

UNIVERZITA KARLOVA
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Aplikovaná geologie

Studijní obor: Hydrogeologie



Bc. Tomáš Pohan

**Využití jehlové metody pro určení intenzity výparu
z porézního prostředí**

Use of uranine-probe method to determine evaporation rate
from porous media

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Martin Slavík, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Mgr. et Mgr. Tomáš Weiss, Ph.D.

Praha, 2023

Prohlášení

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

V Praze 30. 4. 2024

.....
podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu mé diplomové práce Mgr. Martinu Slavíkovi, Ph.D., který mi ochotně poskytoval konzultace, prostředky a nástroje potřebné pro laboratorní měření, cenné rady a podněty pro psaní diplomové práce a intenzivně zodpovídal mé dotazy v průběhu zpracování diplomové práce. Poděkování patří také Mgr. Jaroslavu Řihoškovi, Ph.D. za pomoc s přípravou normalizovaných vzorků a také pracovníci Ústavu struktury a mechaniky hornin Akademie Věd ČR, v.v.i., Mgr. Janě Schweigstillové, Ph.D., za spolupráci při měření dat v laboratoři.

Abstrakt

Výpar z porézního prostředí má vliv na řadu přírodních procesů. Ve své práci jsem se zaměřil na druhou výparovou fázi, kdy intenzitu výparu počítám pomocí Fickova zákona na základě teploty a vlhkosti vzduchu nad výparným povrchem, propustnosti porézního materiálu pro vodní páru a hloubky výparové fronty pod povrchem. Pro určení této hloubky jsem použil jehlovou metodu s fluoresceinem sodným. Cílem práce bylo vypočítat intenzitu výparu pomocí Fickova zákona a hodnot hloubky výparové fronty zjištěné jehlovou metodou, a to pro 6 vzorků písčité zeminy a 3 vzorky různých hornin. Výpočty následně srovnávám s měřenou intenzitou výparu. Dílčím cílem bylo ověřit použitelnost jehlové metody pro určení hloubky výparové fronty v písčité zemině a v 12 různých horninových vzorcích.

Dosažené výsledky ukazují, že jsem úspěšně určil hloubku výparové fronty pro písek a horninové vzorky. Přesnost měření jehlovou metodou v písku byla průměrně 2,0 mm. Rozdíl v hodnotách zjištěných jehlovou metodou byl oproti jiné, nezávislé metodě (detekce výparové fronty ze změny barvy roztoku fluoresceinu) v písku průměrně 1,7 mm, pro horninové vzorky jsem toto nezjišťoval. Všechny výparové experimenty potvrdily, že s rostoucí hloubkou výparové fronty klesá intenzita výparu, a to jak měřená, tak vypočítaná. Pro písek byla vypočítaná intenzita výparu v 83 % případů podhodnocená, s celkovou průměrnou relativní odchylkou pouhých 23 % oproti měření (rozdíl mezi výpočty a měřením v průměru 0,12 mm/den). Pro horniny byla intenzita výparu v 100 % případů podhodnocená, s průměrnou relativní odchylkou 193 % oproti měření (rozdíl mezi výpočty a měřením v průměru 0,28 mm/den). Tato nižší shoda u hornin pravděpodobně souvisí se sníženou přesností měření jehlovou metodou při nízké vlhkosti v hornině. Kombinace Fickova zákona a jehlové metody má nevýhodu v případě výparové fronty v mělkých vrstvách, kde se chyba měření hloubky výparové fronty výrazně projevuje v nejistotě vypočítané intenzity výparu. Konstantní chyba měření jehlovou metodou se projevuje na nejistotě vypočítané intenzity výparu nelineárně v závislosti na hloubce výparové fronty.

Klíčová slova: jehlová metoda, výpar, výparová fronta, intenzita výparu, výparové fáze, fluorescein sodný, uranin, wetcup

Summary

Evaporation from porous media affects many natural processes. In my work, I focused on the second evaporation phase, calculating the evaporation rate using Fick's law based on air temperature and air humidity above the surface, the water-vapor permeability of the porous material, and the evaporation front depth below the surface. To determine this depth, I used the uranine-probe method using sodium fluorescein. The work aimed to calculate the evaporation rate using Fick's law and values of the evaporation front depth determined by the uranine-probe, for 6 sandy soil samples and 3 types of rocks. A sub-goal was to verify the applicability of the uranine-probe for determining the depth of the evaporation front in sandy soil and in 12 different rock samples.

Results show successful determination of evaporation front depth for both sand and rocks. The uranine-probe method's accuracy averaged 2.0 mm for sand. The difference in the values determined by the uranine-probe method compared to another, independent method (detection of the evaporation front from the color change of the fluorescein solution) in the sand was on average 1.7 mm, but I did not study this for the rock samples. All evaporation experiments confirmed that the evaporation rate, both measured and calculated, decrease with increasing depth of the evaporation front. For sand, the calculated evaporation rates underestimate measurements by 83 % of the time, with a relative error of 23 % on average (difference between calculations and measurements averaging 0.12 mm/day). For rocks, this underestimation was in 100 % of cases, with an average relative error of 193 % (difference between calculations and measurements averaging 0.28 mm/day). This lower agreement in rocks is probably related to the reduced accuracy of uranine-probe method at low moisture in rocks. Fick's law and the uranine-probe method combination have a drawback in shallow zones below the surface, where measurement errors of the evaporation front depth significantly affect the calculated evaporation rates. The constant measurement error of the uranine-probe is reflected in the uncertainty of the calculated evaporation rate nonlinearly depending on the depth of the evaporation front.

Keywords: uranine-probe method, evaporation, vaporization plane, evaporation rate, evaporation phases, sodium fluorescein, uranine, wet cup

Obsah

1 Úvod	8
1.1 Cíle práce	10
2 Teoretická část.....	11
2.1 Prostorové uspořádání vlhkosti v porézním prostředí a výparové fáze	11
2.2 Popis difuze vodní páry pomocí Fickova zákona	13
2.3 Princip a využití jehlové metody	14
3 Metodika a studovaný materiál.....	17
3.1 Použité materiály.....	17
3.1.1 Použitý materiál pro měření výparové fronty v písku	17
3.1.2 Použité materiály pro měření výparové fronty v horninách	17
3.2 Příprava vzorků pro experimentální část.....	19
3.2.1 Příprava vzorků s pískem	19
3.2.2 Příprava horninových vzorků	21
3.3 Měření hloubky výparové fronty.....	23
3.3.1 Výparová fronta v písku	24
3.3.2 Výparová fronta v horninách.....	28
3.4 Měření intenzity výparu	30
3.5 Určení propustnosti střelečského písku pro vodní páru	30
3.6 Výpočet intenzity výparu	35
3.6.1 Vstupní data do výpočtů.....	36
4 Výsledky	37
4.1 Ověření jehlové metody pro písek.....	37
4.2 Ověření jehlové metody pro horniny.....	48
4.3 Měřená intenzita výparu vs. měřená hloubka výparové fronty v písku	49
4.4 Měřená intenzita výparu vs. měřená hloubka výparové fronty v horninách.....	53
4.5 Součinitel difuzní vodivosti	55
4.6 Srovnání měření a výpočtů intenzity výparu v písku.....	56
4.7 Srovnání měření a výpočtů intenzity výparu v horninách	64

5 Diskuse.....	70
5.1 Využití jehlové metody v písku a horninách.....	70
5.2 Součinitel difuzní vodivosti pro písek.....	70
5.3 Přesnost výpočtů intenzity výparu z písku	71
5.4 Přesnost výpočtů intenzity výparu z horninového prostředí.....	72
5.5 Vliv přesnosti měření hloubky výparové fronty na výpočty intenzity výparu.....	74
5.6 Doporučení pro budoucí výzkum.....	76
6 Závěr	78
Seznam použité literatury	80
Seznam obrázků.....	85
Seznam tabulek	87
Příloha	

1 Úvod

Výpar je významným členem hydrologické bilance. Ve své práci se zaměřuji na výpar z porézního prostředí, konkrétně ze zeminy a horniny. Výpar z porézního prostředí ovlivňuje celou řadu přírodních procesů, ať už hydrologických, klimatických, ale například i biologických a zvětrávacích (Huinink et al. 2004; Oki a Kanae 2006). Jmenovitě, v zemědělství ovlivňuje zásoby vody v půdě, a tím výnosy z pěstovaných rostlin (Lal a Shukla 2004), hraje roli při plánování zavlažovacích systémů (Shirgure 2012). V aridních oblastech ovlivňuje proces přenášení solí zpod povrchu na povrch půdy, čímž vznikají solné krusty či prachové vrstvy (Mees a Singer 2006), což může dále způsobovat prachové znečištění vedoucí k respiračním problémům (Gomez et al. 1992; Wiggs et al. 2003). V geotechnickém odvětví může výpar ovlivnit objem zeminy a tím narušit například stabilitu budov (Cui a Zornberg 2008; Corti et al. 2009; 2011), chodníků (Puppala et al. 2011), přehrad a dalších objektů (Song et al. 2018). Ve stavebnictví ovlivňuje vlhkost stavebních materiálů (Hall et al. 1984), dále může podporovat růst plísní a řas, které mohou negativně ovlivnit lidské zdraví (Viitanen et al. 2010) nebo díky snižování životnosti materiálů nenávratně poškodit historické budovy (Baker et al. 2007). V přírodě má významný vliv na zvětrávání přirozených výchozů hornin, protože ovlivňuje intenzitu a prostorové uspořádání mrazového a solného zvětrávání (Huinink et al. 2004; Mol a Viles 2013; Bruthans et al. 2018).

Velikost výparu z porézního prostředí je ovlivněna souhrnem faktorů, mezi které patří meteorologické jevy jako sluneční záření, rychlost větru, relativní vlhkost vzduchu, teplota (Yamanaka et al. 1997; Franzen a Peter 2004), dále hraje roli nehomogenita materiálu, reliéf povrchu nebo například hydrofobicita materiálu (Hall et al. 2012; Shokri et al. 2012). Aby mohl výpar probíhat, je potřeba přísun energie v podobě tepla, která je nutná k rozbití vazeb ve vodě při přeměně z kapalného na plynné skupenství (Hillel 2004). Další podmínkou je přísun vody do porézního prostředí, ať už z podzemní vody, nenasurované vrstvy či ze srážek (La Iglesia et al. 1997). Protože výpar z porézního prostředí často probíhá nikoliv jen na samotném povrchu, ale již pod jeho povrchem, je v takových případech potřeba ještě třetí podmínka – rozdíl parciálního tlaku vodní páry mezi místem podpovrchového výparu a okolní atmosférou. Tento rozdíl zajistí transport vodní páry skrz porézní prostředí ve formě difuze (Or et al. 2013).

V současnosti se pro měření výparu využívá tradičních metod, jako jsou lysimetry, ze kterých lze z váhových rozdílů zeminy určit množství odpařené vody za určitý čas (Manning 2016). Dále je pro měření výparu možné využít např. atmometrů (tzv. „ET Gauge“), což jsou trubice vyplněné porézním materiálem (klasicky keramickou destičkou, ale je možné ji nahradit např. půdou) a vodou, která je ponechána vypařovat se skrze definovanou plochu (Gavilán a Castillo-Llanque 2009). Dále se využívá tzv. výparových poklic („evaporation dome“, ASTM F2420-05 2011), které určují výpar z půdy podle nárůstu relativní vlhkosti vzduchu uvnitř parotěsné poklice připevněné k povrchu půdy. Pro výpočet výparu můžeme použít energetické bilanční metody, mezi něž patří například Bowenova metoda, která je založená na změnách teploty a vlhkosti vzduchu v různých výškách a umožňuje odhadovat latentní tok tepla a následně výpar (Bowen 1926). Dalšími používanými metodami jsou empirické rovnice, které pro výpočet výparu využívají meteorologická data, například sluneční záření, teplota, vlhkost vzduchu a rychlost větru, přičemž jednou z nich je Penman-Monteithova rovnice pro odhad evapotranspirace (Allan et al. 1998). Těchto modelů vznikla celá řada, avšak tyto metody pro stanovení výparu mohou být náročné na přípravu, zdlouhavé a drahé. Je proto vhodné hledat další dostupnější možnosti, jak výpar měřit a počítat.

V této diplomové práci využívám pro určení intenzity výparu z porézního prostředí tzv. jehlovou metodu (v angličtině „uranine-probe“; Weiss et al. 2020) v kombinaci s Fickovým zákonem popisujícím difuzi vodní páry (Fick 1855). Jehlová metoda využívá reakce barviva fluoresceinu sodného na kontaktu s kapalnou vodou, projevující se změnou jeho barvy. Díky tomu lze určit hloubku pod povrchem porézního materiálu, ve které dochází k výparu. Tuto hranici nazývám jako tzv. „výparovou frontu“. Ta po zaklesnutí pod povrch rozděluje prostředí na suchou přípovrchovou vrstvu, kde se voda pohybuje ve formě vodní páry, a kapilární vrstvu hlouběji pod povrchem, kde se kapalná voda pohybuje v kapilárách mezi zrny (Idso et al. 1974; Shokri et al. 2009). Fickův zákon lze při znalosti hloubky výparové fronty (respektive mocnosti suché vrstvy u povrchu) využít pro určení intenzity výparu z porézního prostředí (Or et al. 2013; Slavík et al. 2023). Dalšími parametry potřebnými ve Fickově zákoně jsou součinitel difuzní vodivosti studovaného materiálu a parciální tlak vodní páry na výparové frontě a u povrchu porézního prostředí (Or et al. 2013; Slavík et al. 2023). Tyto parametry lze poměrně snadno měřit.

Hloubka výparové fronty a Fickův zákon byly pro určení intenzity výparu použity již v předchozích studiích. Jmenovat mohu například výparové studie zaměřené na zeminy od Lehmana et al. (2008), Shokriho et al. (2008), Ora et al. (2013) a dalších, či výparové studie zaměřené na horniny od Slavíka et al. (2020; 2023) a Mareše et al. (2022). Pro předchozí studie platí, že i) hloubka výparové fronty byla určena jiným způsobem než jehlovou metodou, a/nebo ii) hloubka výparové fronty byla sice určena jehlovou metodou, ale vypočítané hodnoty intenzity výparu nebyly srovnány s přímým měřením intenzity výparu. Chybí tak přímé ověření, že kombinace jehlové metody a Fickova zákona vede k relevantním hodnotám vypočítané intenzity výparu ze zeminy či horniny.

1.1 Cíle práce

Cílem mé diplomové práce je pomocí kombinace jehlové metody a Fickova zákona vypočítat intenzitu výparu z několika vzorků písčité zeminy a hornin. Tyto výpočty následně srovnávám s přímým měřením intenzity výparu. Dílčím cílem je otestovat využití jehlové metody pro určení hloubky výparové fronty v nesoudržném materiálu (písčité zemině) a na dvanácti různých horninových vzorcích.

2 Teoretická část

2.1 Prostorové uspořádání vlhkosti v porézním prostředí a výparové fáze

Struktura porézního prostředí je tvořena pevnými částicemi a volnými prostory mezi nimi. Tyto prostory, póry, mohou být buď plně, či částečně vyplněny vodou (Fredlund a Rahardjo 1993). Porézní prostředí lze koncepčně rozdělit dle míry saturace na tři hlavní vrstvy (Bedient et al. 1994; Shokri et al. 2009):

1. Plně saturovaná vrstva (gravitační voda)
2. Kapilární vrstva
3. Suchá přípovrchová vrstva

V plně saturované vrstvě jsou všechny póry vyplněny vodou, lze vyjádřit proudění vody pomocí Darcyho zákona (formulováno H. Darcym v roce 1856), který má pro 1D horizontální proudění tento tvar rovnice (1) (Jandora 2005):

$$v = -K_s \times i \quad (1)$$

kde v je objemový tok [m/s], K_s je saturovaná hydraulická vodivost [m/s] a i je hydraulický gradient [-].

V kapilární vrstvě se kromě vzduchu vyskytuje voda, která je držena v kapilárách mezi zrny díky působení kapilárních a adsorpčních sil. Proudění vody v kapilární vrstvě popisuje Darcy-Buckinghamův zákon v rovnici (2) (Buckingham 1914):

$$v = -K(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} \quad (2)$$

kde oproti tvaru Darcyho zákona pro saturovanou vrstvu (rovnice 1) je v tomto případě (rovnice 2) hydraulická vodivost K [m/s] funkcí vlhkosti θ [-] a $\frac{\partial H}{\partial x}$ vyjadřuje změnu hydraulické výšky H [m] ve směru x [m].

Hydraulická výška H v Darcy-Buckinghamově zákoně (rovnice 2) se skládá ze dvou hlavních komponent, jimiž jsou h (tlaková výška) a z (geodetická výška). Tlaková výška h [m] nabývá v nesaturované vrstvě záporných hodnot, protože atmosférický tlak je větší než tlak vody v pórech nesaturované vrstvy. V literatuře se tlaková výška h

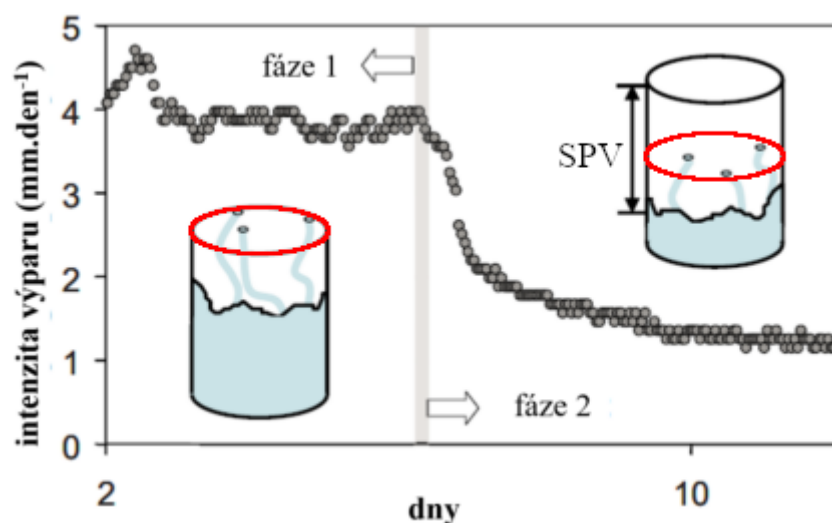
pro nesaturované prostředí často uvádí jako sací tlak p [kPa]. Sací tlak p je inverzní hodnotou kapilárního tlaku P_c [Pa] a v nesaturovaném prostředí nabývá kladných hodnot. Sací tlak udává, o kolik je kapilární tlak v pórech menší oproti atmosférickému tlaku a tuto hodnotu lze měřit pomocí tenzometru. Geodetická výška z [m] zde vyjadřuje vertikální vzdálenost od zvolené referenční úrovně (Tindall et al. 1999; Jandora 2005).

Ve volných pórech se v suché přípovrchové vrstvě vyskytuje vzduch, ale může být přítomna i kapalná voda. Ta se však v suché přípovrchové vrstvě pohybuje ve formě vodní páry. Tento tok vodní páry v suché přípovrchové vrstvě matematicky popisuje Fickův zákon viz rovnice (3) v kapitole 2.2. Hranice mezi kapilární vrstvou a suchou přípovrchovou vrstvou se nazývá „výparová fronta“ (Shokri et al. 2009).

Samotný proces výparu se v literatuře často rozděluje do třech fází. Ve fázi i) je výpar zpravidla nejvyšší a víceméně konstantní. Výpar probíhá na povrchu porézního prostředí, které je plně saturováno v celém svém profilu. V tento moment se čelo plně saturované vrstvy rovná úrovni výparové fronty a obě se nachází na povrchu porézního prostředí. Postupně se ve svrchní části plně saturované vrstvy tvoří kapilární vrstva a hranice mezi plně saturovanou a kapilární vrstvou se dostává pod povrch prostředí. Výparová fronta zůstává na povrchu porézního prostředí a je dotována vodou skrze kapiláry (Idso et al. 1974; Shokri et al. 2009). Ve druhé výparové fázi ii) dochází ke zvýšení sacího tlaku, který dosahuje kritických hodnot, tj. výparová fronta začíná zaklesávat pod povrch porézního prostředí a tím rozděluje prostředí na kapilární vrstvu a suchou přípovrchovou vrstvu. Ve třetí výparové fázi iii) dosahuje sací tlak v suché přípovrchové vrstvě vysokých hodnot a výparová fronta zaklesává stále hlouběji do porézního prostředí. Intenzita výparu dosahuje menších hodnot než v předchozích dvou fázích, rychlost výparu se snižuje a dochází k výparu reziduální vlhkosti (Idso et al. 1974; Hillel 2004; Song et al. 2013; Kumar a Arakeri 2018; Weiss et al. 2018).

Některé další studie (Lehmann et al. 2008; Shokri et al. 2008; 2009; Shokri a Or 2011; Or et al. 2013; Slavík et al. 2020; 2023) pracují i s koncepčním rozdělením výparu jen na dvě fáze viz obr. 1. Obecně lze říct, že dvoufázové rozdělení je velmi podobné jako u třífázového rozdělení, avšak třetí fáze, kdy se vypařuje reziduální vlhkost, se vynechává. Dvoufázové rozdělení na obr. 1 tedy rozděluje výparový proces na dvě fáze tak, že v první fázi i) se výparová fronta vyskytuje na povrchu porézního prostředí a je hydraulicky spojena sítí kapilár s kapalnou vodou hlouběji pod povrchem. Intenzita výparu v první

fázi dosahuje vysokých hodnot. Ve druhé výparové fázi ii) je výparová fronta již pod povrchem porézního prostředí, a povrch není hydraulicky spojen s výparovou frontou. Intenzita výparu ve druhé fázi. Výparová fronta zaklesává stále hlouběji pod povrch porézního prostředí a tím se mezi povrchem porézního prostředí a úrovní výparové fronty vytváří suchá přívodní vrstva, kde se voda pohybuje difúzí v plynné formě (Or et al. 2013; Lehmann et al. 2008). Vztah mezi hloubkou výparové fronty a intenzitou výparu je možné popsat mocninnou funkcí $y = ax^{-1}$, kde y je intenzita výparu, a je konstanta a x je hloubka výparové fronty. To znamená, že při zaklesnutí hloubky výparové fronty o jeden řád se sníží intenzita výparu o jeden řád (Slavík et al., 2020).



Obr. 1: Vývoj intenzity výparu dvoufázového rozdělení v jednotlivých časových fázích výparového experimentu pro zprvu satureovaný sloupec písku. SPV – suchá přívodní vrstva. Červená linie vyznačuje úroveň výparové fronty v příslušné fázi. (Převzato a upraveno z obr. 2.4 dle Slavíka 2019)

V diplomové práci rovněž pracuji s koncepčním rozdělením na dvě fáze. Pokud je výparová fronta na povrchu, hovořím o první výparové fázi i). Pokud je výparová fronta pod povrchem, hovořím o druhé výparové fázi ii).

2.2 Popis difuze vodní páry pomocí Fickova zákona

Během druhé fáze výparu ii) mezi výparovou frontou a povrchem prostředí v suché přívodní vrstvě proudí vodní pára dle gradientu parciálního tlaku vodní páry (Or et al. 2013; Idso et al. 1974). Tento tok vodní páry pohybující se suchou přívodní

vrstvou popisuje první Fickův zákon difuze v následující rovnici (3) (Fick 1855; Slavík 2019):

$$E = \delta \frac{P_1 - P_2}{L} \quad (3)$$

V této obecné rovnici (3), E vyjadřuje intenzitu výparu, δ je parametr vyjadřující schopnost materiálu tvořící porézní prostředí propouštět vodní páru, tj. součinitel difuzní vodivosti, P_1 a P_2 je parciální tlak vodní páry ve dvou zájmových bodech (v tomto případě na výparové frontě a na povrchu prostředí, ze kterého dochází k výparu) a L je hloubka výparové fronty pod povrchem prostředí. Zlomek v rovnici (3) tak vyjadřuje gradient parciálního tlaku v porézním prostředí.

Součinitel difuzní vodivosti δ lze získat měřením paropropustnosti sledovaného materiálu (více v kapitole 3.5). Pro rozdíl parciálních tlaků uvažujeme, že vlhkost na výparové frontě je 100 %, teplota je rovná okolní teplotě vzduchu. Vlhkost a teplotu vzduchu lze měřit dataloggerem. Změřením hloubky výparové fronty od povrchu prostředí získáme parametr L .

Fickův zákon byl použit pro výpočet intenzity výparu především pro sypké porézní materiály (Lehmann et al. 2008; Or et al. 2013) ale také pro horniny (Slavík et al. 2020; 2023).

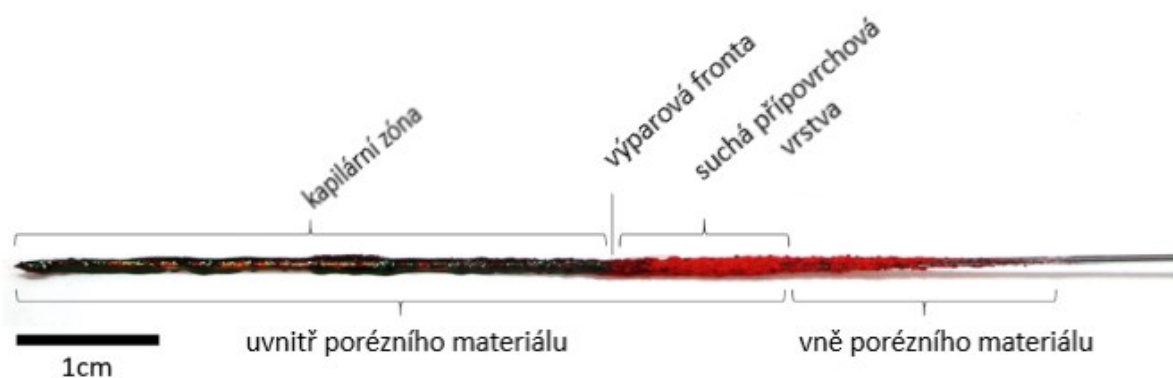
2.3 Princip a využití jehlové metody

Jehlová metoda je způsob, jak určovat hloubku výparové fronty v porézním prostředí. Jedním ze základních principů, proč jehlová metoda funguje, je, že využívá vlastností barviva fluoresceinu sodného (CAS 518-47-8), známého také pod názvem „uranin“, který se v hydrogeologii běžně využívá při stopovacích zkouškách (Buzády et al. 2006). Jeho hlavní vlastností je změna barvy v závislosti na jeho koncentraci ve vodném roztoku (Käss a Behrens 1998). V suchém stavu se tato látka nachází ve formě prášku, má oranžovou až temně červenou barvu a při kontaktu s vodou se snižující se koncentrací v roztoku postupně mění barvu od tmavě oranžovočervené, tmavě indigově zelené až nakonec po jasnou až svítivě zelenou. Ve druhé fázi výparu lze pomocí jehlové metody rozlišit suchá a vlhká místa v porézním prostředí díky barevným změnám uraninu, a tím

detekovat rozhraní mezi kapilární a suchou přípovrchovou vrstvou. (Mareš 2019; Weiss et al. 2018; 2020).

Jehlová metoda byla doposud testována na horninách (pískovec, arkóza, vápenec, prachovec, břidlice, ryolit, spraš, ofiolit, granit), stavebních materiálech (cihla, malta, beton) a okrajově v písku (křemenný písek) (Weiss et al. 2020; Slavík et al. 2023). Stanovení úrovně výparové fronty jehlovou metodou bylo využito pro výpočet intenzity výparu dle Fickova zákona v několika studiích (Slavík et al. 2020; 2023; Mareš et al. 2022), ale doposud nebyly tyto výpočty intenzity výparu ověřeny přímým měřením.





