

**Univerzita Karlova v Praze**

**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Aplikovaná geologie



**Bc. Eliška Svobodová**

Vlhkost a její transport v přívodové zóně kvádového  
pískovce

Diplomová práce

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

Praha 2015

**Prohlášení:**

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

V Praze, 7. 8. 2015

Podpis

## **Poděkování**

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu diplomové práce J. Bruthansovi za poskytované konzultace a pomoc při výzkumu a psaní diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat M. Slavíkovi a M. Filippimu za pomoc při práci v terénu.

Tato práce vznikla za finanční podpory grantového projektu GAČR číslo 13-28040S.

## **Abstrakt**

Práce je zaměřena na transport vlhkosti v porézním prostředí kvádrového pískovce. Kapilární voda a její pohyb hraje zásadní roli při mnoha procesech (solné a mrazové zvětrávání, růst organismů, vznik voštin a tafone). Přesto jsou dosavadní informace o pohybu vlhkosti velmi kusé. Zaměřila jsem se zejména na dvě nově aplikované metody v pískovci. V laboratoři jsem pomocí opakované injekce roztoku fluoresceinu studovala pohyb vlhkosti na odvrtných pískovcových jádrech a na základě změny barvy v závislosti na koncentraci roztoku jsem sledovala vývoj výparové fronty. V terénu jsem na třech lokalitách v české křídové pánvi studovala zastoupení vlhkosti v mělké hloubce výchozů kvádrového pískovce pomocí měření sacího tlaku mikrotenzometry a měření vlhkosti přístrojem TDR. Fluorescein se ukázal jako výborný stopovač pro zviditelnění výparové fronty. Experimenty v laboratoři ukázaly, že na postup vlhkosti v pískovcích má zásadní vliv přítomnost biokrusty, která je hydrofobní a zpomaluje transport vlhkosti k povrchu. Experimenty na vzorcích bez krusty s uměle vytvořenými voštinami ukázaly, že při nižší vlhkosti se roztok vypařuje v důlcích, kdežto při vyšší vlhkosti především na hřebítkách. Tento poznatek, stejně jako hodnoty sacího tlaku naměřené v důlcích a na hřebítkách voštin a měření provedené na tafone v terénu, podporují model solného zvětrávání vytvořený Huininkem et al. (2004).

## **Abstract**

The thesis deals with moisture transport in porous medium of quartz sandstone. Capillary water and its movement is crucial for processes such as salt and frost weathering, growth of organisms and development of honeycombs and tafone. However, moisture transport is still not well described. I focused particularly on two new methods applied to sandstone investigation. In the laboratory I studied moisture transport in sandstone samples by means of repeated injection of uranine solution. I observed the evolution of evaporation front based on the changes in solution concentration indicated by difference in color of uranine solution. Additionally I investigated moisture content in the shallow subsurface of sandstone outcrops in the field using suction pressure and moisture content measurements by microtensiometers and TDR in three locations in the Bohemian Cretaceous Basin. Uranine proved to be an excellent tracer for visualization of the evaporation front geometry and its evolution in time. The results suggest that moisture transport is considerably affected by the presence of biofilms which are hydrophobic and retain moisture transport to surface. In addition, the values of suction pressure measured in honeycombs and a tafone are in agreement with the salt weathering model proposed by Huinink et al. (2004).

# Obsah

|  |    |
|--|----|
| Úvod.....  | 6  |
| 1 Kavernózní zvětrávání pískovce.....                          | 6  |
| 2 Pohyb vody v nesaturované zóně.....                          | 10 |
| 3 Metodika práce.....  | 12 |
| 3.1 Použité přístroje.....                                     | 12 |
| 3.1.1 Měření vlhkosti.....                                     | 12 |
| 3.1.2 Měření sacího tlaku.....                                 | 12 |
| 3.1.3 Vážení vzorků.....                                       | 13 |
| 3.1.4 Monitorování podmínek.....                               | 13 |
| 3.1.5 Monitorovací kamera.....                                 | 13 |
| 3.2 Použitý materiál.....                                      | 13 |
| 3.2.1 Pískovec.....  | 13 |
| 3.2.2 Fluorescein.....   | 17 |
| 3.2.3 Síran sodný.....   | 17 |
| 3.2.4 Síran draselný.....                                      | 18 |
| 3.3 Práce v laboratoři.....                                    | 18 |
| 3.3.1 2D fyzikální model pohybu kapilární vlhkosti a páry..... | 18 |
| 3.3.2 Transport soli jádrem pískovce.....                      | 19 |
| 3.4 Práce v terénu a popis lokalit.....                        | 20 |
| 3.4.1 Mladějov.....  | 21 |
| 3.4.2 Malobratřice.....  | 22 |
| 3.4.3 Drábovna.....  | 22 |
| 3.4.4 Dvořákova stezka.....                                    | 23 |
| 4 Výsledky a diskuze.....                                      | 24 |
| 4.1 Laboratorní práce.....                                     | 24 |
| 4.1.1 Vzorek 2/16.....   | 25 |
| 4.1.2 Vzorek 2/27.....   | 29 |
| 4.1.3 Vzorek 5/20.....   | 32 |
| 4.1.4 Vzorek V2/3.....   | 36 |
| 4.1.5 Vzorek V3/6.....   | 39 |
| 4.1.6 Vzorek 2/1b.....   | 42 |
| 4.1.7 Vzorek 2/1c.....   | 45 |
| 4.1.8 Blok s voštinami.....                                    | 48 |
| 4.1.9 Shrnutí laboratorních experimentů.....                   | 51 |
| 4.2 Terénní práce.....   | 51 |
| 4.2.1 Mladějov I.....  | 51 |
| 4.2.2 Mladějov II.....   | 59 |
| 4.2.3 Malobratřice.....  | 61 |
| 4.2.4 Drábovna.....  | 63 |
| 4.2.5 Dvořákova stezka.....                                    | 67 |
| 4.2.6 Shrnutí a diskuze terénních měření.....                  | 69 |
| 4.3 Další experimenty.....                                     | 71 |
| 4.3.1 Transport soli jádrem pískovcem.....                     | 71 |
| 4.3.2 Monitorování vlhkostní fronty v laboratoři.....          | 72 |
| Závěr.....   | 73 |
| Použitá literatura.....  | 75 |

# Úvod

V pískovcích probíhá řada zvětrávacích i jiných procesů (solné a mrazové zvětrávání, vytváření biofilmů apod.). Pro většinu těchto procesů je zásadní přítomnost nebo pohyb vody ve formě kapilární vody nebo páry. Solné zvětrávání je závislé na transportu solí v roztoku a lokalizace místa rozpadu pískovce je vázaná na prostor, kde dochází k výparu a tedy nakoncentrování roztoku a srážení solí (Huinink et al. 2004). U mrazového zvětrávání je intenzita závislá i na vlhkosti, čili míře zaplnění póru vodou (Walder a Hallet 1986). Obsah vody také určuje, jaké organismy se mohou podílet na biofilmech pokrývajících pískovce (Lan et al. 2010).

Zatímco solným a mrazovým zvětráváním pískovců v laboratoři se věnovala řada studií (Turkington a Paradise 2005), existuje málo fyzikálních experimentů kombinujících proudění vody, výpar, transport solí, krystalizaci a případně i rozrušování povrchu skály na reálných vzorcích pískovce nebo dokonce v terénních podmínkách. Existují numerické modely, které předpovídají, že díky kolísající vlhkosti vzniká kavernózní zvětrávání – voštiny, tafone (Huinink et al. 2004). Solné, mrazové a další druhy zvětrávání jsou ale simulovány za velmi zjednodušených podmínek a je problém je aplikovat na reálné prostředí.

Vlhkost a její pohyb v přírodních výchozech je většinou studována velmi zjednodušeným způsobem – odhadem vlhčích míst podle vizuální inspekce povrchu výchozů, pouze v některých případech elektrickou tomografií nebo bezdotykovým kapacitním měřením, které je ale díky výrazně nerovnému povrchu velmi nepřesné (Mol a Viles 2012, Bell et al. 1987). V současnosti existují dostupné techniky využívané a prověřené v pedologii – hodnocení množství vlhkosti pomocí TDR (Time Domain Reflectometry) nebo měření sacího tlaku. K zjišťování pohybu vlhkosti v kvádrových pískovcích lze teoreticky také využít některé stopovače.

Cílem této práce je pokusit se získat informace o míře vlhkosti a jejím transportu ve velmi mělké zóně výchozů kvádrového pískovce (hloubka cm, max. první desítky cm). Dílčím cílem je pak sledování zastoupení vlhkosti a změny vlhkosti v čase v terénu pomocí TDR a sacího tlaku na několika lokalitách lišících se přítomností nebo absencí vegetačního krytu a případně expozicí vůči světovým stranám (míra oslunění). Dalším cílem je pokusit se v laboratoři pomocí změny barvy fluoresceinu při změně jeho koncentrace zviditelnit geometrii výparové fronty v odvrtných jádrech pískovce a vývoj výparové fronty v čase při rostoucí vlhkosti vzorku. A pokusit se ověřit, zda je distribuce vlhkosti ve voštinách a tafone v souladu s teorií a numerickým modelem podle Huininka et al. (2004), vysvětlujícím vznik těchto forem.

## 1 Kavernózní zvětrávání pískovce

Fenomén kavernózního zvětrávání je známý již dlouho, ale ohledně mechanismu vzniku kavernózního zvětrávání zatím existuje několik teorií. Podle některých teorií je příčinou case hardening, tj. tvrdnutí svrchní vrstvy skály obvykle díky cementaci (Mottershead a Pye 1994), jiné teorie udávají jako příčinu vzniku core softening, tj. měknutí spodní vrstvy kvůli

chemickým modifikacím (Conca a Rossman 1985). Další, že v dutinách je rychlejší proudění vzduchu, což urychluje vysoušení povrchu (Torraca 1988). Důležitou příčinou zvětrávání hornin i historických objektů jsou soli (Evans 1970, Goudie a Viles 1997).

Od 70. let 20. století převládá jako vysvětlení vzniku kavernózního zvětrávání solné zvětrávání, které zahrnuje řadu chemických i mechanických procesů. Experimentální studie ukázaly, že z mechanických procesů je nejdůležitější růst krystalů z roztoku v pórech a trhlinách horniny. Tento proces je podpořen snížením rozpustnosti se snižující se teplotou, vypařováním roztoků nebo míšením různých solí v roztoku (Goudie 2013). Při vysoušení je tedy sůl v roztoku transportována do míst, kde se voda vypařuje, sůl krystalizuje a poškozují strukturu materiálu.

Kavernózní zvětrávání je rozšířeno po celém světě. Tafoni mají typicky vyvinuté obloukovité tvary vchodů s konkávními vnitřními stěnami, převislými visory a mírně skloněným dnem, většinou pokrytým suti (Turkington a Phillips 2004). Oproti tafoni bývají voštiny mnohem menší (zpravidla v řádu cm). Voštiny se vyvíjí velmi rychle a mohou být pozorovány na površích, které byly hladké před méně než stoletím (Mustoe 1982). Siedel (2010) na základě svých měření odhaduje, že rychlost voštinového zvětrávání přesahuje na některých místech 2 mm/rok.



*Obr. 1.1: Voštiny na lokalitě Drábovna. Foto: M. Filippi*

Poprvé experimentálně reprodukovali vznik voštin Rodriguez-Navarro et al. (1999). Na základě experimentů na homogenním vápenci tvrdí, že kromě krystalizace soli je pro vznik voštin důležité i nehomogenní proudění větru přes povrch horniny. Vítr je uvnitř dutin urychlován, což zvyšuje výpar, a tak napomáhá krystalizaci soli v pórech.

McBride (2000) se zabýval původem vzniku tafone v Tunnel Spring Tuff (Utah, USA). Vzhledem k absenci korodovaného křemene a živce v úlomcích horniny tvrdí, že chemické zvětrávání je pro vývoj tafone nedůležité. Na základě předchozího výzkumu Estebana a Klappy (1983), kteří ukázali, že krystalizace kalcitu v půdě generuje dostatečný tlak, aby

přemístila jednotlivá zrna, uvádí, že solné zvětrávání může být výhradně fyzický a nikoli chemický proces.

Laue et al. (2004) zkoumali voštinové zvětrávání křídového pískovce, ze kterého je postavený kostel ve městě Leuba (Sasko, Německo). Jako příčiny zvětrávání uvádějí, že prostředí je velmi znečištěno  $\text{SO}_2$  kvůli přítomnosti blízké hnědouhelné elektrárny a že při stavbě budovy byla použita malta z dolomitického vápna. Obojí je zdrojem solných iontů, které se postupně akumulovaly v místech, kde docházelo ke zvětrávání. Poškození se zvětšovalo cyklickou krystalizací především síranů hořčiku v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu. Vycházeli z analýzy vzorků pískovce odebraných přímo na místě a in-situ měření kapilární absorpce vody pomocí Karstenových trubic a drill resistance (odolnost proti vrtání). Vzorky z nezvětralých oblastí měly relativně homogenní strukturu pórů, vzorky ze zvětralých oblastí relativně heterogenní strukturu, menší porozitu, větší specifický povrch a póry obsahovaly oxidy a hydroxidy železa. Zjistili, že v nezvětralé oblasti je kapilární absorpce vody (water uptake) z Karstenových trubic větší než ve zvětralé, což znamená, že transport vody ve zvětralé zóně není tak rychlý jako v nezvětralé.

Ve výzkumu voštinového zvětrávání na budovách v Sasku pokračoval Siedel (2010). Zamýšlí se nad otázkou, zda voštiny mohou vznikat v makroskopicky homogenních skálách nebo jestli je k tomu nutná heterogenita materiálu. Dochází k závěru, že pro nerovnoměrné zvětrávání povrchu kamene je nutná heterogenita materiálu (rozdíly v porozitě a minerálním složení). Proces vzniku voštin vysvětluje tak, že se na povrchu díky solnému zvětrávání a heterogenitě materiálu nejprve formují malé jamky o rozměrech v řádu milimetrů. Kámen vysychá pomaleji od základu těchto jamek, tudíž se zde akumuluje více solí, což vede k další ztrátě materiálu. V druhé fázi dochází k cyklickému procesu zvětrávání díky solnému zvětrávání a hydratačnímu tlaku. Tento proces závisí jen na změnách vlhkosti a na klimatu. Siedel zkoumal i obsahy jednotlivých solí ve zvětralých a nezvětralých částech zdí a zjistil, že vápník vázaný v sádrovci ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) se koncentruje blízko nezvětralého povrchu zdí a jeho obsah v dutinách je mnohem nižší. Naproti tomu hořčík vázaný v  $\text{MgSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  se vždy koncentruje blízko povrchu v dutině.

Studiem vývoje tafone v antarktické oblasti mezi 74. a 76. stupněm severní šířky se zabývali Strini et al. (2008). Berou v úvahu výskyt soli a data o teplotě a rychlosti větru nasbíraná v průběhu roku. Rychlost větru naměřená uvnitř tafone byla poloviční oproti venkovní rychlosti větru, což nahrává ukládání sněhu uvnitř tafone a napomáhá krystalizaci soli. Naopak vliv větru na teplotu uvnitř tafone je podle nich zanedbatelný. Tento poznatek je v rozporu s předpokladem Rodriguez-Navarra et al. (1999), že je vítr uvnitř dutin urychlován. Z naměřených dat Strini et al. vyvozují, že není žádný klíčový faktor pro vývoj tafone, a jako hlavní proces určují tepelné namáhání, obzvláště při krátkodobých fluktuacích teploty. Data potvrzují, že ostatní teplotní procesy jako cykly tání a mrznutí nebo teplotní šoky nejsou pro vývoj tafone příliš efektivní.

Kavernózní zvětrávání v závislosti na tvrdosti povrchu a vnitřní vlhkosti zkoumali Mol a Viles (2012) na tafone v Golden Gate Highlands National Park (Jihoafrická republika).

K měření distribuce vlhkosti vnitřních stěn tafone v pískovci používali přístroj ERT (Electric Resistivity Tomography). K měření tvrdosti povrchu skály tvrdoměr Equotip (pracuje na stejném principu jako Schmidtovo kladivo, ale je šetrnější ke zkoumanému povrchu). Z naměřených dat určovali míru zvětrání povrchu a povrchové zpevnění horniny (case hardening). Ukázali, že poměrně komplexní interakce mezi tvrdostí povrchu a vnitřní vlhkostí ovlivňují kavernózní zvětrávání, a vytvořili koncepční model popisující tyto interakce.

Předchozí výzkum vzniku tafone v Jihoafrické republice doplnila Mol (2014) o měření povrchové vlhkosti pomocí protimetru (určuje vlhkost na základě měření odporu mezi dvěma body ve vzdálenosti 3 cm) a teploty uvnitř kavern. Uvažuje i vliv biokrust na povrchu pískovce. Z naměřených dat vyvozuje, že core softening nebo case hardening jsou hlavními příčinami formování kavern. Jako důležité příčiny rozpadu povrchu pískovce by do výpočtů měly být zahrnuty i roční změny vlhkostních režimů.

Čistě matematický model kavernózního zvětrávání jako dynamického systému vytvořili Turkington a Phillips (2004). Model pracuje pouze se vzájemnými interakcemi mezi rychlostí zvětrávání (obecně, bez specifikace, o jaké zvětrávání se jedná), velikostí dutin a koncentrací vlhkosti a nebere v úvahu žádné specifické fyzikální a chemické procesy.

Numerický model vzniku tafone čistě na základě vysoušení horniny a krystalizace soli vytvořili Huinink et al. (2004). Modelovali vznik tafone z malé jamky na povrchu skály na základě střídajících se cyklů zvlhčování a vysoušení horniny. Z modelu vyplývá, že klíčovým parametrem je délka vysoušení během jednoho cyklu. Při krátkých vysoušecích periodách střídajících se s obdobím dotace vlhkosti (výparová fronta neztratí kontakt s povrchem skály) krystalizuje sůl nejvíce na vnějších částech povrchu skály než uvnitř dutin, což ve výsledku vede k vyhlazování povrchu skály. Naopak při dlouhých vysoušecích periodách výčnělky a pak i plochý povrch skály vyschnou a vlhkost proudí jen do míst s nejnižším výparem, tedy do dutin, kde zároveň krystalizuje sůl. Dutiny mají nízký výpar i proto, že nejsou vystaveny slunci a větru. Výparová fronta ztrácí kontakt s velkými částmi povrchu skály, ale v dutině zůstává v kontaktu se vzduchem, takže dochází k výparu a srážení soli, čímž se dutina zvětšuje.

Model Huininka et al. (2004) simuluje v každém vysoušecím cyklu transport vody, transport soli a srážení soli. Na konci každého cyklu se modeluje rozpad povrchu skály s použitím dat o srážení soli – čím víc soli se vysráží, tím větší nastane oslabení povrchu skály. Model předpokládá, že množství vysrážené soli je úměrně množství vypařené vody a sůl je transportována především konvekcí, která dominuje nad difuzí. Dále předpokládá, že množství uložené soli na jednotku objemu je mnohem větší na povrchu než uvnitř skály. Když je výparová fronta na povrchu skály, ukládají se soli v tenké vrstvě blízko povrchu. Když se fronta pohybuje ve větší hloubce skály, ukládají se soli v mnohem větším objemu.

S pomocí modelu Huininka et al. (2004) lze vysvětlit tendenci tafone růst směrem vzhůru ve vertikální stěně, protože strop tafone je skryt před sluncem a tudíž zde dochází k menšímu výparu než ve spodní části tafone. Model Huininka et al. (2004) je v souladu s měřením Siedela (2010) na materiálu kostela v Lipsku. Model na začátku předpokládá malé jamky

v povrchu skály, jejichž vznikem se však nezabývá. Podle Siedela vznikají tyto jamky díky heterogenitám materiálu v mikroskopickém měřítku.

Předpoklad modelu Huininka et al. (2004), že v dutinách dochází k nižšímu výparu, je v přímém rozporu s Rodriguez-Navarro et al. (1999), kteří předpokládají v dutinách rychlejší proudění větru a tudíž vyšší výpar. Avšak podle měření Strini et al. (2008) je rychlost větru uvnitř tafone oproti venkovní poloviční. Navíc, jak popisuje Huinink et al. (2004), skutečnost, že za překážkami je nižší potenciální výpar, je dobře empiricky prokázaným faktem (např. větrolamy).

## 2 Pohyb vody v nesaturované zóně

V nasycené zóně je řídicí silou pro pohyb podzemní vody hydraulická výška, definovaná jako součet geodetické a tlakové výšky. Proudění podzemní vody popisuje Darcyho zákon. Stejná koncepce platí i pro pohyb vody v nesaturované zóně. Je zde ale několik odlišností a rovnice jsou více komplikované (Domenico a Schwartz 1998).

V nesaturované zóně obsahují póry jak kapalnou, tak plynnou složku a stupeň nasycení tak závisí na části objemu porů vyplněných vodou. Hydraulická vodivost v nesaturované zóně se rapidně snižuje se snižujícím se objemem vody. Na rozdíl od saturované zóny, kde proudění vody závisí na tlakové výšce, pohyb vody v nesaturované zóně je primárně určen negativním sáním (sacím tlakem) (Tindall et al. 1999).

Obsah vody v částečně saturovaném prostředí se udává jako objemová vlhkost ( $\theta$ ), která je definovaná vztahem

$$\theta = \frac{V_w}{V_T}, \quad (2.1)$$

kde  $V_T$  je celkový objem horniny nebo vzorku a  $V_w$  je objem vody v něm. Pokud jsou póry horniny kompletně vyplněny vodou, rovná se objemová vlhkost porozitě ( $n$ ). Obsah vody v nesaturované zóně se mění v rozsahu  $0 \leq \theta \leq n$  (Domenico a Schwartz 1998). Vlhkost je možné definovat také jako poměr hmotností podle vzorce

$$w = \frac{m_w}{m_s}, \quad (2.2)$$

kde  $m_w$  je hmotnost vody ve vzorku a  $m_s$  je hmotnost suchého vzorku.

Tlaková výška v nesaturované zóně je menší než atmosférická a považuje se tedy za zápornou. Uvádí se i jako sací výška. Pro měření tlakové výšky v nesaturované zóně se používají tenzometry, které se skládají z porézní keramické destičky připojené přes vodní sloupec k manometru (Tindall et al. 1999). Velmi jemné póry keramické destičky jsou vyplněny vodou a zajišťují hydraulické spojení mezi vodou v půdním prostředí a vodním sloupcem v tenzometru. Při změně tlakové výšky v prostředí voda proudí dovnitř nebo ven z tenzometru tak, aby se udržela hydraulická rovnováha. Keramický materiál má tenké, avšak protáhlé póry, které jsou vyplněny v celém profilu vodou, a vzduch tak nemůže vniknout do

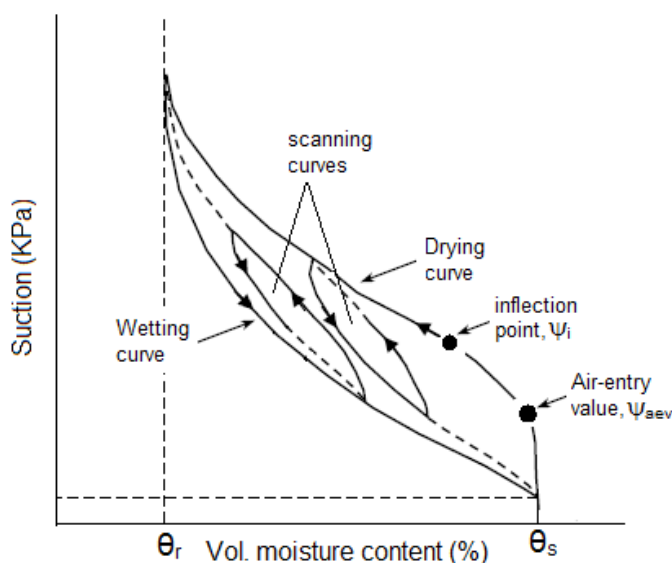
tenzometru, dokud sací tlak nedosáhne kritické úrovně (vstupní hodnota vzduchu).

Pro nesaturovanou zónu je důležitý vztah mezi tlakovou výškou a obsahem vody v materiálu, který se určuje experimentálně a uvádí se jako retenční křivka. Křivka je nelineární při zobrazení tlakové výšky jak na aritmetické, tak logaritmické škále. Chování křivky při malém obsahu vody odráží skutečnost, že půda nebo hornina se nikdy kompletně nevydrénuje. Tento nízký obsah vody se nazývá reziduální vlhkost. Nejběžněji používaným vztahem pro popis retenční křivky je rovnice navržená van Genuchtenem (1980):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (-\alpha h)^n\right)^m}, \quad (2.3)$$

kde  $\theta_r$  a  $\theta_s$  jsou reziduální a nasycená vlhkost,  $h$  tlaková výška a  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  jsou parametry,  $\alpha > 0$ ,  $n > 1$ ,  $m = 1 - 1/n$  (Trpkošová a Mls 2010).

Tvar retenční křivky závisí na několika faktorech. Nejdůležitějším je velikost pórů a jejich distribuce. Tvar retenční křivky se mění v závislosti na tom, zda se jedná o vysychání materiálu nebo jeho zvlhčování. Křivka má tedy hysterézní charakter (Domenico a Schwartz 1998).



Obr. 2.1: Hystereze retenční křivky. Převzato z webových stránek University of Southampton ([https://landss.soton.ac.uk/unsat\\_flow](https://landss.soton.ac.uk/unsat_flow)).

Dalším problémem popisu pohybu vody v nesaturované zóně je skutečnost, že hydraulická vodivost je silně a navíc nelineárně závislá na stupni nasycení materiálu, a tudíž na tlakové výšce. Nejvyšší hodnoty dosahuje hydraulická vodivost, pokud se hornina blíží saturaci a tlaková výška se blíží k nule. Při snižování vlhkosti je tlak stále více negativní a hydraulická vodivost se snižuje, protože voda se stahuje do stále menších a menších pórů a tím roste tření. V blízkosti reziduální vlhkosti klesá hydraulická vodivost k nule. Proto Darcyho zákon použitelný pro nenasyčené prostředí vyžaduje, aby hydraulická vodivost byla vyjádřena jako funkce vlhkosti nebo tlakové (sací) výšky.

Velký vliv na pohyb vody v nesaturevané zóně může mít osmotický tlak. Každá částice má elektrické pole, které způsobuje snížení koncentrace roztoku v blízkosti povrchu částice. V porézním prostředí to znamená zvětšení plochy průřezu pro transport vody v porovnání s plochou dostupnou pro transport rozpuštěných solí. Porézní materiál se tak chová jako polopropustná membrána. Její propustnost závisí na velikosti částic materiálu. Jemnozrnny materiál (např. jíl) propouští roztok soli mnohem hůře než vodu, a proto je zde vliv osmotického tlaku na pohyb vody významný. Naopak v hrubozrnném materiálu je vliv osmotického tlaku na transport roztoku zanedbatelný (Tindall et al. 1999).

## **3 Metodika práce**

### **3.1 Použité přístroje**

#### **3.1.1 Měření vlhkosti**

Pro měření vlhkosti v pískovci jsem používala TDR (Time Domain Reflectometry), přístroj CS620 od firmy Campbell Scientific (Austrálie). Je to relativně nová geofyzikální metoda používaná pro půdní průzkum. Původně byla vyvinutá k detekci a lokalizaci poruch kabelů, od konce sedmdesátých let 20. století se však stále častěji používá i ke stanovování půdní vlhkosti in situ (Davis et al. 1977).

Princip metody vychází ze závislosti mezi objemovou vlhkostí a permitivitou prostředí, kde permitivitu lze stanovit na základě rychlosti šíření elektromagnetického pulzu podél vodiče uloženého v půdě. Tato rychlost se zjišťuje registrací časového průběhu signálu odraženého koncem vodiče. Z rychlosti je poté vyčíslena dielektrická konstanta a následně objemová vlhkost. Hodnota objemové vlhkosti je průměrnou hodnotou z celého měřeného půdního profilu, jehož hloubka je daná délkou sondy (Trakal et al. 2008).

Přístroj udává obsah vody v procentech. Přesnost měření přístroje udávaná výrobcem je  $\pm 3\%$ , rozlišení  $0,25\%$ , rozsah měření je od suché po saturovanou zeminu. Přístroj má dvě sondy dlouhé 12 cm o průměru 5 mm. Rozestup sond je 32 mm.

Pro měření vlhkosti byly na každém měřeném místě vyvrtány do pískovce pomocí jednoduché formy dvě sousední díry s rozstupem, průměrem a délkou přesně padnoucími pro sondy přístroje. Otvory byly mezi měřeními ucpány zátkou z mikrotenové fólie, aby se zabránilo výparu pórové vlhkosti.

#### **3.1.2 Měření sacího tlaku**

Sací tlak jsem měřila pomocí mikrotenzometrů T5x se čtecím zařízením INFIELD7 od firmy UMS (Německo). Je to speciálně navržený tenzometr pro bodové měření s velmi rychlou reakcí díky malému objemu. Průměr keramického hrotu je 5 mm. Aktivní povrch tenzometru je  $0,5\text{ cm}^2$ . Přesnost měření udávaná výrobcem pro tenzometry T5 je  $\pm 0,5\text{ kPa}$ , rozsah  $-85\text{ kPa}$  až  $+100\text{ kPa}$ . Speciální verze tenzometrů T5x má keramický hrot s menšími póry a za předpokladu vyplnění absolutně odvdzdušenou vodou má garantovaný rozsah od  $-160\text{ kPa}$  do  $+200\text{ kPa}$ . Podle výrobce může dosáhnout až  $-250\text{ kPa}$ , výjimečně až  $-450\text{ kPa}$ ,

než dojde k vyprázdnění. Díky jemnějším pórům keramického hrotu má sonda T5x pomalejší odezvu než standardní T5. Odezva T5 je při správném naplnění sondy garantovaná pod 5 sekund. Délka šachtičky s keramickým hrotem limitující délku díry o průměru 5 mm, do které lze tenzometr vložit, je 11 cm. Šachtička je průhledná, takže je snadné detekovat případné bubliny, které signalizují, kdy je potřeba sondu odvzdušnit. Tenzometry mohou být umístěny v jakékoli pozici a orientaci. Nesmí být vystaveny teplotě pod 0 °C, což limituje měření během zimních měsíců.

Pro měření sacího tlaku byly do pískovcových výchozů vyvrtány mělké díry (0,5–2 cm) s průměrem 5 mm. Na většině míst jsem měřila sací tlak v jedné z děr vyvrtaných pro TDR v hloubce okolo 3–11 cm pod povrchem.

### **3.1.3 Vážení vzorků**

Všechna odvrtná jádra použitá pro model pohybu kapilární vlhkosti a páry jsem vážila na kapesní váze Voltcraft PS-500C s rozsahem vážení do 500 g a přesností 0,05 g. Blok s voštinami jsem vážila na laboratorní váze Kern KB 6000-1 s váživostí do 6100 g a přesností 0,1 g. Sestavenou aparaturu pro transport soli jádrem pískovce jsem vážila na solární váze Maultronic S-2000 s rozsahem vážení do 2000 g a přesností 0,5 g.

### **3.1.4 Monitorování podmínek**

Pro monitorování přírodních podmínek na lokalitách a v laboratoři jsem použila USB datalogery Voltcraft DL-121 TH a Garni GAR 171. Obě verze dataloggerů měří teplotu a relativní vlhkost vzduchu, mají paměť na 32000 dat (16000 naměřených hodnot teploty a 16000 hodnot vlhkosti) a možnost nastavení načítání od 2 sekund po 24 hodin. Rozsah měření teploty je od -40 °C do +70 °C s přesností měření  $\pm 1$  °C. Rozsah měření relativní vlhkosti je 0–100 % s přesností  $\pm 3$  %.

Všechna použitá čidla měla nastaveno načítání dat po 30 minutách.

### **3.1.5 Monitorovací kamera**

Pro zjišťování postupující vlhkostní fronty v pískovcové kostce jsem použila inspekční kameru Bosch GOS 10,8 V-LI Professional. Průměr hlavy kamery je 17 mm, délka kabelu 122 cm. Ke kameře je připojený 2,7" LCD displej s vysokým rozlišením. Pro monitorování na tmavých místech má kamera LED osvětlení s 9 stupni. Kamera má také video out konektor pro externí přenos obrazu. Na jedno nabití akumulátoru může přístroj fungovat 7–15 hodin.

## **3.2 Použitý materiál**

### **3.2.1 Pískovec**

Pro práci v laboratoři jsem použila materiál ze tří lokalit v české křídové pánvi. Jádra použitá pro transport soli pískovcem a pískovcová kostka použitá pro monitorování vlhkostní fronty pomocí kamery pochází z pískovcových výchozů v lomu Střeleč.

Jádra 5/20, V2/3, V3/6, 2/1b, 2/1c, 2/2b, 2/3b a 2/9c byla odvrtna na lokalitě Mladějov, která se nachází v dobývacím prostoru lomu Střeleč.

Jádra 2/16, 2/24, 2/27 a blok byla získána ze zřícené skalní věže známé jako „Jestřebická jehla“ v Šemanovickém dole západně od obce Jestřebice na Kokořínsku. Ke zřícení věže došlo kolem poloviny ledna 2014. Jde o materiál s poměrně hlubokými a dobře vyvinutými voštinami.

### **Popis vzorků**

Průměr všech vzorků použitých pro modelování pohybu vlhkosti pomocí fluoresceinu (5/20, V2/3, V3/6, 2/1b, 2/1c, 2/2b, 2/3b, 2/9c, 2/16 a 2/27) byl po úpravě cca 67–70 mm.

Vzorek 2/16 byl odvrtán na místě s voštinami hlubokými okolo 2 cm. Po úpravě má vzorek v nejvyšší části výšku 6,3 cm, v nejnižší 4,4 cm, průměrná výška vzorku je cca 5,2 cm. Na povrchu vzorku je vytvořená šedá biokrusta. Do vzorku jsem pro měření sacího tlaku pomocí tenzometrů vyvrtala celkem tři díry o průměru 0,5 mm. Díry v hřebítku a důlku voštiny byly hluboké cca 1 cm. Třetí díru jsem vyvrtala do jiného důlku voštiny s hloubkou cca 2,5 cm. Později jsem vzorek upravila tak, aby byl spodek jádra rovný a přesně se vešel do PVC zátky o vnějším průměru 75 mm. Vzorek zátku převyšoval, proto jsem její okraje navýšila pomocí stříbrné pásky, kterou jsem převázala gumičkou, abych minimalizovala výpar ze stran vzorku.

Vzorek 2/24 byl odvrtán na místě s voštinami hlubokými 2–3 cm. Na povrchu vzorku je vytvořená šedá biokrusta. Do vzorku jsem pro měření sacího tlaku vyvrtala dvě díry o průměru 0,5 mm a hloubce cca 1 cm.

Vzorek 2/27 byl odvrtán na místě s velkými voštinami hlubokými asi 4 cm. Vzorek samotný představuje jednu necelou voštinu – důlek, který se na třech stranách zvedá nahoru. Povrch vzorku je pokrytý šedou biokrustou. Po úpravě má vzorek v nejvyšší části výšku 4,9 cm, v nejnižší 1,0 cm, průměrná výška vzorku je okolo 2,5 cm. Do vzorku jsem pro měření sacího tlaku vyvrtala dvě díry (do horní části vzorku – hřebítku a dolní části – důlku) o průměru 0,5 mm a hloubce cca 1 cm. Později jsem vzorek upravila pro zasazení do PVC zátky, ale spodek vzorku nebylo možné kvůli nízké části na jedné straně zarovnat. Dno PVC zátky jsem proto kvůli zachování hydraulického kontaktu roztoku s pískovcem vyložila nejprve plenou, která se ale příliš neosvědčila, protože roztok fluoresceinu v ní zůstával, a později savým papírem. Vzorek PVC zátku převyšoval, proto jsem její okraje navýšila pomocí stříbrné pásky, abych minimalizovala výpar ze stran vzorku.



Obr. 3.1: Zleva vzorek 2/16, 2/24 a 2/27

Vzorek 5/20 je relativně plochý, má pouze jeden výraznější důlek s hloubkou okolo 0,7 cm. Povrch vzorku pokrývá šedá biokrusta, která byla na jedné straně vzorku při odvrtávání z výchozu částečně obroušena. V nejvyšší části má vzorek výšku 4,2 cm, v nejnižší 3,2 cm, průměrná výška vzorku je cca 3,7 cm.

Vzorek V2/3 byl odvrtán na místě s výraznými voštinami. Přes celý průměr vzorku leží hřbíték voštiny s výškou cca 1,3 cm, vedle něj jsou na vzorku dva téměř kulaté důlky o průměru 1–1,5 cm. Povrch vzorku je pokrytý tmavě zelenošedou biokrustou, která byla při odvrtávání z výchozu na jedné straně hřbítku částečně obroušena. Výška vzorku je v nejvyšší části 4,4 cm, v nejnižší 2,2 cm, průměrná výška vzorku je cca 3 cm.

Vzorek V3/6 byl odvrtán na místě s výraznými voštinami o výšce 1,5–2 cm. Povrch vzorku je pokryt zelenobílou biokrustou. Výška vzorku je v nejvyšší části 5,1 cm, v nejnižší 2,8 cm, průměrná výška vzorku je cca 4 cm. Vzorek převyšoval PVC zátku, proto jsem její okraje navýšila pomocí stříbrné pásky, abych minimalizovala výpar ze stran vzorku.



Obr. 3.2: Zleva vzorky 5/20, V2/3 a V3/6

Vzorek 2/1b byl odvrtán z hloubky 5–10 cm výchozu a nemá proto na povrchu biokrustu. Na povrchu vzorku jsem vyhloubila důlek s hloubkou cca 2,5 cm a průměrem 3,5–4 cm simulující voštinu. Do důlku i vrchní části vzorku jsem vyvrtala díru o průměru 0,3 cm a hloubce cca 1 cm pro pozorování postupu vlhkostní fronty uvnitř vzorku. Výška vzorku se po jeho obvodu pohybuje od 5,5 cm do 6,3 cm, průměrná výška vzorku je cca 4,5 cm. Vzorek převyšoval PVC zátku, proto jsem její okraje navýšila pomocí stříbrné pásky, kterou jsem převázala gumičkou, abych minimalizovala výpar ze stran vzorku.

Vzorek 2/1c je odvrtán z hloubky 5–15 cm výchozu a nemá proto na povrchu biokrustu. Do vzorku jsem vyhloubila důlek s hloubkou cca 2–2,5 cm a průměrem 3 cm simulující voštinu. Do důlku i vrchní části vzorku jsem vyvrtala díru o průměru 0,3 cm a hloubce cca 1 cm pro pozorování postupu vlhkostní fronty uvnitř vzorku. Výška vzorku se po jeho obvodu pohybuje od 4,5 cm do 5,5 cm, průměrná výška vzorku je cca 4 cm. Vzorek převyšoval PVC zátku, proto jsem její okraje navýšila pomocí stříbrné pásky, kterou jsem převázala gumičkou, abych minimalizovala výpar ze stran vzorku.

Vzorek 2/2b je odvrtán z hloubky 5–10 cm výchozu a nemá proto na povrchu biokrustu. Do vzorku jsem vyhloubila důlek s hloubkou cca 2 cm a průměrem 3 cm simulující voštinu. Do vzorku se mi kvůli jeho nižší pevnosti nepodařilo vyvrtat malé díry pro pozorování

vlhkostní fronty. Výška vzorku se po jeho obvodu pohybuje od 4,3 cm do 5,2 cm, průměrná výška vzorku je cca 3,5 cm. Vzorek převyšoval PVC zátku, proto jsem její okraje navýšila pomocí stříbrné pásky, abych minimalizovala výpar ze stran vzorku.



