

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vývoj půdního miktrotensometru pro bodové měření tlakové výšky
vody**

Development of soil microtensiometer for point measurement of water
pressure head

Bc. Martina Holečková

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Sněhota Ph.D.

Praha 2017



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Holečková Jméno: Martina Osobní číslo: 396500
Zadávací katedra: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vývoj půdního mikrotensometru pro bodové měření tlakové výšky vody
Název diplomové práce anglicky: Development of soil microtensiometer for point measurements of water pressure head

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte detailní rešerši zaměřenou na měření tlakových výšek vody v půdním prostředí. Testujte sérii mikrotensometrů vyrobených různými technologiemi zpracování porézního prvku. Konkrétně zjistěte rozsah měření, reakční dobu mikrotensometru, vliv teploty na měření, přesnost a citlivost měření. Na základě provedných testů doporučte optimální technologii výroby mikrotensometru.

Ověřte funkčnost nově vyvinutého mikrotensometru v experimentu s infiltrací vody do strukturní půdy s přítomností makropórů. Výsledky diskutujte.

Seznam doporučené literatury:

Časopisy z databáze Web of Science a SCOPUS

Jméno vedoucího diplomové práce: Doc. Ing. Michal Sněhota Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 1.3.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2017
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

1.3.2017
Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně s pomocí uvedených použitých zdrojů informací a za odborného vedení doc. Ing. Michala Sněhoty Ph.D.. V případě řádné citace, souhlasím s použitím této práce ve smyslu zákona č. 121/2000 Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Martina Holečková

V Praze dne

.....

Poděkování

Ráda bych zde poděkovala vedoucímu této diplomové práce panu doc. Ing. Michalovi Sněhotovi Ph.D. za odborné vedení a poskytnutí mnoha cenných informací a rad.

Tato diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu Grantové agentury České republiky č. GAČR 17-06759S. Tato práce byla též podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS16/143/OHK1/2T/11.

Dále bych velmi ráda poděkovala programu Aktion, který mi umožnil 3-měsíční stáž na BOKU ve Vídni, svému vídeňskému vedoucímu Andreasovi Schwenovi za poskytnutí prostoru, zapůjčení měřicího zařízení a poskytnutí cenných rad během testování prototypů v laboratořích BOKU a Thomasovi Weningerovi za zaučení se zařízením Hyprop a pomocnou ruku, bylo-li to třeba.

Také děkuji své rodině za podporu v průběhu celého studia.

Abstrakt

V současné době neexistuje mnoho zařízení, které by byly schopny spolehlivě bodově měřit tlakovou výšku vody v pórovitém prostředí. Tato diplomová práce se zabývá vývojem mikrotenzometrů s průměrem propustných elementů 1,1 až 1,8 mm pro bodové měření tlakové výšky půdní vody a jejich následným testováním. Jednotlivé prototypy mikrotenzometru se liší průměrem a technologií zpracování porézního elementu. Měření tlaku v mikrotenzometru je zabezpečeno tenkým katéetrovým snímačem.

Testování nově vyvinutých mikrotenzometrů bylo prováděno s cílem zjištění přesnosti měření a rychlosti reakce mikrotenzometrů, dále pak určení rozsahu měření mikrotenzometrů a teplotní závislosti měření mikrotenzometru. Nakonec byly mikrotenzometry podrobeny pilotnímu měření tlakové výšky v půdním makropóru a jeho bezprostředním okolí.

Nově vyvinuté mikrotenzometry se osvědčily pro velmi přesné bodové měření tlakové výšky. Díky velmi krátké reakční době všech testovaných mikrotenzometrů lze měřit velmi rychlé změny tlakové výšky, na které mikrotenzometr reaguje takřka okamžitě. Navzdory nižší vstupní hodnotě vzduchu porézního elementu mikrotenzometrů, jejíž hodnota se pohybuje v rozmezí - 200 až - 400 hPa, je toto zařízení vhodné pro mnoho aplikací, kde je zapotřebí měřit na malém objemu. Byla prokázána zanedbatelná teplotní závislost měření mikrotenzometrem, která je v souladu s parametry tlakového čidla garantovanými výrobcem.

Nově vyvinuté mikrotenzometry se prokázaly jako robustní zařízení vhodné pro bodové měření tlakové výšky vody v laboratorních experimentech. Bylo dokázáno, že tímto zařízením lze měřit přímo v půdním makropóru i jeho bezprostředním okolí.

Klíčová slova: mikrotenzometr, testování, tlaková výška, makropór

Abstract

Currently there are not many devices that are able to measure the point pressure head of water in the porous media. This master thesis deals with the development of microtensiometers with porous element diameter ranging from 1,1 to 1,8 mm for point measurement of soil water pressure head and its subsequent testing. Individual microtensiometers vary with diameter and manufacturing technology of their permeable elements. The veterinary catheter pressure probe was used as a pressure sensor.

Testing of prototype microtensiometers was conducted especially with the aim of determining the measurement accuracy, speed of response, then range defining and temperature dependence of microtensiometer measurement. Finally the microtensiometers were subjected to pilot measurement of pressure head in the soil macropore and its immediate surroundings.

Results of the experiments have manifested the ability of newly developed microtensiometers to accurately measure pressure head. Thanks to its very low reaction time it is possible to detect very rapid variations of the pressure head, which microtensiometer reacts immediately on. Despite the lower air entry value that varies - 200 to - 400 hPa this device is suitable for many applications where it is necessary to measure very rapid changes in the pressure head in very small volumes. Only negligible temperature dependence of microtensiometer measurement has been demonstrated which is in accordance with the parameters of the catheter pressure sensor guaranteed by the manufacturer.

The newly developed microtensiometers proved to be robust devices suitable for measuring the pressure point water level in laboratory experiments. Ability of pressure head measurements directly in soil macropore and its immediate surroundings has been proven.

Keywords: microtensiometer, testing, pressure head, macropore

Obsah

Úvod	12
Cíle diplomové práce	14
1 Teorie	15
1.1 Voda v půdě	15
1.1.1 Vlhkost půdy	16
1.1.2 Metody měření půdní vlhkosti	17
1.1.3 Potenciál půdní vody	17
1.1.4 Metody měření půdního vodního potenciálu	20
1.2 Hydraulické charakteristiky půdy	23
1.2.1 Retenční čára půdní vlhkosti	23
1.2.2 Hydraulická vodivost	24
1.3 Hydrodynamika půdní vody	25
1.3.1 Rovnice kontinuity	25
1.3.2 Darcyho zákon	26
1.3.1 Darcy – Buckinghamův zákon	27
1.3.4 Richardsova rovnice pro nenasycené proudění	27
1.4 Infiltrace	28
1.4.1 Philipův model	28
1.4.2 Model Green-Ampt	28
1.5 Redistribuce	30
1.6 Preferenční proudění	30
1.7 Evaporace, evapotranspirace	31
2 Rešerše	32
2.1 Půdní tenzometry	32
2.2 Vývoj tenzometru	33
2.3 Použití tenzometru a jeho omezení	35
2.4 Výzkum makropórů a preferenčního proudění	38
3 Materiály a metodika experimentů	40
3.1 Popis prototypu mikrotenzometru	40
3.2 Technologie zpracování porézního elementu mikrotenzometru	41
3.3 Ověření přesnosti měření tlakového čidla	43
3.4 Zjištění přesnosti měření mikrotenzometru	43

3.5	Testování reakční doby mikrotenzometru	45
3.6	Zjištění rozsahu měření mikrotenzometru v půdních vzorcích	46
3.7	Stanovení teplotní závislosti měření mikrotenzometru.....	47
3.8	Pilotní měření mikrotenzometrem v půdním makropóru	48
4	Výsledky experimentů.....	50
4.1	Ověření přesnosti a citlivosti měření tlakového čidla.....	50
4.2	Zjištění přesnosti měření mikrotenzometru	52
4.3	Testování reakční doby mikrotenzometru	55
4.4	Zjištění rozsahu měření mikrotenzometru v půdních vzorcích	58
4.5	Stanovení teplotní závislosti měření mikrotenzometru.....	61
4.6	Pilotní měření mikrotenzometrem v půdním makropóru	62
5	Diskuze.....	65
6	Závěr.....	67
7	Seznam použitých zdrojů	69
	Literatura.....	69
	Internetové odkazy.....	74

Seznam obrázků:

Obr. 1.1:	<i>Ilustrace půdní vody z hlediska zaplnění půdních pórů.</i>	15
Obr. 1.2:	<i>Popis tenzometru pro měření půdního vodního potenciálu za použití různých snímačů tlaku.</i>	21
Obr. 1.3:	<i>Ilustrace zařízení HDS.</i>	22
Obr. 1.4:	<i>Ukázka psychrometru pro měření vysokých hodnot půdního potenciálu.</i>	23
Obr. 1.5:	<i>Retenční čára pro různé půdy</i>	24
Obr. 1.6:	<i>Hysterezní smyčka retenční čáry</i>	24
Obr. 1.7:	<i>Schematické vyjádření Darcyho zákona.</i>	26
Obr. 1.8:	<i>Zjednodušení modelu Green-Ampt</i>	29
Obr. 2.1:	<i>Základní popis půdního tenzometru.</i>	32
Obr. 2.2:	<i>Historické návrhy tenzometru</i>	33
Obr. 3.1:	<i>Popis prototypu mikrotenzometru</i>	41
Obr. 3.2:	<i>Série CT snímků porézních elementů jednotlivých mikrotenzometrů</i>	42
Obr. 3.3:	<i>Pracovní schéma experimentu zjištění přesnosti měření mikrotenzometru</i>	44
Obr. 3.4:	<i>Fotografie experimentální sestavy testování přesnosti měření mikrotenzometru</i>	44
Obr. 3.5:	<i>Pracovní schéma experimentu testování reakční doby mikrotenzometru</i>	45
Obr. 3.6:	<i>Fotografie experimentální sestavy testování reakční doby mikrotenzometru</i>	46
Obr. 3.7:	<i>Fotografie experimentálního set-upu při zjišťování rozsahu měření mikrotenzometru v půdním vzorku</i>	47
Obr. 3.8:	<i>Fotografie řezu půdního vzorku po vyjmutí tenzometru T5 a prototypu mikrotenzometru</i>	47
Obr. 3.9:	<i>Experimentální sestava uvnitř laboratorního inkubátoru.</i>	48
Obr. 3.10:	<i>Postupná příprava vzorku s uměle vytvořeným makropórem</i>	49

Obr. 4.1:	<i>Data prezentující přesnost měření tlakového čidla</i>	50
Obr. 4.2:	<i>Graficky znázorněný vztah mezi hodnotami úrovně vodního sloupce a hodnot tlakové výšky naměřené tlakovým čidlem.</i>	51
Obr. 4.3:	<i>Data naměřená při zjišťování přesnosti měření mikrotenzometru s označením MT1.</i>	52
Obr. 4.4:	<i>Data získaná během experimentu zjišťování přesnosti měření mikrotenzometru s označením MT2.</i>	53
Obr. 4.5:	<i>Data naměřená při zjišťování přesnosti měření mikrotenzometru s označením MT6.</i>	53
Obr. 4.6:	<i>Data naměřená při zjišťování přesnosti měření mikrotenzometru s označením MT7.</i>	54
Obr. 4.7:	<i>Porovnání přesnosti měření jednotlivých mikrotenzometrů.</i>	55
Obr. 4.8:	<i>Data naměřená při testování reakční doby mikrotenzometru MT1, porovnávána s komerčním tenzometrem T5.</i>	56
Obr. 4.9:	<i>Data naměřená při testování reakční doby mikrotenzometru MT2, porovnávána s komerčním tenzometrem T5.</i>	56
Obr. 4.10:	<i>Data naměřená při testování reakční doby mikrotenzometru MT6, porovnání s komerčním tenzometrem, který je součástí sondy Hyprop.</i>	57
Obr. 4.11:	<i>Data získaná při testování reakční doby mikrotenzometru MT7, srovnání komerčním tenzometrem, který je součástí sondy Hyprop.</i>	58
Obr. 4.12:	<i>Data naměřená při experimentu zjišťování rozsahu měření mikrotenzometru MT1 v půdních vzorcích.</i>	59
Obr. 4.13:	<i>Data získaná během experimentu zjišťování rozsahu měření mikrotenzometru MT2 v půdních vzorcích.</i>	59
Obr. 4.14:	<i>Data naměřená během experimentu zjišťování rozsahu měření mikrotenzometru MT6 v půdních vzorcích.</i>	60
Obr. 4.15:	<i>Data naměřená během experimentu zjišťování rozsahu měření mikrotenzometru MT7 v půdních vzorcích.</i>	61
Obr. 4.16:	<i>Grafické znázornění odchylek od průměrné hodnoty tlakové výšky v závislosti na rostoucí, resp. klesající teplotě</i>	61
Obr. 4.17:	<i>Naměřené hodnoty tlakové výšky v půdním makropóru a jeho bezprostředním okolí</i>	63
Obr. 4.18:	<i>Půdní vzorek s uměle vytvořeným makropórem a instalovanými mikrotenzometry</i>	64
Obr. 5.1:	<i>CT snímky porézního elementu mikrotenzometru MT6 zobrazující jeho prostorovou heterogenitu</i>	66

Seznam tabulek:

<i>Tab. 1.1:</i>	<i>Přehled vyjádření půdního potenciálu vzhledem k definici jednotky množství vody s příslušnými jednotkami</i>	20
<i>Tab. 1.2:</i>	<i>Hodnoty součinitele nasycené hydraulické vodivosti pro různé materiály</i>	24
<i>Tab. 2.1:</i>	<i>Přehled hodnot sacích tlaků měřitelných in-situ v zemědělsky běžně využívaných půdách.</i>	35
<i>Tab. 3.1:</i>	<i>Přehled testovaných tenzometrů a použitých technologií zpracování porézního elementu tenzometru</i>	42
<i>Tab. 3.2:</i>	<i>Přehled použitých půdních vzorků a jejich základní vlastnosti.</i>	46

Úvod

V heterogenních půdách voda často proudí preferenčně půdními makropóry a dalšími vodivými strukturami, zatímco proudění okolní půdní matricí je významně pomalejší. Tento jev označovaný jako preferenční proudění lze simulovat modely vycházejícími z konceptu duální propustnosti, ve kterém se řeší samostatně rychlé proudění cestami preferenčního proudění a pomalé proudění půdní matricí. Zároveň je přenosovým členem umožněna komunikace mezi těmito doménami. Určení hydraulických charakteristik domény preferenčního proudění stále představuje velkou výzvu, protože je velmi nesnadné měřit vlastnosti této domény odděleně od půdní matrice. Lepší představu o proudění v půdních makropórech a jiných zónách rychlého proudění v půdě by poskytla znalost tlakových poměrů v těchto strukturách v průběhu proudění. Hodnota tlaku v preferenční doméně indikovaná tenzometrem běžných rozměrů je ale určitou výslednicí tlaků v půdním makropóru i v půdní matrici (Finsterle 1998). Řešením by bylo provádět bodové měření tlaku vody přímo v půdním makropóru mikrotenzometrem velmi malých rozměrů.

Další možné uplatnění takových mikrotenzometrů lze nalézt také při výzkumu extrakce vody v kořenové zóně, archeologii nebo při obnově historických budov, kde je zapotřebí měřit tlakovou výšku vody s co možná nejmenším poškozením oblasti zájmu.

V současné době však neexistuje mnoho zařízení, které by byly schopny bodově měřit tlakovou výšku vody v pórovitém prostředí; nejmenší komerčně dostupný mikrotenzometr s průměrem porézního elementu (keramického) 2,1 mm je nabízen pod označením SDEC 220 (SDEC, Francie). Jde ovšem o keramický element propojený s tlakovým čidlem 1 m dlouhým potrubím. Tato koncepce vede nejspíše k příliš dlouhé reakční době tenzometru v důsledku pružnosti potrubí a velkému relativnímu objemu vody v systému. Z hlediska použití pro měření rychlých změn tlaku v makropórech se tento systém zdá nevhodný. Použití tenzometru SDEC také není dokumentováno v odborné literatuře. Běžně používaný je miniaturní tenzometr UMS T5 (UMS Inc, Německo) s průměrem porézní keramiky 5 mm. Tenzometr T5 má dobrou rychlost reakce a přesnost, nicméně jeho keramika je příliš velká pro realizaci bodových měření v makropórech.

V odborné literatuře lze nalézt také nekomerční řešení mikrotenzometrů. Segal et al. (2008) představili prototyp tzv. PTMT (pliable- tipped microtensiometer) určeného pro měření ve velmi malých objemech půdy- řádově v milimetrech krychlových s průměrem propustné membrány 1,1 mm. Tato propustná membrána sestává z hrotu pipety, který je vyplněn dvěma vrstvami geotextilie, mezi nimiž se nachází vrstva křemenného písku. Ve srovnání s konvenčním mikrotenzometrem PTMT disponuje díky lepšímu kontaktu propustné membrány s okolní zemínou velmi krátkou dobou odezvy. Nedostatkem PTMT je nízká kapacita propustné membrány pro vodu, což za sušších podmínek prudce snižuje hydraulickou vodivost a navíc vzhledem k materiálu pružné membrány PTMT je toto zařízení určené pouze na jednorázové použití.

Rozsah, přesnost a opakovatelnost měření, doba odezvy, a prostorové rozlišení jednotlivých tenzometrů jsou důležité aspekty pro jejich aplikaci a pro následnou analýzu měření tlakové výšky půdní vody (Or a Wraith, 2002). Přesné měření tenzometrem podléhá také teplotní závislosti, tu

lze charakterizovat dvěma směry jako vliv teploty půdní vody a vliv teplotní závislosti měřidla (Kirkham, 2005).

Cílem představovaného výzkumu je vyvinout prototyp mikrotenzometru s průměrem propustného elementu 1,1; 1,73 a 1,8 mm pro bodové měření tlakové výšky vody v půdě. Dalším cílem bylo podrobně testovat nový tenzometr, především posoudit jeho rozsah měření, rychlost reakce a teplotní závislost. Návrh tenzometru byl proveden na Katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakulty stavební, ČVUT v Praze. Testování probíhalo ve spolupráci Institute for Hydraulics and Rural Water Management, BOKU ve Vídni.

Cíle diplomové práce

Záměrem této práce je vyvinout prototyp mikrotenzometru pro bodové měření tlakové výšky vody v půdě. Stěžejním cílem bylo podrobně otestovat sérii prototypů mikrotenzometrů lišících se průměrem a technologií zpracování porézního prvku, především posoudit jejich přesnost a rozsah měření, rychlost reakce a teplotní závislost. Na základě provedených testů následně doporučit optimální technologii výroby. Dalším cílem pak bylo prokázat použitelnost mikrotenzometru pro bodové měření tlakové výšky vody v půdním makropóru a jeho bezprostředním okolí.

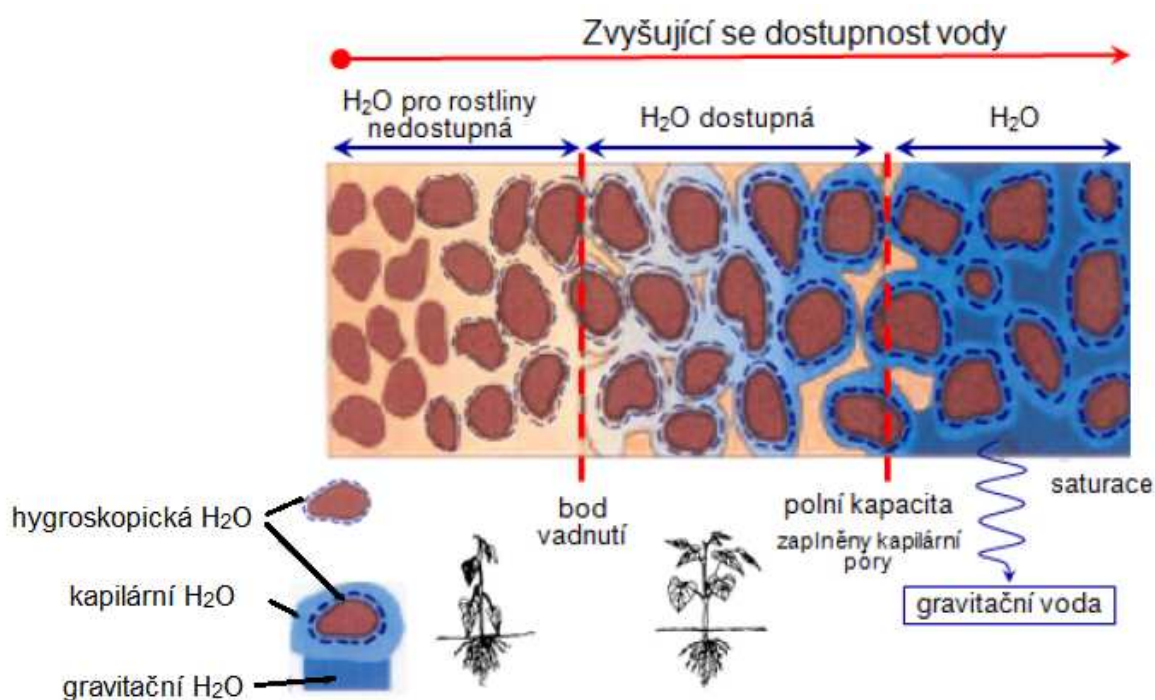
1 Teorie

Tato část práce se zabývá teoretickým popisem chování půdní vody, preferenčním prouděním a měřením vlhkosti. Dále tato kapitola pojednává o elementárních hydrologických procesech – infiltraci, redistribuci a evaporaci. Všechny tyto procesy byly součástí prováděných experimentů nebo úzce souvisejí s použitím tenzometrů. Znalost hydraulických charakteristik půdní vody je nezbytná pro pochopení proudění vody v půdním prostředí. V této části byly použity zdroje literatury: Hillel (1998), Holečková (2015), Jury a Horton (2004), Kutílek a kol. (2000), Sněhota a Šanda (2008), Šantrůčková (2014), Valentová (2007) a Warrick (2002).

1.1 Voda v půdě

Pod pojmem voda v půdě, resp. půdní voda, se rozumí veškerá voda vyskytující se trvale či dočasně v půdním prostředí. Jedná se o vodu ve skupenství kapalném, plynném i pevném, přičemž v půdním prostředí je nejvýznamnější voda kapalném skupenství. Voda v kapalném skupenství působí svými rozpouštěcími, dispergačními, hydrolytickými a translokačními účinky na pedogenetické procesy: fyzikální, chemické, fyzikálně-chemické, biologické a biochemické. Z hlediska zaplnění půdních pórů se v půdním prostředí vyskytuje voda (viz obrázek 1.1):

- hygroskopická, která obaluje jednotlivé půdní částice vodním filmem. Tato voda není dostupná pro rostliny.
- kapilární voda, která obklopuje jednotlivé půdní částice vrstvou vody. Dána kapilárními a absorpčními silami a povrchovým napětím vody.
- gravitační voda představuje volně tekoucí vodu v prostoru mezi půdními částicemi



Obrázek 1.1: Ilustrace půdní vody z hlediska zaplnění půdních pórů; převzato z Šantrůčková (2014).

Voda v půdě je samozřejmě také nenahraditelně významná z fyziologického hlediska jako životní faktor pro rostliny a edafon. Voda dostupná pro rostliny, vymezená hodnotou polní vodní kapacity a hodnotou bodu vadnutí, představuje vodu kapilární.

1.1.1 Vlhkost půdy

Základní kvantitativní charakteristikou pro vztah voda – půda je vlhkost půdy, kterou vyjadřuje poměr hmotnosti nebo objemu půdní vody k jednotce hmotnosti nebo objemu půdy zcela vysušené půdy. Vlhkost půdy lze tedy pak vyjádřit jako hmotnostní, nebo objemovou:

Vlhkost půdy hmotnostní w je poměr hmotnosti vody m_w zastoupené v půdě vzhledem k hmotnosti tuhé fáze půdy m_z . Zpravidla se zjišťuje u porušeného půdního vzorku. Hmotnostní vlhkost půdy je dána vztahem 1.1:

$$w = \frac{m_w}{m_z} \quad (1.1)$$

Kde m_w vyjadřuje hmotnost vody, nebo-li rozdíl hmotnosti vlhké a zcela vysušené půdy; m_z vyjadřuje hmotnost zcela vysušené půdy při teplotě 105°C.

Vlhkost půdy objemová θ je poměr objemu vody V_w zastoupené v pórech vzorku půdy k objemu neporušeného vzorku půdy V . Pro objemovou vlhkost platí vztah 1.2:

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (1.2)$$

Pomocí objemové hmotnosti půdy ρ_d a hustoty vody ρ_w je možný přepočít obou vyjádřených vlhkostí dle vztahu 1.3:

$$\theta = w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (1.3)$$

Ze vztahů 1.1, 1.2 i 1.3 vychází vlhkost jako bezrozměrná veličina, přičemž její hodnoty korespondují se zaplněním objemu půdních pórů vodou, tedy s pórovitostí.

1.1.2 Metody měření půdní vlhkosti

Dle způsobu měření lze metody měření půdní vlhkosti rozlišit na metody přímé, u nichž se stanovuje přímo obsah vody v půdě a metody nepřímé, u kterých se měří jiná fyzikální veličina funkčně závislá na vlhkosti.