Jehlová metoda byla doposud nejvíce testována pro horniny. Do horniny se vyvrtá díra o malém průměru několika milimetrů a hloubky několika centimetrů. Do připravené díry se vsune připravená sonda (medicínská jehla) s uraninem a díky změně barvy uraninu lze měřit hloubku výparové fronty. V kapilární vrstvě se barvivo dostává do přímého kontaktu s kapkami vody drženými v kapilárách a dojde ke změně barvy. V suché přípovrchové vrstvě uranin barvu prakticky nezmění, protože se zde voda v této vrstvě vyskytuje především v plynné formě. Výsledkem je barevná červenooranžová a indigově zelená jasná hranice objevující se na uraninové sondě. Tato hranice je interpretována jako výparová fronta. Rozdíl v barvě fluoresceinu, který byl v kontaktu s kapilární vrstvou (tmavě zelená) a se suchou přípovrchovou vrstvou (červená), můžeme vidět na obr. 2. Uváděná přesnost jehlové metody je 2 mm dle Weisse et al. (2020).



Obr. 2: Uraninová sonda po vytažení z díry v horninovém prostředí. Zeleně zbarvená vrstva indikuje kapilární vrstvu a červeně zbarvená vrstva představuje suchou přípovrchovou vrstvu. Převzato a upraveno z obr. 7 v publikaci Weisse et al. (2020).

Uranin mění svou barvu nejen na přímém kontaktu s kapalnou fází vody, ale barevně reaguje i s vodní párou obsaženou ve vzduchu. Na obr. 3 je názorně zobrazeno, jak barvivo

reaguje na relativní vzdušnou vlhkost v čase t . Pokud je relativní vlhkost vzduchu vyšší než 73 % po dobu 20 minut a více, je určení výparové fronty obtížnější. Výparová fronta je v takovém případě interpretována jako hranice mezi zelenou oblastí s kapičkami vody (kapilární vrstva) a červenooranžovou oblastí (suchá přípovrchová vrstva) jak lze vidět na obr. 2 (Weiss et al., 2020).

	Připravené jehly k měření dle metodického postupu	Relativní vlhkost [%]	Čas (t) od startu experimentu [min]
a		73	20
b		74	40
c		77	92
d		78	146

Obr. 3: Různé zbarvení uraninové sondy v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu. Převzato a upraveno z Weiss et al. (2020, obr. 6).

Jehlová metoda má výhodu, že je levná, téměř nedestruktivní, poměrně snadná na přípravu a relativně rychlá pro změření hloubky výparové fronty pod povrchem materiálu (Weiss et al. 2020).

3 Metodika a studovaný materiál

V této kapitole nejprve popisují typy porézního prostředí (písek, horniny), které jsem použil pro měření hloubky výparové fronty a určení intenzity výparu, včetně způsobu jejich přípravy pro samotné měření. Následně popisují způsob měření hloubky výparové fronty v těchto materiálech a způsob, jakým jsem měřil intenzitu výparu. Taktéž popisují měření propustnosti materiálu pro vodní páru. Závěr této kapitoly je věnován popisu výpočtu intenzity výparu ze studovaného porézního prostředí.

3.1 Použité materiály

3.1.1 Použitý materiál pro měření výparové fronty v písku

Pro všechny experimenty, kde byl použit nesoudržný sypký materiál, jsem použil křemenný písek zakoupený od firmy Sklopísek Střeleč, a. s. Písek byl o deklarované velikosti zrn 0,5–1,25 mm. Jedná se o bílý sklářský písek těžný v teplickém souvrství v české křídové pánvi. Tento písek byl použit nejen pro samotné ověření měření výparové fronty v nesoudržném materiálu, ale také pro měření intenzity výparu a pro zjištění součinitele difuzní vodivosti (tabulka 1 a 2).

3.1.2 Použité materiály pro měření výparové fronty v horninách

V experimentální části jsem použil celkově 12 různých litologií z různých oblastí (tabulka 1 a 2).

Tabulka 1: Souhrnný přehled použitých materiálů pro měření výparové fronty, jejich rozměry, váha a využití

*Využití: Vzorek byl využit pro měření hloubky VF – výparové fronty, E – intenzity výparu, δ – součinitel difuzní vodivosti.

**Rozměry: Pro krychlové vzorky uvedeno $v \times \check{s} \times h$ [cm]. Pro válcové vzorky uvedeno $v \times \emptyset$ (\emptyset = průměr) [cm].

#	Zkratka	Pracovní název materiálu	Suchá hmotnost [g]	Rozměry** ($v \times \check{s} \times h$) nebo ($v \times \emptyset$) [cm]	Využití*
1	PÚ	11 (Podhorní Újezd)	119,7	3,9×4,2×4,2	VF, E
2	RU	89 (lom Ruprechtice)	173,0	4,3×4,2×4,2	VF
3	JOR	620R (Petra Jordan)	179,6	4,3×4,2×4,3	VF, E
4	COL1	44 (GIN2)	122,0	3,7×4,1×4,0	VF
5	PLZ	22 (Plzeň)	148,2	4,1×4,2×4,2	VF
6	ČP	1 (červená poloha, Střeleč)	111,9	4,2×4,2×3,3	VF
7	COL2	41 (GIN1)	133,5	4,1×3,8×4,0	VF
8	MŠ	37 (Mšeno)	101,5	4,2×3,8×4,2	VF
9	SR	Srbsko (Český ráj)	175,3	4,0 × (\emptyset 5,5)	VF, E
10	JE	Jestřebice	204,7	2,1 × (\emptyset 6,8)	VF
11	NA	38/11 (Navajo sandstone)	207,2	4,0 × (\emptyset 5,9)	VF
12	KRA	K16 (Kralupy)	531,1	6,7 × (\emptyset 7,0)	VF
13	Písek	Písek	-	-	VF, E, δ

Tabulka 2: Souhrnný přehled použitých typů materiálů pro měření výparové fronty a jejich původ

Zkratka	Pracovní název materiálu	Typ materiálu	Souvrství
PÚ	11 (Podhorní Újezd)	Křemenný pískovec	ČR, Perucko-korycanské souvrství
RU	89 (lom Ruprechtice)	Žula	ČR, Lužická (západosudetská)
JOR	620R (Petra Jordan)	Pískovec	Jordánsko, Umm Ishrin souvrství
COL1	44 (GIN2)	Pískovec (marinní)	Colorado (USA), Morrison
PLZ	22 (Plzeň)	Arkózový pískovec	ČR, Kladenské souvrství
ČP	1 (červená poloha, Střeleč)	Pískovec	ČR, Teplické souvrství
COL2	41 (GIN1)	Pískovec (fluviální)	Colorado (USA), Dakota souvrství
MŠ	37 (Mšeno)	Jemnozrný pískovec	ČR, Jizerské souvrství
SR	Srbsko (Český ráj)	Křemenný pískovec	ČR, Teplické souvrství
JE	Jestřebice	Křemenný pískovec	ČR, Jizerské souvrství
NA	38/11 (Navajo sandstone)	Jemnozrný pískovec	Utah (USA), Navajo souvrství
KRA	K16 (Kralupy)	Arkóza	ČR, Kladenské souvrství
Písek	Písek (Střeleč)	Křemenný písek	ČR, Teplické souvrství

3.2 Příprava vzorků pro experimentální část

3.2.1 Příprava vzorků s pískem

Písek jsem nasypal do válcových nádob s uzavřenou podstavou a otevřeným vrchem viz obr. 4. U těchto experimentů vhodně posloužily především průhledné kádinky. Kádinky měly výšku 9,5 cm a vnitřní průměr 6,5 cm. U kádinek bylo potřeba vyrovnat jejich ústí tak, aby byl zachován válcový tvar nádob. Tuto úpravu jsem provedl pomocí papíru, který jsem umístil v okolí ústí kádinek a papír přelepil lepicí páskou, aby nedocházelo k saturaci papíru vodou (lze vidět např. na obr. 10 a obr. 12). Tím jsem zabránil nechtěnému vniku kapalně vody do papíru a následnému postrannímu odpařování vody. V experimentech s pískem jsem kromě kádinek použil i válcovou neprůhlednou šedou polypropylenovou (PP) nádobu. Ta měla přilepenou spodní podstavu epoxidovým nepropustným lepidlem. Tato plastová nádoba měla vnitřní výšku 9,5 cm a vnitřní průměr 7 cm.



Obr. 4: Ukázka nádob z přípravy experimentu 5 a 6 s nesoudržným materiálem. Vlevo byla použita skleněná kádinka s roztokem uraninu. Vpravo byla použita polypropylenová nádoba bez roztoku uraninu. Na skleněné lahvi za nádobami je připevněno čidlo pro snímání teploty a vlhkosti vzduchu v okolí povrchu nádob.

U obou typů nádob jsem postupoval obdobně a vyplnil je pískem. Způsob nasypání písku se pro jednotlivé experimenty lišil viz tabulka 4. Pro experimenty 5 a 6 jsem nasypal písek

pomocí kovového kužele (trychtýře) dle normy DIN 18126 (vydání: 1996-11) (popis práce s trychtýřem společně s obrázky se dále nachází v kapitole 3.5). Pro rovnoměrné nasypání písku v celém vertikálním profilu nádoby jsem postupně zdvíhal kužel naplněný pískem, aby písek padal na povrch stále ze stejné výšky. Přebytečný písek nasypaný nad okrajem nádoby jsem sejmul předmětem s rovnou hranou (pravítko apod.) do roviny, podle okraje nádoby. Tento způsob nasypání písku dále označuji jako typ 1. Druhý způsob nasypání písku označuji jako typ 2 a provedl jsem jej bez použití kužele, a to pro experimenty 1 až 4. Písek jsem nasypal rovnou z pytle, ve kterém byl písek uskladněn. Přebytečný písek na povrchu jsem opět zarovnal pravítkem podle okraje dané nádoby. U způsobu nasypání typu 2 je větší pravděpodobnost, že byl písek nasypán více nerovnoměrně oproti typu 1, který využíval normované metody pro rovnoměrné nasypání písku.

Nádoby zaplněné pískem jsem saturoval tekutinou. Pro tři experimenty (experimenty 1, 4 a 6 viz tabulka 4) jsem vzorky saturoval pouze destilovanou vodou. Saturaci jsem provedl pomocí opakované injektaže za pomoci lékařské injekční stříkačky o objemu 25 ml a 12 cm dlouhé lékařské injekční nerezové jehly. Vodu jsem injektoval jehlou od spodní podstavy nádoby, aby docházelo k postupnému vytlačování vzduchu a zabránilo se tak nechtěnému vzniku vzdušných bublin. Postupná saturace jedné nádoby trvala přibližně 1 hodinu.

Pro další tři experimenty (experimenty 2, 3 a 5 viz tabulka 4) jsem vzorky saturoval roztokem uraninu o koncentraci 1,3 g/l, vycházel jsem z kapitoly 2.3.1.6 v publikaci Weiss et al. 2018. Roztok byl připraven rozpouštěním příslušného množství prášku uraninu v destilované vodě. Saturaci vzorků jsem provedl rovněž injekcemi za pomoci lékařské injekční stříkačky a nerezové jehly opět od spodní podstavy nádoby, aby byl vzduch vytlačen odspodu nádoby směrem k povrchu pryč. Vzorky s roztokem uraninu měly po saturaci charakteristickou svítivě zelenou barvu. Roztok uraninu byl použit, protože v místech výparu se zvyšuje koncentrace roztoku, a tím dochází ke změně barvy barviva do tmavší oranžové, jak je popsáno v kapitole 2.3. Díky barevné změně uraninu lze určit výparovou frontu v porézním prostředí, jak bylo opakovaně ukázáno např. studiemi Weisse et al. (2018) a Kumara a Arakeriho (2018) pro soudržné i nesoudržné materiály. U těchto experimentů s roztokem (tabulka 4) jsem zvolil průhledné kádinky, abych mohl pozorovat změnu barvy uraninu během výparu, jak lze vidět např. na obr. 4 a obr. 12.

Po saturaci byly vzorky připraveny k měření. Vzorky jsem vážil na váze s přesností 0,1 g (typ váhy: P221, model: 2106-2k-047).

Tabulka 3: Typy použitých nádob pro nesoudržný materiál

#	Pracovní označení	Typ nádoby	Materiál	Hmotnost prázdné nádoby [g]	Rozměry [cm] ($\varnothing \times v$)
1	V1	Kádinka	Sklo (čiré)	101,1	6,5 × 9,5
2	V2	Kádinka	Sklo (čiré)	89,8	6,5 × 9,5
3	Šedá	Šedivá válcová nádoba	Polypropylen	63,3	7,0 × 9,5

Tabulka 4: Souhrn všech experimentů provedených na nesoudržném materiálu

*Typ 1 a **Typ 2 informuje o způsobu přípravy vzorku popsany v této kapitole 3.2.1

Číslo experimentu	Použitá nádoba	Materiál	Použit roztok uraninu	Použit normovaný kužel
1	V1	Křemenný písek (Střeleč)	Ne	Ne (Typ 2**)
2	V2	Křemenný písek (Střeleč)	Ano	Ne (Typ 2)
3	V1	Křemenný písek (Střeleč)	Ano	Ne (Typ 2)
4	V2	Křemenný písek (Střeleč)	Ne	Ne (Typ 2)
5	V1	Křemenný písek (Střeleč)	Ano	Ano (Typ 1*)
6	Šedá	Křemenný písek (Střeleč)	Ne	Ano (Typ 1)

3.2.2 Příprava horninových vzorků

K dispozici jsem měl vzorky hornin (obr. 5) ve tvaru válce či ostrohranného šestistěnu (tvar blízký krychli či kvádru). Tyto vzorky byly buď odebrány přímo z přirozeného horninového výchozu (vzorky ve tvaru válce) nebo byly připraveny na řezačce v laboratoři (vzorky ve tvaru šestistěnu). Válcové vzorky jsem pomocí epoxidového lepidla upravil tak, aby pouze jejich svrchní podstava umožňovala výpar (zbylý povrch byl nepropustně zalepený epoxidem). Válcové vzorky měly průměr 5 – 7 cm a výšku v 2 – 7 cm (tabulka 1). Vzorky JE, NA a KRA (tabulka 1) jsem obdržel od svého školitele a byly již vsazeny a zalepeny po obvodu do nepropustné polypropylenové válcové skruže. U těchto vzorků pak stačilo zalepit epoxidem pouze spodní podstavu. Všechny šestistěnné vzorky jsem obalil v epoxidovém lepidle ze všech stran kromě svrchní strany. Šestistěnné vzorky měly hranu o délce 3 – 4 cm (tabulka 1). Cílem těchto úprav bylo, aby budoucí výpar během experimentu probíhal pouze z jedné strany vzorku o známé ploše.



Obr. 5: Přehled dvanácti horninových vzorků použitých pro měření hloubky výparové fronty a intenzity výparu. K výparu docházelo pouze jejich svrchní podstavou. Díra uprostřed každého vzorku sloužila pro vkládání uraninové sondy do vzorku.

Po zaschnutí epoxidového lepidla jsem do svrchní podstavy vzorků vyvrtal díry ruční vrtačkou s vrtákem o průměru 2 mm. Vyvrtané díry jsem situoval doprostřed nezalepené strany každého vzorku. Jednotlivé vyvrtané díry byly rozdílně hluboké, ale všechny zasahovaly zhruba do 3/4 až 4/5 vertikálního profilu daného vzorku.

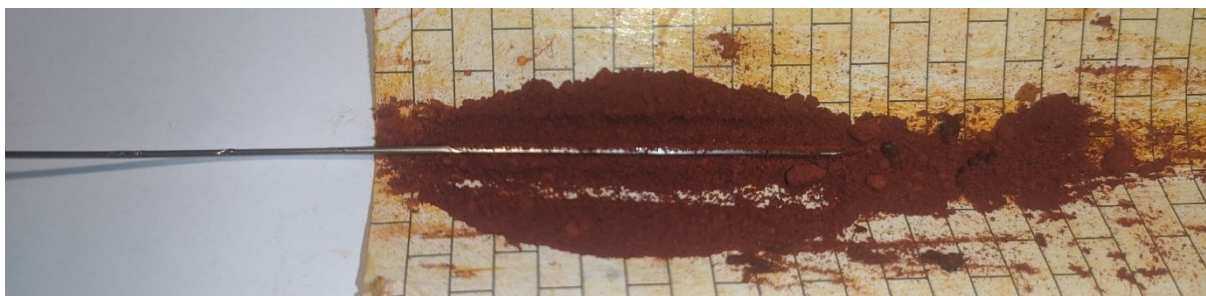
Vzorky jsem poté ponořil do nádoby s destilovanou vodou a nechal saturovat po dobu 24 hodin. Následně jsem vzorky vyjmul z nádoby a byly připraveny k měření. Vzorky jsem zvažil na váze s přesností 0,1 g (typ: P221, model: 2106-2k-047).

3.3 Měření hloubky výparové fronty

Hloubku výparové fronty jsem měřil jehlovou metodou a v některých případech pomocí roztoku uraninu (tabulka 4). Při přípravě jehlových sond pro měření hloubky výparové fronty jsem postupoval podle postupu navrženého Weissem et al. 2020. Využil jsem ověřený typ medicínských jehel z nerezové oceli, které jsou svými vlastnostmi pro tento účel vhodnější oproti sondám ze dřeva, hliníku či polypropylenu. Jehly z nerezové oceli byly zakoupeny ve zdravotnických potřebách a v lékárně. Jehly měly tloušťku 0,8 mm a délku 12 cm. Výběr lepidla jsem také zvolil podle ověřeného postupu dle Weisse et al. 2020. Jehlu jsem obalil v polyuretanovém lepidlu (obr. 6) známém pod komerčním názvem „UHU All Purpose“ značky „Z-Trade“, běžně dostupném v domácích potřebách. Práškové barvivo, uranin (fluorescein sodný, CAS 518-47-8), jsem nasypal na desku z tvrdého papíru a povrch sondy s čerstvě naneseným lepidlem jsem za mírného přitlaku rovnoměrně obalil v barvivu nasypaném na papírové desce (obr. 7). Po vyjmutí jehly z barviva na obr. 8, jsem sondu nechal zaschnout po dobu 10 minut. Po 10 minutách zaschlé lepidlo na sondě zmenšilo objem a v kombinaci s naneseným uraninem si sonda zachovala průměr 1 mm, okrajově v některých případech až 1,3 mm. Sonda by neměla zasychat na vzduchu o relativní vlhkosti větší než 73 %, protože při této vlhkosti již uranin začíná měnit svou barvu viz kapitola 2.3 (Weiss et al. 2020). Při takové vzdušné vlhkosti připravovaná sonda začala během zasychání pozvolna měnit svou barvu a pro přesné stanovení výparové fronty bylo potřeba připravit novou sondu.



Obr. 6: Medicínská jehla s naneseným polyuretanovým lepidlem připravena k obalení do uraninu.



Obr. 7: Jehla s naneseným lepidlem obalovaná v práškovém uraninu nasypaném na desce z tvrdého papíru.



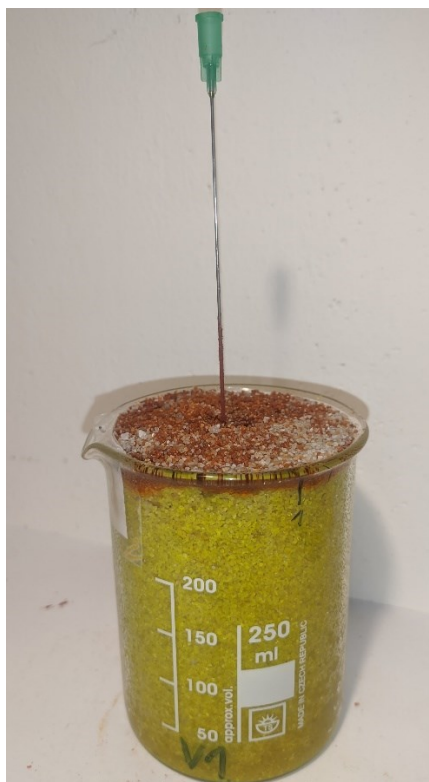
Obr. 8: Ukázka připravené jehly s barvivem uraninu, který se k jehle nalepil díky polyuretanovému lepidlu.

3.3.1 Výparová fronta v písku

Měření výparové fronty v písku jsem u všech experimentů provedl pomocí jehlové metody zhruba v intervalech 24 hodin. U experimentů 2, 3 a 5 (tabulka 4), kde byl použit i roztok uraninu, jsem měřil hloubku výparové fronty i odečtem z průhledného skla od povrchu sledovaného materiálu. Naměřené hodnoty jehlovou metodou a odečtem barevné indikace roztoku uraninu jsem následně porovnal.

V případě měření výparové fronty jehlovou metodou, jsem připravenou jehlu s uraninem (popis přípravy v předchozí kapitole 3.3) zapíchl do sledované kádinky s pískem. Pro experimenty 1–2 jsem vkládal jednu jehlu doprostřed kádinky a měřil jednu hodnotu hloubky výparové fronty, jak lze vidět na obr. 9 a obr. 10. Pro experimenty 3–4 (tabulka 4), jsem vkládal dvě jehly, jednu po druhé, do vždy stejných pozic $1/4$ a $3/4$ průměru kádinky. Měl jsem tedy pro každé dílčí měření dvě hodnoty hloubky výparové fronty. Jehlu jsem zapíchl do mnou odhadované hloubky, kde jsem bral v potaz poslední naměřenou hloubku a také časový průběh experimentu. Na začátku měření stačilo strčit jehlu pouze

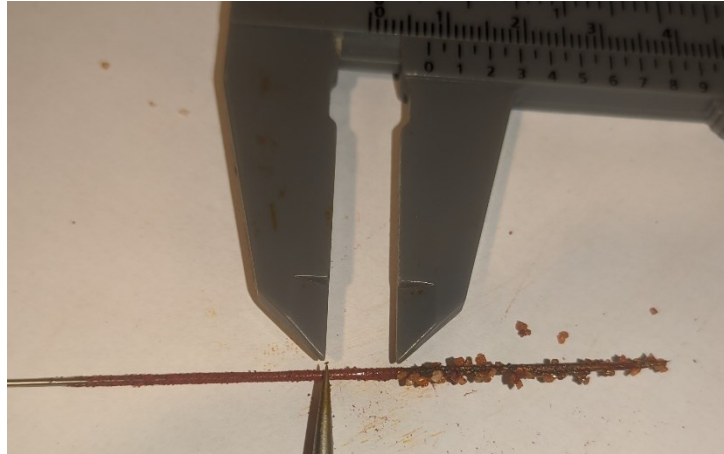
pár cm pod povrch, naopak ke konci měření jsem již jehlu vkládal do celého vzorku. V případech, kdy bych neznal kontext měření nebo neznal jeho průběh, vkládal bych jehlu rovnou do celého profilu vzorku. Jehlu bylo potřeba ponechat ve studovaném prostředí zhruba jednu minutu pro první 2 cm hloubky výparové fronty. S rostoucí hloubkou jsem jehlu nechal ve sledovaném prostředí o trochu déle až čtyři minuty. Na tyto časy jsem přišel ihned v rané fázi měření, kdy jsem jehlu nechal v prostředí příliš dlouho a uranin na jehle pod povrchem změnil barvu i ve výrazně nižší hloubce, přestože měření hloubky výparové fronty podle roztoku bylo zřetelně více než 0,5 cm pod povrchem. Opakovaným vytahováním a zasunováním jehly jsem stanovil takový vhodný čas, aby jehla ukázala zřetelnou hranici a nebyla v prostředí příliš dlouho. Ke konci měření, kdy jsem již vkládal jehlu do celého profilu nádoby, jsem jehlu nechával v písku až čtyři minuty. Pokud jehla byla v písku příliš dlouho, např. deset minut a více, voda měla tendenci vzlínat po jehle a také se na jehlu nalepilo velké množství písku, které znemožnilo detekovat barevnou hranici výparové fronty. Pro vyjmutí jehly z písku jsem používal ostrou pinzetu, kterou jsem přiložil těsně k povrchu písku a kolmo na jehlu (viz obr. 10 vlevo). Během vyjímání jehly z písku bylo třeba postupovat opatrně, aby nedošlo k příliš velkému rozrušení písku nebo vysypání písku ven z kádinky, což by změnilo hmotnost vzorku. Vyjmutá sonda na sobě měla ve většině měření nalepených i několik zrn písku, především v rané fázi měření, kdy byla vlhkost pod výparovou frontou vyšší. S rostoucí hloubkou výparové fronty tento jev klesal. Obvykle nalepených zrn nebylo velké množství a nezakrývala barevné rozhraní na jehle, takže to nebránilo v detekci výparové fronty. Následně jsem posuvným měřítkem měřil tu část jehly, kterou jsem držel pinzetou až po barevné rozhraní na jehle obr. 11, které vytvořila výparová fronta. Naměřenou hodnotu jsem zaznamenal.



Obr. 9: Ukázka uraninové sondy vložené doprostřed kádinky s křemenným pískem a roztokem uraninu.



Obr. 10: Vlevo je ukázka vložené jehlové sondy do kádinky s pískem. K připravené jehlové sondě k vyjmutí je těsně k povrchu přiložená pinzeta. Vpravo je již pinzetou vyjmutá jehlová sonda s naměřenou výparovou frontou.



Obr. 11: Ukázka měření hloubky výparové fronty posuvným měřítkem z pískového experimentu. Na jehle si lze povšimnout i pískových zrn, které se na sondu nalepily díky zvýšené vlhkosti v prostředí pod úrovní výparové fronty.

V průběhu zaklesávání výparové fronty se prostředí sledovaných vzorků, kde byl použit roztok uraninu, rozdělilo na dvě barevně rozlišitelné části, jak lze vidět na obr. 12. Barevné rozdělení zřetelně prezentovalo vlhkostní uspořádání tak, jak popisuje kapitola 2.1 a toto barevné rozdělení zřetelně indikovalo hloubku výparové fronty dle metodiky Weisse et al. (2018). Na obr. 12 lze v levé kádince vidět výparovou frontu na povrchu porézního prostředí v první fázi výparu i). Ve druhé fázi ii) se výparová fronta nachází zhruba v polovině kádinky. V praxi jsem tedy měřil mocnost suché přívrchové vrstvy, která odpovídá hloubce výparové fronty. Měření jsem prováděl posuvným měřítkem od povrchu vzorku po barevné rozhraní z vnější strany kádinky, a to vždy na dvou protilehlých částech kádinky pro všechny experimenty s roztokem (2, 3 a 5). Měření výparové fronty a tím i celý experiment jsem ukončil, když se po dvou po sobě jdoucích měřeních neobjevilo žádné barevné rozhraní na jehle.



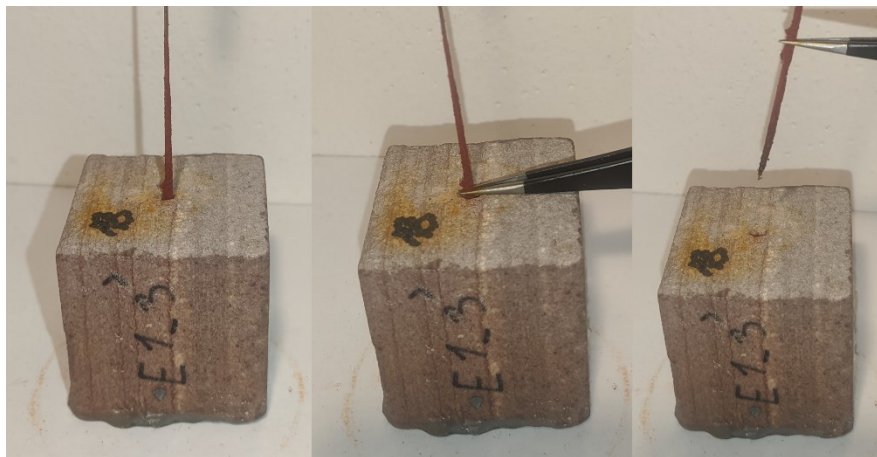
Obr. 12: Ukázka dvoufázového rozdělení z průběhu experimentu č. 5 s použitím roztoku fluoresceinu sodného. Červená přerušovaná linie vyznačuje úroveň výparové fronty v příslušné fázi. SPV – vyznačuje oblast suché přípovrchové vrstvy. Bílý papír přelepený průhlednou izolepou slouží k zabránění nerovnoměrnému postrannímu vypařování v okolí ústí kádinky.