Obr. 3.3: Zleva vzorky 2/1b, 2/1c a 2/2b

Vzorek 2/3b je odvrtný z hloubky 5–10 cm výchozu a nemá proto na povrchu biokrustu. Do vzorku jsem vyhloubila čtyři díry s hloubkou 1–1,5 cm jako simulaci voštin. Výška vzorku v jeho nejvyšší části je 5,5 cm, v nejnižší 3,5 cm, průměrná výška vzorku je cca 4 cm. Vzorek převyšoval PVC zátku, proto jsem její okraje navýšila pomocí stříbrné pásky, abych minimalizovala výpar ze stran vzorku.

Vzorek 2/9c je odvrtný z hloubky 5–15 cm výchozu a nemá proto na povrchu biokrustu. Do vzorku jsem vyhloubila tři díry s hloubkou 1–1,5 cm jako simulaci voštin. Výška vzorku se po jeho obvodu pohybuje od 3 cm do 3,7 cm, průměrná výška vzorku je cca 2,5 cm.



Obr. 3.4: Vzorky 2/3b a 2/9c

Pískovcový blok má rozměry přibližně 23×18 cm. Tloušťka bloku bez započtení voštin je na jedné straně 4 cm, na druhé 9 cm. Na povrchu bloku jsou velmi výrazné voštiny o výšce 3–7,5 cm. Aby byly voštiny v rovině, podložila jsem nízkou stranu bloku plastovou nádobkou.

Pískovcová kostka, kterou jsem použila pro sledování vlhkostní fronty v laboratoři pomocí monitorovací kamery, má rozměry přibližně 16×12 cm, na výšku má cca 8 cm. Kromě vrchní stěny je kostka celá obalená v epoxidu.



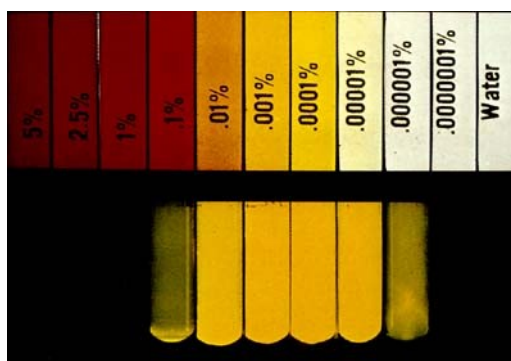
Obr. 3.5: Blok s voštinami

### 3.2.2 Fluorescein

Pro přípravu roztoku fluoresceinu jsem použila fluorescein disodnou sůl (v literatuře známou jako uranin) od firmy Lach-Ner, s.r.o. Chemický vzorec soli je  $C_{20}H_{10}Na_2O_5$ . Produkt má podobu červenooranžového prášku.

Uranin je nejpoužívanějším stopovačem při stopovacích zkouškách. Je to látka s největší známou fluorescencí a pomocí spektrometrů je zjištělný při velmi malých koncentracích. Název uranin je založen na podobné barvě fluoreskujících solí uranilu. Při krystalizaci tvoří uranin tmavě červené podlouhlé krystaly, které nefluoreskují. Barva roztoku uraninu se mění v závislosti na rostoucí koncentraci od slabě zelené přes žlutou až po červenou, jak je vidět na obr. 3.6. Koncentrovaný roztok uraninu má také tmavě červenou barvu a není fluorescentní (Käss et al. 1998).

Při experimentech jsem používala roztok  $C_{20}H_{10}Na_2O_5$  ve vodě o hmotnostní koncentraci 1,25 g/l. Pro experimenty byla důležitou vlastností změna barvy při změně koncentrace.



Obr. 3.6: Změna barvy roztoku  $C_{20}H_{10}Na_2O_5$  v závislosti na koncentraci a jeho fluorescence při 450 nm. Autoři: Robin Williams a Gigi Williams. Převzato z webových stránek [http://medicalphotography.com.au/Article\\_02/03d.html](http://medicalphotography.com.au/Article_02/03d.html)

### 3.2.3 Síran sodný

Pro přípravu roztoku soli jsem použila síran sodný bezvodý od firmy Lach-Ner, s.r.o. Chemický vzorec soli je  $Na_2SO_4$ . Produkt má podobu bílého prášku a jeho rozpustnost ve vodě je při 25 °C 27,9 g/100 ml. V následující tabulce je uvedena fyzikální a chemická

charakteristika produktu udávaná výrobcem.

Tab. 3.1: Složení síranu sodného (Lach-Ner, s.r.o.)

|                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| Obsah                       | min. 99 %    |
| Železo (Fe)                 | max. 0,001 % |
| Těžké kovy (Pb)             | max. 0,001 % |
| Chloridy (Cl)               | max. 0,005 % |
| pH (5 % v H <sub>2</sub> O) | 5–8          |
| Ztráta žíháním              | max. 0,3 %   |

Při experimentu jsem používala roztok Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve vodě o hmotnostní koncentraci 179,2 g/l (hmotnostní procento 16,2 %).

### 3.2.4 Síran draselný

Pro transport soli jádrem pískovce jsem použila síran draselný od firmy Lach-Ner, s.r.o. Chemický vzorec soli je K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Produkt má podobu bílého prášku a při 25 °C je jeho rozpustnost ve vodě 12,0 g/100 ml. V následující tabulce je uvedena fyzikální a chemická charakteristika produktu udávaná výrobcem.

Tab. 3.2: Složení síranu draselného (Lach-Ner, s.r.o.)

|                                      |               |
|--------------------------------------|---------------|
| Látky nerozpustné v H <sub>2</sub> O | max. 0,005 %  |
| Vápník (Ca)                          | max. 0,005 %  |
| Těžké kovy (Pb)                      | max. 0,001 %  |
| Chloridy (Cl)                        | max. 0,0005 % |
| Hořčík (Mg)                          | max. 0,002 %  |

## 3.3 Práce v laboratoři

Pro práci v laboratoři jsem získala jádra z pískovcových výchozů odvrtná pomocí diamantových jádrových vrtáků o vnějších průměrech 68 a 82 mm. Vnitřní průměr jádrovnice a tedy i maximální průměr jádra činí 62 a 75 mm. Výška jader závisela na odlomení jádra od pískovcového masivu, nejvíce zhruba 60 mm.

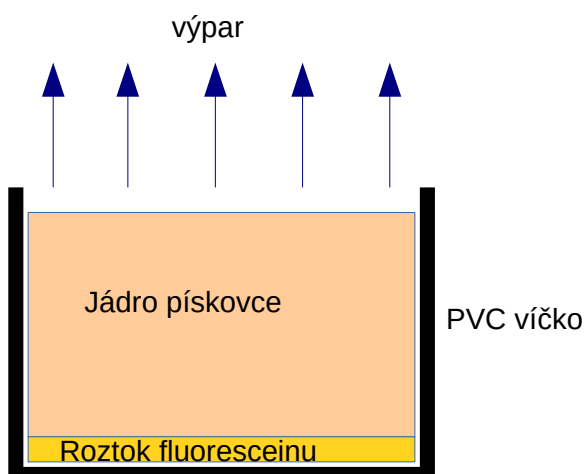
### 3.3.1 2D fyzikální model pohybu kapilární vlhkosti a páry

Odvrtaná jádra jsem pomocí pilníku upravila tak, aby se přesně vešla do PVC zátky o vnějším průměru 75 mm. Výsledkem bylo, že výpar ze stran vzorku byl minimální, naprostá většina vody se odpařovala z povrchu vzorku. Spodek jádra jsem zabrousila do rovné plochy, aby vzorek co nejlépe dosedl na dno PVC zátky. U vzorků vyšších než PVC zátky jsem okraje zátky oblepila těsnicí stříbrnou páskou, kterou jsem ještě pro snížení výparu ze stran vzorku převázala gumičkou.



Obr. 3.7: Vzorek 2/1b

Na dno zátky jsem periodicky injektovala roztok fluoresceinu a zvyšovala tak hmotnostní vlhkost vzorku, kterou jsem počítala podle vzorce (2.2). Sledovala jsem pohyb roztoku vzorkem, vytvoření vlhkostní fronty a pozorovala její vývoj při zvyšující se vlhkosti. Účelem bylo vytvoření 2D fyzikálního modelu pohybu kapilární vlhkosti a páry, jak je znázorněno na obrázku 3.8.



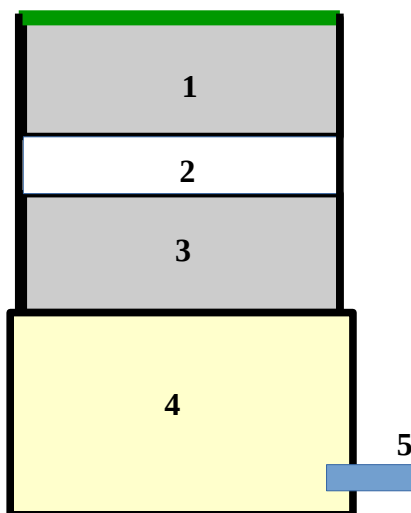
Obr. 3.8: 2D fyzikální model pohybu kapilární vlhkosti a páry

Pro simulaci stejných podmínek ve větším měřítku jsem měla k dispozici blok pískovce s voštinami, který jsem obalila v epoxidu tak, aby k výparu mohlo docházet pouze z vrchní části bloku, kde se nacházely voštiny. Roztok jsem do bloku injektovala pomocí injekční stříkačky s jehlou díky dvěma vyvrtaným dířám o průměru 2 cm a délce 17 cm ve spodní části bloku. Ty byly vyplněné látkovou dětskou plenou (savý materiál), která udržovala hydraulický kontakt s pískovcem, a zalepené stříbrnou páskou zabraňující výparu z děr.

### 3.3.2 Transport soli jádrem pískovce

Vytvořila jsem simulaci transportu a srážení soli v pískovcovém prostředí. Do PVC zátky jsem vyvrtala díru pro zavedení PVC hadičky, kterou jsem dodávala vodu. Hadička byla zakončena škrťicím uzávěrem. Uvnitř zátky jsem na hadičku umístila kousek silonové

punčochy, kterou jsem uvázala gumičkou, aby se do hadičky nedostával písek. Zátku jsem vyplnila zhutněným pískem, na který jsem umístila dvě pískovcová jádra. Obě byla po obvodu zalepená epoxidem. Vrchní jádro mělo na sobě biokrustu, spodní bylo odvrtné z hlubší části masivu a bylo tedy bez krusty. Mezi jádra jsem umístila vrstvu soli  $K_2SO_4$ , jádra a sůl držela pohromadě latexová membrána používaná na triaxiální zkoušky. Kontakt spodního jádra se zátkou jsem zalepila epoxidem. Nakonec jsem celou aparaturu natěsno oblepila elektrikařskou páskou, aby voda proudila pouze skrz jádra a sůl na výparový povrch. Skrz hadičku jsem pak naplnila celý vzorek vodou až po zvlhčení biokrusty. Vzorek jsem poté nechala vysychat a zjišťovala úbytek vody v čase.



*Obr. 3.9: Vytvořená aparatura pro transport soli jádrem pískovce*

*1 – vrchní jádro pískovce s biokrustou, 2 – vrstva soli, 3 – spodní jádro pískovce, 4 – zhutněný písek v PVC zátce, 5 – přívod vody PVC hadičkou*

### 3.4 Práce v terénu a popis lokalit

Pro měření v terénu byly vybrány čtyři hlavní lokality s různými charakteristikami. První tři lokality se nachází v české křídové pánvi. Lokality Mladějov a Malobratřice leží mimo oblast CHKO Český ráj, avšak při jeho hranici. Lokalita Mladějov je rozdělena na dvě další lokality, kde se nachází stejný pískovec, ale lokality mají velmi odlišné mikroklima. Na lokalitě Malobratřice se vyskytují suché a vlhké zóny povrchu pískovce, které jinde nejsou nebo nejsou na první pohled viditelné. Lokalita Drábovna leží v CHKO a je specifická tím, že se nachází na hraně mohutného údolí Jizery. Lokalita Dvořákova stezka se jako jediná nachází v permokarbonských horninách a je významná především výskytem tafone.

Některé z hlavních lokalit jsou ještě rozděleny na dílčí podlokality. Tabulka 3.3 udává přibližné GPS souřadnice jednotlivých lokalit.

Tab. 3.3: Seznam lokalit, jejich částí a jejich GPS souřadnice

| Lokalita            | GPS souřadnice                       |
|---------------------|--------------------------------------|
| Mladějov I          | 50° 29' 22,261" N, 15° 14' 38,820" E |
| Mladějov II         | 50° 29' 28,440" N, 15° 13' 53,339" E |
| Malobratřice I      | 50° 28' 45,180" N, 15° 4' 43,139" E  |
| Malobratřice II     | 50° 28' 46,620" N, 15° 4' 46,261" E  |
| Drábovna            | 50° 37' 44,280" N, 15° 10' 38,819" E |
| Dvořákova stezka I  | 50° 15' 2,735" N, 14° 18' 8,909" E   |
| Dvořákova stezka II | 50° 15' 9,424" N, 14° 18' 8,783" E   |

### 3.4.1 Mladějov

Jde o dvě lokality v české křídové pánvi – Mladějov I a Mladějov II – vzdálené od sebe cca 900 m. Na obou se vyskytují přírodní výchozy turonských až coniackých jemně až hrubě zrnitých pískovců teplického souvrství (Uličný 2001), mají ale velmi odlišné mikroklima. První lokalita je v lese, druhá na pasece.

Lokalita Mladějov I se nachází cca 800 m SSV od obce Mladějov v nadmořské výšce 280 m n. m. Lokalita je v lese v těsném sousedství s lomem Střeleč. Nacházejí se zde výchozy s voštinami i hladké stěny, místy výkvěty solí, vlhké i suché povrchy. Sací tlak a vlhkost jsem zde měřila na pěti různých místech – ve voštinách, v místě výkvětu solí, na vyhlazeném pilíři skály, na vlhké části výchozu pokryté řasami a ve šterbině mezi dvěma bloky skály podobné malé jeskyni. Výchoz, kde se nacházejí voštiny je orientovaný směrem na JZ. Výchoz s řasami je orientovaný na jih. Místo s výkvětem solí se nachází na tomtéž výchozu na straně orientované k západu. Čelo pilíře je orientováno JZ směrem.



Obr. 3.10 : Umístění lokalit Mladějov I a Mladějov II

Lokalita Mladějov II se nachází cca 800 m SSZ od obce Mladějov, v nadmořské výšce 295 m n. m. Původně se zde vyskytoval les, který byl však před několika lety vykácen, čímž

došlo k výrazné změně mikroklimatu. Nyní jsou výchozy plně vystaveny slunečním paprskům, což vedlo k odumření mechů a lišejníků, které skály původně pokrývaly. Je zde stěna s voštinami orientovaná k JV i hladká stěna bez voštin s orientací k JZ. Na obou jsem měřila sací tlak a vlhkost. Na stěně s voštinami jsem měřila sací tlak i v mělkých dírách na hřebítku a uvnitř voštiny.

### 3.4.2 Malobratřice

Opět jde v podstatě o dvě lokality v české křídové pánvi, v nadmořské výšce 285–290 m n. m. Obě jsou situovány v lese. Vyskytují se zde výchozy hrubozrnných bělošedých křemenných pískovců coniackého stáří (Slavík 2014).

Lokalita Malobratřice I se nachází cca 400 m severně od obce Malobratřice. Jsou zde výchozy pokryté mechem, kde jsem měřila vlhkost a sací tlak. Výchoz je orientovaný k SZ.

Lokalita Malobratřice II se nachází asi 60 m SV od první lokality. Výchozy jsou tvořeny velmi hrubozrnným pískovcem, často s voštinami. Jsou zde viditelné stabilní vlhké a suché zóny povrchu pískovce. Měřila jsem zde vlhkost a sací tlak v místě voštin na výchozu orientovaném k SZ. Sací tlak jsem měřila také ve dvou mělkých dírách na viditelném rozhraní vlhké a suché části římsy.



Obr. 3.11 : Umístění lokalit Malobratřice I a Malobratřice II

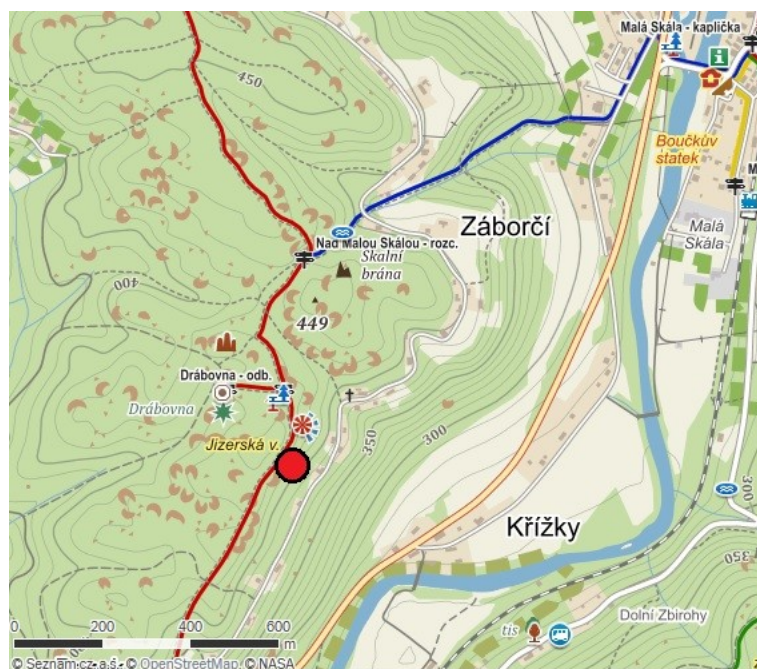
### 3.4.3 Drábovna

Lokalita se nachází v české křídové pánvi u obce Záboreč ve skalním městě Drábovna, 1,5 km JZ od Malé Skály, v nadmořské výšce 420 m n. m. Je tvořena jemné až hrubě zrnitými pískovci coniackého stáří (Slavík 2014). Lokalita je v lese, na hraně mohutného otevřeného údolí Jizery s relativně silným prouděním vzduchu, zvláště mimo vegetační období, kdy jsou okolní stromy bez listů. Údolí je široké 1–1,5 km a hluboké cca 200 m.

Na výchozech je vidět relativně intenzivní rozpad povrchu pískovce. Jsou zde mocné

výkvěty solí, voštiny podléhající destrukci, skalní převisy a římsy a jeskyně o délce několika metrů.

Na lokalitě jsem měřila sací tlak a vlhkost pomocí TDR na pěti různých místech – uvnitř jeskyně, na bázi hladké stěny bez voštin, na převisu skály, v místě výkvětu solí a ve voštinách. Ve voštinách jsem měřila mělké díry (0,5–1 cm) na hřebítku a uvnitř voštiny. Čelo pilíře je orientováno k JV. Stejným směrem je orientovaný i výchoz s voštinami a místo výkvětu solí. Stěna bez voštin, kde jsem měřila sací tlak na její bázi je orientovaná k SV.



Obr. 3.12 : Umístění lokality Drábovna

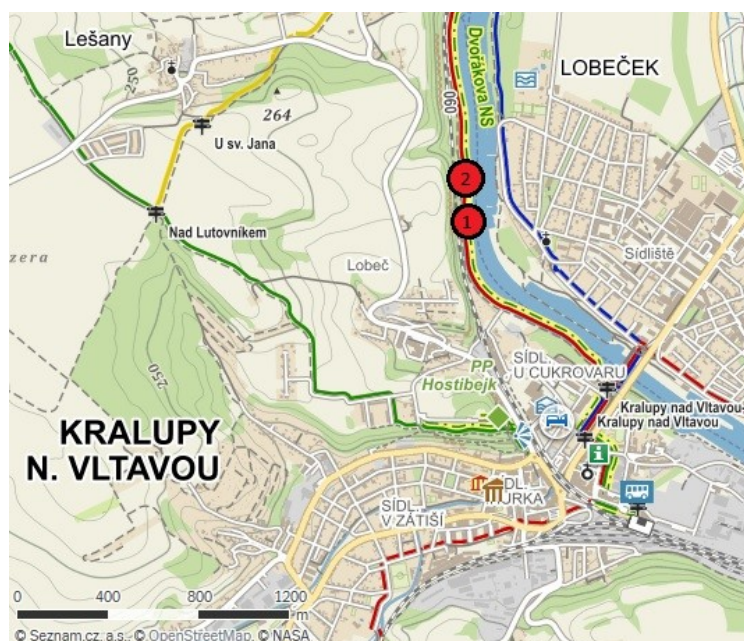
### 3.4.4 Dvořákova stezka

Jde o dvě lokality, které se nacházejí u Kralup nad Vltavou na Dvořákově stezce na levém břehu Vltavy, v nadmořské výšce 180 m n. m. Výchozy jsou orientovány směrem na východ.

Lokalita Dvořákova stezka I leží cca 400 m na sever od Kralup nad Vltavou, lokalita Dvořákova stezka II je od ní vzdálena cca 150 m směrem k Nelahozevsi. Skalní výchozy jsou tvořeny arkózami nýřanských vrstev (svrchní část kladenského souvrství) karbonského stáří. V nejvyšší části srázů (mimo zájmovou lokalitu) vystupují i transgredující svrchnokřídové uloženiny perucko-korycanského souvrství. Arkózy jsou zde pevnější a na ovětralých plochách lze pozorovat šikmé i čočkovité zvrstvení a charakter tenkých, vyklíňujících slepencových poloh. Místa obsahují laminy zuhelnatělé hmoty (Chlupáč 1999). Lokalita je zajímavá především pro výrazné pískovcové útvary – skalní římsy, sklípkovité dutiny a především tafoni.

Na lokalitě Dvořákova stezka I jsem měřila sací tlak v mělké hloubce pod povrchem (1–2 cm) na pěti místech v různých částech jednoho tafone a ve dvou hlubších dírách (3,5 cm a 6 cm) na visoru a uvnitř tafone. Na lokalitě Dvořákova stezka II jsem měřila sací tlak v mělké

hloubce pod povrchem na dvou tafoni vždy na visoru a uvnitř tafone. Výchozy jsou orientovány směrem k východu a nacházejí se 7–15 m nad hladinou Labe.



Obr. 3.13 : Umístění lokality Dvořákova stezka

## 4 Výsledky a diskuze

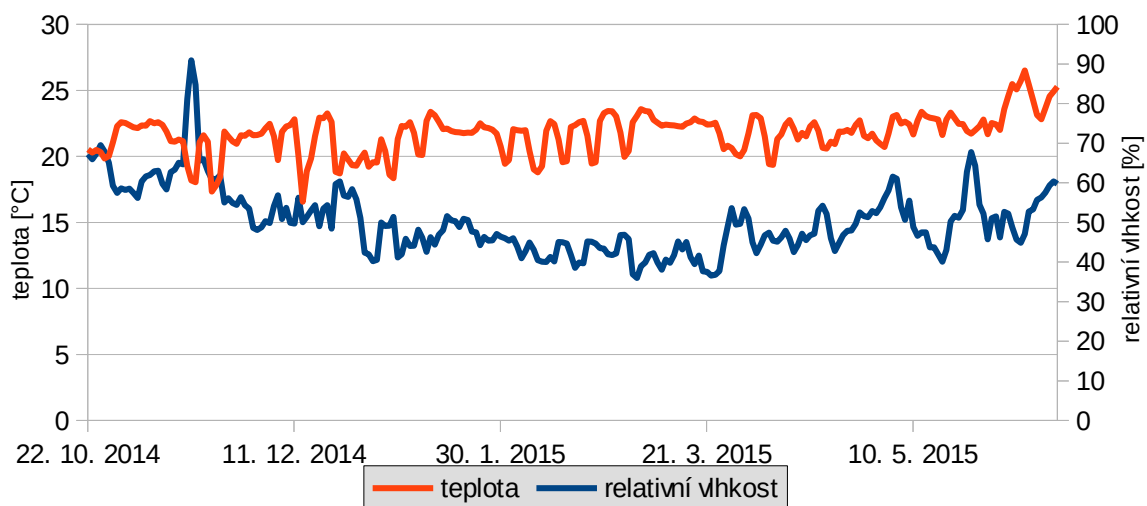
### 4.1 Laboratorní práce

K dispozici jsem měla celkem 10 pískovcových jader. Jádra V3/6, V2/3 a 5/20 byla umístěna výparovou plochou ve vertikální poloze, jak je ukázáno na obr. 4.1. Ostatní jádra byla umístěna výparovou plochou v poloze horizontální.

Pro monitorování podmínek prostředí bylo u jader umístěno čidlo měřící teplotu a relativní vlhkost vzduchu s intervalem 30 minut. V grafu na obr. 4.2 jsou průměrné hodnoty za 24 hodin během trvání pokusů na všech jádrech od října 2014 do června 2015. Průměrná teplota se směrodatnou odchylkou byla  $21,7 \pm 1,7^\circ\text{C}$ , průměrná relativní vlhkost  $50,3 \pm 9,0 \%$ .



Obr. 4.1: Jádra V3/6, V2/3 a 5/20



Obr.4.2: Teplota a relativní vlhkost vzduchu v místnosti, kde byla umístěna jádra

#### 4.1.1 Vzorek 2/16

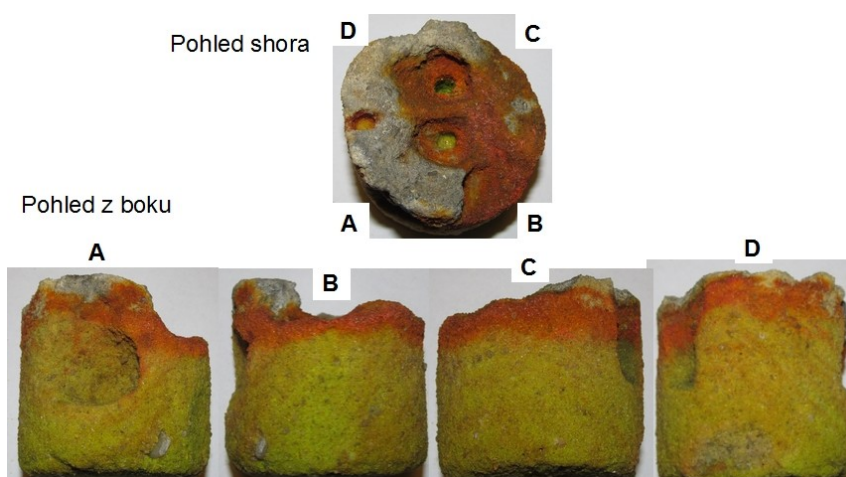
Vzorek 2/16 jsem pro zjišťování pohybu kapilární vlhkosti a páry používala od listopadu 2014 do června 2015. Průběh hmotnostní vlhkosti před a po injektaci roztoku fluoresceinu je vidět na obr. 4.5. Snažila jsem se doplňovat roztok každý den, když se mi to nedařilo, vlhkost vzorku rychle klesla, což jde vidět především v polovině grafu.

Graf na obr. 4.6 ukazuje průběh výparu a hmotnostní vlhkosti vzorku v čase. Na následujícím grafu (obr. 4.7) je znázorněna vzájemná závislost těchto dvou parametrů. Z grafu jde vidět, že se zvyšující se hmotnostní vlhkostí se zvyšuje i výpar.

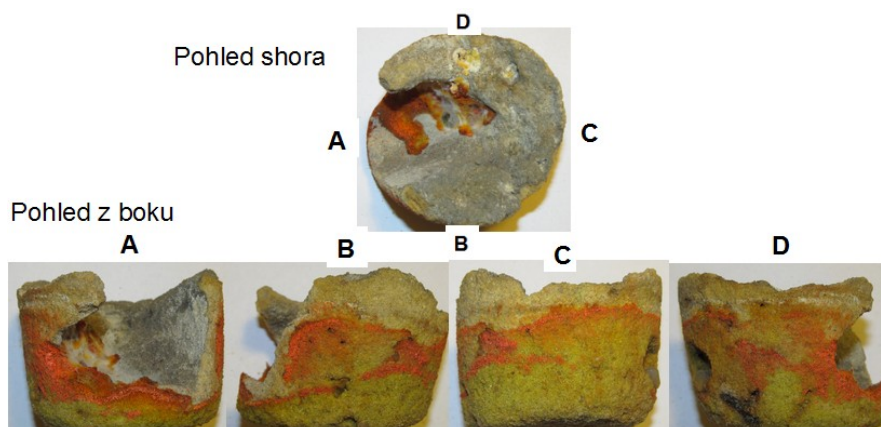
Vlhkostní fronta ve vzorku stoupala velmi nerovnoměrně. První malá skvrna se objevila na povrchu vzorku na úpatí hřebítku 13. listopadu po zvýšení hmotnostní vlhkosti vzorku na 2,2 %. Přitom po obvodu vzorku byla vlhkostní fronta nejvýše zhruba ve 2,5 cm nad bází vzorku, na jedné straně vzorku nebyla vidět vůbec a na jedné byla ve výšce 1 cm nad bází. Velikost obarvené plochy na povrchu vzorku se zvětšovala velmi rychle, i když se vlhkost vzorku pohybovala jen od 2 % do 3,5 %. Obarveny byly všechny důlky a nižší části hřebítků.

Od 24. prosince se obarvená plocha povrchu vzorku velmi dlouho neměnila a to až do května 2015, kdy jsem postupně zvyšovala vlhkost na 6,5 %. Obarvená plocha se však zvětšila jen nepatrně. Při dalším zvyšování vlhkosti až na 8 % se už velikost obarvené plochy nezměnila. Průběh velikosti obarvené plochy vzorku a hmotnostní vlhkosti v čase ukazuje obr. 4.8. Obr. 4.9 srovnává velikost obarvené plochy s hmotnostní vlhkostí. Z grafu lze vidět, jak velikost obarvené plochy strmě stoupala při udržování hmotnostní vlhkosti okolo 2 % až 3 %. Obr. 4.10 ukazuje hodnoty výparu v závislosti na velikosti obarvené plochy. Velikost výparu závisí i na hodnotě vlhkosti, proto je zde velký rozptyl hodnot výparu pro některé hodnoty velikosti obarvené plochy, ale z grafu lze vidět, že se zvětšující se obarvenou plochou se zvyšoval i výpar. Celková obarvená plocha povrchu vzorku byla na konci cca 31 cm<sup>2</sup>, což odpovídá přibližně 67 % povrchu.

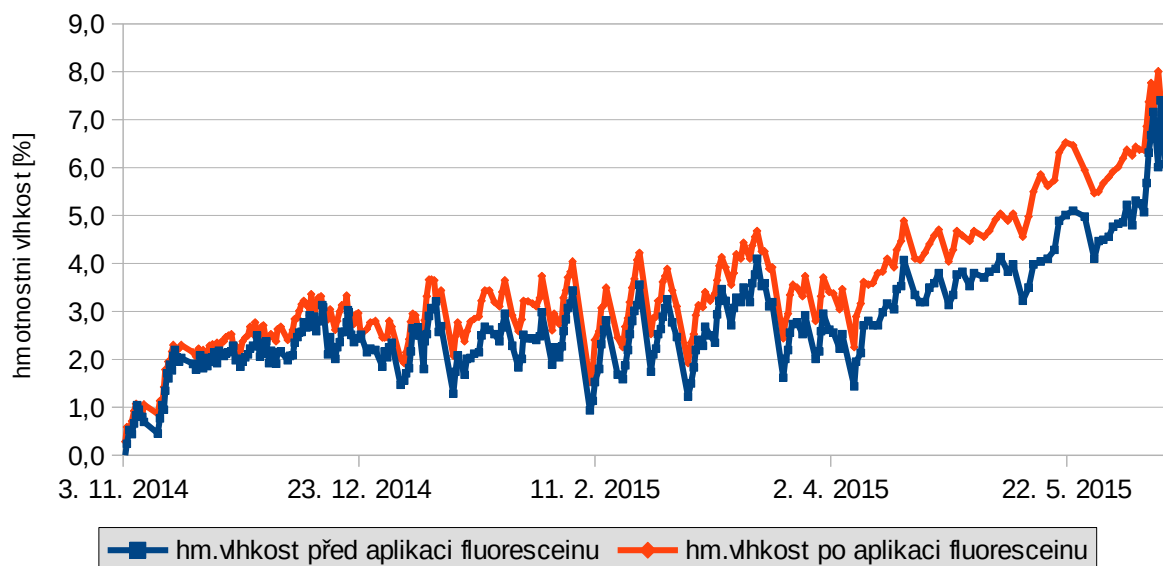
Vlhkostní fronta se dostala na všech místech po obvodu vzorku k povrchu na konci ledna. Na obr. 4.3 je dokumentace vzorku z 28. ledna, obarveno bylo přibližně 65 % povrchu vzorku. Ve vyvrtané díře v důlku vzorku jde vidět, že fluorescein v ní má žlutou barvu. To znamená, že se vypařoval na povrchu nebo těsně pod ním. V únoru vzorek přes víkend téměř vyschl, vlhkost byla pouze 0,9 %. Po zvýšení vlhkosti pak byla na vzorku vidět nová od báze vzorku postupující výparová fronta, která byla mnohem rovnoměrnější než ta původní a částečně kopírovala nerovnosti povrchu vzorku. Po vystoupení nové výparové fronty až k původní začínala fronta těsně pod povrchem vzorku. Šířka červeně obarvené plochy po obvodu vzorku, kde se fluorescein vypařoval, což odpovídá šířce výparové fronty, byla 1–2 cm. Spodní část fronty byla téměř vodorovná. Změna nastala až po zvyšování vlhkosti nad 6 %, kdy se červeně obarvily různé části po obvodu vzorku. U povrchu vzorku byl fluorescein velmi nakoncentrovaný, takže to bylo nejspíše způsobeno tím, že při vyšší vlhkosti už voda ve vzorku neproudila pouze kapilárně, ale i gravitačně dolů. Po vyschnutí vzorku byla vidět největší koncentrace fluoresceinu u povrchu vzorku, avšak rozdíl mezi koncentracemi nebyl tak viditelný jako u jiných vzorků, protože kvůli délce pokusu byla koncentrace fluoresceinu v celém vzorku velmi vysoká. Fotografická dokumentace vzorku je uvedena v příloze.