Přímá metoda, nejčastěji se provádí gravimetrická, neboli vázková metoda. Její princip spočívá ve vážení vlhkého a vysušeného půdního vzorku a následném výpočtu vlhkosti dle vztahu 1.1. Jedná se v podstatě o jedinou metodu, kterou lze využít pro kalibraci nepřímých metod měření půdní vlhkosti. Nevýhodou gravimetrické metody je její destruktivní charakter, při odběru vzorků tedy dochází k porušení půdního profilu a navíc odběry narušují i hydraulické vlastnosti půdy. Z důvodu nutnosti změny místa odběrů a s ním spojené prostorové variability půdy, není vhodné volit tuto metodu při dlouhodobém sledování vlhkosti.

Nepřímé metody – existuje mnoho nepřímých metod měření vlhkosti půdy, avšak žádná z nich není univerzální a při jejich výběru je vždy nutné posoudit jak technické předpoklady, tak ekonomické podmínky.

Z nepřímých metod měření půdní vlhkosti lze v této práci zmínit tenzometrickou metodu, jež v principu zjišťuje vlhkost na základě měření podtlaku v tenzometru.

1.1.3 Potenciál půdní vody

Energie, resp. práce na jednotku množství, která je potřebná k přenesení vody v množství blížícím se nule z místa se standardním stavem energie do půdy, se nazývá potenciál půdní vody. Rozdíl potenciálů mezi dvěma body ve zvlhčeném půdním prostředí (gradient potenciálů) je hnací silou proudění vody mezi těmito body, přičemž pohyb vody nastává z místa s vyšším potenciálem do místa s nižším potenciálem. Pokud je gradient potenciálů roven nule, tzn. potenciály ve všech bodech systému jsou si rovny, pak je hnací síla rovněž nulová a tento systém je tudíž v rovnovážném stavu. Bez pohybu vody, resp. proudění vody v půdě a z půdy do organismů by nebylo možné zachování života. V této kapitole byly použity zdroje: Hillel (1998), Holečková (2015), Jury a Horton (2004), Valentová (2007) a Warrick (2002).

Celkový potenciál Φ lze exaktně vyjádřit pomocí součtu 5 složek potenciálů, viz vztah 1.4:

$$\Phi = \varphi_g + \varphi_w + \varphi_o + \varphi_a + \varphi_e \quad (1.4)$$

Kde nejvýznamnější složky tvoří gravitační potenciál φ_g a matriční potenciál φ_w . Osmotický potenciál φ_o , pneumatický potenciál φ_a a zátěžový potenciál φ_e se často zanedbávají. Jednotkou celkového potenciálu Φ je J/Kg nebo N/m² (= Pa).

Gravitační potenciál φ_g představuje hydraulický spád, nebo také energii na jednotku objemu, či hmotnosti vody potřebnou k přenosu nekonečně malého objemu, či hmotnosti čisté volné vody z referenčního místa z_0 do půdy na úroveň z_s a je vyjádřen vztahem 1.5:

$$\varphi_g = \rho_w \cdot g \cdot (z_s - z_0) \quad (1.5)$$

Gravitační potenciál φ_g je tedy závislý pouze na relativní výškové vzdálenosti od referenční úrovně.

Matriční potenciál φ_w v angličtině také *matric potential*, *matric suction*, *soil- water suction* či *capillary potential*, vyplývá z interakce kapilárních a adsorpčních sil na fázovém rozhraní v kapilárách mezi kapalnou, plynnou a pevnou fází. Primární mechanismus těchto efektů zahrnují: a) kapilární síly na rozhraní kapalně a plynné fáze umožňující interakci v rámci nepravidelné geometrie půdních pórů; b) adheze molekul vody na povrchu půdních částic působením Van der Waalsových sil (krátkého dosahu) a rozšíření těchto účinků kohezí prostřednictvím vodíkových vazeb vytvořených v kapalině; c) hydratace iontů a voda podílející se na difúzní dvojité vrstvě (zejména při povrchu jílu).

Za předpokladu rozhraní kapalina-vodní pára jako povrchu s konstantní parciální specifickou Gibbsovou energií G (nebo potenciálem matrice) lze dle Edlefsena a Andersona (1943), Philipse (1977) a Tullera a kol. (1999) matriční potenciál vyjádřit vztahem 1.6:

$$\varphi_w = A(l) + C(\kappa) \quad (1.6)$$

Kde $A(l)$ představuje vliv adsorpčních sil a $C(\kappa)$ vliv kapilarity.

Adsorpční síly jsou tedy závislé na hodnotě Gibbsovy energie G , která je rovna práci potřebné pro ztenčení filmu při reverzibilním izobaricko- izotermálním procesu do konečné tloušťky l :

$$A(l) = - \left(\frac{\partial G}{\partial l} \right) \quad (1.7)$$

Vliv kapilarity je popsán klasickým Young-Laplace vztahem:

$$C(\kappa) = \frac{-2 \cdot \sigma \cdot \kappa}{\rho} \quad (1.8)$$

Kde κ je pozitivní pro konkávní rozhraní kapaliny, σ je povrchové napětí kapaliny na rozhraní a ρ je hustota kapaliny.

Jinými slovy vlhkostní potenciál φ_w udává, jakou silou je voda držena na površích v kapilárních pórech. Nulová hodnota vlhkostního potenciálu φ_w náleží nasycenému půdnímu prostředí a se

snižující se vlhkostí půdy se snižuje také vlhkostní potenciál (stává se více negativním). Pro přenesení jednotkového množství vody v sušší půdě je tedy potřeba vynaložit více energie.

Osmotický potenciál φ_o prezentuje změnu energie na jednotku objemu půdní vody v místě zájmu oproti čisté volné vodě v témže bodě a je dán přítomností rozpuštěných látek ve vodě, které snižují její potenciální energii a tlak vodní páry. Vliv osmotického potenciálu je důležitý za přítomnosti: a) vysokého množství rozpuštěných látek ve vodě a b) selektivně propustné membrány nebo difúzní bariéry, která propouští vodu snáze nežli soli. Osmotický potenciál lze zanedbat pouze v případě proudění kapalné vody bez přítomnosti difúzní bariéry. Nejvýznamnější difúzní bariéry jsou: i) rozhraní půda – kořen rostliny (buněčné membrány kořenů jsou selektivně propustné); ii) rozhraní voda – vzduch.

Ve zředěných roztocích lze osmotický potenciál φ_o nebo také osmotický tlak vyjádřit úměrně jeho koncentraci a teplotě dle následujícího vztahu:

$$\varphi_o = -R \cdot T \cdot C_s \quad (1.9)$$

Kde osmotický potenciál φ_o je vyjádřen v kPa, R představuje univerzální plynovou konstantu: $8,314 \times 10^{-3} \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{mol} \cdot \text{K})$, T je absolutní teplota v K a C_s je koncentrace roztoku (mol/m^3). Pro přibližné vyjádření osmotického tlaku v kPa lze použít také vztah 1.10:

$$\varphi_o \approx -36 \cdot EC_s \quad (1.10)$$

Kde EC_s je elektrická vodivost půdního roztoku v dS/m.

Pneumatický potenciál φ_a je definován jako změna potenciální energie na jednotku objemu vody při změně tlaku okolního plynu z referenční hodnoty P_0 na hodnotu tlaku vzduchu v půdě P_s . Pokud změna tlaku nevyvolá změnu geometrie kapalné fáze půdní vody, pak platí vztah 1.11:

$$\varphi_a \approx P_s - P_0 = \Delta P \quad (1.11)$$

ΔP představuje manometrický tlak půdního vzduchu vztažený ke standardnímu stavu tlaku vzduchu.

Zátěžový potenciál φ_e je definován jako změna energie na jednotku objemu půdní vody v zájmovém bodě při změně okolního tlaku působícího na tento bod z nulové hodnoty na hodnotu P_e . Jedná se o mechanický tlak vyvíjený nepodepřenými pevnými částicemi působícími na půdní vodu.

Celkový potenciál půdní vody a jeho složky mohou být vyjádřeny různými způsoby, a to v závislosti na definici 'jednotky množství vody'. Potenciál pak může být vyjádřen jako: (i) energie na jednotku hmoty; (ii) energie na jednotku objemu; nebo (iii) energie na jednotku hmotnosti. Následující tabulka 1.1 shrnuje vyjádření potenciálu a jejich příslušné jednotky:

Tabulka 1.1: Přehled vyjádření půdního potenciálu vzhledem k definici jednotky množství vody s příslušnými jednotkami; převzato z Warrick (2002).

Vyjádření potenciálu	Symbol	Název	Rozměry	SI jednotky	CGS jednotky
Energie / hmotu (nebo mol)	μ	Chemický potenciál	L^2 / t^2	J / kg	1 / g
Energie / objem	Φ, φ	Tlak	$M / (Lt^2)$	N / m^2 (Pa)	1 / cm^3
Energie / hmotnost	h	Tlaková výška	L	M	Cm

V praktických aplikacích se obvykle užívá potenciál H vyjádřený jako energie na jednotkovou tíhu vody $h = \rho_w \cdot g$. Pak platí vztah 1.12:

$$H = h + z \quad (1.12)$$

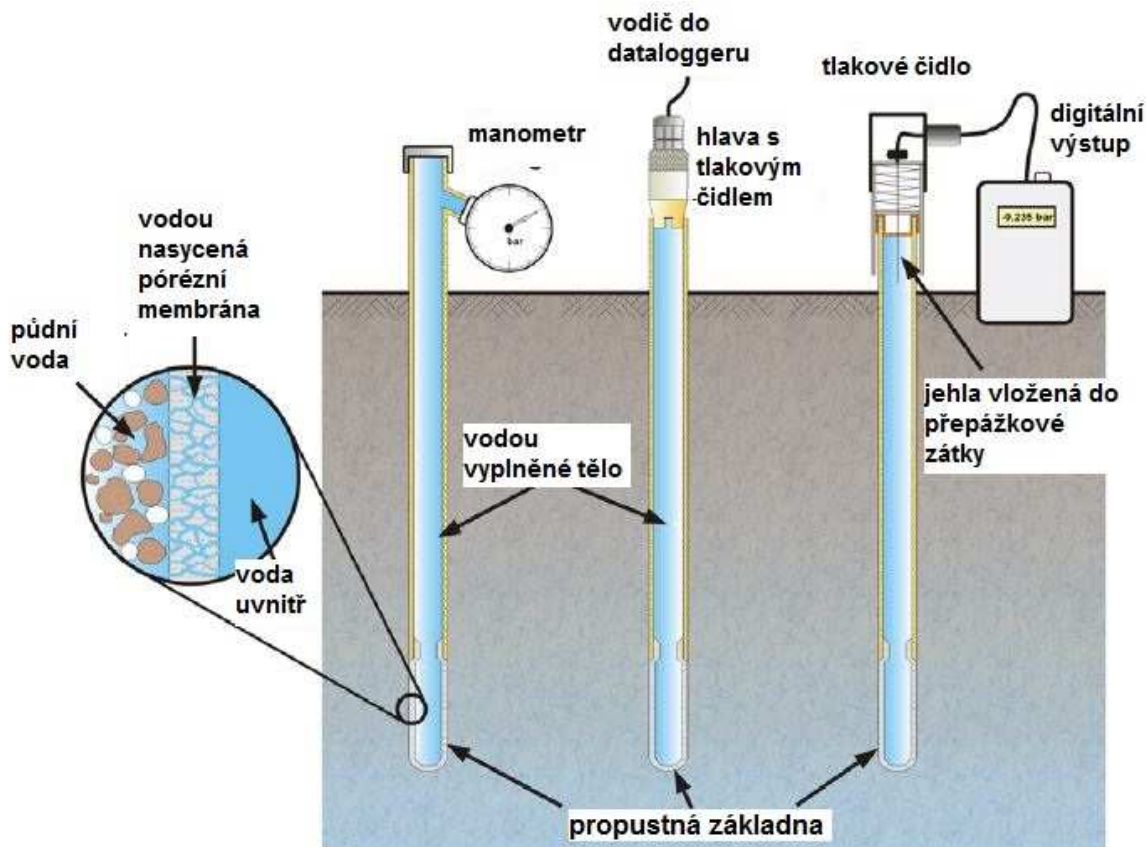
kde h je tlaková výška a z je vzdálenost od referenční úrovně. V nasycené zóně se dosazuje tlaková výška h s kladným znaménkem. V nenasyčené zóně je potom tlaková výška h záporná. Znaménko u z závisí na poloze vzhledem k referenční úrovni: poloha nad referenční úrovní má kladnou hodnotu, poloha pod referenční úrovní potom zápornou hodnotu. Jednotkou celkového potenciálu H jsou jednotky délky (obvykle cm).

Pro sací tlak existuje v českém jazyce několik ekvivalentních názvů: tenzometrický potenciál půdy, vodní potenciál půdy, vlhkostní potenciál, sací nebo tlaková výška vyjádřena v délkových jednotkách (ČSN 75 0145). V anglickém jazyce se lze setkat s termíny: soil's matric suction, soil-moisture tension, tension of water in soil, tension head, potential energy, matric potential, pressure potential, pressure head, soil water pressure (Kirkham 2005).

1.1.4 Metody měření půdního vodního potenciálu

Tenzometr

Základními částmi tenzometru, viz obrázek 1.2, jsou tělo sestávající se z trubice, která je při spodním konci opatřena propustným filtrem - základnou, tlakového čidla se záznamovou jednotkou, či manometrem pro čtení a případně i zaznamenávání naměřených hodnot sacího tlaku půdní vody a odplyněná voda, která zprostředkovává hydraulický kontakt vedoucí k rovnováze tlaku vody v tenzometru a sacímu tlaku v požadované hloubce měření. Princip měření tlaku vody tenzometrem je znázorněn na obr. 1.2.



Obrázek 1.2: Popis tenzometru pro s různými snímači tlaku; převzato a upraveno podle Warrick (2002).

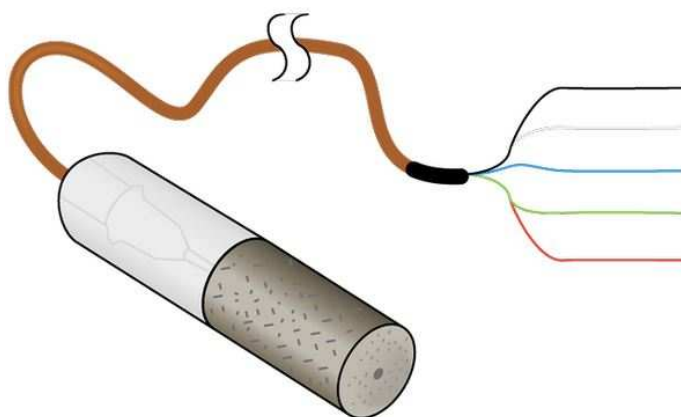
Princip měření potenciálu půdní vody tenzometrem spočívá ve skutečnosti, že voda z tenzometru může přes propustnou základnu proudit ven i dovnitř tenzometru. V případě, že je půdní prostředí nenasyčené, voda proudí ven z tenzometru a vzniká tak v tenzometru podtlak, který je zaznamenáván tlakovým čidlem, resp. manometrem. Po dosažení rovnováhy, tedy stavu, kdy se vzniklý podtlak rovná sacímu tlaku půdní vody, proudění z tenzometru ustává. Může se stát, že se vlhkost v půdě dále snižuje a půda odsává z tenzometru další vodu. Vzniká tedy větší podtlak (více negativní tlak), který je ovšem limitován velikostí podtlaku odpovídající vstupní hodnotě vzduchu propustného elementu a také maximální hodnotou – 100 kPa. V případě opačném, kdy se vlhkost půdy zvyšuje, proudí voda dovnitř tenzometru. Toto proudění pokračuje do té doby než indikovaný podtlak (stávající se méně negativním) dosáhne hodnoty odpovídající aktuálnímu sacímu tlaku půdní vody. V krajním případě, kdy by byla půda plně nasycena, například na hladině podzemní vody, by nedocházelo k žádnému sání a nevznikl by ani žádný podtlak a tenzometr by tedy naměřil nulovou hodnotu sacího tlaku. V nasycené zóně pak tenzometr měří kladný tlak.

Rozsah měření tenzometry je teoreticky omezen maximální hodnotou podtlaku pod 100 kPa, prakticky však tenzometry měří do tlaků – 70 až – 90 kPa. Pro měření nižších hodnot potenciálů půdní vody (půdy s nižší hodnotou vlhkosti) se dále pak používají senzory založené na disipaci tepla, neboli HDS (Heat Dissipation Sensor), či psychrometry.

Senzory založené na disipaci tepla (Heat Dissipation Sensor)

Sondy založené na disipaci tepla se používají obvykle pro měření vodního potenciálu půdy v rozmezí od -10 do -2 500 kPa. HDS se skládají ze soustavy topných prvků (nebo z bodového zdroje tepla) pevně usazených do porézního materiálu se známou velikostí pórů, který se umístí do půdního prostředí v místě zájmu měření. Ilustrace zařízení HDS prezentuje obrázek 1.3.

Princip měření HDS spočívá v aplikaci konstantního tepelného impulsu a v následné analýze teplotní odezvy měřené termočlánkem umístěným v pevně vzdálenosti od tepelného zdroje. Po aplikaci teplotních pulzů nastávají v půdě změny potenciálu, jejichž důsledkem je gradient potenciálů mezi půdním prostředím a porézním materiálem sondy indukující proudění vody mezi těmito materiály, dokud nedojde k rovnovážnému stavu. Změna vlhkosti porézního prvku sondy vyvolá postupnou změnu tepelné vodivosti a tepelné kapacity senzoru. Se zvyšující vlhkostí porézního elementu sondy se jeho tepelná vodivost zvyšuje. Pokud je konstantním výkonem teplo odváděno od zdroje, teplota okolí se v závislosti na teplotní vodivosti porézního prvku zvyšuje. Zvýšení teploty tohoto prvku je tedy způsobeno tepelnou energií, která se nerozptýlila do okolí. Měří se tedy teplotní odezva na aplikovaný teplotní pulz.



Obrázek 1.3: Ilustrace zařízení HDS; model SCI 229; převzato z manuálu Campbell Scientific, Inc., Logan, UT.

Psychrometry

Pro měření půdního vodního potenciálu v rozmezí od - 800 do - 10 000 kPa se běžně využívají psychrometry.

Princip měření psychrometrem spočívá ve stanovení relativního tlaku par vzduchu nad vzorkem po dosažení termodynamické rovnováhy v uzavřené komoře, který se vztahuje k potenciálu půdní vody prostřednictvím upravené Kelvinovy rovnice:

$$\Phi = \frac{R \cdot T \cdot \rho_w}{M_w} \cdot \ln\left(\frac{e}{e_0}\right) \quad (1.13)$$

Kde R představuje plynovou konstantu 8,31 J/(K · mol), T je absolutní teplota v kelvinech, ρ_w je hustota vody, M_w je molekulární hmotnost vody 0,018 kg/mol, e je tlak vodních par vzduchu a e_0 je tlak nasycených vodních par vzduchu při dané teplotě.

Psychrometry existují jak pro laboratorní měření půdního vodního potenciálu na porušených půdních vzorcích, tak pro in situ měření. Ukázku běžně používaného laboratorního psychrometru WP4C (Decagon Devices, Inc.) zobrazuje obrázek 1.4:



Obrázek 1.4: Ukázka laboratorního psychrometru WP4C pro měření vysokých hodnot půdního potenciálu; převzato z manuálu Decagon Devices, Inc..

1.2 Hydraulické charakteristiky půdy

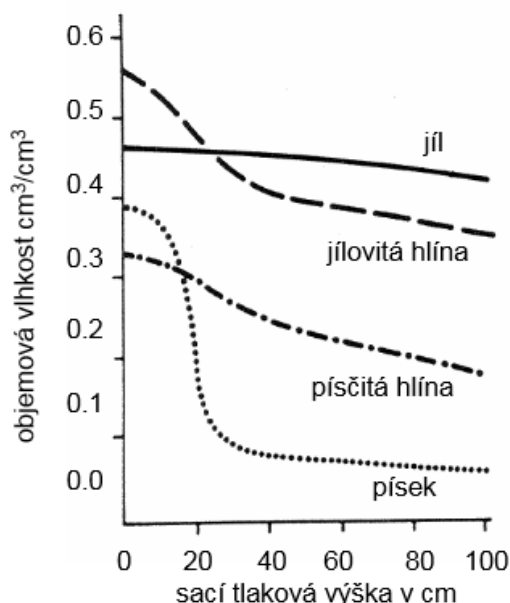
Mezi základní hydraulické charakteristiky půdy se řadí průběh retenční čáry půdní vlhkosti a hydraulická vodivost, na jejichž správném stanovení závisí pochopení a následné modelování pohybu vody v půdním prostředí. V této kapitole byly použity následující zdroje: Hillel (1998), Holečková (2015), Jury a Horton (2004), Kutílek a kol. (2000), Sněhota a Šanda (2008), Šantrůčková (2014), Valentová (2007) a Warrick (2002).

1.2.1 Retenční čára půdní vlhkosti

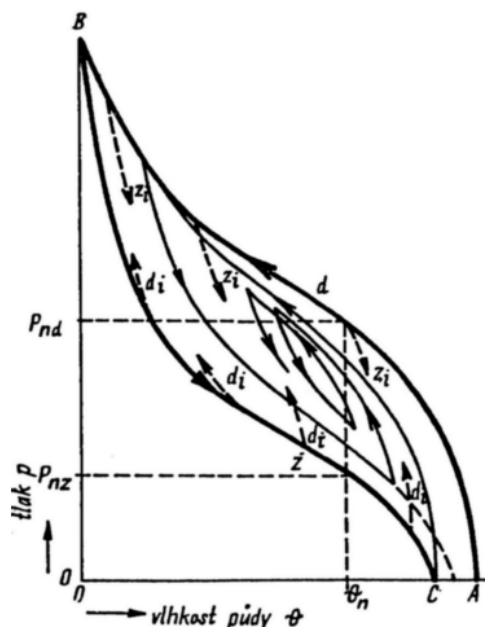
Retenční čára vlhkosti půdy je grafické znázornění rovnovážného vztahu mezi vlhkostí půdy a vlhkosním potenciálem (sacím tlakem, případně tlakovou výškou). Její průběh je charakteristický pro každou půdu, protože je závislý na zrnitostním a mineralogickém složení, struktuře, objemové hmotnosti, obsahu humusu a výměnných kationtů. Průběh retenční čáry tedy nelze ani přibližně odhadovat. Průběhy retenčních čar pro různé půdy viz obr. 1.5.

Při velkém rozsahu tlaku (0 až -10^5 Pa) se graf zobrazuje v semilogaritmickém měřítku a tato čára se nazývá pF čára.

Průběh retenční čáry je dále závislý na cestě, kterou bylo dosaženo rovnovážného stavu vlhkosti. Průběh retenční čáry pro odvodňování původně vlhké půdy je odlišný od průběhu retenční čáry pro zvlhčování půdy ze suchého stavu, viz obr. 1.6. Tento jev se nazývá hystereze retenční čáry a je způsoben především uzavíráním vzduchu nebo vody ve slepých pórech, proměnlivostí průřezů pórů a rozdílnou hodnotou úhlu smáčení při postupu kapaliny na suchém povrchu a při ústupu kapaliny ze zvlhčeného povrchu.



Obrázek 1.5: Retenční čára pro různé půdy. (Sněhota a Šanda, 2008)



Obrázek 1.6: Hysterezní smyčka retenční čáry: cesta drenážní- z bodu B do bodu C; cesta sycení- z bodu A do bodu B; převzato a upraveno podle Kutílek a kol. (2000).

1.2.2 Hydraulická vodivost

Schopnost půdy vést vodu vyjadřuje hydraulická vodivost půdy. Hydraulická vodivost existuje dvojího typu: nasycená hydraulická vodivost K_s , kdy jsou půdní póry zcela vyplněny vodou a nenasycená hydraulická vodivost K , při níž jsou půdní póry vyplněny vodou jen z části. Nasycená hydraulická vodivost K_s má rozměr rychlosti, viz tabulka 1.2. Nenasycená hydraulická vodivost je charakterizována součinitelem K udávající míru, jakou půda umožňuje proudění vody. Nenasycená vodivost je závislá na stupni odvodnění půdy.

Tabulka 1.2: Hodnoty součinitele nasycené hydraulické vodivosti pro různé materiály. (Sněhota a Šanda, 2008)

Materiál	Koeficient nasycené vodivosti K_s (m/s)
Štěrky	10^0 až 10^{-3}
Písky	10^{-2} až 10^{-6}
Písčité zeminy	10^{-3} až 10^{-7}
Spraše	10^{-4} až 10^{-9}
Jílovité zeminy	10^{-6} a méně

1.3 Hydrodynamika půdní vody

Půda představuje porézní prostředí umožňující proudění vody. Prostor, ve kterém se může voda pohybovat je omezený maximální hodnotou objemu pórů v půdě. Jestliže jsou všechny póry v půdě vyplněny vodou, tzn. vlhkost je rovna pórovitosti, nastává nasycené proudění. V případě, že nejsou všechny póry vyplněny vodou, resp. vlhkost je nižší než pórovitost, nastává nenasycené proudění. Hnací silou proudění vody je v obou případech gradient potenciálu. Transportní procesy v půdě jsou nestacionární, rychlost přenosu a další fyzikální veličiny se v čase mění. Stacionární (ustálené, neproměnlivé v čase) proudění lze uvažovat pouze jako zjednodušení a pro některé případy lze řešit analyticky.