3.3.2 Výparová fronta v horninách

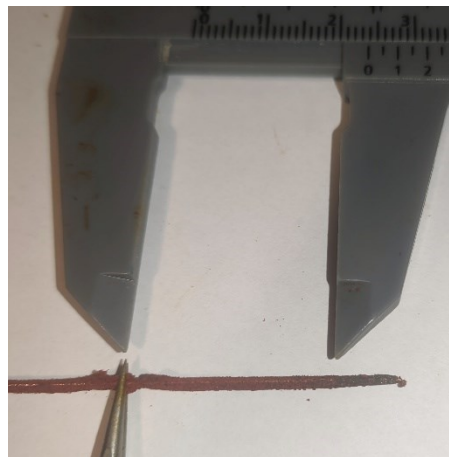
U horninových vzorků jsem hloubku výparové fronty měřil pouze pomocí jehlové metody bez uraninového roztoku. Zpočátku jsem měřil v intervalech zhruba jednou za 9 hodin, protože výpar byl velký a bylo potřeba zachytit okamžik, kdy dojde k přechodu z první i) do druhé ii) výparové fáze. Po přechodu do druhé výparové fáze ii) jsem interval měření prodloužil na 24 hodin.

Při měření hloubky výparové fronty jehlovou metodou pro horninové vzorky jsem postupoval podobně jako u měření výparové fronty v písku v předchozí kapitole 3.3.1 a dle metodiky Weisse et al. (2020) pro horninové prostředí. Připravenou jehlu s uraninem (viz postup přípravy v kapitole 3.3) jsem vložil do vyvrtané díry v horninového vzorku (viz obr. 13 vlevo). Jehlu jsem nechal ve vzorcích po dobu pěti minut napříč všemi měřeními. V případě ponechání jehly ve vzorku déle než deset minut, měla vlhkost tendenci po jehle vzlínat. Po uplynuté době jsem jehlu vyjmul pinzetou přiloženou kolmo k jehle a těsně u povrchu vzorku (viz obr. 13 uprostřed). Po vyjmutí jehly (obr. 13 vpravo), jsem následně posuvným měřítkem změřil část jehly mezi pinzetou

a barevným rozhraním vzorku (obr. 14; detailnější obrázky barevného rozhraní z měření hloubky výparové fronty jsou také v kapitole 4.1 obr. 23 a obr. 24). Po každém jednotlivém měření bylo potřeba vždy zakrýt vyvrtanou díru, aby nedocházelo k výparu skrze plochu uvnitř vyvrtané díry. Proto jsem po každém měření umístil do díry každého vzorku srolovaný kus nepropustné potravinářské fólie. Měření výparové fronty a tím i celý experiment jsem ukončil, když se po dvou po sobě jdoucích měřeních neobjevilo žádné barevné rozhraní na jehle.



Obr. 13: Ukázka měření výparové fronty v horninovém vzorku JOR. Vlevo je vložena jehla s uraninem do vyvrtané díry vzorku. Uprostřed je vložena jehlová sonda připravená pro vyjmutí ze vzorku pinzetou přiloženou těsně k povrchu vzorku. Napravo je již pinzetou vyjmutá jehlová sonda s naměřenou výparovou frontou.



Obr. 14: Ukázka měření hloubky výparové fronty posuvným měřítkem od pinzety k barevnému rozhraní na vyjmuté jehle ze vzorku JOR.

3.4 Měření intenzity výparu

Pro měření intenzity výparu jsem využil střelečský písek i horninové vzorky z měření výparové fronty. Horninové vzorky jsem vybral ve spolupráci se školitelem a to takové, u kterých byly již k dispozici potřebné parametry (jmenovitě součinitel difuzní vodivosti viz kapitola 3.5 a 3.6). Konkrétně šlo o horninové vzorky SR, JOR a PÚ viz tabulka 1. Postup přípravy horninových vzorků pro měření intenzity výparu je obdobný jako je pro přípravu vzorků pro měření výparové fronty (kapitola 3.2.2). Tyto vzorky jsem saturoval v nádobě s destilovanou vodou po dobu 24 hodin. Voda se z horninových vzorků mohla vypařovat opět pouze skrze horní podstavu. Všechny ostatní strany a spodní podstavy vzorků jsem obalil epoxidem. Na spodní podstavě a bočních stranách všech vzorků tedy nebyl žádný přítok vody ani skrz tyto hranice nemohlo docházet k výparu vody z horninového prostředí.

U přípravy vzorků pro písek jsem postupoval obdobně jako u přípravy pro měření výparové fronty (kapitola 3.2.1), a to včetně způsobu nasypání písku do nádob. Vzorky jsem saturoval odspodu podstavy lékařskou jehlou a veškerý výpar pak probíhal pouze svrchní podstavou.

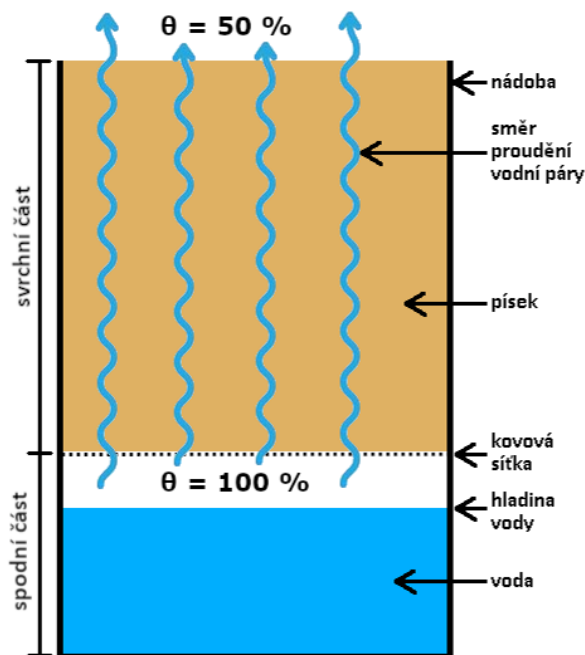
Měřil jsem váhový úbytek jednotlivých vzorků. Měření u všech vzorků (písek i horniny) probíhala až do výparu k reziduální vlhkosti, kdy se váha všech vzorků přestala měnit o více než 0,1 g za 24 hodin. Po celou dobu všech měření byla zaznamenávána teplota a relativní vlhkost vzduchu každých 5 minut pomocí čidla (dataloggeru) typu DL-121TH značky Voltcraft. Měření probíhala v uzavřené místnosti s příležitostným odvětráváním.

3.5 Určení propustnosti střelečského písku pro vodní páru

Pro výpočet intenzity výparu, popisovaný v následující kapitole 3.6, je zapotřebí znát parametr charakterizující schopnost materiálu transportovat vodní páru. Tím parametrem je součinitel difuzní vodivosti. Pro horninové vzorky SR, JOR a PÚ jsem obdržel hodnoty součinitele difuzní vodivosti od školitele; tyto hodnoty byly naměřeny v předchozích studiích (Slavík et al. 2023 a nepublikovaná data). Pro studovaný písek bylo potřeba hodnotu součinitele difuzní vodivosti změřit.

Vzorky střelečského křemenného písku jsem připravil do polypropylenové nádoby, která byla rozdělena na svrchní a spodní část. Spodní část nádoby byla v podstatě válcová miska s uzavřenou spodní podstavou a tvořila rezervoár na vodu. Svrchní část byl jen válec bez podstav. Obě části nádoby měly stejný vnitřní i vnější průměr. Tyto dvě části nádoby jsem mezi sebou oddělil kovovou sítkou o průměru ok menších než 0,5 mm, aby skrze sítku nepropadávala zrna zvoleného písku (kapitola 3.1.1), ale aby síтка propouštěla vodní páru. Tuto kovovou sítku jsem k svrchní válcové části přilepil po celém obvodu svrchní části nádoby pomocí epoxidového lepidla tak, aby se nehýbala a pevně po obvodu držela. Následně jsem spodní část připravené nádoby připevnil pomocí elektrikářské izolační pásky k svrchní části spolu se sítkou tak, aby síтка byla mezi oběma těmito částmi a elektrikářská páska izolovala a pevně držela tento spoj. Tím jsem docílil, aby vodní pára z rezervoáru proudila pouze skrze horní část nádoby a zabránil jsem tak nechtěnému úniku vodní páry skrze spoj po obvodu nádoby, což by vedlo k nepřesným výsledkům.

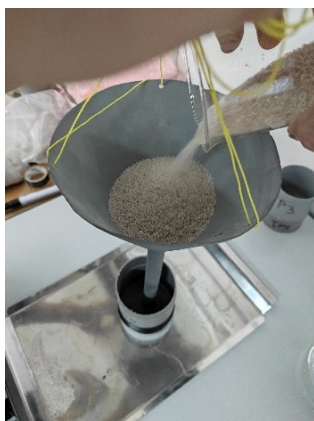
Do misky jsem poté nalil destilovanou vodu, a to pouze takové množství, aby hladina vody nepřišla do kontaktu se sítkou a aby nepřetekla do svrchní části nádoby. Svrchní část nádoby jsem až po okraj dosypal pískem třemi různými způsoby nasypání pro čtyři vzorky (tabulka 5). Destilovaná voda ve spodní části nádoby tedy nebyla v přímém kontaktu se vzorkem písku a jen tvořila rezervoár vlhkosti, respektive vodní páry. Zajišťovala tak pod vzorkem písku prostředí s relativní vlhkostí vzduchu 100 % (obr. 15) Toto schéma nádoby dále nazývám wetcup a v praxi jej lze vidět na obr. 16.



Obr. 15: Schématický náčrt připraveného wetcupu. Nádoba rozdělená na dvě části kovovou sítkou. Ve spodní části nádoby je rezervoár s vodou, který zajišťuje relativní vlhkost vzduchu 100 %. V horní části nádoby je nasypán písek. Vodní pára se pohybuje skrze celý profil horní části nádoby s pískem. Wetcup byl umístěný do klimakomory zajišťující relativní vlhkost vzduchu 50 %.

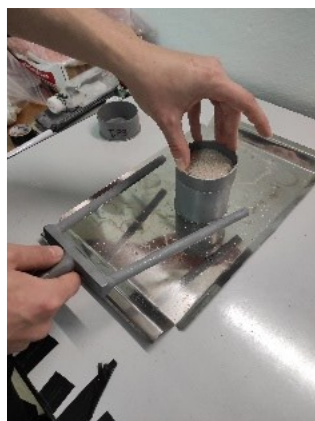
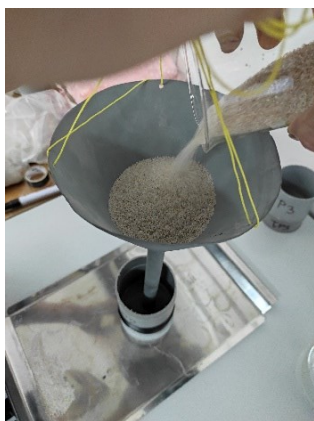


Obr. 16: Wetcup TP1 s křemenným pískem. Ukázka prvního vytvořeného prototypu wetcupu s nasypaným pískem. Zde se jedná pouze o ukázkou, písek v tomto případě není zcela dosypán až po okraj svrchní části nádoby. Ve spodní části se nachází rezervoár na vodu. Černá elektrikářská páska překrývá spoj spodní a svrchní části nádoby se sítkou. Pro případ měření byl takový wetcup dosypán pískem zcela po okraj.



Obr. 17, Obr. 18, Obr. 19: Ukázka nasypání písku do wetcupu TP2 za použití normovaného kužele dle normy DIN 18126. Do trychtýře se nejprve nasype písek. Zaplněný trychtýř pískem se poté postupně zvedá stálou rychlostí vzhůru a písek vyplňuje nádobu. Přebytečný písek je odstraněn a povrch wetcupu zarovnáno do roviny tak, aby povrch písku kopíroval okraj nádoby.

Takto jsem vytvořil dohromady čtyři wetcupy pro měření paropropustnosti písku. Písek jsem do svrchní části nasypal třemi různými způsoby (tabulka 5). Pro wetcup č. 1 - TP1 jsem písek do svrchní části nádoby volně nesytematicky nasypal (způsob nasypání odpovídá typu 2 pro přípravu experimentů s pískem v kapitole 3.2.1). Přebytečný písek na povrchu jsem pak sejmul pravítkem. Obdobně jako u nádoby TP1 jsem postupoval i s nasypáním písku do nádoby wetcupu č. 4 - TP4, kde způsob nasypání rovněž odpovídal typu 2. U nádoby wetcupu č. 2 - TP2 jsem písek do nádoby nasypal dle normy DIN 18126 pomocí normovaného trychtýře (odpovídá způsobu nasypání typ 1 viz kapitola 3.2.1), jak lze vidět na obr. 17-19. U tohoto wetcupu TP2 jsem na vrchní okraje nádoby wetcupu přidal skruž, která mi zbyla při přípravě wetcupu a posloužila tak pro rovnoměrné nasypání písku do wetcupu. Přebytečný písek jsem odstranil pomocí zmíněné skruže, která posloužila rovnou pro zarovnání písku do roviny podle svrchního okraje wetcupu obr. 19. Pro nádobu wetcupu č. 3 - TP3 jsem písek zhutnil ve dvou vrstvách dle normy DIN 18126, jak ukazuje obr. 20-22 a přebytečný materiál opět sejmul a zarovnal skruží jako pro nádobu TP2.



Obr. 20, Obr. 21, Obr. 22. Ukázka zhutnění písku do wetcupu TP3 dle normy DIN 18126. Do wetcupu se nejprve nasype písek normovaným trychtýřem. Pomocí kovové vidlice se klepe z boku do nádoby podle postupu. Přebytečný písek je odstraněn a povrch wetcupu zarovnan do roviny tak, aby povrch písku kopíroval okraj nádoby.

Všechny připravené wetcupy jsem umístil do klimakomory Memmert Climatic Test Chamber CTC 256 na Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR. Vzorky vážila v pravidelných denních intervalech po dobu 30 dní pracovnice AV ČR J. Schweigstilllová. V průběhu měření byla v klimakomoře kontrolována vlhkost a teplota vzduchu pomocí čidla DL-121TH značky Voltcraft. Teplota v klimakomoře byla nastavená na 20°C a relativní vlhkost vzduchu na 50 %.

Tabulka 5: Přehled vzorků písku a jeho způsobu nasypání do nádob pro měření paropropustnosti v klimakomoře

#	Pracovní označení	Materiál	Způsob nasypání	Poznámka
1	TP1	Křemenný písek (Střeleč)	Volně nasypaný	Způsob nasypání typ 2 (kapitola 3.2.1)
2	TP2	Křemenný písek (Střeleč)	Nasypaný trychtýřem podle normy DIN 18126	Způsob nasypání typ 1 (kapitola 3.2.1)
3	TP3	Křemenný písek (Střeleč)	Zhutnění podle normy DIN 18126	Zhutněno ve dvou vrstvách
4	TP4	Křemenný písek (Střeleč)	Volně nasypaný	Způsob nasypání typ 2 (kapitola 3.2.1)

Součinitel difuzní vodivosti δ jsem počítal následujícím způsobem. Z měření hmotnosti vzorků jsem zkontroloval, že vývoje úbytků hmotnosti jednotlivých vzorků v čase jsou lineární. Spočítal jsem celkový úbytek hmotnosti za uplynulý čas. Následně, díky znalosti

mocnosti a ploše vzorku, jsem spočítal součinitel difuzní vodivosti podle následující rovnice (4) (Slavík 2014):

$$\delta = \frac{\Delta m D}{S \tau \Delta P} \quad (4)$$

kde Δm je změna hmotnosti vzorku za daný čas, odpovídající množství páry pohybující se pískem ve svrchní části wetcupu [kg], D je mocnost svrchní části wetcupu [m], S představuje měrnou plochu [m²], τ je doba měření [s] a ΔP je rozdíl parciálních tlaků vodní páry pod pískem ve spodní části wetcupu a nad pískem ve svrchní části wetcupu. Součinitel difuzní vodivosti δ rozměrově odpovídá [s].

Ve spodní části nádoby wetcupu, kde se nacházel rezervoár s vodou, jsem uvažoval, že je zde přítomná 100 % vlhkost. Díky tomuto předpokladu jsem vypočítal parciální tlak vodní páry mezi spodní a svrchní částí wetcupu podle Tetensovy rovnice (5) (Tetens 1930):

$$P_{\text{sat}} = 0,61078 \frac{17,27 T}{T + 237,3} \exp \quad (5)$$

kde T je teplota [°C], P_{sat} je parciální tlak nasycené vodní páry [Pa].

Parciální tlak nad vzorkem, kdy vzduch není zcela nasycený vodními parami, jsem přepočítal podle relativní vlhkosti vzduchu z naměřených dat vlhkosti a teploty z měřicího čidla v klimakomoře. Jestliže relativní vlhkost vzduchu byla 50 %, parciální tlak byl následně 50 % ze saturované hodnoty parciálního tlaku.

3.6 Výpočet intenzity výparu

Výpočet intenzity výparu E vychází z Fickova zákona, který byl z obecné rovnice (3) upraven pro další výpočty. Do výsledné rovnice (6) (Slavík 2019) jsem dosazoval následující parametry: mocnost suché přívodové vrstvy L [m] resp. hloubku výparové fronty, součinitel difuzní vodivosti materiálu δ [s] a rozdíl parciálního tlaku vodních par ΔP [Pa] mezi úrovní výparové fronty a povrchem studovaného materiálu.

$$E = \frac{\delta \Delta P}{L} \quad (6)$$

Výslednou hodnotu intenzity výparu E , která dle rovnice (6) odpovídá rozměrově $[\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}]$ jsem přepočítal na jednotku $[\text{mm}/\text{den}]$, a to pomocí hustoty vody ($1 \text{ kg}/\text{dm}^3$) a definice milimetru srážek ($1 \text{ mm} = 1 \text{ l}/\text{m}^2$) (Slavík et al. 2023).

3.6.1 Vstupní data do výpočtů

Za hloubku výparové fronty L jsem dosadil do rovnice (6) skutečná naměřená data hloubky výparové fronty zjištěná jehlovou metodou. Protože mě vždy zajímá výpar za dané časové období, během kterého se hloubka výparové fronty mění, do výpočtů jsem vždy dosazoval průměrnou hodnotu dvou po sobě jdoucích měření hloubky výparové fronty.

Za paropropustnost δ jsem dosazoval naměřené hodnoty součinitele difuzní vodivosti z klimakomory, pro křemenný písek hodnoty stanovené mnou (kapitola 3.5) a pro jednotlivé horninové vzorky jsem hodnoty součinitele difuzní vodivosti obdržel od mého školitele, ale stanoveny byly také měřeními v klimakomoře.

Jako hodnoty okolní relativní vzdušné vlhkosti a teploty vzduchu během výparových experimentů jsem použil data změřená čidlem v blízkosti povrchu vzorku. Podle Tetensovy rovnice (5) jsem spočítal parciální tlak nasycené vodní páry P_{sat} a opravil jej o hodnoty naměřené čidlem. Tím jsem získal parciální tlak na povrchu vzorku. V místě úrovně výparové fronty jsem uvažoval 100 % vlhkost a tím stanovil P_{sat} také podle rovnice (5). Tyto hodnoty jsem od sebe odečetl a získal jsem rozdíl parciálního tlaku vodních par ΔP , který jsem dosadil do rovnice (6) pro výpočet intenzity výparu.

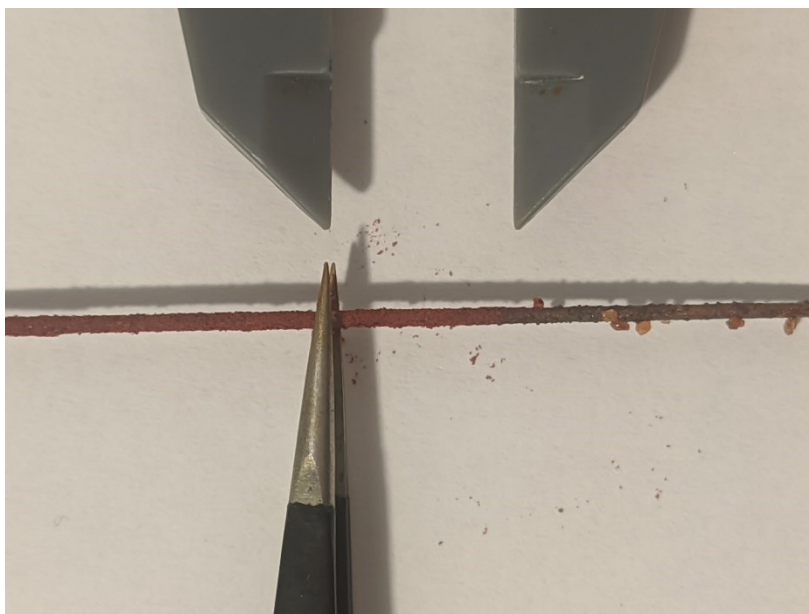
4 Výsledky

Data naměřených hmotností vzorků a hloubek výparové fronty (stanovené jehlovou metodou/roztokem uraninu) jsou pro výparové experimenty s pískem 1–6 a pro 3 horninové vzorky uvedeny k nahlédnutí v příloze.

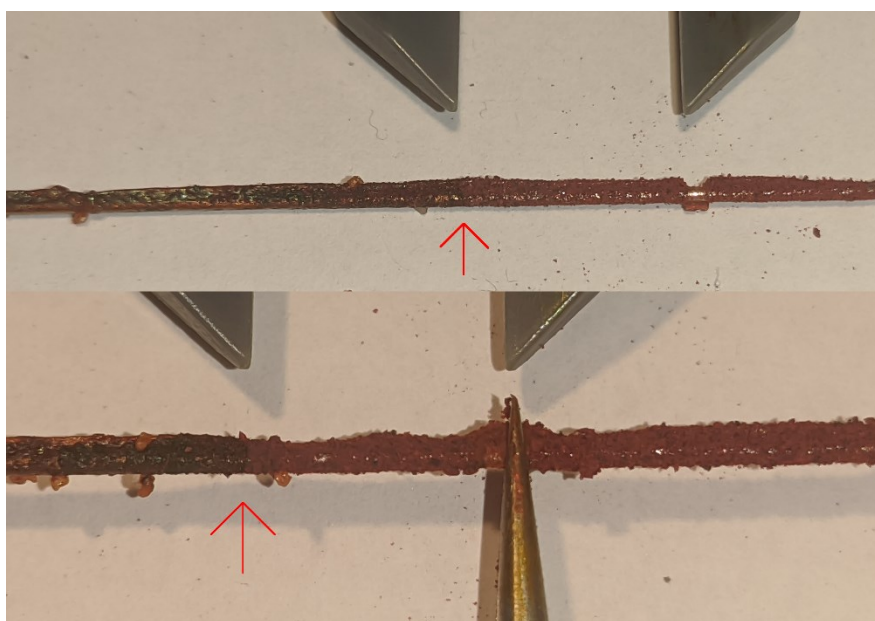
4.1 Ověření jehlové metody pro písek

Výparovou frontu v písku jsem měřil pomocí jehlové metody pro všechny experimenty 1 – 6. Pro experimenty 2, 3 a 5 jsem hloubku výparové fronty měřil také pomocí indikace změny barvy roztoku uraninu, jak je popsáno v kapitole 3.3.1 a v publikaci Weiss et al. (2018). V raných fázích experimentu, kdy mluvím o první výparové fázi i), se výparová fronta pohybovala na povrchu materiálu podle jehlové metody i podle indikace změny barvy roztoku uraninu. První výparové fázi i) se ve své práci ale nevěnuji. Veškerá uvedená data hloubky výparové fronty jsou tedy stanovena pro druhou výparovou fázi ii), kdy výparová fronta zaklesne pod povrch prostředí (viz kapitola 2.1). Protože měření probíhalo během výparového experimentu, mám tak sadu dat pro postupně se prohlubující výparovou frontu až do hloubky zhruba 7,5 cm pod povrchem písku.

Napříč experimenty se objevovaly menší problémy při měření jehlovou metodou, a to především na začátku druhé výparové fáze ii), kdy se výparová fronta stále pohybovala v blízkosti povrchu písku a voda měla tendenci vzlínat po jehle s naneseným uraninem. Naopak ke konci druhé výparové fáze ii) bylo potřeba ponechat jehlu v písku déle, aby vytvořila opravdu zřetelnou hranici na jehle (obr. 23 a 24). Těmto problémům jsem se snažil předejít omezením doby vložené jehly v písku na jednu minutu pro ranou část experimentu, a naopak jsem prodloužil měření na čtyři minuty pro pozdní část experimentu, jak jsem popsal v metodice v kapitole 3.2.1.



Obr. 23: Ukázka barevného rozhraní na uraninové sondě z jednoho z měření v písku.



Obr. 24: Detailnější ukázka barevného rozhraní na uraninové sondě ze dvou měření v písku. Červené šipky směřují na místo na uraninové sondě, kde se barevné rozhraní nachází.

Nejprve bylo potřeba zhodnotit, jaká je shodnost (opakovatelnost) měření pro každou z obou metod (jehlová metoda a změna barvy roztoku uraninu) zvlášť. Při každém měření jsem změřil 2 hodnoty pomocí roztoku uraninu (tabulka 6) a 2 hodnoty pomocí jehlové metody (tabulka 7). Z těchto hodnot jsem pro každou metodu zvlášť nejprve spočítal průměr, vzájemný rozdíl a směrodatnou odchylku těchto hodnot. Pro odečet z barvy

roztoku jsem tímto způsobem analyzoval celkově 37 a pro jehlovou metodu 32 párových hodnot hloubky výparové fronty. V případě experimentu 2, který byl jeden z prvních měření a v tu dobu jsem pro něj neměřil 2 hodnoty jehlovou metodou, ale pouze 1 hodnotu, a proto jsem nemohl spočítat průměr 2 hodnot naměřených jehlou. Z tohoto důvodu jsem experiment 2 z porovnání párových hodnot v tabulce 7 vyřadil, abych zachoval konzistenci prezentovaných výsledků v tabulce 8.

Pro metodu změny barvy roztoku uraninu byl rozdíl mezi dvěma měřeními v průměru 1,3 mm, přičemž ve třetině případů byl rozdíl 0 mm. Ve dvou extrémních případech byl rozdíl 7 a 9 mm, což ovšem představovalo méně než 25 % z průměru měřených hodnot. Tato chyba totiž nastala ve vysoké hloubce výparové fronty u experimentu 5, kde se výparová fronta zdála být mírně ukloněná k jedné straně, její měření na dvou opačných částech kádinky tedy nemusí vyjadřovat přímo chybu měření, ale nerovnoměrnost výparu v kádince. Směrodatná odchylka mezi oběma měřeními byla v průměru 0,7 mm, což představuje pouze 3 % z průměru obou hodnot (tabulka 6). Předpokládám tedy, že průměrná hodnota získaná ze změny barvy roztoku uraninu velmi dobře popisuje hloubku výparové fronty v křemenném písku, a dále pracuji jen s tímto průměrem.