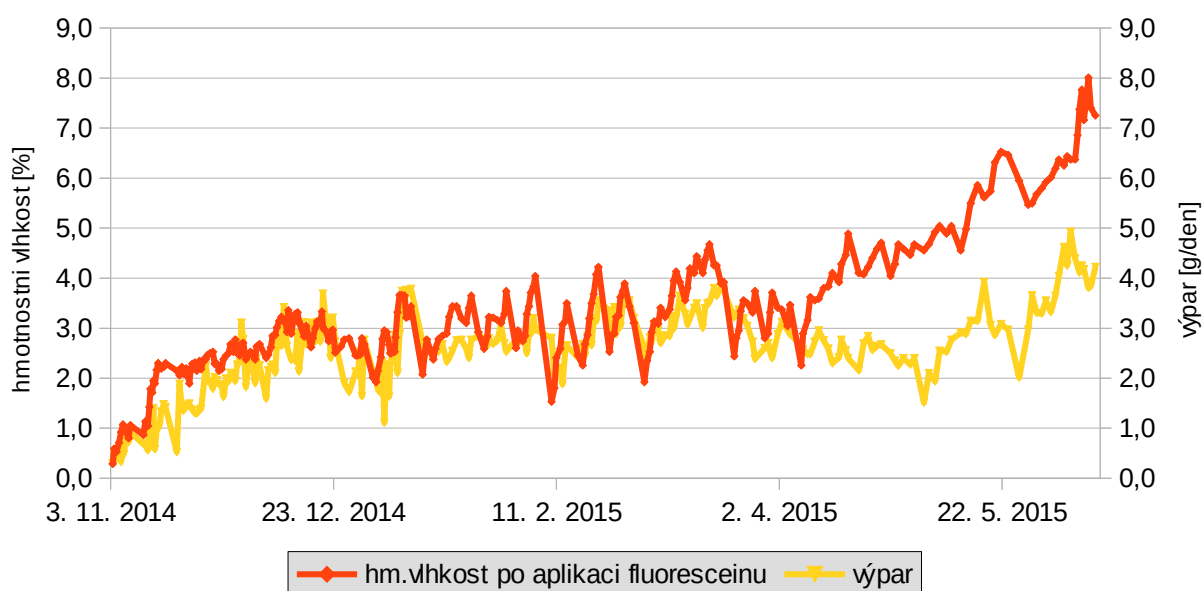
Obr. 4.3: Ukázka dokumentace vzorku 2/16



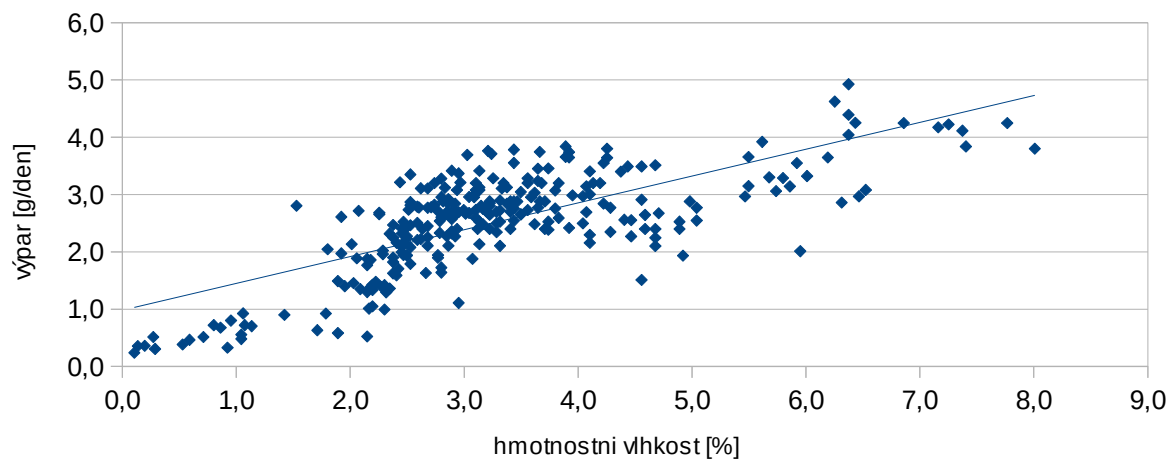
Obr. 4.4: Ukázka dokumentace vzorku 2/27



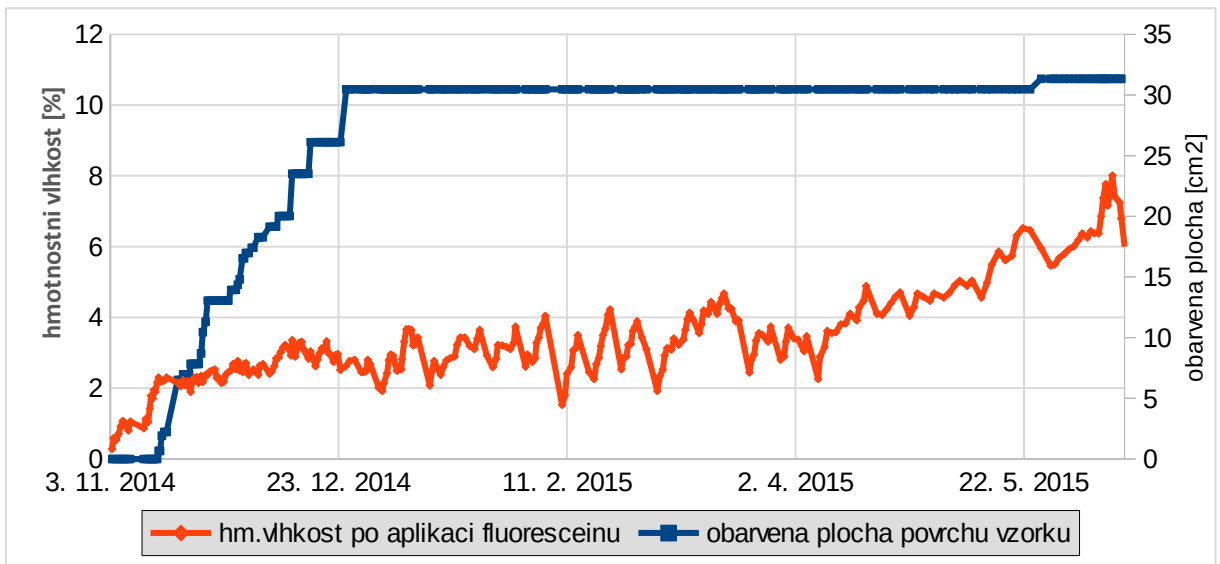
Obr. 4.5: Průběh hmotnostní vlhkosti vzorku 2/16



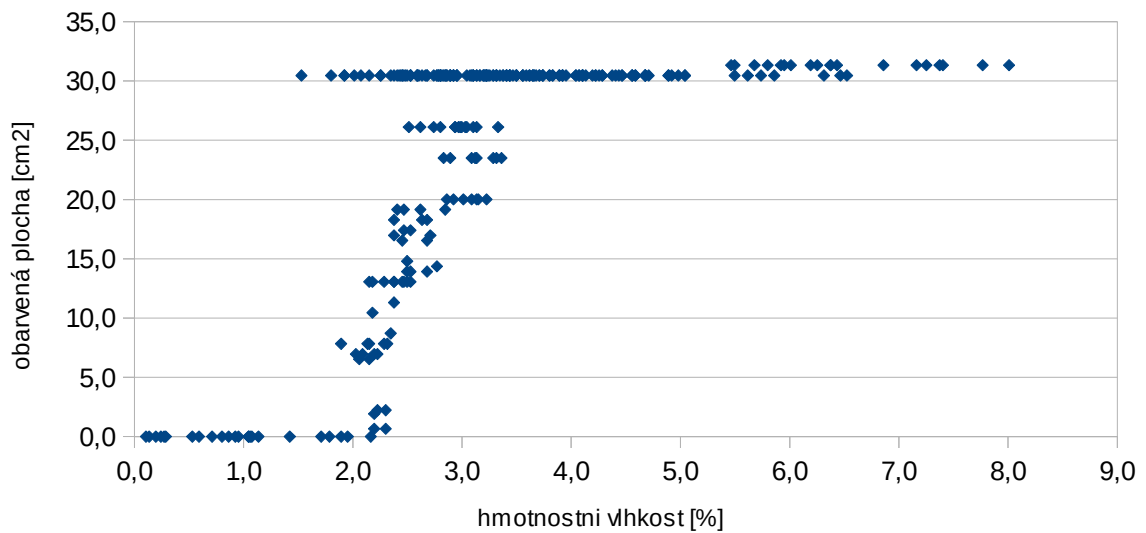
Obr. 4.6: Průběh hmotnostní vlhkosti a výparu vzorku 2/16



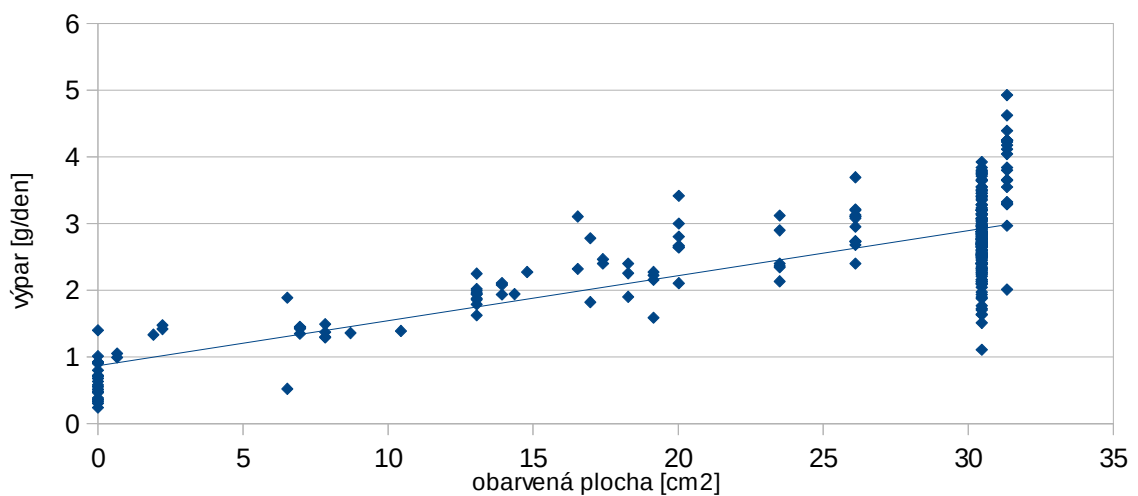
Obr. 4.7: Graf závislosti výparu na hmotnostní vlhkosti vzorku 2/16



Obr. 4.8: Průběh hmotnostní vlhkosti a velikosti obarvené plochy vzorku 2/16



Obr. 4.9: Graf závislosti velikosti obarvené plochy na hmotnostní vlhkosti vzorku 2/16



Obr. 4.10: Graf závislosti výparu na velikosti obarvené plochy vzorku 2/16

### 4.1.2 Vzorek 2/27

Nejdéle probíhalo měření na jádru 2/27. Pomocí roztoku fluoresceinu jsem zvyšovala hmotnostní vlhkost vzorku od října 2014 do června 2015. Průběh vývoje hmotnostní vlhkosti před a po injektování roztoku ukazuje graf na obr. 4.11. Plena, kterou jsem vložila na dno PVC zátky, zpočátku udržovala hydraulický kontakt s pískovcem poměrně dobře. Při zvýšení vlhkosti nad 3 % už ale roztok zůstával v pleně, proto jsem ji 26. listopadu vyměnila za papírové ubrousky, které se osvědčily lépe. Výměna je v grafu viditelná jako velké snížení hmotnostní vlhkosti téměř na nulu. Skutečná vlhkost vzorku byla tedy před výměnou mnohem nižší než ukazuje graf. Poté jsem opět zvyšovala vlhkost na 3–4 %. Snažila jsem se doplňovat roztok každý den. Když se mi to nedařilo, vlhkost vzorku rychle klesla, což lze vidět především v polovině grafu.

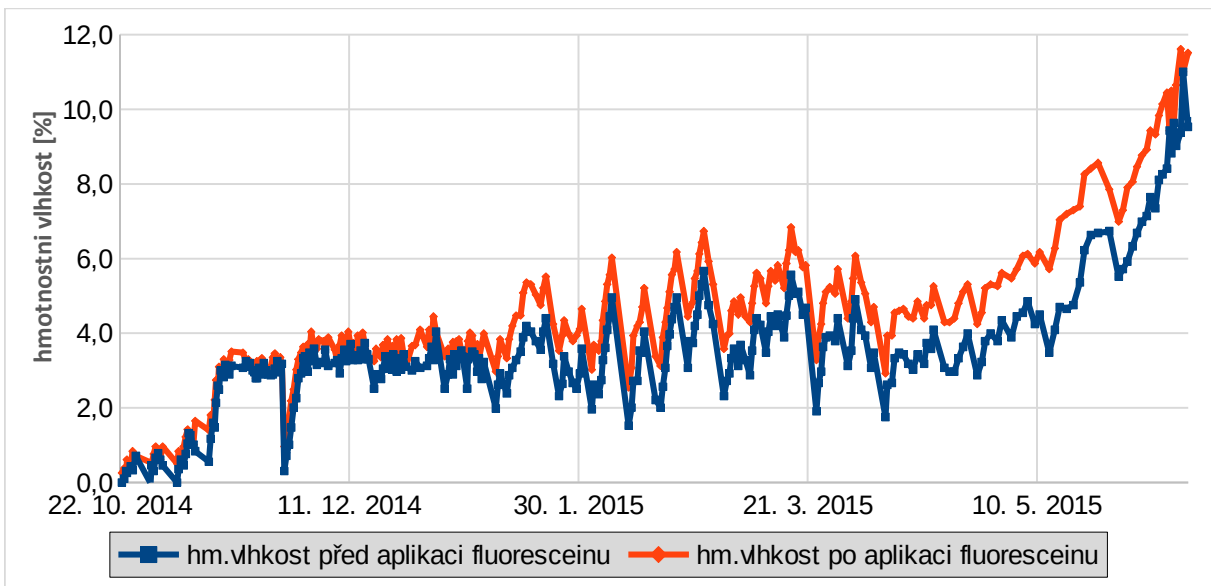
Na obr. 4.12 je znázorněn průběh výparu a hmotnostní vlhkosti vzorku v čase. Na následujícím grafu (obr. 4.13) je znázorněna vzájemná závislost těchto dvou parametrů. Z grafu lze vidět, že se zvyšující se hmotnostní vlhkostí se zvyšuje i výpar.

První malá skvrna ( $0,06 \text{ cm}^2$ ) se na povrchu vzorku objevila v nízké části vzorku na úpatí hřbítku 29. listopadu po zvýšení vlhkosti na 3 %. Postupně se v nízké části vzorku vytvářely nové skvrnky, které se při zvyšující se vlhkosti zvětšovaly až se obarvil celý důlek a část úpatí hřbítků. Celková obarvená plocha byla na konci cca  $10 \text{ cm}^2$ , což odpovídá přibližně 22 % celkové plochy povrchu vzorku. Na obr. 4.4 je dokumentace vzorku z konce dubna, aktuální hmotnostní vlhkost vzorku byla 4 %.

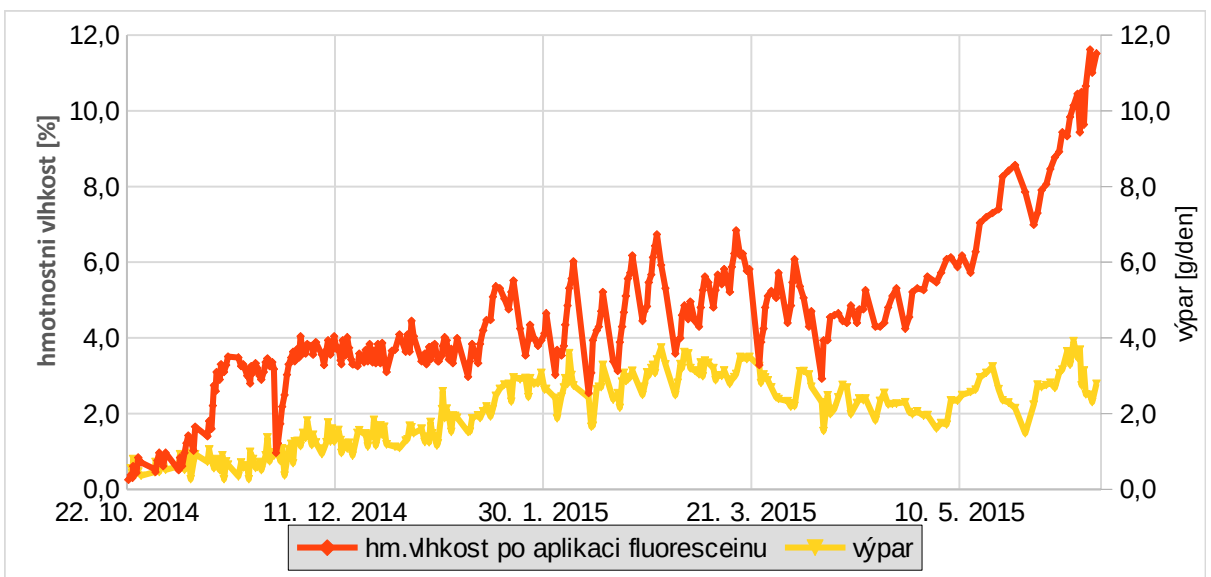
Průběh hmotnostní vlhkosti a obarvené plochy vzorku v čase znázorňuje obr. 4.14. Většina skvrn se objevila při rychlém zvyšování vlhkosti vzorku. Vzájemná závislost těchto parametrů je zachycena na obr. 4.15. Z grafu lze vidět, jak se při zvyšující vlhkosti zvětšovala obarvená plocha povrchu vzorku. Obr. 4.16 ukazuje hodnoty výparu v závislosti na velikosti obarvené plochy. Velikost výparu závisí i na hodnotě vlhkosti, proto je zde velký rozptyl hodnot výparu pro některé hodnoty velikosti obarvené plochy. Z grafu lze však vidět trend zvyšování výparu při zvětšující se obarvené ploše povrchu vzorku.

I u tohoto vzorku se vlhkostní fronta zvedala velmi nerovnoměrně a velmi dlouho, což však mohlo být způsobeno špatným kontaktem mezi vzorkem a papírem na dně zátky, kam jsem přidávala roztok fluoresceinu. Podle srážení se fluoresceinu byla vlhkostní fronta ve výšce 0–3 cm nad bází vzorku, ale v únoru se na jednom místě vzorku vysrážela bílá sůl 0,5 cm pod povrchem, kam později vystoupal i fluorescein. Fotografická dokumentace vzorku je uvedena v příloze.

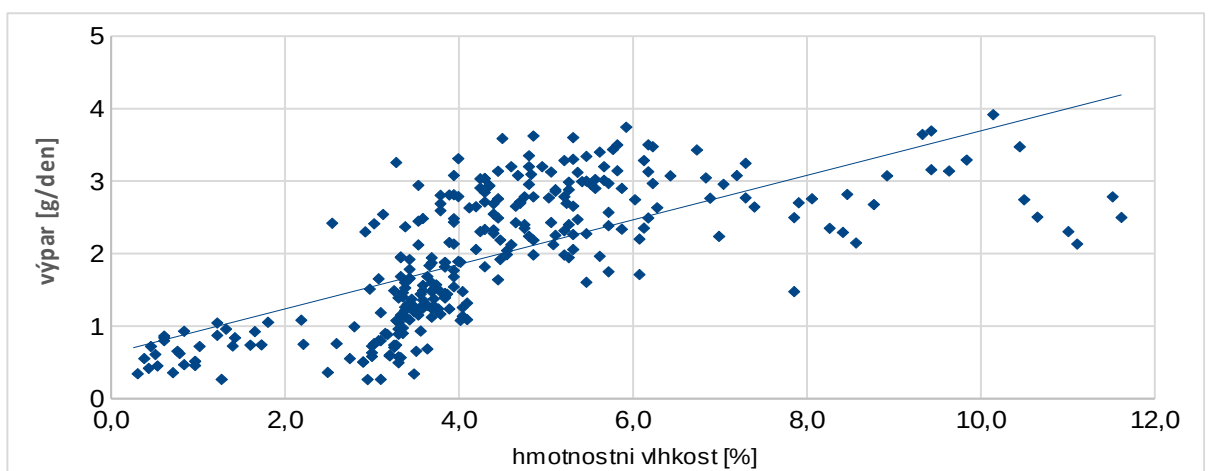
Na konci pokusu jsem postupně zvyšovala vlhkost až k 11 %, abych zjistila, jak se zvětší obarvená plocha a jestli se zvedne vlhkostní fronta. Výsledkem bylo, že obarvení povrchu se zvětšilo jen cca o  $1 \text{ cm}^2$  a fronta zůstala ve vysoké části vzorku ve stejné výšce (zhruba 0,5 cm pod povrchem vzorku), ale bylo vidět, že je vzorek až potud plně saturovaný.



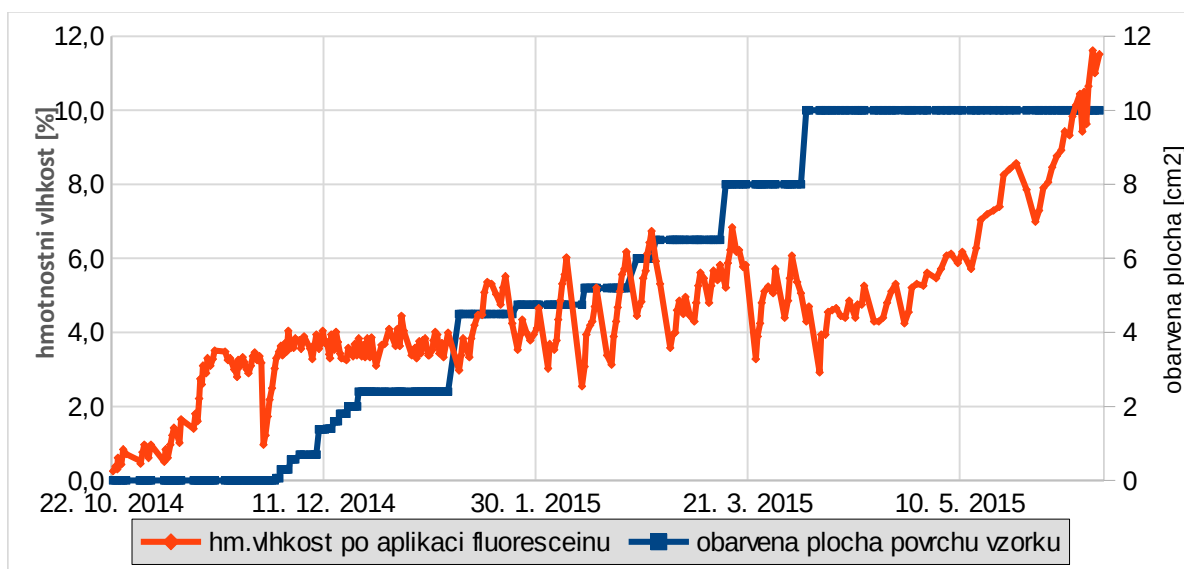
Obr. 4.11: Průběh hmotnostní vlhkosti vzorku 2/27



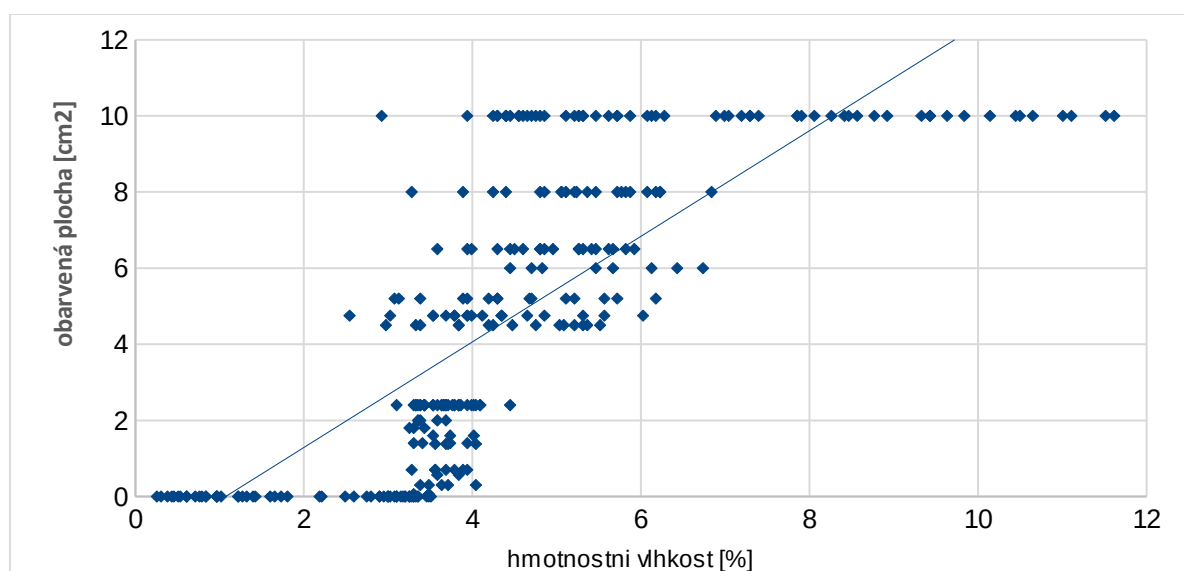
Obr. 4.12: Průběh hmotnostní vlhkosti a výparu vzorku 2/27



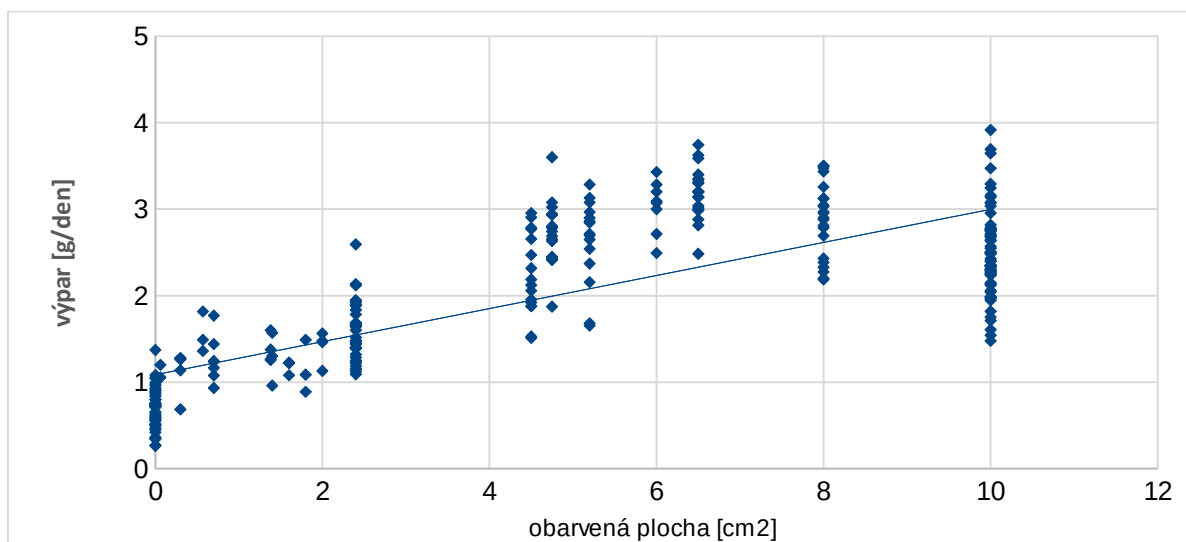
Obr. 4.13: Graf závislosti výparu na hmotnostní vlhkosti vzorku 2/27



Obr. 4.14: Průběh hmotnostní vlhkosti a velikosti obarvené plochy povrchu vzorku 2/27



Obr. 4.15: Graf závislosti velikosti obarvené plochy na hmotnostní vlhkosti vzorku 2/27



Obr. 4.16: Graf závislosti výparu na velikosti obarvené plochy povrchu vzorku 2/27

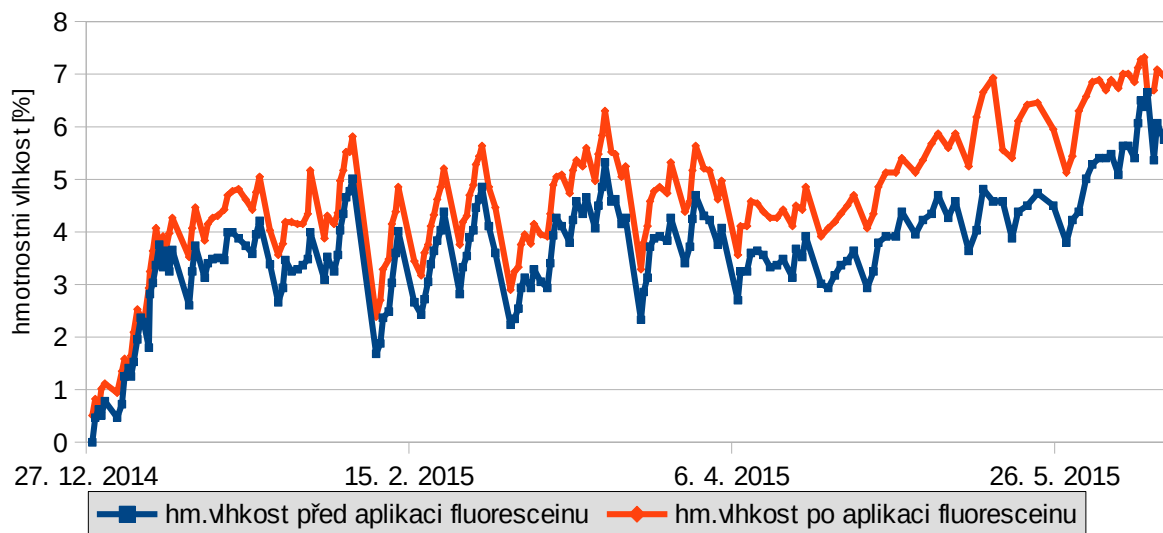
### 4.1.3 Vzorek 5/20

S jádrem jsem pracovala od konce prosince 2014 do června 2015. Na jádru byla dobře vidět postupující vlhkost, která se zvedala téměř vodorovně. K vypařování fluoresceinu a tedy prvnímu objevení části vlhkostní fronty na svrchním povrchu došlo při vlhkosti 2,6 %, kdy po předchozím zvýšení vlhkosti až na 4,3 % vystoupal roztok do výšky cca 2,5–3,5 cm (0,5–1,5 cm pod povrch vzorku). Průběh hmotnostní vlhkosti ukazuje obr. 4.17.

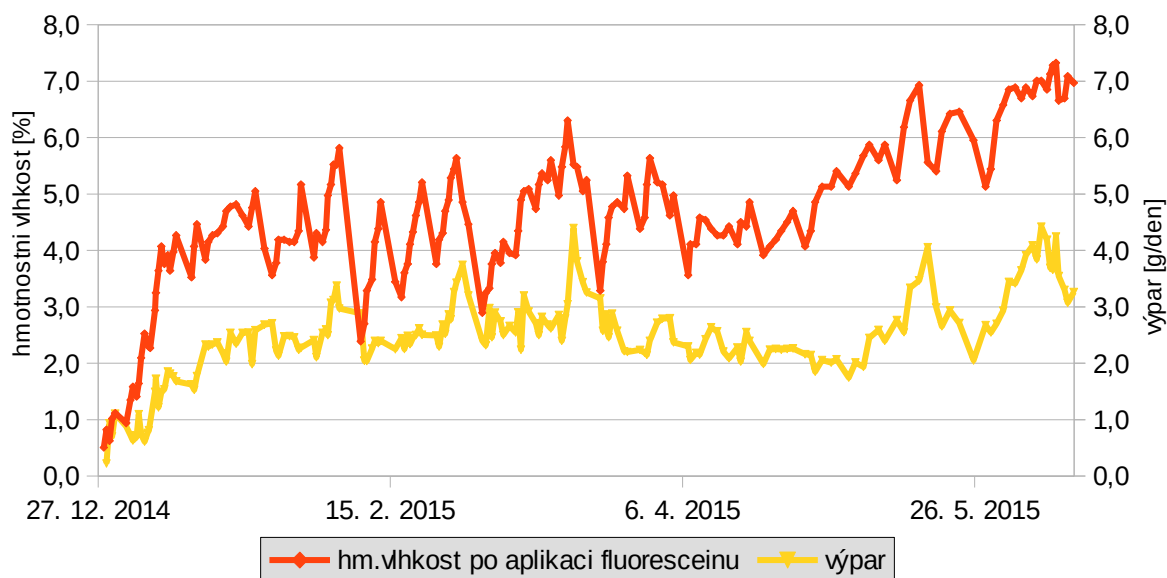
Obr. 4.18 ukazuje průběh výparu a hmotnostní vlhkosti vzorku v čase. Na následujícím grafu (obr. 4.19) je znázorněna vzájemná závislost těchto dvou parametrů. Z grafu lze vidět, že se zvyšující se hmotnostní vlhkostí se zvyšuje i výpar.

Vlhkostní fronta se poměrně dlouho držela zhruba 1 cm pod povrchem vzorku až na místo, kde byla krusta na povrchu vzorku obroušena. Tam se fluorescein objevil po zvýšení vlhkosti na 4,3 % nejprve jako malá tečka, která se postupně rozšířila po celé obroušené ploše až k biokrustě. Podle červené barvy fluoresceinu bylo vidět, že se vypařuje těsně pod začátkem krusty. Fronta se pak postupně prstovitě zvedala až pod povrch vzorku. Šířka červeně obarvené plochy po obvodu vzorku, kde se vypařoval fluorescein a tedy šířka výparové fronty byla cca 1 cm. Na obr. 4.23 je ukázána dokumentace vzorku z 20. ledna. V levé části na povrchu vzorku je vidět obroušená ploška obarvená fluoresceinem a na okraji důlku je první malá skvrnka (0,05 cm<sup>2</sup>), která se na vzorku objevila v polovině ledna po zvýšení vlhkosti na 4,7 %. S postupným zvyšováním vlhkosti se vedle první skvrnky objevilo několik dalších. Ve vyšší části vzorku se první skvrna objevila až v polovině května po zvýšení vlhkosti na 6,9 %. Průběh hmotnostní vlhkosti a obarvené plochy na krustě vzorku v čase ukazuje obr. 4.20. K většímu obarvení povrchu vzorku došlo až na začátku června po postupném zvyšování vlhkosti až na 7,3 %. Nové skvrny se objevily hlavně v důlku – nejnižší části vzorku.

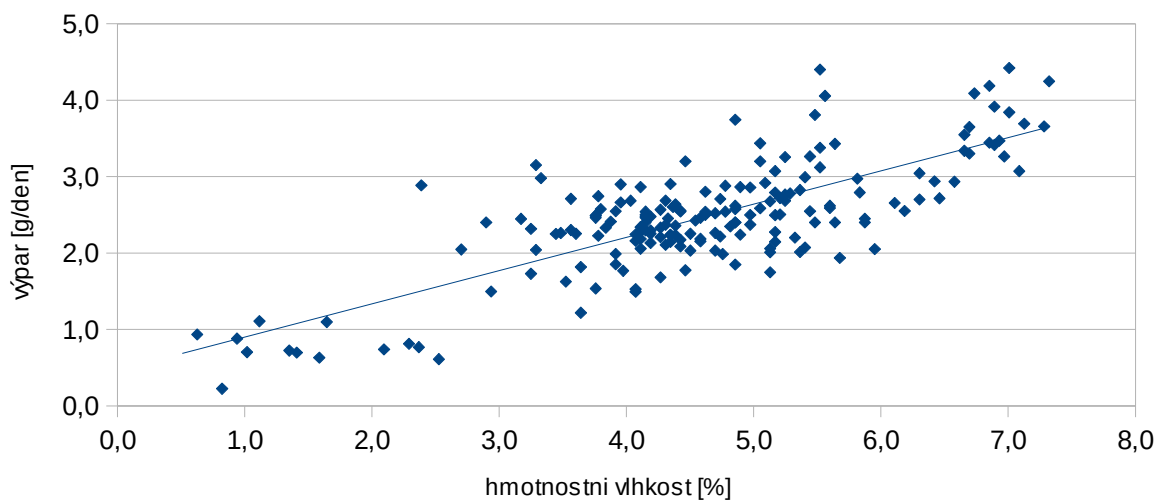
Obr. 4.21 znázorňuje velikost obarvené plochy v závislosti na hmotnostní vlhkosti. Z grafu lze vidět, že obarvená plocha se při zvyšující se vlhkostí zvětšovala, ale mnohem pomaleji než u jiných vzorků. Obr. 4.22 znázorňuje výpar v závislosti na velikosti obarvené plochy povrchu vzorku. Velikost výparu závisí i na hodnotě vlhkosti, proto je zde velký rozptyl hodnot výparu pro některé hodnoty velikosti obarvené plochy. Z grafu je však viditelný trend zvyšování výparu při zvětšující se obarvené ploše povrchu vzorku. Celková obarvená plocha byla ve srovnání s ostatními vzorky velmi malá (3,5 cm<sup>2</sup>, což odpovídá přibližně 9 % celkového povrchu vzorku). Fotografická dokumentace vzorku je uvedena v příloze.



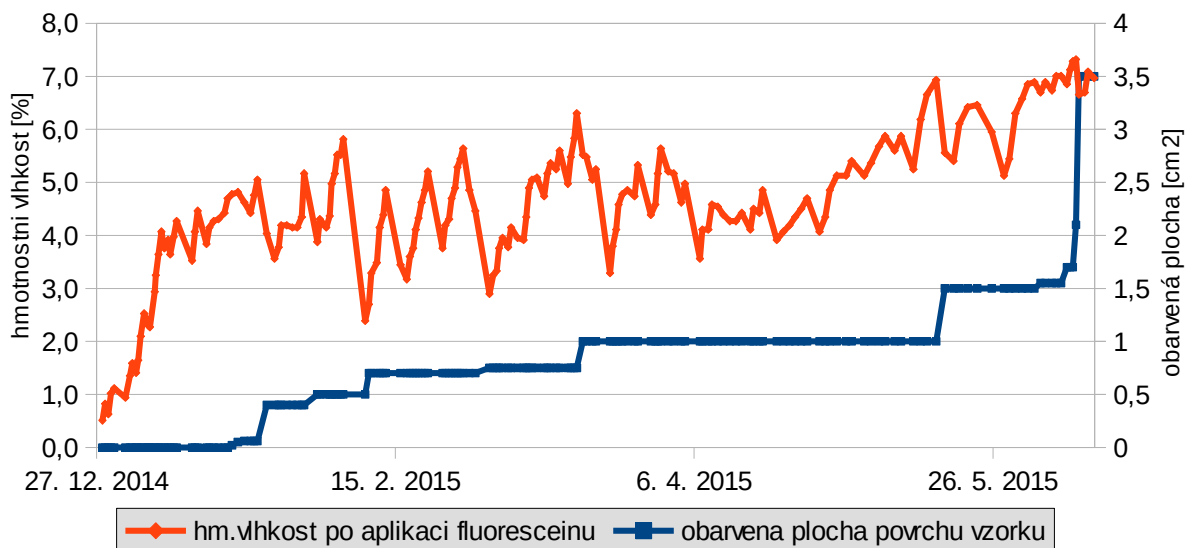
Obr. 4.17: Průběh hmotnostní vlhkosti vzorku 5/20



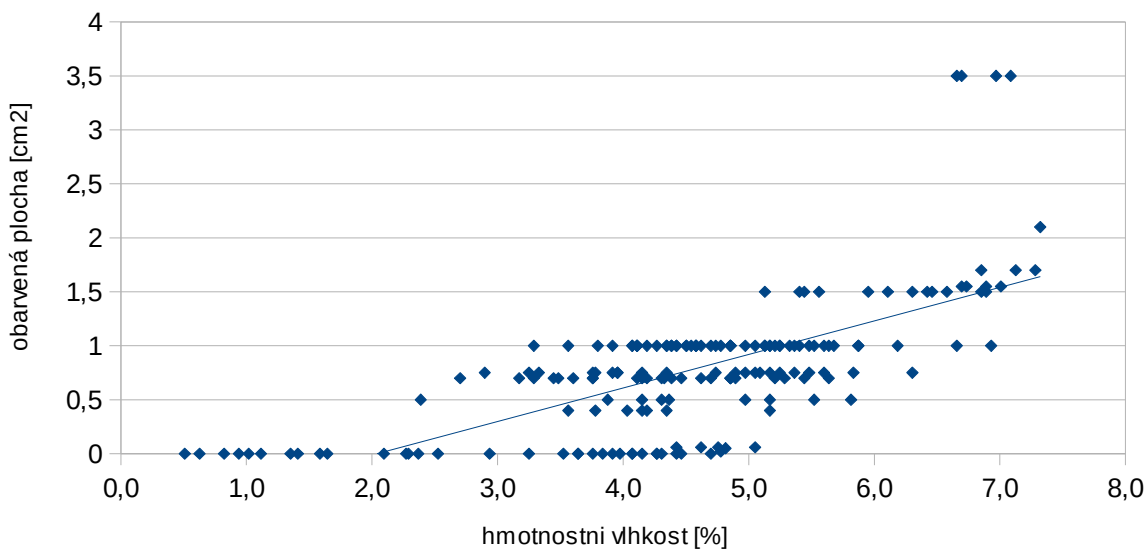
Obr. 4.18: Průběh hmotnostní vlhkosti a výparu vzorku 5/20



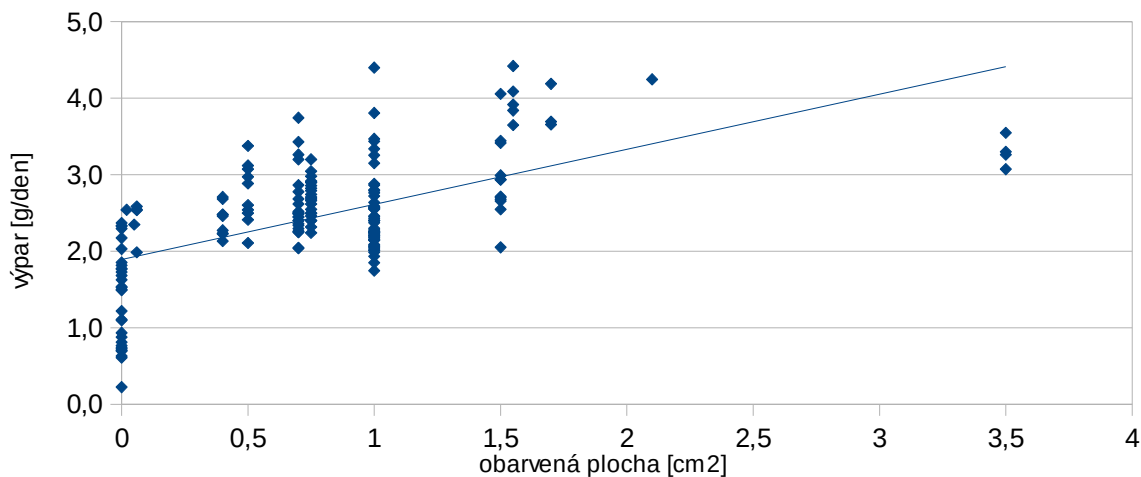
Obr. 4.19: Graf závislosti výparu na hmotnostní vlhkosti vzorku 5/20



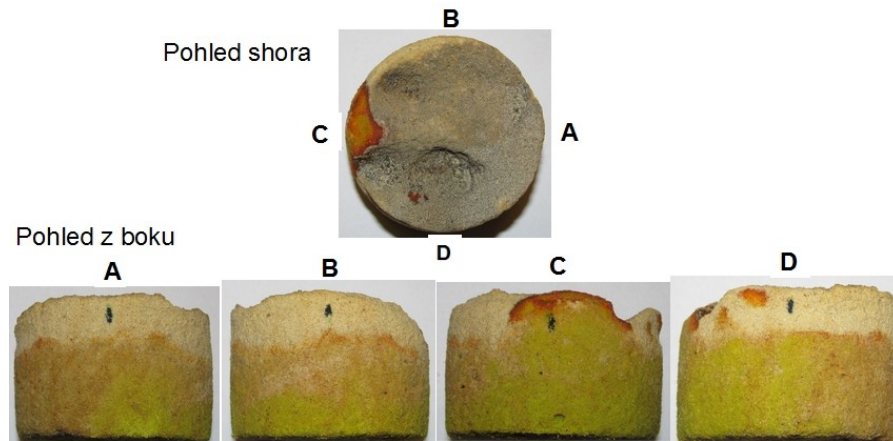
Obr. 4.20: Průběh hmotnostní vlhkosti a velikosti obarvené plochy povrchu vzorku 5/20