Pro popis proudění je nutné sestavit soustavu rovnic rovnice kontinuity a Darcyho (resp. Darcy – Buckinghamova) zákonu. Jejich sloučením vzniká tzv. Richardsova rovnice proudění (popsaná níže). V této kapitole byly použity následující zdroje Holečková (2015), Jury a Horton (2004), Kutílek a kol. (2000), Sněhota a Šanda (2008) a Valentová (2007).

1.3.1 Rovnice kontinuity

Výpočtem bilance množství vody během malého intervalu času Δt , mezi časy t a $t + \Delta t$, v elementárním objemu krychle lze definovat rovnici kontinuity. Rovnice kontinuity vyjadřuje zákon o zachování hmoty. Jinými slovy to znamená, že objem vody vstupující do krychle za dobu Δt je roven součtu objemu vody vstupujícímu z krychle během Δt , přírůstku vody akumulované v krychli během Δt a objemu vody odebrané přímo z vnitřního prostoru krychle během Δt . Jednorozměrný tvar rovnice kontinuity udává vztah 1.14:

$$\frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial \theta}{\partial t} + r = 0 \quad (1.14)$$

Nebo-li součet změny toku „mezi stranami elementu“, změny vlhkosti v čase a odebraného množství vody v elementu (propadu $-r$) je roven nule.

Obecný trojrozměrný tvar rovnice kontinuity je pak dán vztahem 1.15:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + \frac{\partial \theta}{\partial t} + r = 0 \quad (1.15)$$

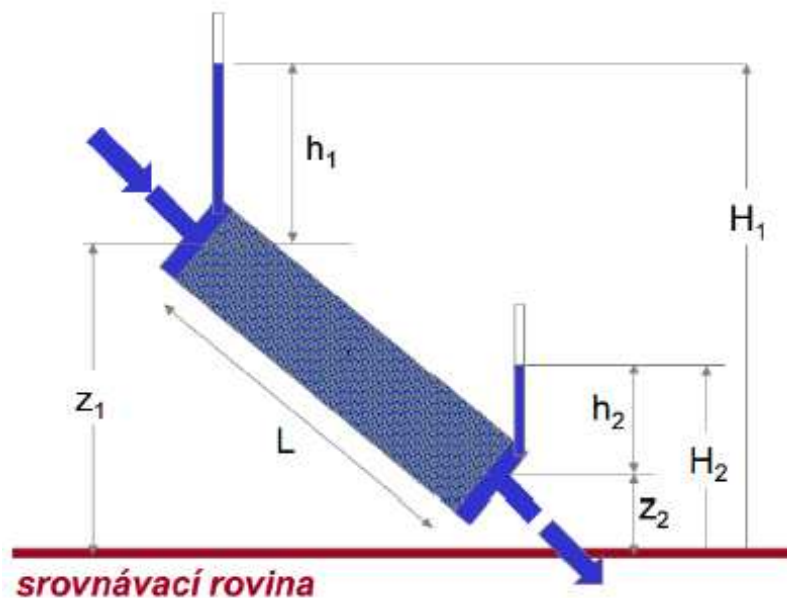
kde q_x , q_y a q_z jsou složky vektoru proudění vody a r je množství odebrané vody z elementu.

1.3.2 Darcyho zákon

Na základě mnoha experimentů Henry Darcy zjistil (1856), že průtok vody Q válcem naplněným pískem je přímo úměrný ploše průřezu válce A , nepřímo úměrný délce válce L , přímo úměrný rozdílu hydrostatických tlaků ΔH na počátku a konci válce a že je závislý na koeficientu lišícím se pro různé druhy materiálů (tedy koeficientem nasycené hydraulické vodivosti K_s). Platnost tohoto zákona je omezena pouze na určitý rozsah hodnot hydraulického gradientu a rychlosti proudění. Matematické vyjádření popisuje vztah 1.16:

$$Q = \frac{K_s \cdot A \cdot \Delta H}{L} \quad (1.16)$$

Schematické vyjádření Darcyho zákona popisuje Obr.1.7:



Obrázek 1.7: Schematické vyjádření Darcyho zákona; převzato z Sněhota a Šanda (2008)

Pro objemový tok $q = \frac{Q}{A}$ [m/s] přejde Darcyho zákon do zobecněné podoby:

$$q = K_s \cdot \frac{\Delta H}{L} = K_s \cdot \frac{dH}{dL} \quad (1.17)$$

Pro jednorozměrné vertikální proudění pak platí vztah 1.18:

$$q = -K_s \cdot \frac{dH}{dL} = -K_s \cdot \nabla H \quad (1.18)$$

Kde záporné znaménko vyjadřuje ∇H opačný směr proti směru proudění.

1.3.1 Darcy – Buckinghamův zákon

Modifikací Darcyho zákona vznikl Darcy – Buckinghamův zákon, který je platný při splnění dvou předpokladů:

- a) hnací silou proudění v nenasyčeném půdním prostředí je součet kapilárního a gravitačního potenciálu,
- b) hydraulická vodivost nenasyčeného půdního prostředí je funkcí vlhkosti půdy nebo vlhkostního potenciálu.

Při použití funkční závislosti nenasyčené hydraulické vodivosti $K(h)$ na sací tlakové výšce h , pro jednorozměrné vertikální proudění pak platí pro objemový tok q vztah 1.19:

$$q = -K(h) \cdot \frac{\partial H}{\partial z} = -K(h) \cdot \frac{\partial(h+z)}{\partial z} = -K(h) \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad (1.19)$$

1.3.4 Richardsova rovnice pro nenasyčené proudění

Dosazením rovnice kontinuity (1.15) do Darcy – Buckinghamova (1.19) zákona vzniká tzv. Richardsova rovnice (1.20), podle níž je možné vypočítat vlhkost nebo kapilární sací tlak během neustáleného nenasyčeného proudění vody, eventuelně naopak. Popisuje tedy proudění v reálném pórovém prostředí, které musí splňovat následující předpoklady:

- a) prostředí je nehybné a nedeformovatelné,
- b) vliv proudění vzduchu na proudění vody je zanedbáno,
- c) proudící voda je nestlačitelná.

Jednorozměrným tvarem Richardsovy rovnice ve vertikálním směru je vztah 1.20:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1.20)$$

V tomto tvaru nelze rovnici 1.14 řešit, protože obsahuje 2 neznámé proměnné: θ a h . Eliminaci jedné neznámé lze docílit zavedením funkce $h(\theta)$, tedy retenční křivkou lze eliminovat buď h nebo θ . Richardsova rovnice pak může mít difuzní, nebo kapacitní tvar.

1.4 Infiltrace

Infiltraci je možné definovat jako průtok vody přes topografický povrch do půdy. Jedná se o nedílnou součást hydrologického cyklu. Infiltrace nastává například při srážkách, nebo závlahách. Důležitou roli hraje infiltrace také z hlediska vodní eroze půdy, díky schopnosti snížení povrchového odtoku a s ním spojeného odnosu půdy.

Rychlost infiltrace v , resp. rychlost vsaku, je ovlivněna zrnitostním a mineralogickým složením půdy, mírou nasycení půdy vodou a obsahem humusu. Podobně jako celková srážka či výpar se i celkové množství zasáknuté vody nazývá kumulativní infiltrace I a její jednotky mají délkový charakter (nejčastěji mm či cm).

Matematický popis infiltrace představuje Richardsova rovnice v difuzním tvaru, jejíž první analytické řešení předložil Philip (1957). Mezi nejvýznamnější aproximativní řešení se řadí Philipova rovnice a postup podle Greena a Ampta (1911). Další postupy řešení infiltrace, založené na empirických výrazech upravených do správného kvalitativního tvaru představují metody podle Hortona (1933) a Holtana (1961).

1.4.1 Philipův model

Philip zavedl termín sorptivita $S [L \cdot T^{-1/2}]$ představující množství vody zasáknuté na počátku infiltrace za první časovou jednotku. Princip Philipova modelu je založen na rozložení řešení Richardsovy rovnice (1.14) v difuzním tvaru do dvou částí: nejprve se řeší infiltrace bez vlivu gravitace (vertikální infiltrace) a následuje oprava s ohledem na gravitaci.

Pro rychlá, praktická řešení navrhl Philip algebraickou infiltrační rovnicí 1.21 a 1.22:

$$I = S \cdot t^{1/2} + A \cdot t \quad (1.21)$$

a

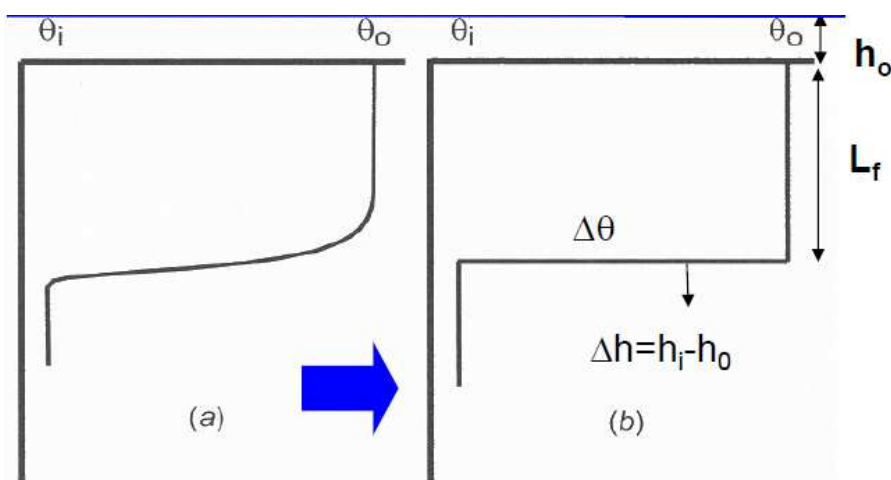
$$v = \frac{1}{2} \cdot S \cdot t^{-1/2} + A \quad (1.22)$$

Kde I je kumulativní infiltrace $[L]$, S je sorptivita $[L \cdot T^{-1/2}]$, t je čas $[T]$, A je parametr $A = m \cdot K_s$ ($m=0,2$ až $2/3$) a v je rychlost infiltrace $[L \cdot T^{-1}]$.

1.4.2 Model Green-Ampt

Green-Ampt model (1911) představuje zjednodušení skutečného vlhkostního profilu při infiltraci na obdélníkový (krabicový, či stupňový), podle něž voda infiltruje jako obdélníkový píst posouvající se s časem do větší hloubky. Čelo zvlhčení se tedy objevuje náhle skokovým vzrůstem

vlhkosti a je rovnoběžné s povrchem (viz obrázek 1.8). Pod čelem zvlhčení je nízká vlhkost. Nad čelem zvlhčení je vlhkost vyšší, případně může být tato zóna nasycená.



Obrázek 1.8: Zjednodušení modelu Green-Ampt; a) reálný průběh vlhkosti b) zjednodušený průběh vlhkosti; převzato a upraveno z Jury a Horton (2004).

Nad čelem zvlhčení se uvažuje platnost Darcyho rovnice, čímž je příklad zjednodušen na řešení nasyceného proudění při $L_f(t)$ dle vztahů 1.23 a 1.24:

$$\Delta\theta \cdot \frac{dL_f}{dt} = K_s \cdot \left[\frac{L_f(t) + (h_o - h_f)}{L_f(t)} \right] \quad (1.23)$$

Kde $\Delta\theta$ je rozdíl vlhkostí na čele zvlhčení, L_f je hloubka čela zvlhčení, t je čas, K_s je koeficient nasycené hydraulické vodivosti, h_o je tlaková výška na povrchu a h_f je tlaková výška na čele zvlhčení.

Separací proměnných a integrací v intervalech $(0; t)$ a $(0; L_f)$ přejde rovnice 1.23 ve tvar 1.24:

$$t = \frac{\Delta\theta}{K_s} \cdot \left\{ L_f + (h_o - h_f) \cdot \ln \left[1 + \frac{L_f}{(h_o - h_f)} \right] \right\} \quad (1.24)$$

Rovnice 1.24 neumožňuje intenzitu $I(t)$ vyjádřit explicitně. Pro sérii zvolených hodnot L_f se počítá t , obdrží se $L_f(t)$ a odtud se vztahem 1.25 dopočítá intenzita $I(t)$:

$$I(t) = L_f \cdot \Delta\theta \quad (1.25)$$

1.5 Redistribuce

Po skončení infiltrace vody se dále posouvá čelo zvlhčení do určité hloubky, avšak nenastává rovnovážný stav. Vysoký gradient potenciálu mezi zvlhčenou částí nad čelem zvlhčení a poměrně sušší částí pod čelem zvlhčení zapříčiňuje stékání vody z horní zvlhčené vrstvy dolů, do sušší vrstvy půdy. Tento proces, podobný ve své podstatě infiltraci, se nazývá redistribuce. Na rozdíl od infiltrace je jediným zdrojem vody zvlhčená horní vrstva, ze které voda pomalu stéká do nižších vrstev. Pokles vlhkosti v horní zvlhčené vrstvě a současný pokles gradientů potenciálu, tedy hnací síly procesu, má za následek snížení rychlosti redistribuce s časem.

1.6 Preferenční proudění

Půdní prostředí je heterogenní a anizotropní, proudění vody tedy často nepodléhá pouze matematickému popisu Richardsovou rovnicí. Voda preferenčními cestami proudí mnohem rychleji než půdní maticí, v důsledku čehož dochází k nepravidelnému postupu čela zvlhčení. Jedná se o tzv. preferenční proudění prostřednictvím již dříve vzniklých preferenčních cest, které se v půdě přirozeně nacházejí. Preferenční cesty přirozeně vznikají buď fyzicky smršťováním a praskáním jílu zastoupeného v půdě anebo biologicky rozkládajícími se kořeny rostlin a hrabajícími živočichy (žížaly, mravenci, hlodavci, atp.). Významný vliv na vznik preferenčních cest má také uspořádání půdních agregátů.

Rychlost preferenčního proudění je závislá na geometrii preferenčních cest, hydraulické vodivosti (sorptivitě) půdy, způsobu a době trvání infiltrace. Během počáteční fáze infiltrace může být příjem vody povrchovými preferenčními cestami (trhlinami) v půdě mnohem vyšší, než je nasycená vodivost matrice půdy. Nicméně pokud proces infiltrace pokračuje dostatečně dlouho, vliv preferenčních cest (trhlin) se posléze snižuje, protože čelo zvlhčení proniká hlouběji do profilu i mimo dosah preferenčních cest. Preferenční cesty samotné pak mají tendenci se uzavřít v důsledku bobtnání jílu (po dlouhodobé absorpci vody).

Na základě velikosti a struktury makropórů Beven a Germann (1982) klasifikovali preferenční cesty do 4 následujících skupin:

- 1) Preferenční cesty vzniklé hrabáním živočichů (červi, krtci, hlodavci, atd.): obvykle duté útvary o průměru od 1 mm do přibližně 50 mm.
- 2) Preferenční cesty vzniklé kořeny rostlin: duté útvary, jejichž velikost a rozměry závisí na konkrétním typu rostliny. Po úhynu rostliny a rozkladu jejích kořenů zůstává dutina. V případě žijící rostliny může docházet k preferenčnímu proudění podél jejích kořenů.
- 3) Preferenční cesty vzniklé z trhlin a puklin: vzniklé smršťováním jílu nebo chemickým zvětráváním podložní horniny. Mohou vzniknout také působením mrazu, resp. zmrazovacími a rozmrazovacími cykly nebo obděláváním půdy.

- 4) Přirozené půdní preferenční cesty: vzniklé v důsledku vysokého hydraulického gradientu (erozního působení) podpovrchového proudění vody ve vysoce propustných a nesoudržných půdách. (Hillel, 1998)

1.7 Evaporace, evapotranspirace

Evaporace představuje fyzikální proces, při němž se voda z kapalného či pevného skupenství přeměňuje na vodní páru. Evaporace je tedy výpar z půdního prostředí nezakrytého vegetací nebo z vodní plochy.

Termín evapotranspirace E_T vznikl spojením slov evaporace E představující výpar z půdy a transpirace T_R , který představuje výpar z rostlin. Kořenovým systémem rostlin je voda potřebná pro transpiraci z půdy extrahována. Více než 95% množství potřebné vody pro transpiraci se pak odpařuje z nadzemních částí rostlin. Evapotranspirace E_T existuje dvojího druhu: potenciální E_{TP} a aktuální E_{TA} :

Evapotranspirace potenciální E_{TP} - v případě neomezeného přítoku k výparnému povrchu. Vyjadřuje tedy velikost výparu, který by nastal za předpokladu neomezeného přísunu vody (maximální možnou evapotranspiraci za daných stanovištních podmínek). E_{TP} lze vypočítat z transportu latentního tepla, transportu turbulentního tepla a radiační bilance, nebo podle empirických vztahů (např. podle Thornthwaita).

Evapotranspirace aktuální E_{TA} - pokud je přítok vody k výparnému povrchu limitován. E_{TA} popisuje množství vody, které se reálně odpaří. Aktuální evapotranspirace E_{TA} se stanoví zavedením stomatálních odporů do Penmanovy rovnice. Její stanovení je ovšem z důvodů problematického měření těchto odporů velice obtížné.

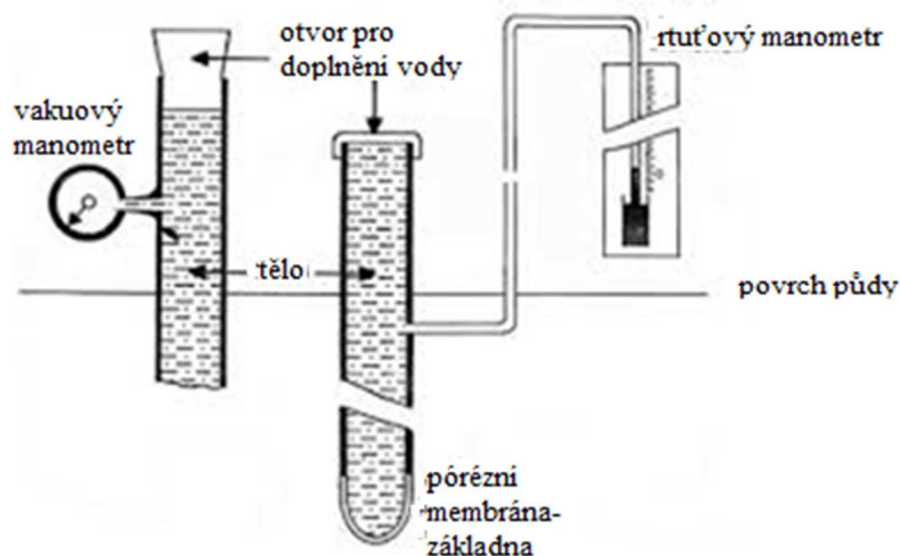
Výpar (evaporace, evapotranspirace) jako jeden ze tří základních složek hydrologické bilance (srážky, odtok, výpar) náleží vzhledem k vzájemně v přírodě velmi složité interakci ve vztahu půda x rostlina x atmosféra ke komplikovaným a obtížně stanovitelným procesům.

2 Rešerše

2.1 Půdní tenzometry

Tenzometr je zařízení sloužící ke kontinuálnímu měření sacího tlaku půdní vody. Sací tlak představuje sílu, kterou musí rostliny překonávat, aby získaly vodu z půdy. Určuje tedy distribuci půdní vlhkosti a pohyb roztoků půdním prostředím.

Základními částmi tenzometru jsou tělo sestávající z trubice, která je při spodním konci opatřena porézním elementem - membránou, tlakového čidla s dataloggerem či manometrem pro čtení a případně i zaznamenávání naměřených hodnot sacího tlaku půdní vody a odplyněná voda, která zprostředkovává hydraulický kontakt vedoucí k rovnováze tlaku vody v tenzometru a sacímu tlaku v požadované hloubce měření. Tělo tenzometru a porézní prvek musejí být dokonale vzduchotěsně i vodotěsně spojeny, aby proudící voda procházela pouze přes propustnou membránu. Póry propustné membrány základny musí být menší než póry půdy, do které je tenzometr osazen, jinak by půdní vzduch mohl vniknout dovnitř membrány a měření by pak nebylo přesné. (Hillel 1998, Kirkham 2005)



Obrázek 2.1: Základní popis půdního tenzometru podle Richardse, 1965; převzato a upraveno podle Hillel (1998).

Young a Sisson (2002) vyjmenovali vlastnosti v praxi používaných materiálů propustných elementů tenzometru. Nejčastěji se propustné elementy vyrábí z porézních keramických materiálů s maximálním průměrem pórů asi 2 μm . Kromě keramických materiálů se dále používají například nerezové oceli, apod..

Pro správnou funkci tenzometru jsou nejdůležitější následující vlastnosti: mechanická odolnost všech dílců a spojů, schopnost rychlého a dokonalého nasycení propustné membrány tenzometru a pro měřidlo tlaku pak dostatečná citlivost měření, vhodná reakční rychlost a trvalá schopnost měřit vysoké hodnoty sacího tlaku. Reakční rychlost tenzometru a citlivost měření jsou závislé zejména na stupni nasycení propustné základny tenzometru. Pro přesné měření tenzometru je vyžadován velmi vysoký stupeň nasycení této membrány. Take a Bolton (2003) uvádí postup pro

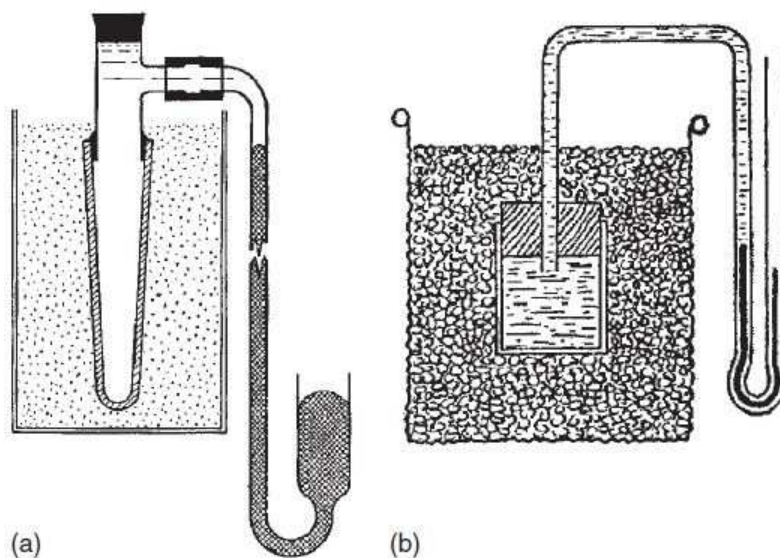
dokonalé nasycení filtračního prvku tenzometru, který spočívá v počátečním sycení v podtlaku a v následné cyklické aplikaci vysokého přetlaku. Nedostatečné nasycení tenzometru omezuje nejen rychlost reakce a měřitelný rozsah sacího tlaku, ale také zvýrazňuje účinky hystereze tlaku.

Rozsah měření, přesnost, opakovatelnost, doba odezvy, a prostorové rozlišení jednotlivých senzorů jsou důležité aspekty pro jejich aplikaci a pro následnou analýzu měření tlaků půdní vody (Or a Wraith, 2002).

2.2 Vývoj tenzometru

Historicky byl pojem potenciál půdní vody v nenasyčeném půdním prostředí z teoretického hlediska představen Buckinghamem (1907). Prvotní a nejčastěji uváděné popisy tenzometrů jsou připisovány Gardnerovi et al. (1922) a Richardsovi (1928), ale v poslední době Or (2001) ukázal, že již Livingston (1908, 1918) navrhl použití tenzometru sestávajícího se z manometru a porézní membrány naplněné vodou.

Až do 80. let 20. století byly tenzometry konstruovány na základě návrhu podle obrázku 2.2, a to za použití rtuťového tlakoměru. Tyto přístroje mají své výhody, pokud jde o přesnost naměřených hodnot, ale trpí neodmyslitelně pomalou dobou odezvy vzhledem k jejich nízké citlivosti.



Obrázek 2.2: Historické návrhy tenzometru: a) návrh tenzometru dle Richardse (1928); b) návrh tenzometru dle Haienese (1927) připisován Livingstonovi (1918); převzato z Warrick (2002)

Vzhledem k problémům v oblasti životního prostředí (toxicita rtuti) a nízké citlivosti rtuťových tlakoměrů byly tyto nahrazeny mechanickými tlakoměry a senzory tlaku určenými jak pro laboratorní experimenty (Vachaud a Thony 1971), tak pro terénní šetření (Bianchi 1962, Watson 1967). Nevýhodami mechanických tenzometrů jsou hystereze manometru, nepříznivý vliv teploty a pořizovací náklady.

V současné době nejdokonalejší způsob měření tlaků pomocí tenzometru zprostředkovávají elektronická čidla tlaku, která jsou zabudována v přímé blízkosti propustného elementu

tenzometru. Pokročilé senzory tlaku disponují vyšším stupněm kontrol a kompenzací a tím pádem i vyšší stabilitou měření (Sisson et al., 2002), zejména díky: (1) integrovanému zesilovači a následně; úpravě signálu pro elektrický výstup; (2) teplotní kompenzaci v těsné blízkosti porézní membrány, (3) indikátoru stavu plnění; (4) vnějšímu opětovnému plnění insitu; a (5) integrovanému teplotnímu čidlu v porézní membráně pro dodatečnou kompenzaci teplotních vlivů.