Tabulka 6: Hloubka výparové fronty (VF) měřená dle změny barvy roztoku uraninu

Experiment 2 – roztok uraninu					
hloubka VF 1 [cm]	hloubka VF 2 [cm]	průměr hloubek [cm]	směrodatná odchylka [cm]	směrodatná odchylka [%]	absolutní rozdíl [cm]
2,4	2,0	2,2	0,21	9,5	0,4
3,1	3,3	3,2	0,10	3,1	0,2
4,0	3,8	3,9	0,10	2,6	0,2
4,3	4,3	4,3	0,00	0,0	0,0
4,3	4,5	4,4	0,10	2,3	0,2

Experiment 3 - roztok uraninu					
hloubka VF 1 [cm]	hloubka VF 2 [cm]	průměr hloubek [cm]	směrodatná odchylka [cm]	směrodatná odchylka [%]	absolutní rozdíl [cm]
0,7	0,8	0,8	0,05	6,7	0,1
0,8	0,8	0,8	0,00	0,0	0,0
0,9	1,2	1,1	0,15	14,3	0,3
1,0	1,2	1,1	0,10	9,1	0,2
1,0	1,3	1,2	0,15	13,0	0,3
1,6	1,6	1,6	0,00	0,0	0,0
2,5	2,5	2,5	0,00	0,0	0,0
2,3	2,3	2,3	0,00	0,0	0,0
3,0	3,0	3,0	0,02	0,8	0,0
3,4	3,4	3,4	0,02	0,7	0,0
3,6	3,7	3,7	0,05	1,4	0,1
4,0	4,0	4,0	0,02	0,6	0,0
4,3	4,2	4,2	0,07	1,8	0,1
4,7	4,7	4,7	0,00	0,0	0,0
5,0	5,0	5,0	0,02	0,5	0,0
5,2	5,2	5,2	0,00	0,0	0,0
5,3	5,3	5,3	0,00	0,0	0,0
5,7	5,8	5,8	0,05	0,9	0,1
6,1	6,3	6,2	0,10	1,6	0,2
7,1	7,2	7,1	0,03	0,4	0,1
7,4	7,4	7,4	0,03	0,3	0,1
Experiment 5 - roztok uraninu					
hloubka VF 1 [cm]	hloubka VF 2 [cm]	průměr hloubek [cm]	směrodatná odchylka [cm]	směrodatná odchylka [%]	absolutní rozdíl [cm]
0,9	0,9	0,9	0,00	0,0	0,0
1,1	1,1	1,1	0,00	0,0	0,0
1,2	1,1	1,2	0,05	4,3	0,1
1,4	1,7	1,5	0,13	8,2	0,3
1,6	1,6	1,6	0,00	0,0	0,0
1,9	1,9	1,9	0,01	0,3	0,0
2,1	2,2	2,2	0,05	2,3	0,1
2,5	2,6	2,6	0,05	2,0	0,1
3,0	3,0	3,0	0,00	0,0	0,0
4,3	3,4	3,9	0,45	11,7	0,9
6,1	5,4	5,7	0,38	6,6	0,8

V případě použití jehlové metody výparová fronta vytvořila jasné viditelné rozhraní na vyjmuté jehle s naneseným uraninem (viz obr. 23 a obr. 24). Tím jsem stanovil hloubku výparové fronty v suché přípovrchové vrstvě ve druhé výparové fázi ii). Všechny tyto experimenty potvrdily, že pomocí jehlové metody lze v studovaném písku změřit hloubku výparové fronty. Pro jehlovou metodu byl absolutní rozdíl mezi dvěma měřeními v průměru 2,0 mm. Zhruba v šestině případů byl rozdíl mezi jednotlivými měřeními 0 mm, maximální rozdíl mezi dvěma měřeními činil 9 mm, toto ovšem opět nastalo při vysoké hloubce výparové fronty a tento rozdíl tak činí pouze 15 % z průměru měřených hodnot. Tento velký rozdíl se opět objevil u experimentu 5, obdobně jako u měření z roztoku a nejspíš se jedná pouze o nerovnoměrný vývoj výparové fronty v různých částech kádinky. Směrodatná odchylka mezi oběma měřeními byla v průměru 1,0 mm, v průměru jde pouze o 4 % z průměru obou hodnot (tabulka 7). Zdá se tedy, že shodnost (opakovatelnost) měření pomocí jehlové metody v křemenném písku je velmi dobrá a podobná té pro odečet ze změny barvy roztoku dle Weisse et al. (2018), ale také srovnatelná s uváděnou přesností jehlové metody 2 mm pro horniny (Weiss et al. 2020). Dále již pracuji jen s průměrnou hodnotou hloubky výparové fronty zjištěnou pomocí jehlové metody.

Tabulka 7: Hloubka výparové fronty měřená dle jehlové metody

Experiment 3 – jehlová metoda					
hloubka VF 1 [cm]	hloubka VF 2 [cm]	průměr hloubek [cm]	směrodatná odchylka [cm]	směrodatná odchylka [%]	absolutní rozdíl [cm]
0,6	0,4	0,5	0,10	20,0	0,2
0,8	0,7	0,7	0,03	3,4	0,1
0,8	0,8	0,8	0,03	3,2	0,1
1,1	1,0	1,1	0,05	4,8	0,1
1,3	1,2	1,3	0,05	4,0	0,1
1,5	1,5	1,5	0,00	0,0	0,0
2,5	2,3	2,4	0,10	4,2	0,2
2,7	2,3	2,5	0,20	8,0	0,4
2,8	2,8	2,8	0,00	0,0	0,0
3,3	3,3	3,3	0,00	0,0	0,0
3,3	3,4	3,4	0,05	1,5	0,1
3,7	3,6	3,7	0,05	1,4	0,1
4,2	4,1	4,1	0,03	0,6	0,1
4,5	4,8	4,7	0,15	3,2	0,3
5,2	5,1	5,2	0,05	1,0	0,1
5,5	4,9	5,2	0,30	5,8	0,6
5,5	5,2	5,4	0,15	2,8	0,3
5,2	5,0	5,1	0,10	2,0	0,2
6,1	5,7	5,9	0,20	3,4	0,4
7,2	6,6	6,9	0,28	4,0	0,6
7,3	7,5	7,4	0,10	1,4	0,2
Experiment 5 – jehlová metoda					
hloubka VF 1 [cm]	hloubka VF 2 [cm]	průměr hloubek [cm]	směrodatná odchylka [cm]	směrodatná odchylka [%]	absolutní rozdíl [cm]
0,9	1,0	0,9	0,00	0,0	0,0
1,0	0,8	1,1	0,00	0,0	0,0
0,9	1,2	1,2	0,05	4,3	0,1
1,6	1,6	1,5	0,13	8,2	0,3
1,6	1,6	1,6	0,00	0,0	0,0
2,1	2,0	1,9	0,01	0,3	0,0
2,3	2,8	2,2	0,05	2,3	0,1
2,5	2,5	2,6	0,05	2,0	0,1
3,2	3,3	3,0	0,00	0,0	0,0
4,1	4,3	3,9	0,45	11,7	0,9
6,4	5,5	5,7	0,38	6,6	0,8

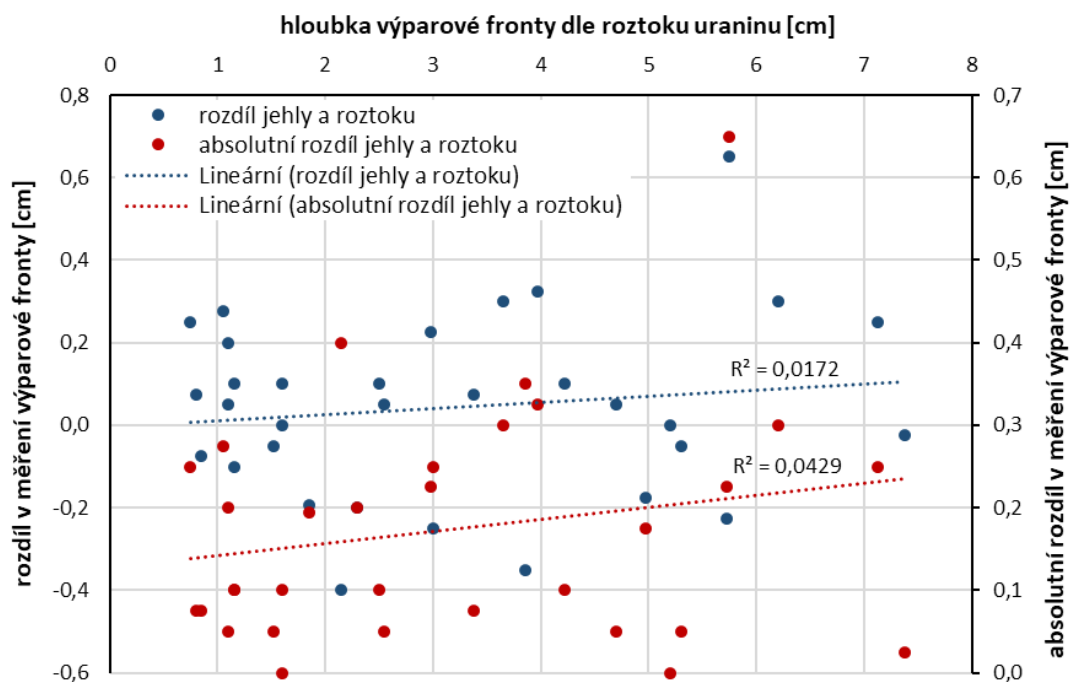
Průměrné hodnoty hloubky výparové fronty ze změny barvy roztoku uraninu a z jehlové metody jsem následně srovnal (32 párových hodnot; tabulka 8). Rozdíl mezi oběma metodami v absolutní hodnotě činil v průměru 1,7 mm, což odpovídá průměrné relativní odchylce 8 %. Nejvyšší naměřený rozdíl byl u experimentu 3, kde hloubka výparové fronty byla oproti odečtu z roztoku uraninu o 6,5 mm podhodnocena. Toto nastalo při vysoké hloubce výparové fronty, rozdíl tak činí pouze 11 % z hodnoty dle roztoku uraninu. Pokud bych pro vyhodnocení nebral absolutní hodnotu rozdílu, byl by rozdíl mezi oběma metodami v průměru pouze 0,4 mm, což je dáno tím, že nadhodnocené a podhodnocené hodnoty jehlové metody oproti roztoku se vzájemně vykompenzují. Relativní odchylka jehlové metody od metody měření z barvy roztoku by v takovém případě byla v průměru pouze 2 % (maximálně 19 %).

Dalším poznatkem je, že hloubka zjištěná pomocí jehlové metody byla v 56 % případů podhodnocená vůči té zjištěné ze změny barvy roztoku. V tomto ohledu tedy nepozoruji výraznou systematickou chybu v měření hloubky výparové fronty jehlovou metodou proti měření roztokem uraninu.

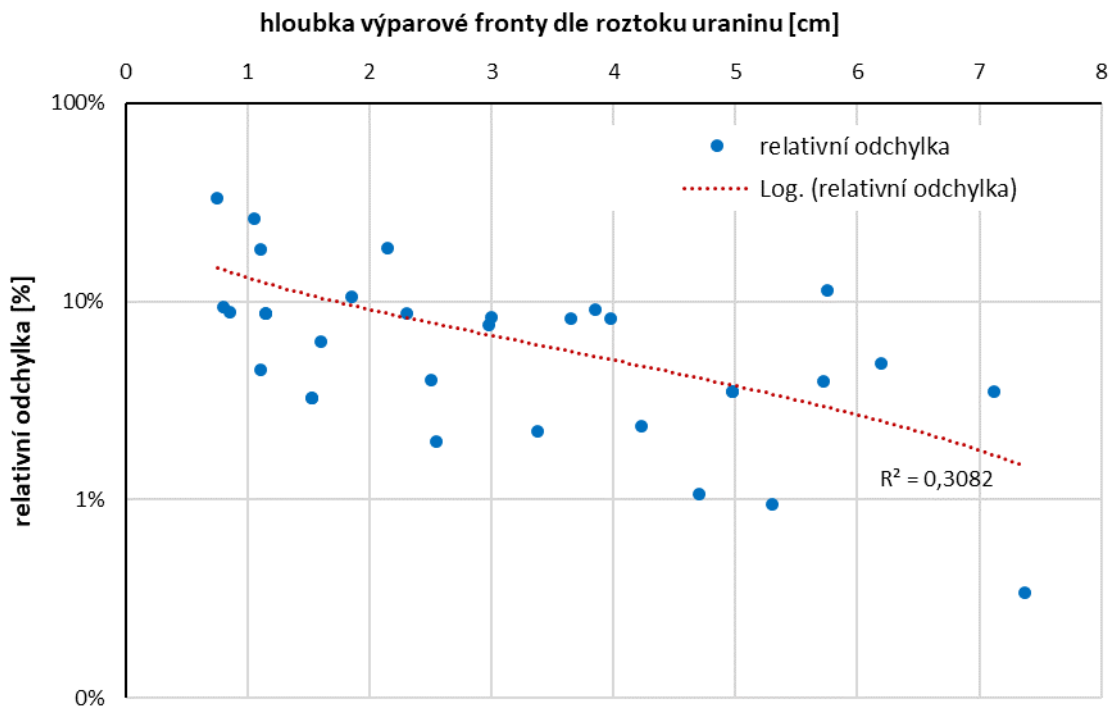
Tabulka 8: Srovnání měřených hodnot hloubky výparové fronty dle změny barvy roztoku uraninu a dle jehlové metody

Experiment 3 – srovnání roztoku uraninu a jehlové metody			
roztok uraninu [cm]	jehlová metoda [cm]	rozdíl metod [cm]	relativní odchylka [%]
0,8	0,5	0,3	-33,3
0,8	0,7	0,1	-9,4
1,1	0,8	0,3	-26,2
1,1	1,1	0,1	-4,5
1,2	1,3	-0,1	8,7
1,6	1,5	0,1	-6,3
2,5	2,4	0,1	-4,0
2,3	2,5	-0,2	8,7
3,0	2,8	0,2	-7,6
3,4	3,3	0,1	-2,2
3,7	3,4	0,3	-8,2
4,0	3,7	0,3	-8,2
4,2	4,1	0,1	-2,4
4,7	4,7	0,0	-1,1
5,0	5,2	-0,2	3,5
5,2	5,2	0,0	0,0
5,3	5,4	0,0	0,9
5,8	5,1	0,7	-11,3
6,2	5,9	0,3	-4,8
7,1	6,9	0,3	-3,5
7,4	7,4	0,0	0,3
Experiment 5 – srovnání roztoku uraninu a jehlové metody			
roztok uraninu [cm]	jehlová metoda [cm]	rozdíl metod [cm]	relativní odchylka [%]
0,9	0,9	-0,1	8,8
1,1	0,9	0,2	-18,2
1,2	1,1	0,1	-8,7
1,5	1,6	-0,1	3,3
1,6	1,6	0,0	0,0
1,9	2,1	-0,2	10,5
2,2	2,6	-0,4	18,6
2,6	2,5	0,0	-2,0
3,0	3,3	-0,3	8,3
3,9	4,2	-0,4	9,1
5,7	6,0	-0,2	3,9

Dále mě zajímalo, zda a jak moc se rozdíl mezi oběma metodami liší v závislosti na aktuální hloubce výparové fronty. Velikost rozdílu mezi oběma metodami se zdá být pro experimenty s pískem na hloubce pod povrchem nezávislá či závislá jen velmi nepatrně (rozdíl mírně narůstá s hloubkou), jak popisuje obr. 25. V absolutním čísle je tak pro experimenty s pískem možné očekávat zhruba stejnou přesnost jehlové metody vůči odečtu ze změny barvy roztoku nezávisle na hloubce výparové fronty pod povrchem. Silnější vztah je patrný při vyjádření relativní odchylky měření dle jehlové metody vůči odečtu hloubky ze změny barvy roztoku, jak lze vidět na obr. 26. Zatímco blíže k povrchu (pod 1 cm) je relativní odchylka až 33 %, v hloubce okolo 7 cm již je pod 4 %. Relativní odchylka zde vyjadřuje, kolik procent z hodnoty změřené pomocí roztoku uraninu tvoří rozdíl mezi oběma metodami. Protože v absolutním čísle je přesnost jehlové metody vůči odečtu ze změny barvy roztoku v písku stále zhruba stejná, s rostoucí hloubkou výparové fronty relativní odchylka logicky klesá.



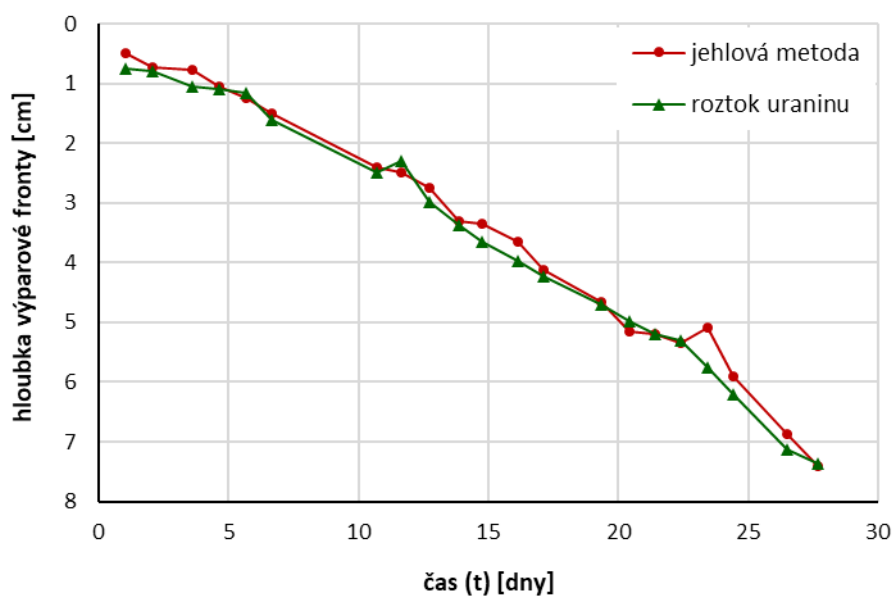
Obr. 25: Rozdíly hloubek výparové fronty podle jehlové metody a roztoku uraninu srovnané s absolutními rozdíly hloubek obou metod. Vztaženo k hloubce výparové fronty naměřené roztokem uraninu.



Obr. 26: Relativní odchylka z absolutních rozdílů hodnot získaných jehlovou metodou a roztokem uraninu v závislosti na hloubce výparové fronty naměřené roztokem uraninu.

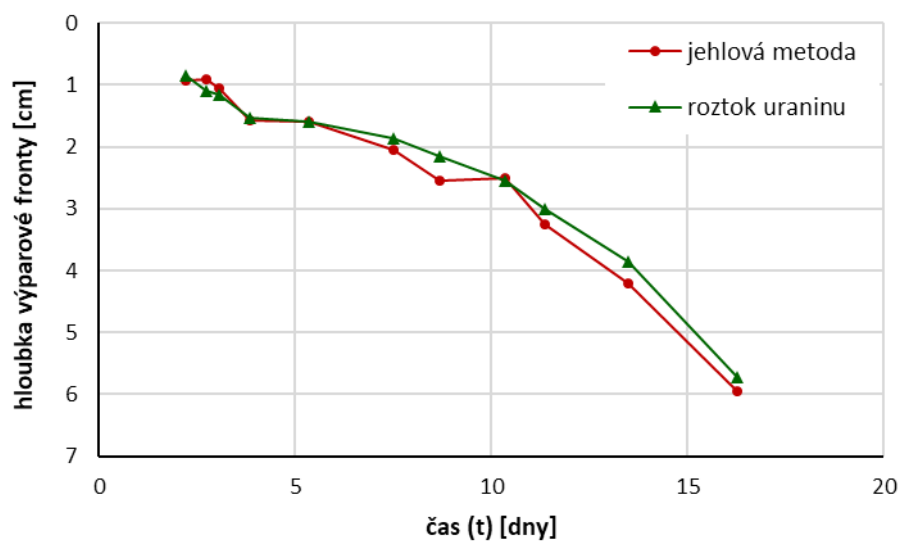
Měření hloubky výparové fronty pomocí obou metod probíhalo v rámci výparových experimentů 3 a 5, během kterých výparová fronta postupně zaklesávala stále hlouběji pod povrch. Na obr. 27 a obr. 28 tedy prezentují postupný vývoj hloubky výparové fronty během experimentů 3 a 5 v závislosti na čase. Využil jsem průměrných hodnot výparové fronty podle jehlové metody a podle roztoku uraninu z tabulky 8. Pro oba experimenty je vývoj hloubky velmi podobný pro obě použité metody. V grafu lze vidět i ojedinělé nepřesnosti měření, které se projevovaly náhlými skoky v průběhu vývoje hloubky výparové fronty.

Experiment 3: Porovnání hloubky VF podle jehly a roztoku



Obr. 27. Experiment 3: Porovnání vývoje hloubky výparové fronty měřené roztokem uraninu a jehlovou metodou v čase t .

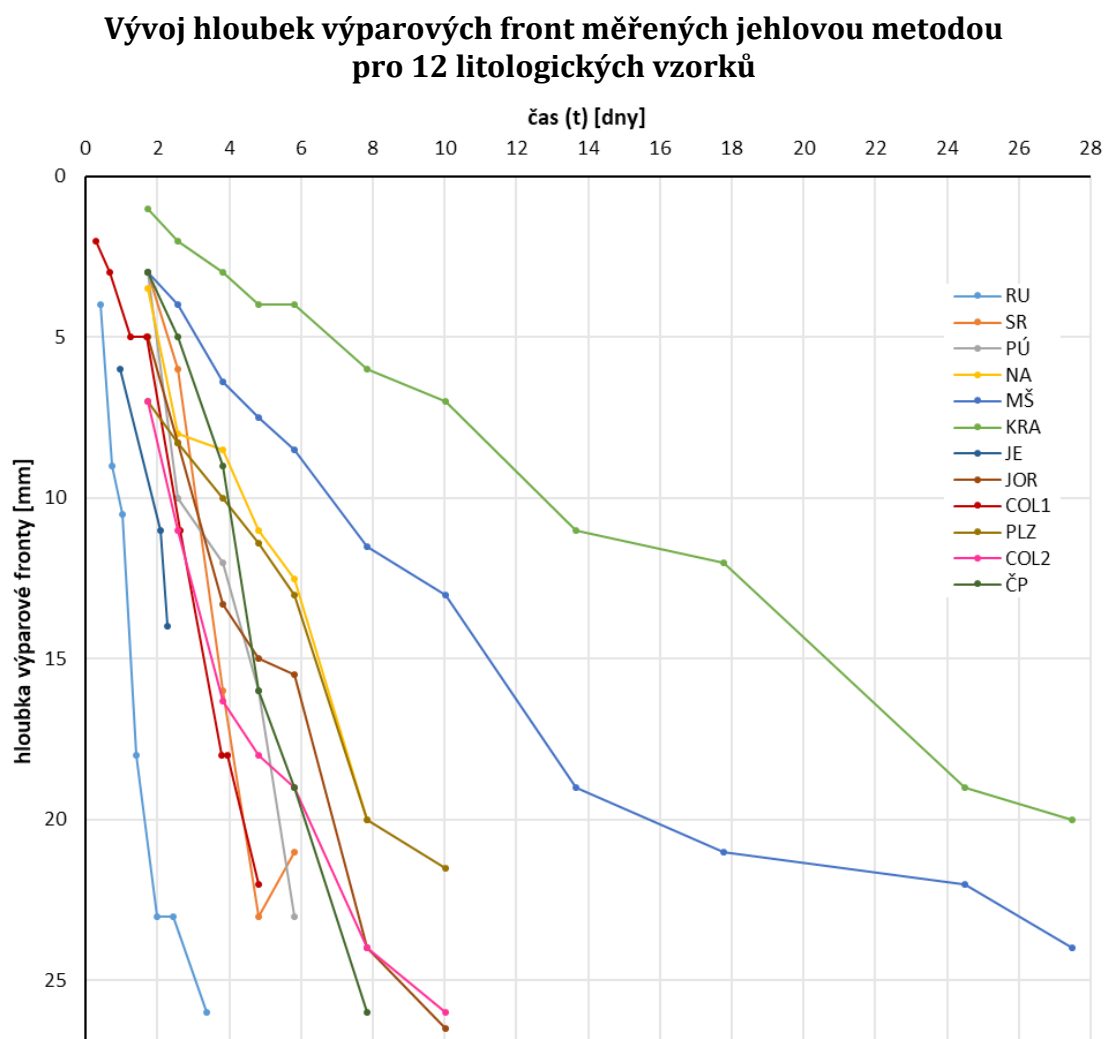
Experiment 5: Porovnání hloubky VF podle jehly a roztoku



Obr. 28: Experiment 5: Porovnání vývoje hloubky výparové fronty měřené roztokem uraninu a jehlovou metodou v čase t .

4.2 Ověření jehlové metody pro horniny

Všech 12 litologických vzorků jsem nechal z plné saturace vypařovat skrze horní podstavu. V horních podstavách vzorků, skrze které probíhal výpar, byly vyvrtány díry. Skrze tuto díru v každém vzorku jsem měřil hloubku výparové fronty jehlovou metodou. Ověřoval jsem, zda je na jehle patrné ostré rozhraní indikující hloubku výparové fronty a zda se toto rozhraní postupně, jak se vypařuje voda z horniny, posouvá směrem hlouběji pod povrch. Ve všech typech hornin, které jsem studoval, se ukázalo, že výparová fronta vytváří ostré barevné rozhraní na jehle s uraninem. Pro dvanáct horninových vzorků (specifikovaných v tabulkách 1 a 2), jsem opakovaně úspěšně stanovil hloubku výparové fronty a tato hloubka se s postupujícím výparem stále více posouvala hlouběji pod povrch horniny, jak prezentuje obr. 29.

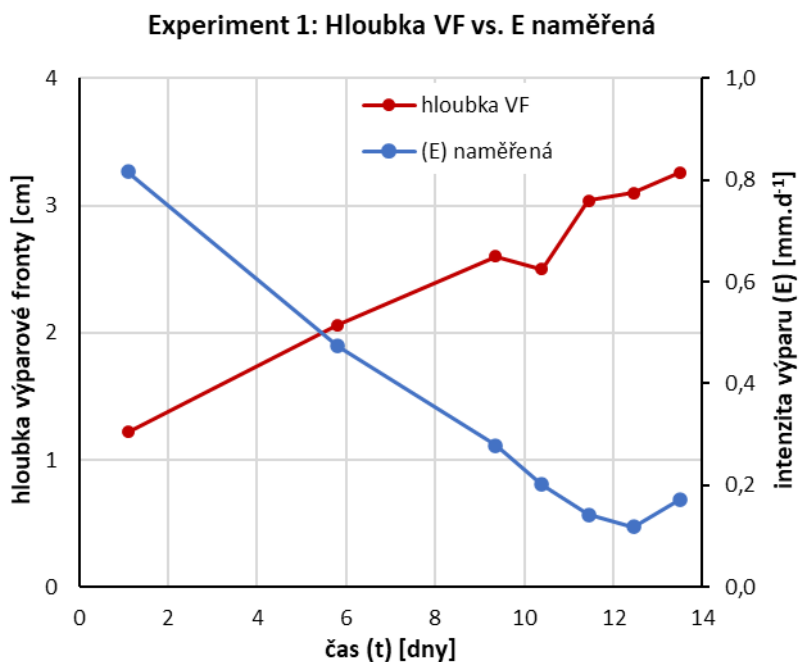


Obr. 29: Graficky znázorněn vývoj hloubek výparových front sledovaných jehlovou metodou v čase t napříč dvanácti horninovými vzorky.