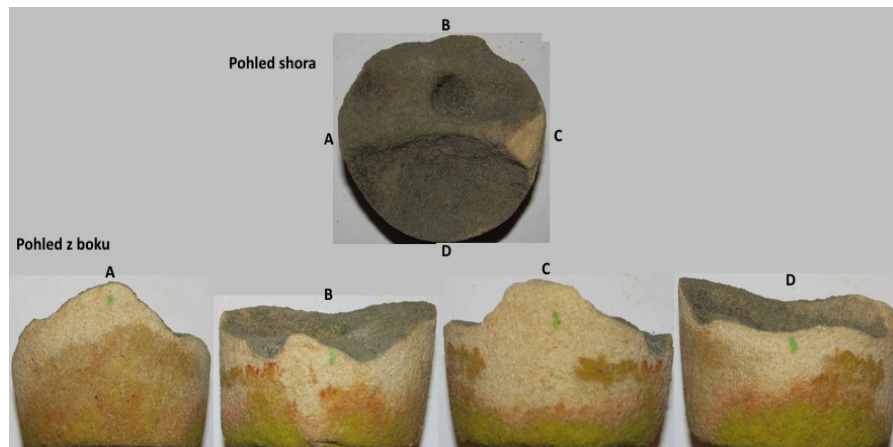
Obr. 4.21: Graf závislosti velikosti obarvené plochy na hmotnostní vlhkosti vzorku 5/20



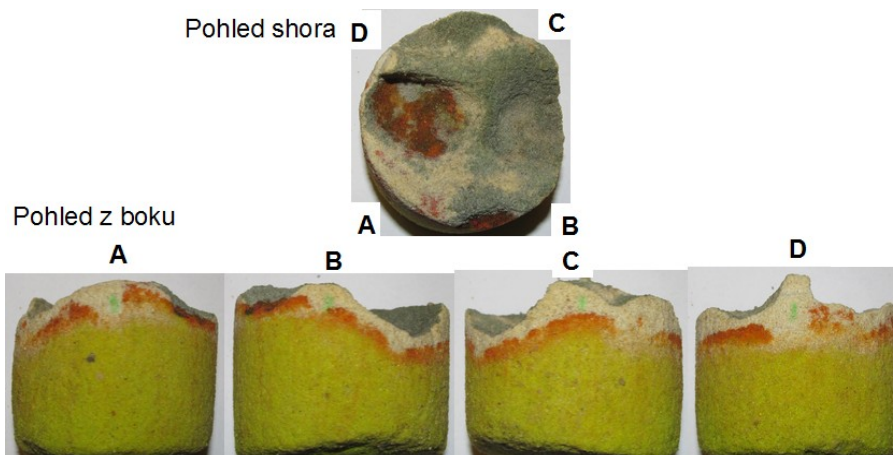
Obr. 4.22: Graf závislosti výparu na velikosti obarvené plochy povrchu vzorku 5/20



Obr. 4.23: Ukázka dokumentace vzorku 5/20



Obr. 4.24: Ukázka dokumentace vzorku V2/3



Obr. 4.25: Ukázka dokumentace vzorku V3/6

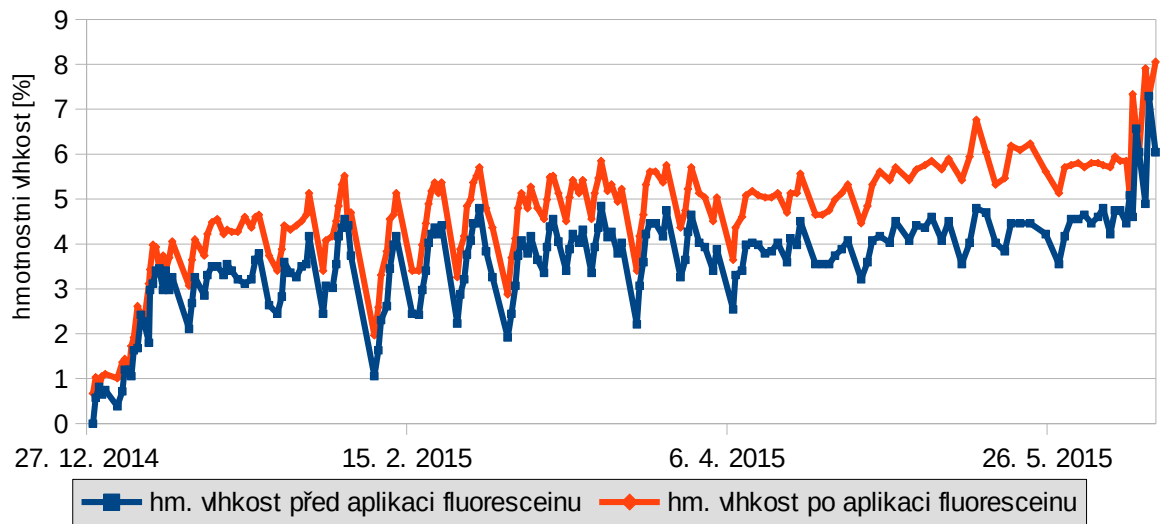
#### 4.1.4 Vzorek V2/3

S jádrem V2/3 jsem pracovala od konce prosince 2014 do června 2015. Zvlhčování vzorku probíhalo velmi nerovnoměrně. Fluorescein pronikal nahoru částí jádra vzorku a rozléval se ve vyšší úrovni, takže obvod vzorku budil dojem, že roztok část pískovce přeskočil. Je to patrné například na dokumentaci vzorku z 5. ledna, která je uvedena na obr. 4.24. Aktuální vlhkost vzorku byla za dané situace 3,0 %. Celá fotografická dokumentace je uvedena v příloze.

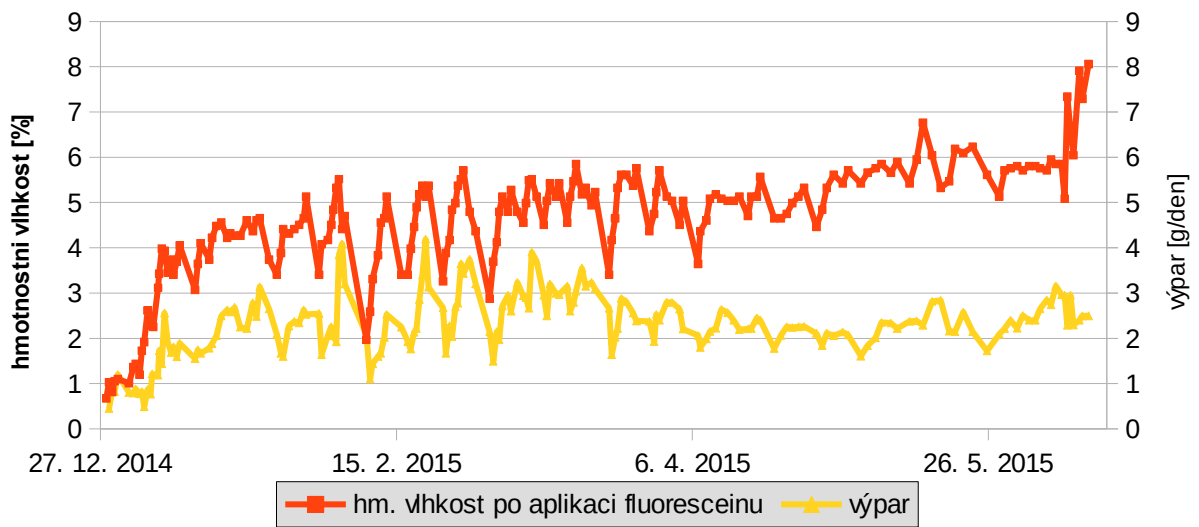
Průběh hmotnostní vlhkosti vzorku je znázorněn na obr. 4.26. Graf na obr. 4.27 ukazuje průběh výparu a hmotnostní vlhkosti vzorku. Na následujícím grafu je znázorněna vzájemná závislost těchto dvou parametrů. Z grafu lze vidět, že se zvyšující se hmotnostní vlhkostí se zvyšuje i výpar.

Poprvé byla výparová fronta po obvodu vzorku viditelná 6. ledna, kdy vlhkost ve vzorku postoupila po většině obvodu až 0,5 cm pod povrch. Vlhkost vzorku byla 3,1 %. V některých místech fronta kopírovala nerovnosti povrchu vzorku, jinde byla v podstatě vodorovná. S dalším zvedáním vlhkosti se výparová fronta dostala těsně pod povrch vzorku na všech místech a kopírovala pak nerovnosti povrchu. Šířka červeně obarvené plochy po obvodu vzorku, kde se vypařoval fluorescein a tedy šířka výparové fronty byla cca 0,5 cm. V únoru jádro během víkendu téměř vyschlo (vlhkost byla 1,6 %) a po zvýšení vlhkosti byla vidět nová fronta, postupující téměř vodorovně.

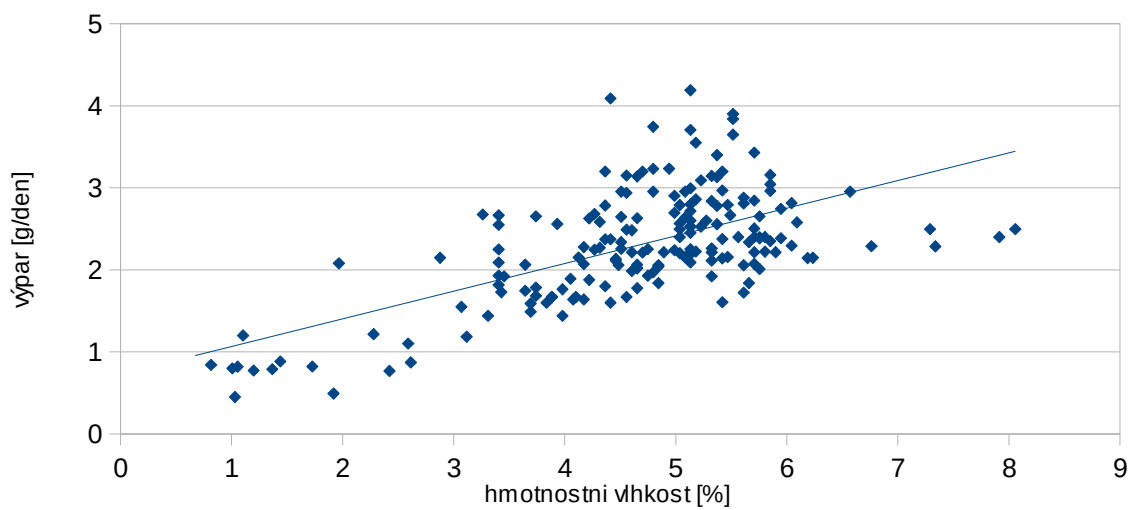
Po zvýšení vlhkosti na 4,5 % se na povrchu vzorku objevila malá skvrnka v místě, kde byla krusta obroušena a současně na krustě pod tímto místem na úpatí hřebítku. V okolí obroušené plochy prosvítal pod biokrustou červený fluorescein. Postupně fluorescein obarvil celou obroušenou část i okolní biokrustu na hřebítku voštiny. V nejhlubším důlku uprostřed vzorku se fluorescein objevil poprvé 16. února. Skvrna se zvětšovala jen mírně. Až po zvýšení vlhkosti na 6,8 % se následně obarvila téměř celá. Průběh hmotnostní vlhkosti a celkové obarvené plochy povrchu vzorku je na obr. 4.29. Při zvýšení hmotnostní vlhkosti nad 6 % už vzorek nenasál všechen roztok na dně zátky, proto jsem ho nechávala výparovou plochou v horizontální poloze. Od 25. května se však obarvení povrchu neměnilo, přestože jsem na dno zátky přidávala větší množství roztoku, který na dně zůstával i do příštího měření. Báze vzorku byla tedy plně saturovaná. Z grafu na obr. 4.30 lze vidět trend růstu velikosti obarvené plochy povrchu vzorku při jeho zvyšující se hmotnostní vlhkostí. Následující graf udává velikost výparu v závislosti na obarvené ploše povrchu vzorku. Velikost výparu závisí i na hodnotě vlhkosti, proto je zde velký rozptyl hodnot výparu pro některé hodnoty velikosti obarvené plochy. Z grafu lze však vidět trend zvyšování výparu při zvětšující se obarvené ploše povrchu vzorku. Celková obarvená plocha byla cca 8 cm<sup>2</sup>, což odpovídá přibližně 18 % celkové plochy povrchu vzorku.



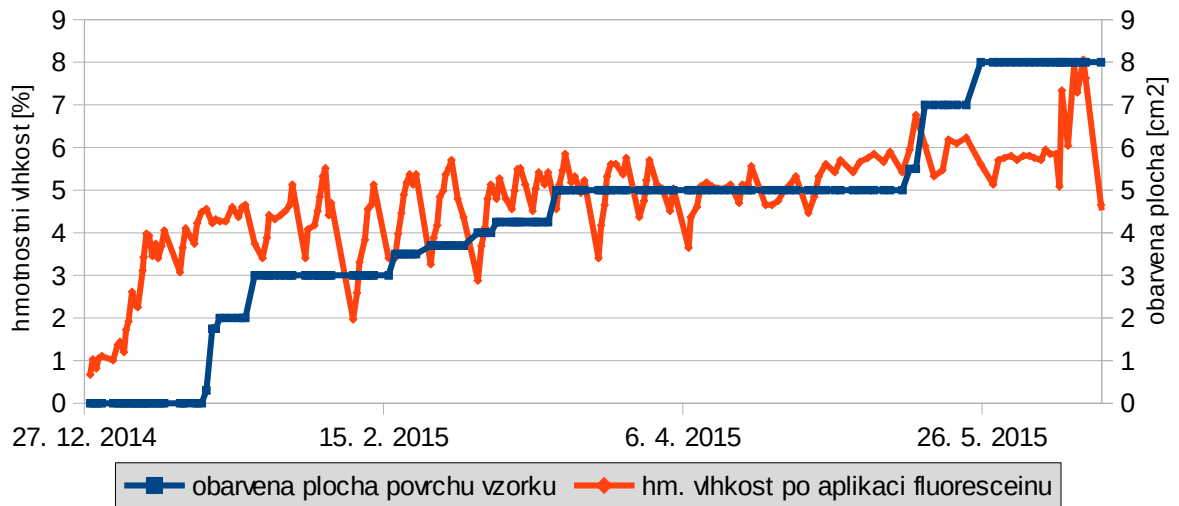
Obr. 4.26: Průběh hmotnostní vlhkosti vzorku V2/3



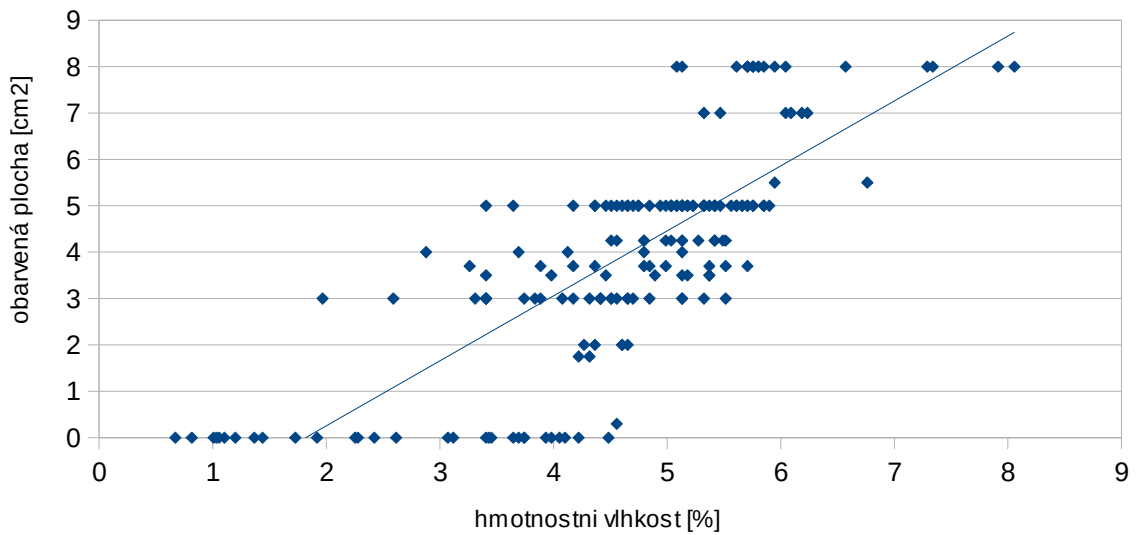
Obr. 4.27: Průběh hmotnostní vlhkosti a výparu vzorku V2/3



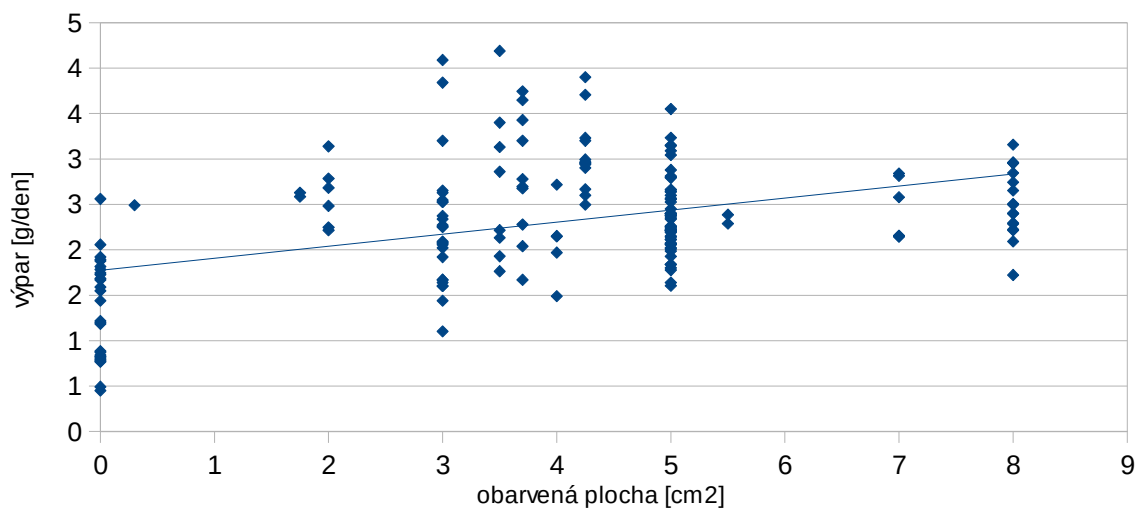
Obr. 4.28: Graf závislosti výparu na hmotnostní vlhkosti vzorku V2/3



Obr. 4.29: Průběh hmotnostní vlhkosti a velikosti obarvené plochy povrchu vzorku V2/3



Obr. 4.30: Graf závislosti velikosti obarvené plochy na hmotnostní vlhkosti vzorku V2/3



Obr. 4.31: Graf závislosti výparu na velikosti obarvené plochy povrchu vzorku V2/3

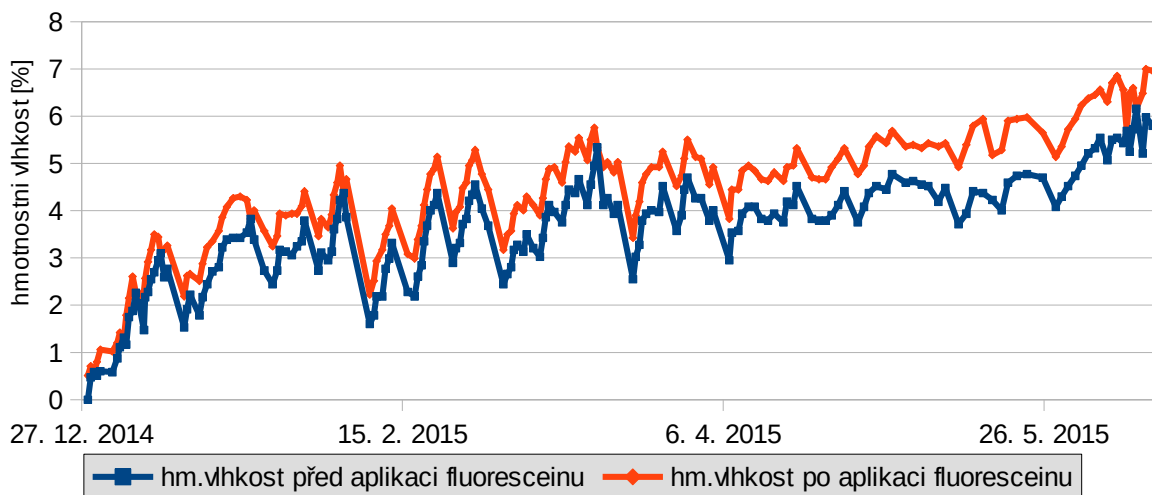
### 4.1.5 Vzorek V3/6

S jádrem V3/6 jsem pracovala od konce prosince 2014 do června 2015. Vlhkostní fronta se ve vzorku pohybovala téměř rovnoměrně. Až po vystoupení do výšky 3–4 cm a přiblížení se k povrchu začala částečně kopírovat jeho nerovnosti. Stejně jako na vzorku V2/3 bylo při zvyšování vlhkosti vidět po obvodu vzorku neobarvená místa, ale v menší míře. Průběh hmotnostní vlhkosti vzorku ukazuje obr. 4.32

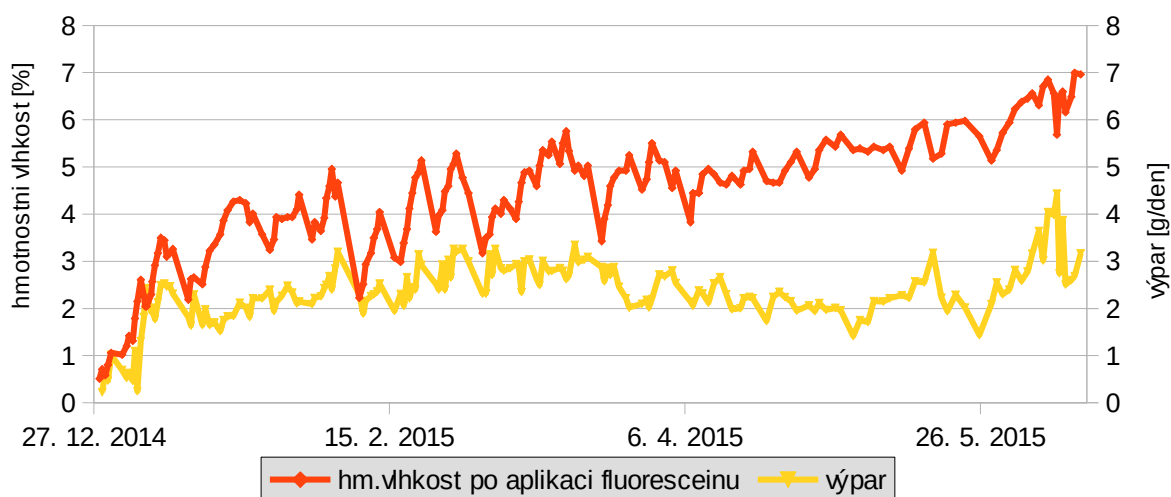
Graf na obr. 4.33 ukazuje průběh výparu a hmotnostní vlhkosti vzorku. Na následujícím grafu je znázorněna vzájemná závislost těchto dvou parametrů. Z grafu jde vidět, že se zvyšující se hmotnostní vlhkostí se zvyšuje i výpar.

Poprvé byla výparová fronta na vzorku částečně viditelná 14. ledna v úrovni 0,5–1,5 cm pod povrchem vzorku. Vlhkost vzorku byla 2,2 %. S postupným zvyšováním vlhkosti se fronta skokově přibližovala k povrchu vzorku. Po celém obvodu vzorku byla vidět 20. února, kdy byla 0–0,5 cm pod povrchem. Šířka červeně obarvené plochy po obvodu vzorku, kde se vypařoval fluorescein a tedy šířka výparové fronty byla 0,5–1 cm. V květnu po zvýšení vlhkosti na 6 % se červeně obarvily i různé plochy po obvodu vzorku pod vlhkostní frontou. U povrchu vzorku byl fluorescein velmi nakoncentrovaný, takže to bylo nejspíše způsobeno tím, že při vyšší vlhkosti už voda ve vzorku neproudila pouze kapilárně, ale i gravitačně dolů. Po vyschnutí vzorku bylo vidět, že se fluorescein koncentroval těsně pod povrchem v šířce 0,5–1,5 cm.

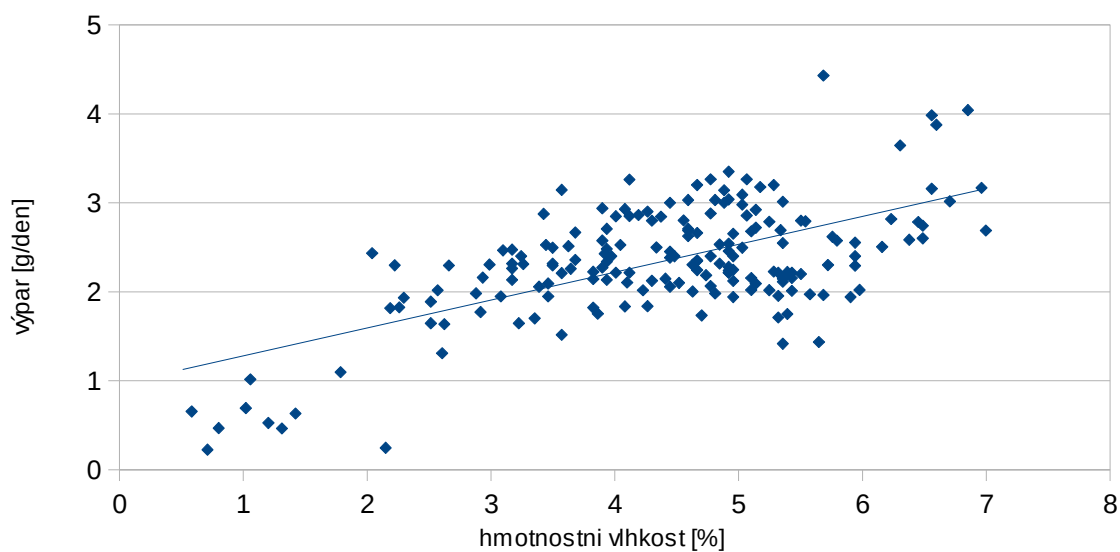
Po zvýšení hmotnostní vlhkosti na 3,5 % se 7. ledna uprostřed vzorku na kraji důlku objevila žlutá skvrna o velikosti 2,5 cm<sup>2</sup>. Ta postupně změnila barvu do oranžova, ale nijak se nezvětšovala. První červené skvrnky se na povrchu vzorku objevily na kraji a uprostřed důlku 18. ledna po předchozím zvýšení vlhkosti na 3,9 %. Se zvyšující se vlhkostí se skvrny poměrně rychle zvětšovaly a přibývaly nové. Dokumentaci vzorku ze začátku února ukazuje obr. 4.25, aktuální vlhkost vzorku byla 3,8 %. Průběh hmotnostní vlhkosti a velikosti obarvené plochy povrchu vzorku je znázorněn na obr. 4.35. Při zvyšování vlhkosti nad 6 % se povrch vzorku rychle obarvoval. Jak se zvyšovala velikost obarvené plochy povrchu vzorku v závislosti na jeho hmotnostní vlhkosti je vidět na obr. 4.36. Obr. 4.37 udává, jak se s velikostí obarvené plochy povrchu vzorku měnil výpar. Velikost výparu závisí i na hodnotě vlhkosti, proto je zde velký rozptyl hodnot výparu pro některé hodnoty velikosti obarvené plochy. Z grafu jde však vidět trend zvyšování výparu při zvětšující se obarvené ploše povrchu vzorku. Celkově bylo obarveno cca 40 cm<sup>2</sup> povrchu (cca 89 %), neobarvená plocha byla jen cca 5 cm<sup>2</sup>. Fotografická dokumentace vzorku je uvedena v příloze.



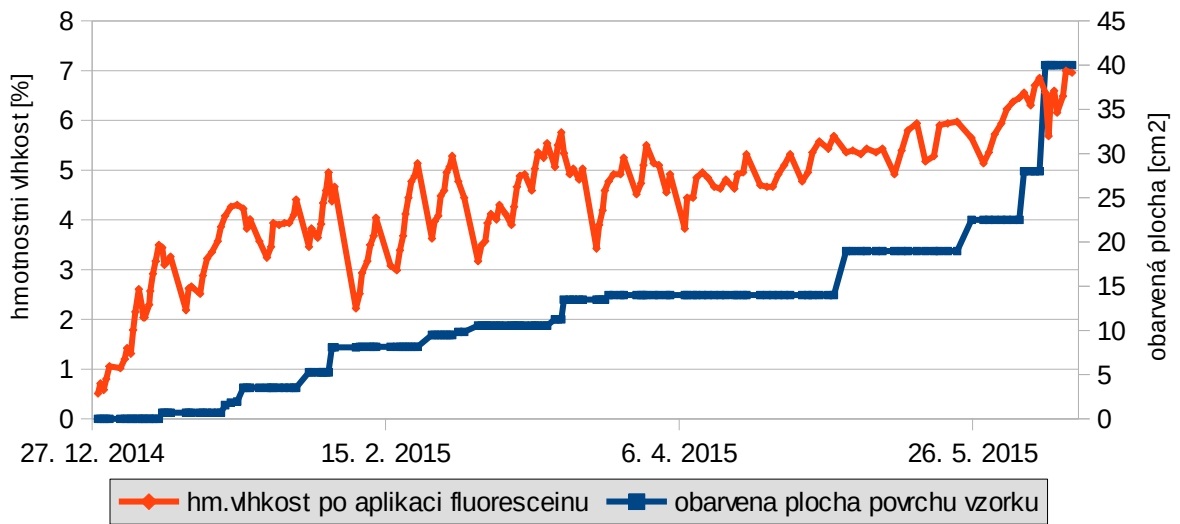
Obr. 4.32: Průběh hmotnostní vlhkosti vzorku V3/6



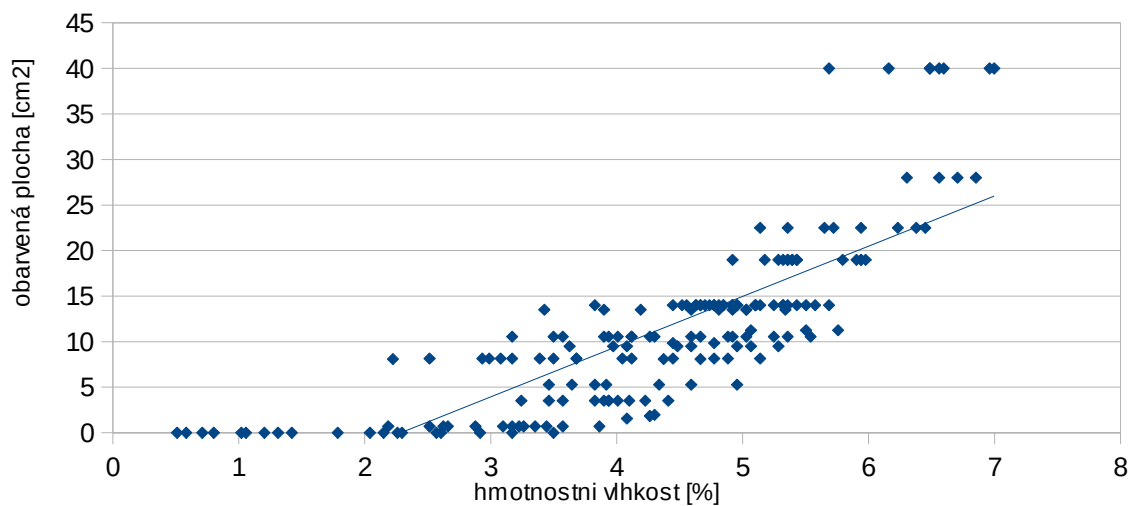
Obr. 4.33: Průběh hmotnostní vlhkosti a výparu vzorku V3/6



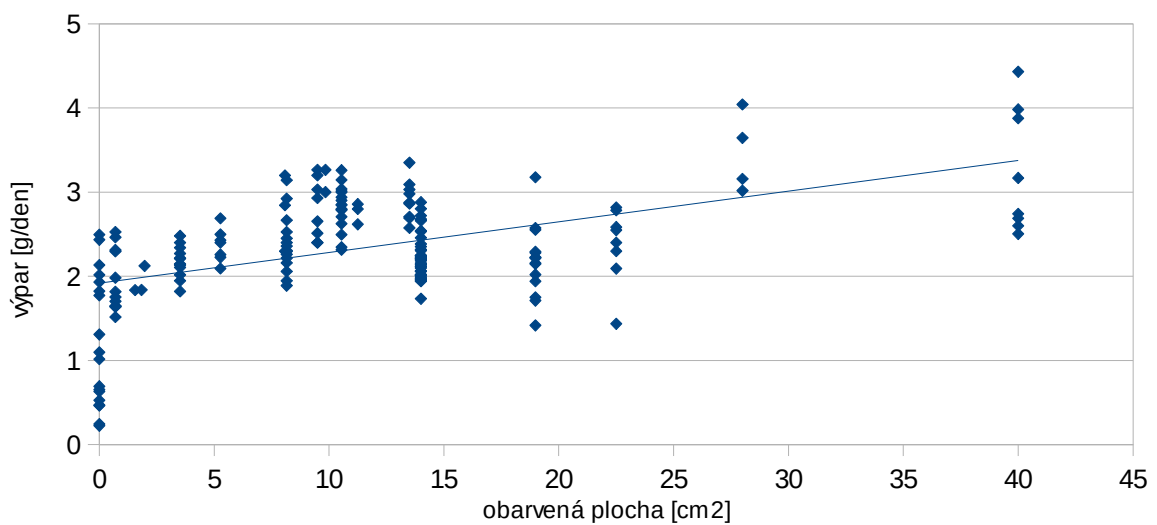
Obr. 4.34: Graf závislosti výparu na hmotnostní vlhkosti vzorku V3/6



Obr. 4.35: Průběh hmotnostní vlhkosti a velikosti obarvené plochy povrchu vzorku V3/6



Obr. 4.36: Graf závislosti velikosti obarvené plochy na hmotnostní vlhkosti vzorku V3/6



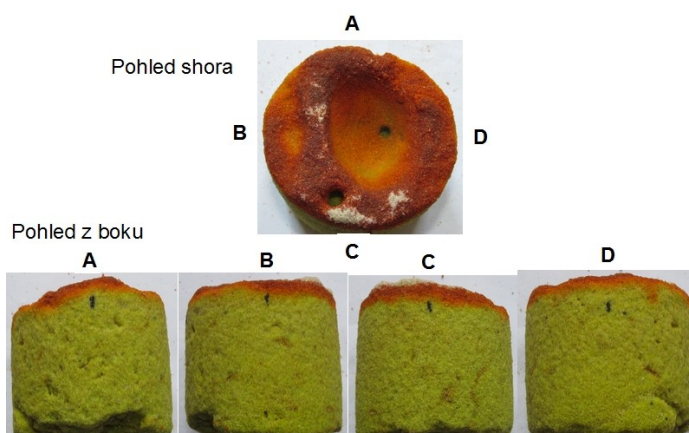
Obr. 4.37: Graf závislosti výparu na velikosti obarvené plochy povrchu vzorku V3/6

#### 4.1.6 Vzorek 2/1b

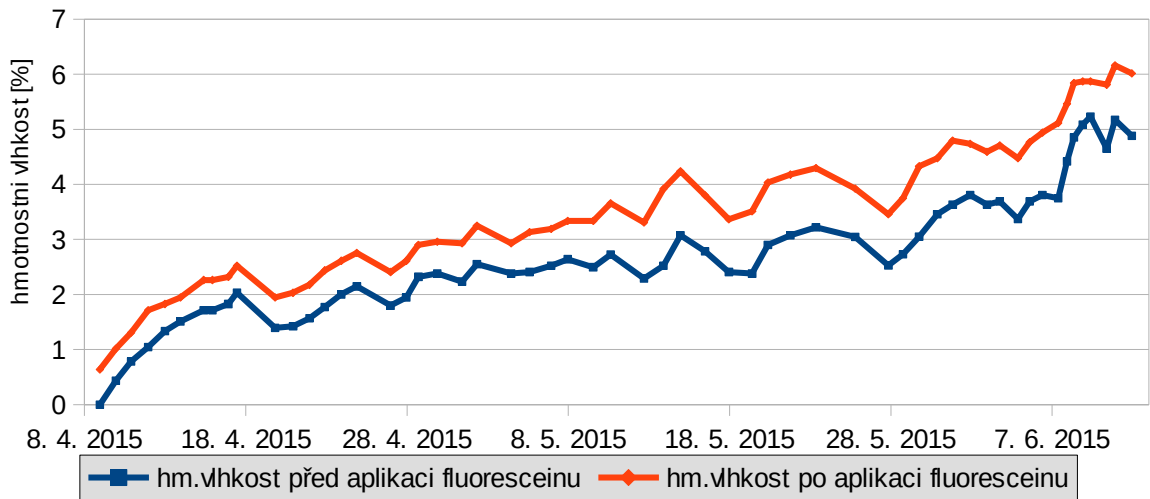
Na všech jádrech bez krusty probíhal experiment prakticky stejně, proto zde uvádím průběh experimentu pouze na dvou z nich. S jádrem 2/1b jsem pracovala od dubna do června 2015. Průběh hmotnostní vlhkosti znázorňuje obr. 4.39. Po obvodu jádra bylo hned od začátku vidět, kde se fluorescein vypařuje. Při dalším zvyšování vlhkosti se vlhkostní fronta rychle zvedala a už po čtyřech dnech dosahovala po obvodu 1–2 cm pod povrch vzorku, i když nejvyšší dosažená vlhkost byla pouze 1,9 %. Uprostřed důlku bylo vidět, jak fluorescein prosvítá pod povrchem. Odtud se fronta stále zvedala až k povrchu vzorku, ale už pozvolněji.

Obr. 4.40 ukazuje průběh výparu a hmotnostní vlhkosti vzorku v čase. Na následujícím grafu (obr. 4.41) je znázorněna vzájemná závislost těchto dvou parametrů. Z grafu jde vidět, že se zvyšující se hmotnostní vlhkostí se zvyšuje i výpar.