Podle Takeho a Boltona (2003) se velká část výzkumu přímého měření sacích tlaků zaměřuje na dosažení maximální měřitelné hodnoty tlaku pomocí zařízení s velkým rozsahem měření a vysokým tlakem nasycení. Nicméně existuje mnoho aplikací, co se fyzikálního modelování a laboratorních experimentů týče, kde je předmětem zájmu menší rozsah sacího tlaku (< 400 kPa), což dokládá potřebu citlivějšího zařízení.

Předmětem výzkumu, a to zejména z pohledu šíření kontaminantů a ochrany kvality podzemní vody, jsou také multifunkční tenzometry. Například Morrison a Szecsody (1987) představili multifunkční tenzometr, který může být použit buď jako tenzometr, nebo jako zařízení pro odběr vzorků půdní vody. Tokunaga (1992) popisuje možnost odběru vzorků půdy vody za současného měření tenzometrem a Essert s Hopmansem (1998) takovýto kombinovaný tenzometr vyvinuli. Moutonnet et al. (1993) představili multifunkční tenzometr, který je kromě měření tlaků v půdě schopen měřit koncentraci dusičnanů v půdě a koncentraci půdního roztoku.

Tenzometr pro stanovení vodního potenciálu spolu se sondou TDR pro měření vlhkosti půdy (Topp a Ferr'e, 2002; Toppa a Ferr'e, 2005) jsou nejpoužívanější měřicí technologie pro zjištění hydraulických charakteristik půdy v terénu. Subedy kol. (2013) spojili tyto technologie do jediné sondy a vyvinuli tzv. T-TDR (tensiometer- time domain reflectometry) v podobě miniaturního tenzometru (Ø 6 mm, délka 32 mm). Toto zařízení je tedy schopné bodově měřit vlhkost půdy za současného měření tlakové výšky půdní vody.

V současné době nejznámějšími výrobci půdních tenzometrů a jejich příslušenství, či zařízení pro měření potenciálu půdní vody jsou například UMS Inc. Mnichov, Campbell Scientific Inc., Decagon Devices Inc., Delta-T Devices Ltd, SDEC's Tensionics; další výrobci: Irrrometer company Inc. či AMI Tens Ltd.

Délka komerčně vyráběných půdních tenzometrů se pohybuje v řádech jednotek až desítek centimetrů a průměrem v řádech milimetrů až centimetrů. Nejmenší komerčně dostupný mikrotenzometr s průměrem propustné membrány 2,2 mm nabízí výrobce SDEC (Francie), dále pak výrobce UMS Inc. (Německo) nabízí mikrotenzometr T5 s průměrem 5 mm.

Segal et al. (2008) představili prototyp tzv. PTMT (pliable- tipped microtensiometer) mikrotenzometru, určeného pro měření ve velmi malých objemech půdy- řádově v milimetrech krychlových s průměrem propustné membrány 1,1 mm. Membrána tohoto mikrotenzometru byla vyrobena z pružné pipety vyplněné dvěma vrstvami netkané geotextilie a střední vrstvou křemičitého stejnozrnného písku (s průměrem zrn 25- μ m). Tělo PTMT tvoří tuhá trubice vyplněná vodou, k níž je připojeno elektronické tlakové čidlo s rozsahem měření -50 až 50 kPa. Ve srovnání s konvenčním mikrotenzometrem PTMT disponuje díky lepšímu kontaktu propustné membrány s okolní zeminou velmi krátkou dobou odezvy. Nedostatkem PTMT je nízká kapacita propustné

membrány pro vodu, což za sušších podmínek prudce snižuje hydraulickou vodivost a navíc vzhledem k materiálu pružné membrány PTMT je toto zařízení určené pouze na jednorázové použití.

2.3 Použití tenzometru a jeho omezení

Měření tenzometrem má dle Richardse (1965) 5 základních aplikací: 1) Určení hloubky kořenového systému rostlin, které lze sledovat v čase. 2) Slouží pro indikaci nutnosti, regulaci a určení doby trvání závlahy vyhovující dané rostlině a místním podmínkám. 3) V odvětvích zemědělství, kde jsou místní klimatické podmínky známy, například jako ve sklenících apod. slouží tenzometry k stanovení přesného časového rozvrhu zavlažování. 4) Identifikace hladiny podzemní vody či jejího vertikálního pohybu. 5) Pomocí skupiny tenzometrů instalovaných v různých hloubkách lze stanovit hydraulický spád a tím pádem tedy i určit směr proudění ve vertikálním smyslu.

Bátřková a kol. (2013) uvádí přehled hodnot sacího tlaku, které lze v běžných zemědělsky využívaných půdách insitu naměřit, orientační popis stavů půdy – vody a jejich důsledky resp. opatření prezentuje tabulka 2.1.

Tabulka 2.1: Přehled hodnot sacích tlaků měřitelných insitu v zemědělsky běžně využívaných půdách.

Sací tlak (kPa)	Stav půda-voda	Důsledek/ opatření
≤ 0	Půda plně nasycena vodou, volná voda snadno viditelná	Nedostatek vzduchu pro kořeny rostlin, zahánění kořenů
0(1)-10	Půda nasycena vodou, voda není schopna stéci do hlubších horizontů (žádná volná voda, pouze vodní film)	Nepříznivý přebytek vody pro růst rostlin
10-20	Limit polní vodní kapacity	Max. množství vody dostupné pro příznivý růst rostlin a dostatek vzduchu
20-40	Vlhká půda	Půdní voda i vzduch v dobrém poměru
40-60	Zvlhčená půda	Půdní voda i vzduch v dobrém poměru pouze u těžkých jílovitých půd. Pro ostatní nutné zahájit závlahu ¹
60-80	Suchá půda	Pro těžké půdy pokyn pro závlahu. U středně těžkých půd riziko úhynu rostlin. U písčitéch půd již úhyn rostlin
> 1500	Smluvně stanovený bod vadnutí	Trvalý nedostatek vody pro rostliny a jejich následný úhyn

¹ Obecně platí: čím těžší půda, tím je počátek zavlažování posunut k vyšším hodnotám sacího tlaku.

Teoretický rozsah měření tenzometrů je obvykle limitován hodnotou tlaku - 1 atm. Navíc kvůli porézním materiálům (nejčastěji keramickým) základny tenzometru a zájmu rychlého dosažení rovnováhy systému, vyšší sací tlak by mohl zapříčinit také nežádoucí vnik vzduchu z půdy do porézního elementu a tím snížit přesnost měření. Prakticky je použití většiny tenzometrů insitu omezeno maximální hodnotou sacího tlaku 0,8 atm (0,8 bar nebo 80 kPa), což je způsobeno kavitací, kdy vzduch vycházející z roztoků za sníženého tlaku přerušuje spojitost vodního sloupce (Hillel 1998, Kirkham 2005).

Rozmezí sacího tlaku 0-0,8 atm v zemědělsky využívaných půdách představuje až více než 50 % množství vody dostupné pro rostliny a v hrubě texturovaných půdách i více než 75 %. Pro měření vyšších hodnot sacího tlaku než 0,8 atm se v praxi využívají psychrometry a osmometry (Slavík a Julinová 2010).

Pro rozšíření rozsahu měření tenzometry Peck a Rabbidge (1966, 1969) navrhovali nahradit vodu roztokem polymeru, nicméně toto vylepšení zůstalo v té době kvůli mnoha technickým problémům dostupných materiálů pouze ve stádiu návrhu. S technologickým vývojem výroby polymerů i keramických materiálů došlo však k obnovení zájmu vývoje polymerních tenzometrů (POT) a Bakker et al. (2007) a van der Ploeg et al. (2010) vytvořili vylepšené verze POT. Prototyp POT je prokazatelně schopen spolehlivě měřit hodnoty sacího tlaku po delší dobu, až k bodu vadnutí ($\geq -1,6$ MPa), což znamená asi 20-násobné zvětšení rozsahu měření oproti konvenčním vodou vyplněným tenzometrům. (van der Ploeg et al., 2010)

Guan a Fredlund (1997) uvedli, že existuje jiný maximální sací tlak pro každý tenzometr a pro odlišný proces nasycení tenzometru. Maximální měřitelný sací tlak tenzometru je omezen: (a) růstem již existujících plynových bublin; (b) vstupem vzduchu, nebo (c) nukleací bublinek páry nebo uvolňováním vzduchu zachyceného na povrchu ve štěrbinách.

Pokud kterýkoli z těchto tří mechanismů odděluje kapalinu ve vodní nádrži tenzometru od kapaliny v půdních pórech, další sání půdy potom vede k expanzi plynu. Vysoký stupeň nasycení porézního elementu zabrání mechanismu (a). Použití jemných porézních materiálů a vlastní povrchové napětí vody, předurčuje mechanismus (b). Třetí mechanismus se vztahuje k pevnosti vody v tahu, ale také zahrnuje přítomnost místa tvoření „jádra“, jako jsou povrchové trhliny (Harvey et al., 1944).

Vzduch uvnitř porézního prvku z počátečního stupně nasycení S_i , při počátečním absolutním tlaku P_i se podle Boyleova zákona za použití tlaku ΔP stlačí, což za předpokladu, že objem porézního elementu je konstantní umožňuje vstup vody do pórů již vyplněných vzduchem. Teoretická změna tlaku potřebná pro 100% nasycení ΔP_{100} , pak vyplývá ze vztahu:

$$\Delta P_{100} = 49P_i (1 - S_i) \quad (2.1)$$

Je-li suchý porézní prvek o atmosférickém tlaku ponořen za působení tlaku, teoretický tlak potřebný pro úplné nasycení by byl téměř 4,9 MPa. Tato rovnice předpokládá, že i ty nejméně nasycené tenzometry budou plně nasyceny za použití tlaku 4,9 MPa, nicméně však nepopisuje čas potřebný pro tento proces. Použití tlaku vyššího než 4,9 MPa (Guan a Fredlund, 1997) může snížit čas potřebný k nasycení, jak je znázorněno na vzorcích triaxiálních zkoušek Black a Lee (1973).

Pro počáteční stupně nasycení nad 95 % ukázali, že doba potřebná pro úplné nasycení výrazně klesá s vyšší hodnotou počátečního nasycení. Ridley (1993) navrhl, že čas potřebný pro nasycení za těchto vysokých tlaků může být snížen střídáním cyklů vysokých kladných tlaků a nízkých podtlaků.

Bublinky plynu (nejčastěji vzduchu, nebo vodní páry) snižují přesnost a citlivost měření tenzometru. Velká plynová bublina v tenzometru v podstatě deaktivuje hydraulický kontakt mezi tenzometrem a půdním prostředím. Vstup plynu může být dle Durnera a Ora (2006) způsoben: a) překročením vstupní hodnoty vzduchu porézného elementu tenzometru, b) spojením malých vzduchových bublinek uvnitř tenzometru vycházejících z rozpuštěného plynu ve vodě, c) vzduchem šířícím se z porézní membrány, a to zejména v průběhu dlouhodobého měření a d) po dosažení tlaku bodu varu půdní vody.

Přesné měření tenzometrem podléhá také teplotní závislosti, tu lze charakterizovat dvěma směry jako vliv teploty půdní vody a vliv teplotní závislosti měřidla (Kirkham 2005). V prvním případě se jedná o změnu fyzikálních veličin vody, a to hustoty a povrchového napětí v závislosti na teplotě. Tyto změny jsou nejmarkantnější při povrchu půdy, kde dochází vlivem slunečního záření k největším teplotním změnám. Problém teplotní závislosti měření tenzometrem se dá eliminovat vhodnou volbou doby měření (v ranních hodinách) anebo zastíněním dané oblasti, ve které měření probíhá. V druhém případě jde o teplotní roztažnost kovů, například v případě využití rtuťových manometrů. Z těchto důvodů je vhodné provést kontrolní experimenty v laboratoři pro zjištění gradientu změn měření způsobeného teplotními změnami a jejich význam.

Po odvzdušnění a před instalací tenzometru do požadovaného místa měření je nejprve nutné vyvrtat díru požadované hloubky o průměru nepatrně menším, nebo odpovídajícímu průměru daného tenzometru. Hloubku, do níž má být tenzometr instalován je vhodné před samotným vrtáním označit na vrtacím zařízení. Do takto vyhloubené šachty se pak tenzometr opatrně vkládá a sleduje se aktuální hodnota tlaku, která nesmí překročit maximální limitní hodnotu měřidla, jinak dojde k jeho poškození (Warrick 2002).

Tenzometr by neměl být instalován v době mrazivého počasí, aby nedošlo k jeho poškození vlivem zmrznutí a následné expanzi vody, resp. ledu uvnitř tenzometru. Pokud je nutné měřit i za takovýchto podmínek, tenzometr by měl být usazen v nezámrazné hloubce, nebo by měl být namísto vody opatřen nemrznoucí kapalinou, např. roztok glykol – voda (Kirkham 2005).

2.4 Výzkum makropórů a preferenčního proudění

Preferenční proudění se vztahuje k nerovnoměrnému a rychlému pohybu vody a rozpuštěných látek přes porézní médium, typicky půdu (Bouma 1981). Tyto cesty, kterými jsou půdní voda a rozpuštěné látky přednostně prováděny se nazývají cesty preferenčního proudění (Helling a Gish, 1991). Preferenční tok může významně ovlivnit pohyb půdní vody v lesních půdách (Noguchi et al., 1999). Toto proudění může také zvýšit dostupnost půdní vody a omezit povrchový odtok z lesních povodí

Mezi faktory odpovědné za tvorbu preferenčních cest patří: heterogenita porézního média (Winiarski et al., 2013), počáteční vlhkost (Kätterer et al., 2001) a vodoodpudivé vlastnosti porézního média (Ritsema et al. 1993). Preferenční proudění půdním prostředím je velmi významné z hlediska tvorby odtoku, transportu chemických látek a živin, z hlediska rozložení a doby pohybu vody v půdě nebo povodí. Nicméně účinky preferenčního proudění v půdě jsou obvykle ignorovány generalizovanými hydrologickými modely.

Již výzkumníci v 19. a počátku 20. století (Engler, 1919; Lawes a kol., 1882, Schumacher, 1864) pozorovali, že makropóry představující velké souvislé otvory nebo kanálky mohou ovlivnit pohyb vody a infiltraci v půdě.

Publikace Bevena a Germanna (1982) stále tvoří základ pro pochopení preferenčního proudění v hydrologii. Jsou zde definovány různé typy makropórů, průtok makropóry a procesy preferenčního proudění. Beven a Germann byli jedni z mála hydrologů argumentující významnost makropórů a nevhodnost jejich zanedbání při fyzikálním modelování. Dokonce zpochybňují adekvátnost snadno aplikovatelného přístupu Richardsovy rovnice (1931) a teorii kapilárního toku coby základu mnoha teorií, modelů a definic půdních vlastností: „Mnoho fyzikálních modelů nyní počítá s nějakou reprezentací preferenčního proudění jako duálního kontinua, duální pórovitosti nebo možnosti duální propustnosti, tyto jsou obecně přišroubovány k Richardsovu řešení bez přísného fyzikální vysvětlení a to i přes skutečnost, že fyzici naznačují, že sám Richardsův přístup není adekvátní znázornění procesů proudění v heterogenním nenasyceném půdním prostředí“ (Beven a Germann, 2013, odst. 70). Richardsova rovnice dokonce dominuje reprezentaci povrchových půdních procesů parametrizací sítě v měřítku globálních cirkulačních modelů (Weiler, 2017).

K odklonu od všudpřítomné Richardsovy rovnice Beven a Germann (1982) navrhují využití teorie Stokesova toku, jehož platnost je ovšem omezena na oblast laminární proudění, pro popis preferenčního proudění v půdách s menšími makropóry a mesopóry (kořenové kanálky, kamenivo, atd). Nicméně proudění v makropórech, zejména v žízálech chodbičkách, půdních kanálech a ve větších půdních trhlinách je často turbulentní s vysokou rychlostí proudění, řádově 50-70 cm/s (Anderson a kol. 2009a; Weiler, 2001). Je tedy třeba rozvíjet nové teorie vyhovující i za podmínek turbulentního proudění, které může být v půdách s většími makropóry markantní.

Interdisciplinární posouzení zejména z pohledu půdní biologie, fyziky půdy, fyziologie rostlin a hydrologie by, dle názoru Weilera (2017), pomohlo předpovídat výskyt a vlastnosti půdních makropórů a dalších účinků vyvolávajících preferenční proudění.

Nejběžnější metodou, jak detekovat a následně kvantifikovat makropóry a cesty preferenčního proudění je infiltrace barevných stopovačů insitu, následné pořízení snímků obarvených horizontů a interpretace obrazovou analýzou. Aby mohla být provedena interpretace, obrazový materiál musí být adekvátně upraven, Lu a kol. (2015) udávají postup úpravy snímků v následujících krocích: a) geometrickou korekcí, která eliminuje geometrické zkreslení způsobené nedokonalé rovnoběžným umístěním fotoaparátu vůči obarveným půdním horizontům; b) korekce osvětlení eliminující rozdíl v citlivosti povrchu obarveného profilu, který má za následek nerovnoměrné osvětlení a zastínění původního obrazu; c) nastavení barev pro zjednodušení obrazové informace a pro identifikaci tvaru obarvené oblasti; d) snížení šumu způsobeného procesem úpravy barev; e) transformace obrazu do číselných hodnot; a nakonec f) obrazová analýza charakteristických parametrů k rozlišení velikostních tříd z prostorové polohy preferenčních cest proudění v obarvené půdě.

3 Materiály a metodika experimentů

V této kapitole jsou postupně popsány: prototyp mikrotenzometru, technologie zpracování porézního elementu mikrotenzometrů a jednotlivé experimenty testování mikrotenzometrů.

Předmětem experimentálních testovacích bylo 10 prototypů půdních mikrotenzometrů o průměrech propustného elementu 1,10; 1,73 a 1,80 mm lišících se technologií výroby. Porézní elementy tenzometrů byly experimentálně vyříznuty do požadované velikosti pomocí laseru na pracovišti Centrum Nové technologie, ZČU v Plzni.

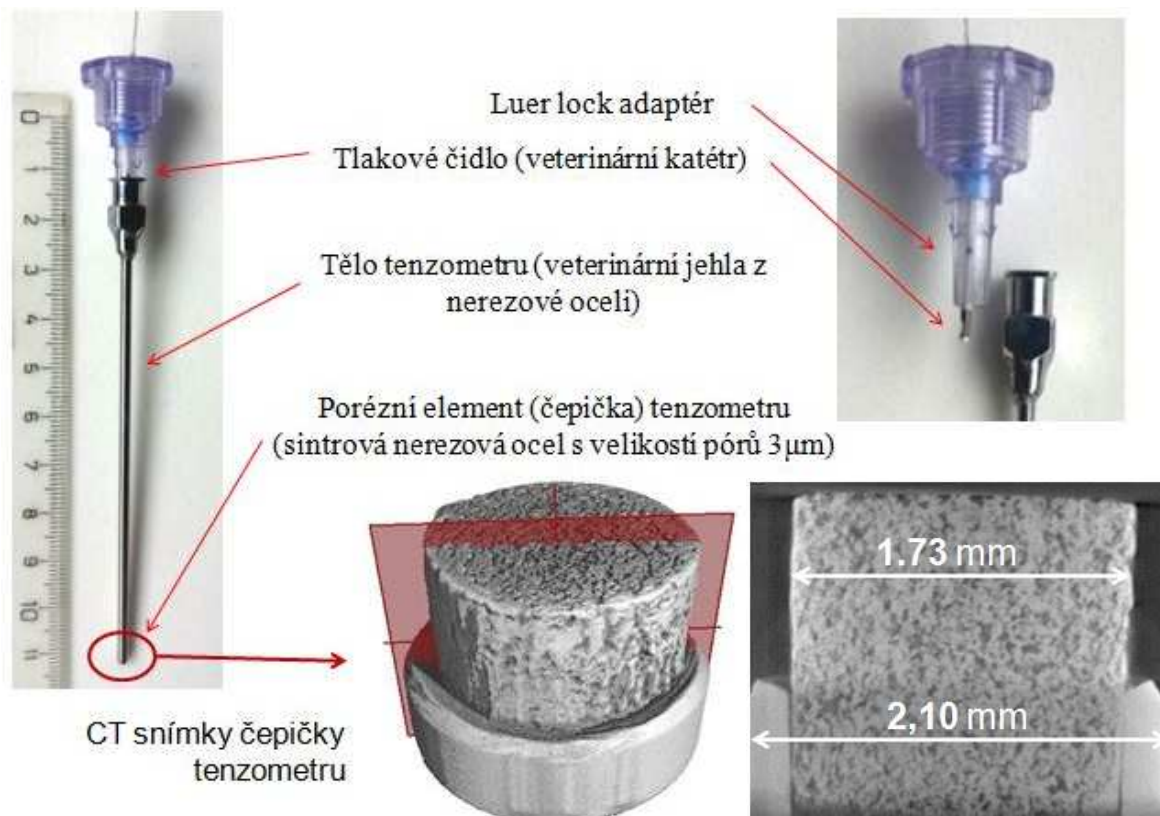
Samotné experimenty lze pak rozdělit do 2 skupin, a to na experimenty prováděné v rámci stáže na Universität für Bodenkultur Wien- BOKU, kde byly testovány mikrotenzometry s označením MT6, MT7 a MT9 a experimenty prováděné v laboratořích Katedry hydromeliore a krajinného inženýrství, Fakulty stavební v Praze, kde byly testovány mikrotenzometry s označením MT1, MT2 a MT6. Experimenty se liší v experimentální sestavě, konkrétně typem referenčního měřidla. Pro experimenty provedené v rámci stáže ve Vídni byl použit tenzometr, který je součástí zařízení pro měření retenčních křivek Hyprop (UMS, Německo), jež na domovské katedře není k dispozici. Na domovské katedře byl jako referenční používán tenzometr T5 (UMS, Německo), což je tenzometr shodný s tenzometrem v zařízení Hyprop.

3.1 Popis prototypu mikrotenzometru

Prototyp mikrotenzometru se skládá ze tří základních částí (viz obr. 3.1):

- i) odnímatelného elektronického tlakového čidla, kterým je tenký elektronický veterinární katétr Mikro-Tip® Catheter, SPR-524, (Millar, Inc., Texas, U.S.A), jenž je připojen do dataloggeru (CRX10, Campbell Scientific, Inc., Utah, U.S.A);
- ii) těla mikrotenzometru sestávající se z veterinární odběrové jehly 90 x Ø 2,1 mm, vyrobené z nerezové oceli; případně menšího rozměru porézního elementu byla jehla zúžena na kapiláru o rozměru 17 RW;
- iii) porézního elementu (čepičky) mikrotenzometru s velikostí póru 3 µm vyrobeného ze sintrové nerezové oceli (AISI3016, GKN Sika - R3). Porézní element byl obroben ve Výzkumném centru Nové technologie na Západočeské Univerzitě v Plzni a nakonec na pracovišti ČVUT v Praze vlisován do těla mikrotenzometru.

Všechny části mikrotenzometru jsou dokonale vzducho- i vodotěsně spojeny. Spoj mezi čidlem tlaku a tělem mikrotenzometru zajišťuje systém LUER lock. Mikrotenzometr je vyplněn odplyněnou destilovanou vodou a před použitím je dokonale odvzdušněn.



Obrázek 3.1: Popis prototypu mikrotenzometru: vlevo zkompletovaný mikrotenzometr; vpravo nahoře detail tlakového čidla; dole CT snímky porézní čepičky mikrotenzometru.