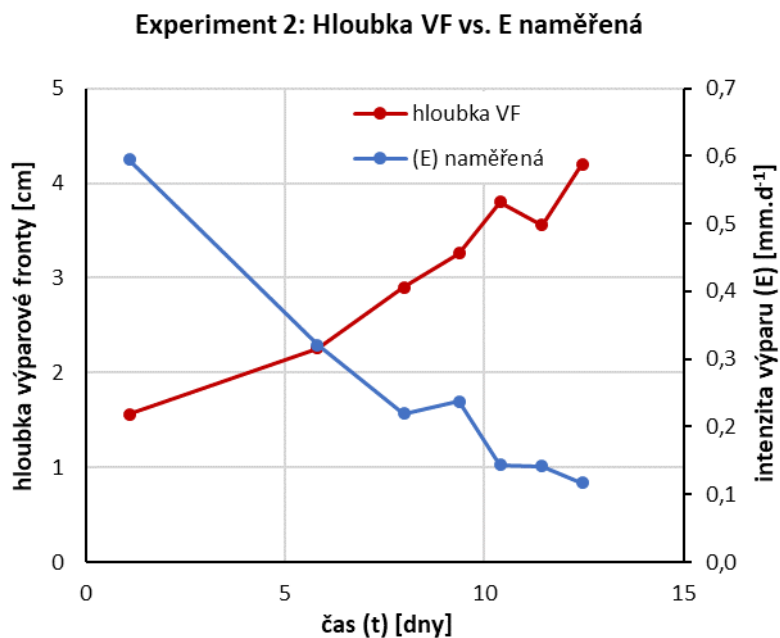
4.3 Měřená intenzita výparu vs. měřená hloubka výparové fronty v písku

Ve výsledkové části všechny grafy, mající na ose x čas t , vyjadřují čas ve dnech od začátku experimentu. Začátkem experimentu ale není myšlen počátek výparu z plné saturace (1. výparová fáze), nýbrž pro $t = 0$ je myšlen okamžik, kdy byla hloubka výparové fronty L naposledy měřením zastižena na samotném povrchu porézního prostředí. To znamená, že mezi nulovou hloubkou výparové fronty L v čase nula ($t = 0, L = 0$) a první naměřenou nenulovou hloubkou výparové fronty ($t > 0, L > 0$) se tedy nachází konec první výparové fáze i) a začátek druhé výparové fáze ii). Všechny získané nenulové hodnoty výparové fronty se již nacházejí ve druhé výparové fázi ii). Hodnoty výparu a nulových hloubek výparové fronty pro první výparovou fázi i) v hlavní práci neprezentuji, protože první výparová fáze není předmětem mého zájmu. Všechny měřené hodnoty hloubky výparové fronty a hmotnosti vzorků pro písek, ze kterých byla následně stanovena „měřená intenzita výparu“, jsou uvedeny v příloze 1–6.

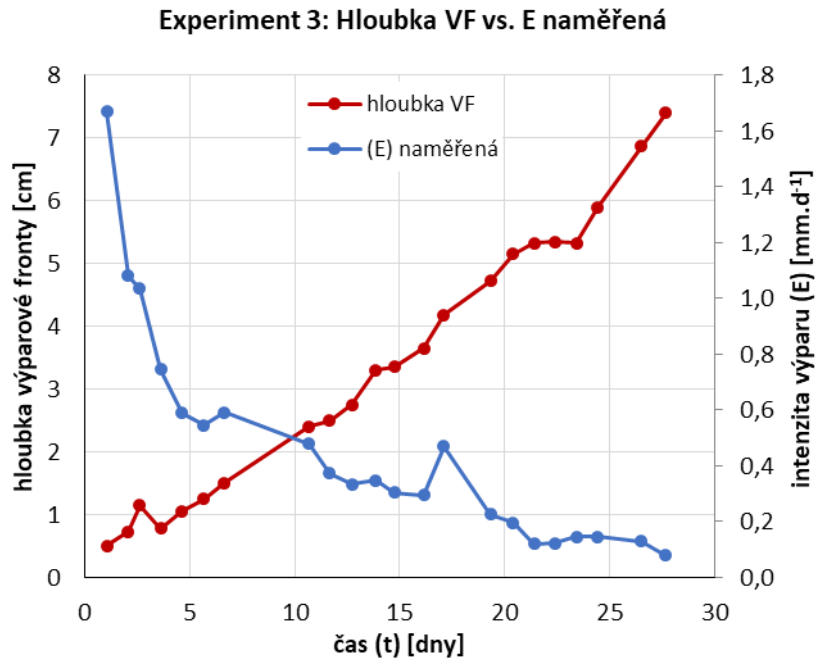
Napříč všemi výparovými experimenty 1–6 v písku se ukázalo, že s rostoucí měřenou hloubkou výparové fronty klesá měřená intenzita výparu, jak ukazují obr. 30–35. Pro experimenty 1 a 2 jsem stanovil pouze jednu hodnotu hloubky výparové fronty pomocí jehlové metody v daném čase t a tato hodnota hloubky je zobrazena v grafech obr. 30 a obr. 31. Pro experimenty 4–6 jsem jehlovou metodou měřil dvě hodnoty hloubky výparové fronty dvěma uraninovými sondami v daném čase t a tyto dvě naměřené hodnoty hloubek jsem následně zprůměroval. V grafech obr. 32–35 experimentů 4–6 jsou tedy uvedeny již průměry těchto dvou hodnot naměřené hloubky v daném čase t . Hloubku výparové fronty jsem porovnal s měřenou intenzitou výparu v grafech obr. 30–35. Měřenou intenzitou výparu se zde rozumí úbytek hmotnosti za dílčí časové období experimentu, vydělený plochou vzorku.



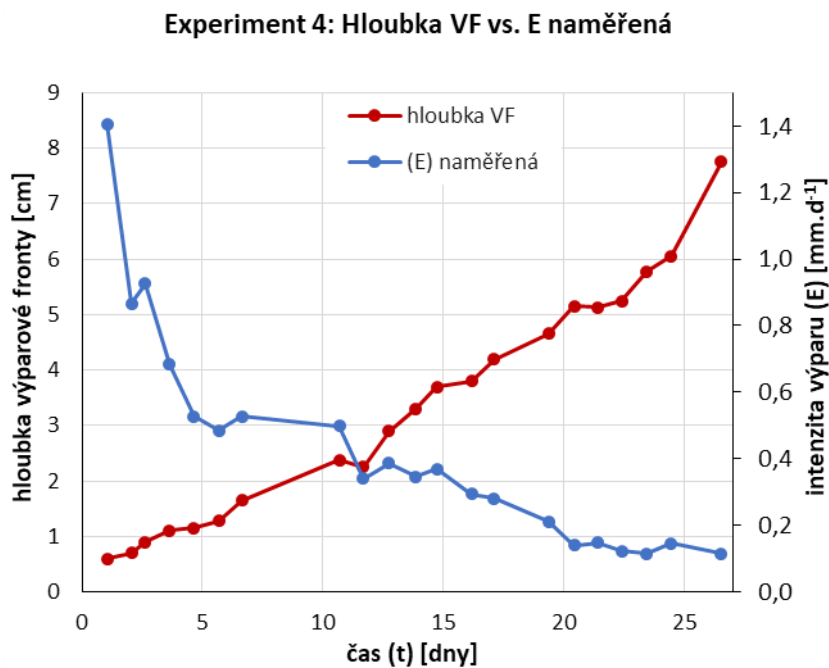
Obr. 30: Experiment 1 - Grafické zobrazení vývoje hloubky výparové fronty sledované jehlovou metodou a měřené intenzity výparu E v čase t pro křemenný písek.



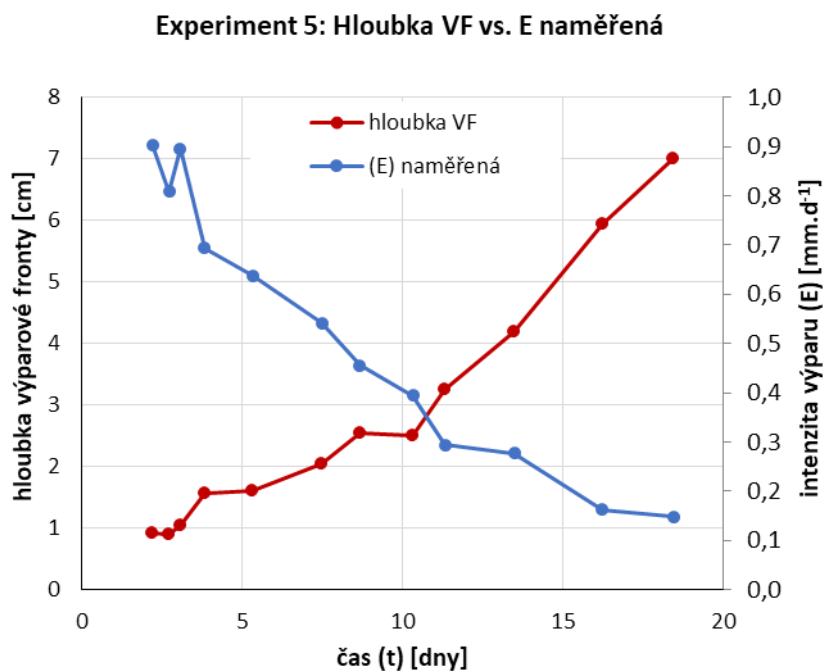
Obr. 31: Experiment 2 - Grafické zobrazení vývoje hloubky výparové fronty sledované jehlovou metodou a měřené intenzity výparu E v čase t pro křemenný písek.



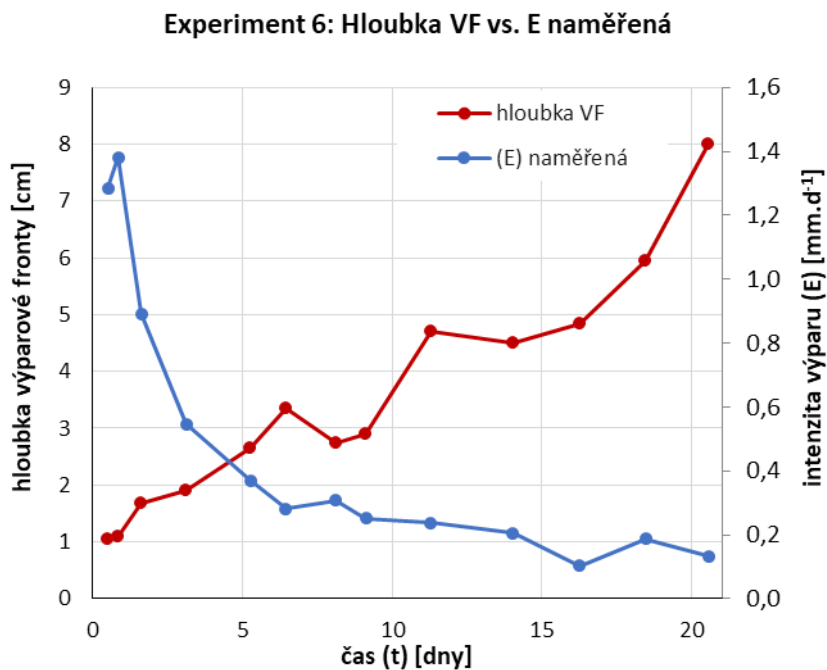
Obr. 32. Experiment 3 - Grafické zobrazení vývoje hloubky výparové fronty sledované jehlovou metodou a měřené intenzity výparu E v čase t pro křemenný písek.



Obr. 33: Experiment 4 - Grafické zobrazení vývoje hloubky výparové fronty sledované jehlovou metodou a měřené intenzity výparu E v čase t pro křemenný písek.



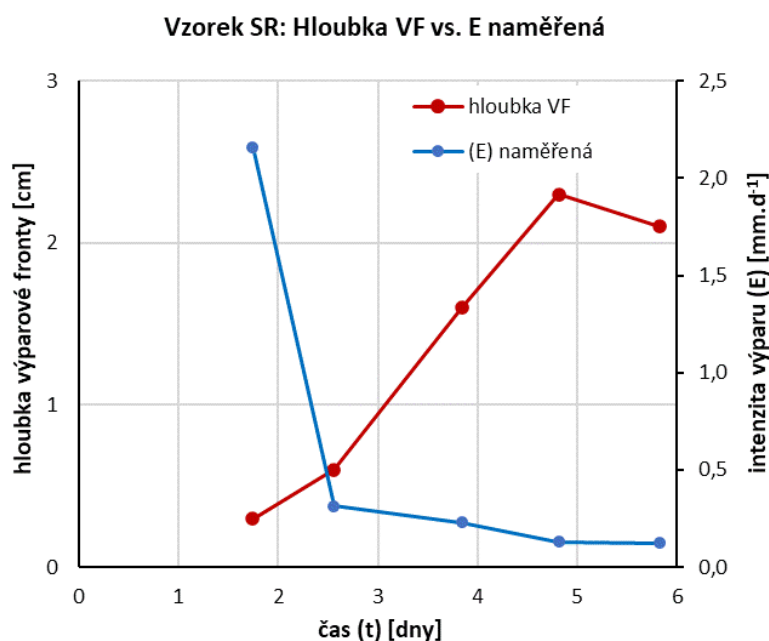
Obr. 34: Experiment 5 - Grafické zobrazení vývoje hloubky výparové fronty sledované jehlovou metodou a měřené intenzity výparu E v čase t pro křemenný písek.



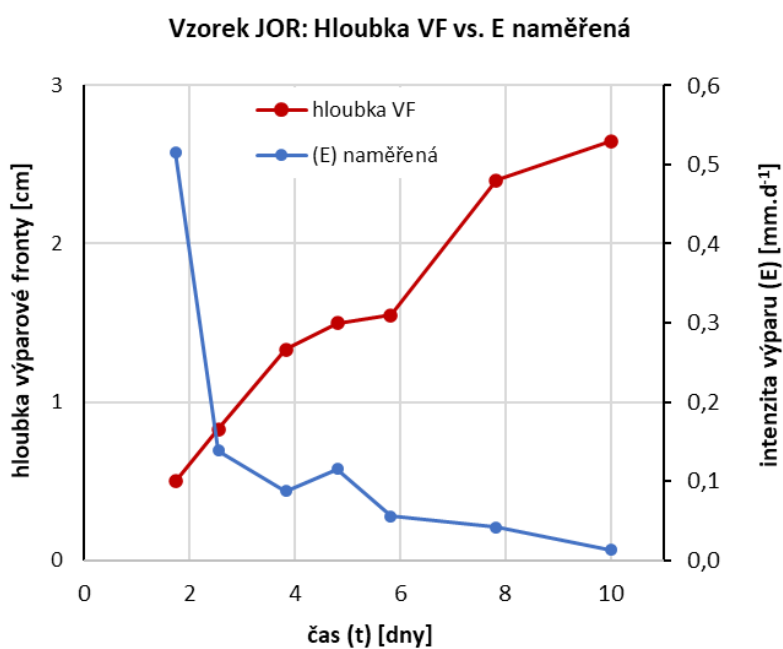
Obr. 35: Experiment 6 - Grafické zobrazení vývoje hloubky výparové fronty sledované jehlovou metodou a měřené intenzity výparu E v čase t pro křemenný písek.

4.4 Měřená intenzita výparu vs. měřená hloubka výparové fronty v horninách

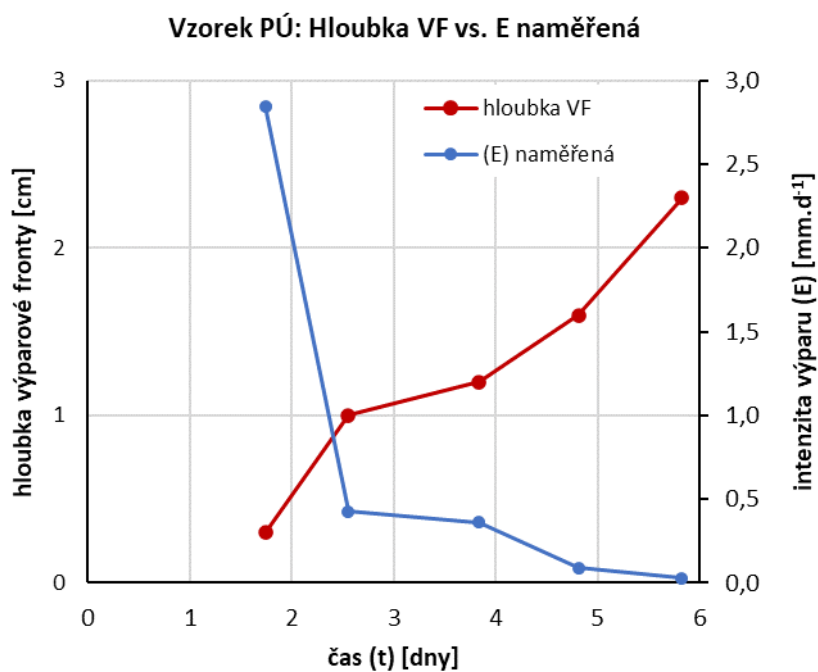
Pro vzorky SR, JOR a PÚ se během výparových experimentů taktéž jednoznačně ukázalo, že s rostoucí měřenou hloubkou výparové fronty klesá měřená intenzita výparu, jak ukazují obr. 36–38. U vzorku SR (obr. 36) je na konci experimentu vidět mírný pokles hloubky výparové fronty. To je nejspíš dáno chybou měření v okamžiku, kdy se hloubka výparové fronty pravděpodobně – vzhledem k velmi nízké intenzitě výparu – již vůbec či téměř vůbec nevyvíjela. Hloubku výparové fronty jsem měřil jehlovou metodou. Pro každý horninový vzorek jsem vložil uraninovou jehlu do jedné vyvrtané díry příslušného vzorku a následně stanovil hloubku výparové fronty v daném čase t . Měřenou intenzitou výparu se rozumí hmotnost (resp. objem) vypařené vody vydělený plochou vzorku za dané časové období. Všechny měřené hodnoty hloubky výparové fronty a hmotnosti pro 3 horninové vzorky (SR, JOR a PÚ), ze kterých byla následně stanovena „měřená intenzita výparu“, jsou uvedeny v příloze 7.



Obr. 36: Vzorek SR - Grafické zobrazení vývoje hloubky výparové fronty sledované jehlovou metodou a měřené intenzity výparu E v čase t pro křemenný pískovec.



Obr. 37: Vzorek JOR - Grafické zobrazení vývoje hloubky výparové fronty sledované jehlovou metodou a měřené intenzity výparu E v čase t pro pískovec.



Obr. 38: Vzorek PÚ - Grafické zobrazení vývoje hloubky výparové fronty sledované jehlovou metodou a měřené intenzity výparu E v čase t pro křemenný pískovec.

4.5 Součinitel difuzní vodivosti

Pro výpočet intenzity výparu (rovnice 6) jsem za součinitel difuzní vodivosti dosazoval hodnoty $\delta_{průměr}$ z tabulky 9. Pro experimenty 1–4 s křemenným pískem jsem dosadil hodnotu $\delta_{průměr}$ $4,17 \times 10^{-11}$ s odpovídající nádobě TP4 a pro experimenty 5 a 6 jsem dosadil hodnotu $\delta_{průměr}$ $4,26 \times 10^{-11}$ s odpovídající nádobě TP2. Tyto hodnoty jsem volil tak, aby způsob přípravy wetcupu v tabulce 5 odpovídal způsobu přípravy daného výparového experimentu v tabulce 4 (způsob nasypání písku do nádoby typ 1 a typ 2 viz kapitola 3.2.1).

Tabulka 9: Přehled výsledných hodnot součinitele difuzní vodivosti z naměřených wetcupů pro křemenný písek a tři horninové vzorky

Pracovní označení	Materiál	D_{min} [cm]	D_{max} [cm]	δ_{min} [s]	δ_{max} [s]	$\delta_{průměr}$ [s]
TP1	Křemenný písek	4,75	4,85	$3,93 \times 10^{-11}$	$4,02 \times 10^{-11}$	$3,98 \times 10^{-11}$
TP2	Křemenný písek	4,70	5,00	$4,13 \times 10^{-11}$	$4,39 \times 10^{-11}$	$4,26 \times 10^{-11}$
TP3	Křemenný písek	5,95	6,00	$3,98 \times 10^{-11}$	$4,02 \times 10^{-11}$	$4,00 \times 10^{-11}$
TP4	Křemenný písek	4,65	5,00	$4,02 \times 10^{-11}$	$4,33 \times 10^{-11}$	$4,17 \times 10^{-11}$
SR	Křemenný pískovec	-	-	-	-	$3,39 \times 10^{-11}$
JOR	Pískovec	-	-	-	-	$2,10 \times 10^{-11}$
PÚ	Křemenný pískovec	-	-	-	-	$4,82 \times 10^{-11}$

V průběhu měření wetcupů s křemenným pískem si písek trochu sedal. Sednutí se projevilo především pro nádoby TP1 a TP4, které byly nasypány volným způsobem nasypání typu 2 (tabulka 5). Sednutí se pohybovalo od 5 do 35 mm viz tabulka 9. Nejmenšího sednutí dosahovala nádoba TP3, protože byla zhutněna při přípravě vzorku. V důsledku sednutí během měření v klimakomoře byla mocnost vzorku D , kterou jsem dosazoval do rovnice (4) pro výpočet součinitele difuzní vodivosti, na konci měření menší než na začátku měření. Výpočet jsem tedy provedl pro obě hodnoty D_{min} a D_{max} (tabulka 9). Pro výsledné vypočítané hodnoty součinitelů difuzní vodivosti δ_{min} a δ_{max} jsem udělal průměr $\delta_{průměr}$. Tuto průměrnou hodnotu součinitele difuzní vodivosti $\delta_{průměr}$ jsem následně dosazoval do jednotlivých výpočtů intenzity výparů pro křemenný písek.

4.6 Srovnání měření a výpočtů intenzity výparu v písku

Výsledné hodnoty naměřené intenzity výparu z písku (kapitola 4.3) jsem srovnal s vypočítanými hodnotami intenzity výparu dle Fickova zákona (rovnice 6) za stejná časová období. Jednotlivé výpočty intenzity výparu [mm/den] jsem ještě přepočítal na výpar [g] pro jednotlivá dílčí časová období a tyto vypočítané hodnoty výparu [g] jsem srovnal s měřeným výparem [g] za stejná dílčí období. Výsledky měřené a vypočítané intenzity výparu [mm/den] a jim odpovídající hodnoty výparu [g] pro jednotlivá dílčí časová období popisují grafy obr. 39-50.

Termínem „relativní odchylka v absolutní hodnotě“ mám v následujících textech na mysli relativní odchylku pro určité hodnoty (obvykle vypočítané a měřené intenzity výparu), která mohla být i záporná, a proto jsem ji převedl do absolutní hodnoty. Z této relativní odchylky v absolutní hodnotě jsem totiž často počítal např. průměr, což by pro případ kladné i záporné relativní odchylky vedlo k jejich vzájemné kompenzaci a tím k zdánlivě vyšší shodě mezi výpočty a měřením. Pokud jsem relativní odchylku počítal z kladných hodnot, nebylo potřeba ji převádět do absolutní hodnoty a hovořím jednoduše o relativní odchylce.

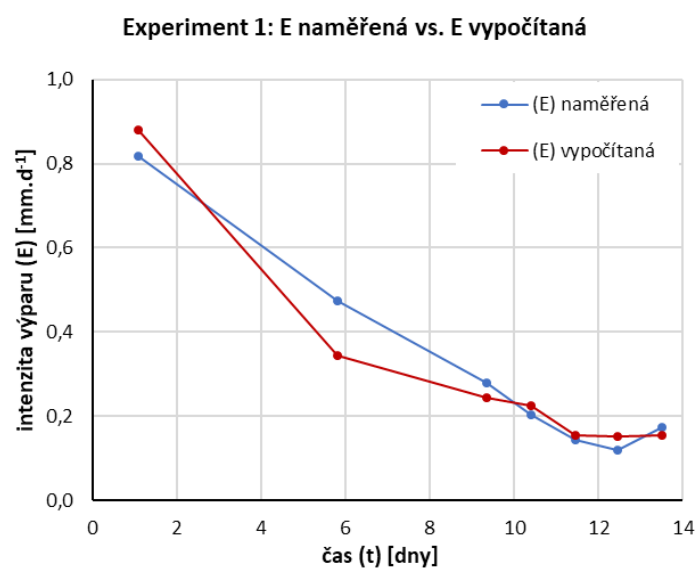
Průběh vypočítané intenzity výparu pro všechny experimenty výparu z písku poměrně dobře sedí s měřenými hodnotami. V obou případech (vypočítaná i měřená) intenzita výparu postupně klesá v čase, kdy na konci experimentu (po zhruba 12–28 dnech v závislosti na době trvání daného experimentu) nabývá pouhých 5–20 % z původní počáteční hodnoty tak, jak se postupně snižovala hloubka výparové fronty. Relativní odchylka v absolutní hodnotě pro vypočítanou intenzitu výparu byla od té měřené (v průměru za celý experiment) pro jednotlivé experimenty s pískem 10,4 až 39,0 % (23,1 % v průměru pro všechny experimenty, pro kterou odpovídá vyjádření v rozdíl 0,12 mm/den). Relativní odchylka celkového výparu naměřeného a vypočítaného na konci celého sledovaného období se napříč experimenty 1–6 pohybovala od 2,3 do 40,6 % (v průměru 16,8 %) z celkového naměřeného výparu (tabulka 10).

Tabulka 10: Přehled relativních odchylek v absolutní hodnotě pro vypočítané a měřené intenzity výparu a relativních odchylek pro celkový výpar Experimenty s pískem 1-6

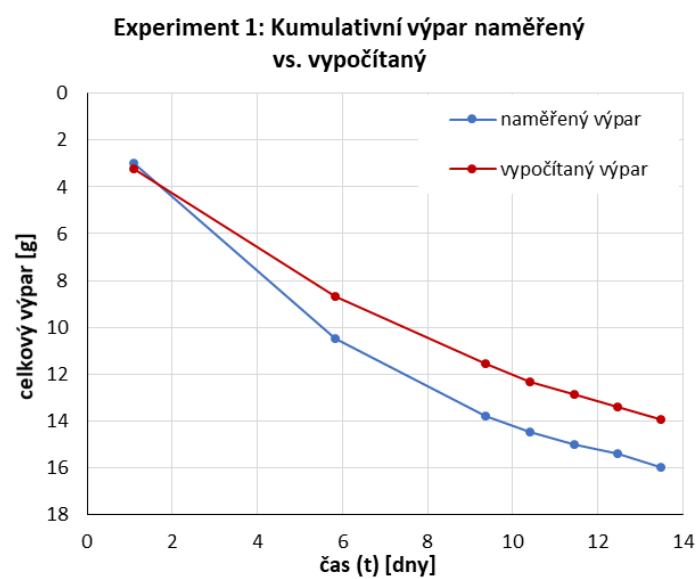
Experiment #	Relativní odchylka vypočítané a měřené intenzity výparu v absolutní hodnotě [%]			Rozdíl vypočítané a měřené intenzity výparu v absolutní hodnotě [mm/den]			Rozdíl celkového výparu v absolutní hodnotě [g]	Relativní odchylka celkového výparu [%]
	min.	max.	průměr	min.	max.	průměr		
1	7,6	27,8	15,0	0,011	0,130	0,045	2,08	13,0
2	0,8	18,3	10,4	0,002	0,092	0,029	0,26	2,3
3	4,3	58,0	18,6	0,008	0,969	0,112	2,01	5,1
4	4,4	56,4	16,4	0,010	0,792	0,087	1,49	4,2
5	10,0	49,7	38,0	0,055	0,358	0,188	8,01	29,0
6	14,3	64,7	39,0	0,015	0,894	0,231	10,34	40,6

Nejlépe vycházel experiment 2, kde rozdíl celkového výparu měřeného a vypočítaného (po 12 dnech měření) činil pouhých 0,26 g, což odpovídá relativní odchylce 2,3 %. Průměrná relativní odchylka v absolutní hodnotě za všechna dílčí měřená období vypočítané a měřené intenzity výparu činila pouhých 10,4 %, což odpovídá pouhým 0,03 mm/den.

Nejhůře naopak vyšel experiment 6, který na konci měření (po 21 dnech) dosahoval rozdílu v celkovém výparu 10,3 g, což odpovídá relativní odchylce 41 %. Průměrná relativní odchylka v absolutní hodnotě za všechna dílčí měřená období pro vypočítanou a měřenou intenzitu výparu činila 39 %, což odpovídá hodnotě 0,23 mm/den.