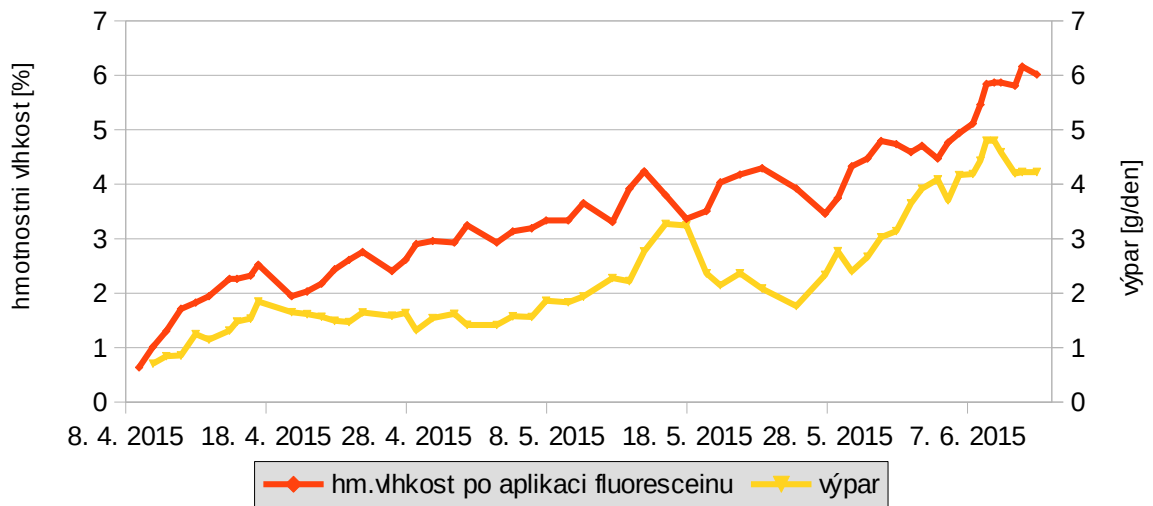
První skvrna o velikosti 2,5 cm<sup>2</sup> se v důlku (nejnižší části vzorku) objevila po zvýšení vlhkosti na 2,3 %. Hned po dalším doplnění roztoku se rozšířila na 7 cm<sup>2</sup>. K dalšímu většímu postupu fluoresceinu a obarvení větší plochy povrchu došlo v polovině května po zvýšení vlhkosti nad 4 %. Po dosažení vlhkosti 6,2 % byl povrch vzorku již obarvený téměř celý (cca 46 cm<sup>2</sup> – přibližně 98 %), neobarvená plocha na povrchu vzorku byla jen cca 1 cm<sup>2</sup>. Po zvýšení vlhkosti na 4,8 % stoupla fronta těsně pod povrch vzorku. Šířka červeně obarvené plochy po obvodu vzorku a tedy šířka výparové fronty byla cca 0,3–0,5 cm. V díře vyvrtané v důlku bylo po celou dobu vidět, že se fluorescein vypařuje těsně pod povrchem. Po obarvení větší části povrchu vzorku, bylo vidět, že se fluorescein vypařuje hlavně z vyšších částí vzorku. Barva fluoresceinu v důlku byla oranžová, místy dokonce žlutá, jak je vidět na obr. 4.38. Po vyschnutí vzorku bylo vidět, že se fluorescein koncentroval těsně pod povrchem ve vyšších částech vzorku. Zbarvení důlku bylo i po vyschnutí vzorku světlejší. Průběh hmotnostní vlhkosti a velikosti obarvené plochy povrchu vzorku ukazuje obr. 4.42. Následující graf vzájemně porovnává tyto parametry a jde na něm vidět, že se obarvená plocha zvětšovala poměrně rychle. Na obr. 4.44 jde vidět, jak se se zvětšující se obarvenou plochou zvyšoval i výpar. Fotografická dokumentace je uvedena v příloze.



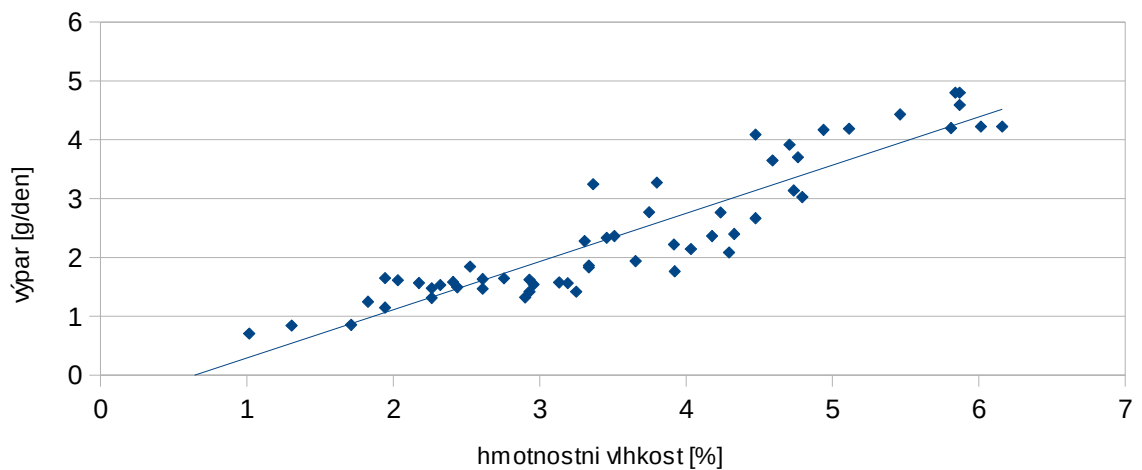
Obr. 4.38: Ukázka dokumentace vzorku 2/1b



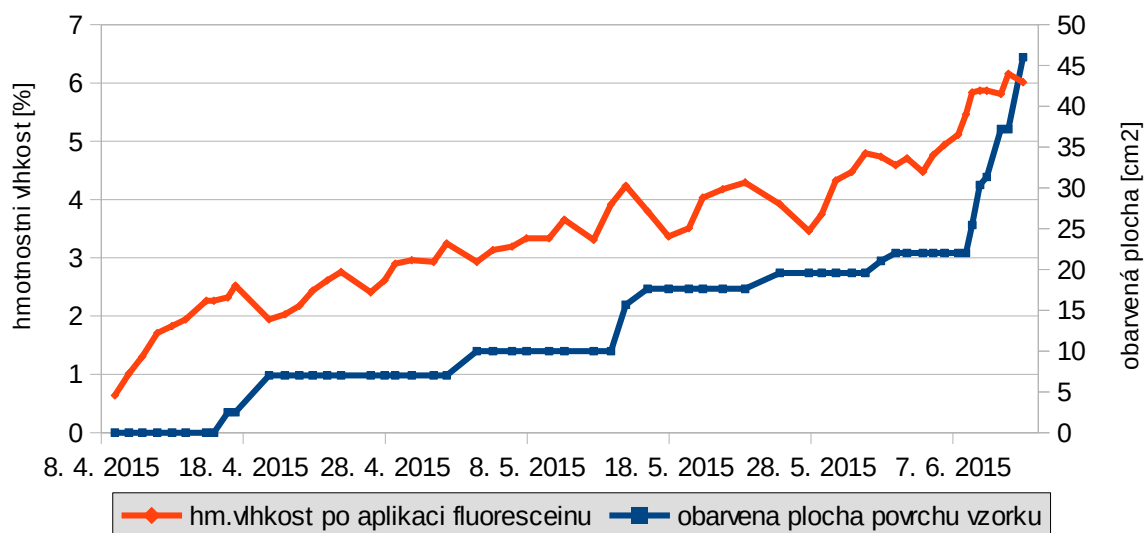
Obr. 4.39: Průběh hmotnostní vlhkosti vzorku 2/1b



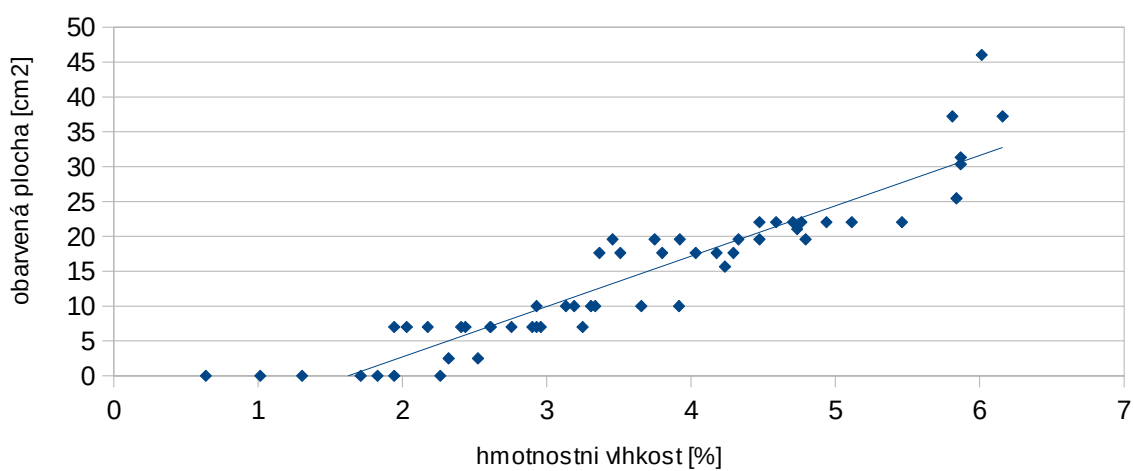
Obr. 4.40: Průběh hmotnostní vlhkosti a výparu vzorku 2/1b



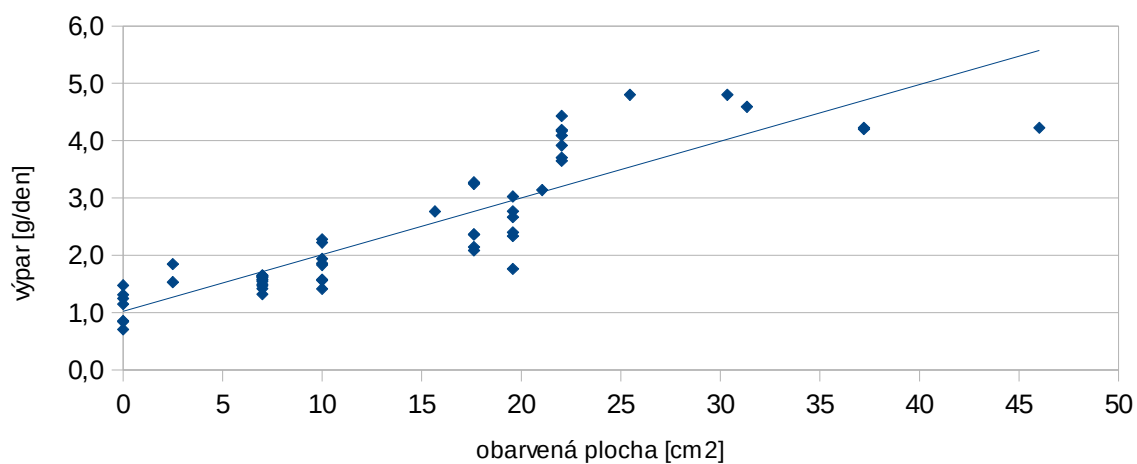
Obr. 4.41: Graf závislosti výparu na hmotnostní vlhkosti vzorku 2/1b



Obr. 4.42: Průběh hmotnostní vlhkosti a velikosti obarvené plochy povrchu vzorku 2/1b



Obr. 4.43: Graf závislosti velikosti obarvené plochy na hmotnostní vlhkosti vzorku 2/1b



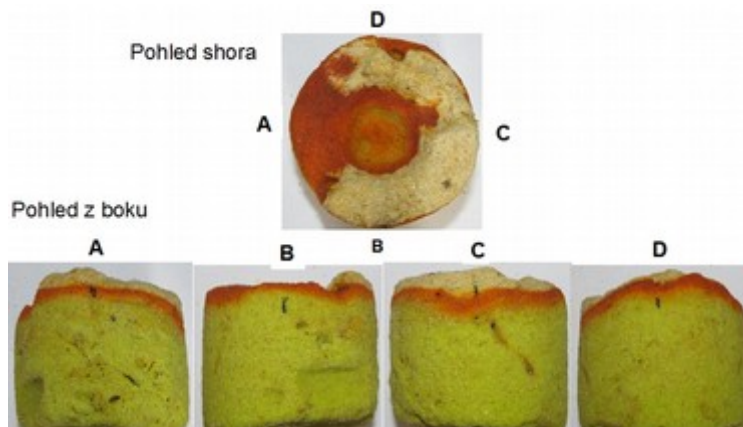
Obr. 4.44: Graf závislosti výparu na velikosti obarvené plochy povrchu vzorku 2/1b

#### 4.1.7 Vzorek 2/1c

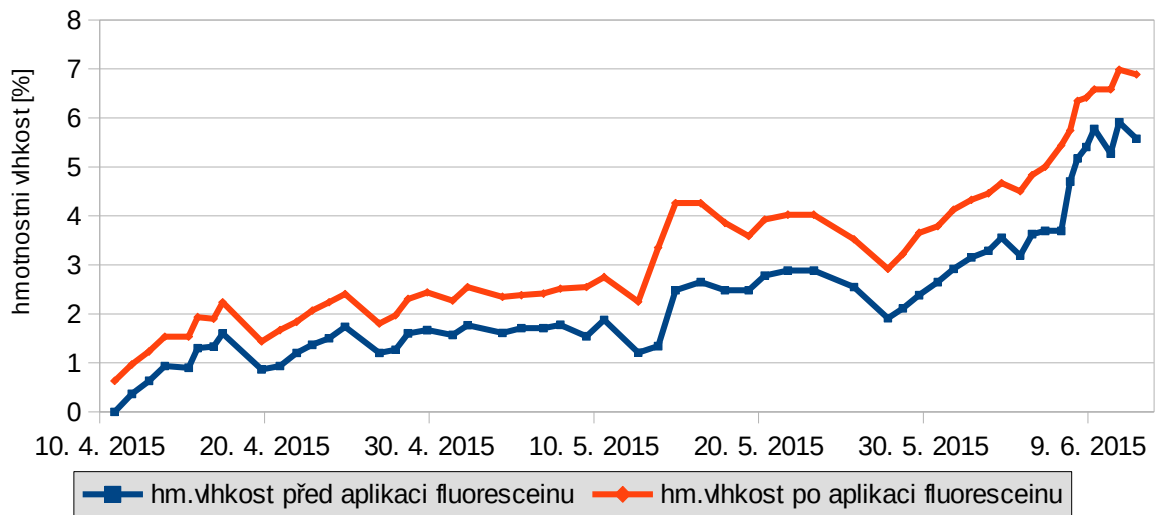
S jádrem 2/1c jsem pracovala od dubna do června 2015. Průběh hmotnostní vlhkosti znázorňuje obr. 4.46. Po obvodu jádra bylo hned od začátku vidět, kde se fluorescein vypařuje. Při dalším zvyšování vlhkosti se vlhkostní fronta rychle zvedala a už po čtyřech dnech se v důlku objevila první skvrna, i když předtím byla hmotnostní vlhkost zvýšena pouze na 1,5 %. Po zvýšení vlhkosti na 2,2 % byl obarvený celý důlek a část stěn nad ním. Odtud se fronta stále zvedala až k povrchu vzorku, ale už pozvolněji.

Obr. 4.47 ukazuje průběh výparu a hmotnostní vlhkosti vzorku v čase. Na následujícím grafu je znázorněna vzájemná závislost těchto dvou parametrů. Z grafu jde vidět, že se zvyšující se hmotnostní vlhkostí se zvyšuje i výpar.

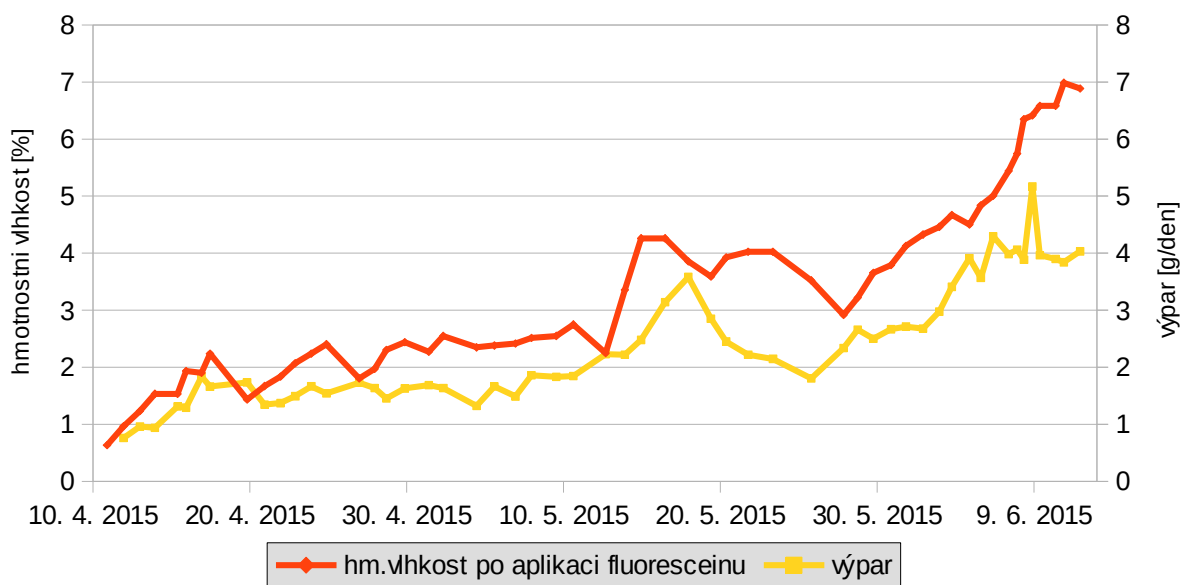
V díře vyvrtané v důlku bylo po celou dobu vidět, že se fluorescein vypařuje těsně pod povrchem. Po obarvení části povrchu v horní části vzorku po zvýšení vlhkosti na 4,3 %, bylo vidět, že se fluorescein vypařuje hlavně z vyšších částí vzorku. Barva fluoresceinu v důlku byla oranžová, místy dokonce žlutá, jak je vidět na obr. 4.45. Po zvýšení vlhkosti na 7 % byl povrch vzorku již obarvený téměř celý (přibližně 98 %). Po vyschnutí vzorku bylo vidět, že se fluorescein koncentroval těsně pod povrchem ve vyšších částech vzorku. Zbarvení důlku bylo i po vyschnutí vzorku světlejší. Průběh hmotnostní vlhkosti a velikosti obarvené plochy povrchu vzorku ukazuje obr. 4.49. Následující graf vzájemně porovnává tyto parametry a jde na něm vidět, že se obarvená plocha zvětšovala poměrně rychle. Na obr. 4.51 jde vidět, jak se se zvětšující se obarvenou plochou zvyšoval i výpar. Fotografická dokumentace je uvedena v příloze.



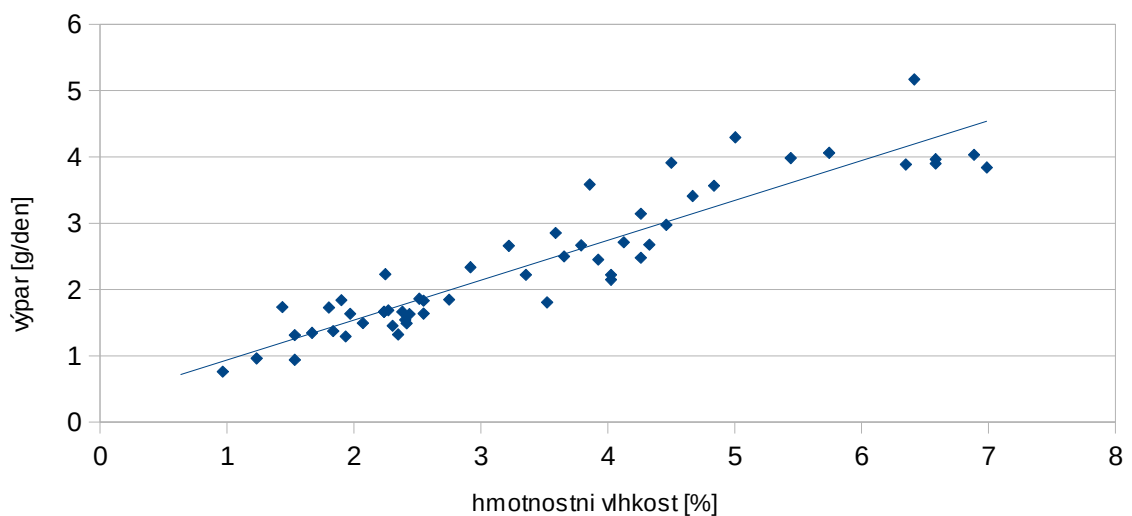
Obr. 4.45: Ukázka dokumentace vzorku 2/1c



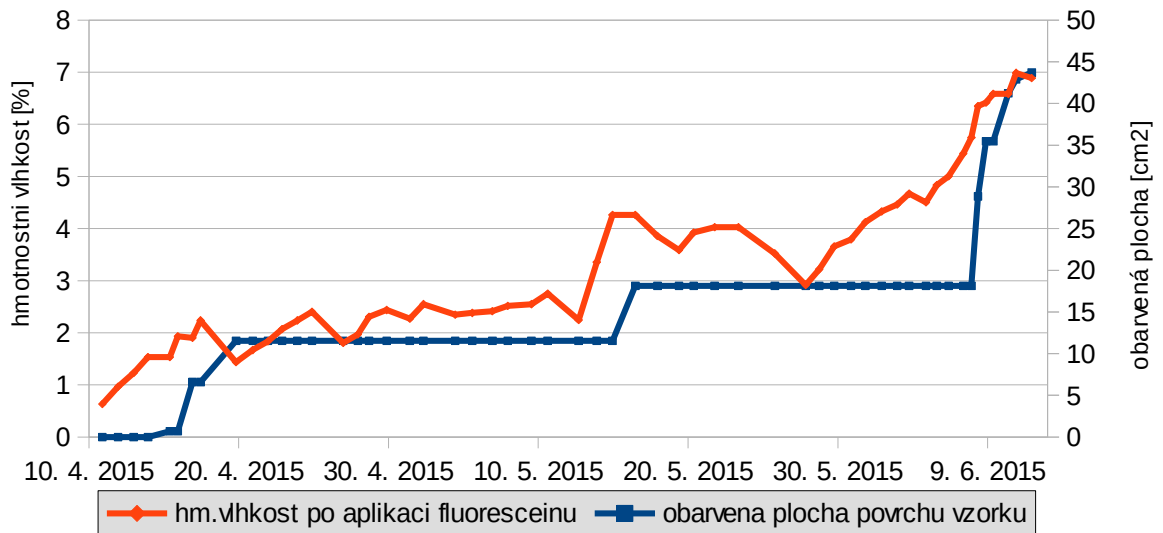
Obr. 4.46: Průběh hmotnostní vlhkosti vzorku 2/1c



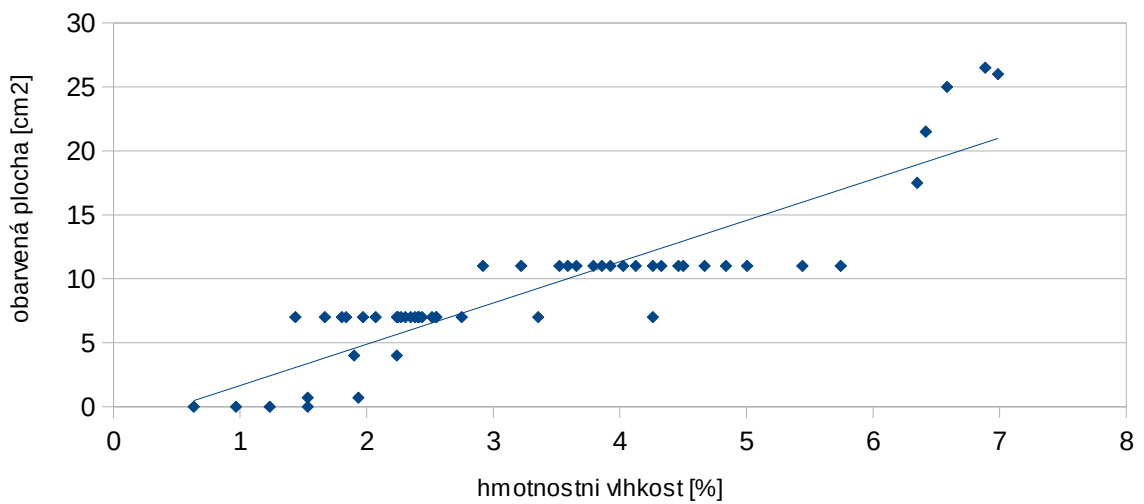
Obr. 4.47: Průběh hmotnostní vlhkosti a výparu vzorku 2/1c



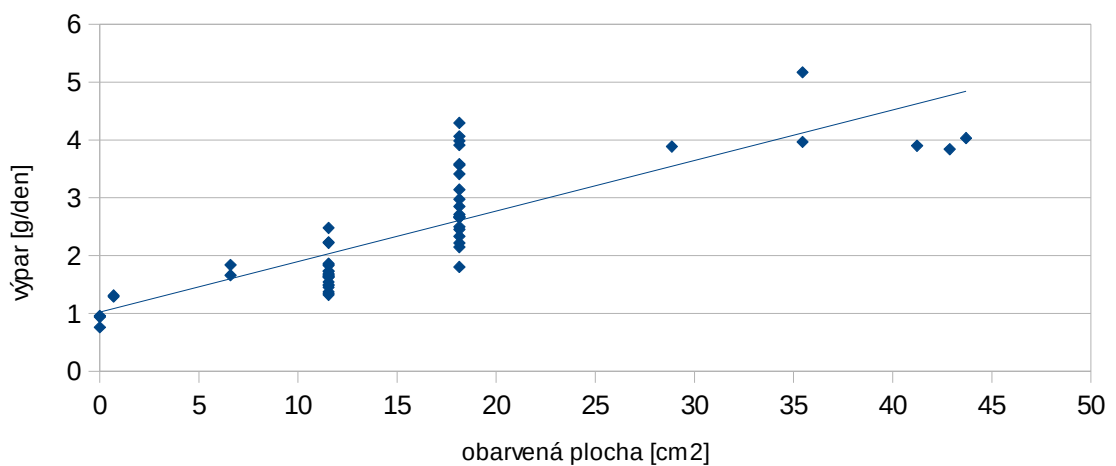
Obr. 4.48: Graf závislosti výparu na hmotnostní vlhkosti vzorku 2/1c



Obr. 4.49: Průběh hmotnostní vlhkosti a velikosti obarvené plochy povrchu vzorku 2/1c



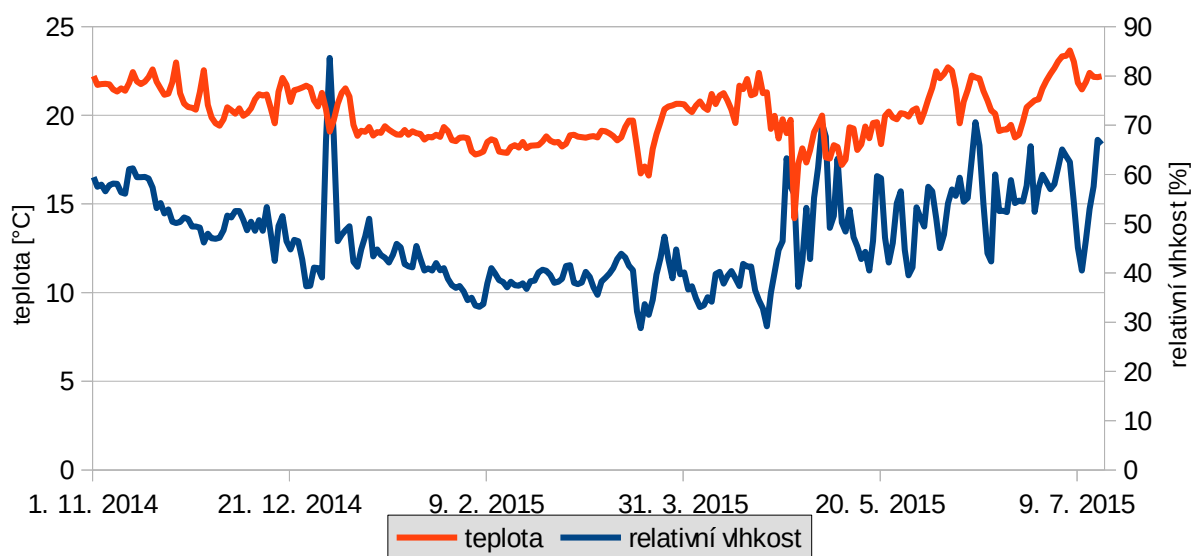
Obr. 4.50: Graf závislosti velikosti obarvené plochy na hmotnostní vlhkosti vzorku 2/1c



Obr. 4.51: Graf závislosti výparu na velikosti obarvené plochy povrchu vzorku 2/1c

#### 4.1.8 Blok s voštinami

I u bloku s voštinami bylo umístěno čidlo pro monitorování podmínek daného prostředí. Teplotu a relativní vlhkost vzduchu v místnosti od listopadu 2014 do července 2015, kdy probíhalo měření, znázorňuje obr. 4.52. Průměrná teplota se směrodatnou odchylkou byla  $20,0 \pm 1,8^\circ\text{C}$ , průměrná relativní vlhkost  $47,0 \pm 9,9\%$ .



Obr. 4.52: Teplota a relativní vlhkost vzduchu v místnosti, kde byl umístěn blok

Do bloku jsem od 3. listopadu 2014 injektovala roztok fluoresceinu, do každé díry jsem dávala stejné množství. Postupně jsem tak zvyšovala hmotnostní vlhkost bloku na 6,5 %, aby došlo k obarvení vlhkých povrchů a tak k jejich zviditelnění. Průběh výparu a vývoje hmotnostní vlhkosti před a po injektaci roztoku znázorňuje obr. 4.54. Červená křivka znázorňuje hmotnostní vlhkost počítanou podle vzorce (2.2) po injektaci roztoku, modrá křivka totéž před injektací roztoku. Tyto hodnoty však později zahrnují i hmotnost vysrážené soli  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Zelená křivka udává skutečnou hmotnostní vlhkost bloku po injektaci roztoku. Žlutá křivka udává výpar.

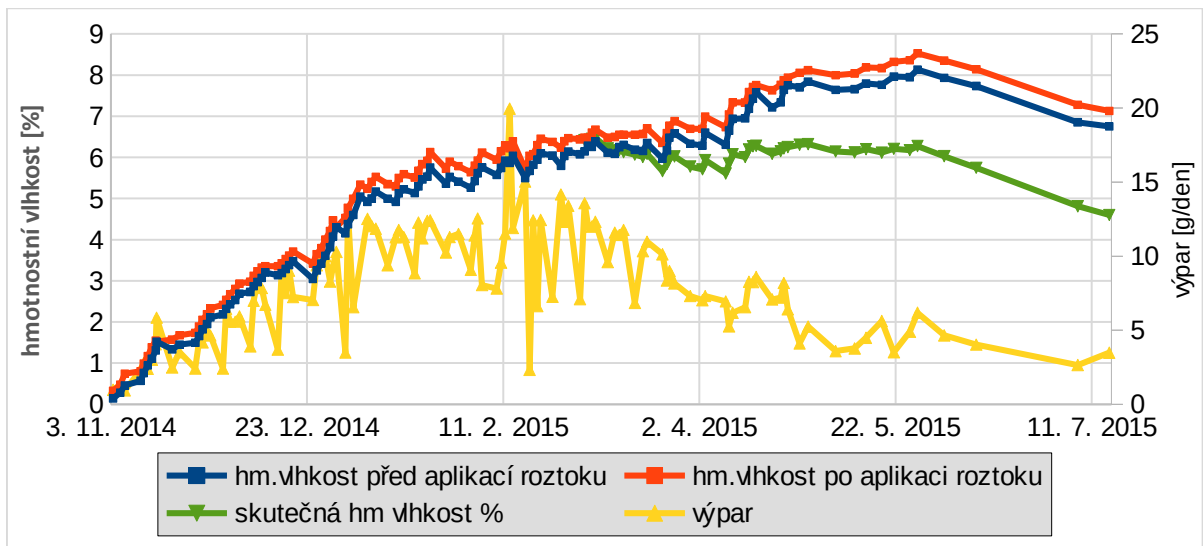
Poprvé se fluorescein objevil na povrchu bloku 26. prosince 2014, na úpatí hřebítka voštiny u kraje v nízké části bloku. Hmotnostní vlhkost byla 3,4 %, skvrna měla velikost  $0,25\text{ cm}^2$ . Postupně se skvrnka na bloku mírně zvětšovala a objevily se další dvě zhruba stejně velké skvrnky na úpatí hřebítka a na hřebítku voštin v nízké části bloku. K většímu průniku fluoresceinu na povrch došlo během víkendu, kdy byl blok přikryt plastovou nádobou. Hmotnostní vlhkost bloku byla okolo 5 %. Celková obarvená plocha se postupně zvětšila až na  $7,5\text{ cm}^2$ . Malá skvrnka se objevila i na okraji vysoké části bloku. K dalšímu zvětšení skvrn a novému průniku fluoresceinu na povrch hřebítka voštiny došlo po překročení vlhkosti 6 %. Celková obarvená plocha se pak zvětšila na  $16\text{ cm}^2$ . K dalšímu velkému zvětšení skvrn došlo opět během víkendu, kdy byl blok přikryt plastovou nádobou. Celkový obarvený povrch pak byl  $24,5\text{ cm}^2$ . Většina skvrn byla v nízké části bloku, po posledním průniku se objevily nové skvrny uprostřed vysoké části bloku.

Od 3. března 2015 jsem do bloku místo fluoresceinu injektovala roztok  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , aby se ukázalo zda přítomnost soli vyvolá jiné šíření vlhkosti a pro pozorování případného zvětrání a rozpadu materiálu. K prvnímu malému výkvětu soli (na ploše  $0,5 \text{ cm}^2$ ) došlo 19. března, kdy se vlhkost pohybovala okolo 6,5 %. Objevil se na úpatí hřebítku v nízké části bloku, v místě, kde se předtím dostal na povrch i fluorescein (stejně jako všechny ostatní výkvěty soli). Tento malý výkvět soli už se dál výrazně nezvětšoval, pouze postupně měnil barvu od počáteční červené, způsobené zbarvením fluoresceinu, po světle žlutou až bílou v červenci. Další krystaly soli se objevily 30. března na úpatí hřebítku v nízké části bloku na ploše cca  $1 \text{ cm}^2$ . Tyto původně červené krystaly se postupně zvětšovaly a měnily barvu. Na začátku července byly krystaly na ploše cca  $23 \text{ cm}^2$ , jejich výška dosahovala 1–2 cm a byly velmi světle žluté až bílé. Kromě růstu krystalů na povrchu bloku zatím dosavadní injektování roztoku  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  nezpůsobilo na pískovci jiné viditelné změny (expanzi nebo rozpad povrchu).

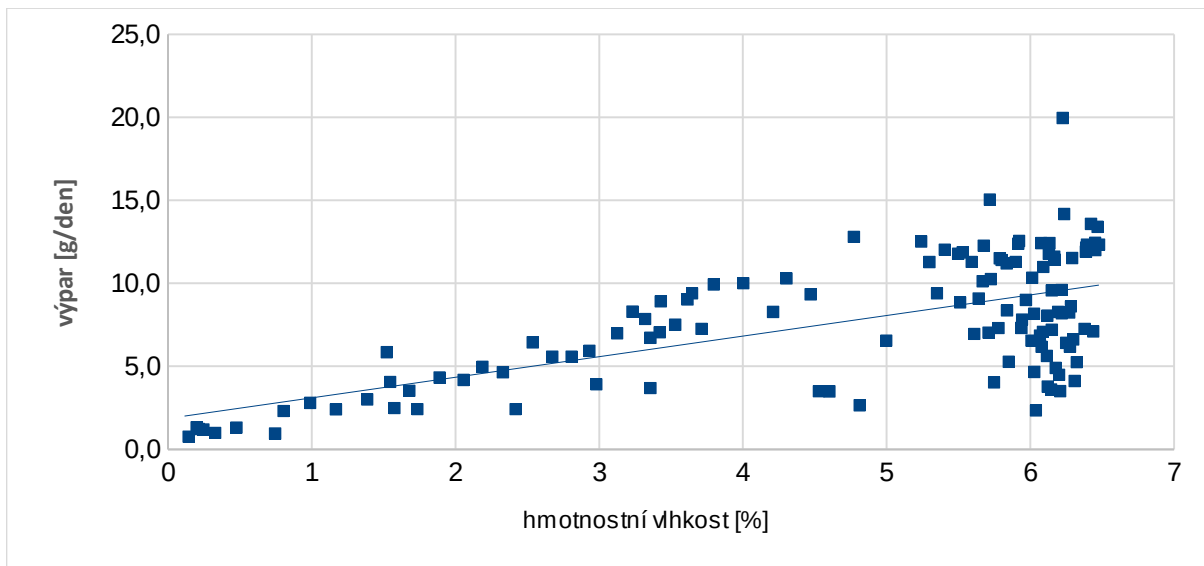
Na obr. 4.56 je znázorněn průběh výparu a velikosti obarvené plochy povrchu bloku. Pokud jsem delší dobu nemohla do bloku doplňovat vodu, přikryla jsem ho i s čidlem plastovou nádobou, aby se snížila rychlost výparu. Tomu odpovídají nízké hodnoty výparu v grafu. Naopak vysoká hodnota výparu z 12. 2. 2015 odpovídá novému průniku fluoresceinu na povrch bloku. Celkově se výpar při zvyšující se hmotnostní vlhkosti zvyšoval až do 3. března 2015. Poté se rychlost výparu začala snižovat, to odpovídá počátku injektace koncentrovaného roztoku síranu sodného místo fluoresceinu (v grafu to odpovídá místu ukončení modré křivky). Sůl se během transportu blokem v pórech pravděpodobně srážela a rekrystalizovala a snižovala tak propustnost bloku pro transport vodních par a tedy i rychlost výparu. Závislost výparu na skutečné hmotnostní vlhkosti bloku je uvedena na obr. 4.55.



