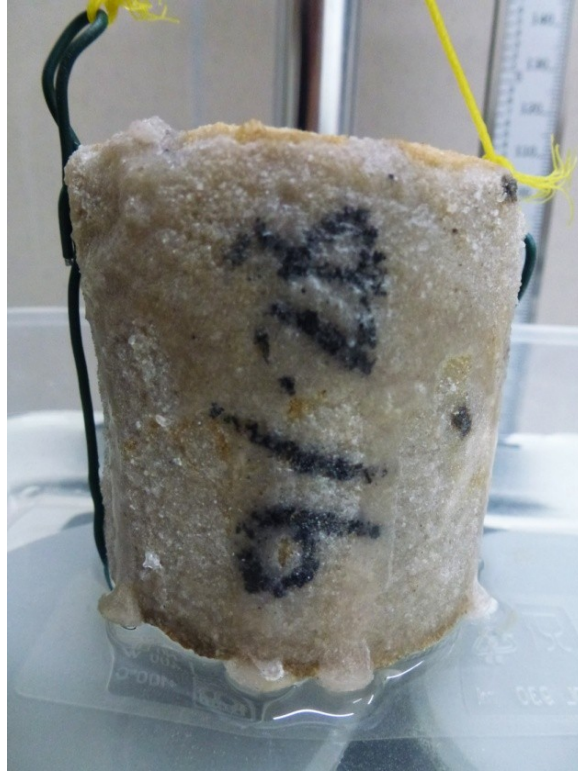


Obr. 2.12.1a. Spodní podstava válce je v kontaktu s hladinou vody pouze adhezními silami vody.

Vlivem kapilárního nasákávání samozřejmě dochází k poklesu hladiny vody v nádobě pod vzorkem. Tuto skutečnost diskutuji v Příloze 1.

Při těchto pokusech musí být podle Menga (1993) dodrženy tři předpoklady: 1) evaporace musí být zanedbatelná v porovnání s kapilární absorpcí, 2) materiál musí mít póry v rozmezí 10 μm -1 mm, aby docházelo ke kapilárnímu vztlínání, 3) proces je vztažen pouze k vertikálnímu pohybu.

S krokem měření 1 s nebo podrobnějším jsem poté sledoval hmotnost válce, která se vlivem nasákavosti v čase zvyšovala. Hmotnost jsem měřil do té doby, než se přestala měnit. Také jsem sledoval, kdy zvlhčující fronta vody migrující skrz vzorek dosáhne svrchní podstavy a viditelně ji zvlhčí. Čas prvního objevení vlhkosti na svrchní podstavě jsem u vybraných vzorků zapsal jako T_w [s].



Obr. 2.12.1b. Spodní podstava válce v kontaktu s hladinou vody.

Také jsem pro vzorky určil tzv. w-value (hodnotu w, v angličtině „water absorption coefficient“), a to podle rovnice (2.12.1) (Siegesmund a Dürrast 2011). Tato hodnota vyjadřuje absorpci vody porézním prostředím vlivem kapilarity.

$$w = \frac{m}{\sqrt{t}} \quad (2.12.1)$$

m značí okamžitou váhu vzorku [g] vydělenou plochou podstavy vzorku [cm²], přes kterou dochází k nasákávání, a t čas [s], resp. dobu od počátku měření. Hodnota w je poté křivkou v grafu m vs. \sqrt{t} a rozměr má [g.cm⁻².s^{1/2}]. Pro porovnání výsledných hodnot s výsledky pomocí metodiky původně uváděné Siegesmundem a Dürrastem (2011), kde hmotnost uvádějí v kg a plochu v m², jsem své výsledky vynásobil deseti. Autoři v původní metodice na horizontální osu vynášejí čas v hodinách (resp. \sqrt{h}), já jsem se však z důvodu některých velmi krátkých pokusů rozhodl pro sekundy (resp. \sqrt{s}).

Protože v hodnotě w figuruje velikost plochy podstavy, která se vlivem kontaminace epoxidem mohla lišit (o 5-51 %, v průměru o 25 %), obkreslil jsem plochy na průhlednou fólii a jejich velikost (cm²) poté spočítal přes milimetrový papír. Velikost těchto ploch poté uvádím jako S_{svrch} (pro svrchní podstavu) a S_{spod} (pro spodní podstavu).

Protože se ukázalo, že skrz S_{svrch} a S_{spod} je maximální množství nasáknuté vody odlišné, vypočítal jsem ještě pro každý vzorek hodnotu R (rovnice (2.12.2)):

$$R = \frac{m_{svrch}}{m_{spod}} [\%] \quad (2.12.2)$$

kde m_{svrch} značí množství nasáknuté vody [g] přes svrchní podstavu a m_{spod} množství nasáknuté vody [g] přes spodní podstavu. Pakliže je maximální množství nasáknuté vody skrz svrchní podstavu vyšší, je hodnota R vyšší než 100 %. Pokud se naopak nasákne více vody skrz spodní podstavu, je hodnota R nižší než 100 %.

Podle rovnice 2.12.3. jsem spočítal hodnotu P, která udává, kolik procent času bylo potřeba k dosažení maximální možné saturace skrz spodní podstavu bez krusty. 100 % času je definováno jako čas potřebný k saturaci skrz svrchní podstavu.

$$P = \frac{T_{spod}}{T_{svrch}} [\%] \quad (2.12.3)$$

T_{spod} značí čas [s] potřebný k dosažení maximální možné saturace skrz spodní podstavu a T_{svrch} skrz svrchní podstavu.

Také jsem se snažil zařadit materiál podle Siegesmunda a Dürrasta (2011) na základě jeho propustnosti. Třídy propustnosti uváděné autory udává tabulka Tab. 2.12.1., a to podle hodnoty w za první hodinu měření. U vzorků, jejichž nasákávání do maximální možné saturace trvalo méně než hodinu, hodnotu w neuvádím.

Tab. 2.12.1. Třídy propustnosti materiálů klasifikované pomocí hodnoty w (Siegesmund a Dürrast 2011).

hodnota w	třída propustnosti
< 0,5 kg.m ⁻² .h	„slightly absorbing“ – slabá absorpce
0,5 – 3 kg.m ⁻² .h	„medium absorbing“ – střední absorpce
> 3 kg.m ⁻² .h	„highly absorbing“ – silná absorpce

Měření jsem po opakovaném vysušení tablety do přirozené vlhkosti m_p provedl i pro druhou podstavu válce a výsledky poté porovnal.

Při vypracovávání této metodiky jsem se inspiroval také článkem autorů Concha-Lozano et al. (2012).

3. POPIS STUDOVANÝCH MATERIÁLŮ A KRUST

Studovaným materiálem byl hruboskalský pískovec české křídové pánve vyskytující se především v lomu Sřeleč a v jeho nejbližším okolí.

3.1. Hruboskalské pískovce a jejich pozice v české křídové pánvi

Studovaná oblast leží v severozápadní části české křídové pánve, stratigraficky se řadí do svrchní křídny.

Česká křídová pánev je typickou hydrogeologickou pánví s vrstvenými kolektory a pokrývá značnou část severní poloviny Českého masivu (Krásný et al. 2012). Na spodu se nacházejí nejstarší cenomanské usazeniny perucko-korycanského souvrství. Perucké vrstvy mají malou mocnost a jedná se o říční a jezerní sedimenty, jako jsou jílovce, pískovce a slepence, zatímco korycanské vrstvy jsou již tvořeny marinními slepenci a pískovci (Adamovič 1992). Na toto souvrství nasedá bělohorské souvrství odpovídající spodnímu až střednímu turonu, kde dominují vápnité jílovce s pískovci (Adamovič 1992). Následuje cca 100 m (v ojedinělých případech až 600 m) mocné jizerské souvrství, jehož pískovce a slínovce se řadí do středního až svrchního turonu (Čurda a Kříž 1987, Krásný et al. 2012).

Nad jizerským souvrstvím se nachází teplické souvrství, které je produktem výrazné mořské transgrese, při které bylo zaplavení českého masivu nejrozsáhlejší. V naprosté většině pánve je teplické souvrství tvořeno vápnitými jílovci až slínovci a vápenci, avšak v zájmové oblasti je vyvinuto v pískovcové facii (Krásný et al. 2012). Tyto 40-120 m mocné vrstvy kvádrových pískovců (tzv. hruboskalský pískovec, tvořící skalní města) se formovaly ve svrchním turonu a coniacu (cca 90-86 Ma) v poměrně mělkém moři (Macák 1956, Uličný 2001). Litologicky se jedná o jemně až hrubě zrnité křemenné pískovce s kaolinovým, illitovým a Al_2O_3 tmelem (Uličný 2001, Schweigstillová et al. 2013).

V polohách teplického souvrství je také vyvinut pískovec v lomu Sřeleč, kde lze navíc rozlišit dva typy materiálu: tzv. sklářský pískovec, který v lomu tvoří subhorizontální těleso v nadm. výšce 240-280 m.n.m. Ve svém podloží i nadloží je obklopen slévárenským pískovcem (nadm. výšky 225-240 m.n.m., 280-310 m.n.m.). Největším rozdílem mezi těmito typy je vyšší obsah železitého tmelu v slévárenském pískovci (Klein a Tajovský 1990).

3.2. Skalní kůra a další druhy zpevnění povrchu pískovců

Cílek a Langrová (1994) definují skalní kůru neboli krustu jako několik milimetrů až desítky centimetrů mocnou, druhotně zpevněnou zónu na povrchu pískovce. Krusty se vyskytují převážně na svislých a převislých stěnách (Adamovič et al. 2010) a hrají roli při vzniku pískovcových skalních věží, voštin a dalších útvarů a také podstatně chrání povrch horniny před erozí (Cílek a Langrová 1994).

Dokonale vyvinuté skalní kůry jsou špatně rozpoznatelné, lépe patrné jsou až při částečné destrukci, kdy začnou vystupovat nad okolní povrch ustupujícího pískovce (Adamovič et al. 2010). Dokonale

vyvinuté kůry se nacházejí na řadě stěn v pískovcových skalních městech, především v lépe propustných pískovcích, a to ve velké části Hruboskalska (Cílek a Langrová 1994, Adamovič et al. 2010).

Názory na to, z čeho bývají krusty složeny, se často liší. Zatímco Cílek a Langrová (1994) nebo Vavřilová et al. (2011) spatřují hlavní tmelící složku skalních kůr v opálu (mnohdy s přítomností sádrovce, hydroxidů železa a organické hmoty), Adamovič et al. (2011) v krustách pokrývajících skalní stěny Českého ráje nezjistili opál ani na jedné z osmi detailně studovaných lokalit. Stejně tak Schweigstilllová (nepublikováno) identifikovala opál z 200 lokalit z celé Evropy jen v pěti případech. Je proto evidentní, že pro vznik skalních kůr není nezbytná přítomnost opálu a jejich složení se různí podle oblastí.

Při studiu pískovce v činném lomu Střeleč, ze kterého jsem odebíral většinu studovaného materiálu a který leží přímo v zájmové oblasti mé práce, byl kromě skalních kůr objeven ještě druhý způsob zpevnění povrchu pískovce a tedy i ochrany výchozu před erozí. Jedná se o cca 1 mm mocnou zónu deformačních proužků lemujících puklinovou plochu. Tyto zóny jsou méně propustné pro vodu a mají výrazně vyšší pevnost v tahu. Jejich vyšší pevnost je způsobena pouze těsnějším uspořádáním zrn. Mají také zásadní vliv na morfologii skalních měst (Bruthans et al. 2013).

Podle Bjellanda a Thorsetha (2002) hrají při zpevnění pískovce také významnou roli lišejníky. Zatímco některé druhy lišejníků jsou destruktivním činitelem, jiné naopak mohou mít ochranný efekt, což potvrzují i studie Mikuláše (1999) na slabě cementovaném pískovci ve Velké Británii, Kurtze a Netoffa (2001), Schweigstilllové et al. (2013) na tzv. sklářských pískovcích v lomu Střeleč a v poslední řadě také Concha-Lozano et al. (2012).

3.3. Seznam studovaných lokalit

Vzorky hruboskalských pískovců jsem odebíral z 8 hlavních lokalit (Střeleč 1, Střeleč 2, Střeleč 3, Mladějov 1, Mladějov 2, Malobratřice 1, Malobratřice 2 a Drábovna; některé vzorky jsem odebral i z lomu Zbiroh (přesněji v obci Michovka), kde se nachází pískovce totožné s těmi na lokalitě Drábovna). Na těchto lokalitách jsem také prováděl měření evapotranspirace a byla zde umístěna čidla zaznamenávající vlhkost a teplotu.

Některé z hlavních lokalit ještě dělím na dílčí podlokality. Kompletní seznam všech studovaných míst uvádím v tabulce Tab. 3.3.1.

Tab. 3.3.1. Seznam všech studovaných míst včetně charakteristiky povrchu pískovce, kterou uvádím zkratkami – PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, ER erodabilní, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce. Mocnost krusty či zvětralé zóny byla zjištěna metodou DR (viz kapitola 3.4.). V případě zvětralé zóny přidávám k číslu hvězdičku a do závorky (zvětralé). Uvádím také rozdíl v odolnosti materiálu mezi krustou či přípovrchovou zvětralou zónou a podložím. Poměr je vždy vztažen k přípovrchové zóně - materiály s krustou mají poměr >1, materiály se zvětralým povrchem mají poměr <1). % Objemovou vlhkost jsem převzal od Svobodové (2013-2014).

lokality	typ povrchu	m nad hladinou	prům. obj. vlhkost [%]	sklon stěny	orientace stěny	mocnost krusty [mm] popř. mocnost zvětralé zóny [mm]	poměr odolnosti
Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO	nad 3	1,7	80°	SZ	2-3	6,0
Střeleč 1 - PP pod závodem	SPOD	nad 3	2,0	80°	SZ	-	-
Střeleč 1 - PP nad odkalištěm	PP+BIO	nad 3	2,9	90°	Z	2-5	4,0 - 6,0
Střeleč 1 - PP nad odkalištěm	SPOD	nad 3	2,9	90°	Z	-	-
Střeleč 1 - PP jezevci II	PP	nad 3	1,1	80°	SZ	2	1,0 - 4,0
Střeleč 1 - břehule	BIO	nad 3	4,9	80°	Z	2-3	3,0
Střeleč 1 - břehule	ER	nad 3	4,9	70°	JZ	přes 32* (zvětralé)	0,3
Střeleč 2 - ČER	BIO	1-2	3-5	5°-20°	-	2-3	4,0 - 15,0
Střeleč 2 - S5 A	PP+BIO	0,4	8,6	90°	JZ-JV	16* (zvětralé)	0,7
Střeleč 2 - S5 B	ER	0,4	8,6	80°	SZ-SV	14* (zvětralé)	0,8
Střeleč 2 - S5 C	PP	1	8,6	90°	SZ-SV	-	-
Střeleč 2 - S4	PP	1	-	100°	SZ-SV	-	-
Střeleč 3 - břehule	BIO	nad 3	3,3	50°	JZ	2-4	4,3
Mladějov 1	PRIR (řasy)	nad 3	9,0	85°	J	-	-
Mladějov 1	SPOD	nad 3	9,0	85°	J	-	-
Mladějov 1	PP+PRIR	nad 3	2,1	80°	JZ	více zpevněných zón?	?
Mladějov 1	PRIR (pilíř)	nad 3	1,0	50°	J	-	-
Mladějov 1	PRIR (voštiny)	nad 3	1,9	60°	Z	-	-
Mladějov 1	PRIR (jeskyně)	nad 3	1,5	60°	S	-	-
Mladějov 2	PRIR (voštiny)	nad 3	-	85°	JV	-	-
Mladějov 2	PRIR	nad 3	-	75°	J	-	-
Malobratřice 1	PRIR (hrubozrnné)	nad 3	2,7	85°	SZ	-	-
Malobratřice 2	PRIR (hrubozrnné)	nad 3	2,8-4	25°	S	-	-
Drábovna	PRIR (solná eroze)	nad 3	2,1	30°	SV	přes 30* (zvětralé)	0,1
Zbiroh	PP+BIO	nad 3	6,4	90°	JV	3	3,3
Zbiroh	PRIR+ER	nad 3	6,4	90°	JZ	přes 24* (zvětralé)	0,3

Přibližné GPS souřadnice hlavních lokalit uvádím v tabulce Tab. 3.3.2., seznam všech použitých vzorků a jejich použití uvádím v tabulkách Tab. 3.3.3a., Tab. 3.3.3b.

Tab. 3.3.2. Seznam zájmových lokalit a jejich GPS souřadnice.

Lokalita	GPS souřadnice
Střeleč 1 - PP pod závodem	50°29'43.921"N 15°14'58.140"E
Střeleč 1 - PP nad odkalištěm	50°29'44.700"N 15°14'56.341"E
Střeleč 1 - PP jezevci II	50°29'42.120"N 15°14'56.939"E
Střeleč 1 - břehule	50°29'42.060"N 15°15'0.839"E
Střeleč 2 - ČER	50°29'36.480"N 15°14'49.079"E
Střeleč 2 - S5 A,B,C	50°29'39.840"N 15°14'38.640"E
Střeleč 2 -S4	50°29'36.660"N 15°14'44.100"E
Střeleč 3 - břehule	50°29'48.720"N 15°14'42.480"E
Mladějov 1	50°29'22.261"N 15°14'38.820"E
Mladějov 1b	50°29'22.020"N 15°14'38.580"E
Mladějov 2	50°29'28.440"N 15°13'53.339"E
Malobratřice 1	50°28'45.180"N 15°4'43.139"E
Malobratřice 2	50°28'46.620"N 15°4'46.261"E
Drábovna	50°37'44.280"N 15°10'38.819"E

Tab. 3.3.3a. Seznam vzorků použitých při měření výparu, místo jejich odebrání a typ povrchu, který uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, ER erodabilní, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	typ povrchu	pozn.	použití
80	Střeleč 1 - PP pod závodem	SPOD		výpar
121	Střeleč 2 - S5 A	PP+BIO		výpar
120	Střeleč 2 - S5 A	PP+BIO		výpar
127	Střeleč 2 - S5 B	ER		výpar
58	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
134	Střeleč 2 - S5 C	PP		výpar
31	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
47 PP	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
65	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
69	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
48	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
42 B	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
61	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
44	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
36	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
64 B	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
33	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
59	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
40	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
49	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
30	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
9/52	Střeleč 1 - břehule	BIO		výpar
39	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
9/25	Střeleč 1 - PP nad odkalištěm	PP+BIO		výpar
41	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
46	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
9/33	Střeleč 3 - břehule	BIO		výpar
42	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
70	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
ČER 9	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar
V3	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
ČER 12	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar
ČER 15	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar
ČER 18	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar
ČER 11	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar
V6	Střeleč 2 - S4	PP		výpar
25	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar
ČER 23	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar
ČER 19	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar
ČER 16	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar
11/51	Drábovna	PRIR	solná eroze	výpar
V4	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
955/4	Malobratřice 2	PRIR	hrubozrnné	výpar
ČER 21	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar
130	Střeleč 2 - S5 C	PP		výpar
V7	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		výpar
ČER 17	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar
101	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar
ČER 24	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar
ČER 13	Střeleč 2 - ČER	BIO		výpar

Tab. 3.3.3b. Seznam vzorků použitých při měření paropropustnosti (wet cup) a nasákavosti pomocí kapil. vzlínání, místo jejich odebrání a typ povrchu, který uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, ER erodabilní, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	typ povrchu	pozn.	použití
91	Střeleč 1 - PP pod závodem	SPOD		wet cup
43	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		wet cup
68	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		wet cup
76	Střeleč 1 - PP pod závodem	SPOD		wet cup
11/15	Zbihroh	PP+BIO		wet cup
11/6	Mladějov 1	PRIR		wet cup
104	Střeleč 2 - ČER	BIO		wet cup
9/21 A	Střeleč 1 - PP nad odkalištěm	PP+BIO		wet cup
9/24 A	Střeleč 1 - PP nad odkalištěm	PP+BIO		wet cup
9/21 B	Střeleč 1 - PP nad odkalištěm	SPOD		wet cup
9/34	Střeleč 3 - břehule	BIO		wet cup
9/24 B	Střeleč 1 - PP nad odkalištěm	SPOD		wet cup
158	Střeleč 1 - PP jezevci II	PP		wet cup
9/7 A	Mladějov 1	PRIR		wet cup
9/7 B	Mladějov 1	SPOD		wet cup
9/47	Střeleč 3 - břehule	BIO		wet cup
11/5	Mladějov 1	PRIR		wet cup
11/10 B	Mladějov 2	SPOD		wet cup
11/9	Mladějov 1	PRIR	voštiny	wet cup
954/2	Malobratřice 1	PRIR	hrubozrnné	wet cup
11/8	Mladějov 1	PRIR	voštiny	wet cup
955/2	Malobratřice 2	PRIR	hrubozrnné	wet cup
11/3	Malobratřice 2	PRIR	hrubozrnné	wet cup
9/53	Střeleč 1 - břehule	BIO		wet cup
9/44	Střeleč 1 - břehule	BIO		nasákavost
9/4	Mladějov 1	PRIR		nasákavost
9/5	Mladějov 1	PRIR		nasákavost
9/32	Střeleč 3 - břehule	BIO		nasákavost
9/29	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		nasákavost
9/28	Střeleč 1 - PP pod závodem	PP+BIO		nasákavost
11/54	Drábovna	PRIR	solná eroze	nasákavost
9/22A	Střeleč 1 - PP nad odkalištěm	PP+BIO		nasákavost
9/22B	Střeleč 1 - PP nad odkalištěm	SPOD		nasákavost
955/1	Malobratřice 2	PRIR	hrubozrnné	nasákavost
9/6	Mladějov 1	PP+PRIR		nasákavost

Mapu lokalit uvádím na obrázcích Obr. 3.3.1. – Obr. 3.3.5, nadmořské výšky lokalit a GPS souřadnice jsem odečetl z topografické mapy <http://www.mapy.cz/>.

3.3.1. Lom Střeleč

Vzorky byly odebírány z lomu Střeleč, který se nachází v Českém ráji cca 3 km JJV od hradu Trosky a 1,5 km SV od obce Mladějov. Lokalita je výjimečná tím, že na poměrně malém prostoru nabízí více druhů materiálu z různých hloubek.

Na území lomu dosahuje mocnost hruboskalských pískovců 85 m, jeho vrstevní plochy se pod úhlem 5-10° uklánějí směrem k JZ, přičemž svrchní část, jejíž mocnost odhaduje Uličný (2001) na 40 m, je tvořena třemi tělesy hrubozrnných delt se šikmým zvrstvením uklánějícím se v úhlu 4-18°. Sediment

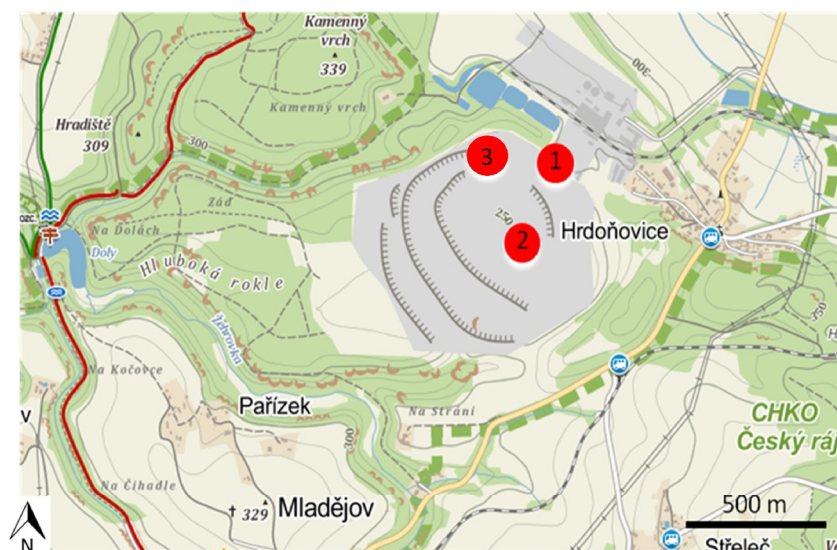
je jemně až středně zrnitý a tvoří subhorizontálně uložené těleso v nadmořské výšce 240-310 m.n.m. (Uličný 2001, Klein a Tajovský 1990).

Studovány byly především: 1) pískovce z vertikální puklinové plochy s biokrustou (vzorky poté označovány zkratkou PPx, kde x značí pořadové číslo odebrání vzorku) odpovídající nově pozorovanému způsobu zpevnění povrchu (Bruthans et al. 2013, viz kapitola 3.2), a 2) bílé pískovce tzv. sklářské polohy, nacházející se v nejbližším okolí čerpací stanice lomu Střeleč, na horizontálním povrchu s biokrustou. Tyto vzorky jsou označovány ČERx. Tento materiál byl podrobně zkoumán již v předchozích pracích (Schweigstillová et al. 2013, Bruthans et al. 2013, Soukup et al. 2013). Opál, karbonáty ani Fe hydroxidy nebyly u bílých pískovců zjištěny, soudržnost křemenných zrn tak způsobuje kaolinit (Schweigstillová et al. 2013). Krusta má póry vyplněny také především kaolinitem, pozorována byla i houbovitá vlákna lišejníků z příbuzenstva rodů *Coccomyxa* a *Staurastrum* (Schweigstillová et al. 2013). Tento pískovec je erodovatelný proudící vodou (Bruthans et al. 2012).

Infiltračními zkouškami byla Soukupem et al. (2013) stanovena vertikální hydraulická vodivost těchto pískovců na 1.10^{-4} m/s.

Vzorky z dílčích lokalit Střeleč 1 a Střeleč 2 jsou odebrány z poloh sklářských pískovců, pouze vzorky z lokality Střeleč 3 jsou slévárenské pískovce.

Lokalizaci odebraných vzorků uvádím v obrázku Obr. 3.3.1.



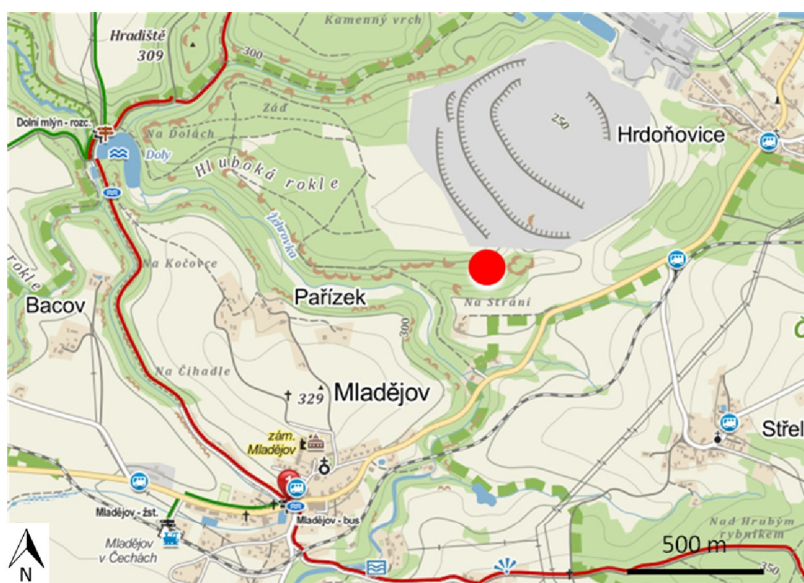
Obr. 3.3.1. Místa odběru vzorků z lomu Střeleč. Odlišují od sebe pískovce z vertikální puklinové plochy s biokrustou (číslo 1), pískovce z horizontálního povrchu s biokrustou v nejbližším okolí čerpací stanice (číslo 2) a tzv. slévárenské pískovce (číslo 3).

Průměrný lokální srážkový úhrn je 590 mm za rok (Nadrchal a Smutek 2007).

3.3.2. Lokalita Mladějov 1

Touto lokalitou označuji pískovcové stěny v nejbližším okolí lomu Střeleč, cca 1 km JZ od vrátnice lomu a 900 m SV od obce Mladějov, jak znázorňuje Obr. 3.3.2. Nadmořská výška těchto výchozů je cca 280 m. n. m.

Vyskytují se zde přírodní výchozy odpovídající pískovcům v lomu, konkrétně jde o jemně až hrubě zrněné pískovce turonského až coniackého stáří (Uličný 2001). Některé stěny jsou pokryty solemi či voštinami, nacházejí se zde také otevřené pukliny. Lokalita je v lese, zastíněná stromy. Je tedy vhodná ke studiu mikroklimatu běžných území skalních měst, ve kterých výrazně převládají zalesněné plochy, nízký sluneční osvit a vysoká relativní vlhkost vzduchu. Ačkoliv jde o přírodní výchozy, lokalita se nachází v dobývacím území lomu. Z této lokality jsem odebral pískovcová jádra ke tvorbě tablet a také jsem zde měřil hodnoty evapotranspirace. Měření bylo doplněno umístěním čidla zaznamenávajícím RH a T.



Obr. 3.3.2. Umístění lokality Mladějov 1.

Průměrný lokální srážkový úhrn je 590 mm za rok (Nadrchal a Smutek 2007).

3.3.3. Lokalita Mladějov 2

Tato lokalita je od předchozí vzdálena cca 850 m SZ směrem, od vrátnice lomu poté asi 1,6 km JZ směrem, jak je znázorněno na obrázku Obr. 3.3.3. Oblast se nachází v nadmořské výšce cca 281 m. n. m.

Nachází se zde přírodní výchozy turonských až coniackých hrubě zrnitých pískovců teplického souvrství (Uličný 2001). Tato oblast byla v nedávné minulosti vykácena, čímž vznikla rozsáhlá mýtina, což mělo za následek odumírání mechů a lišejníků, kterými byl dříve pokryt povrch pískovce. Z důvodu vysokého slunečního osvitu a očekávané nižší vlhkosti vzduchu jsem tuto lokalitu z hlediska mikroklimatu vybral jako kontrastní k Mladějovu 1. Z této lokality jsem odebral pískovcová jádra ke

tvorbě tablet a také jsem zde měřil hodnoty evapotranspirace. Měření bylo doplněno umístěním čidla zaznamenávajícím RH a T.



Obr. 3.3.3. Umístění lokality Mladějov 2.

Průměrný lokální srážkový úhrn je cca 590 mm za rok (Nadrchal a Smutek 2007).

3.3.4. Lokality Malobratřice 1 a Malobratřice 2

Studovaná lokalita Malobratřice 1 se nachází cca 400 m severně od obce Malobratřice. Malobratřice 2 se nachází přibližně 60 m SV směrem od první lokality. Polohu obou lokalit uvádím v obrázku Obr. 3.3.4. Nadmořská výška těchto lokalit je 285-290 m. n. m.

Jedná se o přírodní výchozy bělošedých křemenných pískovců coniackého stáří (odečteno z GEOLMAPA 2014).

Lokalita Malobratřice 1 je pokryta mechy, lokalita Malobratřice 2 je zajímavá díky hrubozrnným pískovcům, na jejichž povrchu se vyskytují voštiny a sole. Hrubozrnné pískovce této lokality jsem zvolil především ke zjištění, zda odlišná litologie má vliv na studované parametry.



Obr. 3.3.4. Umístění lokalit Malobratřice 1 (označeno číslem 1) a Malobratřice 2 (označeno číslem 2).