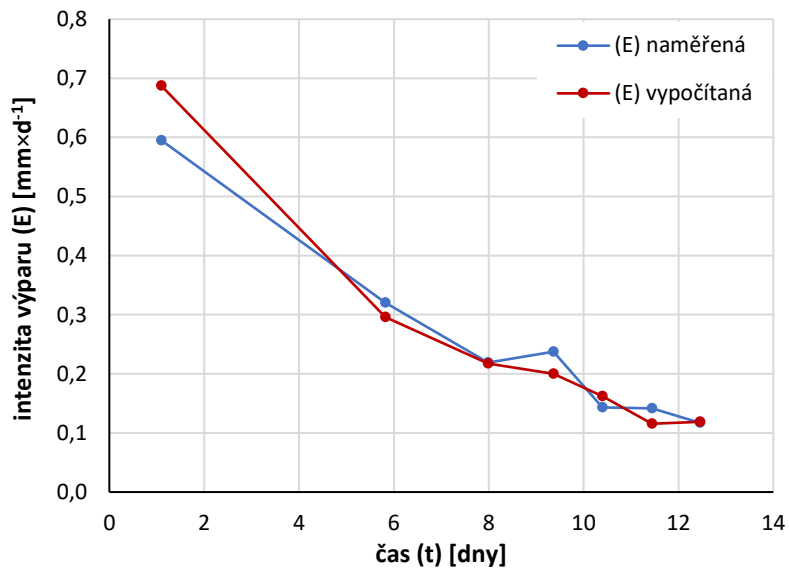


Obr. 39: Experiment 1 - Grafické zobrazení vývoje intenzity výparu E naměřené a intenzity výparu vypočítané v čase t .



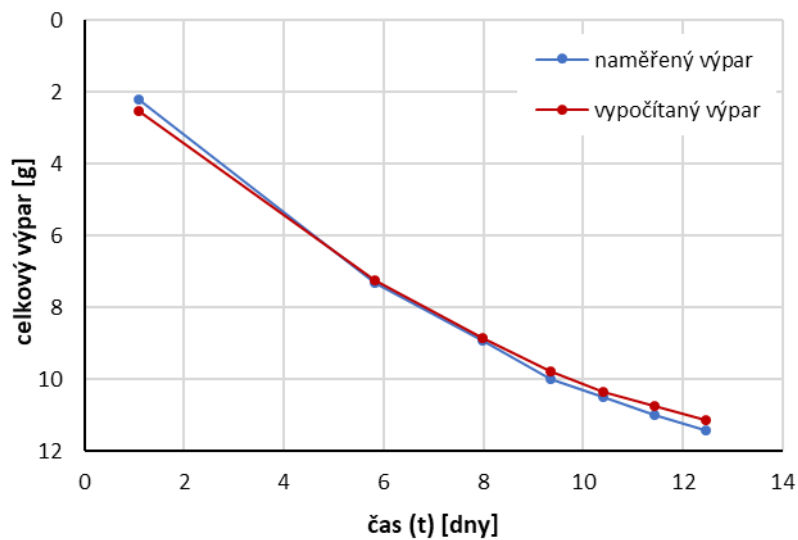
Obr. 40: Experiment 1 - Grafické zobrazení vývoje kumulativního výparu naměřeného a vypočítaného v čase t .

Experiment 2: E naměřená vs. E vypočítaná

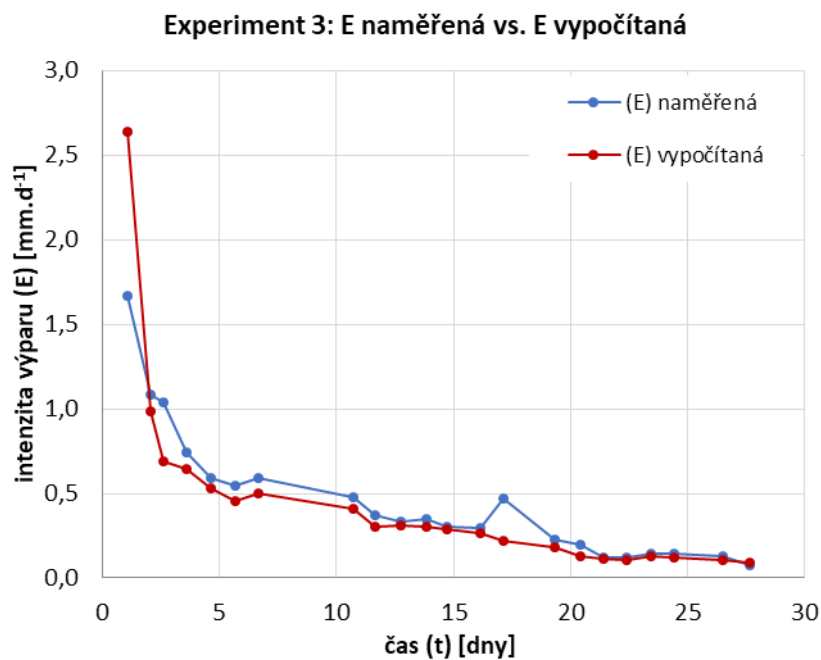


Obr. 41: Experiment 2 - Grafické zobrazení vývoje intenzity výparu E naměřené a intenzity výparu vypočítané v čase t .

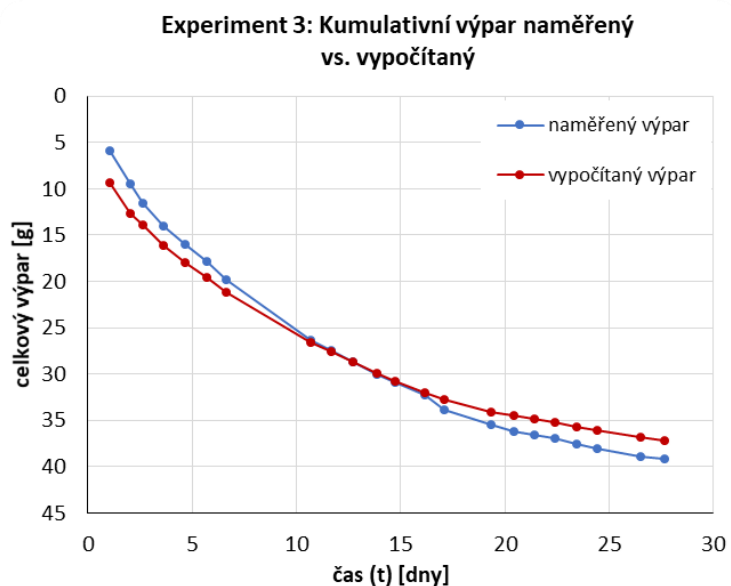
Experiment 2: Kumulativní výpar naměřený vs. vypočítaný



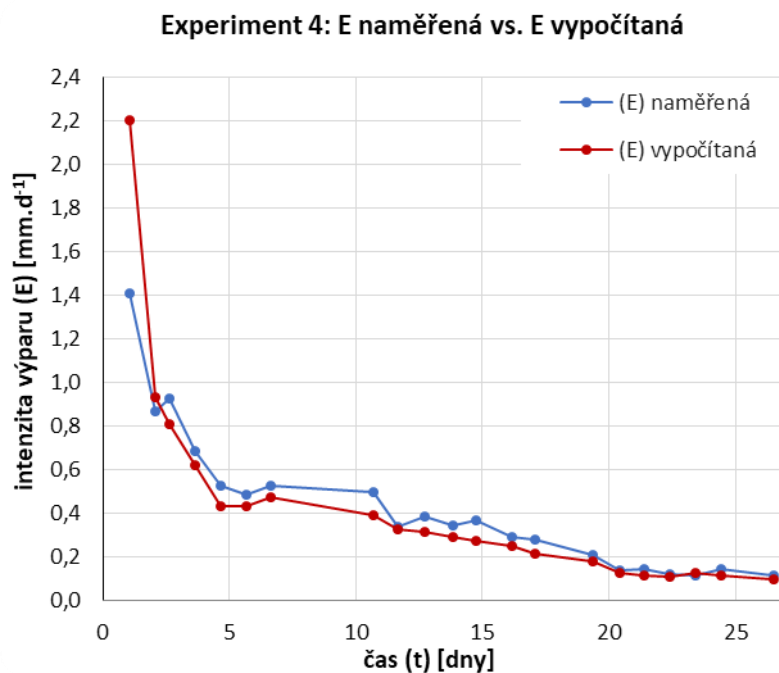
Obr. 42: Experiment 2 - Grafické zobrazení vývoje kumulativního výparu naměřeného a vypočítaného v čase t .



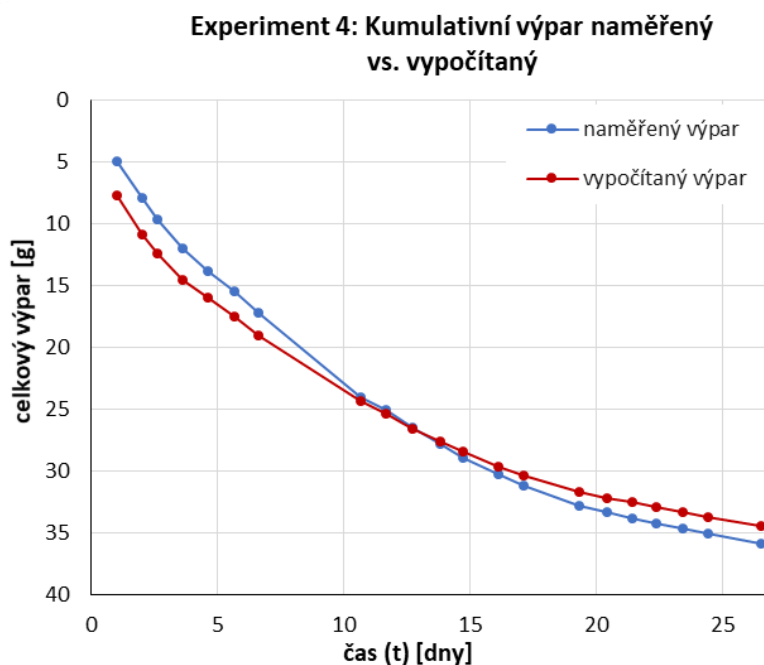
Obr. 43: Experiment 3 - Grafické zobrazení vývoje intenzity výparu E naměřené a intenzity výparu vypočítané v čase t .



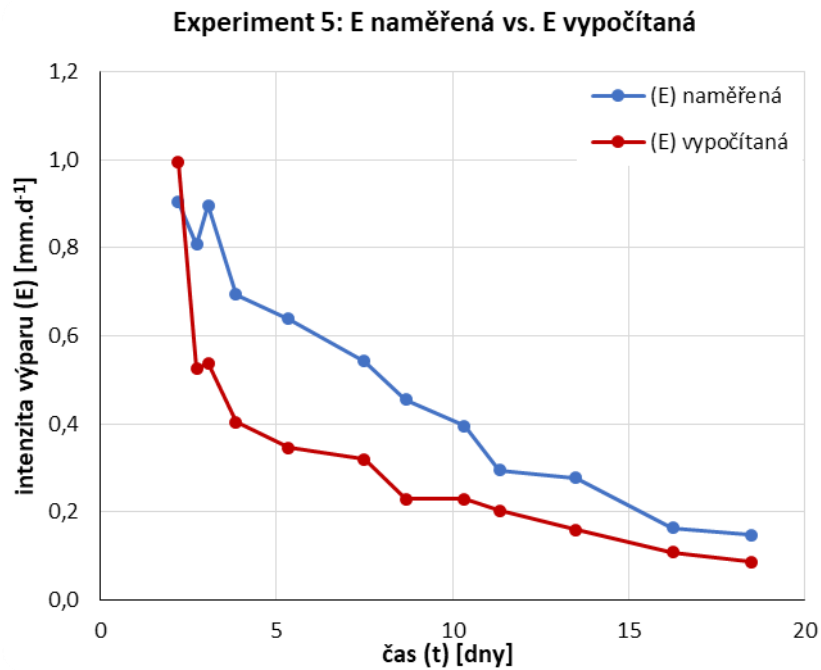
Obr. 44: Experiment 3 - Grafické zobrazení vývoje kumulativního výparu naměřeného a vypočítaného v čase t .



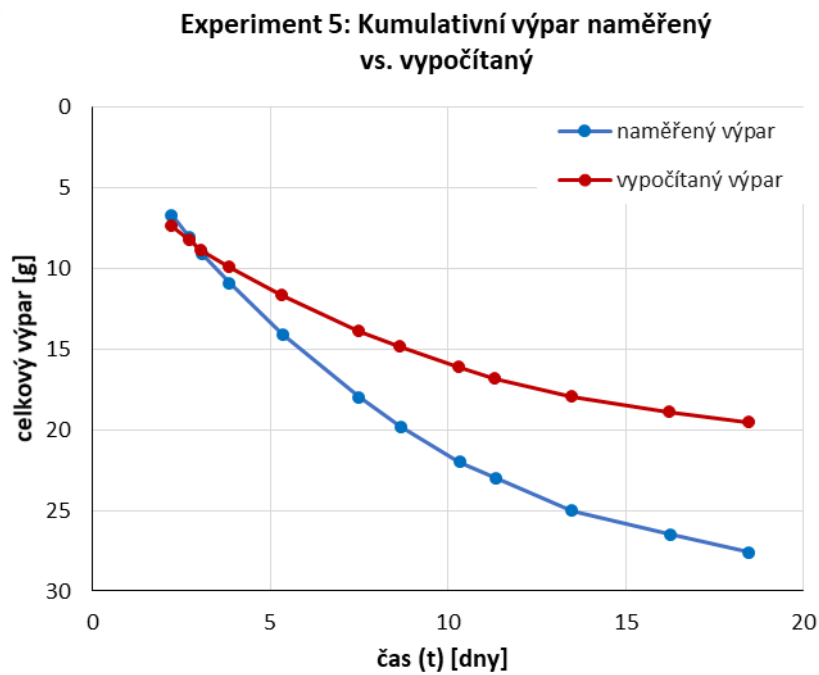
Obr. 45: Experiment 4 - Grafické zobrazení vývoje intenzity výparu E naměřené a intenzity výparu vypočítané v čase t .



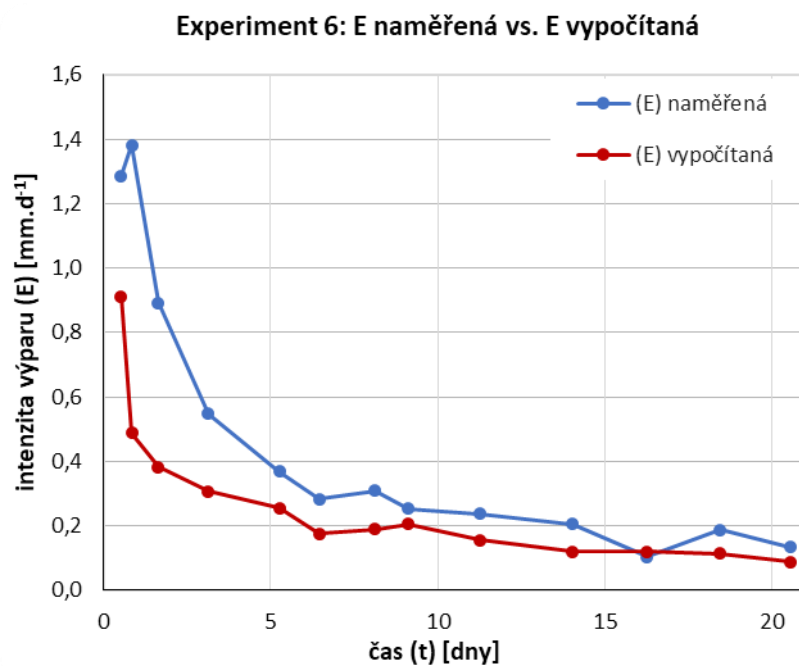
Obr. 46: Experiment 4 - Grafické zobrazení vývoje kumulativního výparu naměřeného a vypočítaného v čase t .



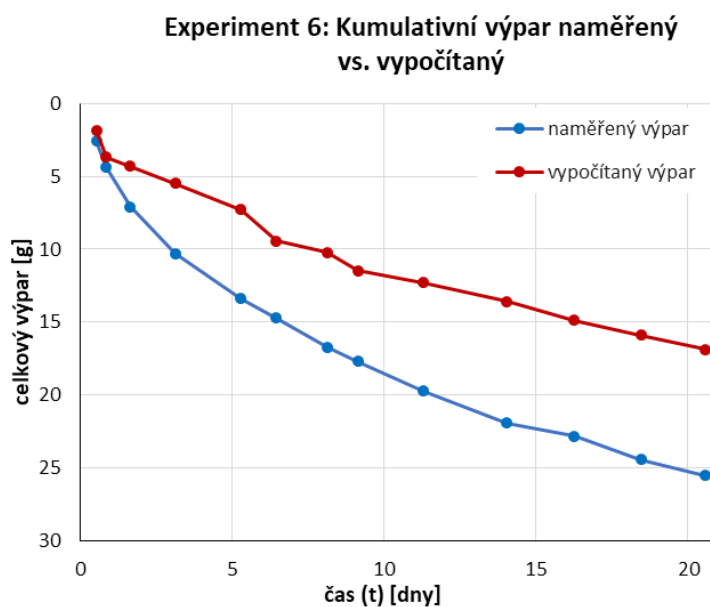
Obr. 47: Experiment 5 - Grafické zobrazení vývoje intenzity výparu E naměřené a intenzity výparu vypočítané v čase t .



Obr. 48: Experiment 5 - Grafické zobrazení vývoje kumulativního výparu naměřeného a vypočítaného v čase t .



Obr. 49: Experiment 6 - Grafické zobrazení vývoje intenzity výparu E naměřené a intenzity výparu vypočítané v čase t .



Obr. 50: Experiment 6 - Grafické zobrazení vývoje kumulativního výparu naměřeného a vypočítaného v čase t .

Napříč všemi experimenty 1–6 jsem stanovil vypočítaný a naměřený výpar pro celkem 82 jednotlivých časových období. Celkový kumulativní vypočítaný výpar (na konci experimentu) byl ve 100 % případů podhodnocený oproti měřenému. Pro jednotlivá dílčí časová období byl výpar napříč všemi experimenty spíše podhodnocený. Vypočítaný výpar byl podhodnocený oproti měřenému výparu v 83 % případů, což odpovídá 68 případům z celkových 82 jednotlivých dílčích časových období. Pouze v 17 % případů byl vypočítaný výpar nadhodnocený. Pro dílčí časová období, kdy byl vypočítaný výpar podhodnocený, byla relativní odchylka oproti měřenému výparu v průměru 24 %.

4.7 Srovnání měření a výpočtů intenzity výparu v horninách

Pro tři vybrané vzorky (PÚ, JOR a SR) jsem měl k dispozici součinitel difuzní vodivosti od svého školitele (tabulka 9). Ten jsem využil k výpočtům intenzity výparu (kapitola 3.6). Mohl jsem tedy pro tyto vzorky vypočítat intenzitu výparu [mm/den] pro jednotlivá časová období. Tyto výpočty jsem následně srovnal s naměřenými hodnotami intenzity výparu z kapitoly 4.4. Jednotlivé výpočty intenzity výparu jsem ještě přepočítal na výpar [g] pro jednotlivá dílčí časová období a vypočítané hodnoty výparu [g] jsem srovnal s přímým měřeným výparem [g] za stejná dílčí časová období. Tyto výsledky popisují grafy na obr. 51–56. Při porovnání jsem stanovil relativní odchylky, relativní odchylky v absolutní hodnotě a případně jejich průměry obdobně, jak popisují v předchozí kapitole 4.6.

Průběh vypočítané intenzity výparu pro všechny horninové vzorky poměrně dobře sedí s měřenými hodnotami. V obou případech (vypočítaná i měřená) intenzita výparu postupně klesá v čase, kdy na konci experimentů (po 6–10 dnech v závislosti na době trvání příslušného experimentu) nabývá pouhých 1–6 % z původní počáteční hodnoty tak, jak se snižovala hloubka výparové fronty v čase. Relativní odchylka v absolutní hodnotě vypočítané intenzity výparu od té měřené byla (v průměru za celý experiment) pro jednotlivé horninové vzorky 75 až 300 % (193 % v průměru pro všechny experimenty, pro kterou odpovídá vyjádření v rozdílu 0,28 mm/den) (tabulka 11).

Relativní odchylka celkového výparu naměřeného a vypočítaného za celé sledované období se na konci měření horninových vzorků pohybovala od 37 do 120 %. Lze tedy říci, že ve srovnání s pískem se jedná o větší rozdíly mezi výpočty a měřením, zároveň však

bylo provedeno daleko menší množství měření a celkový výparový proces tak popisují v nižším detailu než u písku.

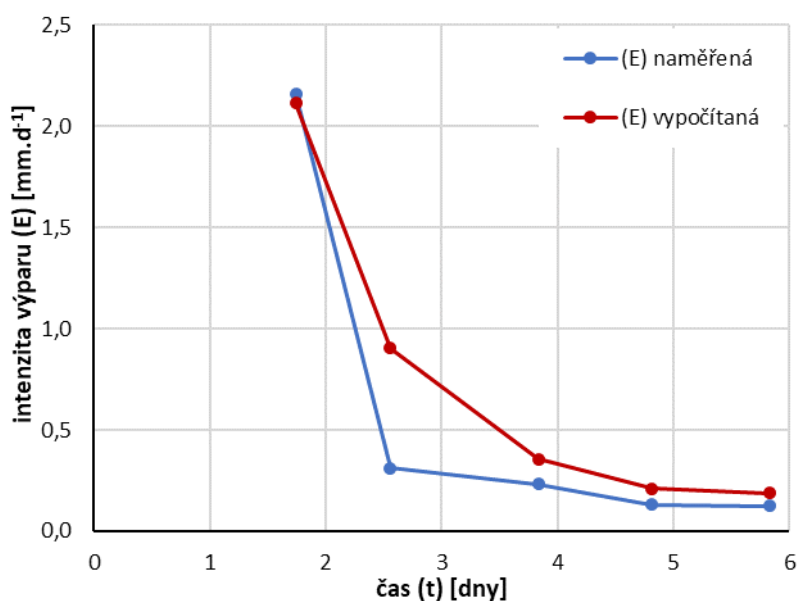
Tabulka 11: Přehled relativních odchylek v absolutní hodnotě pro vypočítané a měřené intenzity výparu a odchylek pro celkový výpar Horninové vzorky SR, JOR a PÚ

Vzorek	Relativní odchylka vypočítané a naměřené intenzity výparu v absolutní hodnotě [%]			Rozdíl vypočítané a měřené intenzity výparu v absolutní hodnotě [mm/den]			Rozdíl celkového výparu v absolutní hodnotě [g]	Relativní odchylka celkových výparů [%]
	min.	max.	průměr	min.	max.	průměr		
SR	23,9	189,4	75,3	0,061	0,592	0,275	3,97	36,8
JOR	55,1	554,2	200,6	0,063	0,479	0,168	2,99	119,7
PÚ	33,6	950,3	300,0	0,145	0,958	0,433	4,89	47,97

Vzorek SR

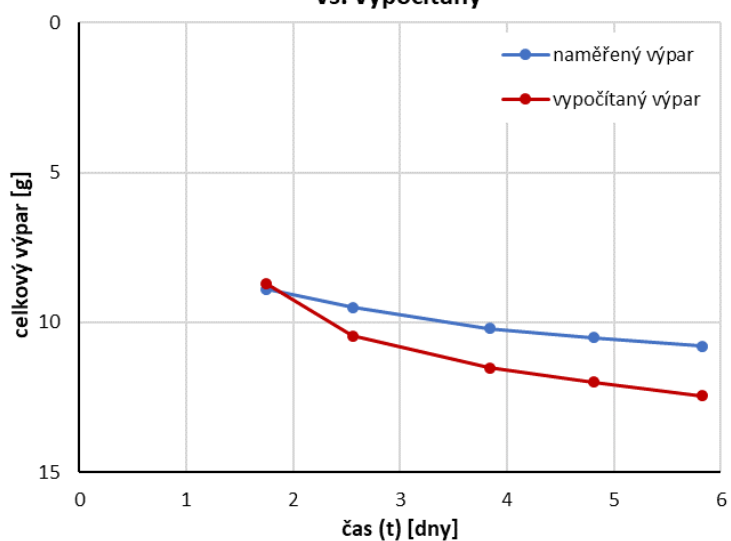
Minimální hodnota relativní odchylky v absolutní hodnotě pro vzorek SR byla 23,9 %, maximální 189,4 % a průměrná 75,3 %. Přestože se jedná v procentuálním vyjádření o vysoké hodnoty, v absolutním vyjádření se jedná o rozdíl maximálně 0,59 mm/den, v průměru pak pouze 0,28 mm/den. Rozdíl celkového vypočítaného a naměřeného výparu na konci experimentu činil 3,97 g (z celkového měřeného výparu 10,8 g), tj. relativní odchylka celkového výparu je 37 %.

Vzorek SR: E naměřená vs. E vypočítaná



Obr. 51: Vzorek SR – Grafické zobrazení vývoje intenzity výparu E naměřené a intenzity výparu vypočítané v čase t .

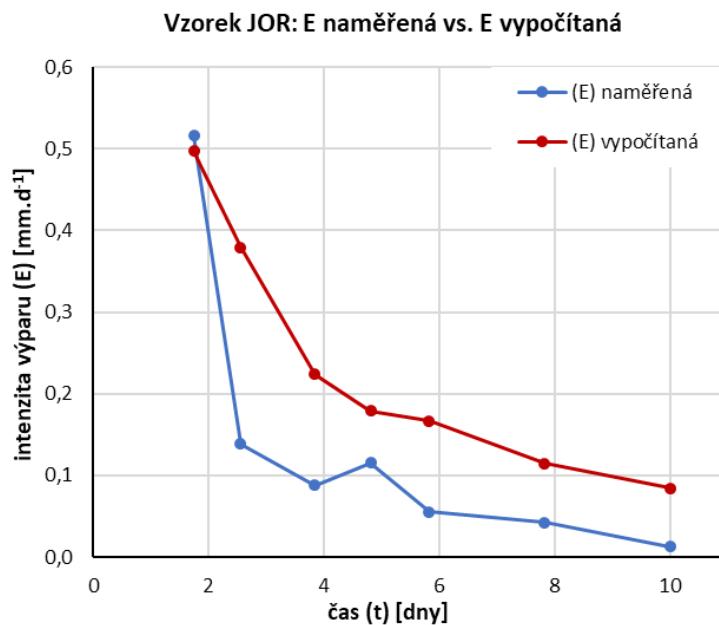
Vzorek SR: Kumulativní výpar naměřený vs. vypočítaný



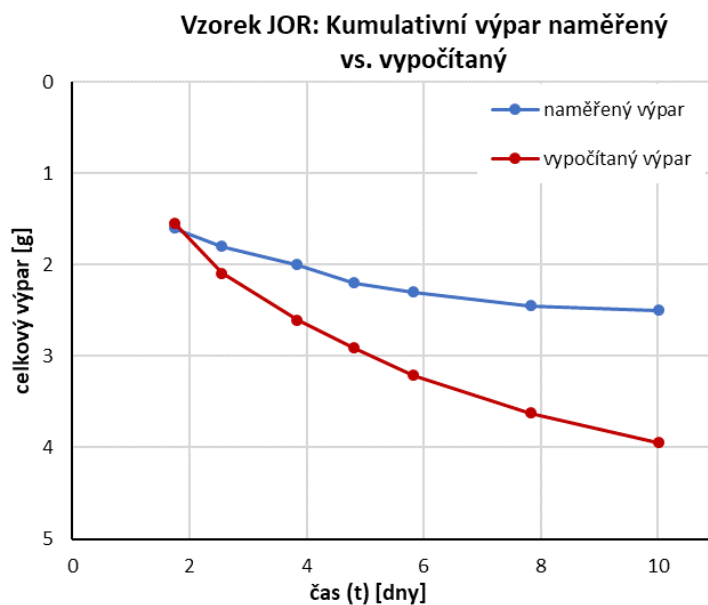
Obr. 52: Vzorek SR – Grafické zobrazení vývoje kumulativního výparu naměřeného a vypočítaného v čase t .