3.2 Technologie zpracování porézního elementu mikrotenzometrů

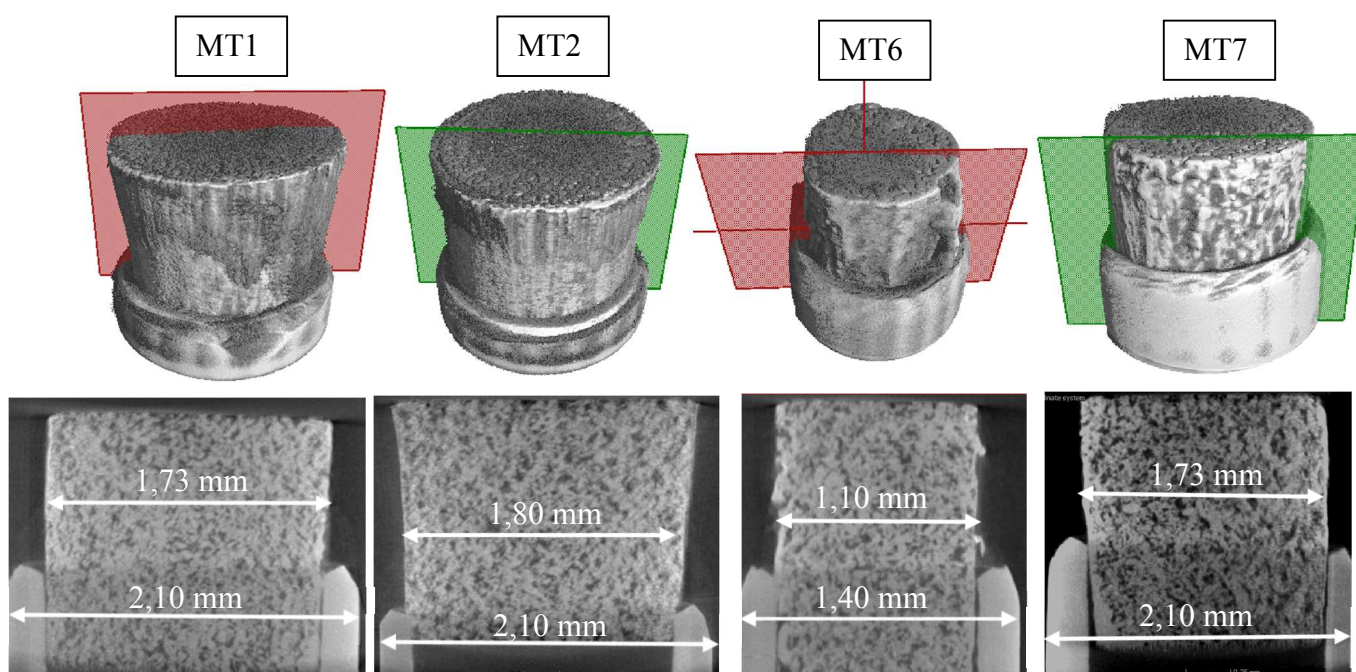
Následující tabulka 3.1 udává přehled testovaných mikrotenzometrů a použití technologií laserového řezání daných propustných elementů mikrotenzometru. Těchto 10 prototypů mikrotenzometru bylo nejprve podrobeno jednoduchému testu funkčnosti, při němž se pouze 5 mikrotenzometrů ukázalo funkčními. Nutno podotknout, že mikrotenzometr s označením MT9 byl v průběhu provádění experimentů zničen, a to při jeho odvzdušňování, kdy byl jeho propustný element doslova vystřelen při aplikovaném přetlaku.

Jak je patrné z tabulky 3.1 porézní elementy vyrobených prototypů mikrotenzometru byly nejprve vyříznuty laserem s výkonem 400 W (dále v textu bude označen jako 400 W), některé byly následně „dočištěny“ pikosekundovým laserem (dále označen jako PS). Jelikož však po řezání 400W laserem docházelo ke slévání roztaveného materiálu při povrchu porézního elementu, resp. po jeho obvodu, musel být obvod elementu následně zabroušen, aby se zalité póry roztaveným materiálem opět otevřely.

Tabulka 3.1: Přehled testovaných tenzometrů a použitých technologií zpracování porézního elementu tenzometru.

Označení tenzometru	Ø porézního elementu tenzometru (mm)	Technologie výroby porézního elementu tenzometru	Předběžný test funkčnosti	Referenční zařízení
MT1	1,73	400 W; zabroušený + PS	funkční	T5
MT2	1,80	PS	funkční	T5
MT3	1,10	400 W; zabroušený + PS	nefunkční	-
MT4	1,10	PS	nefunkční	-
MT5	1,73	400 W; zabroušený	nefunkční	-
MT6	1,10	400 W; zabroušený	funkční	HYPROP, T5
MT7	1,73	400 W; zabroušený + PS	funkční	HYPROP, T5
MT8	1,10	400 W; zabroušený + PS	nefunkční	-
MT9	1,73	400 W; zabroušený	funkční, později zničen	HYPROP
MT10	1,10	400 W; zabroušený	nefunkční	-

Obrázek 3.1 pak prezentuje CT snímky (3D pohled a řez vyznačenou rovinou) propustných elementů funkčních mikrotenzometrů. CT snímky byly pořízeny na Katedře měření, Fakulty elektrotechnické, ČVUT v Praze.



Obrázek 3.2: Série CT snímků porézních elementů jednotlivých mikrotenzometrů; nahoře 3D pohled, dole řez vyznačenou rovinou.

Odvzdušnění tenzometrů bylo prováděno vždy pod hladinou odplyněné destilované vody ve dvou krocích: první krok představovalo odvzdušnění ve vakuové komoře, a to při tlaku - 0,9 bar po dobu minimálně 24 hodin; druhý krok spočíval v odvzdušnění tenzometru bezprostředně před jeho použitím, a to pomocí podtlaku vyvinutého pístem injekční stříkačky do té doby, než byly eliminovány viditelné vzduchové bubliny vycházející z tenzometru. Navíc, bezprostředně po aplikaci podtlaku pístem injekční stříkačky byl aplikován následný přetlak, a to zejména z důvodu zabránění vstupu vzduchu po otevření hydraulicky uzavřeného systému. Tímto způsobem byly odvzdušňovány všechny použité tenzometry.

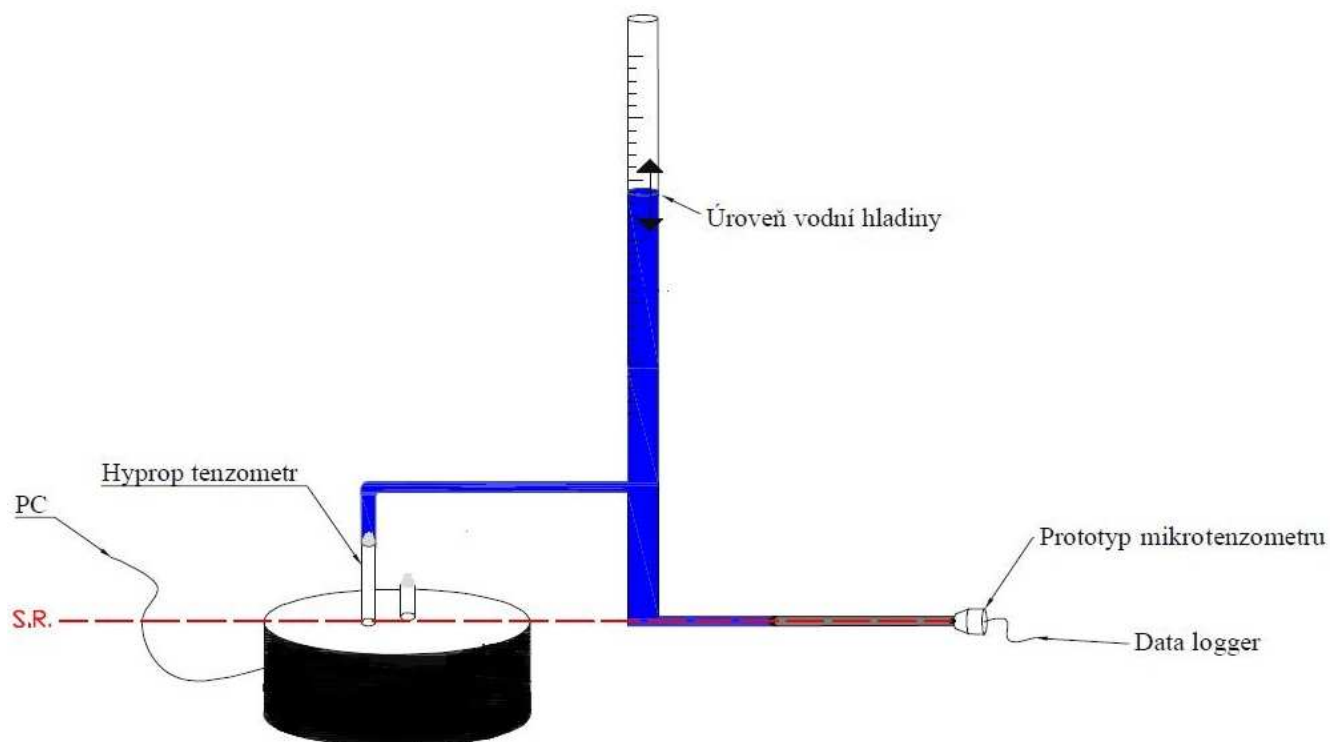
3.3 Ověření přesnosti měření tlakového čidla

Cílem tohoto experimentu bylo ověření přesnosti měření tlakového čidla a porovnání naměřených hodnot s reálnými hodnotami tlakové výšky vodního sloupce. Z tohoto důvodu byl s intervalem 1 s měřen tlak vodního sloupce vzhledem ke srovnávací rovině, která ležela v rovině tlakového čidla. Úroveň vodní hladiny byla v pravidelných intervalech, tj. po dosažení ustálení měřené tlakové výšky postupně zvyšována. Tlakové čidlo bylo k vodnímu sloupci připojeno pomocí Luer lock adaptéru a gumové hadičky. Byly zapisovány začátky a konce zvyšování úrovně vodního sloupce.

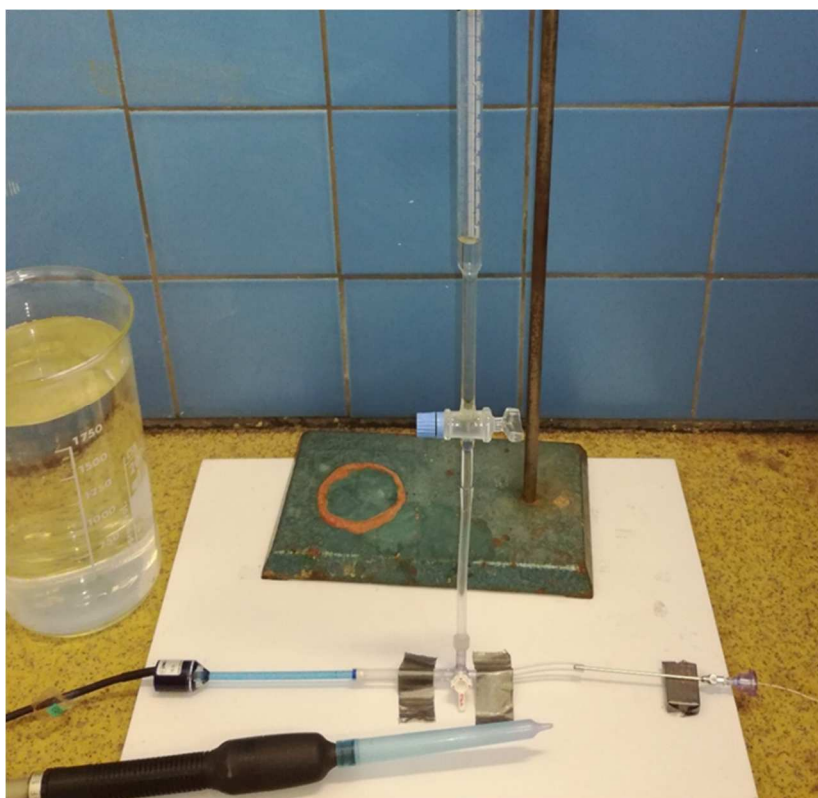
3.4 Zjištění přesnosti měření mikrotenzometru

Podobně jako v předchozím experimentu i zde bylo záměrem experimentu ověření přesnosti měření prototypu mikrotenzometru a porovnání naměřených hodnot s reálnými hodnotami tlakové výšky vodního sloupce. Obdobně byl s 1s intervalem měřen tlak vodního sloupce vzhledem ke srovnávací rovině, která ležela v rovině tlakových čidel. Úroveň vodní hladiny byla v pravidelných intervalech, tj. po dosažení ustálení měřené tlakové výšky zvyšována za současného měření tlaku prototypem mikrotenzometru a konvenčním tenzometrem zařízení Hyprop, nebo tenzometrem T5. Vždy byla zajištěna těsnost spojů tenzometrů k vodnímu sloupci a odstraněny případné vzduchové bubliny v systému. Toho bylo docíleno pomocí gumových hadiček a vyklepáváním bublin směrem k volné hladině. V systému byla použita destilovaná a odplyněná voda. Pracovní schéma tohoto

experimentu s tenzometrem zařízení Hyprop prezentuje obrázek 3.3. Obrázek 3.4, resp. fotografie pak zobrazuje experimentální sestavu s konvenčním tenzometrem T5.



Obrázek 3.3: Pracovní schéma experimentu zjištění přesnosti měření mikrotenzometru: vlevo referenční tenzometr Hyprop (UMS, Inc. Německo); uprostřed úroveň vodního sloupce vzhledem ke srovnávací rovině; vpravo prototyp mikrotenzometru.

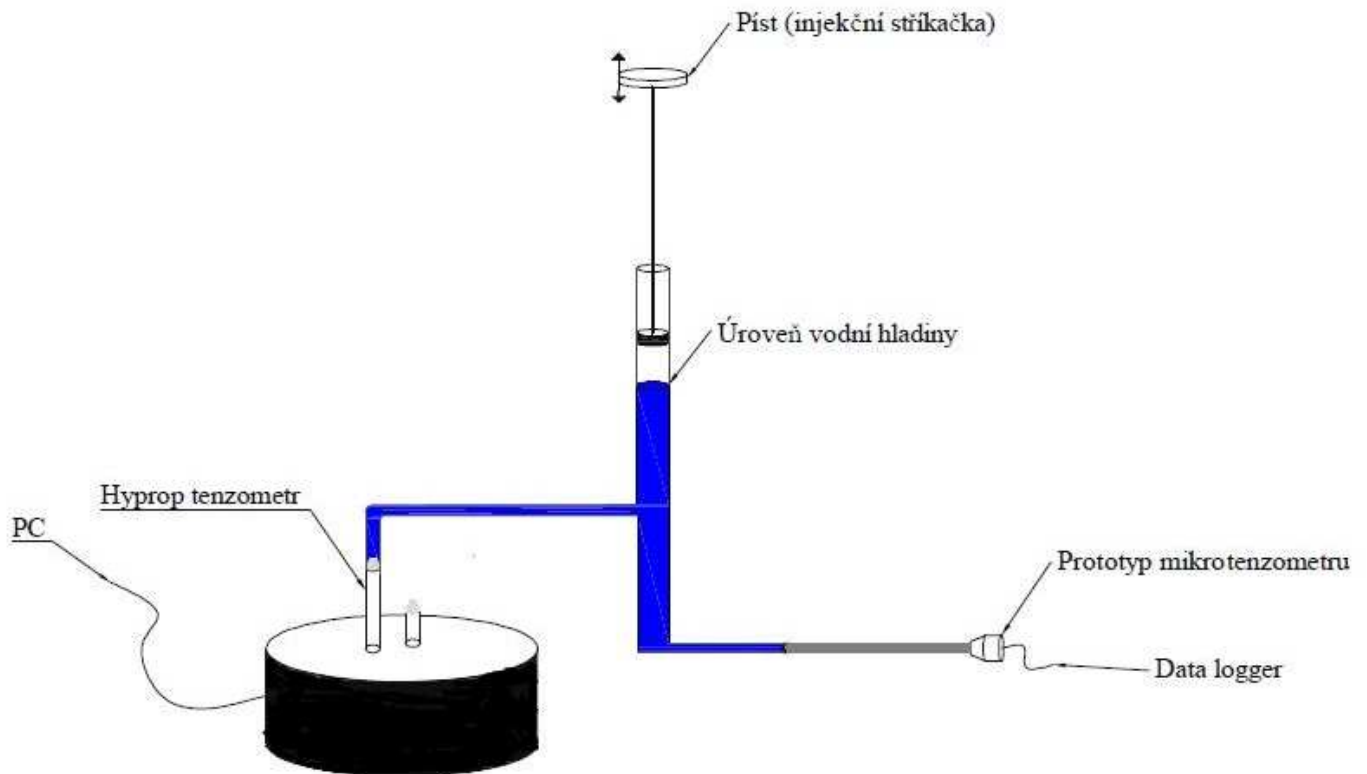


Obrázek 3.4: Fotografie experimentální sestavy testování přesnosti měření mikrotenzometru; vlevo komerčně dostupný tenzometr T5, vpravo prototyp mikrotenzometru.

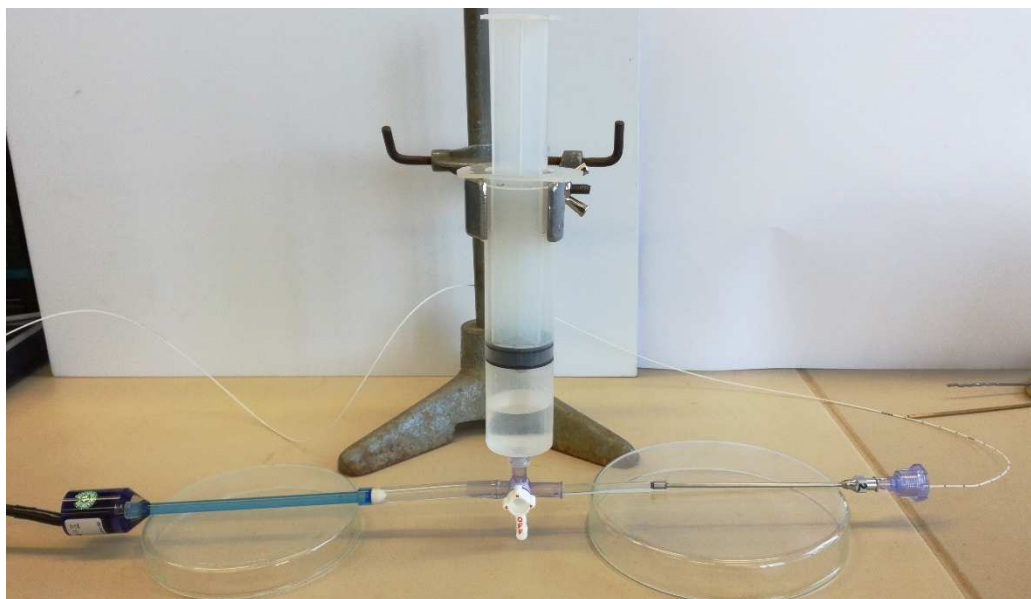
3.5 Testování reakční doby mikrotenzometru

Cílem tohoto experimentu bylo zjištění rychlosti odezvy prototypu mikrotenzometru na rychlé a výrazné změny tlakové výšky, a to jak v kladných tak i v záporných hodnotách. Prototyp mikrotenzometru a komerčně vyráběný tenzometr Hyprop, nebo T5 (UMS, Německo) byly připojeny do hydraulicky uzavřeného systému s odplyněnou destilovanou vodou, v němž byl tlak regulován pomocí pístu, respektive injekční stříkačky. Krok měření byla 1 sekunda. Vzhledem k vyšším, respektive nižším tlakům působících v uzavřeném systému, byl kladen větší důraz na těsnost všech spojů. Tlaková čidla byla k vodnímu sloupci připojena pomocí 3-cestné fitinky a gumových hadiček.

Obrázek 3.5 představuje pracovní schéma experimentu testování reakční doby mikrotenzometru s využitím komerčního tenzometru, který je součástí sondy Hyprop. Obrázek 3.5, respektive fotografie prezentuje stejný experiment s využitím konvenčního tenzometru T5.



Obrázek 3.5: Pracovní schéma experimentu testování reakční doby mikrotenzometru: vlevo referenční tenzometr Hyprop (UMS, Inc. Německo); uprostřed píst, respektive injekční stříkačka zajišťující rychlé a výrazné změny tlaku v systému; vpravo prototyp mikrotenzometru.



Obrázek 3.6: Fotografie experimentální sestavy testování reakční doby mikrotenzometru

3.6 Zjištění rozsahu měření mikrotenzometru v půdních vzorcích

Cílem tohoto experimentu bylo ověření chování prototypu mikrotenzometru v půdních vzorcích, zejména pak zjištění tzv. vstupní hodnoty vzduchu, jenž určuje rozsah měření tenzometru. Pro tento experiment byly použity 2 různé uměle připravené půdní vzorky. Přehled použitých vzorků, jejich texturní složení a objemové hmotnosti při nulové vlhkosti prezentuje tabulka 3.2.

Před začátkem experimentů byla vždy stanovena objemová hmotnost vzorku při dané vlhkosti, poté byl vzorek po dobu minimálně 48 hodin zdola sycen odplyněnou destilovanou vodou. Po dosažení plného nasycení vzorku byly do stejné úrovně (viz obr. 3.8) instalovány dva tenzometry, tedy prototyp mikrotenzometru a komerčně vyráběný tenzometr T5 (UMS, Německo). Poté se za měření tlakové výšky s intervalem 5 minut nechal vzorek samovolně sušit (evaporací). Experiment probíhal do té doby, než měření prototypem tenzometru v důsledku zavzdušnění selhalo. Fotografie experimentální sestavy znázorňuje obrázek 3.7.

Tabulka 3.2: Přehled použitých půdních vzorků a jejich základní vlastnosti.

Označení	Lokalita	Písek %	Prach %	Jíl %	Objemová hmotnost (g/cm ³)
Vz. A	Srbsko	35,5	52,5	12,0	1,13
Vz. B	Heřmánkovice	41,2	52,9	5,9	1,35



Obrázek 3.7: Fotografie experimentálního set-upu při zjišťování rozsahu měření mikrotenzometru v půdním vzorku; vlevo (modrý) tenzometr T5, vpravo (stříbrný) prototyp mikrotenzometru.

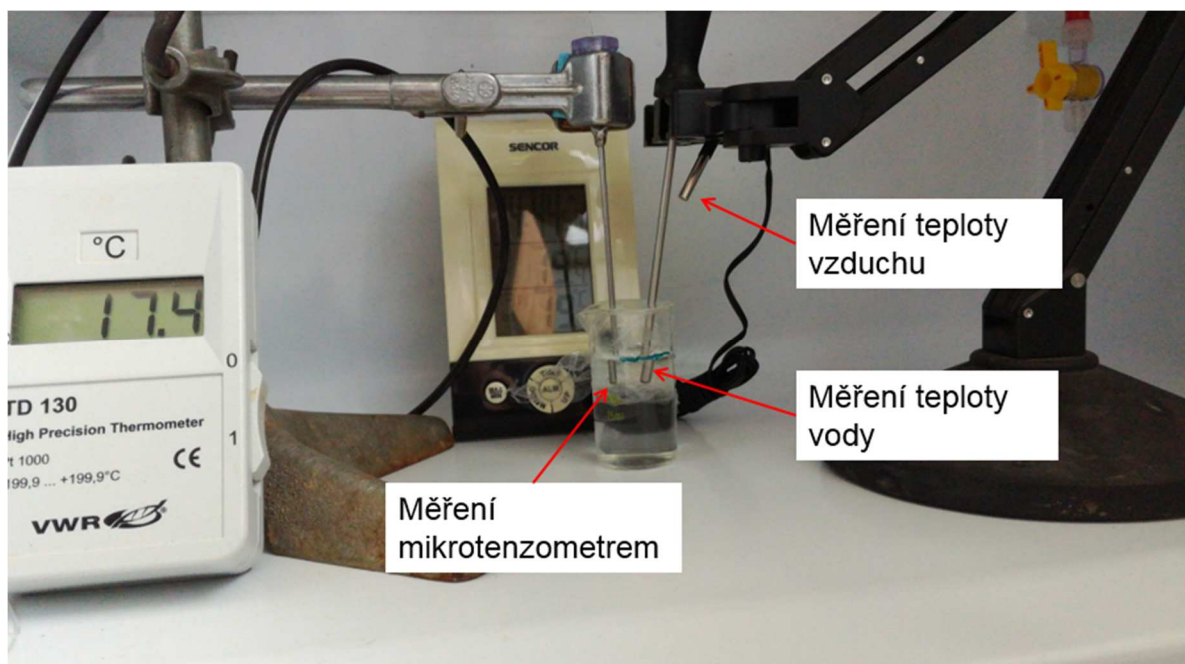


Obrázek 3.8: Fotografie řezu půdního vzorku po vyjmutí tenzometru T5 a prototypu mikrotenzometru.

3.7 Stanovení teplotní závislosti měření mikrotenzometru

Teplotní závislost měření prototypem mikrotenzometru byla zjištěna pomocí laboratorního inkubátoru Q-Cell 200/40 Basic+ (POL – LAB, Polsko). Mikrotenzometr byl ponořen do odplyněné destilované vody a umístěn do inkubátoru. Datalogger byl umístěn vně inkubátoru. Zároveň byla sledována teplota vody, v níž byl tenzometr ponořen a teplota vzduchu v přímém okolí mikrotenzometru. Experimentální sestava tohoto experimentu je zobrazena na obrázku 3.9.

V jednotlivých krocích (5°C/ cca 3 hod), a to vždy po ustálení teploty vody i vzduchu uvnitř inkubátoru a měřené hodnoty tlakové výšky byla nejprve zvyšována teplota uvnitř inkubátoru v rozmezí od 0 do 15°C a v následujícím experimentu byla teplota postupně snižována v rozmezí teplot od 35 do 5°C. Výpar vody, ve které byl umístěn mikrotenzometr uvnitř inkubátoru lze považovat za zanedbatelný, protože nádoba s vodou byla zakryta fólií.



Obrázek 3.9: Experimentální sestava uvnitř laboratorního inkubátoru.

3.8 Pilotní měření mikrotenzometrem v půdním makropóru

Cílem tohoto experimentu bylo ověření použitelnosti mikrotenzometru za účelem, pro který byl navrhnut a vyvinut, tedy pro bodové měření tlakové výšky v půdním makropóru.