Na těchto lokalitách jsem měřil hodnoty evapotranspirace a byla zde umístěna čidla zaznamenávající RH a T.

3.3.5. Lokalita Drábovna

Tato lokalita je vzdálena přibližně 600 m JZ směrem od osady Záborčí a 350 m SZ směrem od autobusové zastávky Křížky, jak naznačuje mapa Obr. 3.3.5. Nadmořská výška lokality je 420-430 m. n. m.

Materiál na této lokalitě je tvořen jemně až hrubě zrnitými pískovci coniackého stáří (GEOLMAPA 2014). Stěny jsou hojně pokryty solemi a v některých polohách jsou výrazně vyvinuty voštiny. Nachází se zde také jeskyně Tří postav o délce několika metrů. Jeskyně byla zvolena jako studované místo z toho důvodu, že jsem v ní očekával velmi nízké hodnoty výparu. Naopak vyšší hodnoty výparu jsem předpokládal pod převisem vystupujícím před okolní povrch pískovce, který je vyvinut ve stejném materiálu o několik metrů dále SZ směrem. Zejména v podzimním a zimním období, kdy na vegetaci nejsou listy, je na Drábovně pozorovatelný relativně intenzivní pohyb vzduchu (široké otevřené údolí Jizery).



Obr. 3.3.5. Umístění studované lokality Drábovna.

Na této lokalitě jsem měřil hodnoty evapotranspirace a své měření jsem doplnil umístěním čidla zaznamenávajícím RH a T.

3.4. Charakterizace skalních kůr pomocí drilling resistance

Využití speciální vrtací techniky nazývané drilling resistance (dále DR) je téměř nedestruktivní metoda testování odporu materiálu vůči vrtání, což je proxy pro odolnost vůči oděru a pro pevnost materiálu. Vývoj odporu při vrtání s hloubkou je zaznamenán v grafu (tzv. DR profil), kde na horizontální ose figuruje odolnost, která je dána množstvím vteřin potřebných na vyvrtání jednoho milimetru [s/mm], na vertikální ose je hloubka od podstavy vzorku [mm]. DR profily tak nabízejí s velmi detailním rozlišením pohled na změny v odolnosti materiálu vlivem zvětrávání či dalších vlivů (Siedel a Siegesmund 2011).

Hodnoty získané pomocí DR jsou bezrozměrné a nedají se srovnat s „klasickou“ definicí pevnosti, nicméně DR je kontrolováno pevností materiálu, jak bylo dokázáno velkým množstvím korelací (Pamplona et al. 2007).

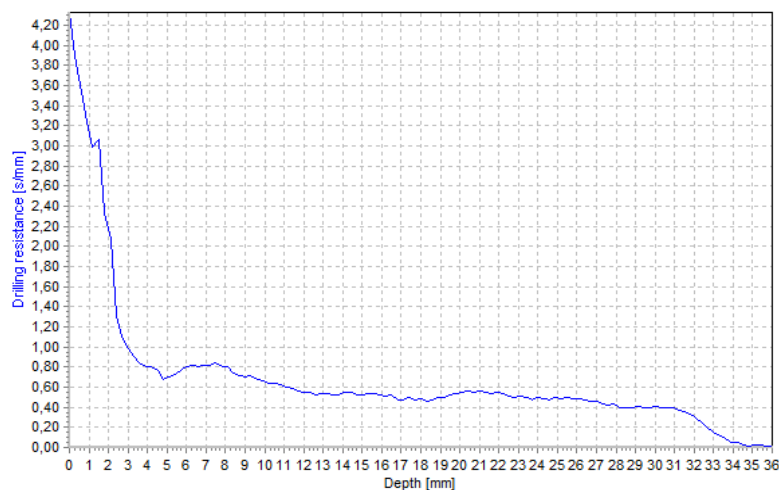
Pokud je pevnost materiálu u povrchu snížena vlivem zvětrání, hodnota DR se s hloubkou návrtu zvyšuje a z mocnosti úseku, ve kterém narůstá odpor při vrtání, lze určit mocnost zvětralé zóny. Naopak přítomnost skalní kůry způsobuje výrazně vyšší odpor a tedy nižší rychlost vrtání na počátku (Cnudde a et al. 2009, Siedel a Siegesmund 2011). Z mocnosti zóny o vyšším odporu lze objektivně stanovit mocnost skalní kůry.

Pokud hornina není zvětralá na jednotlivá zrna, ale rozpadá se na šupiny či úlomky (v angličtině flaking – malé šupiny, nebo contour scaling – větší úlomky), které si udržují víceméně původní pevnost, projeví se to při vrtání prudkými poklesy vrtného odporu k 0 v místech, kde vrták prochází okrajem šupin či úlomků, a poté opět dochází ke skokovému navýšení hodnoty (Siedel a Siegesmund 2011).

Pro studované lokality bylo R. Fabešem a J. Válkem metodou DR navrtáno několik reprezentativních vzorků pomocí odporové vrtačky Tersis2 od firmy Geotron Elektronik. Pro vrtání bylo použito vrtáku č. 3, PROFI LINE do betonu a kamene od firmy Vrbovský, který byl dle opotřebenosti pravidelně vyměňován. Nastavení tlaku pro vrtání bylo závislé na odolnosti a tvrdosti jednotlivých vzorků. Použité nastavení tlaku bylo 87 mBar, 136 mBar, 186 mBar a 287 mBar. Vzorky byly vysušené, bez známky vlhkosti. Měření probíhalo ve standardním laboratorním prostředí při teplotě 20-22 °C a relativní vlhkosti vzduchu 55-60 %.

Jako ukázkou vývoje odolnosti studovaných materiálů do hloubky (dále DR profil) uvádím grafy Obr. 3.4.1. (Střeleč 1 - PP pod závodem), Obr. 3.4.2. (Zbiroh – erodabilní povrch), Obr. 3.4.3 (Střeleč 1 - břehule, erodabilní povrch). Z těchto grafů je patrná mocnost krusty, pokud se na vzorku vyskytuje, a také poměr odolností krusty a podloží, resp. zvětralé přípovrchové zóny a podloží.

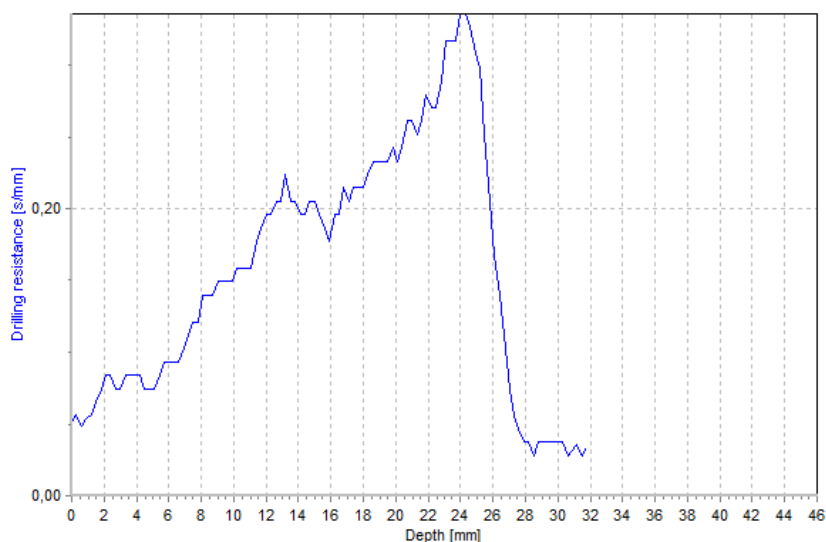
Z Obr. 3.4.1. je vidět, že materiály z lokality Střeleč 1 – PP pod závodem mají krustu mocnou 2 mm a krusta dosahuje 6x vyšší odolnosti než podloží. V hloubce 34 mm již byla navrtána spodní podstava vzorku.



Obr. 3.4.1. DR profil materiálu Střeleč 1 – PP pod závodem pomocí metody DR.

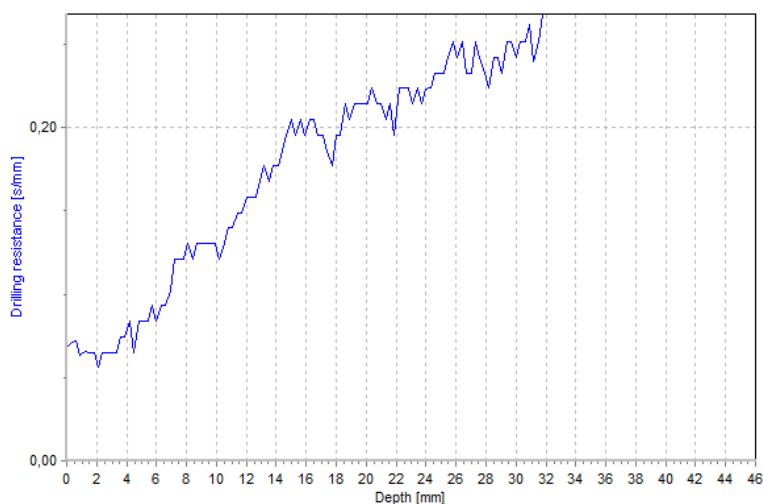
Vertikální osa uvádí odolnost [s/mm], horizontální hloubku [mm].

Z grafu Obr. 3.4.2. je zřejmé, že u materiálu z lokality Zbiroh – erodabilní povrch není přítomna krusta a odolnost materiálu směrem do hloubky roste (na spodní podstavě vzorku byla odolnost cca 3x vyšší než u povrchu). Jedná se tak o materiál s erodabilním povrchem. V hloubce 26 mm již byla navrtána spodní podstava vzorku, odpor proti vrtání tak v celém DR profilu stoupá.



Obr. 3.4.2. DR profil materiálu Zbiroh (erodabilní povrch) pomocí metody DR.
Vertikální osa uvádí odolnost [s/mm], horizontální hloubku [mm].

Krusta není přítomna ani u materiálu z lokality Střeleč 1 – břehule, erodabilní povrch (Obr. 3.4.3.). Odpor proti vrtání se zvyšuje v celém DR profilu, nejvyšší hodnota DR je cca 3,2x vyšší než nejnižší hodnota DR u povrchu vzorku. Jedná se tak o materiál s erodabilním povrchem.



Obr. 3.4.3. DR profil materiálu Střeleč 1 – břehule, erodabilní povrch, pomocí metody DR. Vertikální osa uvádí odolnost [s/mm], horizontální hloubku [mm].

Pro ostatní lokality uvádím mocnost krusty (resp. zvětralé zóny) a poměr odolností v tabulce Tab. 3.3.1.

3.5. Další poznatky o studovaných materiálech

Důležitou charakteristikou studovaných materiálů je nasycená hydraulická vodivost, kterou v rámci své bakalářské práce zjišťovala A. Kobrlová na pískovcových jádrech odebíraných ze stejné zájmové

oblasti. Hydraulická vodivost studovaných materiálů se pohybuje od $3 \cdot 10^{-6}$ do $8 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Kobrllová 2014).

Objemová hmotnost vzorků ČERx je v průměru $1,86 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, objemová hmotnost vzorků PPx je v průměru $1,92 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (Sommerová 2014).

Velice důležitým parametrem je také objemová vlhkost porézního prostředí lokalit, na kterých jsem zjišťoval hodnoty výparu. Tuto vlhkost v rámci své diplomové práce (zatím v přípravě) metodou TDR (zkratka z anglického Time Domain Reflectometry) zjišťovala E. Svobodová a její dosavadní výsledky uvádím v tabulce Tab. 3.5.1. Tato měření probíhala od 19. listopadu 2013 do 16. května 2014 s nekonstantním krokem měření v řádu týdnů, v tabulce uvádím jejich průměr.

Tab. 3.5.1. Průměrné hodnoty objemové vlhkosti porézního prostředí jednotlivých lokalit (Svobodová b. r.).

lokality	Drábovna	Drábovna, jeskyně	Malobratřice 1	Malobratřice 2	Mladějov 1	Mladějov 2
vlhkost [%]	6	10	5	7	4	5

Z odebraných vrtných jader zjišťovala A. Sommerová gravimetrickou metodou (měřením změny hmotnosti) vlhkost vzorků ČERx a PPx in situ. Průměrná přirozená hmotností vlhkost θ vzorků ČERx byla $1,85\% \pm 0,85$ (7 měření v září 2013), resp. $2,83\% \pm 0,82$ (9 měření v listopadu 2013). Průměrná vlhkost vzorků PPx byla $0,90\% \pm 0,39$ (39 měření v průběhu celého roku 2013) (Sommerová 2014).

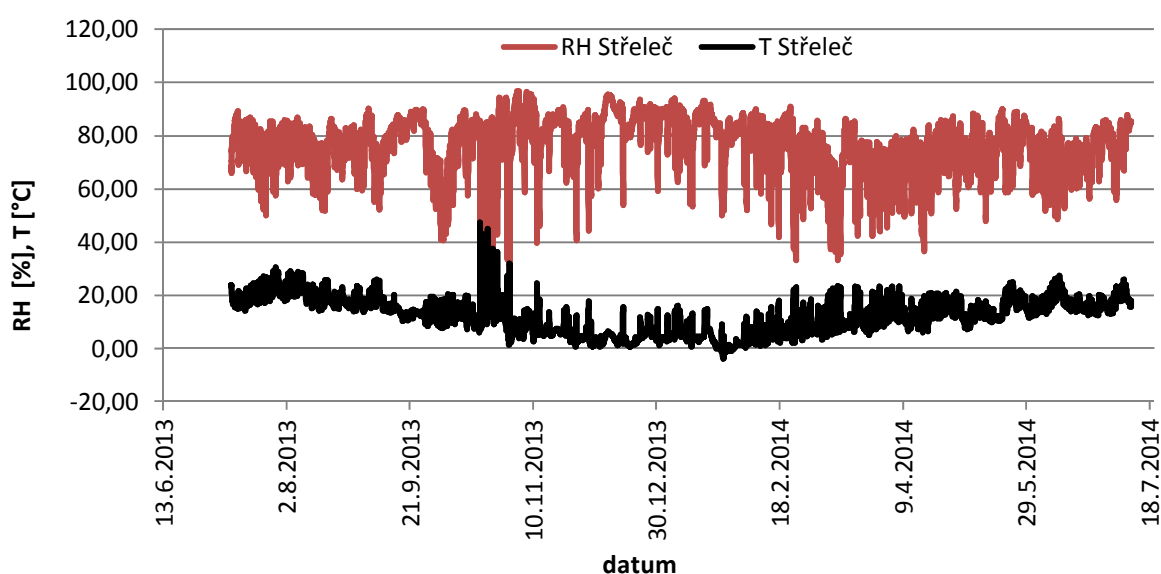
4. VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1. Rozdíly v klimatu napříč lokalitami a jejich vývoj

Od července 2013 jsem na lokality umíšťoval čidla s datalogery zaznamenávající relativní vlhkost vzduchu a teplotu s krokem 30 minut. Tuto kapitolu dělím na podkapitoly podle lokalit, a to ve stejném pořadí jako v kapitole 3.3.

4.1.1. Lom Střeleč

Čidlo jsem umístil v lomu Střeleč na podlokalitě Střeleč 1 (viz. kapitola 3.3.1) ve výšce cca 1,5 m nad terénem. Toto místo není chráněno stromy před slunečním osvitem, ale je v převisu. Stěna, do které jsem čidlo umístil, je orientována na jihozápad. Nejprve uvádím kontinuální záznam měření RH a T (Obr. 4.1.1a.), poté se podrobněji věnuji časové řadě.



Obr. 4.4.1a. Kontinuální záznam RH (na grafu červeně) a T (na grafu černě) z lokality Střeleč.

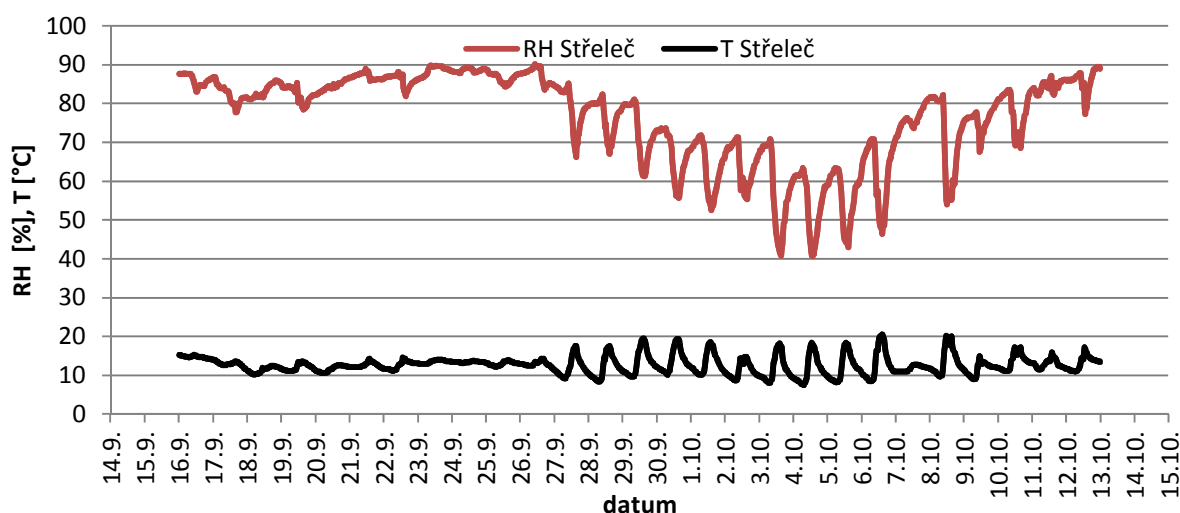
Z celkového počtu 17523 záznamů jsem zjistil, že od 10. července 2013 do 10. července 2014 byla na lokalitě Střeleč průměrná relativní vlhkost vzduchu 77 % a průměrná teplota vzduchu 12 °C (Tab. 4.1.1.). Nejnižší teplota byla -3,8 °C (dosaženo 26. ledna 2014), nejvyšší naopak 47,4 °C (dosaženo 19. října 2013) (Tab. 4.1.1.). V případě teploty 47 °C se nejedná o jednorázovou chybu měření, protože podobně vysoké teploty bylo dosaženo ve čtyřech po sobě jdoucích dnech vždy kolem poledne, a jedná se tedy o vliv rozpáleného povrchu pískovce slunečním osvitem. Při zanedbání takto vysokých teplot z října se nejvyšší hodnoty pohybovaly okolo 26-28 °C, a to zejména v červnu 2014.

Nejnižší relativní vlhkost vzduchu byla 21,1% (dosaženo 19. října 2013, vliv rozpáleného povrchu pískovce viz diskuze výše), nejvyšší 96,8 % (dosaženo 4. listopadu 2013) (Tab. 4.1.1.). Při zanedbání říjnových nízkých hodnot RH se nejnižší hodnoty relativní vlhkosti vzduchu pohybovaly okolo 33-35 %, a to zejména v únoru a březnu.

Tab. 4.1.1. Průměrné, minimální a maximální hodnoty RH a T na lokalitě Střeleč od července 2013 do července 2014.

Střeleč	počet měření	průměr	min	max	variabilita
T [°C]	17523	11,8	-3,8	47,4	51,2
RH [%]	17523	77,1	21,1	96,8	75,7

Při vyhodnocování dat jsem si povšiml krátkých úseků, ve kterých dochází v řádu prvních dnů k výraznému snížení hodnoty RH (Obr. 4.1.1b.). Tyto úseky označuji jako tzv. „dobu vysychání“ a jsou způsobeny dlouhodobým obdobím bez deště. Kvůli nim vysychá porézní pískovcové prostředí a také se snižuje relativní vlhkost vzduchu v těsném okolí povrchu pískovce. S příchodem srážky se poté hodnota RH opět navyšuje. Konkrétně na lokalitě Střeleč došlo během cca 8 dnů ke snížení hodnoty RH o 50 % a poté, s příchodem deště, došlo během 4 dnů k nárůstu RH na původní hodnotu (Obr. 4.1.1b.). Na tomto grafu je také patrné denní kolísání teploty a relativní vlhkosti vzduchu.

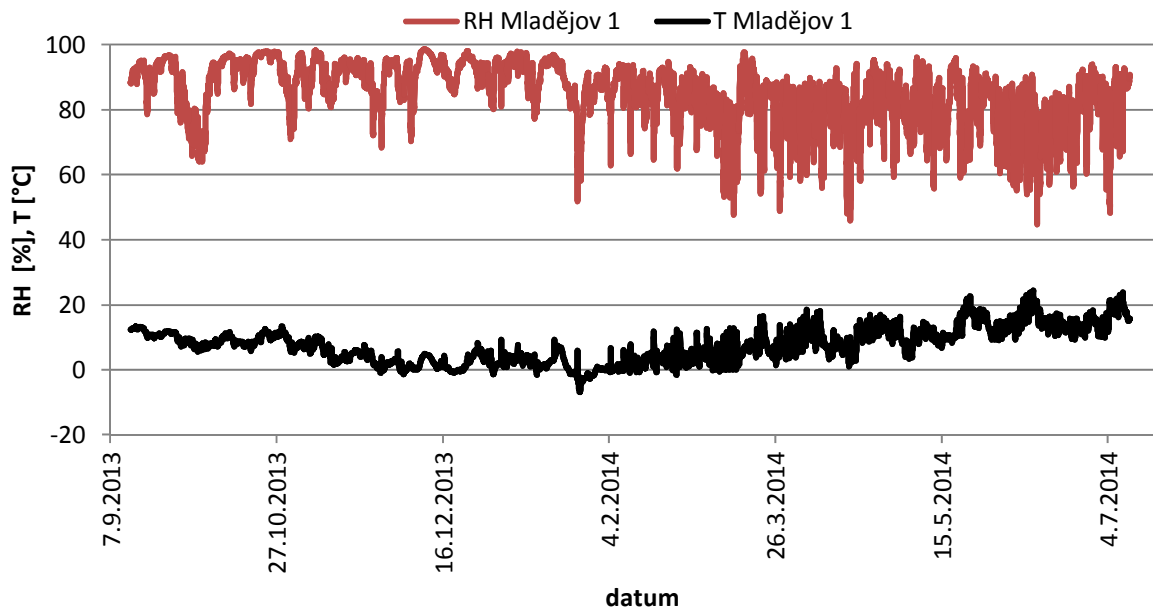


Obr. 4.1.1b. Patrný několik dní trvající poklesový trend RH, tzv. doba vysychání, od 26.9. do 4.10. 2013. S příchodem deště se RH opět zvyšuje na původní hodnotu.

Jelikož se jedná o kontinuální měření po celý kalendářní rok, získané údaje dobře charakterizují sezónní výkyvy v RH a T.

4.1.2. Mladějov 1

Čidlo jsem na této lokalitě, která je od slunečního svitu chráněna stromy, umístil do výšky cca 3 m nad terénem do silně zvětralého pískovce vystupujícího před okolní povrch výchozu. Nejdříve uvádím kontinuální záznam měření (Obr. 4.1.2a.) a poté se věnuji časové řadě podrobněji.



Obr. 4.1.2a. Kontinuální záznam RH (na grafu červeně) a T (na grafu černě) z lokality Mladějov 1.

Z celkového počtu 14427 bodů měření vyplývá, že od 13. září 2013 do 10. července 2014 byla na lokalitě Mladějov 1 průměrná relativní vlhkost vzduchu 85 % a průměrná teplota vzduchu 7 °C (Tab. 4.1.2.). Nejnižší teplota byla -6,9 °C (dosaženo 26. ledna 2014), nejvyšší naopak 24,5 °C (dosaženo 11. června 2014) (Tab. 4.1.2.). Nejnižší relativní vlhkost vzduchu za sledované období byla 44,7 % (dosaženo 12. června 2014), nejvyšší 98,6 % (dosaženo 10. prosince 2013) (Tab. 4.1.2.). Jelikož se jedná o kontinuální měření téměř po celý kalendářní rok, získané údaje poměrně dobře charakterizují sezónní výkyvy v RH a T.

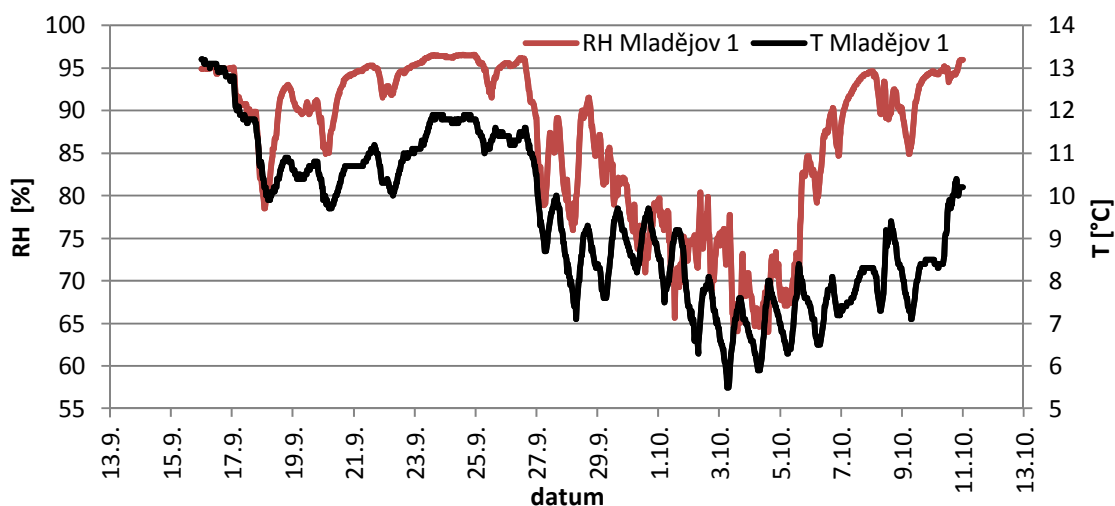
Z měsíců, které jsem svým měřením postihl celé, byl nejchladnějším měsícem leden (průměrná teplota 1,4 °C), naopak nejteplejším měsícem byl červen (průměrná teplota 14,8 °C). Nejvyšší relativní vlhkost vzduchu byla v prosinci 2013 (průměr 92 %), nejnižší naopak v červnu 2014 (průměr 76 %). Průměrná relativní vlhkost vzduchu byla v měsících prosinec až únor okolo 90 %, v dubnu však pouze 80 % a nadále se snižovala (Obr. 4.1.2.).

Tab. 4.1.2. Průměrné, minimální a maximální hodnoty RH a T na lokalitě Mladějov od září 2013 do července 2014.

Mladějov 1	počet měření	průměr	min	max	variabilita
T [°C]	14427	7,4	-6,9	24,5	31,4
RH [%]	14427	85,4	44,7	98,6	53,9

Již z Obr. 4.1.2a. je patrný náhlý pokles RH cca od 25.9. do 5.10. 2013, který je způsoben tzv. „dobou vysychání“. Detailně se tomuto problému věnuji v grafu Obr. 4.1.2b., ze kterého je vidět, že během 10 dnů došlo k poklesu RH o cca 30 % a poté se s příchodem deště relativní vlhkost vzduchu během 2 dnů vrátila na původní hodnotu. Doba vysychání z lokality Mladějov 1 (Obr. 4.1.2b.) přesně kopíruje dobu vysychání z lokality Střeleč (Obr. 4.1.1b.). Obě lokality jsou od sebe vzdáleny asi 800 m.

Podobná doba vysychání postihla lokalitu Mladějov 1 během mých měření vícekrát.



Obr. 4.1.2b. Patrný několik dní trvající poklesový trend RH, tzv. doba vysychání, od 25.9. do 5.10. 2013. S příchodem deště se RH opět zvyšuje na původní hodnotu.

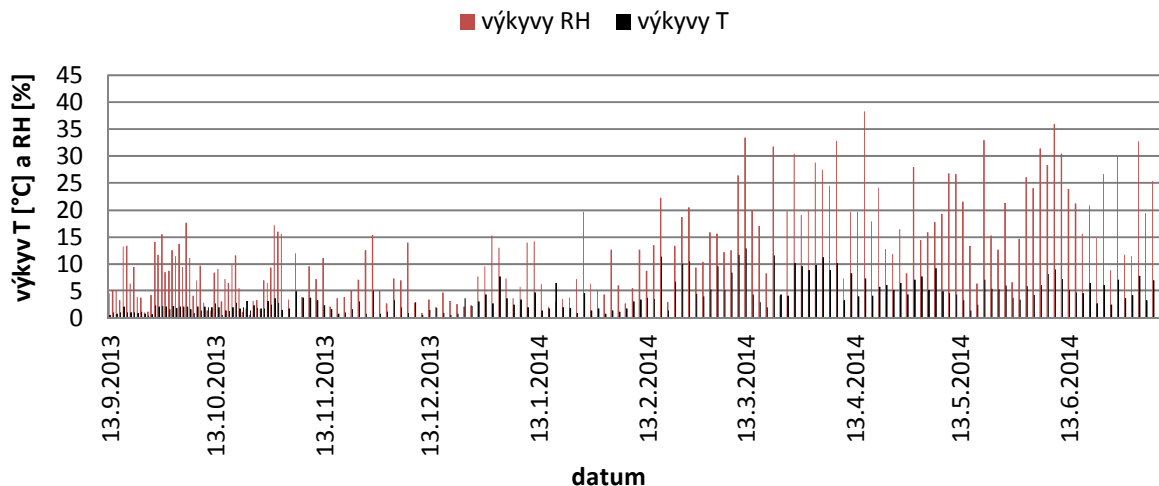
Jelikož jsem lokality Mladějov 1 (zalesněné území) a Mladějov 2 (osluněná mýtina) vybral jako kontrastní vůči sobě, věnuji se u těchto lokalit detailně také denním výkyvům v RH a T a jejich vývoji v průběhu roku (Tab. 4.1.3.). Denní výkyvy v teplotě se na lokalitě Mladějov 1 pohybují od 0,4 do 14 °C, denní výkyvy v relativní vlhkosti vzduchu jsou od 0,3 do 39,9 % (Tab. 4.1.3.).

Rozdíly mezi lokalitami Mladějov 1 a Mladějov 2 diskutuji na konci kapitoly 4.1. U ostatních lokalit se již denním výkyvům detailně nevěnuji.

Tab. 4.1.3. Denní výkyvy teploty a relativní vlhkosti vzduchu a jejich vývoj v průběhu roku (Mladějov 1).