Vzorek JOR

Minimální hodnota relativní odchylky v absolutní hodnotě pro vzorek JOR byla 55,1 %, maximální 554,2 % a průměrná 200,6 %. Přestože se v procentuálním vyjádření opět jedná o vysoké hodnoty, v absolutním vyjádření se jednalo o rozdíl v minimu 0,06 mm/den, maximálně 0,48 mm/den a průměrně o 0,17 mm/den. Stojí za povšimnutí, že maximální relativní odchylka a maximální rozdíl v absolutním vyjádření neodpovídají stejnému časovému období, protože maximální relativní odchylka nastala až v konečné fázi výparu, kdy intenzita výparu již nedosahovala vysokých hodnot. Rozdíl celkového vypočítaného a naměřeného výparu na konci experimentu činil 3 g (z celkového měřeného výparu 2,5 g), tj. relativní odchylka je 120 %.



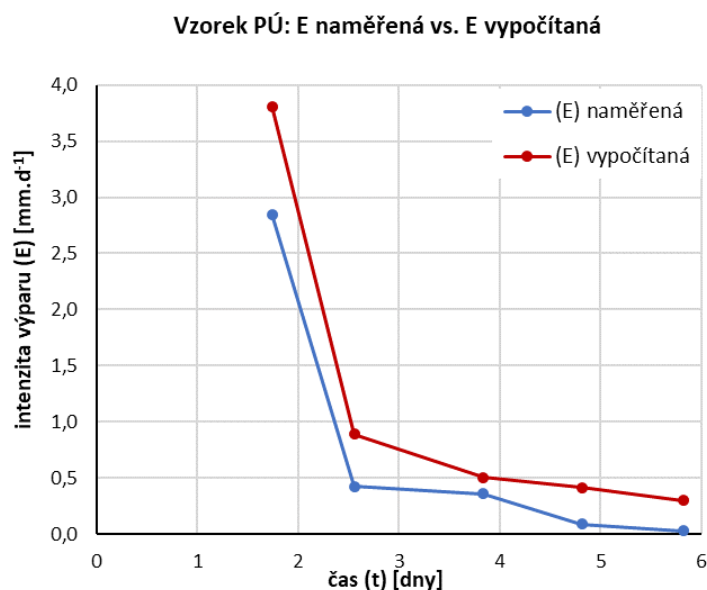
Obr. 53: Vzorek JOR - Grafické zobrazení vývoje intenzity výparu E naměřené a intenzity výparu vypočítané v čase t .



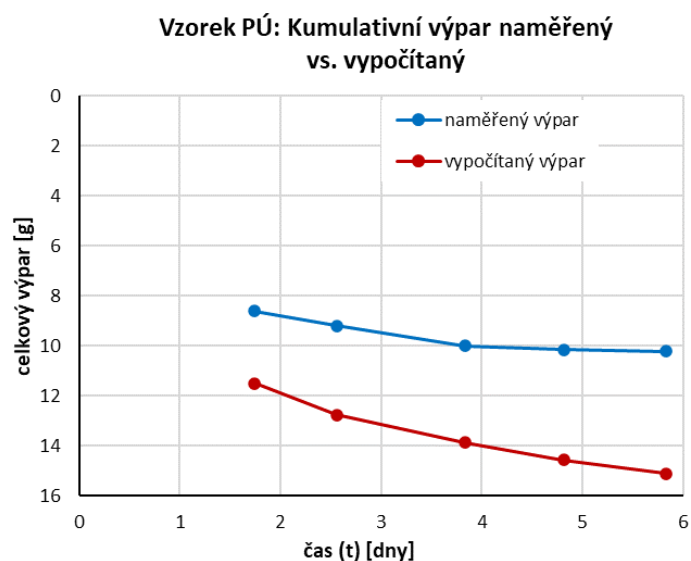
Obr. 54: Vzorek JOR - Grafické zobrazení vývoje kumulativního výparu naměřeného a vypočítaného v čase t .

Vzorek PÚ

Minimální hodnota relativní odchylky v absolutní hodnotě pro vzorek PÚ byla 33,6 %, maximální 950,3 % a průměrná 300 %. I v absolutním vyjádření se u vzorku PÚ jedná o poměrně velký rozdíl mezi výpočty a měřeními – minimální rozdíl byl 0,15 mm/den, maximální byl 0,96 mm/den a průměrný rozdíl mezi výpočty a měřeními pro všechna dílčí měřená období byl 0,43 mm/den. Zde opět hodnoty maximální relativní odchylky a maximálního rozdílu v absolutním vyjádření neodpovídají stejnému časovému období, protože maximální dosažená relativní odchylka nastala v konečné fázi experimentu, kdy intenzita výparu již byla nízká, oproti tomu maximální rozdíl mezi výpočtem a měřeními v mm/den nastal při vysokých intenzitách výparu. Rozdíl celkového vypočítaného a naměřeného výparu na konci experimentu činil 4,9 g (z celkového měřeného výparu 10,2 g), tj. 48 % z celkového výparu.



Obr. 55: Vzorek PÚ - Grafické zobrazení vývoje intenzity výparu E naměřené a intenzity výparu vypočítané v čase t .



Obr. 56: Vzorek PÚ - Grafické zobrazení vývoje kumulativního výparu naměřeného a vypočítaného v čase t .

Napříč všemi třemi experimenty s horninovými vzorky (SR, JOR a PÚ) jsem stanovil vypočítaný a naměřený výpar pro celkem 17 jednotlivých časových období. Celkový kumulativní vypočítaný výpar (na konci experimentu) byl pro všechny vzorky oproti měření podhodnocený ve 100 % případů. Pokud beru v úvahu jednotlivá dílčí měřená období, vypočítaný výpar byl oproti měření podhodnocený taktéž ve 100 % případů. Ani v jednom z dílčích sledovaných časových obdobích tedy nenastala situace, že by vypočítaná intenzita výparu byla stejná či nadhodnocena oproti měření.

5 Diskuse

5.1 Využití jehlové metody v písku a horninách

Pro stanovení hloubky výparové fronty jsem využíval jehlovou metodu, přičemž jsem navazoval na metodiku popsanou Weissem et al. (2020). V mých měřeních jsem sondu jehlové metody nechával měřit v písku po dobu 1 až 4 minut v závislosti na hloubce výparové fronty – pro hlubší měření bylo potřeba ponechat jehlu v písku déle. Domnívám se, že toto není ve skutečnosti způsobeno hloubkou výparové fronty, ale vlhkostí, a tím pádem množstvím vody těsně pod úrovní výparové fronty dostupné pro rozpouštění uraninu nalepeného na jehlovou sondu. V raných fázích experimentu vlhkost písku byla vyšší a měření probíhalo rychleji než na konci experimentu. Toto zjištění odpovídá publikaci Weisse et al. (2020), kde se přímo píše, že stanovení hloubky jehlovou metodou trvá v rozmezí jedné až patnácti minut v závislosti na vlhkosti materiálu. V případě horninových vzorků bylo 5 minut dostačujících pro detekci jasného barevného rozhraní na jehle, a to bez ohledu na hloubku výparové fronty.

Z opakovaného měření hloubky výparové fronty během výparového experimentu z křemenného písku vyplývá následující. Shodnost (opakovatelnost) měření hloubky výparové fronty pomocí jehlové metody je 2,0 mm, což je srovnatelné s odečtem hloubky výparové fronty pomocí změny roztoku barviva uraninu, jejíž shodnost (opakovatelnost) dle mých měření je 1,3 mm. Platí, že tato shodnost je vyšší za nižších hloubek výparové fronty, což může opět být dáno vyšší vlhkostí, tím snazším a tím pádem i více jednoznačným rozlišením barevných zón na jehlové sondě. Rozdíl v hodnotách hloubky výparové fronty podle změny roztoku barviva uraninu a podle jehlové metody je v průměru 2 mm, což odpovídá přesnosti jehlové metody deklarované pro měření v horninách (Weiss et al. 2020). V horninových vzorcích jsem ovšem hodnoty výparové fronty získané z jehlové metody neověřoval pomocí roztoku uraninu.

5.2 Součinitel difuzní vodivosti pro písek

Průměrná hodnota součinitel difuzní vodivosti se pro wetcupy TP1 až TP4 pohybovala od $3,98 \times 10^{-11}$ s do $4,26 \times 10^{-11}$ s. Do výpočtů intenzity výparu jsem použil hodnoty

z wetcupů TP2 a TP4, protože jejich způsoby nasypání (typ 1 a typ 2) odpovídaly způsobu nasypání experimentů 1-6 a zároveň byly jejich vypočítané hodnoty dostatečně reprezentativní pro dosazení do výpočtů.

Naměřený součinitel difuzní vodivosti pro wetcup TP3 (tabulka 9) jsem nevyužil pro žádný z uvedených výpočtů v této práci. Důvodem je fakt, že žádný z výparových experimentů 1-6 nebyl připraven zhutněním jako wetcup TP3. Výsledná hodnota součinitele difuzní vodivosti pro tento wetcup TP3 sloužila pouze pro porovnání s ostatními výslednými hodnotami měřených wetcupů. Hodnotu součinitele difuzní vodivosti pro TP3 jsem očekával nejnižší ze všech, protože TP3 byl připraven zhutněním a prostor mezi zrny písku, umožňující proudění vodní páry, by měl být tedy menší než u ostatních wetcupů. To je v rozporu s výsledky měřeného wetcupu TP1 připraveným volným způsobem nasypání (typ 2), pro který hodnota součinitele difuzní vodivosti vyšla menší než pro zhutnělý TP3. Jako nejpravděpodobnější vysvětlení se mi jeví fakt, že součinitel difuzní vodivosti pro TP1, který vyšel ze všech nejnižší, tak byl z nějakého důvodu chybně změřen. Z tohoto důvodu jsem nepoužil pro výpočty ani hodnotu z wetcupu TP1. Oproti tomu wetcup TP4, kde byl písek taktéž jako v případě TP1 nasypán volně (typ 2), měl TP4 součinitel difuzní vodivosti vyšší než zhutnělý wetcup TP3, což se mi jeví logické. Navíc, hodnota součinitele difuzní vodivosti z wetcupu TP4 dává výrazně lepší shodu mezi výpočty a měřeními intenzity výparu. Ze všech těchto důvodů jsem se rozhodl wetcup TP1 ve výpočtech nepoužít.

5.3 Přesnost výpočtů intenzity výparu z písku

V rámci své práce jsem provedl analýzu přesnosti výpočtů intenzity výparu z písku, která zahrnovala zhodnocení rozsahu relativních odchylek napříč experimenty 1–6. Relativní odchylka v absolutní hodnotě vypočítané a měřené intenzity výparu se pohybovala od 0,8 % do 64,7 % (v průměru všemi experimenty 23,1 %). V absolutním vyjádření šlo o rozdíl mezi výpočty a měřeními 0,002 až 0,97 mm/den (v průměru 0,12 mm/den).

Takovou shodu mezi výpočty a měřeními hodnotím jako velmi dobrou, zejména pokud vezmeme v úvahu dynamiku měřené intenzity výparu, která se napříč všemi experimenty pohybovala v rozmezí od 0,08 mm/den do 1,67 mm/den s průměrnou hodnotou 0,43 mm/den.

Nicméně pro experimenty 5 a 6 byla přesnost výpočtů výrazně nižší než pro ostatní experimenty. Výparové vzorky pro tyto dva experimenty byly připraveny odlišným způsobem (typ nasypání 1) než pro experimenty 1–4 (typ nasypání 2). Domnívám se, že vyšší nepřesnost výpočtů pro experimenty 5 a 6 mohla být způsobena nepřesně změřeným součinitelem difuzní vodivosti pro wetcup s typem nasypání 1, respektive se mi nemuselo povést připravit wetcup do klimakomory stejným způsobem, jakým jsem připravoval vzorky pro výparové experimenty 5 a 6. Do výpočtů dosazovaný součinitel difuzní vodivosti tak nemusel odpovídat těmto vzorkům.

V reakci na tuto situaci jsem se pro experimenty 5 a 6 rozhodl spočítat iterací metody nejmenších čtverců takový součinitel difuzní vodivosti, aby relativní odchylka mezi výpočty a měřením byla co nejmenší. Tento postup mi umožnil nalézt ideální hodnotu součinitele difuzní vodivosti $7,11 \times 10^{-11}$ s a tento součinitel jsem uvažoval, že by mohl být skutečným součinitelem difuzní vodivosti pro způsob nasypání typu 1. Po dosažení součinitele difuzní vodivosti pro experiment 5 klesla relativní odchylka (v absolutní hodnotě) pro celkový výpar z původních 29 % na 18,4 %. Pro experiment 6 klesla relativní odchylka celkového výparu z původních 40,6 % před dosažením na 0,8 % po dosažení.

5.4 Přesnost výpočtů intenzity výparu z horninového prostředí

Analýzu přesnosti výpočtů intenzity výparu z naměřených hloubek výparové fronty jehlovou metodou jsem provedl i pro horninové vzorky. Zahrnovala zhodnocení rozsahu relativní odchylky vypočítané intenzity výparu vůči měřené intenzitě výparu, a to pro tři horninové vzorky (SR, JOR, PÚ).

Napříč všemi horninovými vzorky, pro jednotlivá měřená období, se relativní odchylka v absolutní hodnotě pohybovala od 24 % do 950 % (v průměru 193 %). Je nutné zdůraznit, že hodnota 950 % se objevila ke konci experimentu, kdy intenzita výparu byla relativně nízká, tudíž absolutní rozdíl mezi výpočtem a měřením byl pouze 0,27 mm/den. Rozdíl mezi vypočítanou a naměřenou intenzitou výparu se pohyboval napříč všemi vzorky od 0,06 mm/den do 0,96 mm/den (v průměru pro všechna dílčí měřená období pak 0,28 mm/den). Nicméně i tak dle mého názoru se v průměru jedná o poměrně dobrý odhad intenzity výparu, s ohledem na velký rozsah měřené intenzity výparu, která se pohybovala v rozmezí od 0,01 mm do 2,9 mm/den s průměrnou hodnotou 0,45 mm/den.

V porovnání s tímto velkým rozsahem měřené intenzity výparu, se průměrný rozdíl vypočítané a měřené intenzity výparu 0,28 mm/den, jeví stále jako slušná přesnost výpočtu intenzity výparu.

Oproti experimentům s pískem byla minimální hodnota relativní odchylky pro horniny v průměru 5× vyšší, maximální hodnota relativní odchylky v průměru 12× vyšší a pokud srovnám průměrné hodnoty relativních odchylek, tak ty byly v průměru 8× vyšší pro horniny než pro písek. Výsledky relativních odchylek tedy ukazují větší nepřesnosti ve výpočtech intenzity výparu u hornin než u písku, a to konzistentně napříč všemi vzorky a jednotlivými měřenými obdobími. Poukazují tím pádem i na možné větší nepřesnosti v měření úrovně výparové fronty v horninách oproti písku. Přestože průměrná měřená intenzita výparu pro všechna dílčí období byla pouze o 0,02 mm/den u horninových vzorků vyšší oproti písku, průměrná maximální měřená intenzita výparu byla o 0,71 mm/den u hornin vyšší. Tento velký rozdíl maximálních hodnot může být částečně způsoben měřením v raném období druhé výparové fáze, kdy je intenzita výparu vysoká a nepřesnost jehlové metody 2 mm tedy může způsobovat velké rozdíly ve výpočtech intenzity výparu, a to i v relativním vyjádření (z důvodu mělké hloubky výparové fronty viz obr. 57).

Výsledky relativních odchylek horninových vzorků jsem porovnal s výsledky odchylek pro 10 litologií ze Slavíka et al. (2023). Pro mé vzorky vychází relativní odchylka v průměru 193 %, což je 3× více než relativní odchylka pro všechny použité vzorky ve studii Slavíka et al. (2023), která činila pouze 65,5 %. Studie Slavíka et al. (2023) využívala, taktéž jako já, litologii JOR. V mé práci vycházela relativní odchylka intenzity výparu v průměru 201 %, zatímco v práci Slavíka et al. (2023) vycházela zhruba 5× menší pro hodnotu 39 %.

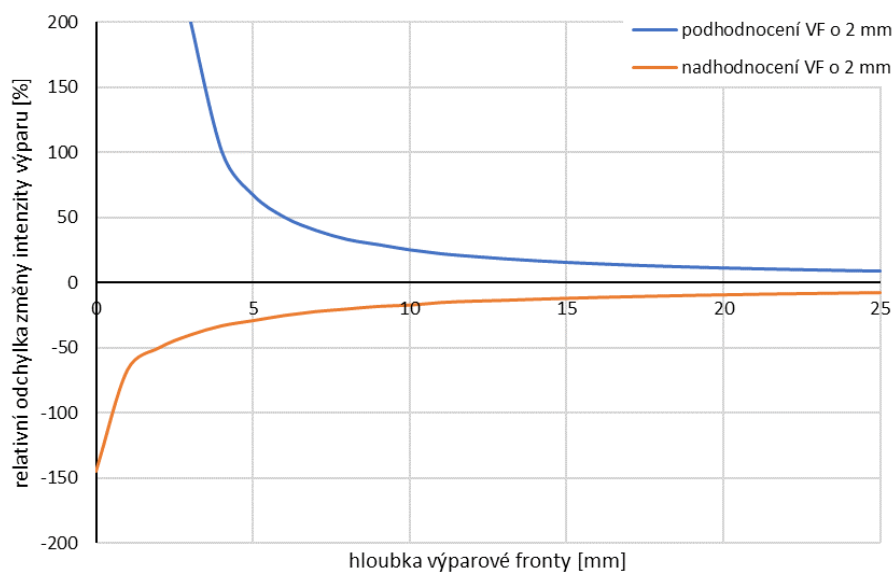
Ukazuje se tak, že má shoda vypočítané a naměřené intenzity výparu je výrazně nižší než v případě předchozí výparové studie Slavíka et al. (2023). Zde je ovšem nutné poznamenat, že v předchozí studii nebyly pro výpočet intenzity výparu použity hodnoty hloubky výparové fronty odečtené pomocí jehlové metody. V předchozí studii byla hloubka výparové fronty pevně stanovena, nehybná, definovaná mocností vzorku, kterému byla předepsána suchá přívrchová vrstva v celém jeho objemu. Tato hloubka výparové fronty byla navíc výrazně vyšší než v mém případě (až 4,5 cm, ve srovnání s mými hloubkami výparové fronty pod cca 2,5 cm ve všech případech). Nepřesnost

ve vypočítané intenzitě výparu tedy mohl způsobit i vliv špatně odečtené hloubky výparové fronty z jehly v rané fázi měření. Chyba měření hloubky výparové fronty v několika prvních milimetrech pod povrchem může totiž způsobit relativní odchylku až stovky procent, viz obr. 57 v následující kapitole.

5.5 Vliv přesnosti měření hloubky výparové fronty na výpočty intenzity výparu

Jehlovou metodu s její udávanou přesností 2 mm lze považovat za jeden z nejpřesnějších způsobů, jak měřit hloubku výparové fronty, jak vyplývá ze studie Weisse et al. (2020). Pro pochopení bližšího vztahu mezi hloubkou výparové fronty a výpočtem intenzity výparu je potřeba si uvědomit, že vztah těchto veličin je řízen mocninnou funkcí $y = ax^{-1}$, kde y je intenzita výparu, a je konstanta a x je hloubka výparové fronty. To znamená, že pokud se hloubka výparové fronty zvýší o řád, tak se intenzita výparu o řád sníží (fig. 8a v Slavík et al. 2020). To je důvod, proč se konstantní chyba měření hloubky výparové fronty projevuje na chybě ve výpočtu intenzity výparu nelineárně. Směrem do větších hloubek pod povrchem je chyba v procentuálním vyjádření menší a menší. Proto jen nepatrná chyba v měření v těsné blízkosti pod povrchem může mít obrovský vliv na vypočítanou hodnotu intenzity výparu.

Například v hloubkách prvních milimetrů pod povrchem případné podhodnocení o 2 mm vede k chybě výpočtu intenzity výparu až 200 %, zatímco v hloubce 6 mm pod povrchem už stejné podhodnocení o 2 mm znamená chybu ve výpočtu intenzity výparu už jen 50 %, a v 10 mm už pouze 25 %, viz obr. 57. Další důsledek toho, že se jedná o mocninnou funkci, je ten, že nadhodnocení hloubky výparové fronty o 2 mm má poněkud menší dopad na chyby ve výpočtu intenzity výparu než v případě podhodnocení. Například, pokud se hloubka výparové fronty nadhodnotí o 2 mm v hloubce 6 mm pod povrchem, znamená to chybu ve výpočtu intenzity výparu 25 % (ve srovnání s 50 % pro hloubku 6 mm v případě podhodnocení).



Obr. 57: Diagram relativní odchylky intenzity výparu při nadhodnocení nebo podhodnocení hloubky výparové fronty o 2 mm.

Nejnižší hloubka výparové fronty napříč experimenty s pískem byla 5 mm u experimentu 3. Z mých naměřených dat pro experiment 3 vyplývá, že hloubka 5 mm odpovídá relativní odchylce měřené a vypočtené intenzity výparu 58 %. Z grafu na obr. 57 vychází, že pro 5 mm při podhodnocení měřené hloubky výparové fronty o 2 mm by byla relativní odchylka intenzit výparu 67 %. Pokud by tedy byla nejistota výpočtů výparu dána pouze odečtem hloubky výparové fronty, měřil jsem ji v tomto případě s větší přesností, než je uváděná přesnost jehlové metody 2 mm. Pro experiment 5 se relativní odchylka intenzity výparu rovnala 10 % pro hloubku 9,3 mm, což dobře odpovídá přesnosti jehlové metody 2 mm. Pro experiment 6 byla nejmenší hloubka výparové fronty 10,5 mm s odpovídající relativní odchylkou intenzit výparu 52 %, což naopak poukazuje na nadhodnocení měřené výparové fronty o více než 2 mm.

V případě horninových vzorků, pro vzorek SR vycházela relativní odchylka intenzity výparu 24 % pro hloubku 3 mm, což odpovídá velmi dobré přesnosti měření s odchylkou menší než 2 mm. Pro vzorek JOR vycházela relativní odchylka 93 % pro hloubku 5 mm, což poukazuje na podhodnocení měření o více než 2 mm (2 mm odpovídá 67 % v hloubce 5 mm, takže odchylka od přesnosti jehlové metody je vyšší). Pro vzorek PÚ vycházela relativní odchylka 34 % pro hloubku 3 mm, což odpovídá velké přesnosti měření hloubky výparové fronty, s podhodnocením měření menším než 2 mm.

Přestože relativní odchylka intenzity výparu pro mělké výparové fronty horninových vzorků vycházela poměrně dobře, u hlouběji naměřených výparových front (více než 8 mm), mé relativní odchylky intenzity výparu jsou u těchto vzorků již výrazně vyšší. Relativní odchylka intenzity výparu pro tyto hloubky výparové fronty byla 2×, dokonce až 100× vyšší (v průměru 19× vyšší) než by odpovídalo chybě uvedené na obr. 57. Domnívám se, že to může být způsobeno nižší přesností odečtu výparové fronty, než je 2 mm, a to z důvodu nižších vlhkostí v pozdních fázích výparových experimentů. Podobně jako z analýzy výparové fronty v písku se tedy ukazuje, že za nižších vlhkostí v porézním prostředí je jehlová metoda o něco méně spolehlivá (u písku jen nepatrně, u hornin výrazně více). Je však nutné zdůraznit, že čím hlouběji je výparová fronta pod povrchem, tím nižší je intenzita výparu v absolutním čísle.

Zdá se tedy, že kombinace Fickova zákona a jehlové metody má tu nevýhodu, že v případě, kdy je výparová fronta u povrchu (v mělkých vrstvách pod povrchem) a intenzita výparu je tudíž vysoká, tak se chyba měření hloubky výparové fronty (2 mm) poměrně značně projevuje v nejistotě vypočítané intenzity výparu. Tato nejistota s hloubkou výparové fronty dle teorie klesá, moje vlastní měření ovšem naznačují, že s rostoucí hloubkou výparové fronty se snižuje přesnost v jejím odečtu. To však paradoxně má nižší vliv na chybu výpočtu intenzity výparu v absolutním čísle.

5.6 Doporučení pro budoucí výzkum

Tato práce může sloužit jako podklad pro další výzkum v ověřování jehlové metody pro stanovení hloubky výparové fronty a výpočty intenzity výparu. Navázat lze například použitím odlišných nesoudržných materiálů (zemin a písků) s rozličnou zrnitostí, protože v této práci se zabývám pouze jedním druhem vytríděného písku s konkrétním rozsahem velikosti zrn. Nabízí se tedy otázka, zda by jehlová metoda fungovala i na jiných typech dobře (či špatně) vytríděného materiálu, jehož zrna by se mohla zaklínit a zamezit tak průchod uraninové sondy do porézního prostředí, nebo případně ověřit funkčnost jehlové metody pro nízkou (či vysokou) pórovitost materiálu.

Další možností se nabízí otestovat jehlovou metodu, pokud bude na povrchu sypkého či horninového materiálu hydrofobní (například biogenní) krusta (Slavík et al. 2017). Je možné spočítat intenzitu výparu a porovnat, zda jehlová metoda může sloužit

s dostatečnou přesností pro vzorky s krustou, a mimo jiné analyzovat, jak hydrofobní krusta celkově ovlivní výpar.

Dalším prostorem ke zkoumání může být měření jehlovou metodou v prostředí s větší koncentrací solí v pórové vodě a ověřit, že jehlová metoda je schopná detekovat výparovou frontu i ve vysoce zasoleném prostředí, případně ověřit, jaká je přesnost jehlové metody a potažmo následných výpočtů intenzity výparu. Díky schopnosti soli vázat vodu by mohlo dojít k ovlivnění vlhkosti v okolí úrovně výparové fronty, kde se sůl bude nejvíce akumulovat, a tím by mohlo být těžší přesně stanovit výparovou frontu.

Navázat lze stavebními materiály a ověřením, zda v nich lze jehlovou metodou sledovat výparový proces, což v kombinaci s použitím Fickova zákona pro výpočet intenzity výparu může přispět k lepšímu porozumění a sledování zvětrávacích procesů historických budov (Foraboschi a Vanin 2014; Benavente et al. 2018).

V neposlední řadě by mohlo být zajímavé porovnat výpočty intenzity výparu spočítané z hodnot stanovených jehlovou metodou s výpočty vycházejícími z hloubky výparové fronty stanovené nějakou geofyzikální metodou, např. elektrickou odporovou tomografií, kterou lze použít díky detekci ostrého nárůstu elektrického odporu v přechodu do suché přípovrchové vrstvy, a tuto náhlou změnu v odporu interpretovat jako výparovou frontu. Přesnost elektrické odporové tomografie je velmi citlivá na míře rozpuštěné a srážené soli v porézním prostředí, a tak se nabízí porovnat přesnost jehlové metody a této geofyzikální metody na vzorcích porézního prostředí s rozpuštěnými solemi (Mol a Viles 2013; Wilhelm et al. 2016).

6 Závěr

Výpar z porézního prostředí ovlivňuje celou řadu přírodních procesů – hydrologických, klimatických či biologických a zvětrávacích. Velikost výparu z porézního prostředí je ovlivněna celou řadou faktorů. Ve své práci jsem se soustředil na tzv. druhou výparovou fázi, kdy intenzita výparu je ovlivněna teplotou a vlhkostí vzduchu nad výparným povrchem, propustností porézního materiálu pro vodní páru a hloubkou tzv. výparové fronty, která rozděluje porézní prostředí na hlouběji uloženou kapilární vrstvu a mělčeji uloženou suchou přípovrchovou vrstvu. V předchozích pracích byla intenzita výparu pro druhou výparovou fázi vypočítána pomocí Fickova zákona. Ve své diplomové práci pro určení hloubky výparové fronty používám tzv. jehlovou metodu, která využívá barevné reakce barviva fluoresceinu sodného na kontaktu s kapalnou vodou. Cílem mé práce bylo pomocí Fickova zákona, s využitím dat hloubky výparové fronty zjištěné jehlovou metodou, vypočítat intenzitu výparu z 6 vzorků písčité zeminy a 3 vzorků různých hornin. Tyto výpočty jsem následně srovnal s přímým měřením intenzity výparu. Dílčím cílem bylo otestovat využití jehlové metody pro určení hloubky výparové fronty v písčité zemině a v 12 různých horninových vzorcích.