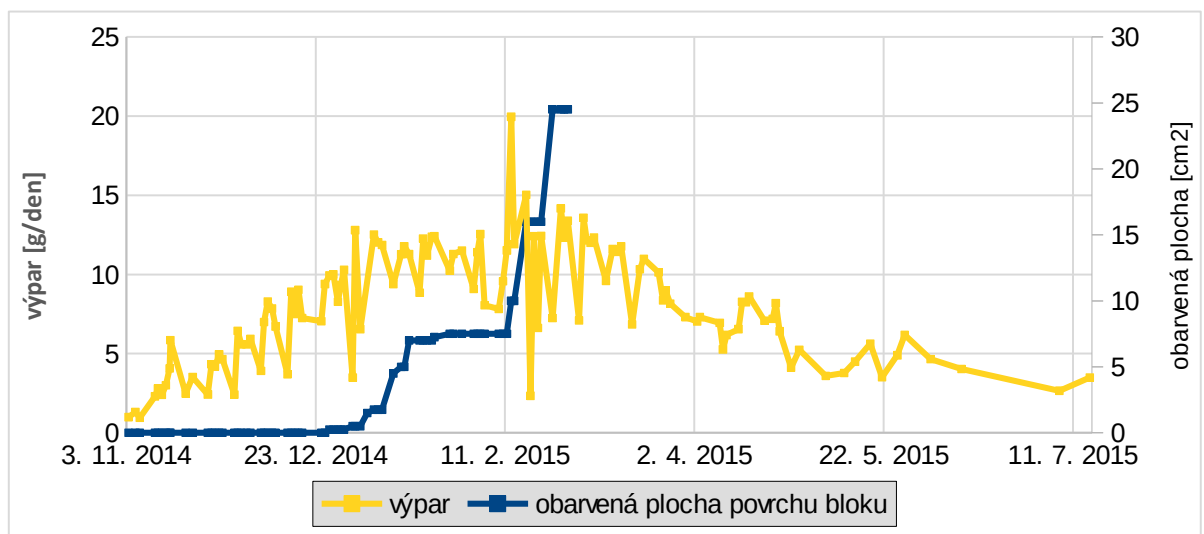
*Obr. 4.53: Detail místa, kde se nejvíce objevoval fluorescein a krystaly soli. Vlevo stav před počátkem injektace síranu sodného, uprostřed stav v polovině května a vpravo na začátku července.*



Obr. 4.54: Průběh výparu a hmotnostní vlhkosti a výparu bloku



Obr. 4.55: Graf závislosti výparu na skutečné hmotnostní vlhkosti bloku



Obr. 4.56: Průběh výparu a velikosti obarvené plochy povrchu bloku

### 4.1.9 Shrnutí laboratorních experimentů

Z provedených experimentů na odvrtných jádrech pískovce jde vidět, že postup vlhkosti je velmi závislý na tom, zda je na povrchu vzorku biokrusta nebo ne. U vzorků, které na povrchu neměly krustu se vlhkost vzorkem šířila mnohem rychleji než u vzorku s biokrustou. Fluorescein se na nejnižší části výparového povrchu objevil po zvýšení hmotnostní vlhkost na 1,5 % až 2,8 %. U vzorků s biokrustou se fluorescein objevil na povrchu až po zvýšení hmotnostní vlhkosti na 3,0 % až 4,3 %, s výjimkou vzorku 2/16. U dvou vzorků (V2/3, 5/20) část krusty na povrchu chyběla. Fluorescein se objevil nejprve v této části, avšak až po překročení vlhkosti 4 %. U vzorku 5/20 se fluorescein objevil na povrchu biokrusty až po zvýšení vlhkosti na 4,7 %. Z toho jde vidět, že biokrusta je hydrofobní a její přítomnost má na postup vlhkosti v pískovci zcela zásadní vliv.

Přítomnost biokrusty má vliv i na velikost výparu. Směrnice přímek z grafů závislosti velikosti výparu na hmotnostní vlhkosti vzorku se pro vzorky bez biokrusty pohybuje od 0,60 do 0,82 (průměr 0,72), s výjimkou vzorku 2/2b, u kterého je směrnice přímkou 0,37. Pro vzorky s biokrustou jsou směrnice přímek 0,31 až 0,47 (průměr 0,37). Se zvyšující se vlhkostí se tedy u vzorků bez biokrusty zvyšuje výpar rychleji než u vzorků s biokrustou. Hmotnostní vlhkosti 1 % odpovídal u všech vzorků výpar přibližně 0,5–1 g/den, hmotnostní vlhkosti 5 % odpovídal výpar u vzorků s biokrustou 2–4 g/den, u vzorků bez biokrusty 3–4 g/den.

U vzorků bez biokrusty s uměle vytvořenými voštinami se fluorescein objevil vždy nejdříve v důlcích – nejnižších částech vzorků – a postupně se šířil na vyšší části (hřbítky) vzorků. Při postupu fluoresceinu na vyšší části vzorku bylo z barvy fluoresceinu vidět, že výpar probíhá především z těchto částí a důlky zůstávají mnohem vlhčí, což odpovídá modelu solného zvětrávání podle Huininka et al. (2004). Při zvyšování vlhkosti u vzorků s biokrustou a na bloku s voštinami pronikal fluorescein na povrch nejdříve většinou na úpatí hřbítků, případně přímo na hřbítku voštin. Při průniku fluoresceinu do důlků voštin se většinou objevil nejprve na okraji důlku (tedy ne v nejnižší části) a teprve postupně vyplňoval zbytek důlku. U vzorků se skutečnými voštinami tedy nemůže fluorescein díky hydrofobní biokrustě pronikat k povrchu tak snadno a objevuje se v místech, kde je biokrusta slabší. Z průběhu experimentů na jednotlivých vzorcích lze rovněž usuzovat, že záleží na druhu biokrusty, která povrch pokrývá.

## 4.2 Terénní práce

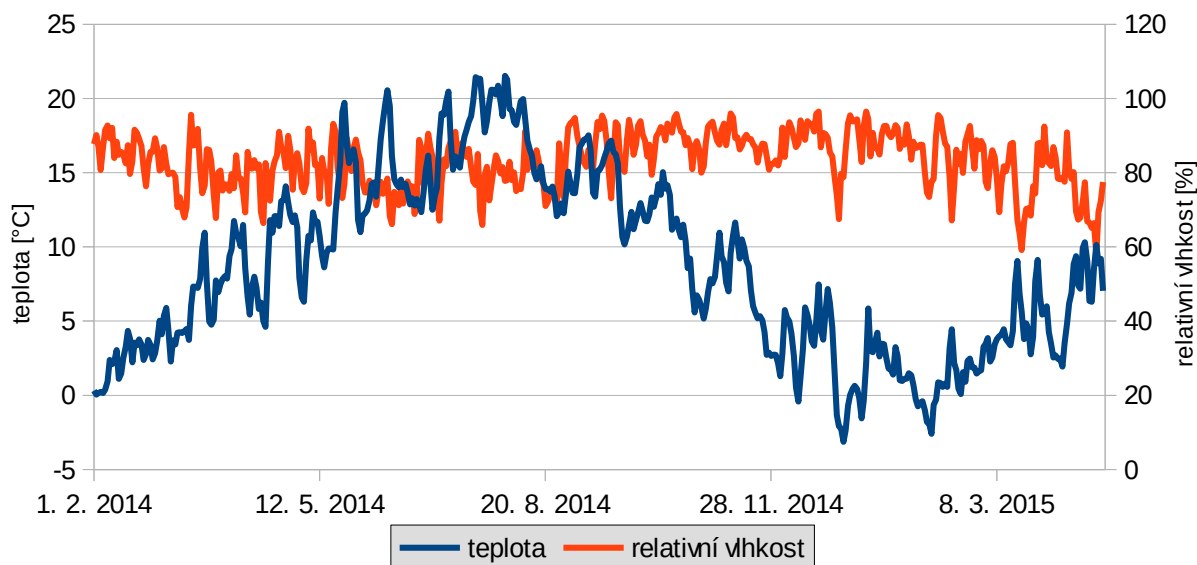
Zde uvádím výsledky měření z terénu pro jednotlivé lokality a místa na lokalitách. Pro přehlednost uvádím sací tlak vždy v absolutní hodnotě.

Na lokalitách v Českém ráji byla umístěna čidla měřící teplotu a relativní vlhkost vzduchu se záznamem po 30 minutách.

### 4.2.1 Mladějov I

Lokalita je situována v lese. Čidlo pro měření teploty a relativní vlhkosti bylo umístěno ve skále ve výšce cca 3 m od povrchu terénu. Průměr teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu za 24 hodin od února 2014 do května 2015, kdy na lokalitě probíhalo měření, udává

obr. 4.57. Obě hodnoty se během dne poměrně výrazně mění, rozdíl je však mnohem menší než na lokalitě Mladějov II. Průměrná relativní vlhkost vzduchu se směrodatnou odchylkou během roku je  $83,2 \pm 8,9 \%$ , průměrná teplota  $8,6 \pm 6,2^\circ\text{C}$ .



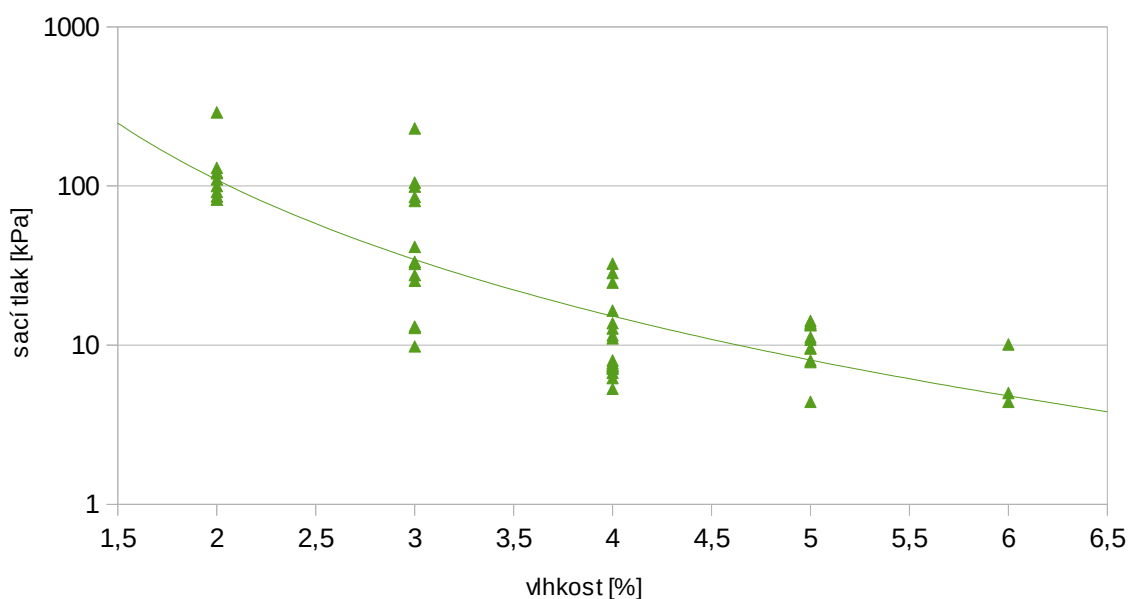
Obr. 4.57: Teplota a relativní vlhkost vzduchu na lokalitě Mladějov I

Na lokalitě jsem měřila sací tlak a vlhkost pískovce na pěti různých místech – v místě výkvětu solí, na hladké části výchozu pokryté řasami, na vyhlazeném pilíři skály, ve voštinách a ve štěrbině mezi dvěma bloky skály podobné malé jeskyni. Na obr. 4.59 je vidět srovnání hodnot sacího tlaku ze tří nejstabilnějších míst na lokalitě – v místě výkvětu solí, jeskyni a na výchozu s voštinami. Nejnížší sací tlak jsem naměřila v místě výkvětu solí a po celou dobu měření byl poměrně konstantní (pohyboval se v rozmezí od 3 kPa do 8 kPa, průměrná hodnota 6,2 kPa). Poměrně konstantní byl i sací tlak v jeskyni (rozmezí 10–14 kPa, průměrná hodnota 5,1 kPa). Na výchozu s voštinami se sací tlak v průběhu měření postupně zvyšoval, což ukazuje na postupné vysychání výchozu (8–28 kPa, průměrná hodnota 14,9 kPa). Hodnoty sacího tlaku na konci měření však nebyly tak vysoké jako na výchozu s řasami. Měření vlhkosti na výchozu s řasami ukázalo, že vlhkost postupně klesala z původních 5 % na 3 %. Sací tlak se od začátku měření v únoru 2014 až do června 2014 držel na poměrně nízkých hodnotách (okolo 8–9 kPa), další měření proběhlo až v září 2014, kdy začal sací tlak postupně strmě stoupat až ke 100 kPa. Obojí naznačuje, že se výchoz vysušoval, což bylo vidět i na odumírajících řasách na stěně výchozu. Na grafu jde vidět krátkodobé zvýšení vlhkosti a snížení sacího tlaku v lednu 2015, kdy měření proběhlo několik dní po 2. povodňovém stupni na místním toku Žehrovka po výrazných srážkách a tání sněhu. Tehdy byla naměřena nejnížší hodnota sacího tlaku i v jeskyni (9,6 kPa).

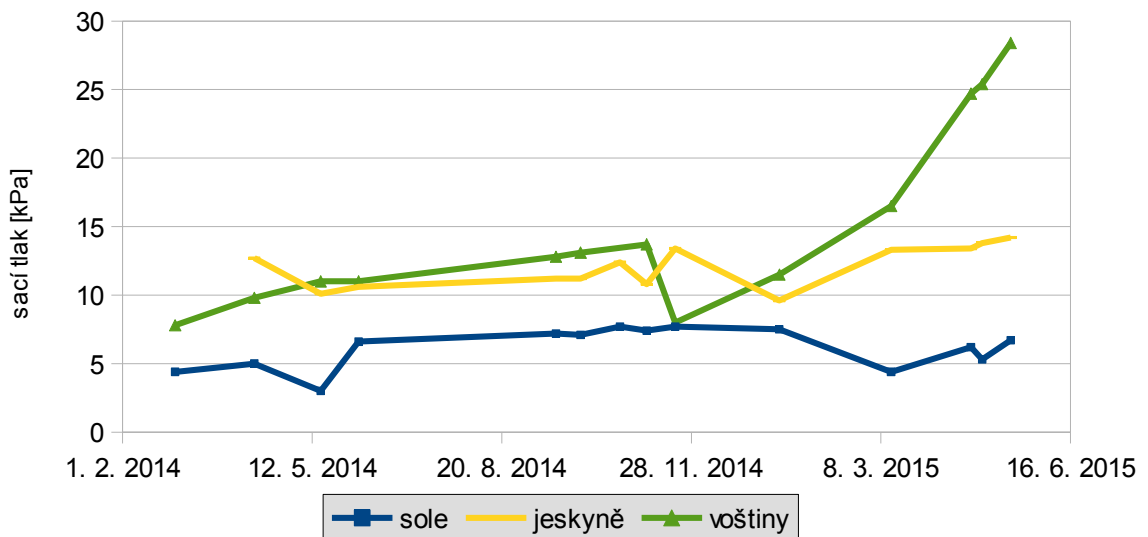
Na obr. 4.58 je porovnání hodnot sacího tlaku na naměřené vlhkosti pískovce ze všech míst na lokalitě. Z grafu jde vidět jak se zvyšující se vlhkostí klesá sací tlak. Z naměřených hodnot však nelze sestavit retenční křivku vzhledem k malé přesnosti měření vlhkosti pomocí TDR ( $\pm 3 \%$ ). Například pro hodnotu vlhkosti 3 % jsem na této lokalitě naměřila hodnoty sacího

tlaku v intervalu od 9 kPa do 105 kPa.

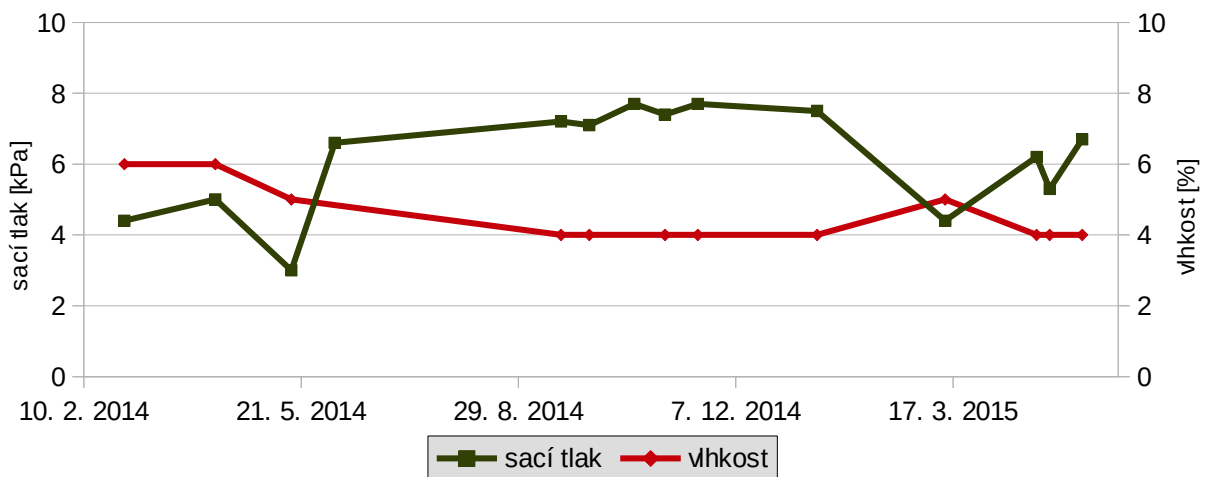
Obrázky 4.60 až 4.64 ukazují porovnání hodnot sacího tlaku a vlhkosti na jednotlivých místech. Ze všech grafů jde vidět, že při snížení vlhkosti se zvýší sací tlak a naopak. Hodnoty sacího tlaku naměřené na pilíři skály je nutné brát s rezervou. Ve většině případů nebyla hodnota ustálená a stále klesala. Místo je už od pohledu velmi suché, což ukázalo i měření pomocí TDR, kdy změřená vlhkost byla většinou jen 2 %. Protože tenzometry nejsou určeny pro měření v suchých zeminách (horninách) a po překročení hodnoty 250 kPa se může stát, že pro další měření bude potřeba sondu odvzdušnit, ukončovala jsem měření po překročení 100 kPa. Je pravděpodobné, že skalní pilíř obsahoval v měřené hloubce (cca 11 cm) jen reziduální vlhkost.



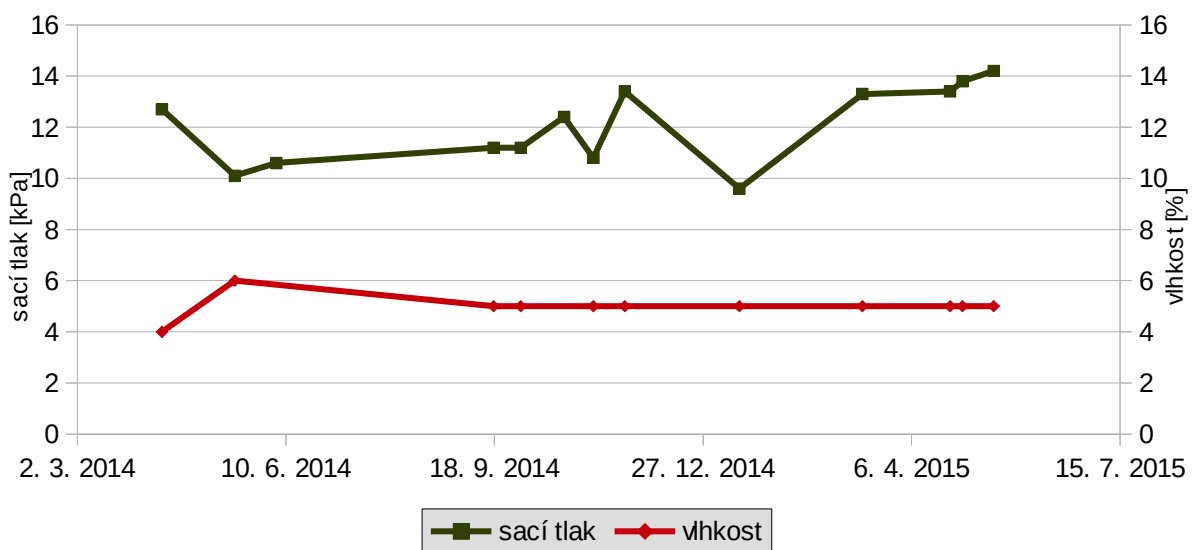
Obr. 4.58: Graf závislosti sacího tlaku na vlhkosti pískovce na lokalitě Mladějov I



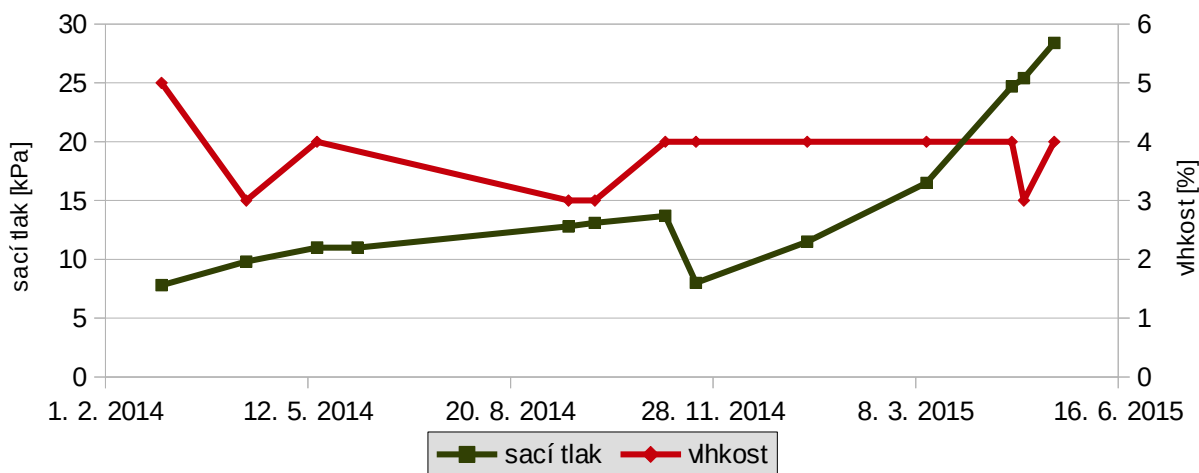
Obr. 4.59: Hodnoty sacího tlaku v místě výkvětu solí, jeskyni a na výchozu s voštinami na lokalitě Mladějov I



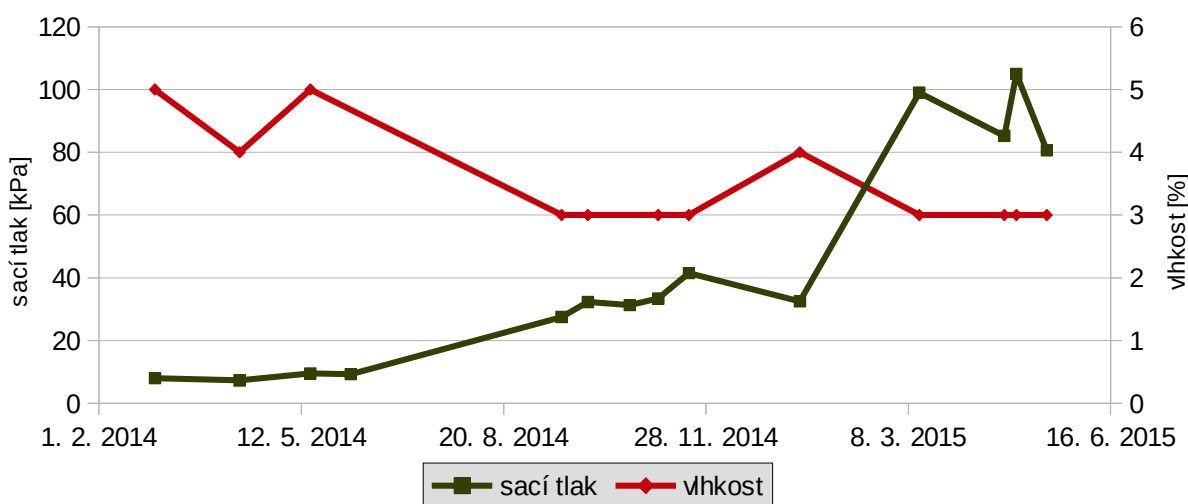
Obr. 4.60: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti v místě výkvětu solí na lokalitě Mladějov I



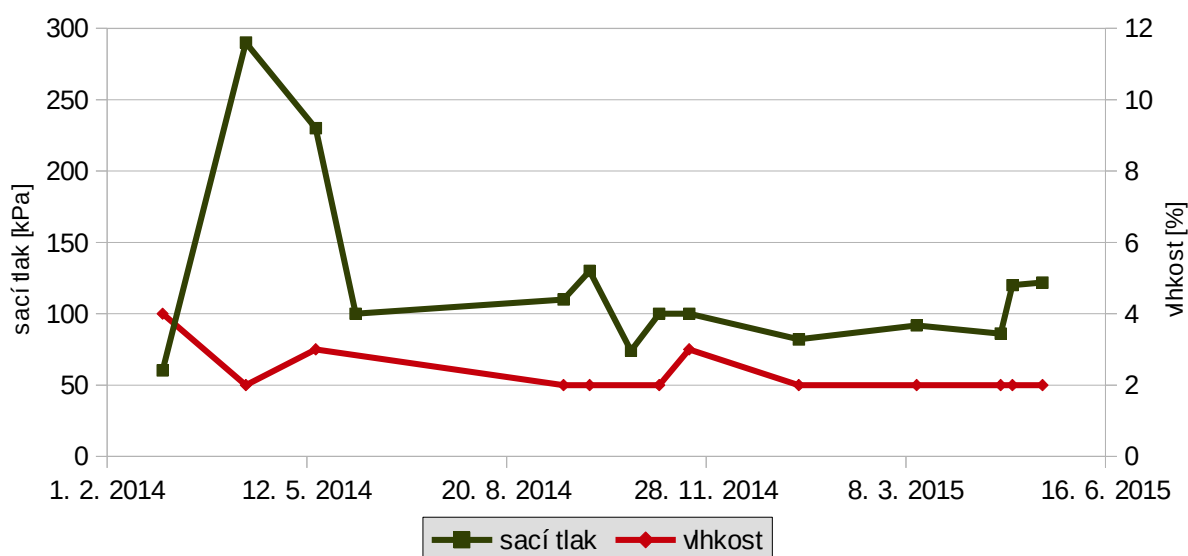
Obr. 4.61: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti v jeskyni na lokalitě Mladějov I



Obr. 4.62: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti výchozu s voštinami na lokalitě Mladějov I



Obr. 4.63: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti výchozu s řasami na lokalitě Mladějov I

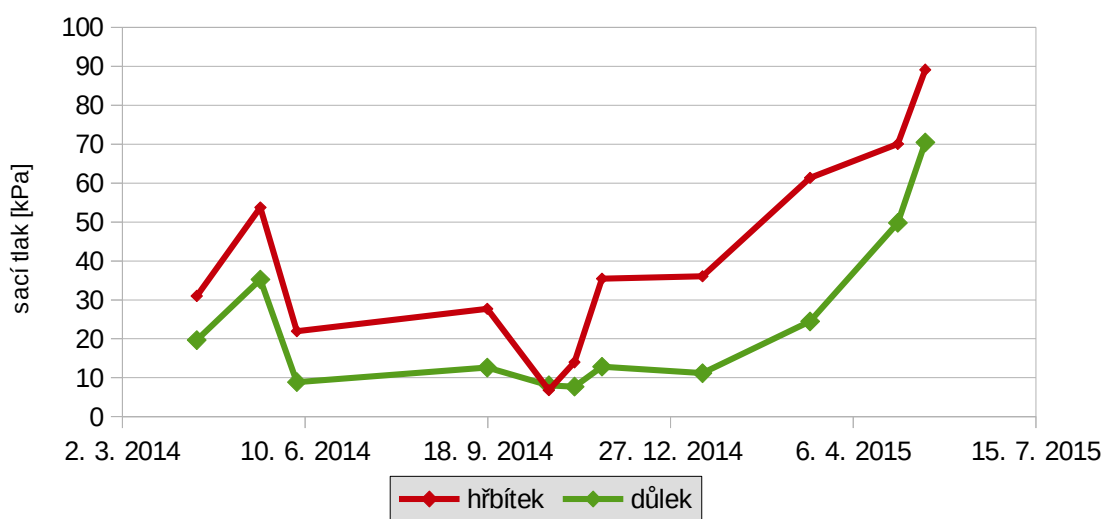


Obr. 4.64: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti na pilíři skály na lokalitě Mladějov I

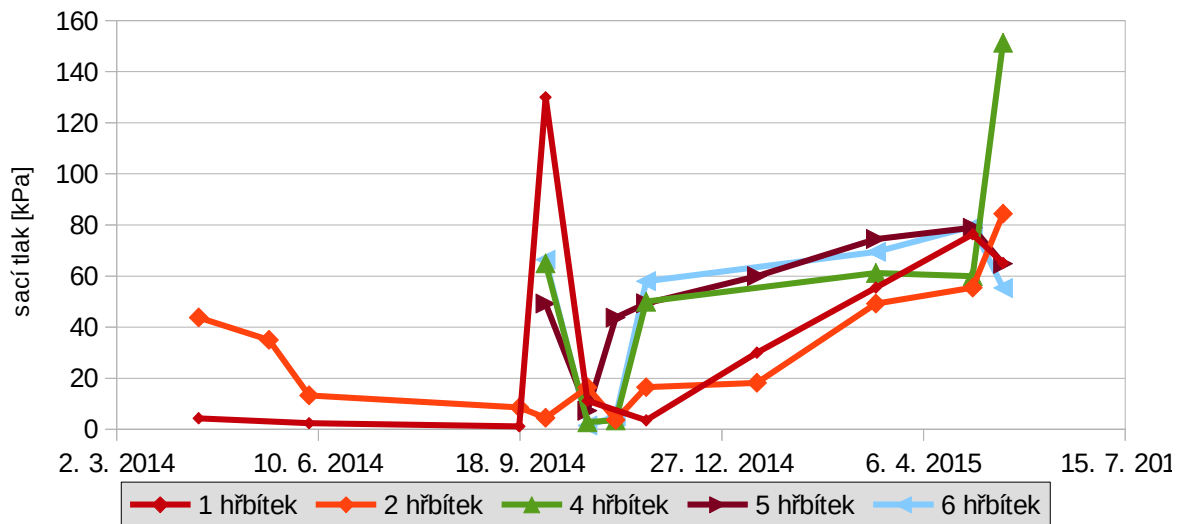
Na této lokalitě jsem se detailně věnovala i měření v mělkých dírách ve voštinách, vždy kombinující důlek voštiny a hřbítok nad ním. Díry byly hluboké pouze 0,5–1 cm. Při měření jsem okolí tenzometru u skály obalovala mikrotenovou fólií, aby měření byla co nejméně ovlivněna větrem a jinými okolními vlivy.

Celkem jsem měřila v šesti voštinách, ale měření z voštiny číslo 3 neuvádím kvůli výrazně odlišným hodnotám než u ostatních voštin. Díry u této voštiny byly zřejmě špatně vyvrtány (byly příliš široké) a proto docházelo k ovlivňování měření výparem díky větru či špatným uchycením sondy. Stejně tak je nejspíše ovlivněno i měření na hřbítoku voštiny číslo 1 ze září 2014. Porovnání sacích tlaků ve všech důlcích a všech hřbítocích voštin ukazují obrázky 4.66 a 4.67. Ačkoli je rozptyl dat poměrně velký, většina měření v různých dírách vykazuje stejný trend. První hodnoty u voštin číslo 4 až 6 naměřené v září 2014 jsou pravděpodobně ovlivněné vrtáním děr, kdy se bezprostřední okolí skály díky tření vrtáku vysušilo.

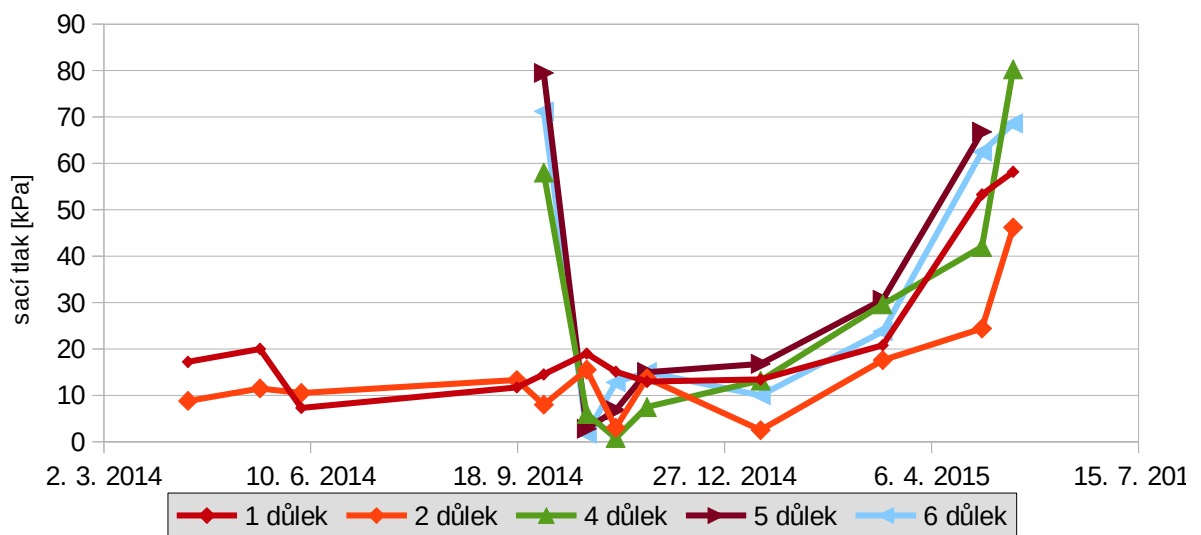
Ze srovnání hodnot sacího tlaku hřbítoku a důlku jednotlivých voštin vyplývá, že důlky byly většinou vlhčí než hřbítoky (nižší absolutní tlak). Obr. 4.65 ukazuje srovnání průměrných hodnot sacího tlaku naměřených na hřbítocích a v důlcích voštin během jednoho měření. Z výpočtu jsou vyřazeny hodnoty, které jsou pravděpodobně ovlivněny výparem nebo vrtáním. Z tohoto srovnání je vidět, že sací tlak byl většinou vyšší na hřbítocích voštin. Jedinou výjimkou je měření z října 2014, kdy byla průměrná hodnota sacího tlaku v důlcích voštin nepatrně vyšší než průměrná hodnota na hřbítocích. Porovnání hodnot naměřených v důlcích a na hřbítocích u jednotlivých voštin udávají obrázky 4.68 až 4.71.



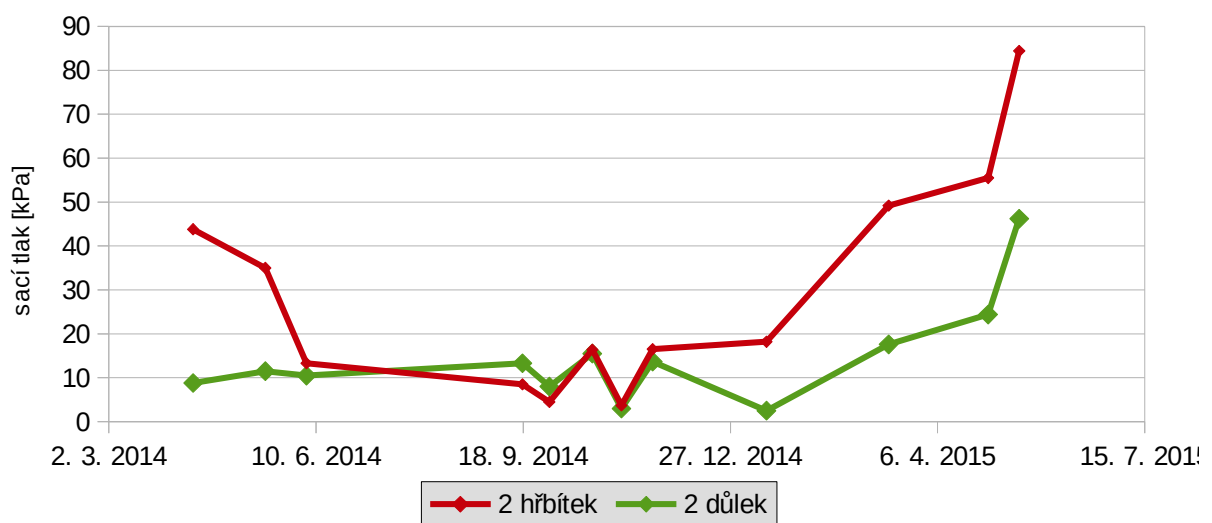
Obr. 4.65: Průměrné hodnoty sacího tlaku na hřbítoku a v důlku voštin



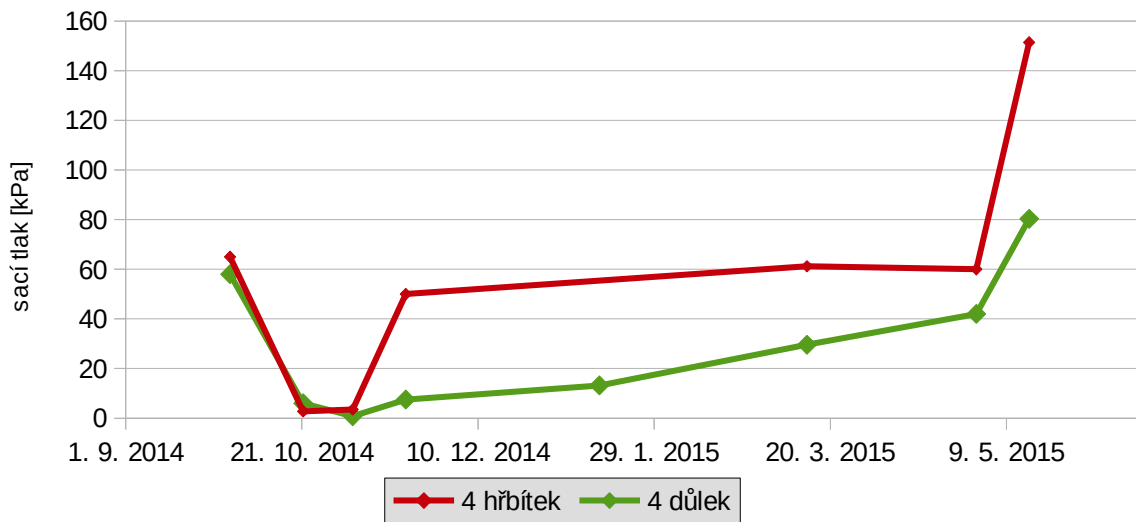
Obr. 4.66: Hodnoty sacího tlaku naměřené na hřbítcích voštin na lokalitě Mladějov I



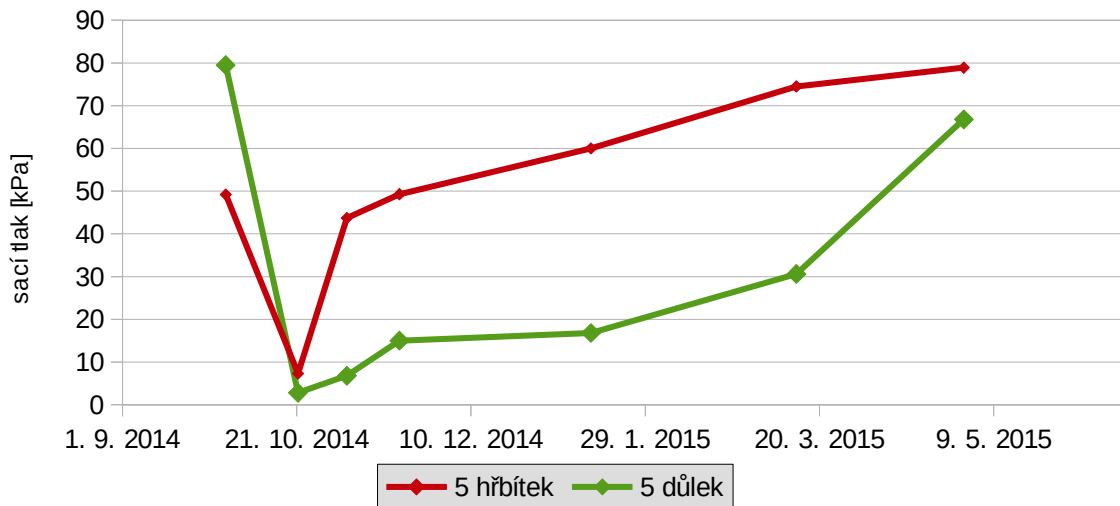
Obr. 4.67: Hodnoty sacího tlaku naměřené v důlcích voštin na lokalitě Mladějov I



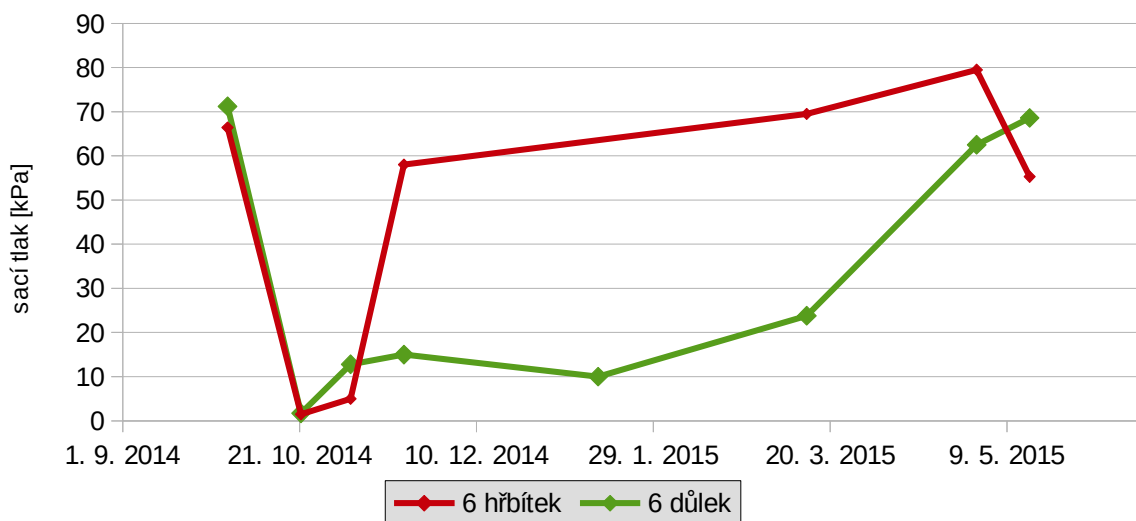
Obr. 4.68: Srovnání sacího tlaku na hřbítku a v důlku voštiny číslo 2



Obr. 4.69: Srovnání hodnot sacího tlaku na hřbítku a v důlku voštiny číslo 4



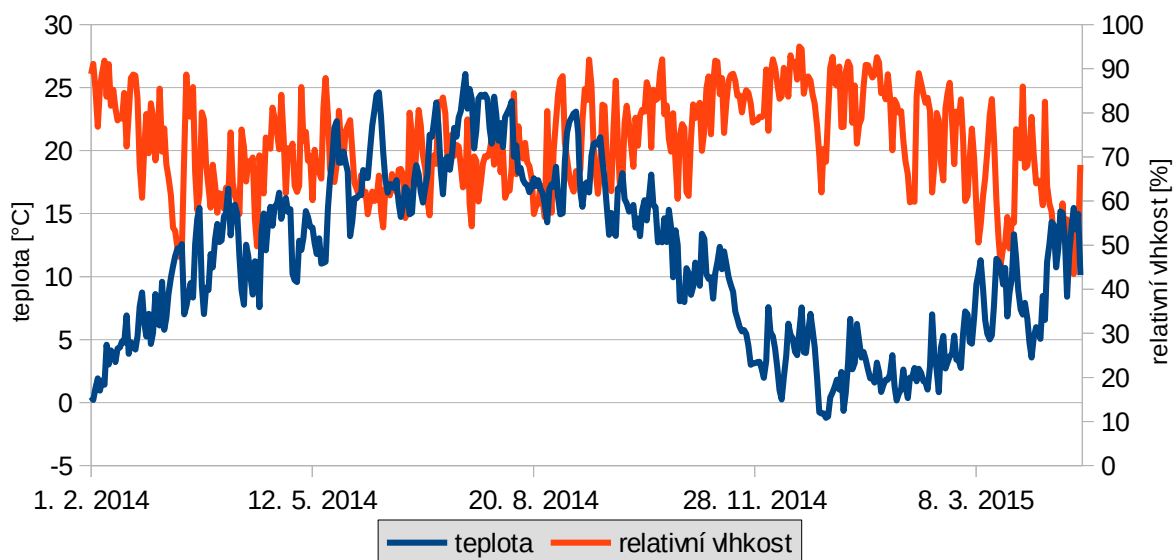
Obr. 4.70: Srovnání hodnot sacího tlaku na hřbítku a v důlku voštiny číslo 5



Obr. 4.71: Srovnání hodnot sacího tlaku na hřbítku a v důlku voštiny číslo 6

## 4.2.2 Mladějov II

Lokalita je bez vegetačního krytu a přírodní výchozy včetně skály, kde bylo čidlo, jsou tak plně vystaveny slunečním paprskům. Čidlo pro měření teploty a relativní vlhkosti bylo umístěno ve skále ve výšce cca 3 m od povrchu terénu. Obr. 4.72 udává průměrnou teplotu vzduchu a relativní vlhkost vzduchu za 24 hodin od února 2014 do května 2015, kdy na lokalitě probíhalo měření. Výkyvy obou hodnot během dne byly mnohem výraznější než na lokalitě Mladějov I. Průměrná relativní vlhkost vzduchu se směrodatnou odchylkou během roku je  $73,0 \pm 16,1 \%$ , průměrná teplota  $11,3 \pm 8,0^\circ\text{C}$ . Rozdíl relativní vlhkosti během dne byl mnohdy i přes 40 %, rozdíl teplot okolo  $25^\circ\text{C}$ .