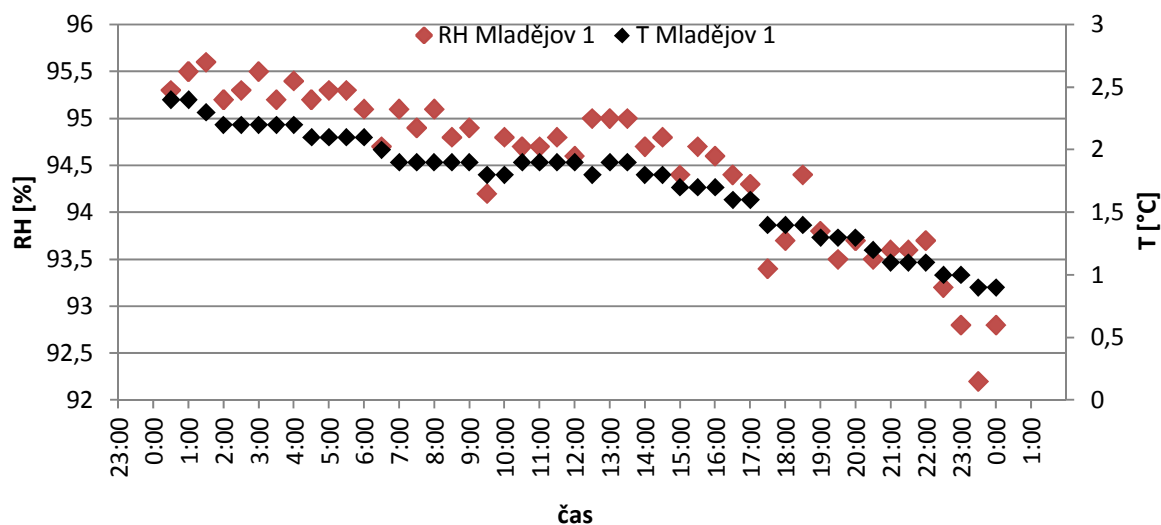
měsíc	Denní výkyvy T [°C]	Denní výkyvy RH [%]
září	0,4 - 2,3	0,9 - 15,5
říjen	0,5 - 3,6	0,5 - 17,6
listopad	0,8 - 5,0	2,1 - 22,0
prosinec	0,5 - 6,4	0,3 - 23,0
leden	0,6 - 12,0	1,2 - 30,7
únor	0,4 - 14,0	2,7 - 24,1
březen	1,7 - 12,9	4,1 - 33,4
duben	2,6 - 12,0	7,3 - 38,3
květen	1,3 - 9,2	4,7 - 32,9
červen	2,3 - 9,0	9,4 - 39,9
červenec	3,3 - 9,9	6,2 - 38,2

Protože se z grafu Obr. 4.1.2a. zdálo, že se denní výkyvy od počátku měření zvyšují (zvyšující se rozptyl dat), vytvořil jsem ještě graf s hodnotami denních výkyvů RH a T (Obr. 4.1.3.), který mou domněnku potvrdil. Zejména od února se na lokalitě Mladějov 1 rapidně zvyšoval výkyv denních teplot a relativní vlhkosti vzduchu.

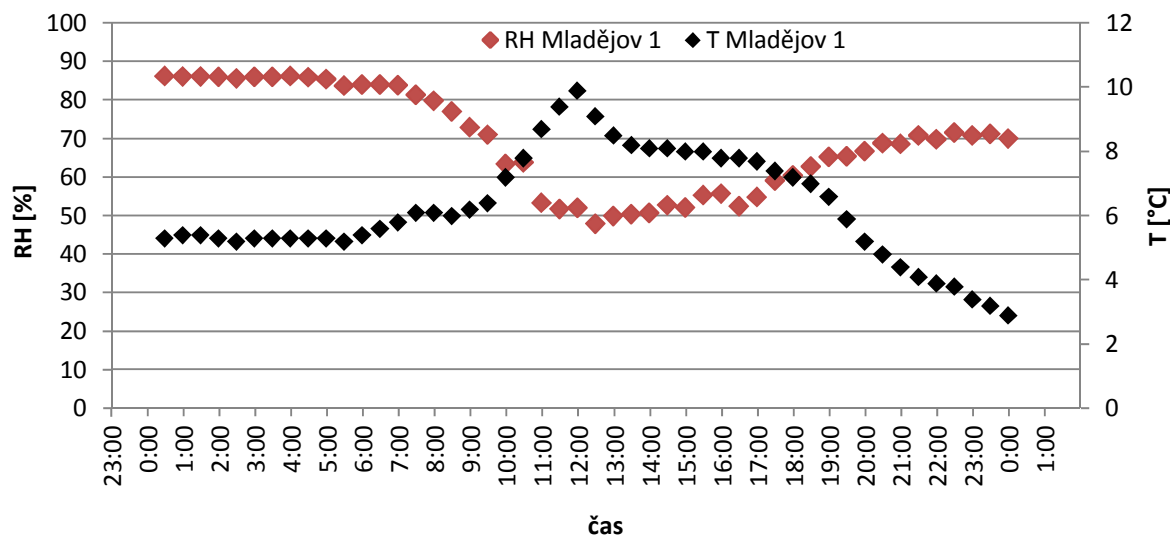


Obr. 4.1.3. Vývoj denních výkyvů RH (červeně) a T (černě) na lokalitě Mladějov 1. Zejména od února se rapidně zvyšuje výkyv obou hodnot během dne.

Rozdílný vývoj teploty a relativní vlhkosti vzduchu v průběhu dne je vidět ve dnech 13. prosince 2013 (malý výkyv hodnot, Obr. 4.1.4a.) a 16. dubna 2014 (velký výkyv hodnot, Obr. 4.1.4b.). V prvním případě je snižující se trend obou hodnot způsoben příchodem studené fronty, ve druhém případě se hodnoty v průběhu dne vyvíjí v závislosti na slunečním osvětlení.



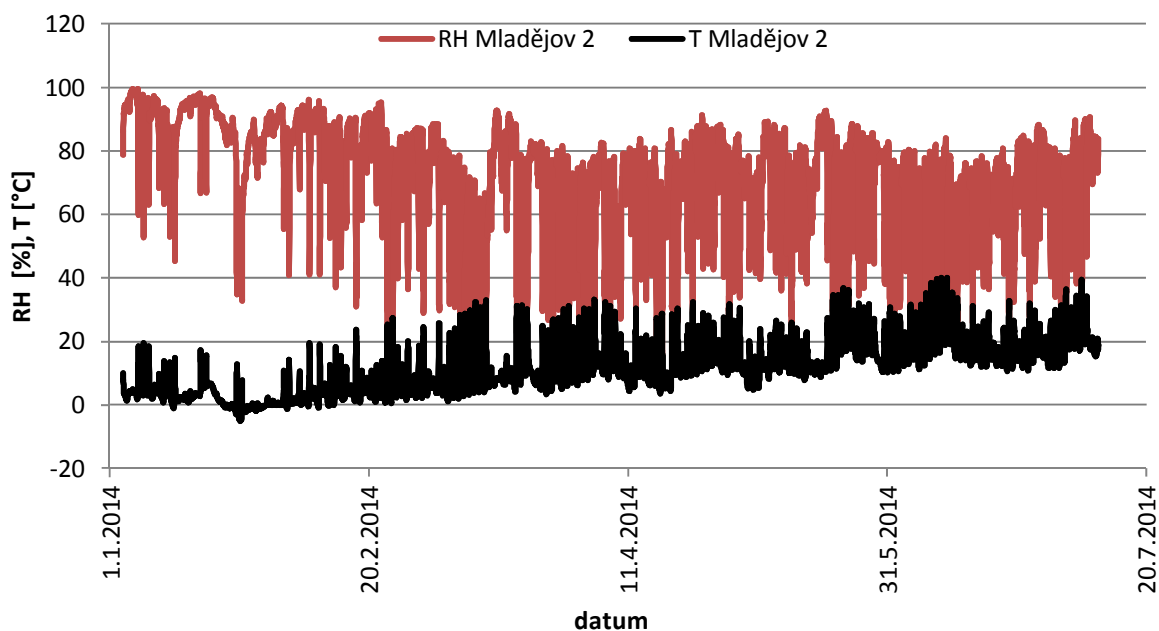
Obr. 4.1.4a. Průběh teploty a relativní vlhkosti vzduchu na lokalitě Mladějov 1 z 13. prosince 2013. Jedná se o období, ve kterém docházelo k ochlazení.



Obr. 4.1.4b. Průběh teploty a relativní vlhkosti vzduchu na lokalitě Mladějov 1 z 16. dubna 2014. Okolo poledních hodin je vidět silný vliv slunečního osvětlení.

4.1.3. Mladějov 2

Čidlo jsem na této lokalitě umístil do výšky cca 3 m od úrovně terénu. Toto místo není před slunečním zářením chráněno stromy. Nejprve uvádím kontinuální záznam (Obr. 4.1.5a.), poté se detailněji věnuji časové řadě.



Obr. 4.1.5a. Kontinuální záznam RH (na grafu červeně) a T (na grafu černě) z lokality Mladějov 2.

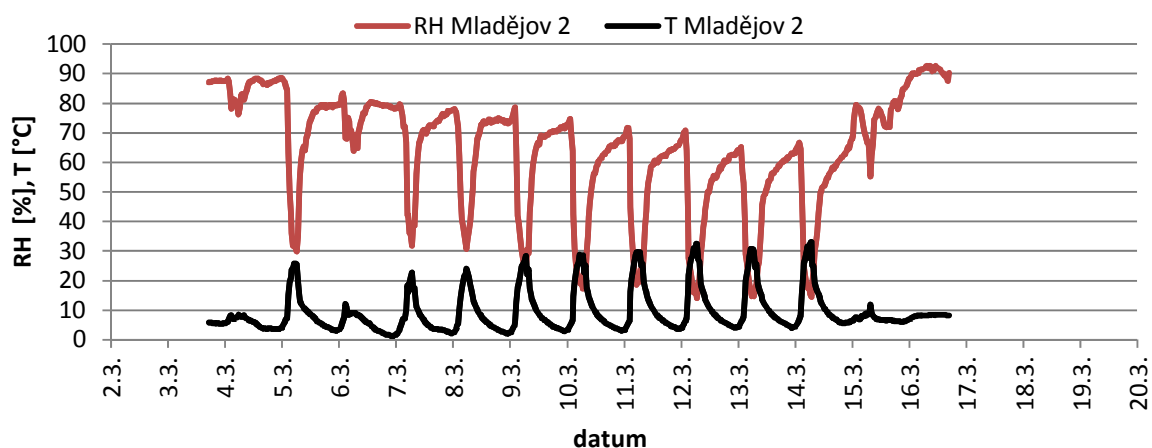
Z celkového počtu 9033 měření vyplývá, že od 3. ledna 2014 do 10. července 2014 byla na lokalitě Mladějov 2 průměrná relativní vlhkost vzduchu 73 % a průměrná teplota vzduchu 11,1 °C (Tab. 4.1.4.). Nejnižší zaznamenaná teplota byla -5,0 °C (dosaženo 26. ledna 2014), nejvyšší 40,1 °C (dosaženo 11. června 2014) (Tab. 4.1.4.). Nejnižší relativní vlhkost vzduchu za sledované období byla 14 % (dosaženo 12. března 2014), nejvyšší 99,5 % (dosaženo 5. ledna 2014) (Tab. 4.1.4.).

Z měsíců, které jsem svým měřením postihl celé (v lednu jsem začal měřit až třetí den měsíce, ztrátu předchozích dvou dnů zanedbávám), byl nejchladnějším měsícem leden (průměrná teplota 2,8 °C) a nejteplejším měsíc červen (průměrná teplota 18,2 °C). Nejnižší relativní vlhkost vzduchu byla v červnu (průměr 64,4 %), nejvyšší v lednu (průměr 87,7 %). Průměrná relativní vlhkost vzduchu byla v měsících leden až únor 82-88 %, od března do června byla nižší, s průměrnými hodnotami 64-71 % (Obr. 4.1.5a.).

Tab. 4.1.4. Průměrné, minimální a maximální hodnoty RH a T na lokalitě Mladějov 2 od ledna 2014 do července 2014.

Mladějov 2	počet měření	průměr	min	max	variabilita
T [°C]	9033	11,1	-5,0	40,1	45,1
RH [%]	9033	73,0	14,0	99,5	85,5

Také na lokalitě Mladějov 2 jsou patrné tzv. „doby vysychání“, nejpatrnější je v období od 4. března do 16. března (Obr. 4.1.5b.), kdy během 9 dnů RH klesá o cca 20 % a poté se v průběhu 3 dnů vrací na původní hodnotu. Na tomto grafu je také dobře patrné denní kolísání RH a T (viz níže).



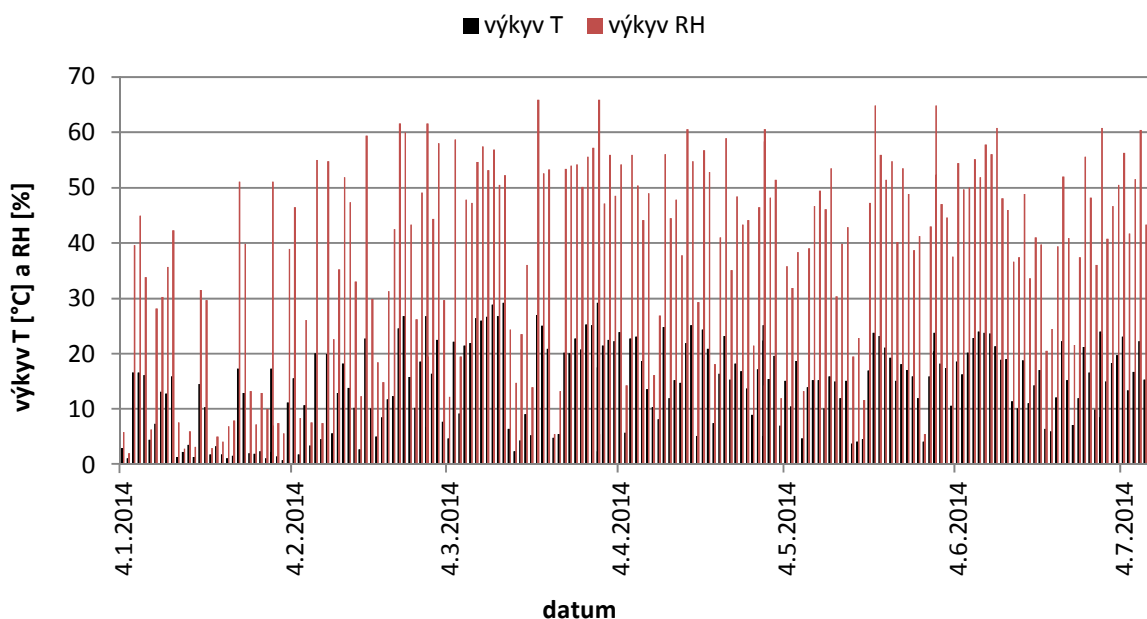
Obr. 4.1.5b. Patrný pokles RH, tzv. doba vysychání, od 5.3. do 13.3. 2014. S příchodem deště se RH opět zvyšuje na původní hodnotu.

Denní výkyvy v teplotě se na lokalitě Mladějov 2 pohybují od 0,7 do 29,2 °C, denní výkyvy v relativní vlhkosti vzduchu jsou od 2,0 do 65,8 % (Tab. 4.1.5.).

Tab. 4.1.5. Denní výkyvy teploty a relativní vlhkosti vzduchu a jejich vývoj v průběhu roku (Mladějov 2).

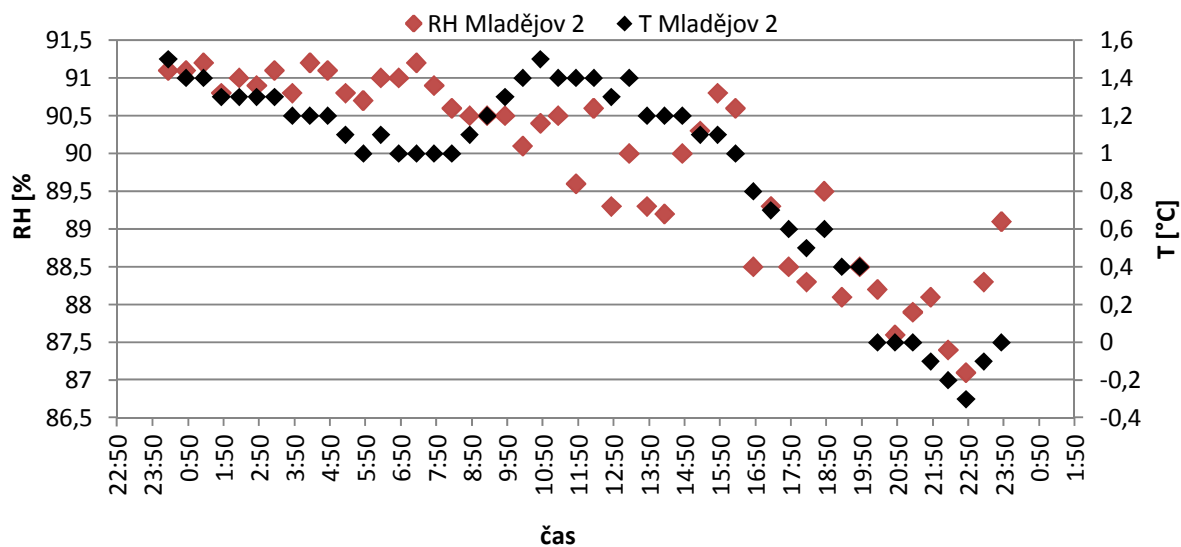
měsíc	Denní výkyvy T [°C]	Denní výkyvy RH [%]
leden	1,1 - 17,3	2,0 - 51,1
únor	0,7 - 26,8	5,6 - 61,6
březen	2,4 - 29,2	5,5 - 65,8
duben	5,1 - 25,2	14,3 - 60,5
květen	3,8 - 23,8	5,5 - 64,8
červen	5,9 - 24,0	20,5 - 60,7
červenec	5,3 - 23,1	11,5 - 60,4

Z grafu s hodnotami denních výkyvů RH a T (Obr. 4.1.6.) je patrné, že zhruba od poloviny února jsou výkyvy obou hodnot vyšší než v lednu.

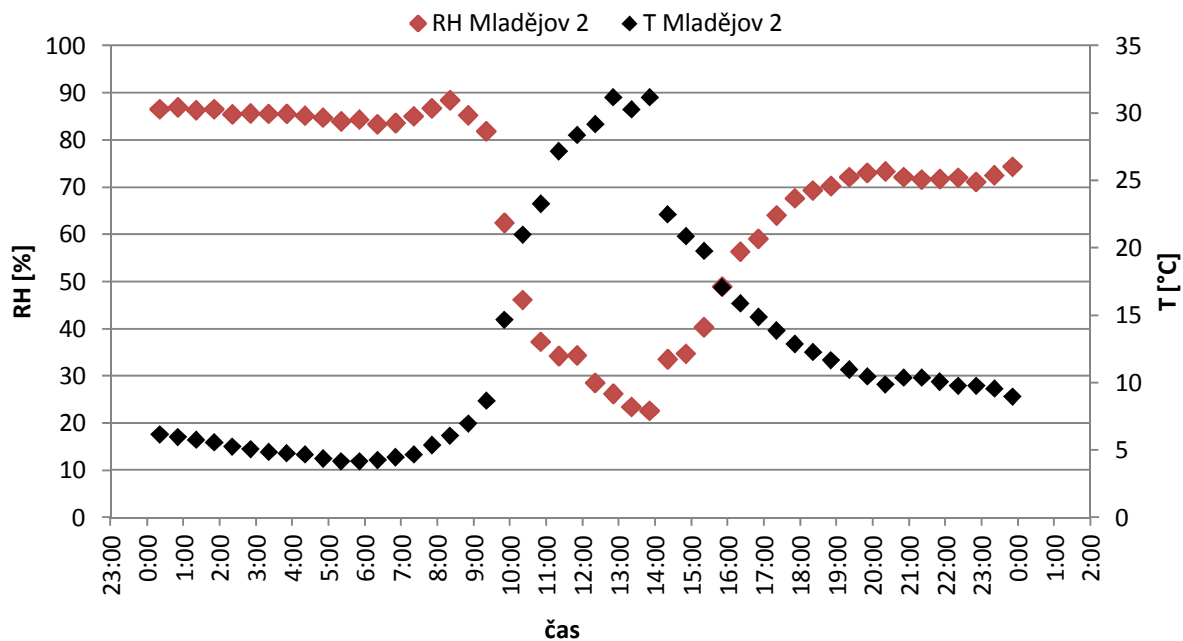


Obr. 4.1.6. Vývoj denních výkyvů RH (červeně) a T (černě) na lokalitě Mladějov 2. Od poloviny února do července jsou výkyvy hodnot vyšší než v lednu.

Rozdílný vývoj teploty a relativní vlhkosti vzduchu v průběhu dne je vidět ve dnech 22. ledna 2014 (malý výkyv hodnot, Obr. 4.1.7a.) a 20. března 2014 (velký výkyv hodnot, Obr. 4.1.7b.). V prvním případě je snižující se trend v obou hodnotách způsoben příchodem studené fronty, nicméně i tak je okolo poledne vidět nárůst teploty vlivem slunečního osvětlení. Ve druhém případě je vliv oslunění daleko patrnější a způsobuje vyšší rozdíl hodnot RH a T v průběhu dne.



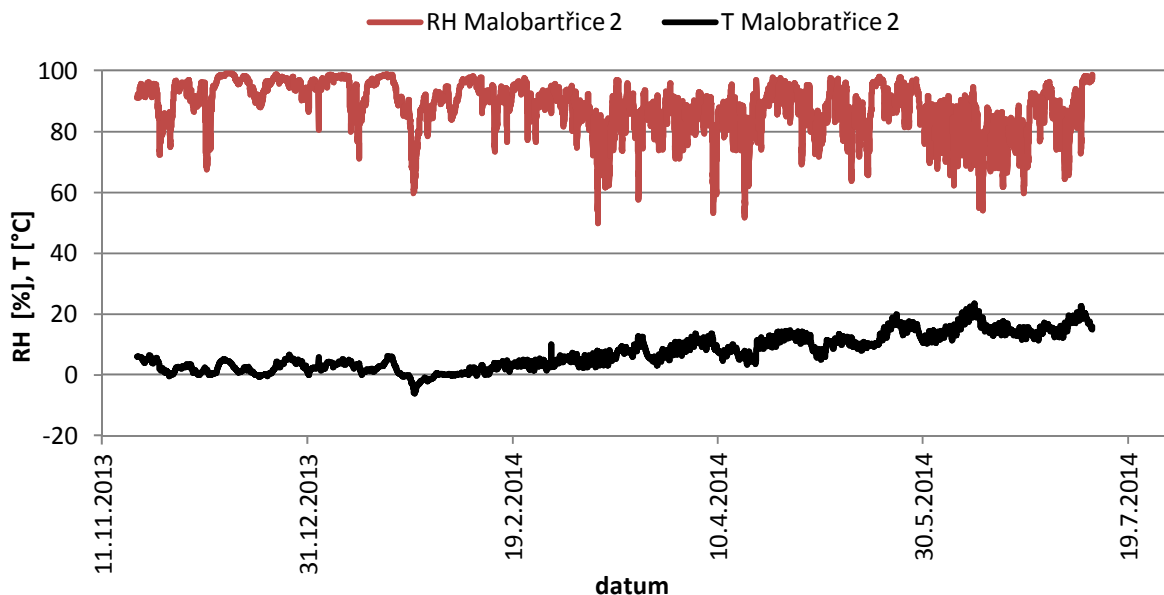
Obr. 4.1.7a. Průběh teploty a relativní vlhkosti vzduchu na lokalitě Mladějov 2 z 22. prosince 2014. Jedná se o období, ve kterém docházelo k ochlazení.



Obr. 4.1.7b. Průběh teploty a relativní vlhkosti vzduchu na lokalitě Mladějov 1 z 16. dubna 2014. Okolo poledních hodin je vidět silný vliv slunečního osvětlení.

4.1.4. Malobratřice 2

Na této lokalitě jsem umístil čidlo do výšky cca 3 m nad úroveň terénu na místo chráněné stromy před slunečním svitem. Kontinuální záznam z měření uvádím v grafu Obr. 4.1.8.



Obr. 4.1.8. Kontinuální záznam RH (na grafu červeně) a T (na grafu černě) z lokality Malobratřice 2.

Z celkového počtu 11176 záznamů jsem zjistil, že od 19. listopadu 2013 do 10. července 2014 byla na lokalitě Malobratřice 2 průměrná relativní vlhkost vzduchu 88,3 % a průměrná teplota vzduchu 7,3 °C

(Tab. 4.1.6.). Nejnižší dosažená teplota byla $-6,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, nejvyšší $23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tab. 4.1.6.). Nejnižší relativní vlhkost vzduchu za sledované období byla $49,9\%$, nejvyšší $99,1\%$ (Tab. 4.1.6.).

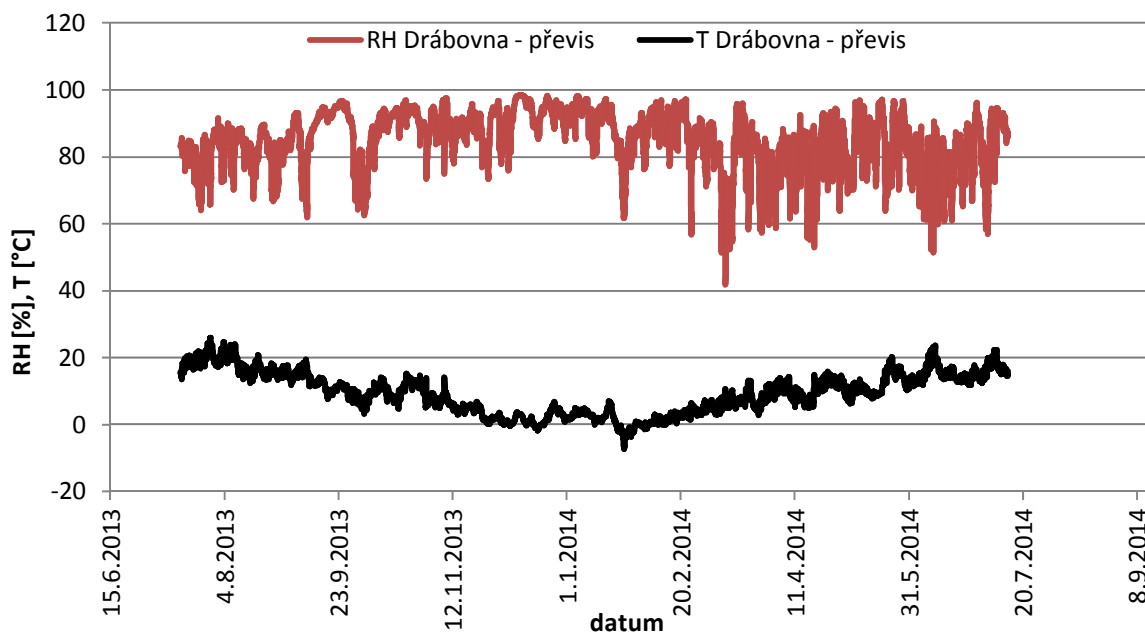
Tab. 4.1.6. Průměrné, minimální a maximální hodnoty RH a T na lokalitě Malobratřice 2 od listopadu 2013 do července 2014.

Malobratřice 2	počet měření	průměr	min	max	variabilita
T [$^{\circ}\text{C}$]	11176	7,3	-6,1	23,5	29,6
RH [%]	11176	88,3	49,9	99,1	49,2

4.1.5. Drábovna

Na tuto lokalitu jsem umístil dvě čidla, každému z nich se ve vyhodnocení věnuji zvlášť: 1) Drábovna – převis: čidlo umístěné nad převisem vyvinutým ve skále, která vystupuje ve svahu před ostatní skalní stěny (relativně intenzivní pohyb vzduchu, zejména v nevegetačním období, kdy jsou stromy bez listů), 2) Drábovna – jeskyně: čidlo umístěné v malé slepé dutině ve stropě jeskyně Tří postav.

AD 1) Čidlo jsem na lokalitě Drábovna - převis umístil do výšky cca 4 m od povrchu terénu nad mohutný převis do mělké dutiny. Toto místo je ve vegetačním období chráněno stromy před slunečním osvětlením, ale v zimních měsících, po opadání listů z listnatých stromů, může být vystaveno přímému slunečnímu svitu. Kontinuální záznam z měření RH a T uvádím v Obr. 4.1.9.



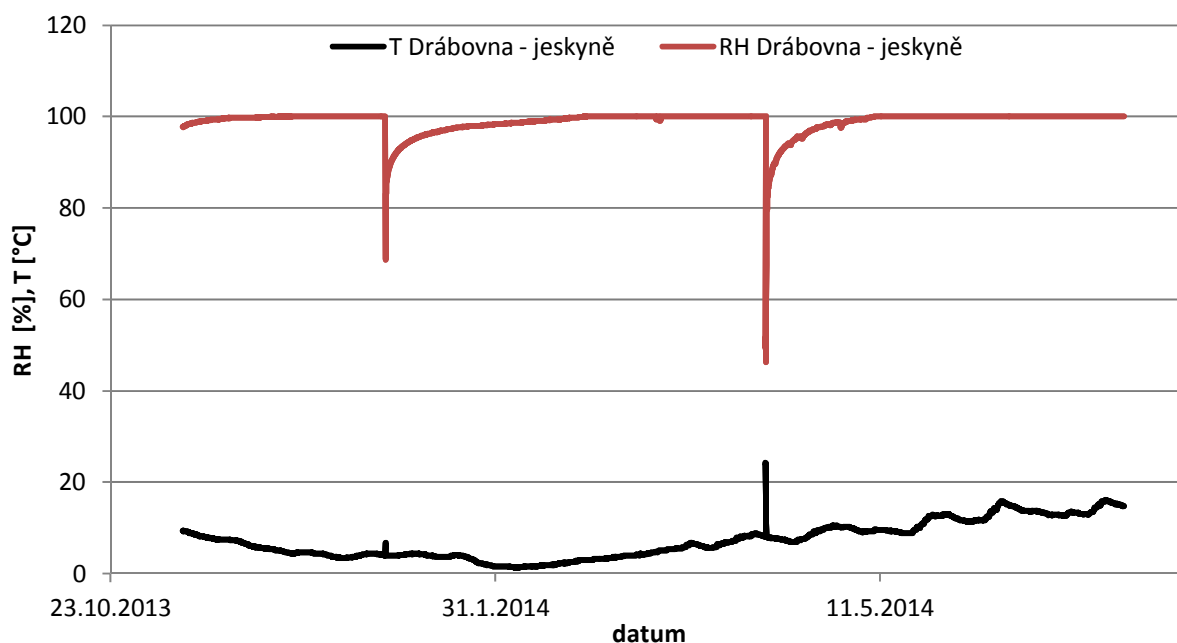
Obr. 4.1.9. Kontinuální záznam RH (na grafu červeně) a T (na grafu černě) z lokality Drábovna – převis.

Z celkového počtu 17402 záznamů jsem zjistil, že od 15. července 2013 do 13. července 2014 byla na lokalitě Drábovna – převis průměrná relativní vlhkost vzduchu 85% a průměrná teplota vzduchu činila $9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tab. 4.1.7.). Nejnižší teplota byla $-7,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (dosaženo 26. ledna 2014), nejvyšší $25,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (dosaženo 28. července 2013) (Tab. 4.1.7.) Nejnižší vlhkost vzduchu byla $41,9\%$ (dosaženo 11. března 2014) a nejvyšší vlhkost vzduchu $98,4\%$ (dosaženo 11. prosince 2013) (Tab. 4.1.7.).

Tab. 4.1.7. Průměrné, minimální a maximální hodnoty RH a T na lokalitě Drábovna - převis získané z čidla s krokem měření 30 minut od července 2013 do července 2014.