Pro tento experiment byl nahutněn půdní vzorek s označením vz. A (35,5 % písek, 52,5 % prach a 12 % jílu) s uměle vytvořeným makropórem ústícím do drenáže. Byly vyzkoušeny různé varianty složení drenážní vrstvy, například samotná vrstva hrubozrnného písku, jež však nebyla dostatečně propustná a docházelo tedy k příliš pomalému odtoku vody. Proto byla zvolena varianta s vrstvou skleněných kuliček, které byly doplněny tenkou vrstvou hrubozrnného písku, jejíž účelem bylo vytvoření rozhraní mezi půdou a skleněnými kuličkami. Dále byly vyzkoušeny sítky s různou velikostí ok, jemné sítky výrazně snižovaly rychlost odtoku.

Jako optimální byla zvolena drenážní vrstva vzorku sestávající se z vrstvy skleněných kuliček s průměrem 4,0 mm, sítky s velikostí oka 0,6 mm, vrstvy hrubozrnného písku frakce 0,6 až 1,2 mm a opět sítky s velikostí oka 0,6 mm.

Makropór byl vytvořen pomocí bambusové tyčky půlkruhového průřezu s průměrem 2 mm, která byla po vrstvách zasypávána optimálně vlhkou půdou a hutněna. Bambusová tyčka byla vyjmuta až po instalaci mikrotenzometrů do požadovaných poloh. Přípravu vzorku s uměle vytvořeným makropórem popisuje série obrázků 3.10.

Optimální vlhkost půdního vzorku byla zvolena 25 % (hmotnostní vlhkost), a to z důvodu nepřekročení vstupní hodnoty vzduchu cca - 350 hPa. Zavzdušnění mikrotenzometru by totiž způsobilo prodloužení reakční doby mikrotenzometru a tím pádem i k měření nesprávných hodnot tlakové výšky v čase. Díky umělému umístění makropóru, respektive bambusové tyčky ústící do

drenáže byl makropór v půdním vzorku jasně lokalizovatelný a tudíž byly instalovány 2 mikrotenzometry do požadovaných poloh. Mikrotenzometr s ozn. MT1 byl umístěn do přímé blízkosti makropóru, respektive k vnějšímu povrchu makropóru. Druhý mikrotenzometr s označením MT7 byl vložen do vzdálenosti cca 1 cm od makropóru. Po vsazení obou mikrotenzometrů do požadovaných poloh ve vzorku s makropórem byla bambusová tyčka vyjmuta a následně byla zahájena infiltrace s konstantní intenzitou 0,57 ml/s lokalizovaná pomocí veterinární jehly s průměrem 2,1 mm přímo do makropóru. Aby bylo zabráněno erozi vyplavování půdních vlivem dopadu kapek vody, byl povrch půdního vzorku s makropórem zakryt filtračním papírem.



Obrázek 3.10: Postupná příprava vzorku s uměle vytvořeným makropórem.

Průběh tohoto experimentu s předpokládaným velmi rychlým průběhem byl zaznamenáván videokamerou, aby bylo možné interpretovat proudění vody makropórem, průběh infiltrace a redistribuce vody v bezprostředním okolí makropóru.

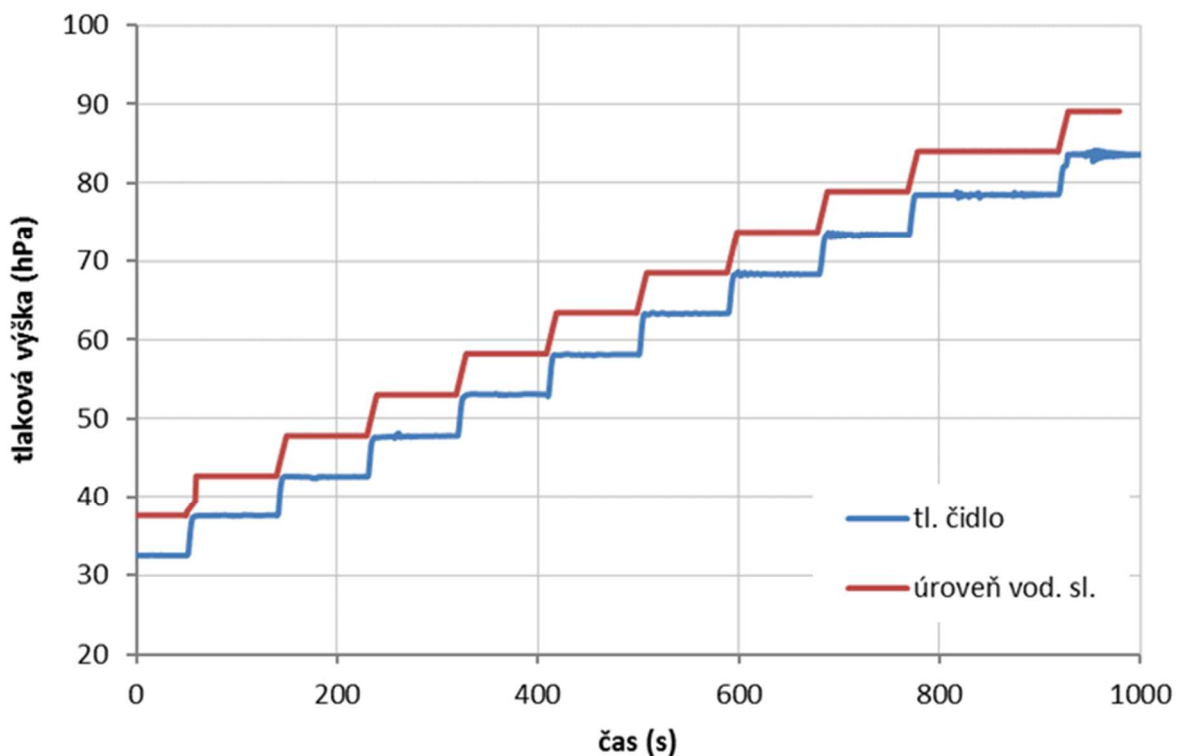
4 Výsledky experimentů

Následující kapitola prezentuje data získaná z provedených experimentů testování mikrotenzometrů s označením MT1, MT2, MT6 a MT7. Část výsledků testování mikrotenzometru MT9 získaných před jeho zničením zde není prezentována.

4.1 Ověření přesnosti a citlivosti měření tlakového čidla

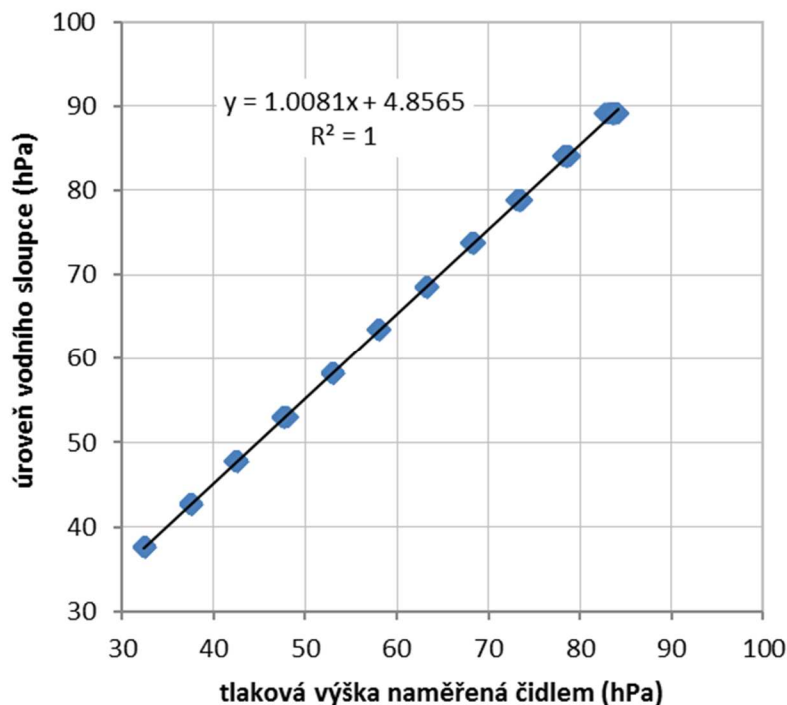
Z naměřených dat reprezentovaných obrázkem 4.1 je patrná shoda průběhu tlakové výšky naměřené tlakovým čidlem s úrovní vodního sloupce vzhledem ke srovnávací rovině ležící v úrovni tlakového čidla. Posun křivek je způsoben tzv. off-setovou hodnotou, která se skládá ze sloužek: a) elektronické odchylky a b) rozdílu atmosférického tlaku vzhledem k normálnímu atmosférickému tlaku (měří-li čidlo absolutní tlak). Hodnota off-set tedy může být dlouhodobě v čase proměnlivá, a to v řádu jednotek či desítek hPa.

V průběhu experimentu byly zaznamenávány jednotlivé doby začátku a konce nárůstu hodnot úrovně vodního sloupce, tudíž byly tyto mezilehlé hodnoty stanoveny lineární interpolací z mezilehlých konstantních hodnot ustálené úrovně vodního sloupce. Při porovnání hodnot naměřených tlakovým čidlem s hodnotami úrovně vodního sloupce byly tyto přírůstkové hodnoty vyloučeny.



Obrázek 4.1: Data prezentující přesnost měření tlakového čidla; prostřednictvím měření úrovně vodního sloupce vzhledem ke srovnávací rovině.

Z rovnice lineární závislosti tlakové výšky naměřené tlakovým čidlem na úrovni vodního sloupce, viz obrázek 4.2, lze kvantifikovat off-set hodnotu tlakového čidla pro dané měření, a to 4,85 hPa. Z hodnoty směrnice trendu, která nabývá hodnoty velmi blízké 1, je pak patrná takřka dokonalá linearita měření tlakovým čidlem.



Obrázek 4.2: Graficky znázorněný vztah mezi hodnotami úrovně vodního sloupce a hodnotami tlakové výšky naměřenými tlakovým čidlem.

Citlivost měření tlakového čidla lze vyjádřit jako vztah vstupního signálu v mV a výstupního signálu v kPa, resp. v hPa a představuje hodnotu minimální velikosti vstupního signálu, který zprostředkuje výstupní signál větší nežli tzv. šum. Citlivost tlakového čidla dle manuálu (Millar, Inc., Texas) činí $37 \mu\text{V} = 1 \text{ kPa}$, resp. $3,76 \mu\text{V} = 1 \text{ hPa}$. Vstupní signál do dataloggeru byl naprogramován na rozsah od -7,5 do 7,5 mV, tedy 15 mV. Datalogger dle manuálu CR10X pracuje s rozlišením 2^{13} dílků.

Citlivost dataloggeru lze stanovit následujícím vztahem:

$$\frac{15}{2^{13}} = 0,00183 \text{ mV} = 1,83 \mu\text{V}$$

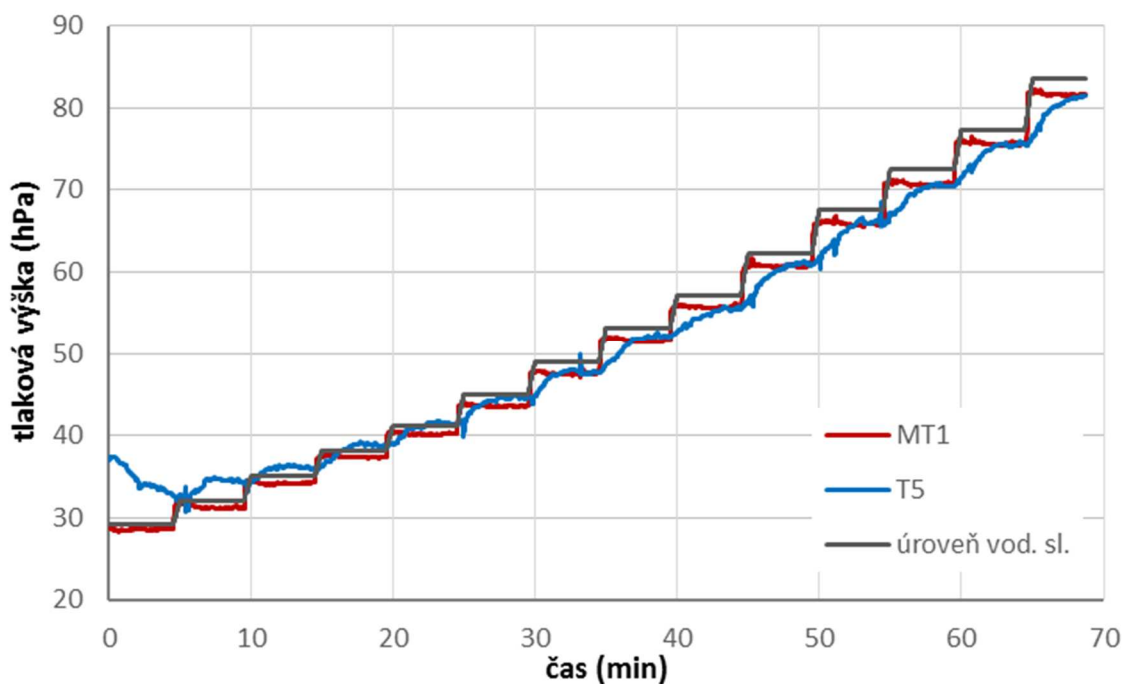
Citlivost dataloggeru je tedy přibližně dvakrát větší než citlivost tlakového čidla.

4.2 Zjištění přesnosti měření mikrotenzometru

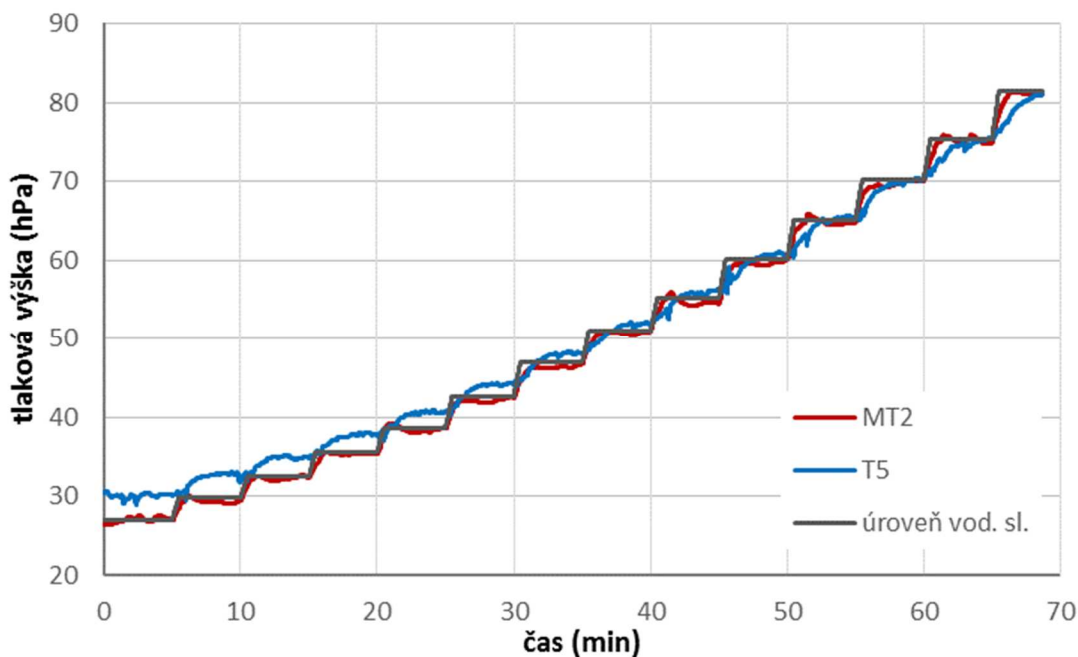
Jak je patrné z obrázků 4.3 a 4.4 přesnost měření testovaných mikrotenzometrů MT1 a MT2 je výrazně vyšší nežli měření konvenčním tenzometrem T5. Nepřesnost měření a pomalejší rychlost reakce tenzometru T5 je pravděpodobně dána nedostatečným odvodušněním jeho propustného elementu, který je vyroben z porézní 8-barové keramiky a při ručním odvodušňování tenzometru T5 pomocí injekční stříkačky nemohla být tato hodnota přetlaku plně dosažena. Tuto možnost při osobní konzultaci v rámci výročního zasedání Evropské geovědní unie EGU2017 ve Vídni potvrdil i generální ředitel společnosti UMS Ing. Georg von Unold.

V průběhu experimentu byly zaznamenávány jednotlivé doby začátku a konce nárůstu hodnot úrovně vodního sloupce, tudíž byly tyto mezilehlé hodnoty stanoveny lineární interpolací z mezilehlých konstantních hodnot ustálené úrovně vodního sloupce. Mírná postupně se zvyšující odchylka hodnot vodního sloupce, viz obr. 4.3, je zřejmě způsobena klesajícím atmosférickým tlakem. Velmi dobrá je zde také reakční rychlost prototypů mikrotenzometru na malé změny tlakové výšky, která je prakticky totožná se změnami úrovně tlakové výšky vodního sloupce.

Rozkolísanost měření mikrotenzometrů MT1 a MT2, jež je možné kvantifikovat pomocí standardních odchylek vypočítaných z intervalů ustálených hodnot tlakové výšky, lze považovat za zanedbatelnou. Pro mikrotenzometr MT1 byla zjištěna maximální standardní odchylka od ustálené hodnoty tlakové výšky 0,20 hPa na úrovni tlaku 77.4 hPa. V případě mikrotenzometru MT2 pak byla zjištěna maximální standardní odchylka 0.59 hPa na úrovni tlaku 75.4 hPa. Přesnost měření mikrotenzometrů MT1 i MT2 lze vyhodnotit jako velmi dobrou.

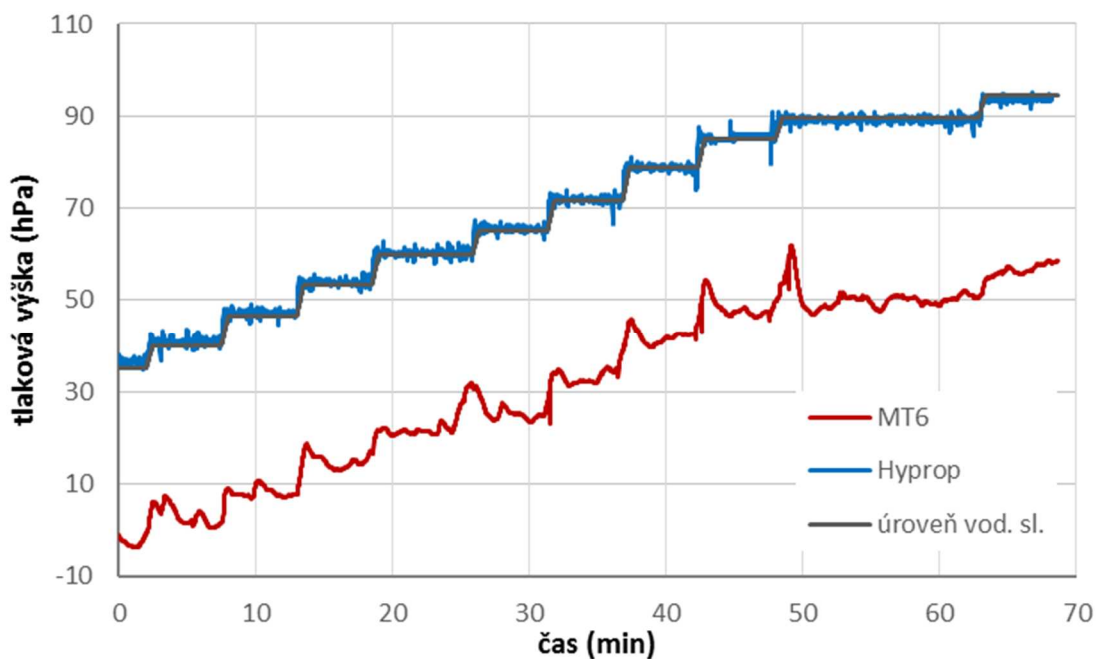


Obrázek 4.3: Data naměřená při experimentu zjišťování přesnosti měření mikrotenzometru s označením MT1.



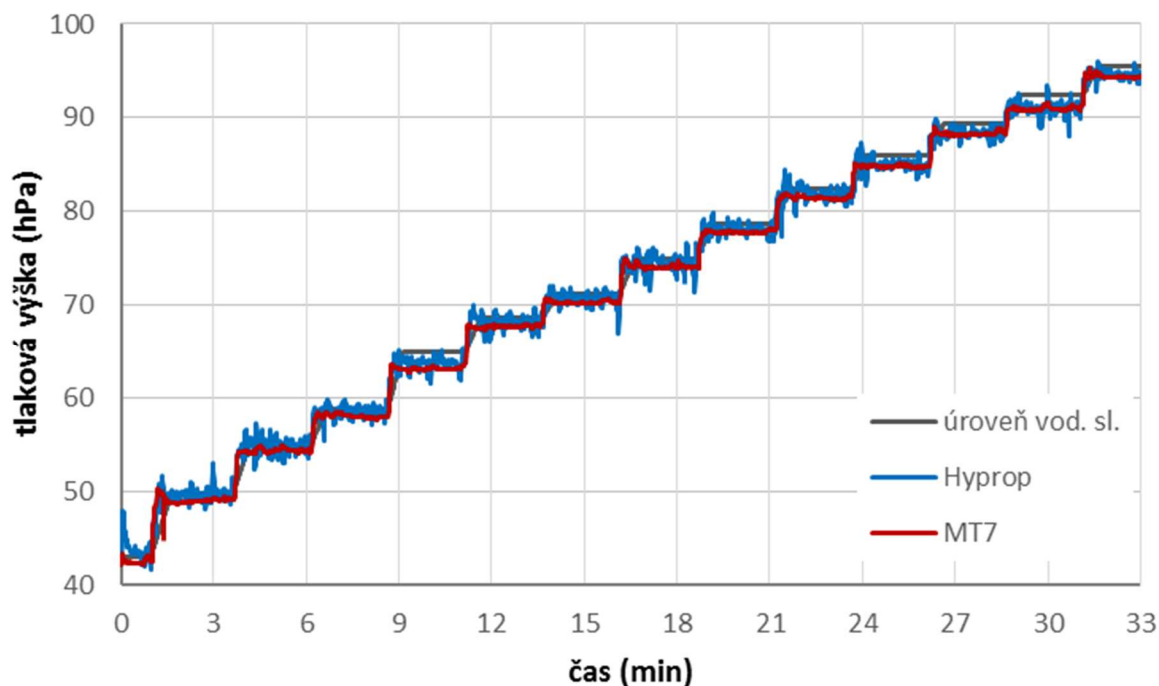
Obrázek 4.4: Data získaná během experimentu zjišťování přesnosti měření mikrotenzometru s označením MT2.

V případě testování přesnosti mikrotenzometru s označením MT6 prezentované obrázkem 4.5 lze dle vysoké rozkolísanosti měření mikrotenzometru MT6 a velkému rozdílu naměřených hodnot tlakové výšky prototypem mikrotenzometru MT6 od hodnot naměřených komerčním tenzometrem Hyprop usuzovat na poměrně výraznou nepřesnost měření mikrotenzometru MT6. Posun naměřených hodnot mikrotenzometrem MT6 činí cca 38 hPa a je zřejmě způsoben aktuálně nižším tlakem vzduchu, protože tlakové čidlo mikrotenzometru měří na rozdíl od tlakového čidla sondy Hyprop tlak absolutní. Největší standardní odchylka od ustálené hodnoty tlakové výšky byla pro mikrotenzometr MT6 zjištěna 3,00 hPa, a to na intervalu s průměrnou hodnotou tlakové výšky 22,79 hPa.