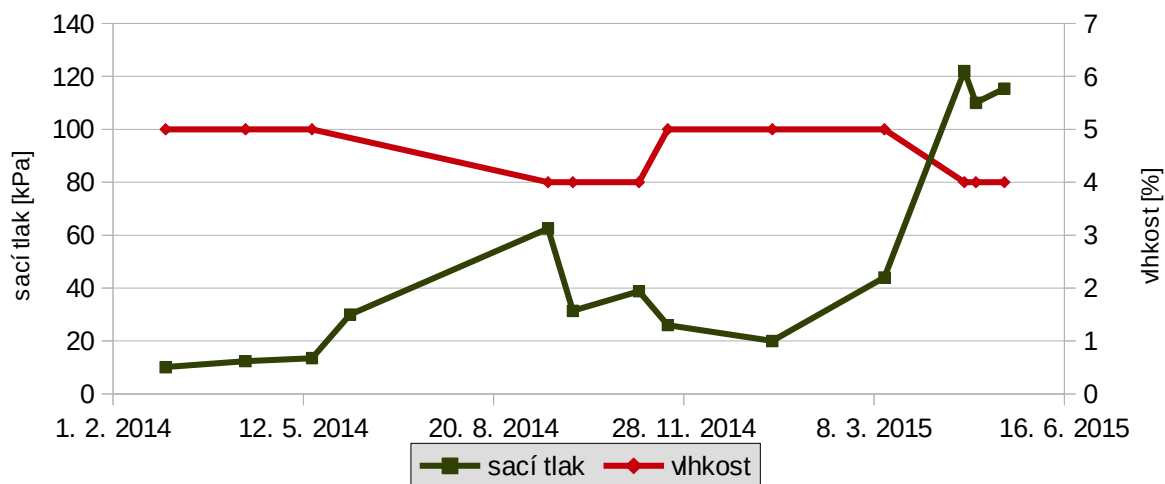
Obr. 4.72: Teplota a relativní vlhkost vzduchu na lokalitě Mladějov II

Na lokalitě jsem měřila sací tlak a vlhkost na dvou místech – na stěně s voštinami a na bázi hladké stěny bez voštin. Grafy na obrázcích 4.73 a 4.74 porovnávají tyto hodnoty na jednotlivých místech. Jde z nich vidět, že hodnoty spolu poměrně dobře korespondují - při snížení vlhkosti se zvýší sací tlak a naopak. Přestože vlhkost byla vždy vyšší na bázi hladké stěny bez voštin (4–5 %), vycházel tu vyšší sací tlak (průměrná hodnota 49 kPa) než na vedlejší stěně s voštinami.

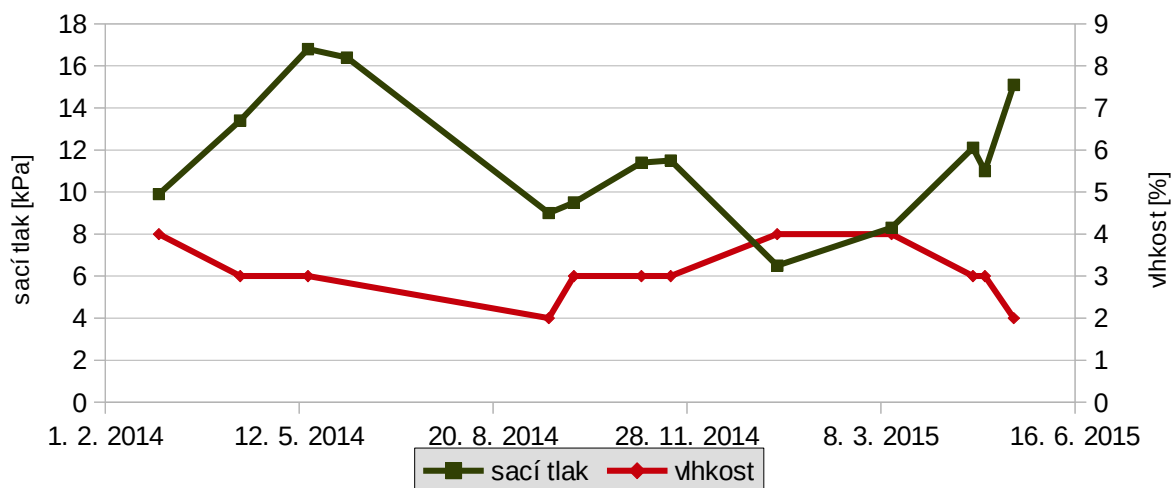
Na stěně s voštinami se vlhkost pohybovala mezi 2 až 4 % (průměr 3,1 %), ale hodnoty sacího tlaku byly v rozmezí od 9 kPa do 17 kPa (průměr 11,6 kPa). Na obou grafech jde vidět snížení sacího tlaku v polovině ledna 2015, kdy měření probíhalo několik dní po 2. povodňovém stupni na blízkém toku Žehrovka po vydatných srážkách a tání sněhu. Na stěně s voštinami byla naměřena i vyšší vlhkost než při předchozím měření.

Na lokalitě jsem měřila i v mělkých dírách na hřbítcích a v důlcích voštin. Některé díry byly vyvrtány špatně, proto zde uvádím jen měření ze dvou voštin. Z porovnání sacího tlaku na hřbítku a v důlku voštiny vyplývá, že většinou byl sací tlak nižší v důlku. Jde to vidět především na obr. 4.76, první naměřené hodnoty mohou být ovlivněny vrtáním děr. Vzhledem k tomu, že lokalita není krytá stromy, je zde větší proudění vzduchu než na lokalitě

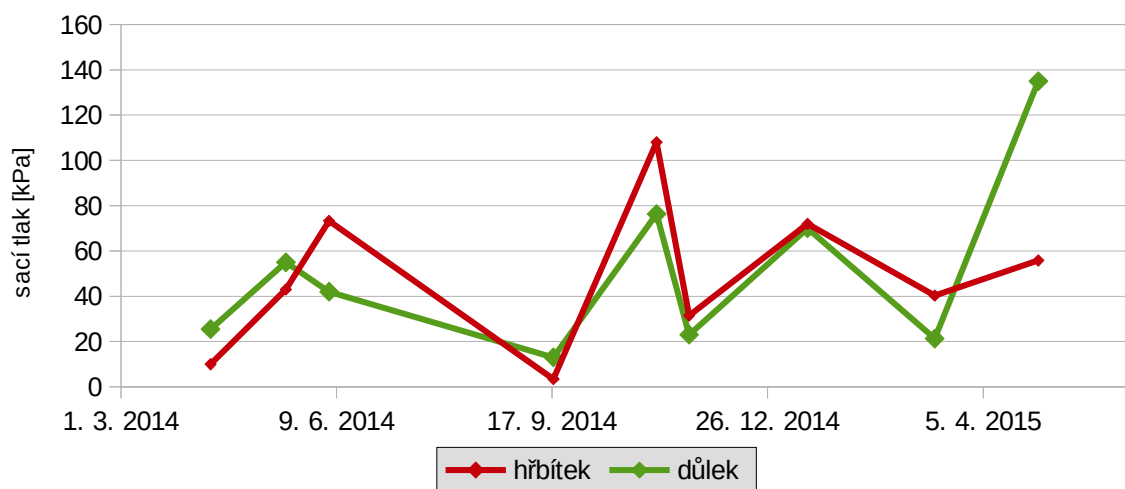
Mladějov I, proto některá měření mohou být ovlivněna vysycháním díky větru (např. poslední hodnota sacího tlaku naměřená v důlku voštiny číslo 1).



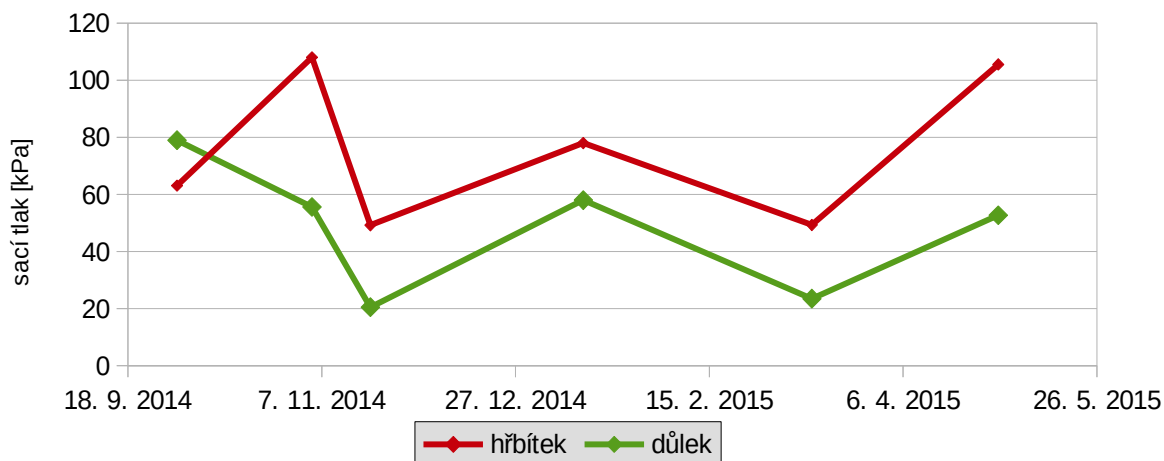
Obr. 4.73: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti na bázi hladké stěny na lokalitě Mladějov II



Obr. 4.74: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti na stěně s voštinami na lokalitě Mladějov II



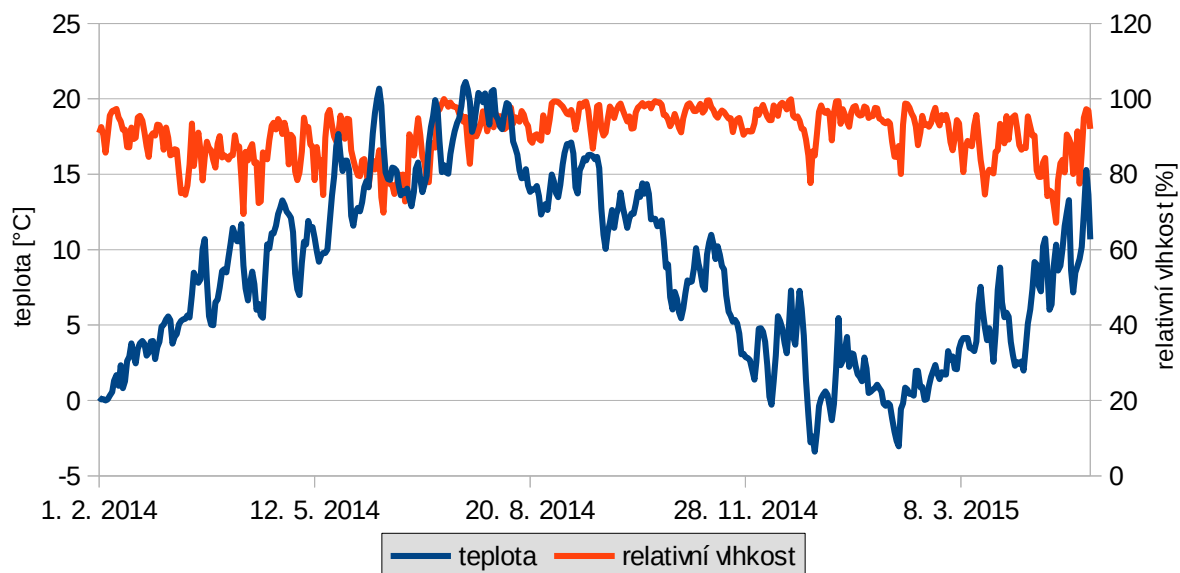
Obr. 4.75: Srovnání sacího tlaku na hřbítoku a v důlku voštiny číslo 1 na lokalitě Mladějov II



Obr. 4.76: Srovnání sacího tlaku na hřbítku a v důlku voštiny číslo 2 na lokalitě Mladějov II

### 4.2.3 Malobratřice

Lokality se nacházejí v lese s poměrně stabilními přírodními podmínkami. Čidlo pro měření teploty a relativní vlhkosti bylo umístěno na lokalitě Malobratřice II ve skále ve výšce cca 3 m nad povrchem terénu na místě chráněném stromy před slunečními paprsky. Průměrné hodnoty teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu za 24 hodin od února 2014 do května 2015, kdy na lokalitě probíhalo měření, udává obr. 4.77. Průměrná relativní vlhkost vzduchu se směrodatnou odchylkou během roku je  $90,7 \pm 7,5 \%$ , průměrná teplota  $8,7 \pm 6,0^\circ\text{C}$ .

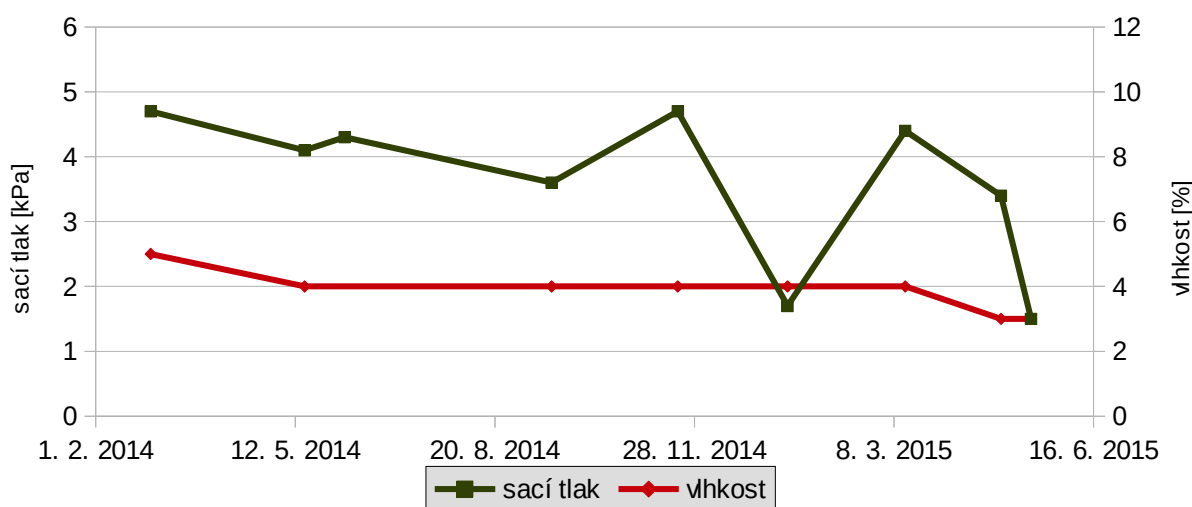


Obr. 4.77: Teplota a relativní vlhkost vzduchu na lokalitě Malobratřice

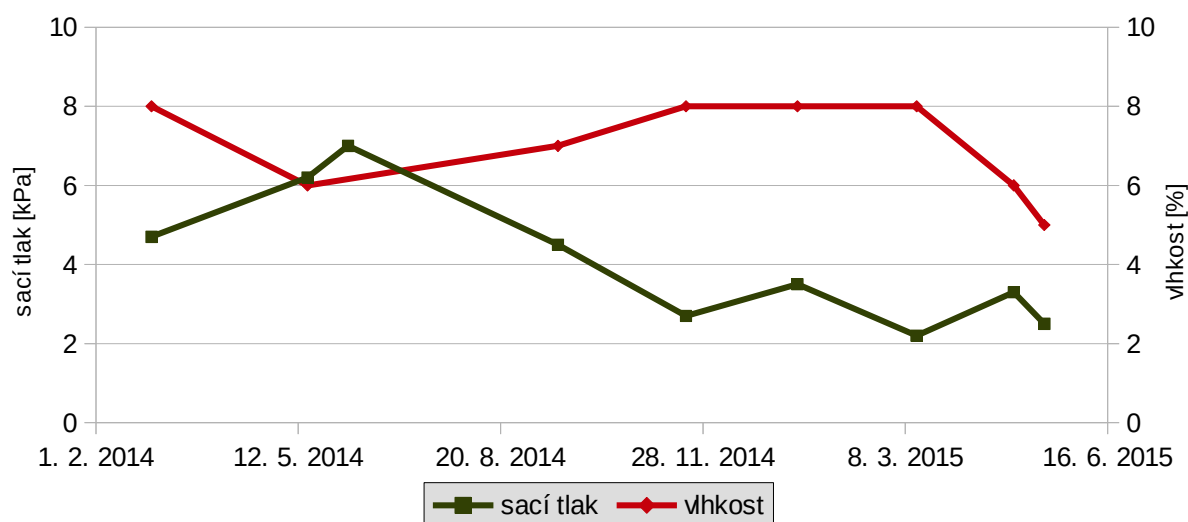
Na lokalitě Malobratřice I jsem měřila vlhkost a sací tlak na výchozu pískovce pokrytého mechem. Výsledky měření jsou uvedeny na obr. 4.78. Velmi nízký sací tlak jsem naměřila v lednu 2015, několik dní po vydatných srážkách a tání sněhu. Výsledky z měření na výchozu

s voštinami na lokalitě Malobratřice II jsou na obr. 4.79. Na obou místech byl sací tlak poměrně nízký a hodnoty byly docela podobné – v řasách se pohybovaly mezi 1,5–4,7 kPa, ve voštinách mezi 2,5–6,2 kPa. Naproti tomu naměřená vlhkost byla ve výchozu s voštinami oproti výchozu s řasami většinou dvojnásobná.

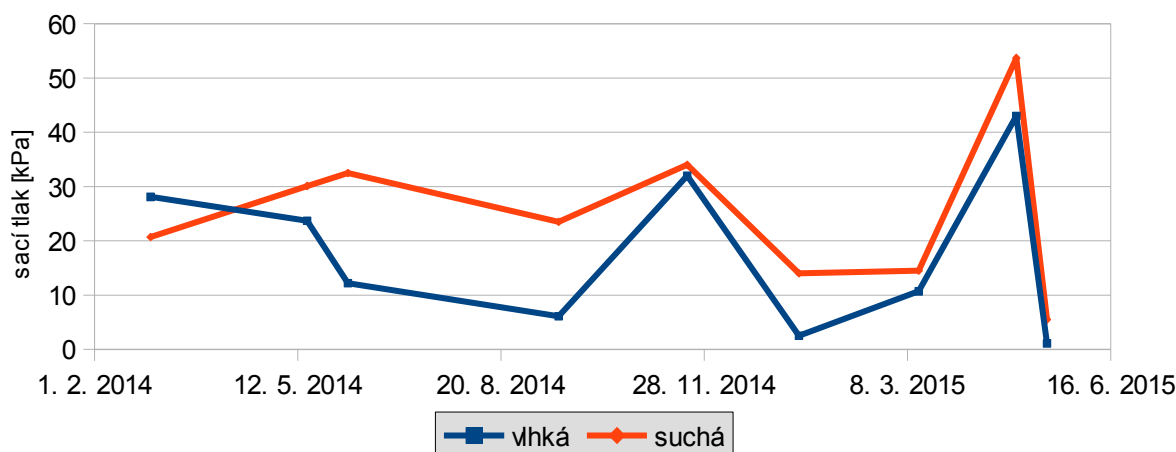
Obr. 4.80 ukazuje hodnoty sacího tlaku naměřené v mělkých dírách umístěných na viditelném rozhraní vlhké a suché části římsy. Z grafu jde vidět, že hodnota sacího tlaku v díře na vlhké části římsy byla většinou nižší. Rozdíl mezi hodnotami však většinou nebyl příliš velký. Je však třeba si uvědomit, že suchý a vlhký je přímo povrch pískovce. I pod suchým povrchem je však v určité hloubce nutné očekávat vlhkostní frontu. Hloubka měření se sondami T5x již může zasahovat pod toto rozhraní.



Obr. 4.78: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti na výchozu s řasami na lokalitě Malobratřice I



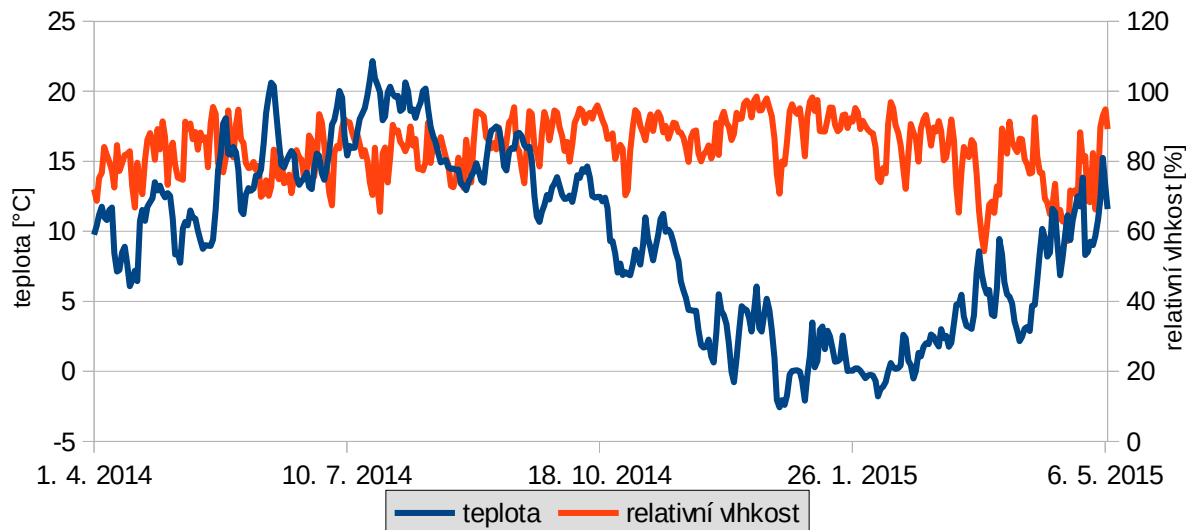
Obr. 4.79: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti na výchozu s voštinami na lokalitě Malobratřice II



Obr. 4.80: Srovnání hodnot sacího tlaku na rozhraní vlhké a suché části římsy na lokalitě Malobratřice II

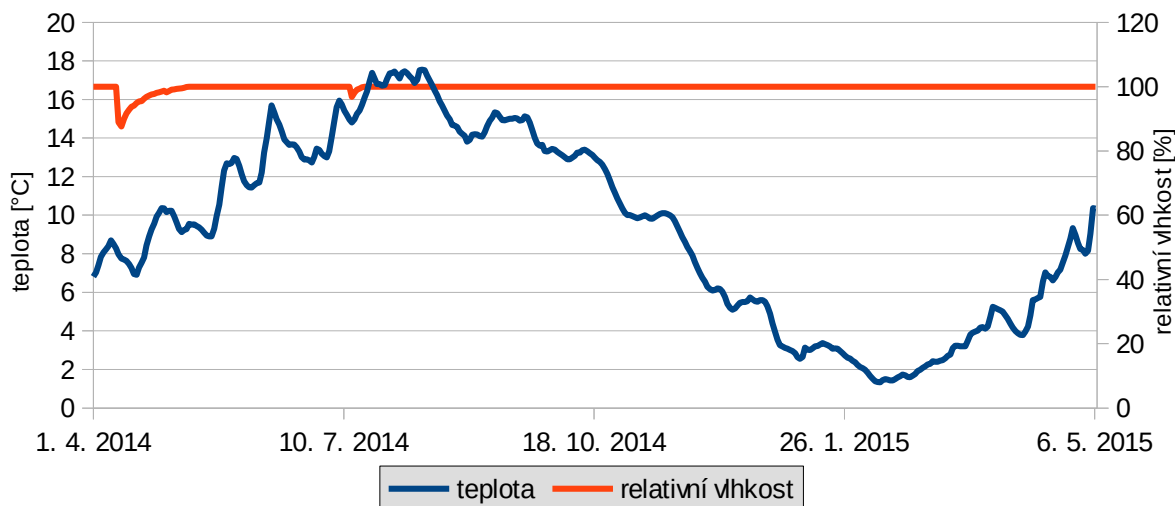
#### 4.2.4 Drábovna

Čidlo pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu bylo umístěno v mělké dutině skály ve výšce cca 4 m od povrchu terénu. Průměrnou teplotu vzduchu a relativní vlhkost vzduchu za 24 hodin od dubna 2014 do května 2015, kdy na lokalitě probíhalo měření, udává obr. 4.81. Průměrná relativní vlhkost vzduchu se směrodatnou odchylkou během roku je  $83,9 \pm 9,4 \%$ , průměrná teplota  $9,4 \pm 6,3^\circ\text{C}$ .



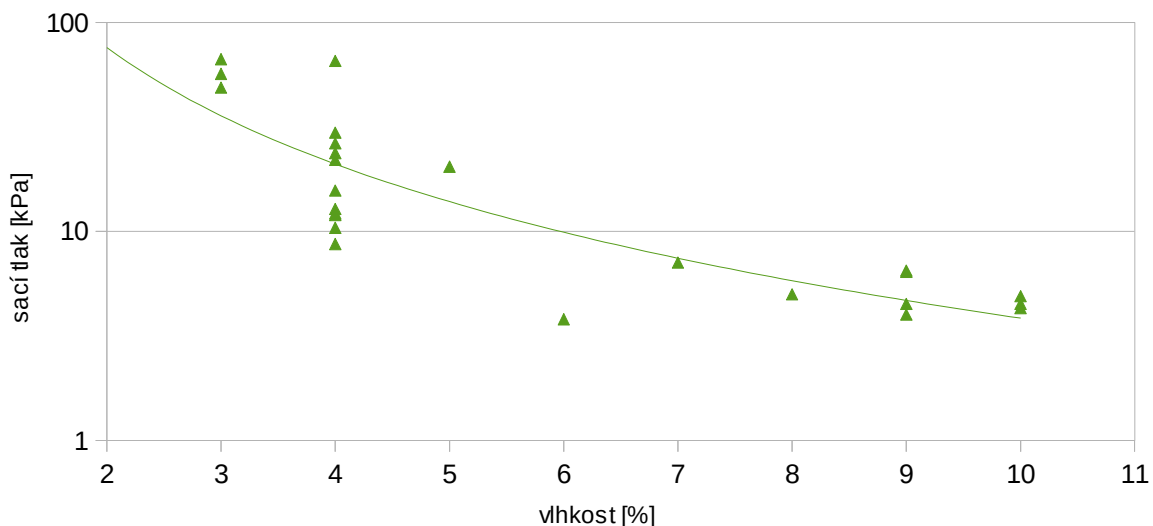
Obr. 4.81: Teplota a relativní vlhkost vzduchu na lokalitě Drábovna

Uvnitř jeskyně bylo umístěno další čidlo pro měření přírodních podmínek. Z obr. 4.82 jde vidět, že v jeskyni je relativní vlhkost vzduchu celoročně velice stabilní – okolo 100 %. Výkyvy relativní vlhkosti jsou pravděpodobně způsobeny manipulací s čidlem při stahování dat, případně odpovídají výměně čidla, které by nemělo být vystaveno 100 % vlhkosti příliš dlouhou dobu. Průměrná roční teplota se směrodatnou odchylkou je v jeskyni  $9,2 \pm 4,8^\circ\text{C}$ .



Obr. 4.82: Teplota a relativní vlhkost vzduchu uvnitř jeskyně na lokalitě Drábovna

Na lokalitě jsem měřila sací tlak a vlhkost na pěti různých místech – uvnitř jeskyně, na bázi hladké stěny bez voštin, na převisu skály, v místě výkvětu solí a ve voštinách. Všechny hodnoty sacího tlaku kromě hodnot naměřených na pilíři skály jsou v porovnání na obr. 4.84. Nejnižší sací tlak jsem naměřila v jeskyni. Jeho hodnoty zde byly poměrně konstantní (4–6,5 kPa). Na výchozu s voštinami jsem začala měřit až od září 2014. I zde vypadají hodnoty sacího tlaku poměrně stabilně (pohybují se v hodnotách 8–13 kPa). V místě výkvětu solí a na bázi stěny se hodnoty sacího tlaku postupně zvyšovaly. Je na nich ale vidět snížení v lednu 2015, kdy měření proběhlo několik dní po vydatných srážkách a tání sněhu. V solích bylo snížení jen mírné, ale na bázi hladké stěny jsem naměřila jen 3,8 kPa.



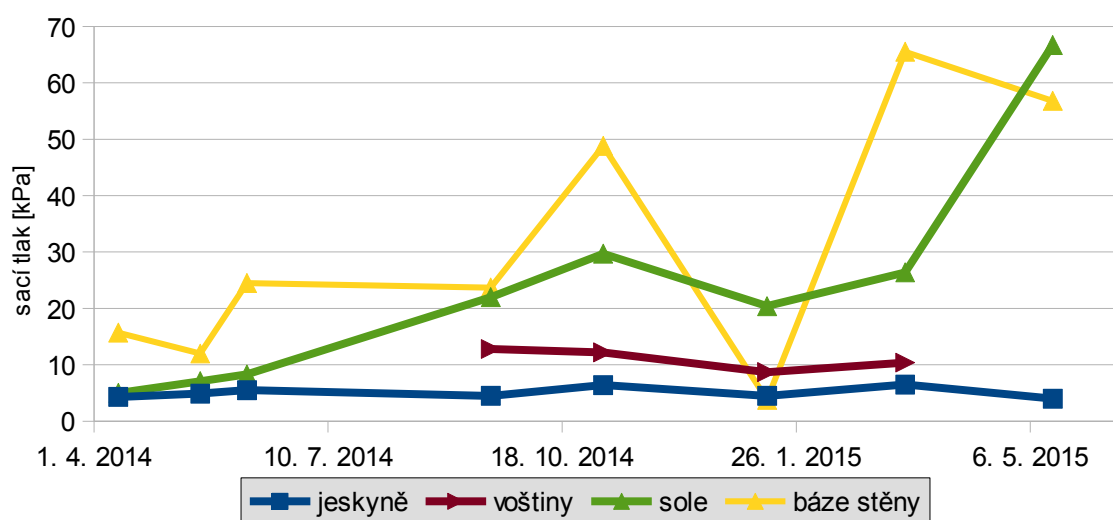
Obr. 4.83: Graf závislosti sacího tlaku na vlhkosti pískovce na lokalitě Drábovna

Na obr. 4.83 je porovnání hodnot sacího tlaku a naměřené vlhkosti pískovce ze všech míst (kromě měření na pilíři skály) na lokalitě. Z grafu jde vidět jak se zvyšující se vlhkostí klesá sací tlak. Z naměřených hodnot však nelze sestavit retenční křivku vzhledem k malé přesnosti

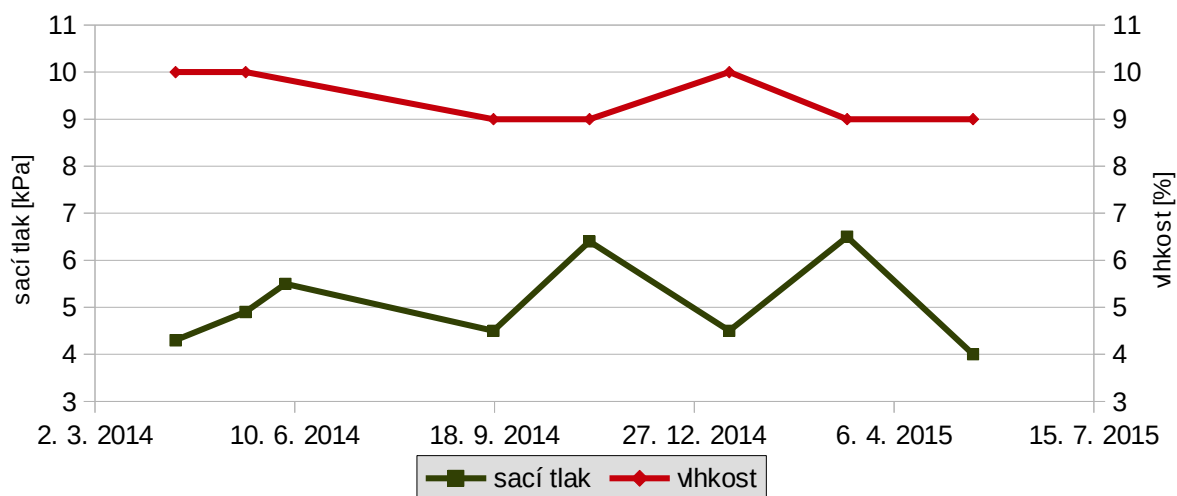
měření vlhkosti pomocí TDR ( $\pm 3\%$ ). Například pro hodnotu vlhkosti 3 % jsem naměřila hodnoty sacího tlaku v intervalu od 9 kPa do 105 kPa. Na obr. 4.85 až 4.89 porovnávám hodnoty sacího tlaku a vlhkosti na jednotlivých místech. Z grafů jde vidět, že při zvýšení vlhkosti se sníží sací tlak a naopak. Nejvyšší vlhkost byla v jeskyni (9–10 %).

Hodnoty sacího tlaku naměřené na pilíři skály je nutné brát s rezervou. Ve většině případů nebyla hodnota ustálená a stále klesala, přestože naměřená vlhkost byla 3–4 %. Podle měření TDR tedy stejná jako například ve voštinách. Protože tenzometry nejsou určeny pro měření v suchých zeminách (horninách) a po překročení hodnoty 250 kPa se může stát, že pro další měření bude potřeba sondu odvzdušnit, ukončovala jsem měření po překročení 100 kPa.