Drábovna - převis	počet měření	průměr	min	max	variabilita
T [°C]	17402	9,4	-7,3	25,9	33,2
RH [%]	17402	85,0	41,9	98,4	56,5

AD 2) Čidlo umístěné na lokalitě Drábovna – jeskyně zaznamenávalo RH a T od 10. listopadu 2013 do 13. července 2014. Relativní vlhkost vzduchu zde byla podle očekávání naměřena velice vysoká (Obr. 4.1.10.), zdá se, že vývoj RH se v grafu od umístění čidla limitně blíží k 100 %. Je překvapivé, že dosažení 100 % vlhkosti vzduchu vždy trvá značnou dobu (25 – 50 dní). Průměrná teplota byla v jeskyni po dobu měření 7,2 °C, přičemž od listopadu do února docházelo k poklesu teploty od 9 °C až na hodnotu 1,3 °C a poté se teplota opět zvyšovala až na hodnotu 16 °C v červnu (Tab. 4.1.8.). Dva výkyvy v grafu Obr. 4.1.10., kdy se skokově snižuje RH a zvyšuje T, odpovídají stažení dat a výměně čidla (aby čidla nebyla vystavena 100% vlhkosti po příliš dlouhou dobu) – jedná se o ovlivnění měření lidskou činností.



Obr. 4.1.10. Kontinuální záznam RH (na grafu červeně) a T (na grafu černě) z lokality Drábovna – jeskyně. Dva výkyvy v grafu, kdy se skokově snižuje RH a zvyšuje T, jsou způsobeny lidskou činností (kontrolou čidla).

4.1.6. Porovnání lokalit

Protože měření neprobíhala na všech lokalitách po stejnou dobu, pro porovnání rozdílů mezi lokalitami jsem vypočítal průměrné hodnoty RH a T a jejich variabilitu od 3. ledna 2014 do 10. července 2014, tedy pro dobu, během které probíhala měření na všech lokalitách.

Z mých měření vyplývá, že nejvlhčí ze sledovaných lokalit je podle předpokladu Drábovna – jeskyně (průměrná RH = 100 %). Druhou nejvlhčí je stromy chráněná lokalita Malobratřice 2 (průměrná RH = 87,1 %) s průměrnou hodnotou RH o 4-14 % vyšší, než je tomu u ostatních lokalit. Naopak nejnižší

lokality je Mladějov 2 (průměrná RH = 73 %), tedy oblast vystavená silnému slunečnímu osvětlení (Tab. 4.1.8.).

Lokalita Mladějov 2 je také nejteplejší ze všech sledovaných oblastí (průměrná teplota 11,1 °C), druhou nejteplejší oblastí je lom Střeleč. Rozdíl v průměrné teplotě mezi těmito lokalitami je však zanedbatelný. Nejchladnější lokalitou je Drábovna – jeskyně s průměrnou teplotou 7,6 °C (Tab. 4.1.8.).

Tab. 4.1.8. Průměrné hodnoty RH a T a jejich variabilita na jednotlivých lokalitách od 3.1. do 10.7. 2014.

	Střeleč	Mladějov 1	Mladějov 2	Malobratřice 2	Drábovna - převis	Drábovna - jeskyně
RH [%]	75,0	82,2	73,0	87,1	82,9	100
T [°C]	11,0	8,2	11,1	8,4	8,5	7,6
variabilita RH [%]	61,0	53,1	85,5	48,9	56,1	-
variabilita T [°C]	31,2	31,4	45,1	29,6	30,9	14,8

Nejvyšší variabilita v RH a T je na lokalitě Mladějov 2, naopak nejstálější hodnoty jsem pozoroval v jeskyni na Drábovně (Tab. 4.1.8.).

Po porovnání výše uvedených výsledků (Tab. 4.1.8.) pro lokality Mladějov 1 a Mladějov 2, které jsou od sebe vzdáleny cca 850 m a na kterých je vyvinut totožný pískovec, jsem zjistil, že intenzivní sluneční osvětlení na lokalitě Mladějov 2 způsobuje v průměru o cca 9 % nižší relativní vlhkost vzduchu a o cca 3 °C vyšší teplotu, než je na lokalitě Mladějov 1 (od slunečního osvětlení chráněna stromy). Podobný efekt má rozdílné sluneční osvětlení také na sezónní (resp. od 3. ledna do 10. července, Tab. 4.1.8.) a denní výkyvy v hodnotách RH a T. Sezónní variabilita relativní vlhkosti vzduchu je vyšší o cca 32 % a variabilita teploty je vyšší o cca 14 °C na lokalitě Mladějov 2 než na lokalitě Mladějov 1. Průměrný denní výkyv je pro lokalitu Mladějov 2 od ledna do června 2014 o cca 9 °C (T) vyšší a o cca 20 % (RH) vyšší než pro lokalitu Mladějov 1 (Tab. 4.1.9.).

Tab. 4.1.9. Průměrný denní výkyv od ledna do června 2014 pro lokality Mladějov 1, Mladějov 2.

lokality	prům. denní výkyv T [°C]	prům. denní výkyv RH [%]
Mladějov 1	5,4	16,7
Mladějov 2	13,9	36,7

Velké rozdíly v RH v průběhu dne jsou dány kapacitou vzduchu pro absorbování vody v plynné podobě, tedy maximální možnou absolutní vlhkostí [g/m³]. Výkyvy v relativní vlhkosti vzduchu jsou tak funkcí teploty, resp. rosného bodu (Steadman 1979).

4.2. Paropropustnost

Pomocí vztahů uvedených v kapitole 2.9 jsem pro šálky („wet cup“) spočítal součinitel difúzní vodivosti δ , součinitel difúze vodní páry D_v a faktor difúzního odporu μ pro: 1) S_{svrch} , kdy jsem do vztahů dosazoval velikost plochy svrchní podstavy, a 2) průměr S_{svrch} a S_{spod} , kdy jsem do vztahů dosazoval průměr velikostí ploch obou podstav. Tyto hodnoty jsem zjišťoval pro tři režimy nastavení klimakomory: 1) RH 50 %, T 20 °C; 2) RH 70 %, T 20 °C; 3) RH 90 %, T 20 °C, jelikož se tyto

hodnoty RH blíží skutečným hodnotám naměřeným v terénu a uvedeným v kapitole 4.1 a protože teplota 20 °C je uváděna jako standardní pro měření (Bear a Bachman 1990).

Protože u relativní vlhkosti vzduchu 50 % je úbytek váhy v čase nejvyšší, rozhodl jsem se brát toto RH jako standardní. Pro režim nastavení klimakomory č. 1 jsem z toho důvodu uskutečnil tři nezávislá měření, zatímco pro režimy 2 a 3 vždy pouze po jednom měření. Jednotlivá měření při režimu nastavení 1 tak označuji postupně 1a, 1b, 1c a zbylá dvě měření jako měření 2 a 3.

S výjimkou druhé sady vzorků byly všechny šálky umístěny ve spodním patře klimakomory. Druhá sada vzorků byla umístěna v horním patře klimakomory a měření na nich probíhala pouze při režimu 1c (viz níže). Šálky byly pro všechny režimy měření umístěny vždy na stejném místě klimakomory.

Lineární rychlost úniku destilované vody skrz pískovcové jádro uvádím pro všechna měření v Příloze 2. Hodnota spolehlivosti R^2 pro lineární regresi se u všech měřených vzorků pohybovala vždy nad 0,9.

Zjištěné hodnoty pro měření 1a při dosazení S_{svrch} uvádím v tabulce Tab. 4.2.1aS., při dosazení průměru S_{svrch} a S_{spod} v tabulce Tab. 4.2.1aP. Toto měření se od všech ostatních (1b – 3) lišilo v tom, že větrací zařízení zajišťující rozeznání difúzní vrstvy nad vzorky bylo nastaveno pouze na 75 % účinnosti. Při všech ostatních měřeních již byl větrák nastaven na 100 % účinnosti. Výsledné hodnoty měření 1a jsou tedy podceněné a přisuzují materiálům zdánlivě nižší paropropustnost.

Tab. 4.2.1aS. Výsledné hodnoty pro měření 1a (RH 50 %, T 20 °C) za použití velikosti plochy svrchní podstavy. Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Zbiroh ZBI). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	povrch	δ [s]	Dv [$m^2 \cdot s^{-1}$]	μ	plocha [cm^2]
91	STR1	SPOD	3,78E-11	5,11E-06	4,50	9,72
11/15	ZBI	PP+BIO	1,87E-11	2,53E-06	9,09	12,03
43	STR1	PP+BIO	2,08E-11	2,81E-06	8,18	12,59
68	STR1	PP+BIO	2,58E-11	3,49E-06	6,59	9,14
11/6	MLD1	PRIR	1,79E-11	2,42E-06	9,50	13,17
104	STR2	BIO	2,00E-11	2,71E-06	8,50	12,96
9/21 A	STR1	PP+BIO	1,50E-11	2,03E-06	11,31	14,12
9/24 A	STR1	PP+BIO	2,02E-11	2,73E-06	8,41	14,95
9/21 B	STR1	SPOD	1,86E-11	2,53E-06	9,11	12,90
9/34	STR3	BIO	1,95E-11	2,64E-06	8,70	11,89
9/24 B	STR1	SPOD	2,03E-11	2,75E-06	8,38	12,62
158	STR1	PP	2,55E-11	3,45E-06	6,66	12,70

Tab. 4.2.1aP. Výsledné hodnoty pro měření 1a (RH 50 %, T 20 °C) za použití průměru velikostí ploch obou podstav. Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Zbiroh ZBI). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	povrch	δ [s]	Dv [$m^2 \cdot s^{-1}$]	μ	plocha [cm^2]
91	STR1	SPOD	3,30E-11	4,46E-06	5,15	11,14
11/15	ZBI	PP+BIO	1,75E-11	2,37E-06	9,70	12,83
43	STR1	PP+BIO	1,94E-11	2,63E-06	8,74	13,45
68	STR1	PP+BIO	1,99E-11	2,70E-06	8,52	11,82
11/6	MLD1	PRIR	1,83E-11	2,47E-06	9,30	12,90
104	STR2	BIO				nezjištěno
9/21 A	STR1	PP+BIO	1,46E-11	1,97E-06	11,67	14,56
9/24 A	STR1	PP+BIO	2,05E-11	2,05E-11	8,27	14,70
9/21 B	STR1	SPOD	1,81E-11	2,44E-06	9,41	13,33
9/34	STR3	BIO	1,89E-11	2,55E-06	9,01	12,31
9/24 B	STR1	SPOD	1,94E-11	1,94E-11	8,78	13,23
158	STR1	PP	2,31E-11	3,13E-06	7,35	14,02

Měření 1a probíhalo po dobu 670 h a úbytek hmotnosti se pohyboval od 2,89 g (vzorek 68) do 5,45 g (vzorek 91). Použil jsem 12 vzorků.

Obdobně uvádím v tabulkách výsledky pro měření 1b (Tab. 4.2.1bS., Tab. 4.2.1bP.), měření 1c (Tab. 4.2.1cS., Tab. 4.2.1cP.), měření 2 (Tab. 4.2.2S., Tab. 4.2.2P.) a měření 3 (Tab. 4.2.3S., Tab. 4.2.3P.). Rozdíly mezi jednotlivými měřeními a také mezi konkrétními vzorky (pokud byly použity při více měřeních) jsou diskutovány v této kapitole pod uvedením výsledků. Samostatně také uvádím výsledky pro 11 vzorků z druhé sady umístěných v horním patře klimakomory při měření 1c (Tab. 4.2.4S., Tab. 4.2.4P.).

Tab. 4.2.1bS. Výsledné hodnoty pro měření 1b (RH 50 %, T 20 °C) za použití velikosti plochy svrchní podstavy. Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Zbiroh ZBI). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	povrch	δ [s]	Dv [$m^2 \cdot s^{-1}$]	μ	plocha [cm^2]
91	STR1	SPOD	3,84E-11	5,20E-06	4,42	9,72
11/15	ZBI	PP+BIO	2,52E-11	3,41E-06	6,75	12,03
43	STR1	PP+BIO	2,30E-11	3,12E-06	7,37	12,59
68	STR1	PP+BIO	3,22E-11	4,36E-06	5,28	9,14
11/6	MLD1	PRIR	2,00E-11	2,70E-06	8,51	13,17
104	STR2	BIO	2,08E-11	2,82E-06	8,16	12,96
9/21 A	STR1	PP+BIO	1,79E-11	2,43E-06	9,47	14,12
9/24 A	STR1	PP+BIO	1,86E-11	2,52E-06	9,14	14,95
9/21 B	STR1	SPOD	1,88E-11	2,54E-06	9,04	12,90
9/34	STR3	BIO	2,13E-11	2,89E-06	7,96	11,89
9/24 B	STR1	SPOD	2,14E-11	2,90E-06	7,94	12,62
158	STR1	PP	2,55E-11	3,45E-06	6,67	12,70
76	STR1	PP	2,89E-11	3,91E-06	5,88	8,77

Tab. 4.2.1bP. Výsledné hodnoty pro měření 1b (RH 50 %, T 20 °C) za použití průměru velikostí ploch obou podstav. Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Zbiroh ZBI). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	povrch	δ [s]	Dv [$m^2 \cdot s^{-1}$]	μ	plocha [cm^2]
91	STR1	SPOD	3,35E-11	4,54E-06	5,07	11,14
11/15	ZBI	PP+BIO	2,36E-11	3,19E-06	7,20	12,83
43	STR1	PP+BIO	2,16E-11	2,92E-06	7,87	13,45
68	STR1	PP+BIO	2,49E-11	3,37E-06	6,83	11,82
11/6	MLD1	PRIR	2,04E-11	2,76E-06	8,33	12,90
104	STR2	BIO				nezjištěno
9/21 A	STR1	PP+BIO	1,74E-11	2,36E-06	9,76	14,56
9/24 A	STR1	PP+BIO	1,89E-11	2,56E-06	8,99	14,70
9/21 B	STR1	SPOD	1,82E-11	2,46E-06	9,34	13,33
9/34	STR3	BIO	2,06E-11	2,79E-06	8,23	12,31
9/24 B	STR1	SPOD	2,04E-11	2,76E-06	8,32	13,23
158	STR1	PP	2,31E-11	3,13E-06	7,36	14,02
76	STR1	SPOD	2,32E-11	3,15E-06	7,31	10,90

Měření 1b trvalo 598 h a úbytek hmotnosti byl od 2,90 g (vzorek 76) po 4,95 g (vzorek 91), použil jsem 13 vzorků. Je evidentní, že navýšení účinnosti větráku oproti měření 1a se pozitivně projevilo na hodnotách propustnosti materiálů - materiály se jeví propustnější, pouze pro vzorek 9/24A vyšla paropropustnost nižší a pro vzorek 158 přibližně stejná v porovnání s měřením 1a.

Tab. 4.2.1cS. Výsledné hodnoty pro měření 1c (RH 50 %, T 20 °C) za použití velikosti plochy svrchní podstavy. Některé názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Zbiroh ZBI). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	povrch	δ [s]	Dv [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	μ	plocha [cm^2]
91	STR1	SPOD	3,97E-11	5,37E-06	4,28	9,72
11/15	ZBI	PP+BIO	2,75E-11	3,72E-06	6,18	12,03
43	STR1	PP+BIO	2,62E-11	3,54E-06	6,49	12,59
68	STR1	PP+BIO	3,41E-11	4,62E-06	4,98	9,14
11/6	MLD1	PRIR	2,14E-11	2,89E-06	7,95	13,17
104	STR2	BIO	1,99E-11	2,69E-06	8,55	12,96
9/21 A	STR1	PP+BIO	1,73E-11	2,35E-06	9,79	14,12
9/34	STR3	BIO	2,18E-11	2,96E-06	7,78	14,95
9/24 A	STR1	PP+BIO	2,04E-11	2,76E-06	8,35	12,90
9/21 B	STR1	SPOD	1,95E-11	2,64E-06	8,72	11,89
158	STR1	PP	2,79E-11	3,78E-06	6,08	12,62
9/24 B	STR1	SPOD	2,26E-11	3,06E-06	7,51	12,70
76	STR1	SPOD	3,22E-11	4,36E-06	5,28	8,77

Tab. 4.2.1cP. Výsledné hodnoty pro měření 1c (RH 50 %, T 20 °C) za použití průměru velikostí ploch obou podstav. Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Zbiroh ZBI). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	povrch	δ [s]	Dv [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	μ	plocha [cm^2]
91	STR1	SPOD	3,46E-11	4,69E-06	4,91	11,14
11/15	ZBI	PP+BIO	2,58E-11	3,49E-06	6,59	12,83
43	STR1	PP+BIO	2,45E-11	3,32E-06	6,93	13,45
68	STR1	PP+BIO	2,64E-11	3,57E-06	6,44	11,82
11/6	MLD1	PRIR	2,18E-11	2,96E-06	7,78	12,90
104	STR2	BIO				nezjištěno
9/21 A	STR1	PP+BIO	1,68E-11	2,28E-06	10,10	14,56
9/34	STR3	BIO	2,11E-11	2,86E-06	8,05	14,70
9/24 A	STR1	PP+BIO	2,07E-11	2,80E-06	8,20	13,33
9/21 B	STR1	SPOD	1,89E-11	2,55E-06	9,00	12,31
158	STR1	PP	2,53E-11	3,43E-06	6,71	13,23
9/24 B	STR1	SPOD	2,16E-11	2,92E-06	7,86	14,02
76	STR1	SPOD	2,59E-11	3,51E-06	6,56	10,90

Měření 1c trvalo 526 h a úbytek hmotnosti byl od 2,71 g (vzorek 9/21 A) do 4,49 g (vzorek 91), použil jsem 13 původních vzorků. Druhé sadě vzorků (11) se věnuji níže (Tab. 4.2.4S, Tab. 4.2.4P).

Tab. 4.2.2S. Výsledné hodnoty pro měření 2 (RH 70 %, T 20 °C) za použití velikosti plochy svrchní podstavy. Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Zbiroh ZBI). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	povrch	δ [s]	Dv [$m^2 \cdot s^{-1}$]	μ	plocha [cm^2]
91	STR1	SPOD	6,28E-11	8,51E-06	2,70	9,72
11/15	ZBI	PP+BIO	3,16E-11	4,27E-06	5,38	12,03
43	STR1	PP+BIO	2,44E-11	3,30E-06	6,96	12,59
68	STR1	PP+BIO	3,53E-11	4,78E-06	4,81	9,14
11/6	MLD1	PRIR	2,18E-11	2,96E-06	7,78	13,17
104	STR2	BIO	1,89E-11	2,56E-06	8,98	12,96
9/21 A	STR1	PP+BIO	2,31E-11	3,12E-06	7,37	14,12
9/24 A	STR1	PP+BIO	1,92E-11	2,60E-06	8,86	14,95
9/21 B	STR1	SPOD	1,80E-11	2,44E-06	9,43	12,90
9/34	STR3	BIO	2,18E-11	2,95E-06	7,81	11,89
9/24 B	STR1	SPOD	2,17E-11	2,94E-06	7,84	12,62
158	STR1	PP	2,78E-11	3,76E-06	6,11	12,70
76	STR1	SPOD	2,80E-11	3,79E-06	6,08	8,77

Tab. 4.2.2P. Výsledné hodnoty pro měření 2 (RH 70 %, T 20 °C) za použití průměru velikostí ploch obou podstav. Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Zbiroh ZBI). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	povrch	δ [s]	Dv [$m^2 \cdot s^{-1}$]	μ	plocha [cm^2]
91	STR1	SPOD	5,48E-11	7,42E-06	3,10	11,14
11/15	ZBI	PP+BIO	2,96E-11	4,01E-06	5,74	12,83
43	STR1	PP+BIO	2,28E-11	3,09E-06	7,44	13,45
68	STR1	PP+BIO	2,73E-11	3,70E-06	6,22	11,82
11/6	MLD1	PRIR	2,23E-11	3,02E-06	7,62	12,90
104	STR2	BIO				nezjištěno
9/21 A	STR1	PP+BIO	2,24E-11	3,03E-06	7,60	14,56
9/24 A	STR1	PP+BIO	1,95E-11	2,64E-06	8,71	14,70
9/21 B	STR1	SPOD	1,74E-11	2,36E-06	9,74	13,33
9/34	STR3	BIO	2,10E-11	2,84E-06	8,09	12,31
9/24 B	STR1	SPOD	2,07E-11	2,80E-06	8,21	13,23
158	STR1	PP	2,52E-11	3,41E-06	6,75	14,02
76	STR1	SPOD	2,25E-11	3,05E-06	7,55	10,90

Měření 2 trvalo 672 h a úbytek hmotnosti byl od 1,89 g (vzorek 76) po 3,53 g (vzorek 91), použil jsem 13 vzorků.

Tab. 4.2.3S. Výsledné hodnoty pro měření 3 (RH 90 %, T 20 °C) za použití velikosti plochy svrchní podstavy. Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Zbiroh ZBI). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	povrch	δ [s]	D_v [$m^2 \cdot s^{-1}$]	μ	plocha [cm^2]
91	STR1	SPOD	4,27E-11	5,78E-06	3,98	9,72
11/15	ZBI	PP+BIO	3,91E-11	5,30E-06	4,34	12,03
43	STR1	PP+BIO	2,52E-11	3,42E-06	6,73	12,59
68	STR1	PP+BIO	2,68E-11	3,63E-06	6,34	9,14
11/6	MLD1	PRIR	3,48E-11	4,72E-06	4,88	13,17
104	STR2	BIO	1,90E-11	2,58E-06	8,93	12,96
9/21 A	STR1	PP+BIO	1,43E-11	1,93E-06	11,89	14,12
9/24 A	STR1	PP+BIO	1,40E-11	1,90E-06	12,12	14,95
9/34	STR3	BIO	1,96E-11	2,66E-06	8,66	11,89
9/24 B	STR1	SPOD	1,95E-11	2,64E-06	8,70	12,62
158	STR1	PP	3,06E-11	4,14E-06	5,56	12,70
76	STR1	SPOD	2,32E-11	3,14E-06	7,33	8,77

Tab. 4.2.3P. Výsledné hodnoty pro měření 3 (RH 90 %, T 20 °C) za použití průměru velikostí ploch obou podstav. Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Zbiroh ZBI). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	povrch	δ [s]	D_v [$m^2 \cdot s^{-1}$]	μ	plocha [cm^2]
91	STR1	SPOD	3,73E-11	5,05E-06	4,56	11,14
11/15	ZBI	PP+BIO	3,67E-11	4,97E-06	4,63	12,83
43	STR1	PP+BIO	2,36E-11	3,20E-06	7,19	13,45
68	STR1	PP+BIO	2,07E-11	2,80E-06	8,20	11,82
11/6	MLD1	PRIR	3,56E-11	4,82E-06	4,78	12,90
104	STR2	BIO				nezjištěno
9/21 A	STR1	PP+BIO	1,39E-11	1,88E-06	12,26	14,56
9/24 A	STR1	PP+BIO	1,43E-11	1,93E-06	11,92	14,70
9/34	STR3	BIO	1,90E-11	2,57E-06	8,96	12,31
9/24 B	STR1	SPOD	1,86E-11	2,52E-06	9,12	13,23
158	STR1	PP	2,77E-11	3,75E-06	6,13	14,02
76	STR1	SPOD	1,87E-11	2,53E-06	9,10	10,90

V případě měření 3 trvalo velice dlouho, než se vlhkost pískovcových jader v šálcích přizpůsobila vysoké relativní vlhkosti vzduchu 90 %. Z toho důvodu nelze na počátku měření považovat úbytek váhy v čase za lineární, proto jsem hodnoty paropropustnosti počítal pouze pro ten úsek, který prokazatelně lineární je (viz Příloha 2). Jelikož jsem byl v časové tísní (klimakomora byla měsíc a půl vyřazena kvůli poruše), nemohl jsem si dovolit prodloužit pokus tak, aby použitelný úsek trval podobnou dobu jako při ostatních měřeních, a proto použitelný úsek měření č. 3 trval pouze 424 h. Použil jsem 12 vzorků.

Úbytek hmotnosti pro měření 3 byl od 0,33 g (vzorek 76) do 0,91 (vzorek 11/6 = 9/1).

Tab. 4.2.4S. Výsledné hodnoty pro měření 1c (RH 50%, T 20 °C) za použití velikosti plochy svrchní podstavy. Tabulka se týká druhé sady šálků, umístěných v horním patře klimakomory a měřených pouze při tomto režimu. Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Malobratřice MBR). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	povrch	δ [s]	Dv [$m^2 \cdot s^{-1}$]	μ	plocha [cm^2]
9/47	STR3	BIO	2,61E-11	3,53E-06	6,51	13,83
11/5	MLD1	PRIR	3,14E-11	4,25E-06	5,41	12,23
11/10 B	MLD2	SPOD	2,82E-11	3,82E-06	6,03	11,79
11/9	MLD1	PRIR	2,32E-11	3,14E-06	7,31	11,66
954/2	MBR1	PRIR	2,98E-11	4,03E-06	5,70	12,39
11/8	MLD1	PRIR	2,26E-11	3,06E-06	7,51	11,31
955/2	MBR2	PRIR	2,93E-11	3,97E-06	5,79	9,80
9/7 A	MLD1	PRIR	2,48E-11	3,36E-06	6,85	11,74
11/3	MBR2	PRIR	3,00E-11	4,07E-06	5,65	12,08
9/53	STR3	BIO	3,12E-11	4,22E-06	5,45	12,18
9/7 B	MLD1	SPOD	3,03E-11	4,10E-06	5,60	11,28
průměrná hodnota μ pro vzorky BIO					5,98	
průměrná hodnota μ pro vzorky SPOD					5,82	
průměrná hodnota μ pro vzorky PRIR					6,32	

Tab. 4.2.4P. Výsledné hodnoty pro měření 1c (RH 50%, T 20 °C) za použití průměru velikostí ploch obou podstav.

Tabulka se týká druhé sady šálků, umístěných v horním patře klimakomory a měřených pouze při tomto režimu. Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Malobratřice MBR). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

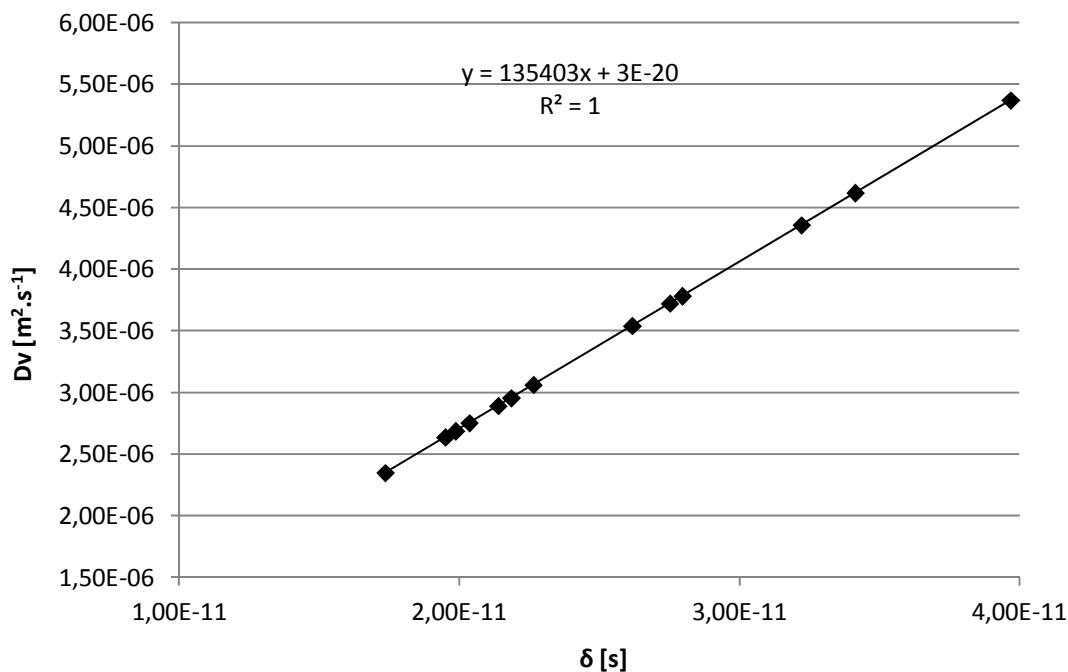
vzorek	místo odebrání	povrch	δ [s]	Dv [$m^2 \cdot s^{-1}$]	μ	plocha [cm^2]
9/47	STR3	BIO	2,57E-11	3,48E-06	6,61	14,03
11/5	MLD1	PRIR	2,82E-11	3,82E-06	6,01	13,59
11/10 B	MLD2	SPOD	2,65E-11	3,58E-06	6,42	12,56
11/9 vošt	MLD1	PRIR	1,97E-11	2,67E-06	8,61	13,73
954/2	MBR1	PRIR	2,90E-11	3,93E-06	5,86	12,72
11/8 vošt	MLD1	PRIR	1,81E-11	2,44E-06	9,41	14,17
955/2	MBR2	PRIR	2,51E-11	3,40E-06	6,77	11,46
9/7 A	MLD1	PRIR	2,25E-11	3,05E-06	7,54	12,99
11/3	MBR2	PRIR	2,56E-11	3,46E-06	6,64	14,19
9/53	STR3	BIO	3,08E-11	4,17E-06	5,51	12,33
9/7 B	MLD1	SPOD	2,62E-11	3,55E-06	6,47	13,03

Měření 1c pro druhou sadu vzorků (11) umístěných v horním patře klimakomory trvalo 526 h a úbytek hmotnosti se pohyboval od 2,44 g (vzorek 9/7 B) do 4,28 g (vzorek 11/9).

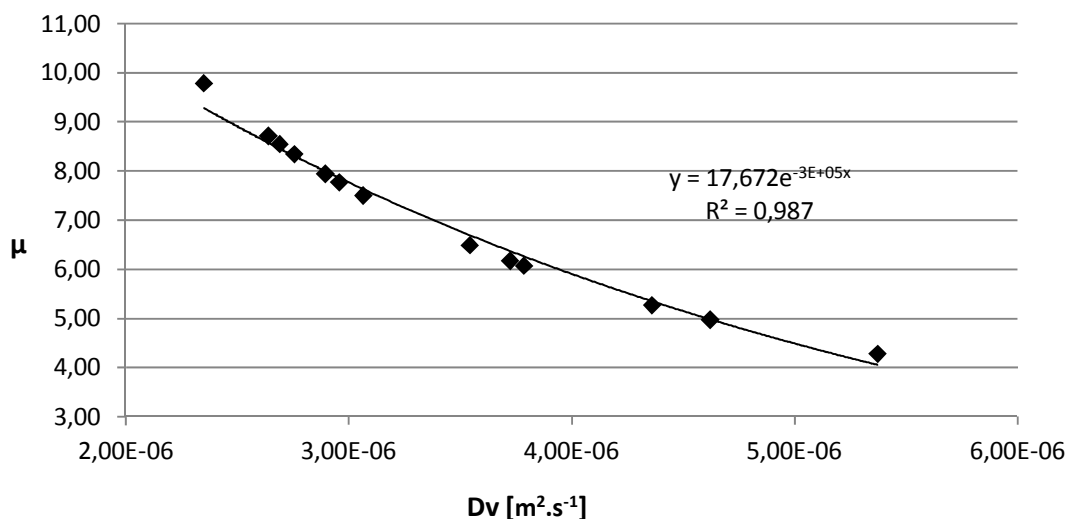
Protože jsou hodnoty součinitele difúzní vodivosti, součinitele difúze vodní páry a faktoru difúzního odporu vzájemně provázané, budu se nadále věnovat pouze hodnotám faktoru difúzního odporu μ . Čím vyšší je hodnota μ , tím je materiál méně propustný pro páru. Připouštím však, že zatímco mezi hodnotami součinitele difúzní vodivosti a součinitele difúze vodní páry je lineární vztah (Obr. 4.2.1.), mezi hodnotami součinitele difúzní vodivosti (resp. součinitele difúze vodní páry) a faktoru difúzního

odporu je vztah dán rovnicí $y = A \cdot e^{-bE+05x}$ (Obr. 4.2.2.). Jelikož se hodnoty A, b pro jednotlivé režimy měření liší, vytvořil jsem tabulku (Tab. 4.2.5.), ve které jednotlivým měřením při dosažení S_{svrch} přiřazuji rovnici pro přepočet μ na Dv .