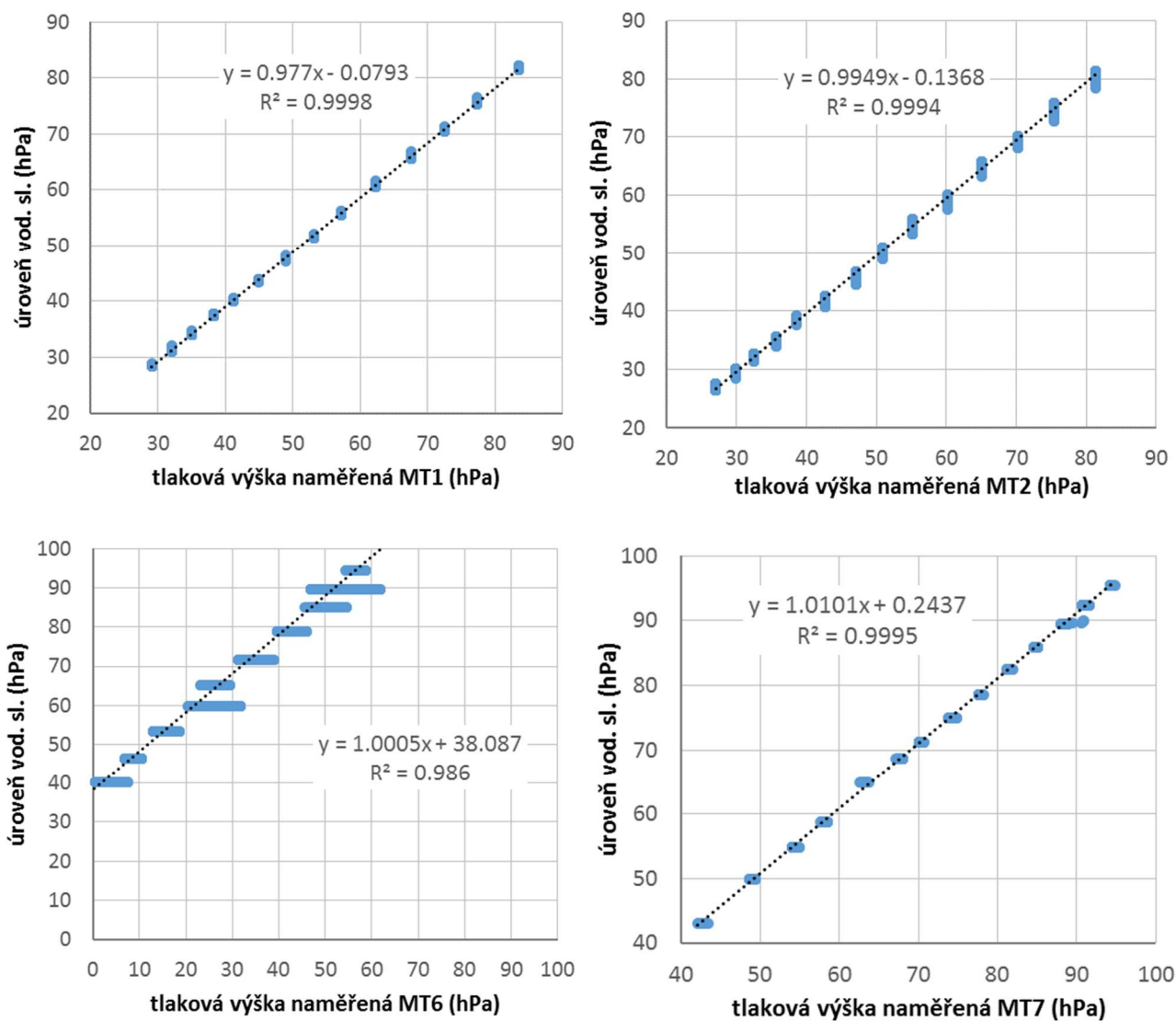
Obrázek 4.5: Data naměřená při zjišťování přesnosti měření mikrotenzometru s označením MT6.

Jak je patrné z obr. 4.6 přesnost měření testovaného mikrotenzometru MT7 je naprosto srovnatelná s měřením tenzometrem zařízení Hyprop, avšak prototyp mikrotenzometru disponuje výrazně menší rozkolísaností měřených hodnot. Tuto rozkolísanost lze kvantifikovat standardní odchylkou na ustálené hodnotě tlakové výšky, například pro tlakovou výšku 54,9 hPa hodnoty naměřené tenzometrem zařízení Hyprop jsou zatížené standardní odchylkou 0,86 hPa, zatímco mikrotenzometr MT7 na tomtéž intervalu disponuje standardní odchylkou 0,19 hPa.



Obrázek 4.6: Data naměřená při zjišťování přesnosti měření mikrotenzometru s označením MT7.

V sérii obrázků 4.7 lze porovnat přesnost, respektive shodu měření jednotlivých mikrotenzometrů s úrovní vodního sloupce. U všech testovaných mikrotenzometrů lze pozorovat směrnici velmi blízkou 1, což značí velmi přesnou shodu naměřených hodnot mikrotenzometrem s úrovní vodního sloupce. Pouze v případě mikrotenzometru MT6 bylo měření mikrotenzometrem zatíženo výraznou hodnotou off-set.

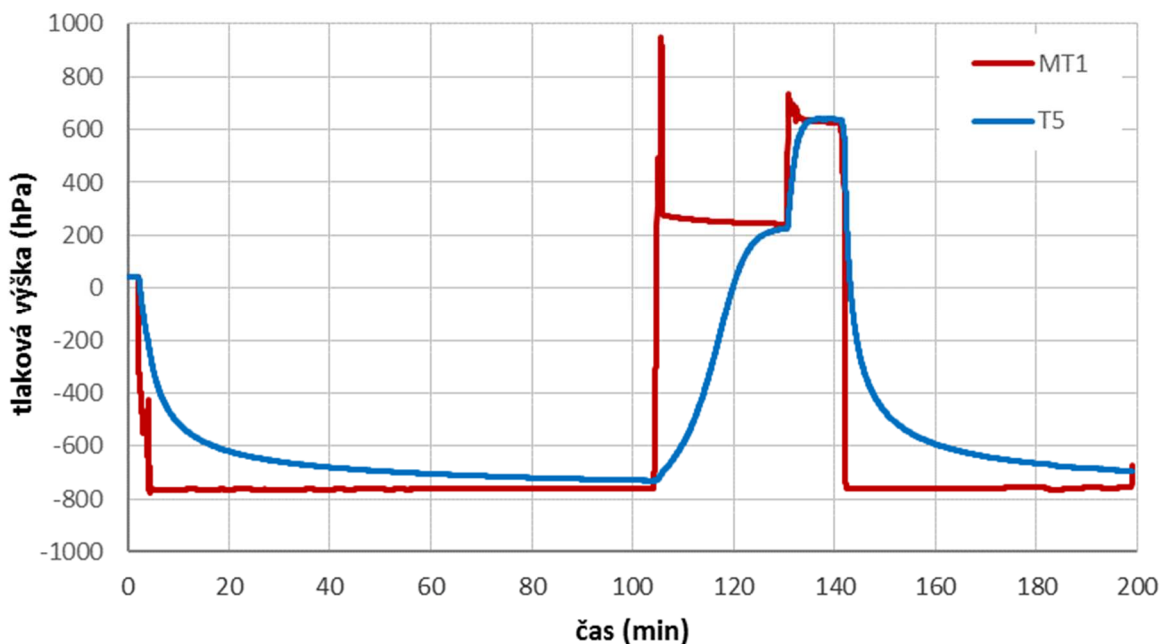


Obrázek 4.7: Porovnání přesnosti měření jednotlivých mikrotenzometrů.

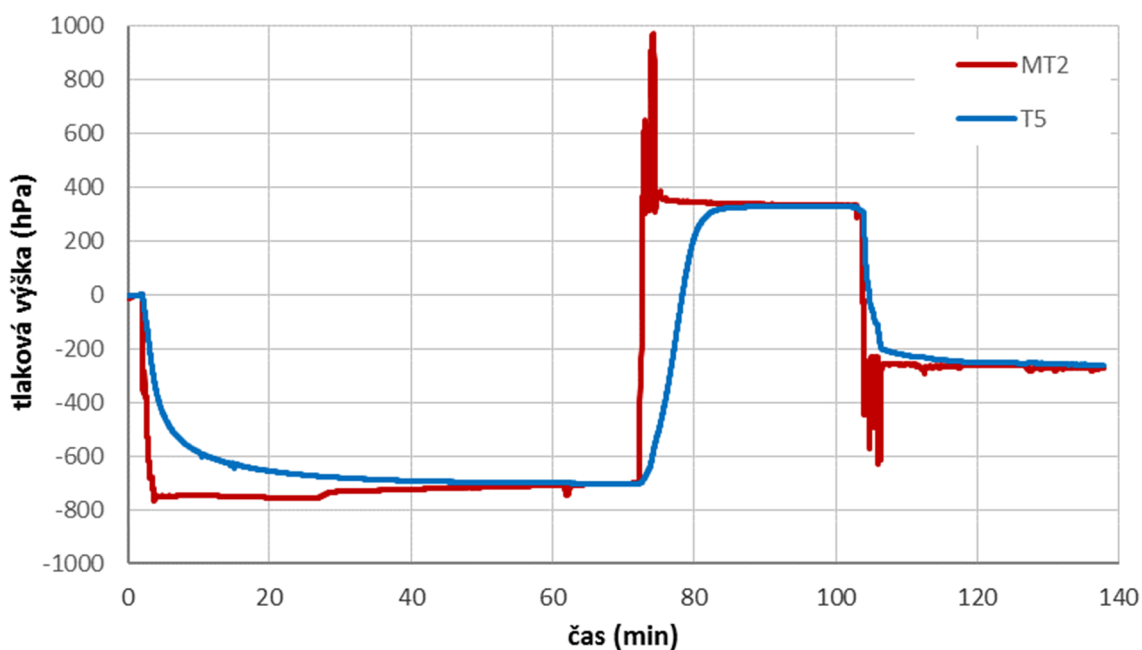
4.3 Testování reakční doby mikrotenzometru

Obrázky 4.8 a 4.9 prezentují data naměřená při testování rychlosti reakce mikrotenzometru, v nichž je na první pohled evidentní velmi dlouhá reakční doba komerčního tenzometru T5. Tato velmi pomalá reakce tenzometru T5 je v obou případech způsobena nedokonalým nasycením, respektive odvodušením porézní keramiky T5.

Reakční dobu mikrotenzometrů M1 a MT2 tedy v tomto případě nelze porovnávat s hodnotami naměřenými tenzometrem T5, nicméně z obrázků 4.8 a 4.9 lze pozorovat, že oba zmíněné mikrotenzometry jsou schopny reagovat na velmi rychlé a výrazné změny tlakové výšky, což potvrzují téměř svislé úseky křivek.

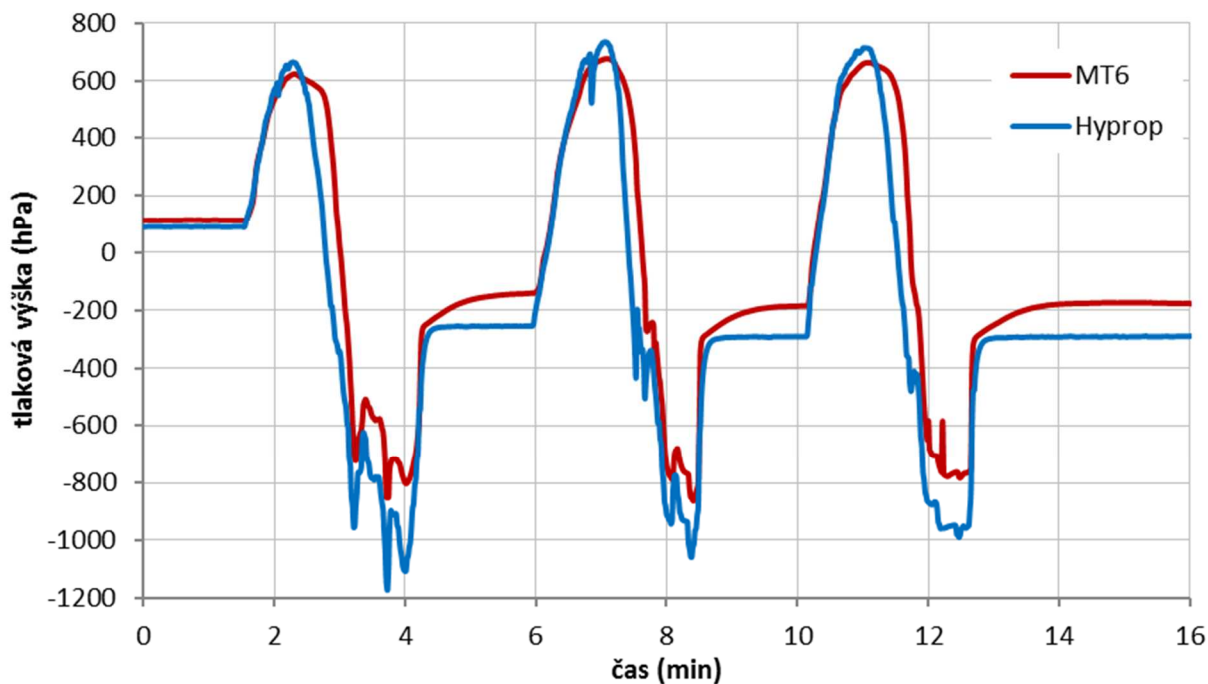


Obrázek 4.8: Data naměřená při testování reakční doby mikrotenzometru MT1, porovnávána s komerčním tenzometrem T5.



Obrázek 4.9: Data naměřená při testování reakční doby mikrotenzometru MT2, porovnávána s komerčním tenzometrem T5.

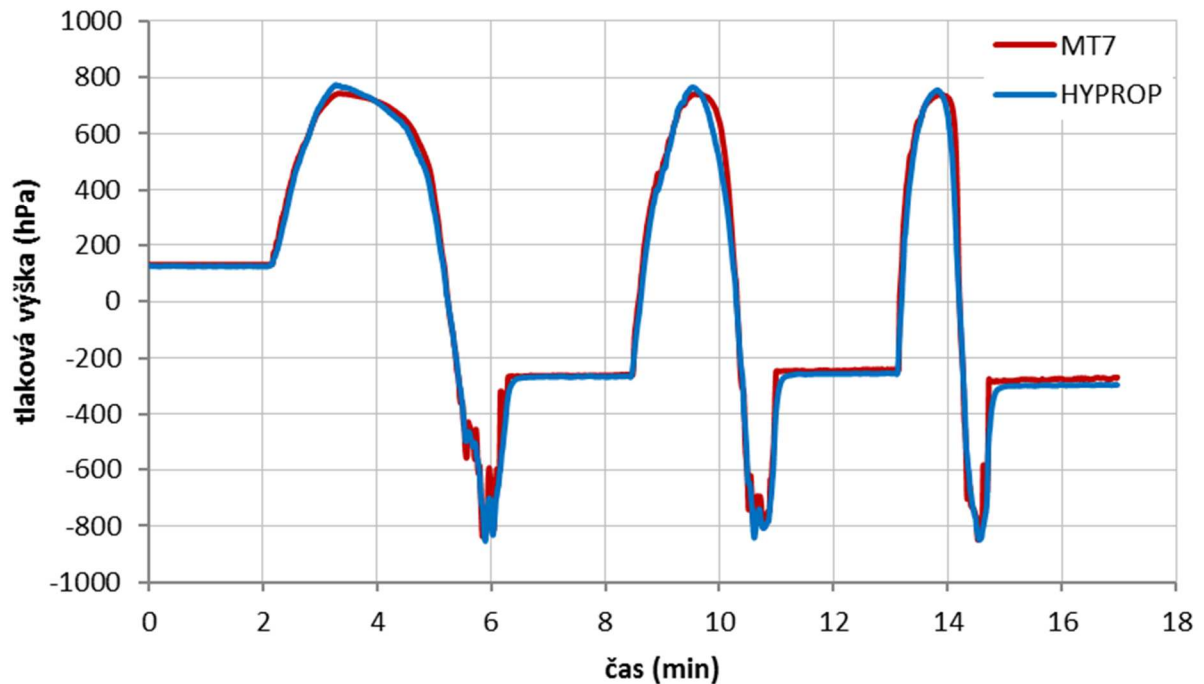
Z dat zobrazených obrázkem 4.10 získaných při testování reakční doby mikrotenzometru MT6 lze vypořádat takřka dokonalou shodu měření mikrotenzometrem MT6 s měření tenzometrem Hyprop pouze při rostoucí tlakové výšce, a to do tlaku cca + 600 hPa. Při snižujících se hodnotách tlakové výšky se reakční doba mikrotenzometru MT6 prodlužovala, a to cca o 15 sekund. Navíc záporné hodnoty naměřené mikrotenzometrem MT6 jsou oproti hodnotám naměřeným tenzometrem Hyprop posunuté o 100 až 200 hPa.



Obrázek 4.10: Data naměřená při testování reakční doby mikrotenzometru MT6, porovnání s komerčním tenzometrem, který je součástí sondy Hyprop.

Při testování rychlosti odezvy prototypu mikrotenzometru MT7 na velké a rychlé změny tlaku byla zjištěna prakticky totožná rychlost odezvy mikrotenzometru MT7 s tenzometrem Hyprop v záporných hodnotách tlakové výšky, viz obrázek 4.11. Nicméně jak je patrné ze záporných hodnot tlakové výšky naměřené kolem 6. minuty, MT7 zaznamenal dvě velmi rychlé a poměrně výrazné změny tlaku, které tenzometr Hyprop nezaznamenal, což poukazuje na fakt, že MT7 disponuje ještě kratší reakční dobou nežli tenzometr zařízení Hyprop. Naopak v kladných hodnotách tlakové výšky, a to zejména v rozmezí 730 - 250 hPa, lze pozorovat mírné zpomalení reakční rychlosti mikrotenzometru MT7 oproti tenzometru zařízení Hyprop.

Rozkolísané hodnoty podtlaku v obr. 4.11 jsou dány ručním působením na píst, resp. stříkačku, protože podtlak bylo fyzicky mnohem obtížnější vyvinout, respektive udržet ho na konstantní hodnotě nežli přetlak.



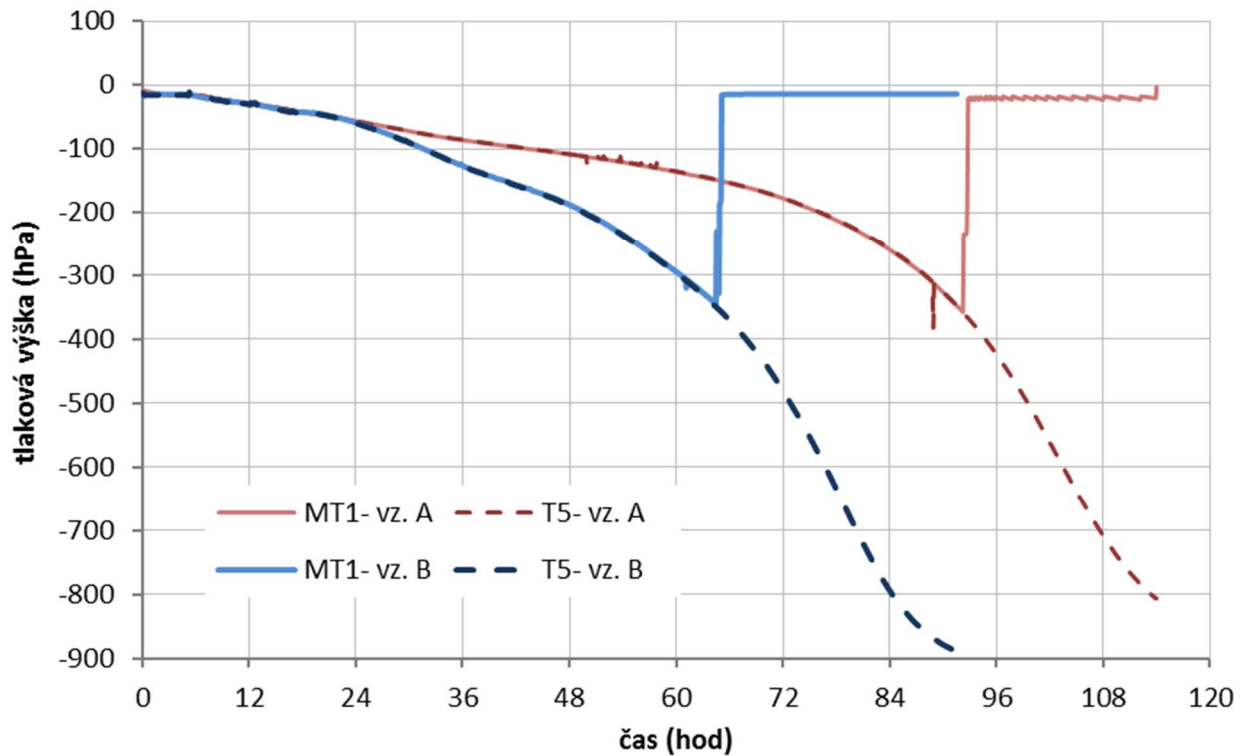
Obrázek 4.11: Data získaná při testování reakční doby mikrotenzometru MT7, srovnání s hodnotami naměřenými komerčním tenzometrem, který je součástí sondy Hyprop.

4.4 Zjištění rozsahu měření mikrotenzometru v půdních vzorcích

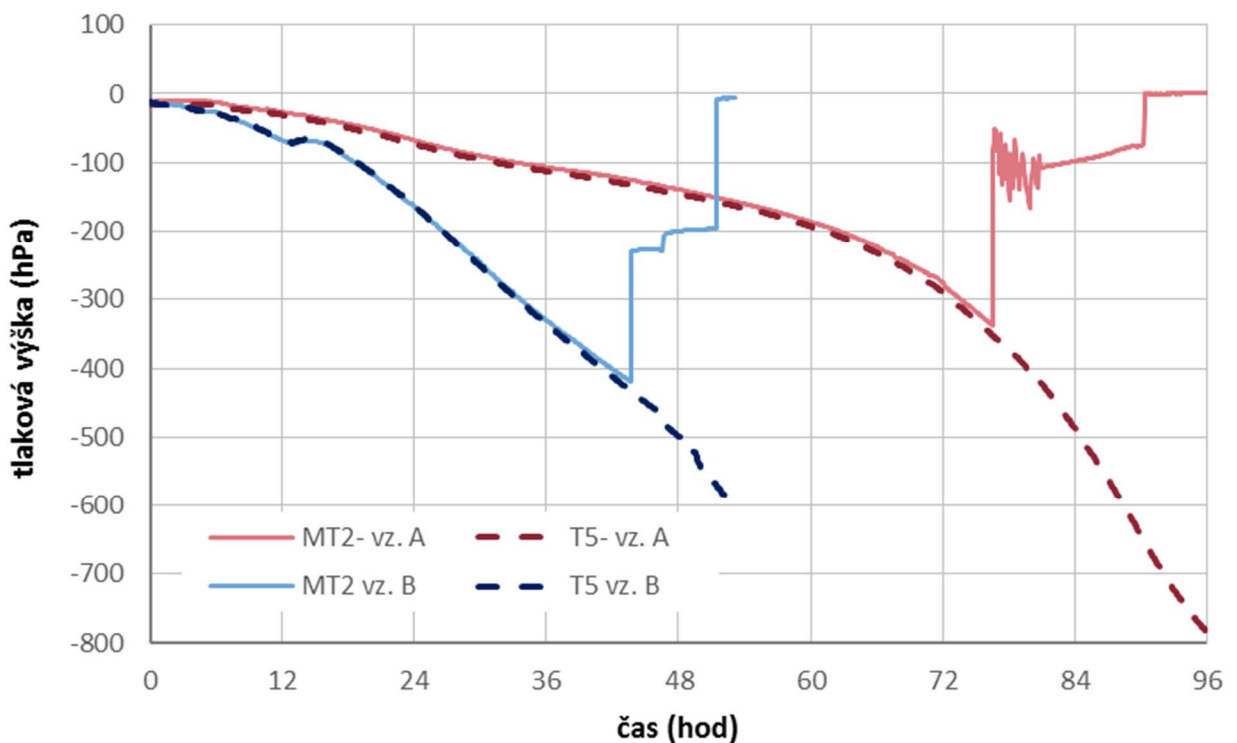
V průběhu provádění experimentů stanovení rozsahu měření bylo zjištěno, že při dlouhodobém měření v rámci hodin a desítek hodin dochází k postupnému vnikání vzduchu do vnitřního prostoru mikrotenzometru, a to konkrétně v oblasti kolem tlakového čidla. Tato skutečnost byla pravděpodobně způsobena netěsností při ústí, původně posouvatelného vodivého drátu tlakového čidla (katétru) do plastové fitinky (viz obrázek 3.1). Tudíž bylo toto potenciálně problémové místo utěsněno dvousložkovým lepidlem a tím pádem byla znemožněna polohovatelnost tlakového čidla.

Obrázek 4.12 prezentuje naměřená data z měření mikrotenzometrem MT1 v půdních vzorcích a komerčním tenzometrem T5. Na první pohled je patrná poměrně nízká vstupní hodnota vzduchu mikrotenzometru MT1 shodující se pro oba půdní vzorky, a to cca - 340 hPa. Po dosažení této hodnoty tlakové výšky dochází k postupnému pronikání vzduchu do porézního elementu vedoucí k přerušení hydraulického kontaktu tlakového čidla s půdním vzorkem a měření již dál nepokračuje.

Z dat reprezentující testování rozsahu měření mikrotenzometru MT2 zobrazených obrázkem 4.13 lze zdnlivě vypočítat dvě různé vstupní hodnoty vzduchu, a to - 340 hPa pro vzorek B a - 420 hPa pro vzorek A. Ovšem vstupní hodnota vzduchu je primárně dána vlastnostmi materiálu, ze kterého je vyroben porézní element tenzometru, zejména úhlem smáčení pro vodu a velikostí největších pórů tohoto materiálu.