Dosažené výsledky:

- Jehlovou metodou jsem úspěšně stanovil hloubku výparové fronty v nesoudržném porézním materiálu – křemenném písku z lokality Střeleč, a to pro šest experimentů v laboratorních podmínkách. Rovněž se mi podařilo stanovit hloubku výparové fronty jehlovou metodou i pro 12 různých horninových vzorků.
- Shodnost (opakovatelnost) měření hloubky výparové fronty ve vzorcích písku pomocí jehlové metody byla průměrně 2 mm. Porovnání hodnot měřených jehlovou metodou s nezávislou metodou detekce hloubky výparové fronty ze změny barvy roztoku fluoresceinu se ukázalo, že rozdíl mezi oběma těmito metodami je pro písek v průměru 1,7 mm. Velikost tohoto rozdílu se zdá být nezávislá na hloubce výparové fronty pod povrchem pískovce. Tato zjištění jsou podobná s předchozí udávanou přesností jehlové metody v horninách (2 mm).
- Pro všechny výparové experimenty s pískem i horninami platí, že s rostoucí hloubkou výparové fronty klesala měřená intenzita výparu. Vypočítané hodnoty intenzity

výparu (dle Fickova zákona, s využitím hodnot z jehlové metody) taktéž klesají s rostoucí hloubkou výparové fronty.

- Pro výparové experimenty s pískem byla vypočítaná intenzita výparu v 83 % případů podhodnocená, celkový vývoj vypočítané intenzity výparu však velmi dobře sledoval trend měřené intenzity výparu v průběhu experimentů. Relativní odchylka vypočítané intenzity výparu od té měřené byla v průměru 23 % (0,12 mm/den).
- Při výparových experimentech z hornin byla vypočítaná intenzita výparu v 100 % případů podhodnocená, celkový vývoj výpočtů ovšem opět poměrně dobře sleduje trend měřené intenzity výparu. Relativní odchylka pro horninové vzorky byla v průměru 193 % (0,28 mm/den). Pokud je mi známo, jedná se o první kombinaci Fickova zákona a jehlové metody ověřenou pomocí přímého měření intenzity výparu.

Nižší shoda mezi výpočty a měřeními pro horninové vzorky je pravděpodobně dána sníženou přesností odečtu hloubky výparové fronty jehlovou metodou pro případy, kdy je nízká vlhkost v hornině, a tím menší množství vody dostupné pro rozpouštění prášku fluoresceinu na jehlové sondě. Konstantní chyba měření jehlovou metodou se projevuje na chybě ve výpočtu intenzity výparu nelineárně v závislosti na aktuální hloubce výparové fronty. Z mých výsledků a následné diskuze vyplývá, že kombinace Fickova zákona a jehlové metody má tu nevýhodu, že v případě, kdy je výparová fronta v mělkých vrstvách pod povrchem (první milimetry) a intenzita výparu je tudíž vysoká, tak se chyba měření hloubky výparové fronty (2 mm) poměrně značně projevuje v nejistotě vypočítané intenzity výparu (až 200 %). Tato nejistota s hloubkou výparové fronty dle teorie klesá, moje vlastní měření ovšem naznačují, že s rostoucí hloubkou výparové fronty se může snižovat přesnost v jejím odečtu (kvůli nižší vlhkosti v prostředí). Tato snížená přesnost jehlové metody přesto má poměrně nízký vliv na chybu výpočtu intenzity výparu v absolutním čísle, protože v takovém případě je již intenzita výparu relativně nízká.

Seznam použité literatury

ALLAN, Richard G, Luis S. PEREIRA, Dirk RAES a Martin SMITH, 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. B.m.: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. 300 str. ISBN 92-5-104219-5.

ASTM F2420-05, 2011. Standard Test Method for Determining Relative Humidity on the Surface of Concrete Floor Slabs Using Relative Humidity Probe Measurement and Insulated Hood (Withdrawn 2014).

BAKER, Paul H., David BAILLY, Mike CAMPBELL, Graham H. GALBRAITH, R. Craig MCLEAN, Noé POFFA a Chris H. SANDERS, 2007. The application of X-ray absorption to building moisture transport studies. *Measurement*. 40(9-10), 951-959. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2006.10.016

BEDIENT, Philip B., H. S. RIFAI a Charles J. NEWELL, 1994. Ground Water Contamination: Transport and Remediation. B.m.: PTR Prentice Hall. 568 str. ISBN 978-0-13-362592-9.

BENAVENTE, D., J. MARTINEZ-MARTINEZ, N. CUETO, S. ORDOÑEZ a M. A. GARCIA DEL CURA, 2018. Impact of salt and frost weathering on the physical and durability properties of travertines and carbonate tufas used as building material. *Environmental Earth Sciences*. 77(4), 147. ISSN 1866-6299. Dostupné z: doi:10.1007/s12665-018-7339-0

BOWEN, Irwing S., 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*. 27(6), 779-787. ISSN 0031-899X.

BRUTHANS, Jiří, Michal FILIPPI, Martin SLAVÍK a Eliška SVOBODOVÁ, 2018. Origin of honeycombs: Testing the hydraulic and case hardening hypotheses. *Geomorphology*. 303, 68-83. ISSN 0169-555X. Dostupné z: doi:10.1016/j.geomorph.2017.11.013

BUCKINGHAM, E., 1914. On Physically Similar Systems; Illustrations of the Use of Dimensional Equations. *Physical Review*. 4(4), 345-376. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRev.4.345

BUZÁDY, Andrea, János EROSTYÁK a Gabor PAAL, 2006. Determination of uranine tracer dye from underground water of Mecsek Hill, Hungary. *Journal of biochemical and biophysical methods*. 69, 207-14. Dostupné z: doi:10.1016/j.jbbm.2006.05.009

CORTI, Thierry, Veruska MUCCIONE, Pamela KÖLLNER-HECK, David N. BRESCH a Sonia I. SENEVIRATNE, 2009. Simulating past droughts and associated building damages in France. *Hydrology and Earth System Sciences*. 13(9), 1739-1747. ISSN 1027-5606. Dostupné z: doi:10.5194/hess-13-1739-2009

CORTI, Thierry, Marc WÜEST, David N. BRESCH a Sonia I. SENEVIRATNE, 2011. Drought-induced building damages from simulations at regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 11(12), 3335-3342. ISSN 1561-8633. Dostupné z: doi:10.5194/nhess-11-3335-2011

CUI, Yu-Jun a Jorge G. ZORNBERG, 2008. Water Balance and Evapotranspiration Monitoring in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. *Geotechnical and Geological Engineering*. 26(6), 783–798. ISSN 0960-3182, 1573-1529. Dostupné z: doi:10.1007/s10706-008-9198-z

FICK, Adolf, 1855. Ueber Diffusion. *Annalen der Physik*. 170(1), 59–86. ISSN 1521-3889. Dostupné z: doi:10.1002/andp.18551700105

FORABOSCHI, Paolo a Alessia VANIN, 2014. Experimental investigation on bricks from historical Venetian buildings subjected to moisture and salt crystallization. *Engineering Failure Analysis*. 45, 185–203. ISSN 1350-6307. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2014.06.019

FRANZEN, Christoph a Mirwald PETER, 2004. Moisture content of natural stone: Static and dynamic equilibrium with atmospheric humidity. *Environmental Geology*. 46, 391-401. Dostupné z: doi:10.1007/s00254-004-1040-1

FREDLUND, D. G. a H. RAHARDJO, 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils: Fredlund/Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. 926 str. ISBN 978-0-470-17275-9. Dostupné z: doi:10.1002/9780470172759

GAVILÁN, Pilar a Freddy CASTILLO-LLANQUE, 2009. Estimating reference evapotranspiration with atmometers in a semiarid environment. *Agricultural Water Management*. 96(3), 465–472. ISSN 0378-3774. Dostupné z: doi:10.1016/j.agwat.2008.09.011

GOMEZ, Stephen R., Robert A. PARKER, James A. DOSMAN a Helen H. MCDUFFIE, 1992. Respiratory Health Effects of Alkali Dust in Residents Near Desiccated Old Wives Lake. *Archives of Environmental Health: An International Journal*. 47(5), 364–369. ISSN 0003-9896. Dostupné z: doi:10.1080/00039896.1992.9938376

HALL, C., W. D. HOFF a M. R. NIXON, 1984. Water movement in porous building materials—VI. Evaporation and drying in brick and block materials. *Building and Environment*. 19(1), 13–20. ISSN 0360-1323. Dostupné z: doi:10.1016/0360-1323(84)90009-X

HALL, Christopher, William HOFF a Maurizio DONDI, 2012. Moisture Expansivity of Fired-Clay Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 95(4), 1204-1207. Dostupné z: doi:10.1111/j.1551-2916.2012.05109.x

HILLEL, D., 2004. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press, Amsterdam, 494 str. ISBN: 0-12-348655-6.

HUININK, H. P., L. PEL a K. KOPINGA, 2004. Simulating the growth of tafoni. *Earth Surface Processes and Landforms*. 29(10), 1225–1233. ISSN 1096-9837. Dostupné z: doi:10.1002/esp.1087

IDSO, Sherwood B., Robert J. REGINATO, Ray D. JACKSON, Bruce A. KIMBALL a Fumiko S. NAKAYAMA, 1974. The three stages of drying of a field soil. *Soil Science Society of America Journal*. 38(5), 831–837. ISSN 0361-5995. Dostupné z: doi:10.2136/sssaj1974.03615995003800050037x

- JANDORA, Jan, 2005. *Hydraulika a hydrologie*. Studijní opora. 188 str. FAST VUT v Brně.
- KÄSS, Werner a H. BEHRENS, 1998. *Tracing technique in geohydrology*. Rotterdam: A.A. Balkema. 582 str. ISBN 978-90-5410-444-5.
- KUMAR, Navneet a Jaywant H. ARAKERI, 2018. Evaporation From Confined Porous Media Due to Controlled IR Heating From Above. *Transport in Porous Media*. 125(2), 311–340. ISSN 1573-1634. Dostupné z: doi:10.1007/s11242-018-1120-4
- LA IGLESIA, Á., Victoria GONZÁLEZ GARCÍA, Victoria LÓPEZ-ACEVEDO CORNEJO a Cristóbal VIEDMA MOLERO, 1997. Salt crystallization in porous construction materials I. Estimation of crystallization pressure. *Journal of Crystal Growth*. 177, 111-118. ISSN 0022-0248. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-0248(96)01072-X
- LAL, Rattan a Manoj K. SHUKLA, 2004. *Principles of Soil Physics*. Boca Raton: CRC Press. 736 str. ISBN 978-0-429-21533-9. Dostupné z: doi:10.4324/9780203021231
- LEHMANN, Peter, Shmuel ASSOULINE a Dani OR, 2008. Characteristic lengths affecting evaporative drying of porous media. *Physical Review E*. 77(5), 056309. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevE.77.056309
- MANNING, John C., 2016. *Applied Principles of Hydrology: Third Edition*. B.m.: Waveland Press, Inc. 276 str. ISBN 978-1-4786-3479-9.
- MAREŠ, Jakub, 2019. Určení hloubky výparové fronty v pískovcích a dalších porézních materiálech: využití jehel obalených uraninem. Diplomové práce. Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky, Univerzita Karlova, Praha. Dostupné z: <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/106935>
- MAREŠ, Jakub, Jiří BRUTHANS, Tomáš WEISS a Michal FILIPPI, 2022. Coastal honeycombs (Tuscany, Italy): Moisture distribution, evaporation rate, tensile strength, and origin. *Earth Surface Processes and Landforms*. 47(6), 1653–1667. ISSN 1096-9837. Dostupné z: doi:10.1002/esp.5340
- MEES, Florias a Arieh SINGER, 2006. Surface crusts on soils/sediments of the southern Aral Sea basin, Uzbekistan. *Geoderma*. 136, 152–159. Dostupné z: doi:10.1016/j.geoderma.2006.03.019
- MOL, Casper L. a John H. VILES, 2013. Exposing drying patterns: using electrical resistivity tomography to monitor capillary rise in sandstone under varying drying conditions. *Environmental Earth Sciences*. 68(6), 1647–1659. ISSN 1866-6280, 1866-6299. Dostupné z: doi:10.1007/s12665-012-1858-x
- OKI, Taikan a Shinjiro KANAÉ, 2006. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Science*. 313(5790), 1068–1072. Dostupné z: doi:10.1126/science.1128845
- OR, Dani, Peter LEHMANN, Ebrahim SHAHRAEENI a Nima SHOKRI, 2013. Advances in Soil Evaporation Physics—A Review. *Vadose Zone Journal*. 12(4), 1-16. ISSN 1539-1663. Dostupné z: doi:10.2136/vzj2012.0163

PUPPALA, Anand J., Thammanoon MANOSUTHKIJ, Soheil NAZARIAN a Laureano R. HOYOS, 2011. Threshold moisture content and matric suction potentials in expansive clays prior to initiation of cracking in pavements. *Canadian Geotechnical Journal*. 48(4), 519–531. ISSN 0008-3674, 1208-6010. Dostupné z: doi:10.1139/t10-087

SHIRGURE, Parameshwar, 2012. Evaporation modeling with multiple linear regression techniques – a review. *Scientific Journal of Review*. 1(6), 170–182. ISSN 2322-2433.

SHOKRI, N., P. LEHMANN a D. OR, 2008. Effects of hydrophobic layers on evaporation from porous media. *Geophysical Research Letters*. 35(19). ISSN 1944-8007. Dostupné z: doi:10.1029/2008GL035230

SHOKRI, N. a D. OR, 2011. What determines drying rates at the onset of diffusion controlled stage-2 evaporation from porous media? *Water Resources Research*. 47(9). ISSN 0043-1397. Dostupné z: doi:10.1029/2010WR010284

SHOKRI, N., Muhammad SAHIMI a D. OR, 2012. Morphology, propagation dynamics and scaling characteristics of drying fronts in porous media. *Geophysical Research Letters*. 39(9). ISSN 1944-8007. Dostupné z: doi:10.1029/2012GL051506

SHOKRI, Nima, Peter LEHMANN a Dani OR, 2009. Critical evaluation of enhancement factors for vapor transport through unsaturated porous media. *Water Resources Research*. 45(10). ISSN 1944-7973. Dostupné z: doi:10.1029/2009WR007769

SLAVÍK, Martin, 2014. Propustnost přírodních povrchů hruboskalského pískovce ve skalních městech pro vodní páru a intenzita výparu. Diplomová práce. Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky, Univerzita Karlova, Praha. Dostupné z: <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/72199>

SLAVÍK, Martin, 2019. Vlhkostní charakteristiky přirozených pískovcových výchozů. Disertační práce. Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky, Univerzita Karlova, Praha. Dostupné z: <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/108151>

SLAVÍK, Martin, Jiří BRUTHANS, Michal FILIPPI, Jana SCHWEIGSTILLOVÁ, Lukáš FALTEISEK a Jaroslav ŘIHOŠEK, 2017. Biologically-initiated rock crust on sandstone: Mechanical and hydraulic properties and resistance to erosion. *Geomorphology*. 278, 298–313. ISSN 0169-555X. Dostupné z: doi:10.1016/j.geomorph.2016.09.040

SLAVÍK, Martin, Jiří BRUTHANS a Jana SCHWEIGSTILLOVÁ, 2023. Evaporation rate from surfaces of various granular rocks: Comparison of measured and calculated values. *Science of The Total Environment*. 856, 159114. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.159114

SLAVÍK, Martin, Jiří BRUTHANS, Tomáš WEISS a Jana SCHWEIGSTILLOVÁ, 2020. Measurements and calculations of seasonal evaporation rate from bare sandstone surfaces: Implications for rock weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*. 45 (12), 2965-2981. Dostupné z: doi:10.1002/esp.4943

SONG, Weikang, Yu-Jun CUI, Anh-Minh TANG a W.-Q DING, 2013. Development of a Large-Scale Environmental Chamber for Investigating Soil Water Evaporation. *Geotechnical Testing Journal*. 36, 20120142. Dostupné z: doi:10.1520/GTJ20120142

SONG, Wei-Kang, Yu-Jun CUI a Wei-Min YE, 2018. Modelling of water evaporation from bare sand. *Engineering Geology*. 233, 281–289. ISSN 00137952. Dostupné z: doi:10.1016/j.enggeo.2017.12.017

TETENS, Otto, 1930. Über einige meteorologische Begriffe. B.m.: Friedrich Vieweg & Sohn Akt.- Gesellschaft.

TINDALL, James A., James R. KUNKEL a Dean E. ANDERSON, 1999. *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*. B.m.: Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. p. 624. ISBN 978-0-13-660713-7.

VIITANEN, Hannu, Juha VINHA, Kati SALMINEN, Tuomo OJANEN, Ruut PEUHKURI, Leena PAAJANEN a Kimmo LÄHDESMÄKI, 2010. Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures. *Journal of Building Physics*. 33(3), 201–224. ISSN 1744-2591, 1744-2583. Dostupné z: doi:10.1177/1744259109343511

WEISS, Tomáš, Jakub MAREŠ, Martin SLAVÍK a Jiří BRUTHANS, 2020. A microdestructive method using dye-coated-probe to visualize capillary, diffusion and evaporation zones in porous materials. *Science of The Total Environment*. 704, 135339. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135339

WEISS, Tomáš, Martin SLAVÍK a Jiří BRUTHANS, 2018. Use of sodium fluorescein dye to visualize the vaporization plane within porous media. *Journal of Hydrology*. 565, 331-340. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2018.08.028

WIGGS, Giles F. S., Sarah L. O'HARA, Johannah WEGERDT, Joost VAN DER MEER, Ian SMALL a Richard HUBBARD, 2003. The dynamics and characteristics of aeolian dust in dryland Central Asia: possible impacts on human exposure and respiratory health in the Aral Sea basin. *The Geographical Journal*. 169(2), 142–157. ISSN 0016-7398. Dostupné z: doi:10.1111/1475-4959.04976

WILHELM, K., H. VILES a Ò. BURKE, 2016. The Influence of Salt on Handheld Electrical Moisture Meters: Can They Be Used to Detect Salt Problems in Porous Stone? *International Journal of Architectural Heritage*. 10(6), 735–748. ISSN 1558-3058. Dostupné z: doi:10.1080/15583058.2015.1109733

YAMANAKA, Tsutomu, Atsushi TAKEDA a Fumi SUGITA, 1997. A modified surface-resistance approach for representing bare-soil evaporation: Wind tunnel experiments under various atmospheric conditions. *Water Resources Research*. 33(9), 2117–2128. ISSN 1944-7973. Dostupné z: doi:10.1029/97WR01639

Seznam obrázků

Obr. 1	13
Obr. 2	15
Obr. 3	16
Obr. 4	19
Obr. 5	22
Obr. 6	23
Obr. 7	24
Obr. 8	24
Obr. 9	26
Obr. 10	26
Obr. 11	27
Obr. 12	28
Obr. 13	29
Obr. 14	29
Obr. 15	32
Obr. 16	32
Obr. 17	33
Obr. 18	33
Obr. 19	33
Obr. 20	34
Obr. 21	34
Obr. 22	34
Obr. 23	38
Obr. 24	38
Obr. 25	45
Obr. 26	46
Obr. 27	47
Obr. 28	47
Obr. 29	48
Obr. 30	50
Obr. 31	50

Obr. 32	51
Obr. 33	51
Obr. 34	52
Obr. 35	52
Obr. 36	53
Obr. 37	54
Obr. 38	54
Obr. 39	58
Obr. 40	58
Obr. 41	59
Obr. 42	59
Obr. 43	60
Obr. 44	60
Obr. 45	61
Obr. 46	61
Obr. 47	62
Obr. 48	62
Obr. 49	63
Obr. 50	63
Obr. 51	66
Obr. 52	66
Obr. 53	67
Obr. 54	68
Obr. 55	69
Obr. 56	69
Obr. 57	75

Seznam tabulek

Tabulka 1.....	18
Tabulka 2.....	18
Tabulka 3.....	21
Tabulka 4.....	21
Tabulka 5.....	34
Tabulka 6.....	39
Tabulka 7.....	42
Tabulka 8.....	44
Tabulka 9.....	55
Tabulka 10.....	57
Tabulka 11.....	65

Příloha

Příloha 1

Písek: Experiment 1		
Datum a čas	Váha [g]	Jehla [cm]
09.01.2021 13:30	513,3	-
10.01.2021 15:50	510,3	1,2
15.01.2021 9:10	502,8	2,1
18.01.2021 22:10	499,5	2,6
19.01.2021 23:00	498,8	2,5
21.01.2021 0:10	498,3	3,0
22.01.2021 0:30	497,9	3,1
23.01.2021 1:30	497,3	3,3

Příloha 2

Písek: Experiment 2				
Datum a čas	Váha [g]	Roztok 1 [cm]	Roztok 2 [cm]	Jehla [cm]
09.01.2021 13:30	494,5	-	-	-
10.01.2021 15:50	492,3	1,2	-	1,6
15.01.2021 9:10	487,2	2,4	2,0	2,3
17.01.2021 13:10	485,6	3,1	3,3	2,9
18.01.2021 22:10	484,5	4,0	3,8	3,3
19.01.2021 23:00	484,0	4,3	4,3	3,8
21.01.2021 0:10	483,5	4,3	4,5	3,6
22.01.2021 0:30	483,1	4,4	-	4,2

Příloha 3

Písek: Experiment 3					
Datum a čas	Váha [g]	Roztok 1 [cm]	Roztok 2 [cm]	Jehla 1 [cm]	Jehla 2 [cm]
18.03.2021 0:40	619,3	-	-	-	-
19.03.2021 2:00	613,4	0,7	0,8	0,6	0,4
20.03.2021 1:50	609,8	0,8	0,8	0,8	0,7
20.03.2021 15:40	607,8	-	-	1,2	1,1
21.03.2021 15:40	605,3	0,9	1,2	0,8	0,8
22.03.2021 16:00	603,3	1,0	1,2	1,1	1,0
23.03.2021 17:00	601,4	1,0	1,3	1,3	1,2
24.03.2021 16:00	599,5	1,6	1,6	1,5	1,5
28.03.2021 17:20	593,0	2,5	2,5	2,5	2,3
29.03.2021 16:25	591,8	2,3	2,3	2,7	2,3
30.03.2021 18:13	590,6	3,0	3,0	2,8	2,8
31.03.2021 21:03	589,3	3,4	3,4	3,3	3,3
01.04.2021 18:20	588,4	3,6	3,7	3,3	3,4
03.04.2021 4:20	587,0	4,0	4,0	3,7	3,6
04.04.2021 3:14	585,5	4,3	4,2	4,2	4,1
06.04.2021 9:03	583,8	4,7	4,7	4,5	4,8
07.04.2021 10:37	583,1	5,0	5,0	5,2	5,1
08.04.2021 10:39	582,7	5,2	5,2	5,5	4,9
09.04.2021 10:06	582,3	5,3	5,3	5,5	5,2
10.04.2021 10:48	581,8	5,7	5,8	5,2	5,0
11.04.2021 11:15	581,3	6,1	6,3	6,1	5,7
13.04.2021 13:10	580,4	7,1	7,2	7,2	6,6
14.04.2021 16:42	580,1	7,4	7,4	7,3	7,5

Příloha 4

Písek: Experiment 4			
Datum a čas	Váha [g]	Jehla 1 [cm]	Jehla 2 [cm]
18.03.2021 0:40	602,6	-	-
19.03.2021 2:00	597,6	0,8	0,4
20.03.2021 1:50	594,7	0,7	0,7
20.03.2021 15:40	592,9	0,9	0,9
21.03.2021 15:40	590,6	1,1	1,1
22.03.2021 16:00	588,8	1,1	1,2
23.03.2021 17:00	587,1	1,2	1,4
24.03.2021 16:00	585,4	1,6	1,7
28.03.2021 17:20	578,6	2,4	2,4
29.03.2021 16:25	577,5	2,2	2,3
30.03.2021 18:13	576,1	2,9	2,9
31.03.2021 21:03	574,8	3,2	3,4
01.04.2021 18:20	573,7	3,8	3,6
03.04.2021 4:20	572,3	4,0	3,6
04.04.2021 3:14	571,4	4,1	3,9
06.04.2021 9:03	569,8	4,5	4,5
07.04.2021 10:37	569,3	5,1	4,9
08.04.2021 10:39	568,8	5,5	4,8
09.04.2021 10:06	568,4	5,2	5,3
10.04.2021 10:48	568,0	5,9	5,4
11.04.2021 11:15	567,5	6,2	5,8
13.04.2021 13:10	566,7	7,4	8,1

Příloha 5

Písek: Experiment 5					
Datum a čas	Váha [g]	Roztok 1 [cm]	Roztok 2 [cm]	Jehla 1 [cm]	Jehla 2 [cm]
27.11.2021 6:20	594,5	-	-	-	-
29.11.2021 11:30	587,8	0,9	0,9	0,9	1,0
29.11.2021 23:55	586,4	1,1	1,1	1,0	0,8
30.11.2021 7:55	585,4	1,2	1,1	0,9	1,2
01.12.2021 2:30	583,6	1,4	1,7	1,6	1,6
02.12.2021 14:25	580,4	1,6	1,6	1,6	1,6
04.12.2021 18:00	576,5	1,9	1,9	2,1	2,0
05.12.2021 22:20	574,7	2,1	2,2	2,3	2,8
07.12.2021 14:15	572,5	2,5	2,6	2,5	2,5
08.12.2021 14:35	571,5	3,0	3,0	3,2	3,3
10.12.2021 18:15	569,5	4,3	3,4	4,1	4,3
13.12.2021 12:20	568,0	6,1	5,4	6,4	5,5
15.12.2021 17:40	566,9	-	7,0	-	7,0

Příloha 6

Písek: Experiment 6			
Datum a čas	Váha [g]	Jehla 1 [cm]	Jehla 2 [cm]
27.11.2021 6:20	661,3	-	-
29.11.2021 11:30	646,7	0,8	0,5
29.11.2021 23:55	644,1	1,0	1,1
30.11.2021 7:55	642,3	1,1	1,1
01.12.2021 2:30	639,6	1,7	1,7
02.12.2021 14:25	636,4	1,9	1,9
04.12.2021 18:00	633,3	2,7	2,6
05.12.2021 22:20	632,0	3,4	3,3
07.12.2021 14:15	630,0	2,9	2,6
08.12.2021 14:35	629,0	2,5	3,3
10.12.2021 18:15	627,0	4,6	4,8
13.12.2021 12:20	624,8	4,5	4,5
15.12.2021 17:40	623,9	4,9	4,8
17.12.2021 22:25	622,3	6,1	5,8
20.12.2021 1:10	621,2	8,0	8,0

Příloha 7

Datum a čas	Hornina: SR		Hornina: JOR		Hornina: PÚ	
	Váha [g]	Jehla [cm]	Váha [g]	Jehla [cm]	Váha [g]	Jehla [cm]
20.03.2022 23:25	186,4	-	182,5	-	130,4	-
22.03.2022 17:15	177,5	0,3	180,9	0,5	121,8	0,3
23.03.2022 12:45	176,9	0,6	180,7	0,8	121,2	1,0
24.03.2022 19:30	176,2	1,6	180,5	1,3	120,4	1,2
25.03.2022 18:55	175,9	2,3	180,3	1,5	120,3	1,6
26.03.2022 19:15	175,6	2,1	180,2	1,6	120,2	2,3
28.03.2022 19:15	-	-	180,1	2,4	-	-
30.03.2022 23:50	-	-	180,0	2,7	-	-