Od této chvíle se také věnuji pouze hodnotám μ spočítaným pomocí S_{svrch} .



Obr. 4.2.1. Vztah mezi faktorem difúzní vodivosti δ (horizontální osa) a součinitelem difúze vodní páry Dv (vertikální osa) je lineární. Graf převzat z měření 1c.

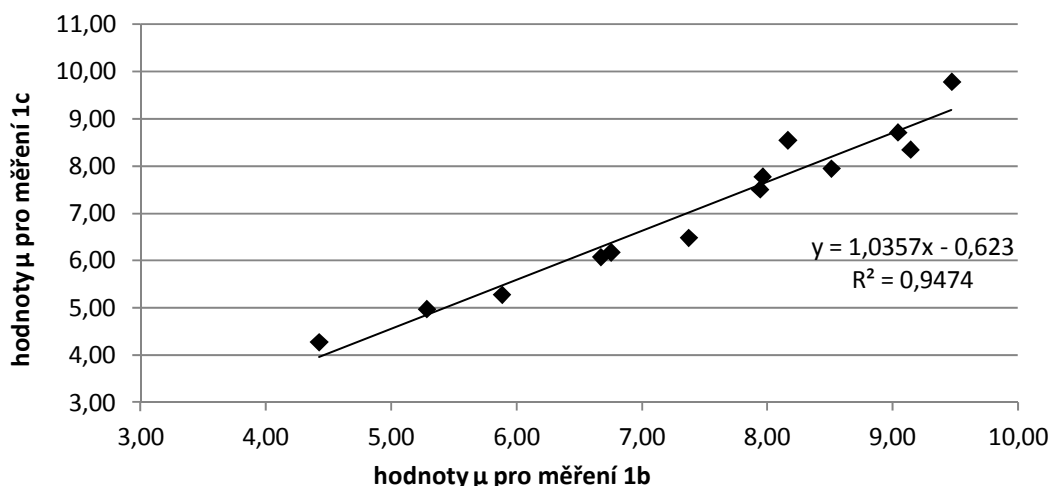


Obr. 4.2.2. Vztah mezi faktorem difúzního odporu μ (vertikální osa) a součinitelem difúze vodní páry Dv (horizontální osa) je dán rovnicí $y = A \cdot e^{-bE+05x}$. Graf převzat z měření 1c.

Tab. 4.2.5. Rovnice pro přepočítání faktoru difúzního odporu μ na součinitel difúze vodní páry D_v pro jednotlivá měření.

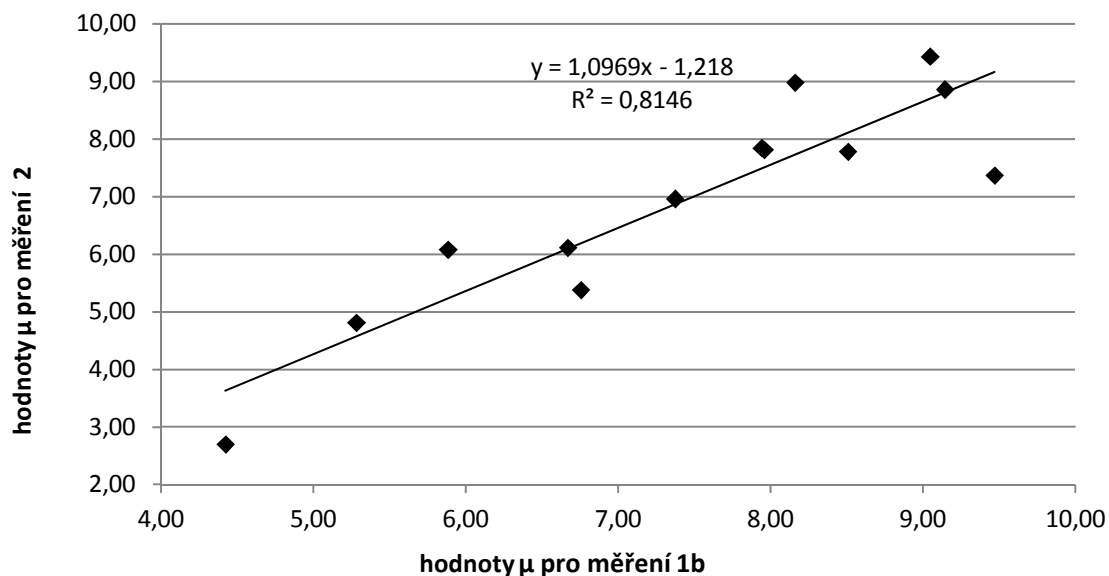
režim měření	1a	1b	1c	1c druhá sada	2	3
rovnice	$y = 18,9e^{-3E+05x}$	$y = 17,988e^{-3E+05x}$	$y = 17,672e^{-3E+05x}$	$y = 19,663e^{-3E+05x}$	$y = 14,143e^{-2E+05x}$	$y = 18,9e^{-3E+05x}$
R^2	0,9783	0,9873	0,9870	0,9935	0,9599	0,9732

Hodnoty pro konkrétní vzorky se liší napříč jednotlivými nastaveními klimakomory. Pro měření 1b, 1c (tedy totožné nastavení klimakomory; RH 50 %, T 20 °C a účinnost větracího zařízení 100 %) však jsou hodnoty μ velice podobné (Obr. 4.2.3.). V případě lineární regrese je mezi těmito výsledky hodnota spolehlivosti $R^2 = 0,95$.



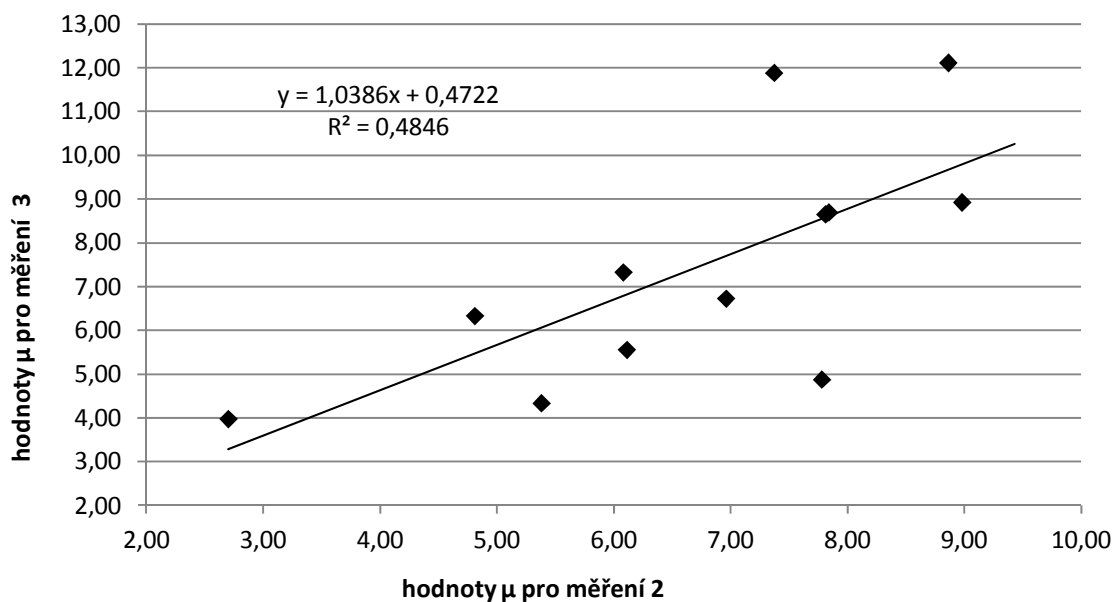
Obr. 4.2.3. Vztah mezi hodnotami μ pro dvě nezávislá měření za stejného nastavení klimakomory (RH 50 %, T 20°C).

Hodnoty μ se v případě měření 1b a 2 liší o 1-39 %, u 10 vzorků z 13 (77 %) je hodnota μ vyšší při měření 1b, u 3 vzorků při měření 2 (Obr. 4.2.4.).



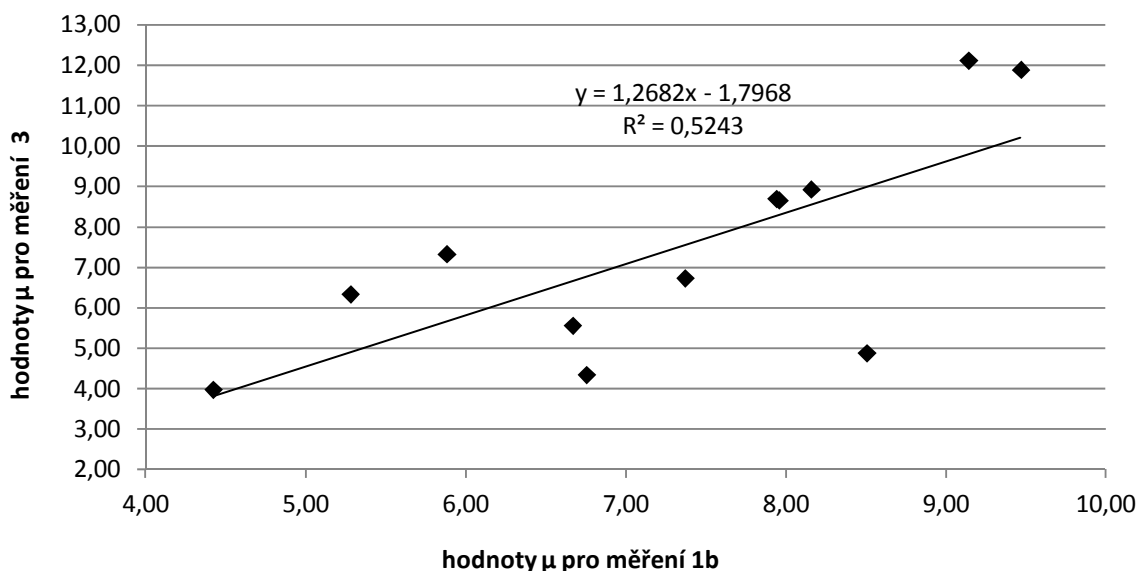
Obr. 4.2.4. Hodnoty μ z měření 1b – RH 50 %, T 20 °C (horizontální osa) a z měření 2 – RH 70 %, T 20 °C (vertikální osa).

Hodnoty μ se v případě měření 2 a 3 liší o 1-61 %, u 5 vzorků z 12 (42 %) je hodnota μ vyšší při měření 2, u 7 vzorků (58 %) při měření 3 (Obr. 4.2.5.).



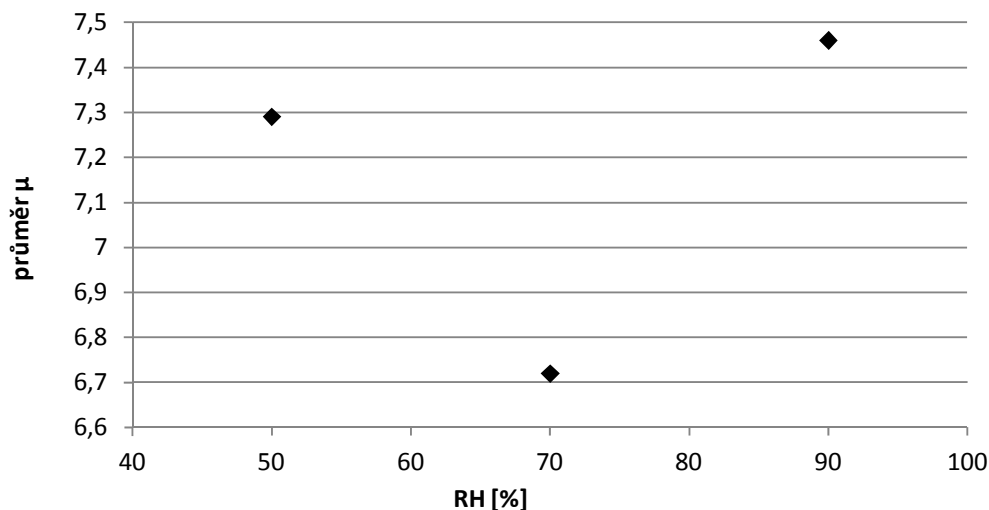
Obr. 4.2.5. Hodnoty μ z měření 2 – RH 70 %, T 20 °C (horizontální osa) a z měření 3 – RH 90 %, T 20 °C (vertikální osa).

Hodnoty μ se v případě měření 1b a 3 liší o 9-43 %, u 5 vzorků z 12 (42 %) je hodnota μ vyšší při měření 1b, u 7 vzorků (58 %) při měření 3 (Obr. 4.2.6.).



Obr. 4.2.6. Hodnoty μ z měření 1b – RH 50 %, T 20 °C (horizontální osa) a z měření 3 – RH 90 %, T 20 °C (vertikální osa).

Po vypočítání průměrné hodnoty μ všech vzorků pro jednotlivá měření jsem zjistil, že zatímco při nejvyšší relativní vlhkosti vzduchu je průměrná hodnota μ nejvyšší, nejnižší průměrná hodnota není, jak by se dalo předpokládat, při nejnižší relativní vlhkosti vzduchu, ale při $RH = 70 \%$ (Obr. 4.2.7).



Obr. 4.2.7. Mezi relativní vlhkostí vzduchu a průměrnou hodnotou μ se nezdá být žádný vztah.

Také Pavlík et al. (2008) ve své práci uvádějí, že pro různé režimy jim pro vzorky vyšly rozdílné hodnoty. Tito autoři studovali materiál mšenských pískovců, hodnoty μ jim vyšly v rozmezí od 6,7 (gradient relativní vlhkosti 97 % – 25 %) do 21 (gradient relativní vlhkosti 5 % – 85 %). Ve druhém případě se takovýto pokus již označuje jako tzv. „dry cup“. Uspořádání pokusu je podobné jako v případě „wet cup“, pouze vodní páry migrují opačným směrem, tedy z okolního vzduchu do vzorku. Metoda „dry cup“ se používá pro měření za nízkých hodnot RH, zatímco metodou „wet cup“ se zjišťuje paropropustnost materiálu za vysokých hodnot relativní vlhkosti vzduchu, ačkoliv ostrou hranici použití metod jsem v odborné literatuře nenašel.

U mých měření nelze vyloučit špatné uspořádání experimentu, kdy 90 % je tak vysoká relativní vlhkost vzduchu, že při ní dochází k samovolné zpětné kondenzaci vody ve vzorcích, čímž samozřejmě zdánlivě narůstají hodnoty μ těchto vzorků. Pro další měření za vysokých hodnot RH by proto bylo vhodnější zvolit výrazně delší časový úsek měření.

Možným vysvětlením rozdílných hodnot paropropustnosti může být i skutečnost, že se na transportu vody v jakékoliv formě při různých RH podílí různé mechanismy. Podle Siegesmunda a Dürrasta (2011) a Künzela (1994) jsou to tři hlavní transportní mechanismy: difúze vodních par, kapilární absorpce vodních par, povrchová difúze vody. Hnací silou difúze vodních par je pouhý rozdíl v parciálních tlacích, přičemž s rostoucí vlhkostí vzduchu dochází k vyšší absorpci vodní páry, což vede k povrchové difúzi na stěnách pórů, která se ve výsledku může proměnit v tok kapilární vody v nepatrné vrstvě na stěnách pórů (Siegesmund a Dürrast 2011). Povrchová difúze a kapilární tok mohou probíhat v opačném směru než difúze vodních par (Siegesmund a Dürrast 2011).

Absence vztahu mezi hodnotami μ a RH je však podle mého názoru způsobena jednoduše chybou měření (vzhledem k velké variabilitě v hodnotách paropropustnosti jednotlivých šálků v rámci všech měření je rozdíl $\pm 0,4 \mu$ téměř zanedbatelný).

Pro každý šálek, který byl použit ve všech měřeních, jsem spočítal průměrnou hodnotu μ (pro S_{svrch}) pro všechna měření (Tab. 4.2.6.) a vynesl jsem ji v obrázku do toho místa v klimakomoře, ve kterém byl příslušný šálek umístěn (Obr. 4.2.8.).

Tab. 4.2.6. Průměrné hodnoty faktoru difúzního odporu μ jednotlivých šálků pro všechna měření (do vztahů dosazeny plochy S_{svrch}). Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Zbiroh ZBI). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	místo odebrání	povrch	průměr μ	počet měření
91	STR1	SPOD	3,98	5
11/15	ZBI	PP+BIO	6,35	5
43	STR1	PP+BIO	7,15	5
68	STR1	PP+BIO	5,60	5
11/6	MLD1	PRIR	7,72	5
104	STR2	BIO	8,62	5
9/21 A	STR1	PP+BIO	9,97	5
9/24 A	STR1	PP+BIO	9,38	5
9/34	STR3	BIO	8,18	5
9/24 B	STR1	SPOD	8,07	5
158	STR1	PP	6,22	5

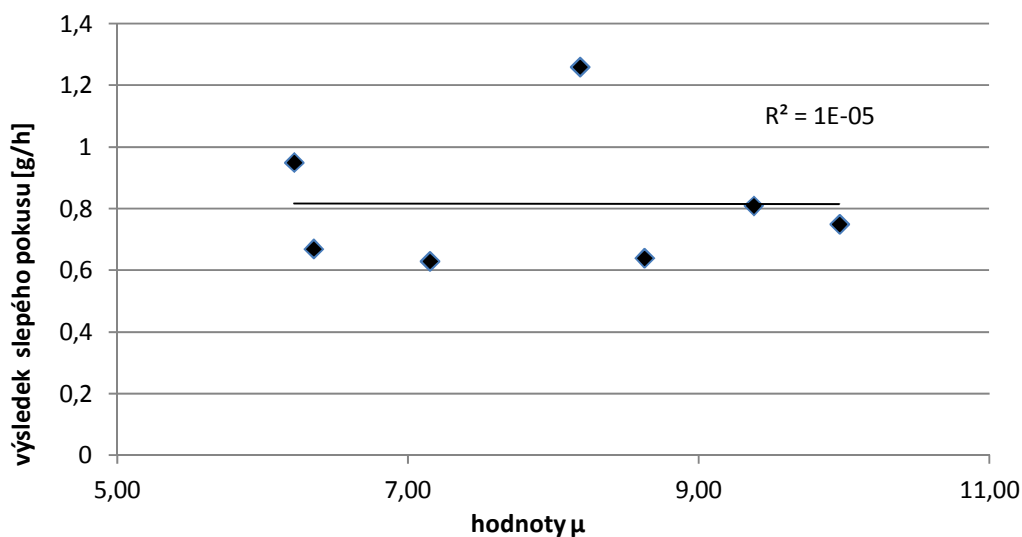


Obr. 4.2.8. Průměrné hodnoty faktoru difúzního odporu μ jednotlivých šálků pro všechna měření (do vztahů dosazeny plochy S_{svrch}) – hodnoty přiděleny umístění šálků v klimakomoře. Větrací zařízení je v klimakomoře umístěno v horní části obrázku.

Pro podrobnější vyšetření, jak moc je měření ovlivněno nehomogenitami uvnitř klimakomory (viz Příloha 1), jsem ještě vytvořil tabulku Tab. 4.2.7., ve které uvádím průměrné hodnoty μ ze všech měření a výsledek slepého pokusu pro danou oblast klimakomory v gramech vypařené vody za hodinu při relativní vlhkosti vzduchu 50 % (více viz Příloha 1). Pokud nějaké umístění šálku nebylo dostatečně pokryto slepým pokusem, tento vzorek jsem pro tato zjištění nepoužil. Vztah mezi hodnotami μ a výsledky slepého pokusu demonstrují také v grafu Obr. 4.2.9. Jelikož je mezi oběma proměnnými velice nízká hodnota spolehlivosti R^2 (10^{-6} pro lineární regresi, $2 \cdot 10^{-4}$ v případě exponenciální regrese), zdá se, že rozdílné hodnoty μ pro jednotlivé šálky nejsou způsobeny rozdílným výparem v klimakomore, a odpovídají tak vlastnostem materiálů. Z pokusů se slepými vzorky jsem navíc zjistil, že ve spodním patře klimakomory vzdálenost vzorku od větracího zařízení nehraje roli (viz Příloha 2).

Tab. 4.2.7. Průměrné hodnoty μ vybraných vzorků a přiřazené výsledky slepého pokusu [g/h].

vzorek	průměr μ	slepý vzorek	slepý pokus [g/h]
158	6,22	S26	0,95
9/34	8,18	S27	1,26
9/21 A	9,97	S29	0,75
9/24 A	9,38	S31	0,81
104	8,62	S33	0,64
11/15	6,35	S34	0,67
43	7,15	S28	0,63



Obr. 4.2.9. Průměrné hodnoty μ vybraných vzorků (horizontální osa) a přiřazené výsledky slepého pokusu [g/h] pro RH 50 % (vertikální osa). Mezi oběma proměnnými není těsný vztah.

Nejprve se věnuji první sadě vzorků.

Šálky s puklinovými plochami a vyvinutou biokrustou (dále PP+BIO) vykazují v rámci jednotlivých měření vysoké nehomogenity (Tab. 4.2.8.). Průměr hodnoty μ pro všechna měření se u jednotlivých vzorků pohybuje od 5,6 do 10,0 μ (Tab. 4.2.8.), průměr pro všechny vzorky PP+BIO a všechna měření je 7,7 μ .

Tab. 4.2.8. Hodnoty μ pro jednotlivá měření na vzorcích PP+BIO (s puklinovou plochou).

vzorek režim	1a μ	1b μ	1c μ	2 μ	3 μ	průměr μ
11/15	9,09	6,75	6,18	5,38	4,34	6,35
43	8,18	7,37	6,49	6,96	6,73	7,15
68	6,59	5,28	4,98	4,81	6,34	5,60
9/21 A	11,31	9,47	9,79	7,37	11,89	9,97
9/24 A	8,41	9,14	8,35	8,86	12,12	9,38
směr. odch.	1,54	1,55	1,70	1,45	3,14	
průměr	8,72	7,60	7,16	6,68	8,29	7,69

Obdobně uvádím výsledky i pro vzorky s biokrustou (dále BIO) (Tab. 4.2.9.). Průměr hodnoty μ pro všechna měření se u jednotlivých vzorků pohybuje od 8,2 do 8,6 μ , průměr pro vzorky BIO pro všechna měření je 8,4 μ (Tab. 4.2.9.).

Tab. 4.2.9. Hodnoty μ pro jednotlivá měření na vzorcích BIO.

vzorek režim	1a μ	1b μ	1c μ	2 μ	3 μ	průměr μ
104	8,50	8,16	8,55	8,98	8,93	8,62
9/34	8,70	7,96	7,78	7,81	8,66	8,18
směr. odch.	0,10	0,10	0,39	0,58	0,14	
průměr	8,60	8,06	8,17	8,39	8,79	8,40

Ačkoliv se materiály s PP+BIO jeví v průměru jako lépe propustné pro vodní páru, nepovažuji tento závěr za věrohodný – vzorků s PP+BIO bylo k vypočítání průměru použito 5 a vzorky s BIO pouze 2. V případě použití pouze dvou vzorků s PP+BIO (9/21 A, 9/24 A) by průměrná hodnota μ vyšla 9,7 což by naopak naznačovalo, že lépe propustné pro vodní páru jsou vzorky s BIO. V Tab. 4.2.8. je také patrný vysoký rozptyl hodnot vzorků s PP+BIO. Předpokládám proto, že nehomogenity materiálu převyšují rozdíly mezi typy povrchu, čemuž napovídají i výsledky jednotlivých měření (Tab. 4.2.1aS. – Tab. 4.2.3S.).

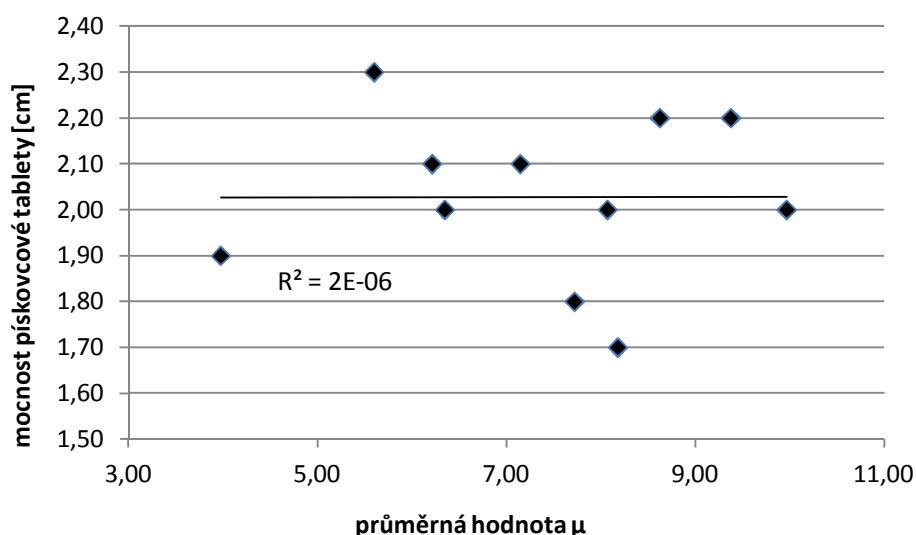
V několika případech jsem srovnal paropropustnost vzorků z povrchu pískovce s paropropustností vzorků odebraných několik cm pod povrchem – z jejich podloží (Tab. 4.2.10.). Protože u jednoho z těchto vzorků došlo při režimu měření 3 k chybě, uvádím průměr hodnot μ pro tyto vzorky pouze pro režimy 1a – 2. Ačkoliv vzorky odebrané z povrchu měly na své svrchní podstavě puklinovou plochu, mezi hodnotami μ pro vzorky odebrané z povrchu a z podloží není prakticky žádný rozdíl (Tab. 4.2.10.). To naznačuje, že tenká puklinová plocha není schopna klást páře významný odpor.

Tab. 4.2.10. Mezi hodnotami μ pro vzorky odebrané z povrchu výchozu a z jejich podloží není velký rozdíl.

úroveň odběru	1a μ	1b μ	1c μ	2 μ	průměr μ
povrch	9,86	9,30	9,07	8,11	9,09
podloží	8,74	8,49	8,11	8,63	8,49
rozdíl	1,12	0,81	0,96	0,52	0,59

Pro druhou sadu vzorků (Tab. 4.2.4S.) platí, že rozdíly mezi různými materiály nejsou z hlediska paropropustnosti příliš vysoké. Vzorky s biokrustou mají průměrnou hodnotu součinitele difúzního odporu 6,0 μ , vzorky odebrané z podloží 5,8 μ a ostatní vzorky označené PRIR 6,3 μ (Tab. 4.2.4S.).

Pomocí grafu Obr. 4.2.11. demonstrují, že neexistuje těsná závislost mezi mocností pískovcové tablety d a průměrem hodnoty μ pro vzorky ze všech měření. Hodnota spolehlivosti R^2 dosahuje hodnoty $2 \cdot 10^{-6}$. Výsledky tedy nejsou ovlivněny mocností d , a lze proto usuzovat, že metoda je plně použitelná pro zvolený rozsah mocností pískovcových jader 1-6 cm.



Obr. 4.2.11. Neexistuje těsná závislost mezi průměrem hodnoty μ pro vzorky ze všech měření a mocností vzorku d .

Z výsledků tak usuzují, že propustnost různých typů hruboskalských pískovců pro vodní páru nevykazuje výrazné odlišnosti. U šáleků nemá na rychlost difúze vodní páry skrz pískovcové jádro prokazatelný vliv, zda je na výparné ploše krusta či ne.

Z hustoty křemene ($2,65 \text{ g.cm}^{-3}$, Čmelík et al. 2001), průměrné objemové hmotnosti vzorků (viz kapitola 3.5., pro výpočet zjednodušeno na $1,9 \text{ g.cm}^{-3}$) a průměrné hodnoty μ pro všechny šálky a všechna měření jsem zjistil, že zdánlivá tortuozita (poměr skutečné dráhy pohybu vodních par a přímé dráhy) hruboskalského pískovce je okolo 2,1.

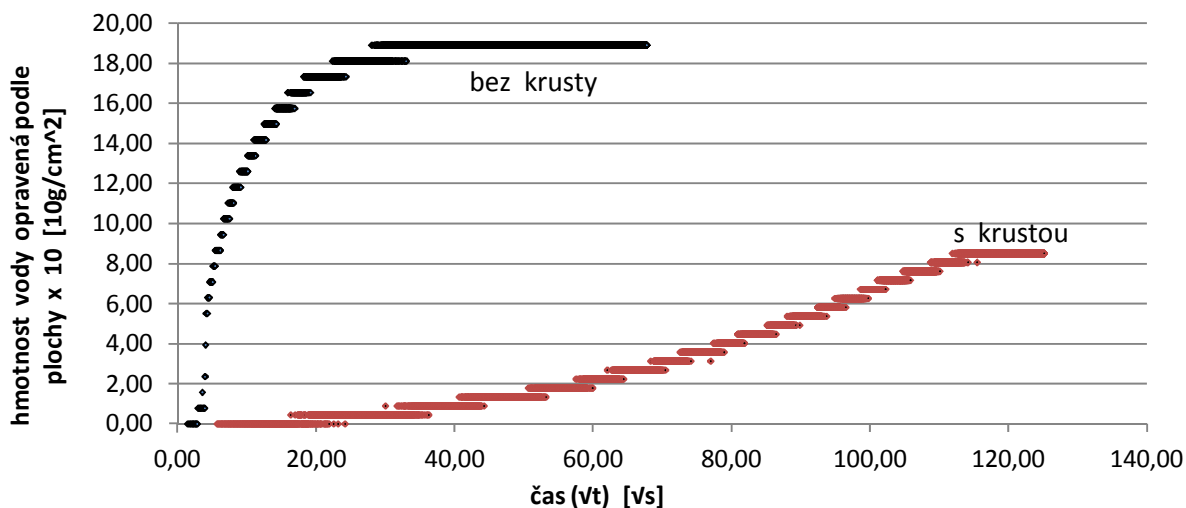
4.3. Saturace pískovcových válců vlivem kapilárního nasákávání

U 12 vzorků pískovce jsem zjišťoval rychlost saturace vodou v kapalné formě vlivem kapilárního nasákávání. U jednoho ze vzorků došlo při měření k chybě, takže dále porovnávám výsledky pro 11 vzorků.