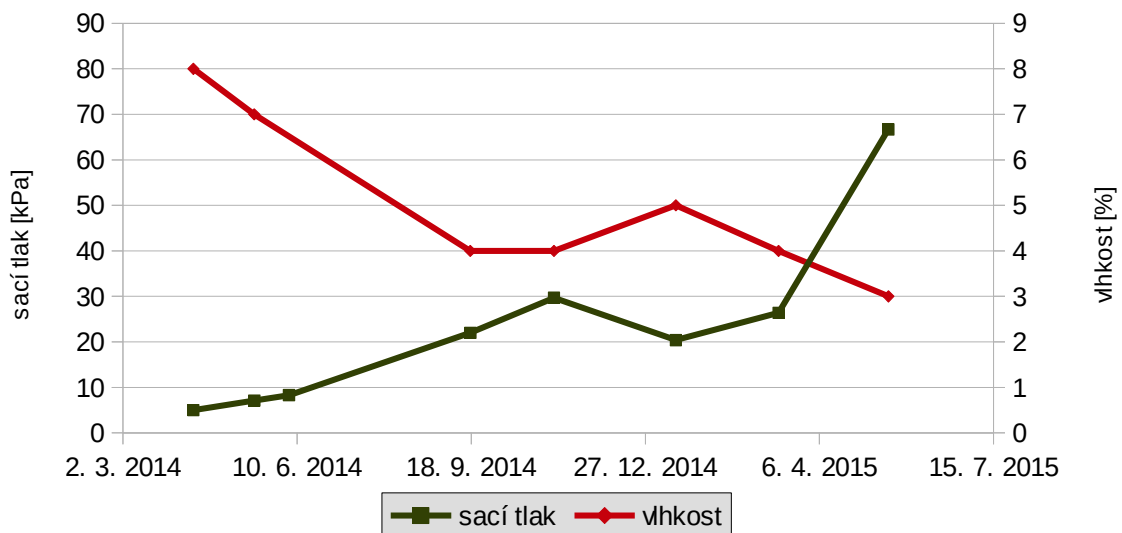
Na výchozu s voštinami jsem měřila i v mělkých dírách v důlku a na hřebítku voštiny. Naměřené hodnoty ukazuje obr. 4.90. Sací tlak byl většinou nižší v důlku. Vysoká hodnota naměřená v důlku v listopadu 2014 může být ovlivněna zvýšeným výparem díky větru nebo špatným uchycením sondy.



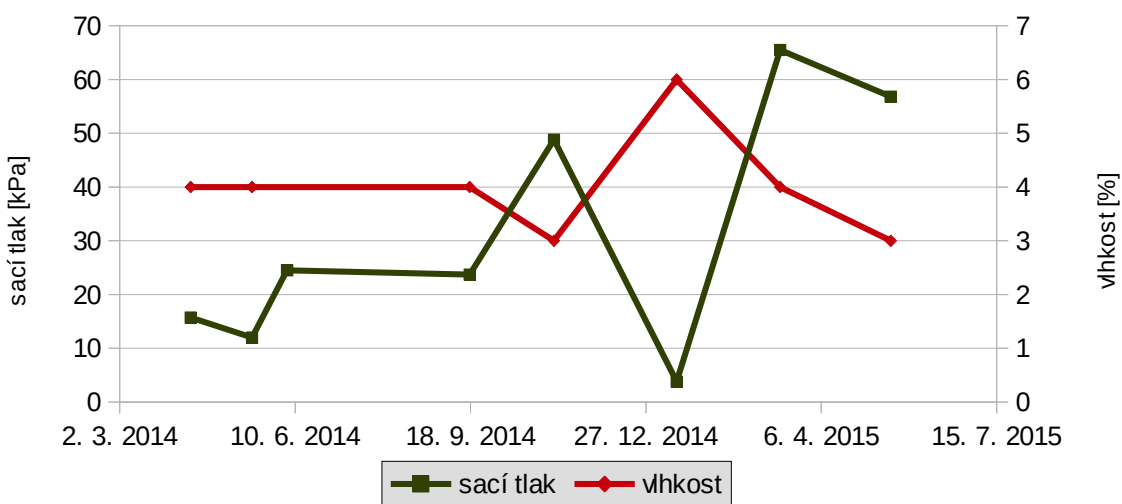
Obr. 4.84: Porovnání hodnot sacího tlaku z různých míst na lokalitě Drábovna



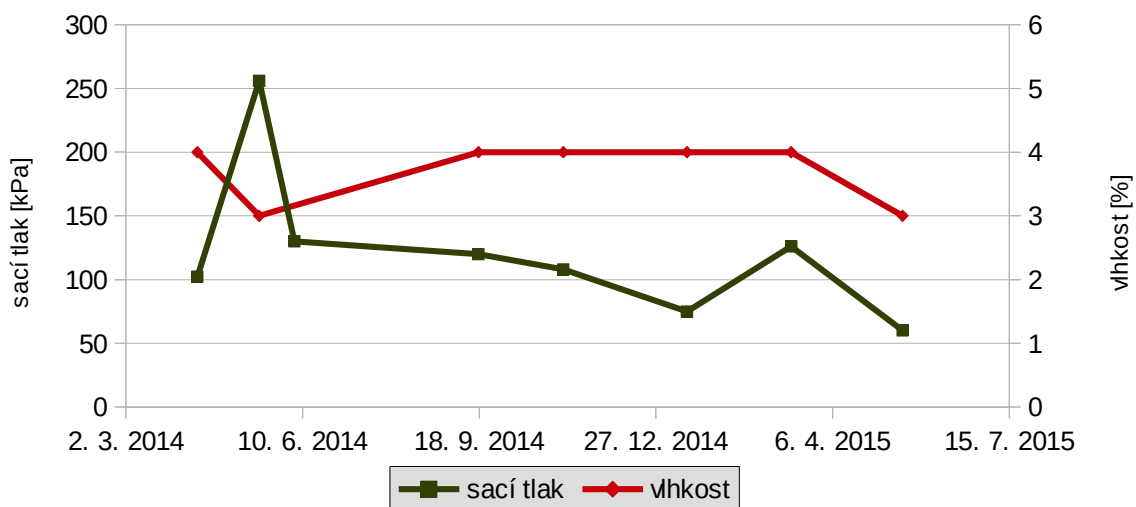
Obr. 4.85: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti v jeskyni na lokalitě Drábovna



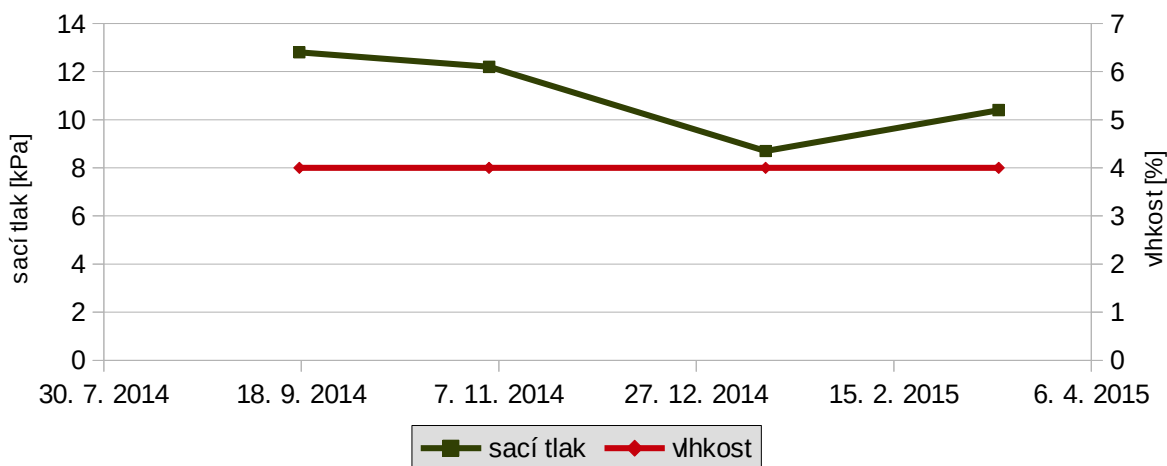
Obr. 4.86: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti v místě výkvětu solí na lokalitě Drábovna



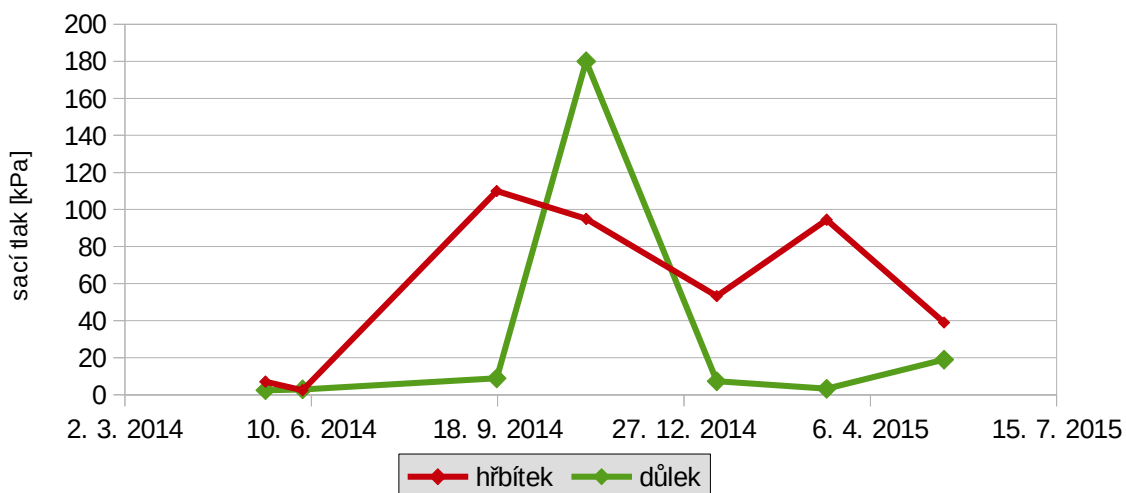
Obr. 4.87: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti na bázi hladké stěny na lokalitě Drábovna



Obr. 4.88: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti na pilíři skály na lokalitě Drábovna



Obr. 4.89: Srovnání sacího tlaku a vlhkosti na výchozu s voštinami na lokalitě Drábovna



Obr. 4.90: Srovnání sacího tlaku na hřbítku a v důlku voštiny na lokalitě Drábovna

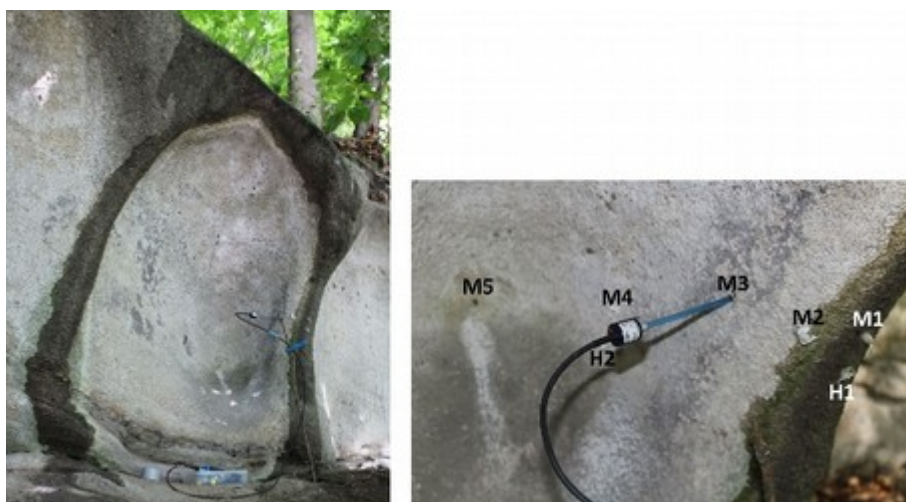
#### 4.2.5 Dvořákova stezka

Na lokalitě jsem měřila sací tlak pouze třikrát během května 2015. Proto zde uvádím pouze měření z lokality Dvořákova stezka I, kde jsem měřila sací tlak na různých místech a v různých hloubkách na jednom tafone. Mělká díra M1 se nachází na visoru tafone. Ostatní mělké díry (M2–M5) byly vyvrtány přibližně ve stejné výšce jako M1 v různých částech směrem dovnitř tafone (M5 v nejzazší části tafone) a jejich hloubka dosahuje 1–2 cm. Díra H1 je hluboká cca 6 cm a nachází se na visoru pod M1. Díra H2 je hluboká cca 3,5 cm a nachází se pod M4. Umístění jednotlivých děr je uvedeno obr. 4.91 vpravo.

Naměřené hodnoty sacího tlaku v absolutní hodnotě udává tabulka 4.1. Nejvyšší sací tlak byl vždy v mělké díře na visoru tafone, naopak nejnižší byly v M5 v nejhlubší části tafone a v díře H2. Snižování hodnot sacího tlaku na povrchu tafone od visoru směrem do jeho nejhlubší části je vidět na obr. 4.92. Podle těchto měření je visor nejsušší částí a vlhkost na

povrchu roste směrem dovnitř tafone, což odpovídá Huininkově teorii.

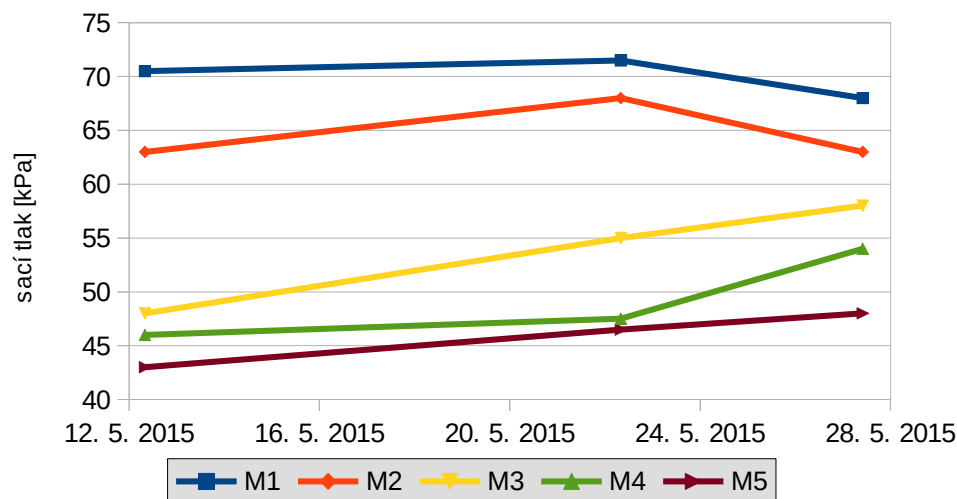
Na lokalitě jsem 22. května 2015 provedla zalévací pokus, kdy jsem na půdu pokrývající vršek tafone přibližně v půlhodinových intervalech od 9:00 kropila vodou, měřila sací tlak a sledovala jeho vývoje v jednotlivých dírách v čase. Veškerá voda stékala pouze po visorech a dovnitř tafone se nedostala, což jde vidět na obr. 4.91 vlevo, kde je fotografie ze dne konání pokusu. Tabulka 4.2 udává naměřené hodnoty před začátkem pokusu a přibližně 3 a 9 hodin po ukončení kropení vodou. Po 3 hodinách (14:00) bylo vidět, jak vlhkost postupuje uvnitř tafone od visoru směrem dovnitř. Nejnižší sací tlak v mělkých dírách byl v M1 na visoru a nejvyšší v M5 v nejzazší části (obrácený sled než při měření za sucha). Po 9 hodinách (20:00) bylo ze snížení hodnot sacího tlaku u děr M2 až M5 vidět další postup vlhkosti směrem dovnitř tafone. Sací tlak v hluboké díře na visoru (H1) se také stále snižoval avšak hodnota v M1 už byla vyšší než při měření ve 14:00, což znamená, že vlhkost se stahovala dovnitř tafone a povrch visoru se vysušoval.



Obr. 4.91: Tafone na Dvořákově stezce. Vpravo detail s popisem umístění děr.

Tab. 4.1: Hodnoty sacího tlaku na tafone

|           | 12. 5. 2015 | 22. 5. 2015 | 27. 5. 2015 |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| <b>M1</b> | 70,5 kPa    | 71,5 kPa    | 68 kPa      |
| <b>M2</b> | 63 kPa      | 68 kPa      | 63 kPa      |
| <b>M3</b> | 48 kPa      | 55 kPa      | 58 kPa      |
| <b>M4</b> | 46 kPa      | 47,5 kPa    | 54 kPa      |
| <b>M5</b> | 43 kPa      | 46,5 kPa    | 48 kPa      |
| <b>H1</b> | 47,4 kPa    | 56 kPa      | 55 kPa      |
| <b>H2</b> | 42 kPa      | 46,7 kPa    | 50 kPa      |



Obr. 4.92: Sací tlak naměřený v mělkých dírách na tafone

Tab. 4.2: Průběh sacího tlaku v jednotlivých dírách na tafone během zalévacího pokusu

|           | 22. 5. 2015 8:00 | 22. 5. 2015 14:00 | 22. 5. 2015 20:00 |
|-----------|------------------|-------------------|-------------------|
| <b>M1</b> | 71,5 kPa         | 37 kPa            | 46 kPa            |
| <b>M2</b> | 68 kPa           | 41,5 kPa          | 35 kPa            |
| <b>M3</b> | 55 kPa           | 45,2 kPa          | 44 kPa            |
| <b>M4</b> | 47,5 kPa         | 45 kPa            | 43 kPa            |
| <b>M5</b> | 46,5 kPa         | 47,5 kPa          | 42 kPa            |
| <b>H1</b> | 56 kPa           | 51 kPa            | 49 kPa            |
| <b>H2</b> | 46,7 kPa         | 38 kPa            | 45 kPa            |

#### 4.2.6 Shrnutí a diskuze terénních měření

Měření sacího tlaku v hlubších dírách (přes 2 cm) je věrohodné, protože sonda je v dobrém kontaktu s porézním prostředím pískovce a výpar z díry je zanedbatelný. Naopak měření sacího tlaku v mělkých dírách (0,5–1 cm) může být problematictější, protože měření mohou komplikovat vnější vlivy (například zvýšený výpar díky větru). V mělkých dírách je také obtížnější sondu dobře uchytit. Mělké díry musí být dobře vyvrtané (nesmí být příliš široké), aby byl keramický hrot tenzometru v kontaktu s horninou. Při hloubce otvoru pod 1 cm již měření není příliš věrohodné.

Rozsah naměřených hodnot sacího tlaku v mělkých dírách ve voštinách během všech měření je pro důlky i hřbítky prakticky stejný (od 1 kPa až přes 100 kPa), protože velikost hodnot závisí na pozici výparové fronty, která se v čase mění. Z porovnání sacího tlaku v důlku a na hřbítku voštin při jednotlivých měřeních a z průměru neovlivněných hodnot na lokalitě Mladějov I v České křídové pánvi však vyplývá, že v důlcích je sací tlak vesměs nižší, jsou tedy vlhčí než hřbítky. To odpovídá i modelu kaverózního zvětrávání, který sestavil

Huinink et al. (2004). Naměřených dat je však zatím relativně málo a některá z nich jsou nejspíše ovlivněna výparem či špatným uchycením sondy.

Huininkovu modelu odpovídají i hodnoty sacího tlaku naměřené v mělké hloubce pod povrchem (cca 1–2 cm) v různých částech tafone na lokalitě Dvořákova stezka v permokarbonských pískovcích u Kralup nad Vltavou. Podle těchto měření je nejsušší částí tafonu visor (68–72 kPa) a vlhkost povrchu roste směrem dovnitř tafone (43–48 kPa).

Na lokalitě Mladějov II jsou velmi odlišné přírodní podmínky (výrazně vyšší průměrná teplota vzduchu a nižší relativní vlhkost vzduchu) kvůli odlesnění svahu, na kterém se výchozy nacházejí, než na lokalitě Mladějov I, která se nachází v lese. Hodnoty vlhkosti a sacího tlaku naměřené na výchozech s voštinami a hladkých stěnách, které pokrývaly řasy, se však nijak výrazně neliší. Na lokalitě Mladějov II je průměrná hodnota vlhkosti výchozu s voštinami 3,1 % a průměrná hodnota sacího tlaku 11,6 kPa. Na výchozu, který dříve pokrývaly řasy je průměrná vlhkost 4,5 % a průměrný sací tlak 49 kPa, avšak ze stoupajících hodnot sacího tlaku lze usuzovat na postupné vysušování výchozu. Na lokalitě Mladějov I je průměrná hodnota vlhkosti výchozu s voštinami 3,8 % a průměrná hodnota sacího tlaku 14,9 kPa – tedy dokonce vyšší než na výchozu s voštinami na lokalitě Mladějov II, který je vzhledem ke svému umístění (směr JV) během dne plně vystaven slunečním paprskům. Průměrná hodnota vlhkosti na výchozu s řasami na lokalitě Mladějov I je 3,5 % a průměrná hodnota sacího tlaku 43 kPa. Ze zvyšujících se hodnot sacího tlaku na obou výchozech na lokalitě Mladějov I lze usuzovat, že výchozy vysychají, což je vidět i díky odumírajícím řasám. Důvodem vysychání je zřejmě dlouhodobé suché období.

Průměrné hodnoty vlhkostí pískovce na výchozech s voštinami jsou na všech lokalitách velmi podobné. Nejnížší je na lokalitě Mladějov I (3,2 %), kde je roční průměrná vlhkost vzduchu se směrodatnou odchylkou  $73,0 \pm 16,1$  %. Nejvyšší průměrná vlhkost pískovce na výchozu s voštinami je na lokalitě Malobratřice (4,1 %), kde je nejvyšší i průměrná roční vlhkost vzduchu ( $90,7 \pm 7,5$  %). Zde je i nejnížší průměrný sací tlak (3,6 kPa). Nejvyšší průměrný sací tlak je na lokalitě Mladějov I (14,9 kPa). Ze všech naměřených hodnot lze usuzovat, že výchozy s voštinami jsou vždy poměrně vlhké, bez závislosti na lokalizaci výchozů.

Z porovnání vlhkostí výchozu s voštinami (naměřené hodnoty 5–8 %, průměrná hodnota 4,1 %) a výchozu pokrytého řasami (3–5 %, průměrná hodnota 3,9 %) na lokalitě Malobratřice lze usuzovat, že řasy pokrývající pískovec odčerpávají z jeho povrchu vlhkost. Hodnoty sacího tlaku měřené v hloubce 4–10 cm byly pro obě místa velmi podobné, na výchozu s řasami dokonce nižší (1,5–4,7 kPa, průměrná hodnota 3,6 kPa) než na výchozu s voštinami (2,5–7,0 kPa, průměrná hodnota 3,6 kPa).

Měření sacího tlaku částečně koresponduje s měřením vlhkosti – při vyšší vlhkosti je sací tlak v absolutní hodnotě většinou nižší a naopak. Avšak pro měření vlhkosti v pískovci, kde se vlhkost mění v poměrně velmi malém rozsahu, má přístroj TDR příliš nízkou přesnost ( $\pm 3$  %). Proto nelze z měření TDR odhadovat sací tlak, který byl pro stejné hodnoty vlhkosti na různých místech různý (např. pro vlhkost 4 % jsem na výchozu s řasami na lokalitě

Malobratřice naměřila hodnotu 1,7 kPa, ale pro stejnou hodnotu vlhkosti jsem na pilíři skály na lokalitě Drábovna dostávala hodnoty vyšší než 100 kPa). Nejnižší naměřená vlhkost byla na pilíři skály na lokalitě Mladějov I (2 %), nejvyšší v jeskyni na lokalitě Drábovna (10 %), kde je celoročně relativní vlhkost vzduchu 100 %. Sací tlak měřený pomocí sond T5x je tak mnohem spolehlivějším ukazatelem stavu vlhkosti v pórech pískovce než měření TDR.

## 4.3 Další experimenty

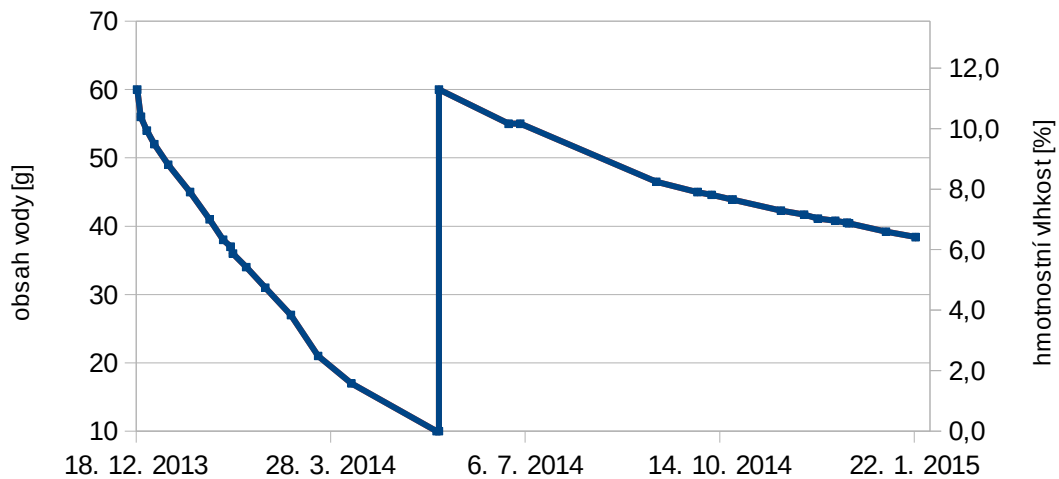
### 4.3.1 Transport soli jádrem pískovcem

Pokus vytvořený pro simulaci transportu soli ( $K_2SO_4$ ) pískovcem probíhal od 18. prosince 2013 do 22. ledna 2015. Na začátku jsem do vzorku pomocí PVC hadičky injektovala vodu dokud nedošlo ke zvlhčení povrchu pískovce. Obsah vody ve vzorku za daných podmínek dosahoval 60 g. (což odpovídá hmotnostní vlhkosti cca 11,3 %). Vzorek jsem pak nechala postupně vysychat a obsah vody jsem zjišťovala vážením vzorku. Po úbytku hmotnosti o 50 g jsem v květnu 2014 do vzorku injektovala vodu podruhé a to tak, aby výsledná váha byla stejná jako na začátku pokusu a opět jsem zjišťovala úbytek hmotnosti v čase.

Průběh pokusu znázorňuje obr. 4.93. Z grafu jde vidět, že druhé vysychání vzorku bylo mnohem pomalejší, pravděpodobně kvůli krystalizaci soli a ucpávání pórů. Vypočtená hmotnostní vlhkost vzorku uvedená v grafu na vertikální ose vpravo je pouze přibližná, protože část vody zůstávala v PVC hadičce.

Výpar vztahovaný k ploše na povrchu svrchního jádra byl na začátku prvního vysychání 0,108 g/cm<sup>2</sup>/den, na konci byl výpar 0,008 g/cm<sup>2</sup>/den. Průměrná hodnota výparu během prvního vysychání byla 0,017 g/cm<sup>2</sup>/den. Průměrná hodnota výparu během druhého vysychání byla 0,004 g/cm<sup>2</sup>/den, na konci druhého vysychání byl výpar jen 0,003 g/cm<sup>2</sup>/den.

Pokus jsem ukončila 22. ledna 2015, kdy jsem aparaturu rozebrala. Skrz vytvořený těsnicí plášť neprošla téměř žádná sůl, takže je zřejmé, že těsnění elektrikařskou páskou fungovalo velmi dobře. Povrch pískovce na svrchním jádru začal asi po měsíci od začátku pokusu expandovat a v průběhu pokusu se povrch stále rozpínal, ale nepraskl a přes povrch nepronikla žádná sůl. Po rozebrání pokusné aparatury a naříznutí povrchu svrchního jádra jsem zjistila, že se sůl vysrážela v podobě milimetrových krystalů těsně pod povrchovou krustou, jak je vidět na obrázku 4.94 vpravo. Zbylou sůl ze zdrojové zóny mezi jádry, jsem nechala vysušit a poté jsem jí zvažila. Z původních 21 g se nerozpustilo 10 g. Zbytek soli byl vodou rozpuštěn a transportován do svrchního jádra a to především pod krustu, kde se sůl z roztoku vysrážela. Vzorkem protéklo za celou dobu pokusu zhruba 100 ml vody, takže úbytek soli přibližně odpovídá její rozpustnosti (12,0 g/100 ml při 25 °C).



Obr. 4.93: Průběh pokusu pro transport soli jádrem pískovce



Obr. 4.94: Vytvořená aparatura pro transport soli jádrem pískovce. Vpravo detail naříznuté krusty, pod kterou se vysrážela sůl. Foto: J. Bruthans

### 4.3.2 Monitorování vlhkostní fronty v laboratoři

Pro sledování pohybu vlhkostní fronty v laboratoři jsem použila pískovcovou kostku obalenou v epoxidu. Uprostřed kostky jsem vyvrtala hlubokou díru o průměru cca 2,5 cm, kam jsem umístila průhlednou plastovou trubku s vnitřním průměrem 2 cm, do které se přesně vešla hlava kamery. Aby se do trubky zespodu nedostával písek, přilepila jsem na její spodní část plastové kolečko. Pro snížení výparu přímo z díry jsem utěsnila okolí plastové trubky na povrchu pískovce mikrotenovou fólií. Na okraji kostky jsem na dvou stranách vyvrtala další dvě hluboké díry s průměrem cca 1 cm, kudy jsem do pískovce injektovala roztok fluoresceinu. Pomocí kamery jsem pak pozorovala pohyb roztoku v prostřední díře. Účelem pokusu bylo otestovat, zda lze minikamerou sledovat fluoresceinem zviditelněnou vlhkostní frontu na povrchových výchozech pískovce.

## Závěr

Ve své práci jsem se zaměřila na otestování fluorescentního stopovače pro zobrazení pohybu vlhkosti v odvrтанých jádrech pískovce z přírodních výchozů a měření sacího tlaku a vlhkosti pomocí TDR v terénu pro popis míry vlhkosti a jejího transportu v povrchové zóně kvádrových pískovců. Vedle kvádrového pískovce z Českého ráje jsem studovala i pohyb vlhkosti v permokarbonském pískovci v Kralupech nad Vltavou, kde je vyvinuto tafone, které se na křídových pískovcích nevyskytuje. Měření v terénu probíhalo zhruba jednou měsíčně od února 2014 do května 2015. Protože tenzometry T5 nesmí být vystaveny teplotám pod 0 °C, nelze měřit sací tlak v zimě.

Experimenty s pozorováním pohybu fluoresceinu provedené na odvrтанých jádrech pískovce ukázaly, že postup vlhkosti je velmi závislý na přítomnosti biokrusty. Vlhkost se šířila mnohem rychleji ve vzorcích, které neměly na výparovém povrchu biokrustu, než ve vzorcích s biokrustou. Fluorescein se ukázal jako výborný stopovač pro zjišťování postupu vlhkosti a výparové fronty, protože se jeho barva mění v závislosti na koncentraci. Pro experimenty jsem používala roztok, který měl žlutooranžovou barvu, takže bylo vidět postupující vlhkost uvnitř vzorků. Na místech, kde se roztok vypařoval, se jeho barva měnila na červenou a místo přechodu barev tak jasně označovalo aktuální místo výparu.

Z grafů závislosti velikosti výparu na zvyšující se hmotnostní vlhkosti vzorků je zřejmé, že přítomnost biokrusty na povrchu pískovce má vliv i na velikost výparu. U vzorků bez biokrusty na povrchu se výpar se zvyšující se vlhkostí vzorku zvyšoval rychleji než u vzorků s biokrustou. Z výsledku pokusu vytvořeného pro simulaci transportu soli pískovcem je vidět, že biokrusta ovlivňuje i místo výparu a následné srážení soli. Ke srážení soli docházelo těsně pod biokrustou.

Z postupu fluoresceinu na vzorcích s uměle vytvořenými voštinami (uměle vyhloubené důlky na jádrech přírodního pískovce bez přítomnosti hydrofobní biokrusty) je patrné, že při nižší vlhkosti probíhá výpar především z důlků, kdežto při vyšší vlhkosti postoupí výparová fronta a výpar probíhá především z vyšších částí vzorku (hřbítků). To přesně odpovídá numerickému modelu transportu vlhkosti a solného zvětrávání podle Huininka et al. (2004). Ve vzorcích se skutečnými voštinami postupoval roztok fluoresceinu k povrchu kvůli hydrofobní biokrustě mnohem pomaleji a na povrch pronikal v místech, kde byla vrstva biokrusty slabší.

Huininkovu modelu zvětrávání odpovídají i výsledky měření sacího tlaku v mělkých dírách ve voštinách v terénu, ze kterého vyplývá, že v důlcích voštin je vesměs větší vlhkost než na jejich hřbítcích. Tomuto modelu odpovídá i rozložení vlhkosti naměřené pomocí sacího tlaku v tafone, kde nejsušším místem byl visor a směrem dovnitř tafone se vlhkost zvyšovala.

Z měření v terénu jsem zjistila, že pro zjišťování sacího tlaku v pískovci se dají mikrotenzometry T5 poměrně dobře použít, především pro díry hlubší než 1 cm. Měření v dírách menších než 1 cm není příliš věrohodné, protože měření může být ovlivněno

vnějšími vlivy díky výparu a špatnému kontaktu sondy. Většina měření na různých místech u jednotlivých lokalit probíhala v již dříve vyvrtaných dírách hlubokých cca 15 cm pro měření vlhkosti pomocí TDR. Výhodou je, že díky hloubce děr nejsou měření ovlivněna vnějšími vlivy. Nevýhodou těchto hlubokých děr určených primárně pro jiný účel je, že měření nemusí probíhat vždy ve stejné hloubce (například z důvodu uvolnění zrn ze stropu díry).

Z porovnání průměrných hodnot vlhkosti a sacího tlaku naměřených na výchozech s voštinami lze usuzovat, že tyto výchozy s voštinami jsou vždy poměrně vlhké, i když nejsou chráněny vegetací a jsou plně vystaveny slunečním paprskům. Průměrná vlhkost výchozů s voštinami na studovaných lokalitách je 3,1–4,1 %, průměrný sací tlak 3,6–14,9 kPa.

Z experimentu provedeného v laboratoři jsem zjistila, že vlhkostní fronta zviditelněná díky fluoresceinu by se pravděpodobně dala sledovat přímo na přírodních výchozech pískovce pomocí finančně dostupné instalatérské minikamery.

Mikrotenzometry a fluorescein se na základě provedených experimentů jeví jako velmi slibné techniky pro detailní porozumění pohybu vlhkosti a solí v kvádrovém pískovci jak v laboratoři, tak v terénních podmínkách. Je překvapivé, že tyto techniky převzaté z půdní hydrologie dosud nejsou pro studium pohybu vlhkosti v pískovcích šířeji využívány.

## Použitá literatura

- Bell J. P., Dean T. J., Hodnett M. G. (1987): Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, part II. Field techniques, evaluation and calibration. *Journal of Hydrology* **93**: 79–90.
- Brandmeier M., Kuhlemann J., Krumrei I., Kappler A., Kubik P. W. (2011): New challenges for tafoni research. A new approach to understand processes and weathering rates. *Earth Surface Processes and Landforms* **36**(6): 839–852.
- Conca J. L., Rossman G. R. (1985): Core softening in weathered tonalite. *Journal of Geology* **93**: 59–73.
- Davis J. L., Topp G. C., Annan P. (1977): Electromagnetic detection of soil moisture, Progress report I. *Can. J. Remote Sens.* **3**: 76–86.
- Domenico P. A., Schwartz F. W. (1998): *Physical and Chemical Hydrogeology*. Wiley and Sons, New York.
- Esteban M., Klappa C. F. (1983): Subaerial exposure environment. In Carbonate Depositional Environments. Scholle P. A., Bebout D. G., Moore C. H. eds. *American Association of Petroleum Geologists Memoir* **33**: 1–54.
- Evans I. S. (1970): Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de Geomorphologie dynamique* **19**: 153–177.
- Fediuk F. (2011): Dvořákova stezka, *Zpravodaj České geologické společnosti* **14** – leden 2012, Česká geologická společnost, Praha.
- Goudie A. S., Viles H. (1997): *Salt Weathering Hazards*. Wiley: Chichester.
- Goudie A. S. (2013): *Arid and Semi-Arid Geomorphology*. Cambridge University Press.
- Huinink H. P., Pel L. and Kopinga K. (2004): Simulating the growth of tafoni. *Earth Surface Processes and Landforms* **29**: 1225–1233.
- Chlupáč I. (1999): *Výcházky za geologickou minulostí Prahy a okolí*, Academia, 2., upravené vydání, Praha, 183–190.
- Käss, W., Behrens, H., & Behrens, H. (1998): *Tracing technique in geohydrology* (p. 581). Rotterdam: Balkema.
- Lan W., Li H., Wang W. D., Katayama Y., Gu J. D. (2010): Microbial community analysis of fresh and old microbial biofilms on Bayon temple sandstone of Angkor Thom, Cambodia. *Microbial ecology* **60**(1): 105–115.
- Laue S., Siedel H., Pfefferkorn S. (2004): Alveolar (honeycomb) weathering of Cretaceous building sandstone on the church of Leuba (Upper Lusatia, Germany): causes, processes, damages. In: Kwiatkowski, D. & Löfvendahl, R. (eds) *Proceedings of 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, ICOMOS Sweden,

Stockholm, 211–218.

- McBride E. F., Picard M. D. (2000): Origin and development of tafoni in Tunnel Spring Tuff, Crystal Peak, Utah, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* **25**: 869–879.
- Mol L., Viles H. A. (2012): The role of rock surface hardness and internal moisture in tafoni development in sandstone. *Earth surface processes and landforms* **37**: 301–314.
- Mol L. (2014): Investigations into the relationship between changes in internal moisture regimes and rock surface deterioration in cavernous sandstone features. *Earth surface processes and landforms* **39**: 914–927.
- Mottershead D. N., Pye K. (1994): Tafoni on coastal slopes, South Devon, UK. *Earth Surface Processes and Landforms* **19**: 543–563.
- Mustoe, G. E. (1982): The origin of honeycomb weathering. *Geological Society of America Bulletin* **93**: 108–115.
- Rodriguez-Navarro C., Doehne E., Sebastian E. (1999): Origins of honeycomb weathering: The role of salt and wind. *Geological Society of America Bulletin* **111**(8): 1250–1255.
- Siedel H. (2010): Alveolar weathering of Cretaceous building sandstones on monuments in Saxony, Germany. In: Přikryl R. & TÖRÖK, A. (eds) *Natural Stone Resources for Historical Monuments*. Geological Society, London, Special Publications 333, 11–23.
- Slavík M. (2014): *Propustnost přírodních povrchů hruboskalského pískovce ve skalních městech pro vodní páru a intenzita výparu*. Diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky.
- Strini A., Guglielmin M., Hall K. (2008): Tafoni development in a cryotic environment: an example from Northern Victoria Land, Antarctica. *Earth Surface Processes and Landforms* **33**: 1502–1519.
- Tindall J. A., Kunkel J. R., Anderson D. E. (1999): *Unsaturated zone hydrology for scientists and engineers* (No. 04; GB1197. 7, T5.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Torraca G. (1988): *Porous Building Materials*. ICROM: Rome.
- Trakal L., Dohnal J., Vosátka M. (2008): Dynamika retence vody v půdě v procesu vývoje mykorhizní symbiózy (monitorování metodou TDR – time domain reflectometry). *Biom.cz* [online]. 2008-08-11. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/dynamika-retence-vody-v-pude-v-procesu-vyvoje-mykorhizni-symbiozy-monitorovani-metodou-tdr-time-domain-reflectometry>>. ISSN: 1801-2655.
- Trpkošová D., Mls J. (2010): Efficiency of capillary barriers in relation to retention curves data. In: *Acta Geodyn. Geomater.* **7**(2): 201–207.
- Turkington A. V., Paradise T. R. (2005): Sandstone weathering: a century of research and innovation. *Geomorphology* **67**(1): 229–253.

- Turkington A. V., Phillips J. D. (2004): Cavernous weathering, dynamical instability and self-organization. *Earth Surface Processes and Landforms* **29**: 665–675.
- 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**: 599–628.
- Van Genuchten M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal* **44**(5): 892–898.
- Walder J. S., Hallet B. (1986): The physical basis of frost weathering: toward a more fundamental and unified perspective. *Arctic and Alpine Research*, 27–32.