Na základě metodiky uvedené v kapitole 2.12. jsem u 6 vzorků (55 %) zjistil, že pokud dochází k saturování pískovcového válce skrz svrchní podstavu (přes krustu), je rychlost saturace výrazně pomalejší (viz Tab. 4.3.1.) než v případě, kdy dochází k saturování skrz spodní podstavu. Pro 4 vzorky (36 %) bylo maximální možné saturace skrz obě podstavy dosaženo přibližně ve stejný okamžik, naopak u jednoho válce došlo k dosažení maximální možné saturace dříve (cca 5x rychleji) v případě, kdy saturace probíhala skrz svrchní podstavu (viz Příloha 2).

U 7 vzorků (64 %) v případě saturace skrz svrchní podstavu (přes krustu) lze vývoj hodnoty w v prostředním úseku měření vyjádřit konvexní či lineární funkcí, zatímco v případě saturování skrz spodní plochu bez krusty se jedná spíše o konkávní funkci (viz níže). Pokud materiál vykazuje tuto charakteristiku, uvádím dále, že u tohoto vzorku je patrný „charakteristický trend“. U 3 vzorků (27 %) charakteristický trend patrný není, vývoj hodnot w je pro tyto vzorky obdobný skrz obě podstavy. Jeden válec vykazoval přesný opak trendu, kdy vývoj křivek byl oproti charakteristickému trendu pro svrchní a spodní podstavu prohozen (Příloha 2).

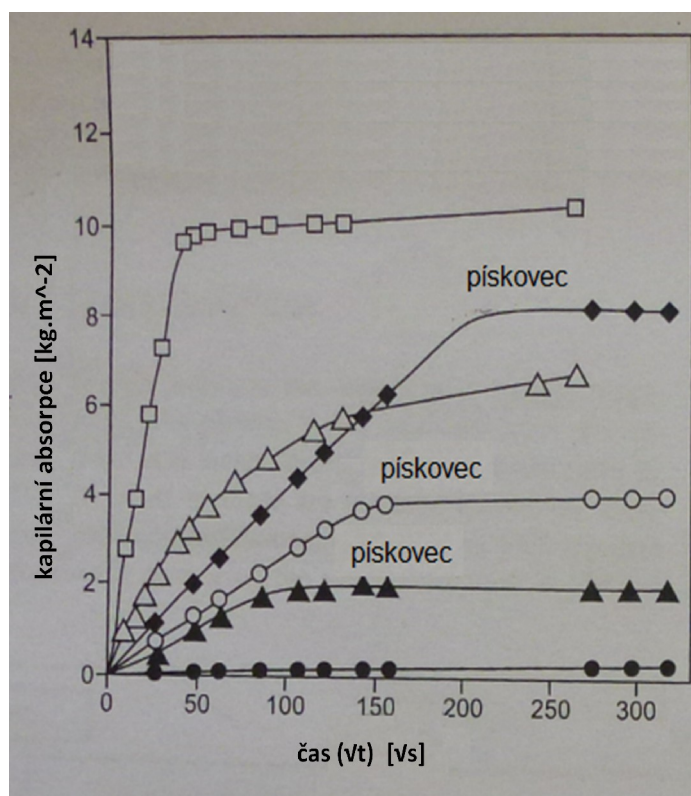
Jako příklad vývoje nasákávání uvádím vzorek 9/6 (Obr. 4.3.1.), u kterého je dobře patrné, jaký je rozdíl mezi způsobem saturace skrz plochu s krustou (červené body) a skrz plochu bez krusty (černé body). Hodnota P je u tohoto vzorku 6,4 % (viz Tab. 4.3.1.). Tento vzorek vykazuje charakteristický trend.



Obr. 4.3.1. Hodnoty w pro vzorek 9/6. Rychlost saturace je skrz krustu (červené body) výrazně pomalejší než přes plochu bez krusty (černé body). Vývoj hodnot w je pro měření „bez krusty“ možné vyjádřit konkávní funkcí, pro měření „s krustou“ konvexní funkcí (vzorek vykazuje charakteristický trend).

Obdobné grafy pro zbývajících 11 vzorků uvádím v Příloze 2.

Siegesmund a Dürrast (2011) uvádějí, že vývoj hodnot w se dá v grafu rozdělit do dvou dílčích částí, kde první část je vyjádřitelná lineární funkcí a druhá část vykazuje plochý tvar („plateau - style shape“), kdy hodnoty na vertikální ose již v čase rostou velice pomalu (Obr. 4.3.2.). Tomuto poznatku plně odpovídá pouze malé množství mých měření – pro mé výsledky by bylo vhodnější rozdělit grafy do tří částí, kdy první část je nejstrmější (nasákávání je nejrychlejší) a teprve druhá část u vybraných vzorků vykazuje lineární (či konvexní) průběh (viz Příloha 2). Třetí část mých měření je shodná s druhou částí grafu uváděnou Siegesmundem a Dürrastem (2011). Absenci první, nejstrmější části ve výsledcích těchto autorů si vysvětluji jejich delším krokem měření (viz Obr. 4.3.2.), kvůli čemuž tuto pouze několik desítek vteřin trvající fázi nejrychlejší absorpce nepostihli.



Obr. 4.3.2. Podle autorů Siegesmunda a Dürrasta (2011) lze vývoj hodnot w rozdělit do dvou dílčích částí, z nichž první je lineární a druhá vykazuje plochý tvar („plateau - style shape“). Graf převzat z Siegesmund a Dürrast (2011).

Protože na vertikální ose je okamžitá hmotnost vzorku opravená podle velikosti plochy, přes kterou dochází k saturaci, a z důvodu, že pro spodní a svrchní podstavu téhož vzorku se velikost obou ploch liší (rozdíl 5-51 %), nelze maximální hodnotu w vzájemně porovnávat za účelem rozpoznání nasáknutého množství vody. Porovnání rozdílů mezi množstvími nasáknuté vody skrz obě podstavy (hodnota R , viz kapitola 2.12.) uvádím v tabulce Tab. 4.3.1., ve které také uvádím velikost obou ploch (S_{svrch} , S_{spod}).

Tab. 4.3.1. Vzorky, typ jejich povrchu, lokalita odebrání a velikosti ploch podstav (S_{svrch} pro svrchní podstavu, S_{spod} pro spodní podstavu), hodnoty R (rovnice 2.12.2 v kapitole 2.12.) a hodnoty P (rovnice 2.12.2 v kapitole 2.12.). Pokud je hodnota R vyšší než 100 %, je maximální množství nasáknuté vody skrz svrchní podstavu vyšší, a naopak když je hodnota R nižší než 100%, více vody se nasákne skrz spodní podstavu. Čím více je hodnota P vzdálena od 100 %, tím větší je rozdíl v čase potřebném k dosažení plné saturace vzorku skrz obě podstavy. Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Drábovna DRV, Malobratřice MBR). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	lokalita	povrch	pozn.	hodnota P [%]	hodnota R [%]	Ssvrch [cm ²]	Sspod [cm ²]	rozdíl ploch [%]	trend
9/44	STR1	BIO		79	82	11,42	9,10	20,32	ano
9/4	MLD1	PRIR	zvětralý	41 (poškozen)	125 (poškozen)	14,94	13,08	12,45	-
9/5	MLD1	PRIR		23	110	23,83	17,91	24,84	ne
9/32	STR3	BIO		107	83	21,62	11,12	48,57	ano
9/29	STR1	PP+BIO		88	81	14,76	17,20	16,53	ano
9/28	STR1	PP+BIO	hrubozrný	112	91	19,46	15,91	18,24	opačný
11/54	DRV	PRIR	sol. eroze	nelze	nelze	18,37	17,37	5,44	ano
9/22A	STR1	PP+BIO		72	107	20,81	21,93	5,38	ano
9/22B	STR1	SPOD		57	92	21,80	16,78	23,03	ne
955/1	MBR1	PRIR	biokr., hrub.	21	117	12,19	15,40	26,33	ne
9/6	MLD1	PP+PRIR		6	126	22,78	12,95	43,15	ano
9/9	MLD2	PRIR	voštiny	495	33	23,57	11,59	50,83	ano

V tabulce Tab. 4.3.2. uvádím u vzorků hodnoty Tw [s] a pakliže je to možné, také zatřídění vzorku podle Siegesmunda a Dürrasta (2011, viz Tab. 2.12.1.).

Tab. 4.3.2. Vzorky, typ jejich povrchu, lokalita odebrání a Tw (čas prvního objevení vlhké fronty na opačné straně vzorku), hodnoty w a zatřídění materiálu podle propustnosti. Názvy lokalit uvádím zkratkami (Střeleč STR, Mladějov MLD, Drábovna DRV, Malobratřice MBR). Typ povrchu uvádím pomocí zkratk: PP je puklinová plocha, BIO biokrusta, SPOD je jádro podložního pískovce, PRIR přírodní povrch pískovce.

vzorek	lokalita	povrch	pozn.	Tw [s] pro S_{svrch}	hodnota w pro 1. hodinu skrz S_{svrch} [kg.m ⁻² .h]	zatřídění pro S_{svrch}	Tw [s] pro S_{spod}	hodnota w pro 1. hodinu skrz S_{spod} [kg.m ⁻² .h]	zatřídění pro S_{spod}
9/44	STR1	BIO		500	-	-	300	-	-
9/4	MLD1	PRIR	zvětralý	250	-	-	170	-	-
9/5	MLD1	PRIR		5100	1,71	střední absorpce	1720	5,13	silná absorpce
9/32	STR3	BIO		363	-	-	550	-	-
9/29	STR1	PP+BIO		670	17,27	silná absorpce	650	18,38	silná absorpce
9/28	STR1	PP+BIO	hrubozrný	880	9,43	silná absorpce	2000	12,82	silná absorpce
11/54	DRV	PRIR	sol. eroze	nezjišťováno	-	-	nezjišťováno	-	-
9/22A	STR1	PP+BIO		nezjišťováno	-	-	nezjišťováno	-	-
9/22B	STR1	SPOD		nezjišťováno	-	-	nezjišťováno	-	-
955/1	MBR1	PRIR	biokr., hrub.	nezjišťováno	5,02	silná absorpce	nezjišťováno	-	-
9/6	MLD1	PP+PRIR		7600	2,24	střední absorpce	nezjišťováno	18,90	silná absorpce
9/9	MLD2	PRIR	voštiny	nezjišťováno	2,3	střední absorpce	nezjišťováno	15,84	silná absorpce

U všech jemnozrných materiálů s PP (puklinovou plochou) je patrný trend tvaru funkcí. Hrubozrný materiál s PP v podobě vzorku 9/28 nevykazuje trend – naopak je zde trend pro obě podstavy opačný (Příloha 2).

V případě vzorků s biokrustou, které nejsou hrubozrné, je charakteristický trend patrný u 2 vzorků ze 3 (66 %). Do této skupiny řadím i vzorek 9/6, jehož povrch je hustě pokryt řasami. Hrubozrný materiál s biokrustou v podobě vzorku 955/1 nevykazuje trend.

V případě vzorků s PP je s nejvyšší pravděpodobností přítomna i biokrusta (Bruthans 2014, úst. sdělení). Za tohoto předpokladu se vzorky s biokrustou chovají podobně, ať už je na nich vyvinuta

puklinová plocha či nikoliv. Z celkového počtu 8 vzorků s biokrustou vykazuje charakteristický trend 5 vzorků, v případě jemnozrných materiálů s biokrustou je trend přítomný u 5 vzorků z 6 (83 %). Z celkového počtu 7 vzorků s charakteristickým trendem je 5 (71 %) tvořeno materiálem s biokrustou či PP.

Concha-Lozano et al. (2012) uvádějí, že některé biokrusty mohou mít těsnící účinek a zpomalují vstup vody do porézního prostředí kapilárním nasákáváním. Tím pádem jejich působením dochází k redukování transportu rozpustných solí vlivem difúze.

Siegesmund a Dürrast (2011) tvrdí, že rychlejší kapilární absorpce nastává tehdy, když jsou póry větší, a pomalejší, když jsou póry menší. Pokud je ale migrační cesta (kapilára) někde porušená, menší póry absorbují vodu z větších pórů díky svému vyššímu sacímu tlaku. Poté je to přesně naopak a v nejmenší kapiláře vystoupá za čas voda nejvýše, protože do sebe bude stahovat vodu z širších kapilár (Siegesmund a Dürrast 2011). Ukazuje se tedy, že hrubozrnější materiály se řídí jinými pravidly než jemnozrné, a to jak v rychlosti nasákávání (Siegesmund a Dürrast 2011), tak v jejím vývoji v závislosti na již nasáknutém množství vody.

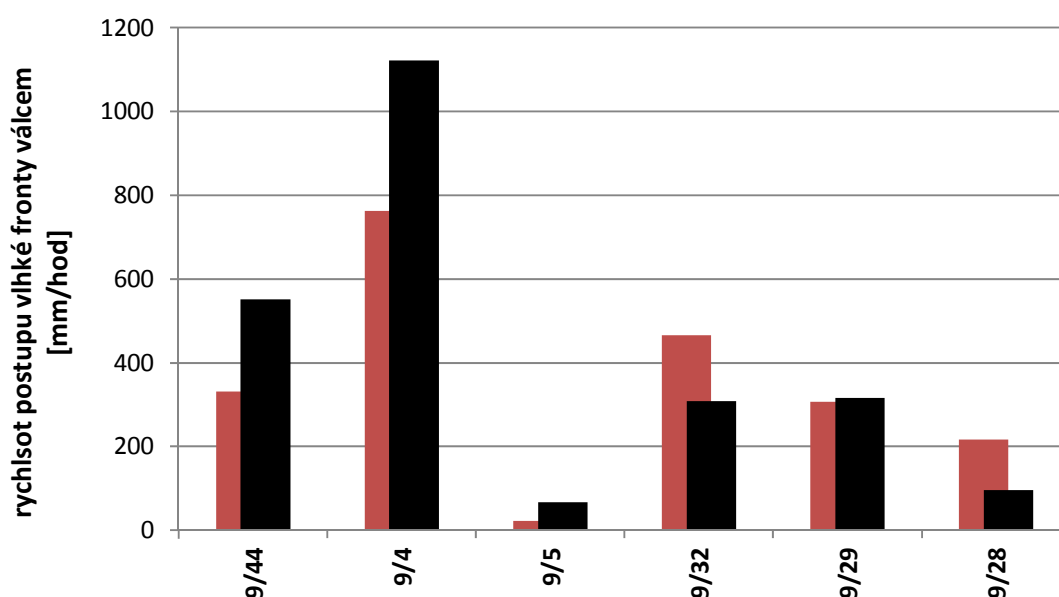
Charakteristický trend byl přítomen také u dvou vzorků bez puklinové plochy či biokrusty. Prvním takovým vzorkem je válec 11/54, na jehož povrchu (svrchní podstavě) je patrna destrukční činnost solí. Druhým takovým vzorkem je válec 9/9, na jehož svrchní podstavě jsou vyvinuty voštiny, přičemž platnost trendu pro nasákání skrz tuto podstavu je sporná (viz Příloha 2), jelikož v první části měření byl vývoj hodnot w příliš strmý a nelze s určitostí tvrdit, že je lineární. Nicméně v případě vzorku 11/54 je trend v obou případech jednoznačný a důvod pro jeho přítomnost v tomto druhu materiálu (povrch se solnou erozí) zůstává otevřenou otázkou.

Trend kromě výše zmíněného válce 955/1 nebyl přítomen u vzorku 9/22 B, který byl odebrán z podloží, a vzorku 9/4 odebraného ze silně zvětralého povrchu.

Ze 7 vzorků s trendem pouze 2 vzorky (29 %) vykazovaly výrazně pomalejší nasákávání skrz svrchní podstavu s krustou. Z celkového počtu 6 válců, u kterých je vidět výrazné opožděné saturování skrz svrchní podstavu, pouze 2 vzorky (33 %) vykazují trend.

Z 6 válců s patrným opožděním jsou 4 (66 %) s biokrustou či PP, 1 vzorek se silně zvětralým povrchem a 1 vzorek odebraný z podloží. Z 5 válců, u kterých není patrné opoždění, mají 3 (60 %) na svém povrchu vyvinutou biokrustu či puklinovou plochu. Ze 4 jemnozrných válců bez opoždění jsou 2 (50 %) s biokrustou či PP.

Na grafu Obr. 4.3.3. na základě časů prvního objevení vlhké fronty na opačné straně vzorku Tw a mocnosti vzorku d porovnávám rychlost postupu vlhké fronty pískovcovým válcem [mm/hod].



Obr. 4.3.3. Porovnání rychlosti postupu vlhké fronty válcem pro jednotlivé vzorky a obě jejich podstavy. Rychlost migrace od svrchní podstavy ke spodní je v grafu znázorněna červenými sloupci, rychlost migrace od spodní podstavy ke svrchní černými sloupci.

Z 10 válců, u kterých lze zjistit hodnotu R , jich 6 (60 %) vykazuje vyšší maximální množství nasáknuté vody v případě nasákávání skrz spodní podstavu. Pouze 40 % vzorků vykazuje maximální množství nasáknuté vody v případě nasákávání skrz svrchní podstavu.

Hodnoty w pro první hodinu nasákávání se u mých vzorků pohybují od $1,71 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}$ do $18,90 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}$ (Tab. 4.3.2.). Jedná se o materiály dobře absorbující vodu vlivem kapilárního nasákávání, všechny zatříděné vzorky se v případě nasákávání skrz spodní podstavu řadí mezi materiály se silnou absorpcí, v případě nasákávání skrz svrchní podstavu se 50 % sledovaných vzorků řadí do kategorie materiálu se střední absorpcí a 50 % se silnou absorpcí. Výsledky mohou být v malé míře ovlivněny nerovnostmi povrchu svrchní podstavy, při měření jsem však dával pozor, aby celá plocha byla v kontaktu s vodní hladinou pouze adhezními silami vody.

Podle Siegesmunda a Dürrasta (2011) jsou hodnoty w pro žulové materiály či mramor nižší než $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}$, „Globigerine“ vápence z Malty dosahují hodnot w $7,8 - 15,0 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}$ (Ruedrich et al. 2005) a běžné pískovce používané ve stavebnictví dosahují hodnot w od $0,1$ do $9,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}$ (Szilagyí 1995). Nejvyšší hodnoty w , kterých mohou materiály dosáhnout, se pohybují až kolem $70 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}$ (Siegesmund a Dürrast 2011). Hruboskalské pískovce tedy patří k materiálům vykazujícím nadprůměrné hodnoty w .

Všechny výše uvedené poznatky poukazují na to, že materiály, jejichž povrch tvoří puklinová plocha či biokrusta (tedy zóny s menšími póry a s vysokou četností houbových vláken lišejníků v pórech), mají vyšší tendenci vykazovat tzv. „charakteristický trend“, kdy rychlost kapilárního nasákávání skrz

tyto zóny se zvyšuje v čase (resp. s množstvím nasáknuté vody a postupem zvlhčené fronty vzorkem vzhůru), než vzorky bez těchto zón. Zdá se, že materiály mají také vyšší tendenci k opožděnému nasákávání skrz puklinovou plochu/biokrustu než skrz podložní materiál. Oba jevy mohou být způsobeny vodoodpudivostí povrchu houbových vláken. Nelze také vyloučit platnost obecného pravidla, že s rostoucí hloubkou od povrchu pískovce roste jeho propustnost pro kapilární nasákávání.

Tato zjištění jsou důležitá z toho důvodu, že některé porézní materiály při dešti absorbují kapilárním vztlínáním vodu podobně, jako kdyby byly v kontaktu s podzemní vodou. Jedná se o spontánní proces řízený kapilární absorpční silou (v anglicky psané literatuře „capillary absorption force“). Je to výsledek rovnováhy mezi povrchovým napětím vody a absorpčními silami stěn pórů, na kterých má voda specifický úhel smáčení, který vede k tendenci smáčet porézní systém a vstupovat do něho, a nastává tak kapilární sukce. Mechanismus závisí převážně na velikosti pórů a geometrii porézního systému (Siegismund a Dürrast 2011). Lze tedy očekávat, že při kratším dešti v řádu prvních hodin dojde díky přítomnosti biokrusty či kombinace biokrusty a puklinové plochy k zasáknutí menšího množství vody do takovýchto povrchů než v případě holého pískovce.

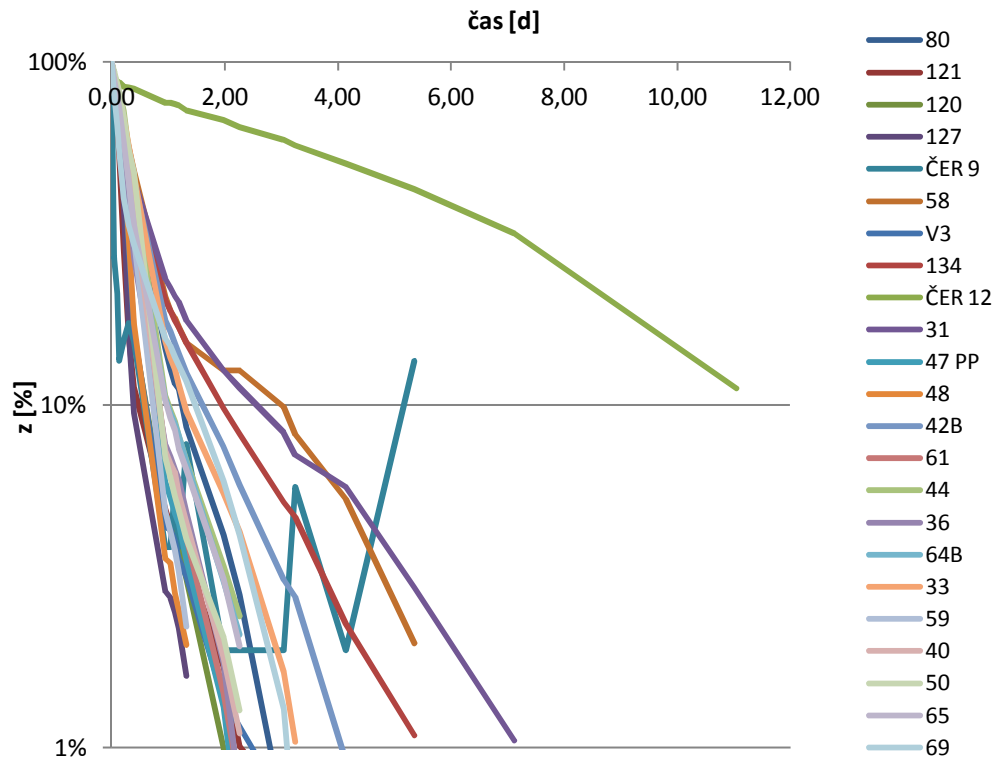
4.4. Výpar z pískovcových tablet v klimakomoře

Pro zjištění pravidel, kterými se řídí výpar z pískovců, jsem využil metodiku z kapitoly 2.7.

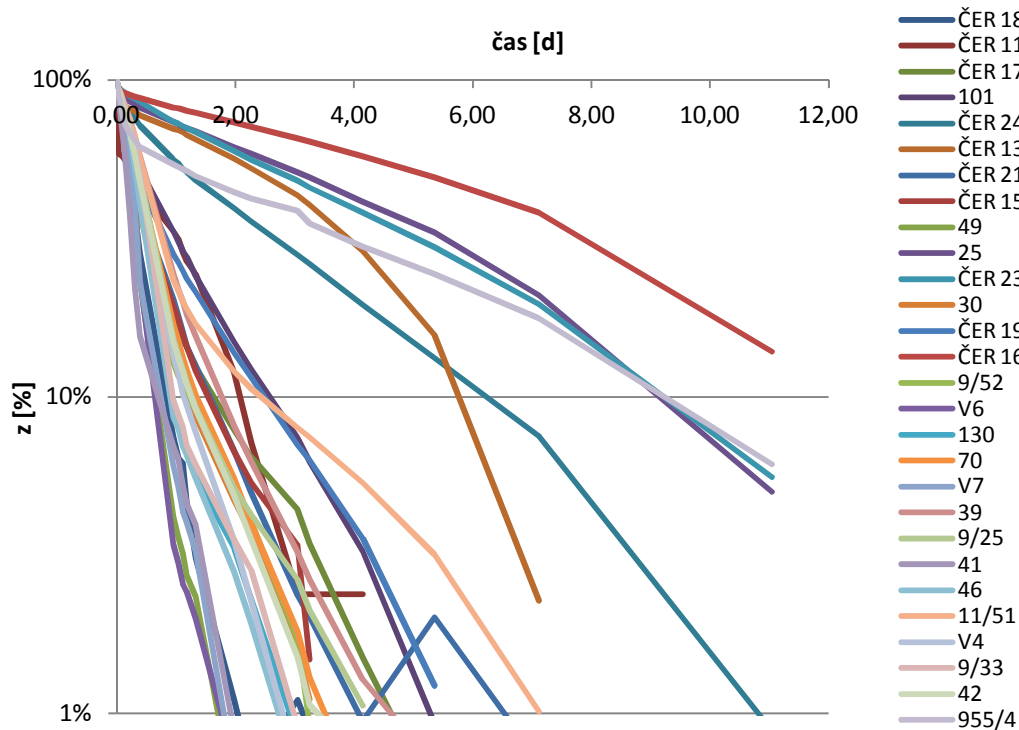
Na počátku této kapitoly uvádím postupně pro jednotlivé režimy měření grafy, které znázorňují výpar z pískovců v čase. Na horizontální ose figuruje čas [d] a na vertikální ose hodnota z (viz rovnice 2.7.1 v kapitole 2.7.). Hodnotu z udávám v procentech, kdy 100 % značí hmotnost tablety na počátku měření (m_{sat}) a hodnota z se poté v čase snižuje směrem k $z = 0$ %. V případě, kdy se hodnota m blíží hodnotě m_2 , se hodnota z blíží 0 %. Jelikož se jedná o logaritmus, pro který nula není definována, do grafů je možné vynášet hodnoty z jen v intervalu <100 %; 0 %).

Graf znázorňující výpar z pískovcových tablet při režimu RH 50 % a T 20 °C uvádím v Obr. 4.4.1a., Obr. 4.4.1b. (pro první měření za tohoto režimu, kdy účinnost větracího zařízení v klimakomoře byla nastavena na 75 %) a Obr. 4.4.2a., Obr. 4.4.2b. (pro druhé měření za tohoto režimu, kdy účinnost větracího zařízení v klimakomoře byla již nastavena na 100 %). První graf měření (označený vždy „a“) se vztahuje k tabletám umístěným v horním patře klimakomory, druhý graf označený vždy „b“ je vztážen k tabletám umístěným v prostředním patře klimakomory.

Na Obr. 4.4.1a. je vidět zdánlivé zpětné zvyšování hodnoty z vzorku ČER 9 (azurová křivka), které je způsobeno malým rozdílem mezi m_{sat} a m_2 (pouze 4,3 g) – chyba měření má proto v tomto případě na celkové hodnotě z procentuálně vyšší zastoupení, ačkoliv celková váha vzorku m se od cca $t = 1$ d do konce měření měnila jen o 0,07 g. Toto obdobně platí i pro vzorek ČER 21 na grafu Obr. 4.4.1b. (tmavě modrá křivka). Pro další měření již tuto skutečnost nekomentuji.

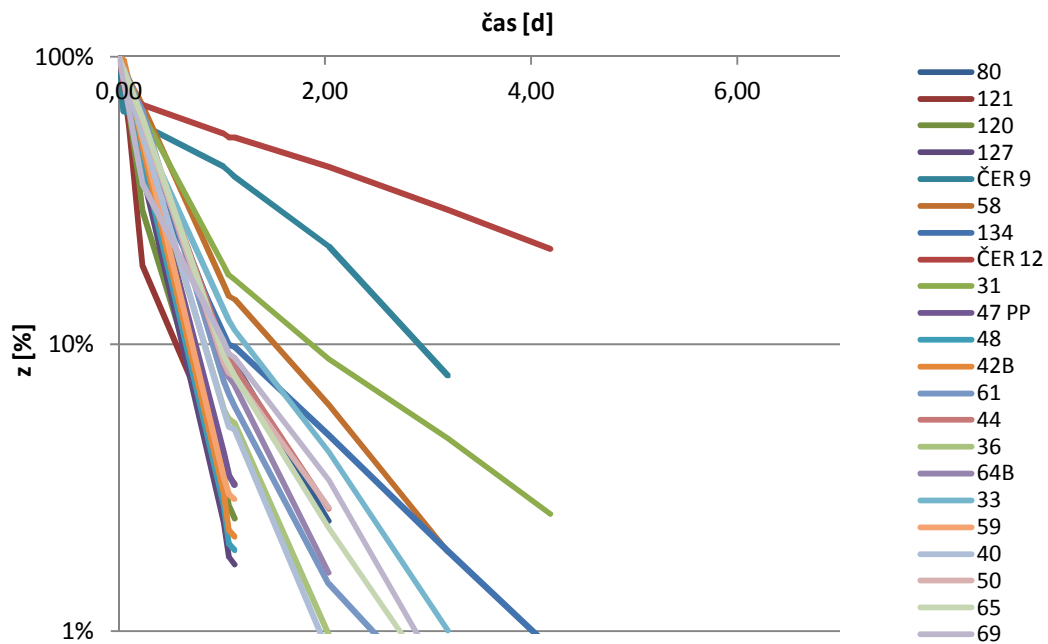


Obr. 4.4.1a. Výpar z pískovcových tablet v horním patře klimakomory při režimu RH 50 % a T 20 °C. Účinnost větracího zařízení je v tomto případě nastavena na 75 %. Hodnota $z = 100\%$ odpovídá m_{sat} a v průběhu měření se limitně blíží k hodnotě $z = 0\%$.

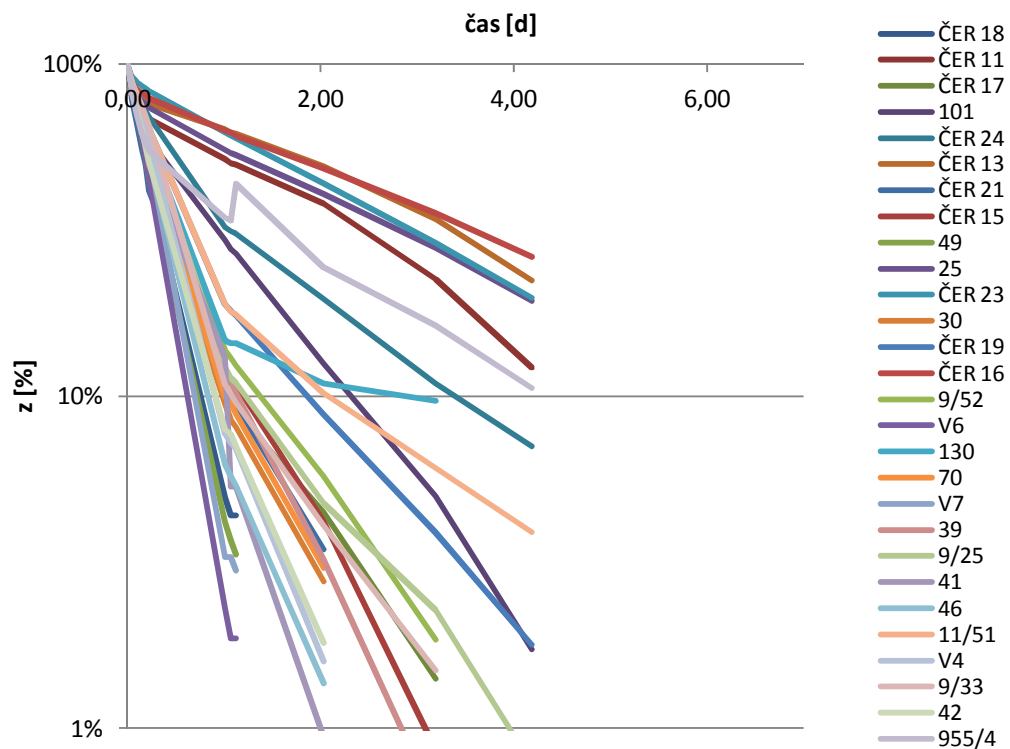


Obr. 4.4.1b. Výpar z pískovcových tablet v prostředním patře klimakomory při režimu RH 50 % a T 20 °C. Účinnost větracího zařízení je v tomto případě nastavena na 75 %. Hodnota $z = 100\%$ odpovídá m_{sat} a v průběhu měření se limitně blíží k hodnotě $z = 0\%$.

Při měření v režimu RH 50 %, T 20 °C a účinnosti větracího zařízení 75 % jsem použil 51 pískovcových tablet. Použil jsem data z 21 měření.



Obr. 4.4.2a. Výpar z pískovcových tablet v horním patře klimakomory při režimu RH 50 % a T 20 °C. Účinnost větracího zařízení je v tomto případě nastavena na 100 %. Hodnota $z = 100\%$ odpovídá m_{sat} a v průběhu měření se limitně blíží k hodnotě $z = 0\%$.

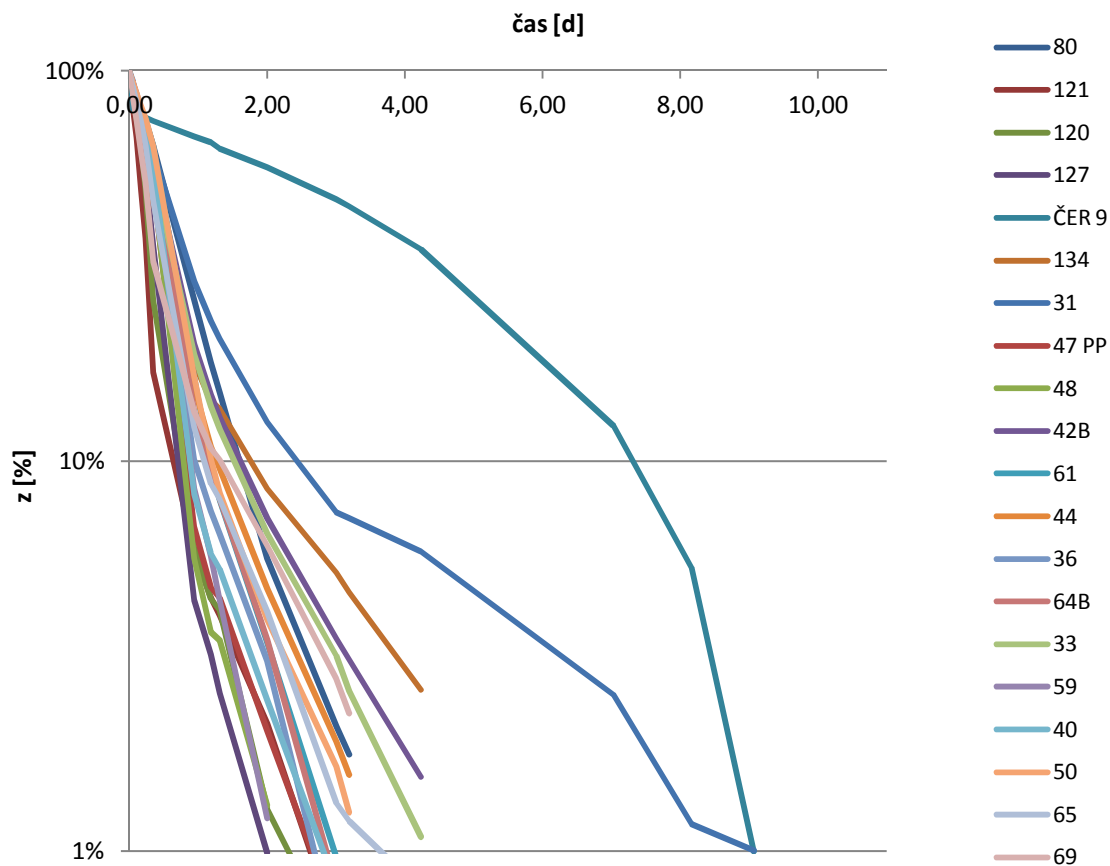


Obr. 4.4.2b. Výpar z pískovcových tablet v prostředním patře klimakomory při režimu RH 50 % a T 20 °C. Účinnost větracího zařízení je v tomto případě nastavena na 100 %. Hodnota $z = 100\%$ odpovídá m_{sat} a v průběhu měření se limitně blíží k hodnotě $z = 0\%$.

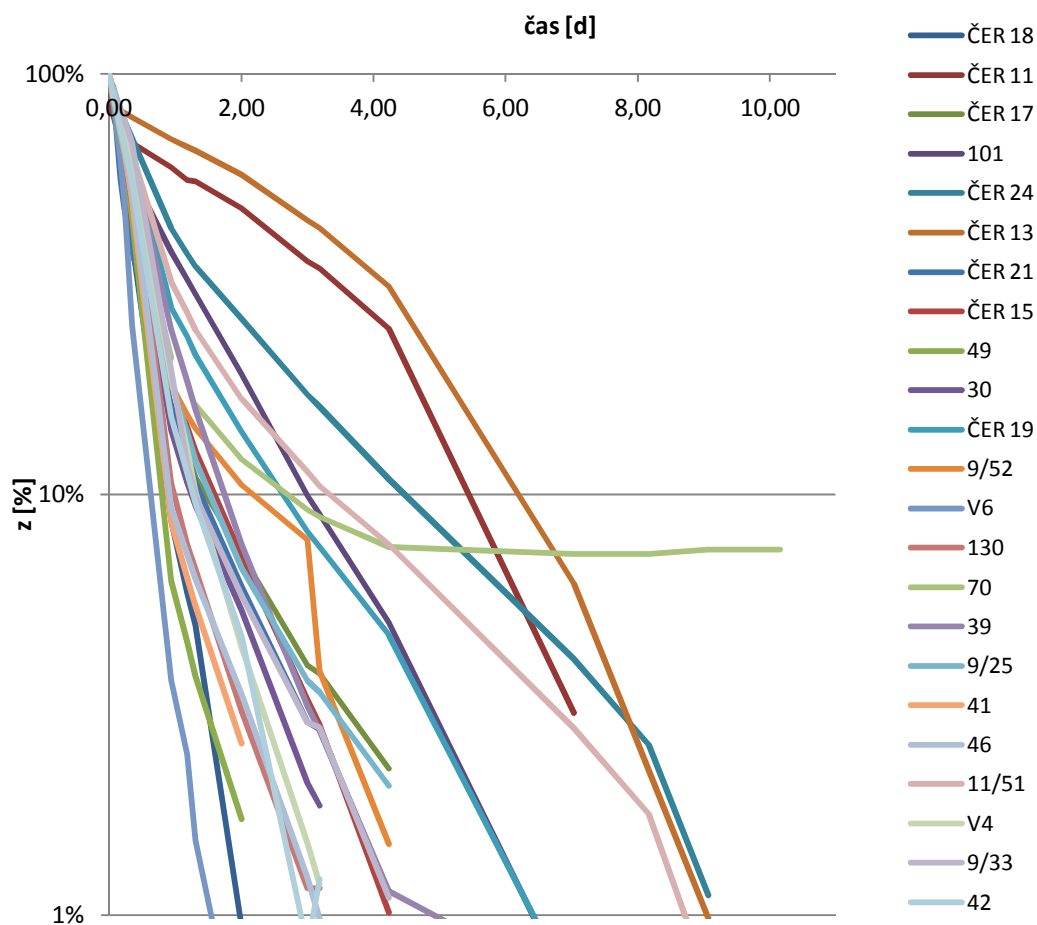
Při režimu nastavení klimakomory RH 50 %, T 20 °C a účinnosti větracího zařízení 100 % jsem použil 50 pískovcových tablet. Použil jsem data z 13 měření.

U zbývajících dvou měření byla účinnost větracího zařízení nastavena na 100 %.

Pro měření v režimu RH 70% a T 20 °C uvádím grafy Obr. 4.4.3a., Obr. 4.4.3b.



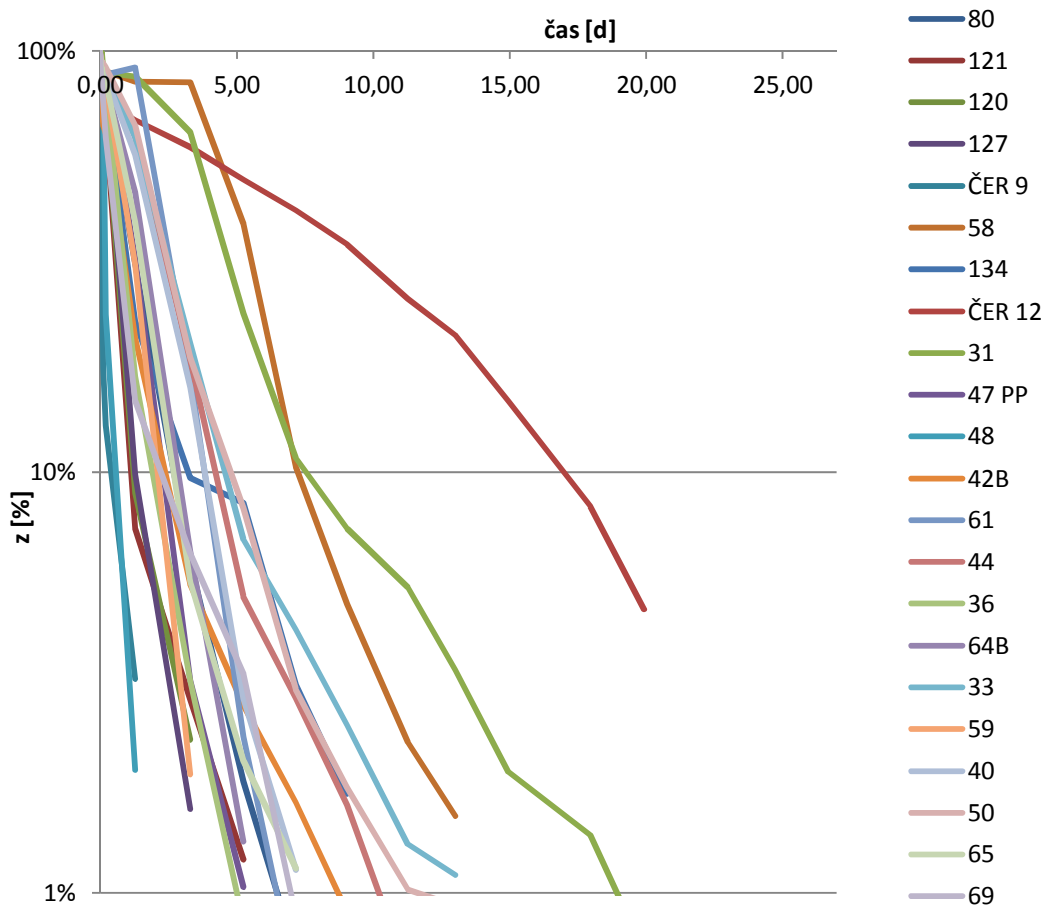
Obr. 4.4.3a. Výpar z pískovcových tablet v horním patře klimakomory při režimu RH 70 % a T 20 °C. Účinnost větracího zařízení je v tomto případě nastavena na 100 %. Hodnota $z = 100\%$ odpovídá m_{sat} a v průběhu měření se limitně blíží k hodnotě $z = 0\%$.



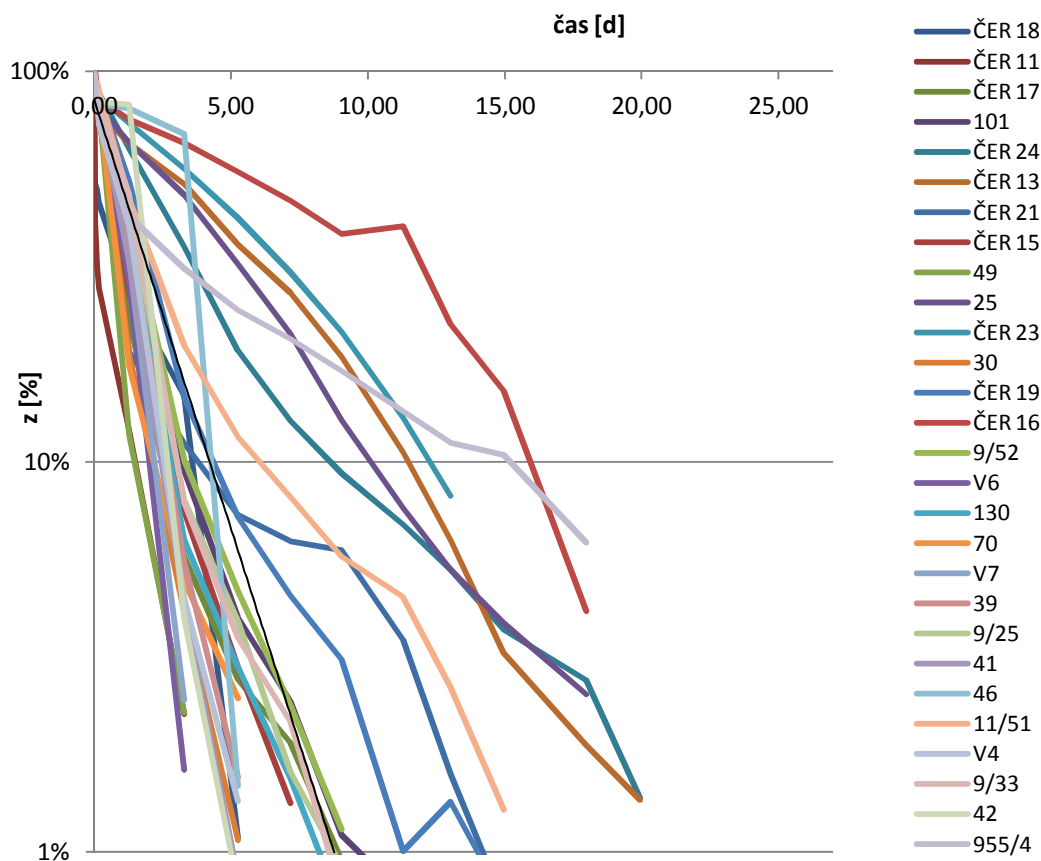
Obr. 4.4.3b. Výpar z pískovcových tablet v prostředním patře klimakomory při režimu RH 70 % a T 20 °C. Účinnost větracího zařízení je v tomto případě nastavena na 100 %. Hodnota $z = 100\%$ odpovídá m_{sat} a v průběhu měření se limitně blíží k hodnotě $z = 0\%$.

Při režimu měření RH 70 %, T 20 °C jsem použil 43 pískovcových tablet. Použil jsem data z 17 měření.

Pro měření v režimu RH 90 % a T 20 °C uvádím grafy Obr. 4.4.4a., Obr. 4.4.4.b.



Obr. 4.4.4a. Výpar z pískovcových tablet v horním patře klimakomory při režimu RH 90 % a T 20 °C. Účinnost větracího zařízení je v tomto případě nastavena na 100 %. Hodnota $z = 100\%$ odpovídá m_{sat} a v průběhu měření se limitně blíží k hodnotě $z = 0\%$.



Obr. 4.4.4b. Výpar z pískovcových tablet v prostředním patře klimakomory při režimu RH 90 % a T 20 °C. Účinnost větracího zařízení je v tomto případě nastavena na 100 %. Hodnota $z = 100\%$ odpovídá m_{sat} a v průběhu měření se limitně blíží k hodnotě $z = 0\%$.

Při měření v režimu RH 90 %, T 20 °C jsem použil 50 pískovcových tablet. Použil jsem data z 17 měření.

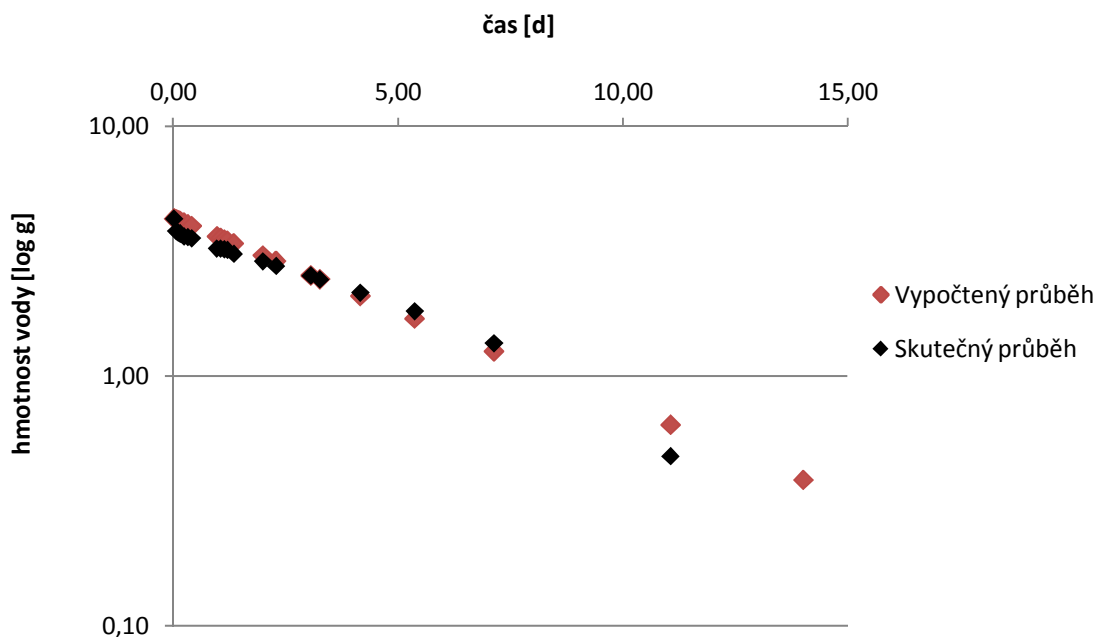
Zjistil jsem, že výpar z pískovcových tablet v klimakomoře lze pro každou tabletu aproximovat exponenciální funkcí, kterou uvádím v rovnici (4.4.2):

$$y = A \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (4.4.2)$$

kde y odpovídá aktuální hmotnosti vody [g] v čase t , A je hmotnost vody [g] na počátku měření (v čase t_0), t je čas [d] uplynulý od počátku měření a α představuje konstantu určující rychlost výparu.

Jako důkaz správnosti tohoto tvrzení přikládám graf (Obr. 4.4.5.), ze kterého je zřetelné, jak moc se toto zjednodušení (červené body) liší od reálného výparu (černé body). Pearsonův korelační koeficient pro tyto dvě řady nabývá hodnoty 0,988. Jedná se o vzorek ČER 12 při režimu měření RH 50 %, T 20 °C a účinnosti větráku 75 %.

Jelikož nelze v rámci diplomové práce prokazovat platnost rovnice (4.4.2) podobným způsobem pro všechny použité vzorky a všechna měření, v Příloze 2 uvádím obdobné grafy pro další 4 vzorky.



Obr. 4.4.5. Znáznornění, jak se od sebe pro vzorek CER 12 liší vypočtené hodnoty (červené body) hmotnosti vody [g] v daném čase podle rovnice (4.5.2) a skutečné hodnoty (černé body) této hmotnosti. Vertikální osa je v logaritmickém měřítku.

Pro danou relativní vlhkost vzduchu a teplotu tak mohu vypočítat hodnotu z i pro čas t , ve kterém jsem nevážil okamžitou hmotnost tablety m , a to pouhým dosazením požadované hodnoty t do rovnice (4.4.2).

V Příloze 2 uvádím pro všechny režimy měření samostatně také bodové grafy, kde na vertikální ose figuruje vlhkost vzorku θ definována podle rovnice (2.7.2) v kapitole 2.7.

Pokud v rovnici (4.4.2) za A namísto hmotnosti vody [g] v čase t_0 dosadím počáteční vlhkost vzorku θ , hodnoty α nabývají stejných hodnot, pouze hodnota A je odlišná.

Tento způsob vyjádření má své výhody i nevýhody. Nevýhodou je zneprůhlednění grafu z toho důvodu, že hodnoty na vertikální ose již všechny nezačínají v jednom bodě ($z = 100\%$).

Výhodu tohoto vyjádření spatřuji v tom, že jelikož jsem schopný změřit vlhkost pískovce θ za přirozeného stavu (viz kapitola 3.5., Svobodová b.r., Sommerová 2014) a také dlouhodobě automaticky měřit RH na dané lokalitě, které je velice blízké 90 % (viz kapitola 4.1.), mohu pouhým dosazením hodnot do rovnice (4.4.3) odhadnout skutečný výpar z porézního prostředí [g/h] in situ. Navíc, za znalosti rychlosti úbytku vody vlivem difúze (viz kapitola 4.2.), mohu tento úbytek hmotnosti rozdělit na výpar a difúzní transport.

$$y = \theta \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (4.4.3)$$

y v rovnici (4.4.3) představuje aktuální hmotnosti vody [g] v čase t , θ reprezentuje počáteční vlhkost vzorku v čase t_0 , t je čas [d] a α je konstanta charakterizující rychlost výparu z daného materiálu za daných podmínek.

Jelikož jsem hodnoty výparu zjišťoval také in situ, znám průměrné hodnoty α jednotlivých lokalit a mohu tak do vztahu (4.4.3) dosazovat přímo tyto hodnoty nebo jimi ověřovat vypočtené hodnoty výparu. Na lokalitách poté lze při pouhé znalosti vlhkosti porézního prostředí přibližně vyjádřit množství vypařené vody za čas [g/h].

Spočítal jsem průměr hodnot α vypočtených z rovnice (4.4.3) pro vzorky ČERx a pro vzorky PPx pro všechny režimy měření klimakomory. Také jsem udělal průměr z hodnot α vydělených příslušným m_{sat} . Hodnotu α jsem bral reprezentativní pro celý pokus pouze v případě, kdy hodnota spolehlivosti R^2 byla větší nebo rovna 0,98. Tomuto kritériu odpovídalo 75 % vzorků v případě režimu 1), 70 % v případě režimu 2) a 65 % v případě režimu 3). Výsledky uvádím v tabulce Tab. 4.4.1.

Tab. 4.4.1. Průměrné hodnoty α pro vzorky ČERx a PPx doplněné o průměr hodnot α vydělených příslušnou hmotností m_{sat} .

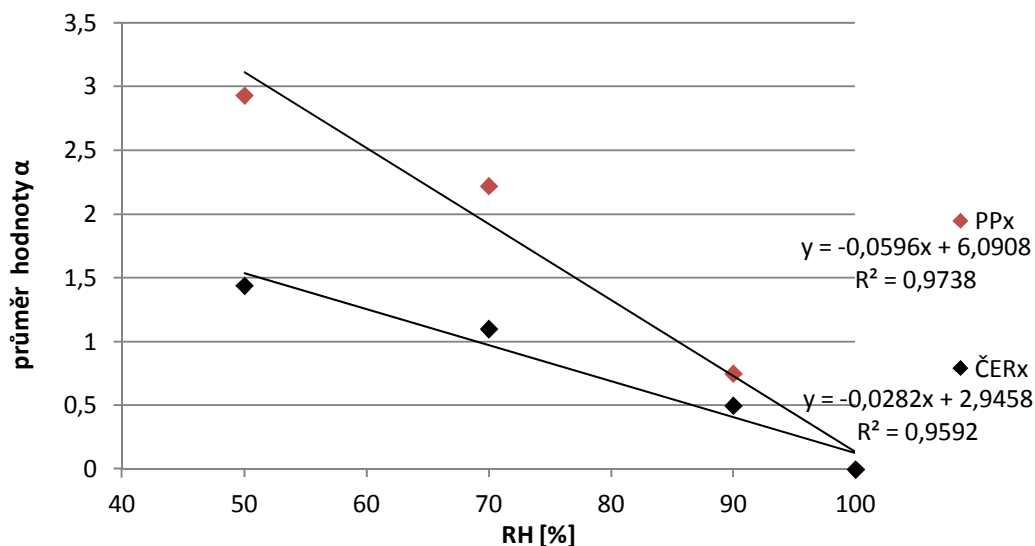
	RH 50%, 20 °C, účinnost větráku 100%		RH 70%, 20 °C		RH 90%, 20 °C	
	průměr α PPx	průměr α ČERx	průměr α PPx	průměr α ČERx	průměr α PPx	průměr α ČERx
	2,93	1,44	2,22	1,10	0,75	0,50
	průměr α/m_{sat} PPx	průměr α/m_{sat} ČERx	průměr α/m_{sat} PPx	průměr α/m_{sat} ČERx	průměr α/m_{sat} PPx	průměr α/m_{sat} ČERx
	0,0223 g ⁻¹	0,0126 g ⁻¹	0,0163 g ⁻¹	0,0107 g ⁻¹	0,0076 g ⁻¹	0,0034 g ⁻¹
počet vzorků	25	8	24	5	20	8

Z výsledků usuzuji, že ze vzorků PPx (jejichž povrch tvoří puklinová plocha a biokrusta a jsou z vertikální stěny) je výpar rychlejší než ze vzorků ČERx (jejichž povrch je chráněn biokrustou, ale jsou z horizontálního povrchu a proudění se tedy odehrává v nejméně propustném směru). Hodnota konstanty α je pro vzorky PPx přibližně 1,5-2x vyšší než pro vzorky ČERx.

Protože s rostoucí relativní vlhkostí vzduchu klesá průměrná hodnota α pro vzorky PPx rychleji než pro vzorky ČERx, vytrácejí se s rostoucí RH rozdíly mezi oběma typy materiálu (Obr. 4.4.6.).

Rozdíly mezi materiály z hlediska rychlosti výparu tak v přirozeném prostředí nelze brát jako pevně dané – velikost rozdílu je dána klimatickými poměry, kterým jsou materiály vystaveny.

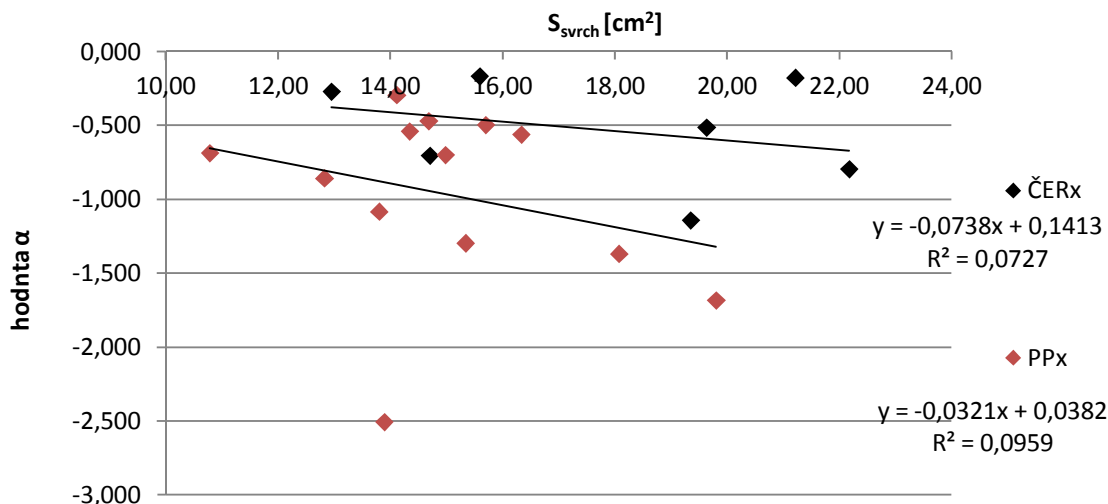
Otázkou zůstává, jaký mechanismus způsobuje tyto rozdíly v rychlosti výparu mezi oběma typy materiálu. Je možné, že na vzorcích s puklinovou plochou je biokrusta, která by mohla být potenciální příčinou snížené rychlosti výparu, vyvinuta výrazně méně než na vzorcích ČERx. Nelze však vyloučit ani vliv vrstevnatosti materiálu, kdy vzorky ČERx byly odebrány z horizontálního povrchu, takže při pokusech byl směr výparu kolmý na uložení vrstev, tedy ve směru s obvykle nejnižší propustností.



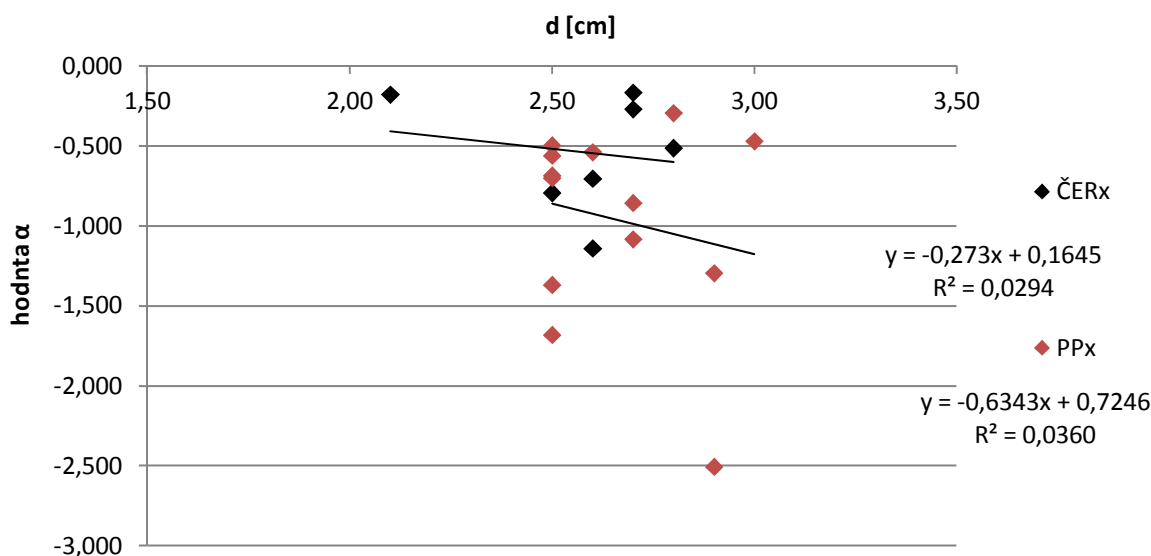
Obr. 4.4.6. Graf charakterizující změnu průměrných hodnot α s rostoucí RH pro vzorky PPx (červené body) a ČERx (černé body). Na horizontální ose figuruje rel. vlhkost vzduchu a na vertikální průměrná hodnota α za této vlhkosti.

Jelikož jsem prokázal, že nehomogenity ve výparu v klimakomoře jsou poměrně výrazné (viz Příloha 1), zůstává otázkou, do jaké míry lze tyto výsledky brát jako směrodatné. Vzorky ČERx a PPx však byly v klimakomoře rozestavěny víceméně náhodně a i z hodnot výparu v přirozeném prostředí se ukazuje, že je výpar ze vzorků ČERx výrazně pomalejší (viz níže, kapitola 4.5.).

Pro vzorky ČERx a PPx, u kterých jsem znal velikost S_{svrch} a mocnost d a jejichž hodnota spolehlivosti pro zjednodušení pomocí rovnice (4.4.2) byla 0,95 nebo vyšší, jsem ještě pro režim měření RH 90 %, T 20 °C vypočítal hodnotu spolehlivosti pro 1) S_{svrch} a hodnotu α (Obr. 4.4.7.), 2) d a hodnotu α (Obr. 4.4.8.). V prvním případě (S_{svrch} vs. α) je hodnota spolehlivosti R^2 pro vzorky ČERx 0,073 a pro vzorky PPx 0,096. Ve druhém případě (d vs. α) je hodnota spolehlivosti R^2 pro vzorky ČERx 0,029 a pro vzorky PPx 0,036. Zdá se tedy, že zvolená metodika je použitelná pro zvolený rozsah mocností 1-4 cm a hodnoty α nejsou ovlivněny ani velikostí svrchní podstavy pískovcové tablety. Režim měření RH 90 % jsem pro toto ověření zvolil z toho důvodu, že s ním pracuji v kapitole 4.6.



Obr. 4.4.7. Mezi velikostí svrchní podstavy a hodnotami α se nezdá být žádný vztah.

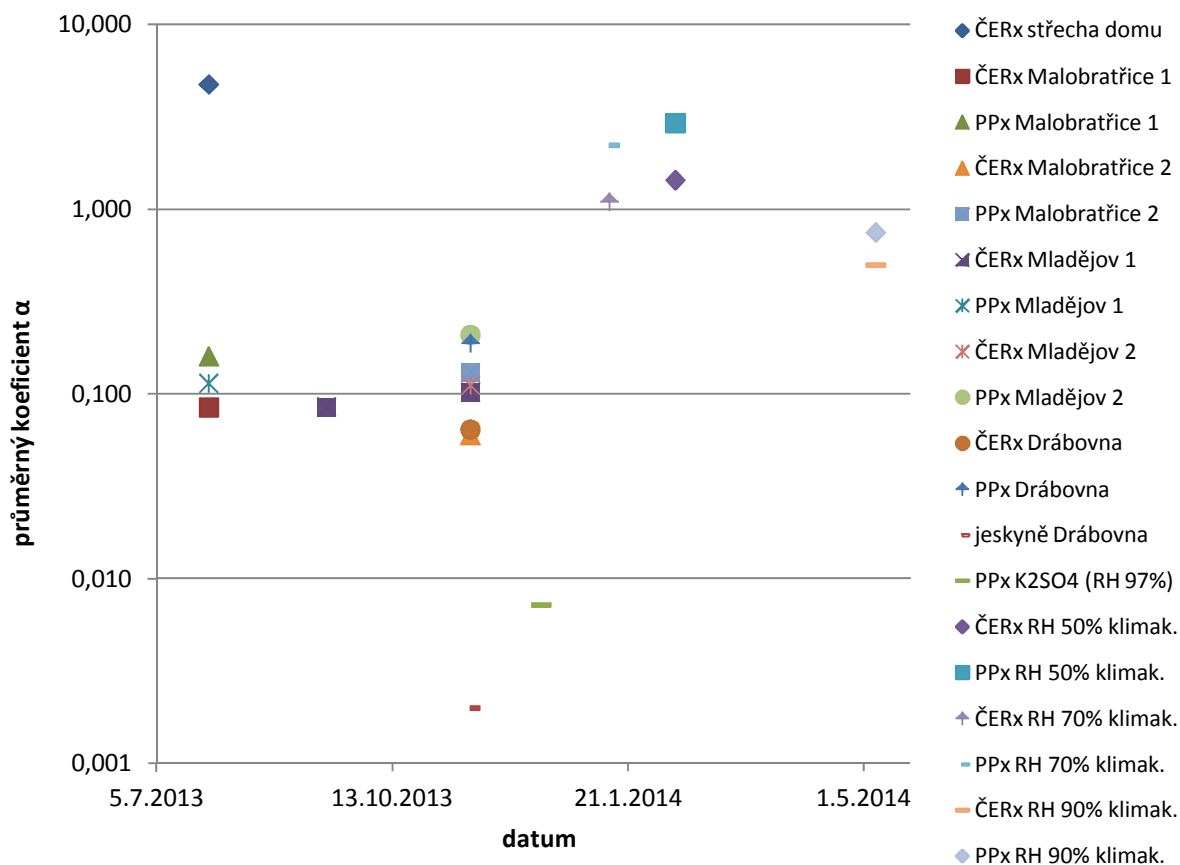


Obr. 4.4.8. Mezi mocnostmi tablet d a hodnotami α se nezdá být žádný vztah.

4.5. Hodnoty výparu za přirozeného mikroklimatu

Na základě metodiky z kapitoly 2.5. jsem zjišťoval hodnoty výparu za skutečného mikroklimatu. Podle rovnice (4.4.3) jsem spočítal hodnoty α jednotlivých vzorků a jejich průměr jsem poté přiřadil těm lokalitám, na kterých byly umístěny. Při těchto krocích předpokládám, že platnost exponenciální rovnice není omezena pouze pro konstantní RH a T a že hodnoty α přímo reprezentují průměrnou rychlost výparu v měřeném období. Předpokládám také, že epoxidový plášť a listí vyplňující volné prostory mezi tabletou a porézním prostředím nezpůsobují významné odlišnosti v teplotě vzorku a přirozeného výchozu. Jelikož jsem při měření v klimakomoře i v terénu zjistil, že výpar ze vzorků PPx je výrazně rychlejší než ze vzorků ČERx, dělím průměrné hodnoty α jednotlivých lokalit ještě na dvě skupiny podle typu vzorků.

Hromadné vyjádření výsledků uvádím v podobě grafu (Obr. 4.5.1.). V tomto grafu také pro srovnání udávám hodnoty α z měření v klimakomoře (viz kapitola 4.4.) a průměr hodnot α pro vzorky PPx vystavené prostředí se solí K_2SO_4 , která zajišťuje stálou relativní vlhkost vzduchu 97 %. Hodnotu označenou „ČERx střecha domu“ uvádím také pouze pro srovnání – jedná se o vzorky ČERx umístěné na střeše domu ve Středních Čechách v horkém letním dni ($T > 30\text{ °C}$).

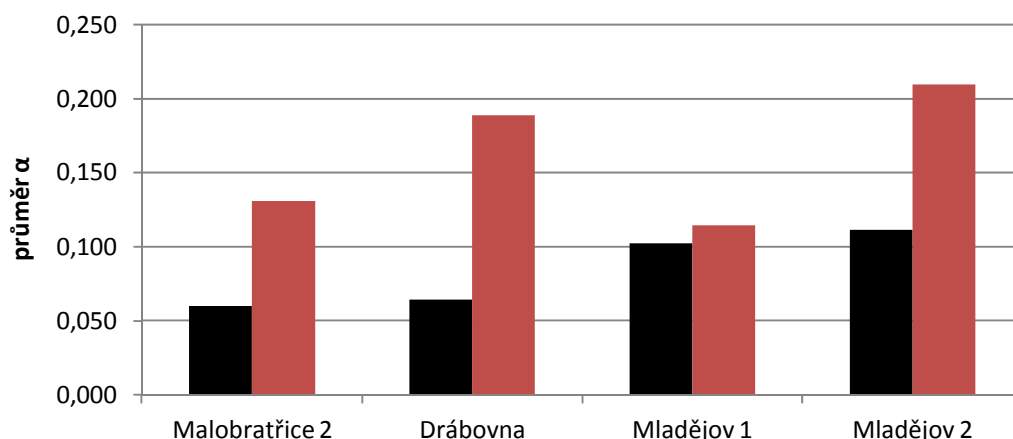


Obr. 4.5.1. Znázornění rychlosti výparu (koeficient α na vert. ose) z jednotlivých přírodních lokalit a režimů měření klimakomory. Na horizontální ose je datum měření.

Výsledky měření, která probíhala na různých lokalitách ve stejném časovém období (listopad 2013), uvádím v tabulce Tab. 4.5.1. a grafu Obr. 4.5.2. Z dat je vidět, že ze vzorků PPx se voda vypařuje rychleji než ze vzorků ČERx, a to o cca 10-55 % na stejné lokalitě.

Tab. 4.5.1. Průměrné hodnoty α (listopad 2013) pro oba typy vzorků na jednotlivých lokalitách.

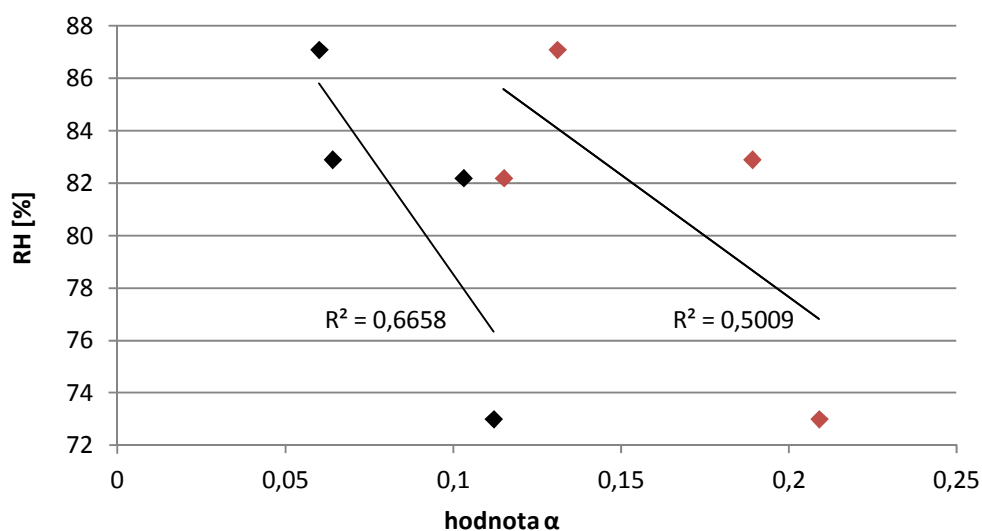
typ vzorku a lokalita	ČERx Malobratřice 2	PPx Malobratřice 2	ČERx Drábovna	PPx Drábovna
průměr α	0,060	0,131	0,064	0,189
typ vzorku a lokalita	ČERx Mladějov 1	PPx Mladějov 1	ČERx Mladějov 2	PPx Mladějov 2
průměr α	0,103	0,115	0,112	0,209



Obr. 4.5.2. Rozdíl v hodnotách α mezi oběma typy vzorků pro jednotlivé lokality. Hodnoty α pro vzorky PPx jsou červeně, pro ČERx černě.

Porovnáním průměrné relativní vlhkosti vzduchu lokalit za období od 3. ledna do 10. července 2014 (Tab. 4.1.8.) s průměrnými hodnotami α lokalit (Tab. 4.5.1.) jsem zjistil, že pro vzorky PPx nabývá hodnota spolehlivost R^2 0,50 a pro vzorky ČERx 0,67 (Obr. 4.5.3.). Jedná se však pouze o zjednodušení – k vypočítání průměrných hodnot RH (Tab. 4.1.8.) jsem použil hodnoty z jiného časového rozpětí, než ze kterého jsem vypočítal hodnoty α (Tab. 4.5.1.), a to z toho důvodu, že k tomuto časovému úseku nebyly změřené hodnoty RH pro všechny lokality. Nelze vyloučit, že právě toto zjednodušení způsobilo, že hodnoty relativní vlhkosti vzduchu s hodnotami α příliš nekorespondují.

Ve svých úvahách dále předpokládám 1) stejnou rychlost výparu ze stejného typu vzorku pro jednu celou lokalitu, 2) že zjištěná hodnota α je obecně platná pro celý rok. Jedná se o silné zjednodušení, nicméně i tak tento přístup ukazuje cestu, jak lze na problém výparu in situ nahlížet. Navíc rozdíl v rychlosti výparu ze vzorků PPx v září a listopadu není na lokalitě Mladějov 1 příliš vysoký (α se liší o 0,017, viz Obr. 4.5.1).



Obr. 4.5.3. Porovnání průměrných hodnot RH a α z jednotlivých lokalit. Červené body se týkají vzorků PPx, černé vzorků ČERx.

Nejnižší rychlosti výparu jsou podle očekávání v jeskyni na Drábovně. Těmto nízkým hodnotám se blíží pouze měření v prostředí s K_2SO_4 , ostatní hodnoty α jsou nejméně 30x vyšší. Nejrychlejší výpar na sledovaných lokalitách je naopak podle očekávání na osluněné pasece (lokalita Mladějov 2). Tato hodnota je však i tak velice vzdálená od hodnoty α pro výpar ze střechy domu (Obr. 4.5.1.).

V jeskyni na Drábovně z měření trvajících od 8. listopadu do 11. dubna (154 dní) vychází rychlost výparu (vztažena na celý rok) ze dvou použitých vzorků od 5 mm/rok (vzorek ČERx) do 7 mm/rok (vzorek PPx).

Oproti tomu na lokalitě Mladějov 2 se rychlost výparu (zjištěná pro období od 11. listopadu 2013 do 29. dubna 2014, 169 dní) pohybuje od 94 mm/rok (stěna s voštinami) do 191 mm/rok (suchá stěna orientována na jih). Obě hodnoty jsou získány ze vzorků odebraných na lokalitě Mladějov 2, tedy in situ. Na této lokalitě se tak z pískovcového povrchu vypaří množství vody odpovídající nejméně 16-32 % srážek, protože hodnoty výparu jsou odvozeny z chladné poloviny roku.

4.6. Podíl difúze par na celkovém transportu vody v přípovrchové zóně pískovce

Podle rovnice (4.4.3) jsem spočítal, jaký alespoň přibližný podíl na celkovém transportu vody v přípovrchové zóně porézního prostředí mají difúze vodních par a kapilární transport vody. Do rovnice jsem za proměnnou α dosadil průměrnou hodnotu α pískovcových tablet ČERx, resp. PPx při režimu měření RH 90 %, T 20 °C (viz Tab. 4.4.1.), protože toto nastavení klimakomory se nejvíce blíží reálným klimatickým podmínkám v přirozeném prostředí (viz kapitola 4.1.). Za proměnnou θ jsem dosadil průměrnou přirozenou vlhkost materiálů ČERx a PPx in situ (odvozeno z hodnot viz kapitola 3.5.). Pro zjednodušení výpočtu jsem počítal u vzorků ČERx $\theta = 2,34$ % a u vzorků PPx $\theta = 0,90$ %.

Zjistil jsem, že za takovýchto podmínek by z materiálu ČERx docházelo k úbytku vody rychlostí 0,0482 g/hod a z materiálu PPx rychlostí 0,0277 g/hod. Tyto výsledky se při prvním přiblížení neshodují se závěry z kapitoly 4.5., kde tvrdím, že výpar probíhá rychleji ze vzorků PPx. Rychlejší výpar z materiálu ČERx je však v tomto případě způsoben vyšší vlhkostí θ tohoto materiálu.

Protože jsem v kapitole 4.2. nenalezl výrazný rozdíl v paropropustnosti napříč jednotlivými typy materiálů, počítám dále s tím, že průměrná rychlost úbytku vody z šálků způsobená difúzí par (0,0013 g/hod) při RH 90 % a T 20 °C poměrně dobře reprezentuje všechny typy studovaných materiálů.

Usuzuji tak, že v případě materiálu ČERx tvoří na celkovém transportu vody v přípovrchové zóně pískovce kapilární transport nejméně 97,3 % a v případě materiálu PPx nejméně 95,3 %. Difúze par na celkovém transportu představuje za těchto podmínek nejvýše cca 5 %.

Pomocí rovnice (4.4.3) jsem také zjistil, že (za předpokladu, že rychlost difúze vodních par se nemění v závislosti na okamžité vlhkosti vzorku) difúze vodních par je jediným mechanismem zodpovědným za úbytek vody z materiálu cca při hm. vlhkosti 0,1 % a nižší. Jedná se pouze o teoretickou hodnotu, nicméně i tak tento výsledek napovídá, že i při poměrně malém obsahu vody v materiálu může dominovat kapilární transport nad difúzí, zatímco difúze par dominuje pouze v případech, kdy je materiál již téměř úplně suchý.

Obdobným způsobem jsem zjistil, že při RH 70 %, T 20 °C v případě materiálu ČERx na celkovém transportu vody v prvních centimetrech pod povrchem pískovce tvoří kapilární proudění nejméně 96,4 % a v případě materiálu PPx nejméně 95,2 %. Difúze par na celkovém úbytku vody z materiálu představuje za těchto podmínek nejvýše cca 5 %. Difúze vodních par je jediným mechanismem zodpovědným za transport vody z materiálu cca při vlhkosti 0,1 % a nižší.

Při RH 50 %, T 20 °C v případě materiálu ČERx transportu vody v prvních centimetrech pod povrchem pískovce tvoří kapilární proudění nejméně 95,6 % a v případě materiálu PPx nejméně 94,2 %. Difúze par na celkovém úbytku vody z materiálu představuje za těchto podmínek nejvýše cca 6 %. Difúze vodních par je jediným mechanismem zodpovědným za úbytek vody z materiálu cca při vlhkosti 0,1 % a nižší.

5. ZÁVĚR

Ve své práci jsem se soustředil na propustnost hruboskalských pískovců pro vodní páru, na jejich schopnost saturace vlivem kapilárního nasákávání a na intenzitu výparu z pískovcového prostředí za skutečného mikroklimatu. Důležitou částí práce jsou také poznatky o přirozeném mikroklimatu několika vybraných lokalit Hruboskalska.

Dosažené výsledky:

- Přirozené mikroklima skalních měst vykazuje průměrnou roční relativní vlhkost vzduchu přibližně 70-90 % a průměrnou roční teplotu přípovrchové zóny pískovce přibližně 7-11 °C. Relativní vlhkost vzduchu v jeskyni Tří postav se blíží 100 %.
- S rostoucím slunečním osvitom roste variabilita relativní vlhkosti vzduchu a teploty v průběhu dne i roku.
- Hruboskalský pískovec je 4-10x méně propustný pro vodní páru než nehybná vrstva vzduchu o stejné mocnosti.
- Propustnost různých typů hruboskalských pískovců pro vodní páru nevykazuje výrazné odlišnosti, nehomogenity materiálu převyšují rozdíly mezi typy materiálu.
- Na rychlost difúze vodní páry skrz materiál hruboskalských pískovců nemá prokazatelný vliv, zda je na výparné ploše krusta (biokrusta nebo krusta na puklinové ploše) či ne.
- Metodika zjištění paropropustnosti je použitelná pro zvolený rozsah mocnosti vzorků 1-6 cm.
- Materiály, jejichž povrch tvoří puklinová plocha či biokrusta, mají vyšší tendenci k opožděnému kapilárnímu nasákávání skrz puklinovou plochu/biokrustu než skrz podložní materiál.
- Materiály, jejichž povrch tvoří puklinová plocha či biokrusta, mají vyšší tendenci vykazovat tzv. „charakteristický trend“, kdy rychlost kapilárního nasákávání se zvyšuje s rostoucí vzdáleností zvlhčené fronty od povrchu materiálu.
- Hruboskalský pískovec patří z hlediska kapilárního nasákávání s hodnotami w od 1,71 do 18,90 kg.m².h k materiálům vykazujícím nadprůměrné absorpční schopnosti.
- Výpar z daného objemu porézního materiálu lze při konstantní relativní vlhkosti vzduchu a teplotě aproximovat exponenciální funkcí $y = \theta \cdot e^{-\alpha \cdot t}$, kde y představuje aktuální hmotnost vody [g] v materiálu, θ je váhová vlhkost materiálu [%] na počátku, t je čas [d] a α je konstanta určující rychlost výparu.
- Srovnáním dvou materiálů (ČERx a PPx) jsem zjistil, že výpar ze vzorků ČERx je pomalejší než ze vzorků PPx, což může být způsobeno lépe vyvinutou krustou na povrchu materiálu ČERx, nebo jde o vliv vrstevnatosti materiálu - vzorky ČERx byly odebrány z horizontálního povrchu, takže při pokusech byl směr výparu kolmý na uložení vrstev, tedy ve směru

s obvykle nejnižší propustností. Hodnota α je pro vzorky PPx 1,5-2x vyšší než pro vzorky ČERx.

- S rostoucí relativní vlhkostí vzduchu se vytrácejí rozdíly v rychlosti výparu mezi oběma typy materiálu (ČERx a PPx). V přirozeném prostředí tak rozdíly mezi materiály z hlediska výparu nelze brát jako pevně dané – velikost rozdílu je dána klimatickými poměry, kterým jsou materiály vystaveny.
- Metodika zjištění rychlosti výparu je použitelná pro zvolený rozsah mocnosti vzorků 1-4 cm a velikosti jejich výparné plochy 11-22 cm².
- Nejvyšší rychlost výparu v přirozeném prostředí je na lokalitě s nejnižší průměrnou relativní vlhkostí vzduchu a nejvyšší průměrnou teplotou (Mladějov 2), nejnižší rychlost výparu je v jeskyni Tří postav, kde se relativní vlhkost vzduchu blíží 100 % a průměrná teplota je nejnižší (pod 8 °C).
- Na lokalitě Mladějov 2 je rychlost výparu 94-191 mm/rok, což číselně odpovídá 16-32 % srážek. Oproti tomu v jeskyni Tří postav je rychlost výparu pouze 5-7 mm/rok.
- Z celkového transportu vody v přípovrchové zóně pískovce tvoří kapilární transport vody přibližně 95 % a difúze vodních par 5 %.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Adamovič J. (1992): Sedimentologie pískovců lužické a jizerské oblasti české křídové pánve. Úvod do problematiky. – MS-Archiv Českého Geologického ústavu – Praha.

Adamovič J. – Mikuláš R. – Cílek V. (2010): Atlas pískovcových skalních měst České a Slovenské republiky. – Academia. Praha, 459 str.

Adamovič J. – Mikuláš R. – Schweigstilllová J. – Böhmová V. (2011): Porosity changes induced by salt weathering of sandstones, Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. – Acta Geodyn. Geomater. 8, 1, str. 29-45.

Arnold A. – Küng A. (1985): Crystallization and habit of salt efflorescences on Walls II. In: Felix G. (ed): Proceedings of the 5th Int'l Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Presses Romandes, Lausanne, str. 255-277.

Bear J. – Bachman Y. (1990): Introduction to modeling of transport phenomena in porous media, vol 4. Dordrecht: Kluwer.

Bjelland T. – Thorseth I. H. (2002): Comparative studies of the lichen-rock interface of four lichens in Vingen, western Norway. - Chem. Geology 192, str. 81-89.

Bruthans J. – Schweigstilllová J. (2009): Hliníkem bohaté vody z nenasycené zóny pískovců: atmosférickou depozicí nejvíce acidifikované prostředí v ČR? In: Rapantová N. – Grmela A. (eds): Sbor. 10. česko-slovenského mezinár. hydrogeol. kongr. – Vys. Šk. báň. Tech. Univ. Ostrava, str. 43-46.

Bruthans J. – Soukup J. – Schweigstilllová J. – Světlík D. (2013): Zpevněné povrchy puklin v kvádrovém pískovci a jejich role při vzniku otevřené puklinové pórozity a vzniku skalních měst. – Zpr. geol. výzk. v roce 2012.

Cílek V. – Langrová A. (1994): Skalní kůry a solné zvětrávání v CHKO Labské pískovce. - Ochr. Přír. 49, 8, str. 227-231.

Cílek V. (2007): Climate, microclimate and paleoclimate of sandstone areas of Central and Northern Bohemia (Czech Republic). In: Härtel H. - Cílek V. - Herben T. - Jackson, A. & Williams R. (eds.): Sandstone Landscapes. - Academia, str. 97-104.

Cnudde V. – Silversmit G. – Boone M. – Dewanckele J. – De Samber B. – Schoonjans T. – Van Loo D. – De Witte Y. – Elburg M. – Vincze L. – Van Hoorebeke L. – Jacobs P., (2009): Multi-disciplinary Characterisation of a Sandstone Surface Crust. - Science of the Total Environment, 407. – Amsterdam, str. 5417–5427.

Concha-Lozano N. – Gaudon P. – Pages J. – de Billerbeck G. – Lafon D. – Eterradosi O. (2012): Protective effect of endolithic fungal hyphae on oolitic limestone buildings. – Journal of Cultural Heritage 13, str. 120-127.

Čmelík M. – Machonský L. – Šíma Z. (2001): Fyzikální tabulky. – TUL, Liberec.

- Čurda S. – Kříž L., (1987): Příloha řady 5 – hydrogeologie – Nudvojovice (závěrečná zpráva). – Vodní zdroje, n.p. Praha, závod 02 Bylany. – Turnov.
- Guyot A. – Curtis G. E. – Libbey W. (1988): Smithsonian Meteorological Tables. – Smithsonian Institute. – City of Washington, 262 str.
- Klein V. – Tajovský P. (1990): Zpráva o výsledcích prací na ložisku Střeleč s výpočtem prognózních zásob sklářské a slévárenské suroviny. - Ústřední Ústav Geologický, Praha, Geofond č. P056953.
- Kobřilová A. (2014): Hydraulická vodivost vzorků pískovce. – Bakalářská práce UK PŘF v přípravě, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky PŘF UK. – Praha.
- Krásný J. – Císlarová M. – Čurda S. – Datel V. Josef – Dvořák J. – Grmela A. – Hrkal Z. – Kříž H. – Marszałek H. – Šantrůček J. – Šilar J. (2012): Podzemní vody České republiky. - Česká geologická služba. - Praha, 1143 str.
- Kurtz H. D. – Netoff D. I. (2001): Stabilization of friable sandstone surfaces in a desiccating, wind-abraded environment of south-central Utah by rock surface microorganisms. - J. arid Environments 48, str. 89–100.
- Künzel H. (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Diss Univ Stuttgart.
- Macák P. (1956): Hydrogeologické poměry na Drábovně u Malé Skály. – Diplomová práce PŘF UK. Praha, str. 1-38.
- Memmert - Operating Manual - Climatic Chamber Test CTC 256 (2013): Memmert GmbH + Co. KG., 67 str.
- Meng B. (1993): Charakterisierung der Porenstruktur im Hinblick auf die Interpretation von Feuchtetransportvorgängen. Aachener Beitr Bauforsch 3, str. 1-71.
- Mikuláš R. (1999): The Protective Effect of Lichens and the Origin of Modern Bulge-Like Traces on Weakly Lithified Sandstones (Hilbre Islands, Wirral Peninsula, Great Britain). – Ichnos 6, 4, str. 261-268.
- Nadrchal J. – Smutek D. (2007): Střeleč - lom, Královehradecký kraj. Monitorování režimu podzemních a povrchových vod. Vyhodnocení prací za rok 2006. - Vodní zdroje Chrudim, Geofond č. P119010.
- Pamplona M. – Kocher M. – Sneath R. – Aires-Barros L., (2007): Drilling Resistance: Overview and Outlook. - Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 158, 3. – Darmstadt, str. 665-676.
- Pavlík Z. – Michálek P. – Pavlíková M. – Kopecká I. – Maxová I. (2008): Water and Salt Transport and Storage Properties of Mšené Sandstone. – Construction and Building Materials, vol. 22, 8, str. 1736-1748.

- Patzelt Z. (2007): Groundwater chemistry of the Bohemian Switzerland National Park (Czech Republic). In: Härtel H. - Cílek V. - Herben T. - Jackson, A. & Williams R. (eds.): Sandstone Landscapes. - Academia, str. 93-96.
- Ruedrich J. – Rothert E. – Fitzner B. (2005): Schadensanalyse an Gebäuden aus Kalksteinen auf Malta. In: Siegesmund S. – Snethlage R. – Auras M (eds): Stein-Zerfall und Konservierung. Edition Leipzig, Leipzig.
- Siedel H. - Siegesmund S. (2011): Charakterisation of Stone Deterioration on Buildings, In: Siegesmund S. – Snethlage R.: Stone in Architecture – Properties, Durability, 4th edition. – Springer, str. 347-410.
- Siegesmund S. – Dürrast H. (2011): Physical and Mechanical Properties of Rocks, In: Siegesmund S. – Snethlage R.: Stone in Architecture – Properties, Durability, 4th edition. – Springer, str. 97-226.
- Schweigstilllová J. – Bruthans J. – Falteisek L. – Válek J. – Soukup J. (2013): Rychlá tvorba skalních kůr na povrchu hruboskalského pískovce: mikroskopický popis, tahová pevnost, odolnost vůči erozi, vznik a význam pro pískovcový reliéf. – Zpr. geol. výzk. v roce 2012, str. 228-234.
- Sommerová A. (2014): Měření vlhkosti pískovce: Laboratorní a terénní techniky. – Bakalářská práce UK PŘF v přípravě, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky PŘF UK. – Praha.
- Soukup J. – Bruthans J. – Světlík D. – Schweigstilllová J. – Smutek D. (2013): Sebeorganizovaný systém podzemních kanálů vzniklých prouděním vody v puklinách křemenného pískovce v lomu Střeleč. – Zpr. geo. výzk. v roce 2012, str. 296-304.
- Steadman R.G. (1979): The assesment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. - J. Appl. Meteor., 18, str. 861-873.
- Svobodová E. (b. r.): Diplomová práce UK PŘF v přípravě, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky PŘF UK. – Praha.
- Szilagyi J. (1995): Leitgesteine für die Denkmalpflege-Untersuchung petrophysikalischer Eigenschaften (key rock for monument care-investigation into petrophysical properties). – Research report TU Dresden.
- Uličný D. (2001): Depositional systems and sequence stratigraphy of coarse-grained deltas in a shallow-marine, strike-slip settings: the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. – Sedimentology 48, str. 599-628.
- Vavřilová Z. – Příkryl R. – Cílek V. (2011): Pravčice Rock Arch (Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic) deterioration due to natural and antropogenic weathering. – Environ. Earth Sci. 63, str. 1861-1878.
- Young R.W. – Wray R.A.L. – Young A.R.N (2009): Sandstone Landforms. – Cambridge Univ. Press. – Cambridge, 314 str.

7. SEZNAM PŘÍLOH

1. PŘÍLOHA 1.....	i
1.1. Průnik epoxidu do vzorku.....	i
1.2. Nasákavost epoxidu.....	i
1.3. Těsnění el. páskou.....	ii
1.4. Nehomogenity rychlosti výparu v klimakomoře.....	iii
1.5. Pokles hladiny vody v nádobě při měření kapilární nasákavosti.....	viii
2. PŘÍLOHA 2.....	ix
2.1. Linearita rychlosti difúze vodních par.....	ix
2.2. Grafy rychlosti saturace vlivem kapilárního nasákávání.....	x
2.3. Platnost rovnice (4.5.2.) z kapitoly 4 vlastní práce.....	xviii