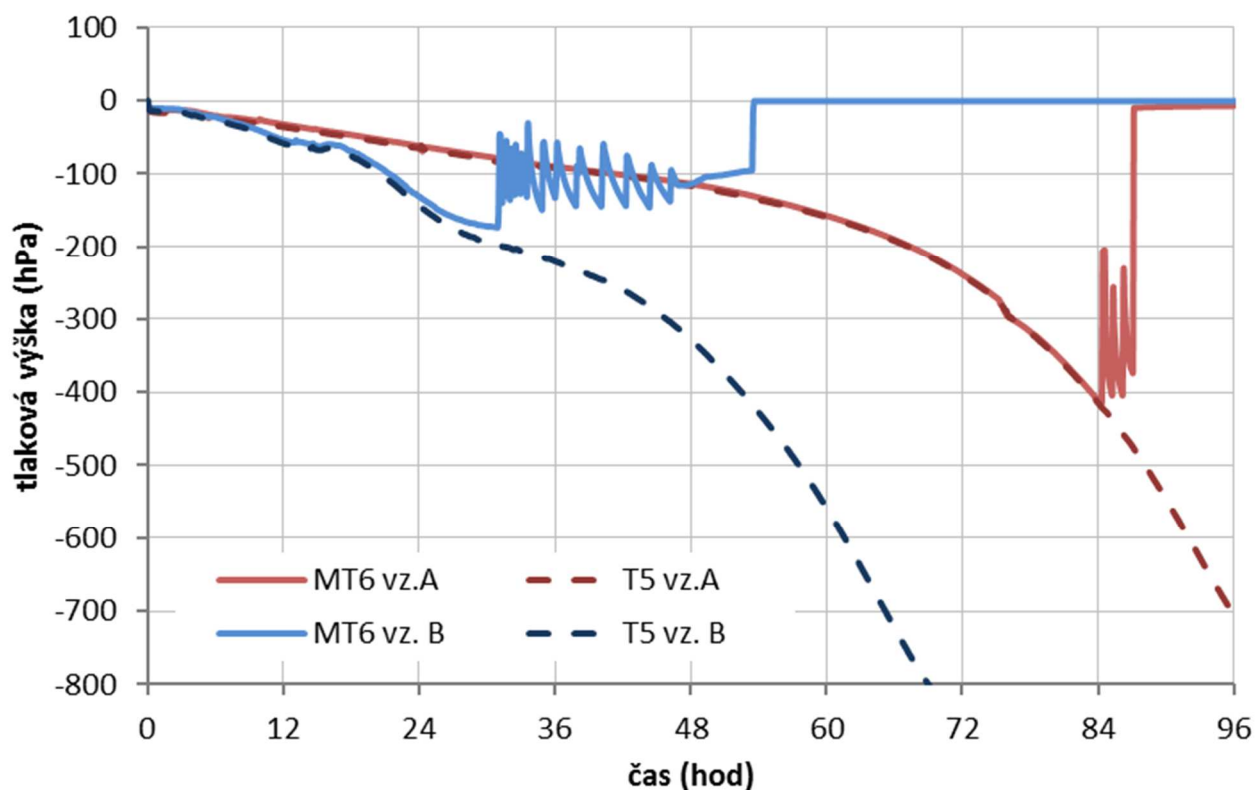


Obrázek 4.12: Data naměřená při experimentu zjišťování rozsahu měření mikrotenzometru MT1 v půdních vzorcích.



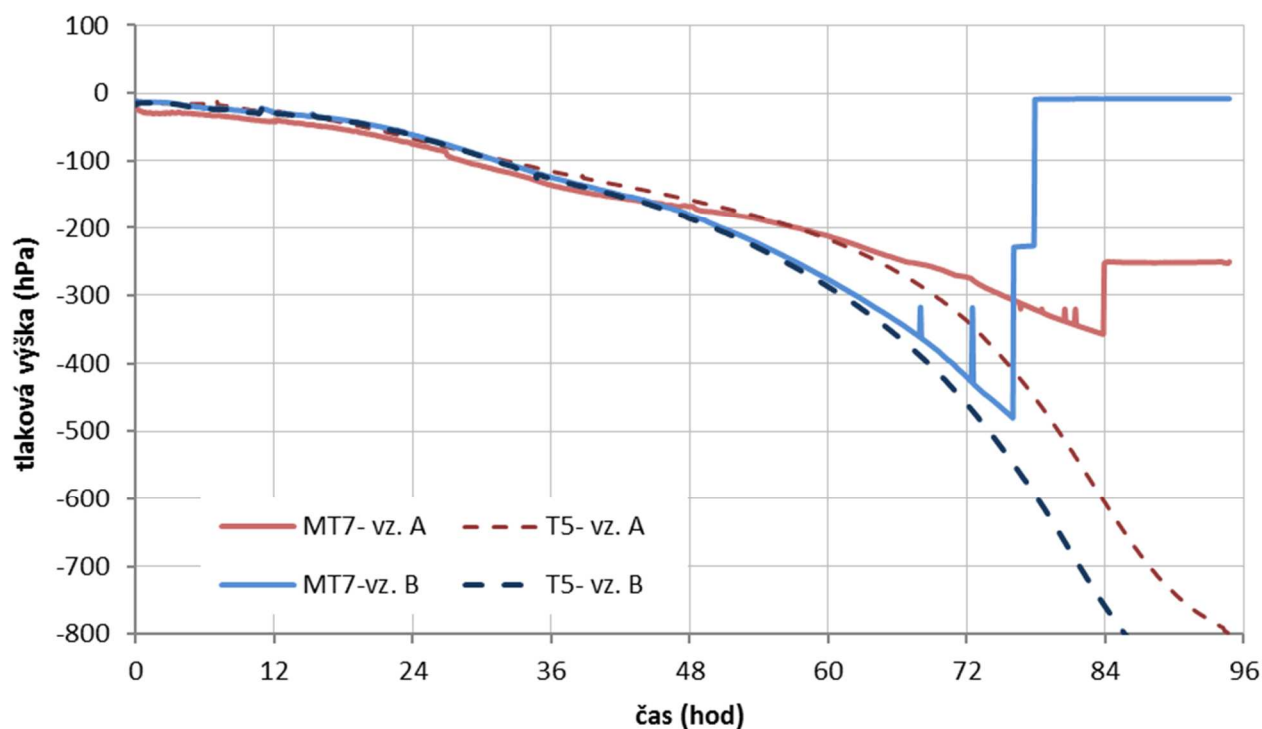
Obrázek 4.13: Data získaná během experimentu zjišťování rozsahu měření mikrotenzometru MT2 v půdních vzorcích.

V následujícím experimentu testování rozsahu měření mikrotenzometru MT6 je z obrázku 4.14 patrný ještě výraznější rozdíl mezi dosaženými vstupními hodnotami mikrotenzometru MT6 pro vzduch, a to -170 hPa pro vzorek B a -410 hPa pro vzorek A.



Obrázek 4.14: Data naměřená během experimentu zjišťování rozsahu měření mikrotenzometru MT6 v půdních vzorcích.

V případě mikrotenzometru MT7 lze z naměřených dat během experimentu zjišťování rozsahu měření v obou půdních vzorcích prezentovaných obrázkem 4.15 vypočítat téměř shodnou vstupní hodnotu vzduchu, a to cca -220 hPa. Po dosažení této hodnoty tlakové výšky docházelo k pozvolnému pronikání vzduchových bublin dovnitř mikrotenzometru, což způsobilo postupné prodlužování reakční doby mikrotenzometru a tím pádem i měření nesprávných hodnot tlakové výšky v čase. Pozvolné pronikání vzduchu dovnitř tenzometru pokračovalo do té doby, než byl přerušen hydraulický kontakt tlakového čidla mikrotenzometru s půdní vodou ve vzorku.

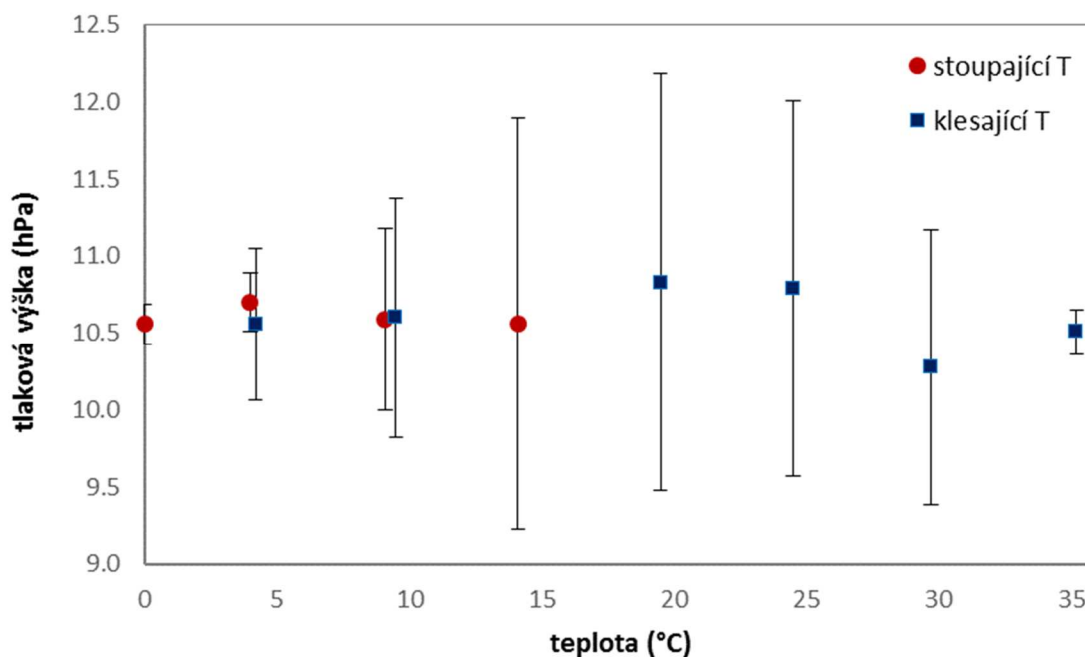


Obrázek 4.15: Data naměřená během experimentu zjišťování rozsahu měření mikrotenzometru MT7 v půdních vzorcích.

4.5 Stanovení teplotní závislosti měření mikrotenzometru

Výstupní data experimentu stanovení teplotní závislosti mikrotenzometru prezentuje obrázek 4.16. Z naměřených hodnot průměrných tlakových výšek (po ustálení měření na dané hodnotě) za dobu 30 minut a jejich standardních odchylek v rozmezí testovaných hodnot teploty (0 – 35 °C) lze vypočítat zanedbatelnou závislost měření mikrotenzometru na rostoucí, respektive klesající změny teploty. Nejvyšší standardní odchylka, a to 1,36 hPa, byla zjištěna při teplotě 19,5 °C. Zjištěné standardní odchylky od průměrné hodnoty tlakové výšky nabývají nejvyšších hodnot v rozmezí teplot 15 – 25 °C, a to jak v závislosti na rostoucí tak i na klesající teplotě.

Zjištěné standardní odchylky měření mikrotenzometrem na zkoumaném intervalu teplot 0 – 35 °C nicméně nepřekračují odchylku garantovanou výrobcem tlakového čidla, která dle specifikace činí ± 2 hPa v rozmezí teplot 23 – 38 °C.



Obrázek 4.16: Grafické znázornění odchylek od průměrné hodnoty tlakové výšky v závislosti na rostoucí, resp. klesající teplotě, kde vykreslené hodnoty představují průměrné hodnoty tlakové výšky za dobu 30 minut s vykreslením příslušných standardních odchylek.

4.6 Pilotní měření mikrotenzometrem v půdním makropóru

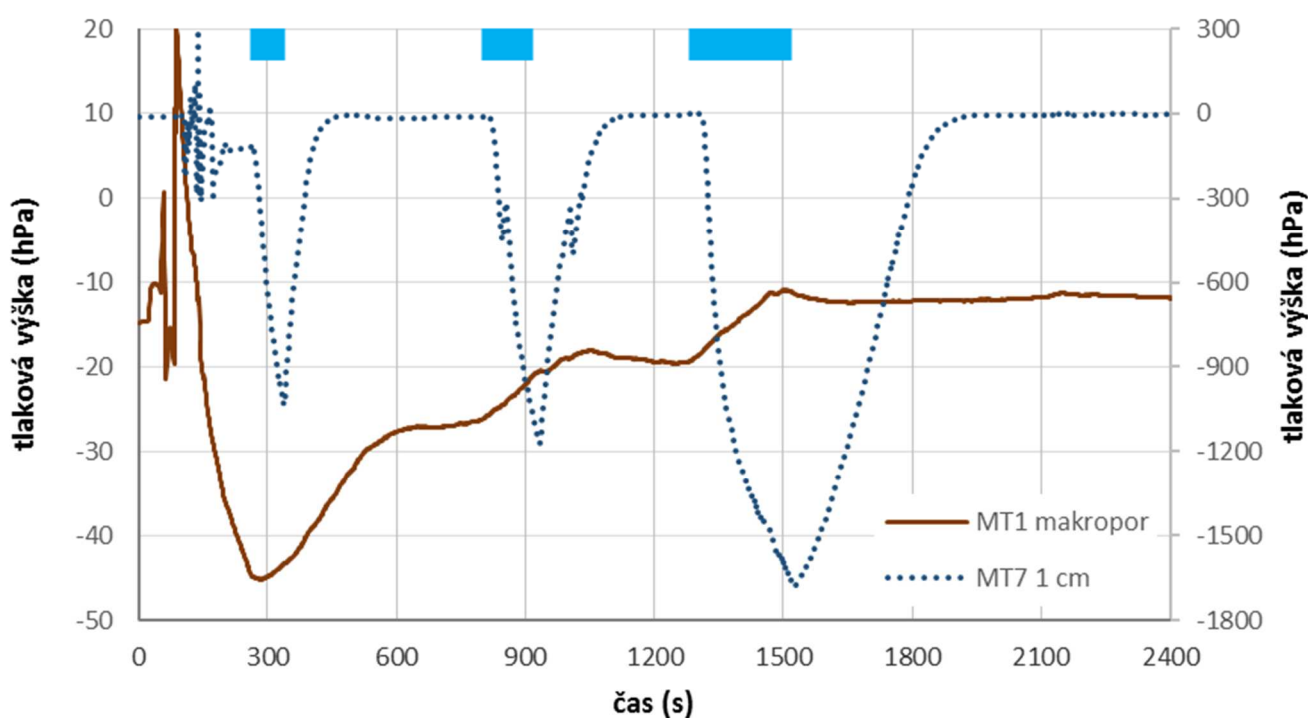
Obr. 4.17 popisuje průběh tlakové výšky ve stěně makropóru (primární osa y) a ve vzdálenosti 1 cm od stěny makropóru (sekundární osa y) v závislosti na infiltraci s konstantní intenzitou (vyznačená světle modrou barvou).

V obrázku 4.17 jsou na počátku, a to do cca 200 s, patrné výrazné fluktuace tlakové výšky, které jsou způsobeny vkládáním mikrotenzometrů do půdního vzorku poté následuje pokles tlakové výšky, resp. ustálení. V čase 280 s od počátku měření byla zahájena první série infiltrace s dobou trvání 80 s, další infiltrace byla zahájena v čase 800 s a dobou trvání 120 s a poslední infiltrace byla zahájena v čase 1280 s a dobou trvání 240 s.

Během jednotlivých infiltračních událostí je patrná reakce obou mikrotenzometrů. Nicméně v případě mikrotenzometru MT7 umístěného ve vzdálenosti cca 1 cm od stěny makropóru je patrná reakce na opakovaná zvýšení vlhkosti půdního vzorku poklesem tlakové výšky k hodnotám - 1000 hPa, - 1200 hPa a - 1650 hPa, což jsou hodnoty zcela nereálné. Tlakové čidlo mikrotenzometru MT7 tedy evidentně selhalo. Oproti tomu mikrotenzometr MT1 umístěný při stěně makropóru reagoval na zvýšení vlhkosti v půdním vzorku zvýšením tlakové výšky, až do dosažení plného nasycení, respektive naměření off-setové hodnoty cca - 13 hPa představující 0 hPa.

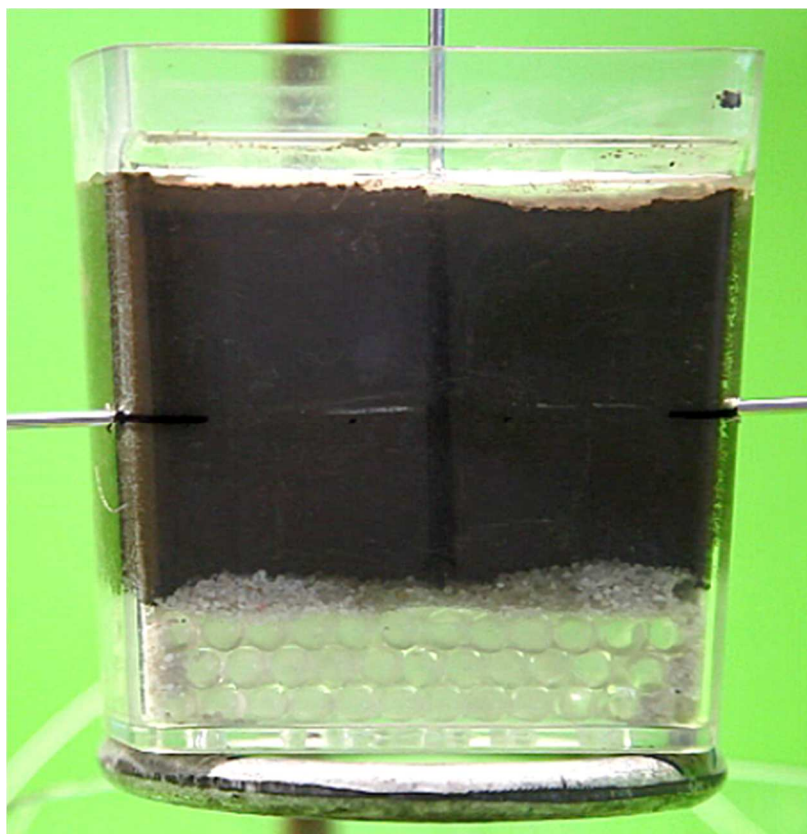
Z pořízeného videa je patrná shoda času počátku infiltrace s časem dosažení čela zvlhčení k mikrotenzometru MT1. Nicméně z naměřených dat mikrotenzometrem MT1 je patrná zpočátku delší reakční doba mikrotenzometru na infiltrační události. V případě první srážkové události mikrotenzometr MT1 zareagoval nárůstem tlakové výšky po cca 27 s od začátku infiltrace, na druhou srážkovou událost zareagoval mikrotenzometr po cca 4 s a na poslední srážkovou událost mikrotenzometr zareagoval po cca 3 s. Zpočátku delší reakční doba mikrotenzometru MT1 je tedy pravděpodobně způsobena nedosažením ustálení mikrotenzometru po jeho instalaci do půdního vzorku a nedostatečnou časovou prodlevou před zahájením infiltrace.

Experiment by v případě jeho opakování bylo vhodné provést s delší časovou prodlevou mezi instalací mikrotenzometru do půdního vzorku a počátkem infiltrace, a to z důvodu dosažení rovnovážného stavu mikrotenzometru. Navíc pro dosažení lepšího kontrastu hodnot tlakové výšky by bylo vhodné použít půdní vzorek s nižší počáteční vlhkostí.



Obrázek 4.17: Naměřené hodnoty tlakové výšky v půdním makropóru (tlakové čidlo MT1, primární osa y) a jeho bezprostředním okolí (tlakové čidlo MT7, sekundární osa y) s vyznačenou infiltrací. Tlakové čidlo mikrotenzometru MT7 zjevně selhalo.

Obr. 4.18 zobrazuje snímek pořízený během experimentu měření mikrotenzometry v uměle vytvořeném makropóru, a to v čase cca 10 s od počátku první srážkové události.



Obrázek 4.18: Půdní vzorek s uměle vytvořeným makropórem a instalovanými mikrotenzometry; vlevo mikrotenzometr MT1 instalovaný do stěny makropóru; vpravo mikrotenzometr MT7 ve vzdálenosti cca 1 cm od stěny makropóru; nahoře skrápěcí jehla.

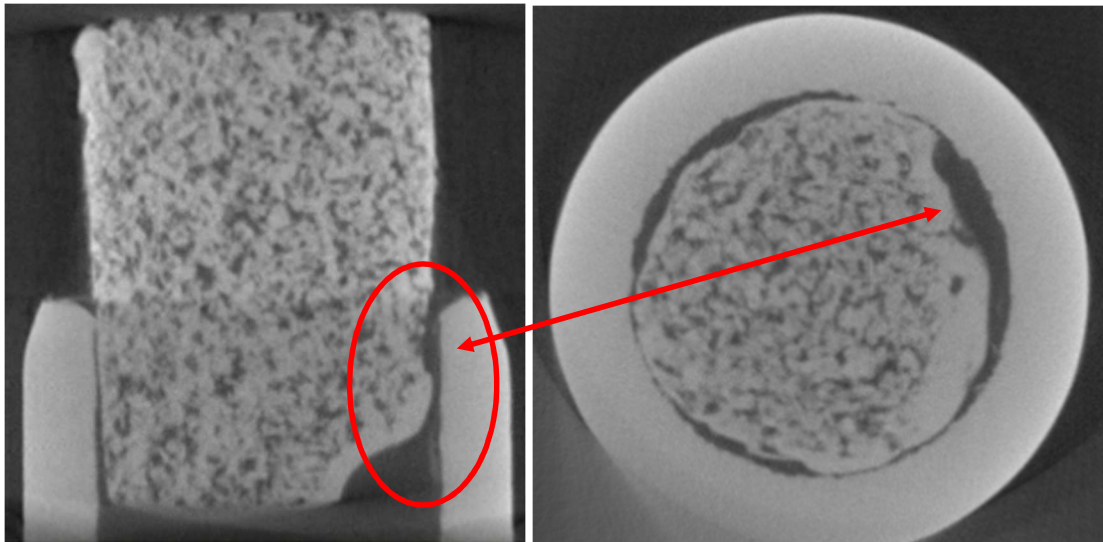
5 Diskuze

Prototypy nově vyvinutého mikrotenzometru byly porovnávány s komerčně dostupnými tenzometry, konkrétně s tenzometrem, který je součástí zařízení pro měření retenčních křivek půdy Hyprop (UMS, Německo) a s tenzometrem T5 (UMS, Německo). Z obrázků 4.6 a 4.7 je patrná rozkolísanost měření tenzometrem Hyprop, kterou lze kvantifikovat standardní odchylkou od průměrné hodnoty ustálené tlakové výšky cca 0,9 hPa. Tato rozkolísanost měření tenzometrem Hyprop je pravděpodobně způsobená „elektronickým šumem“ tlakového čidla, což při osobní konzultaci v rámci konference EGU2017 potvrdil generální ředitel společnosti UMS Ing. Georg von Unold. Nutno ovšem podotknout, že zařízení Hyprop je primárně určeno pro laboratorní stanovení pF křivky, měření retence a nenasycené hydraulické vodivosti. Tenzometr sondy Hyprop tedy disponuje velkým rozsahem měření a výrobce udává přesnost měření ± 1.5 hPa.

Oproti tomu rozkolísanost měření tenzometrem T5 byla prokazatelně nižší, nicméně reakční doba tenzometru T5 byla mnohonásobně delší než u všech používaných tenzometrů. Jak je patrné z obrázků 4.9 a 4.10 k ustálení tlakové výšky měřené tenzometrem T5 docházelo až po více než 70 minutách. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobená nedostatečným nasycením, respektive odvodušněním porézního elementu tenzometru T5, jenž je vyroben z 8-barové keramiky. Odvodušňování tenzometru T5 bylo však prováděno podtlakem vyvíjeným ručně pomocí injekční stříkačky, přičemž bylo dosaženo maximálně $\pm 1\,200$ hPa, tj. $\pm 1,2$ bar. Předpoklad nedostatečného nasycení porézního elementu tenzometru T5 potvrdil při osobní konzultaci v rámci konference EGU 2017 ve Vídni výše zmíněný Ing. Georg von Unold. Dalším potvrzením této domněnky je skutečnost, že po dosažení hodnoty přetlaku cca 1 000 hPa se reakční doba tenzometru T5 v obou případech výrazně snížila. Tato teze je v souladu s výsledky studie Takeho a Boltona (2003), kteří uvádějí postup dokonalého nasycení porézního elementu tenzometru, jenž spočívá v počátečním sycení podtlakem a v následné cyklické aplikaci vysokého přetlaku.

Rozsah měření testovaných mikrotenzometrů je limitován vstupní hodnotou vzduchu. Konzultací se zmíněným Ing. Georgem von Unoldem bylo zjištěno, že úhel smáčení oceli pro vodu předurčuje omezenou hodnotu vstupního vzduchu, která je ve srovnání s keramickými materiály několikrát nižší. Jelikož je porézní element prototypů mikrotenzometru vyroben právě z nerezové oceli, je dle Ing. Georga von Unolda vstupní hodnota vzduchu prototypů mikrotenzometru předurčena na maximálně - 450 hPa. Tato domněnka byla provedenými experimenty potvrzena. Pro zvýšení rozsahu měření je tedy nutné použít jiný materiál porézního elementu mikrotenzometru s menší velikostí největších porů, nebo chemicky ošetřit povrch oceli pro zmenšení kontaktního úhlu.

V průběhu testování rozsahu měření mikrotenzometru MT6 byly zjištěny různé velikosti vstupní hodnoty vzduchu mikrotenzometru, a to - 170 hPa a - 410 hPa. Tento nesoulad může být způsoben nepřesným vyříznutím porézního elementu MT6 s průměrem 1,10 mm a tím pádem i částečnou netěsností po obvodu elementu, kterou lze vidět na následujícím obrázku 5.1. Lze tedy předpokládat, že v prvním případě vnikl vzduch předčasně dovnitř mikrotenzometru netěsnostmi po obvodu porézního elementu MT6. Netěsnost porézního elementu MT6 mohla zapříčinit také rozkolísanost měření, jež byla pravděpodobně způsobena nerovnoměrným protékáním vody celým profilem porézního elementu.



Obrázek 5.1: CT snímky porézního elementu mikrotenzometru MT6 zobrazující netěsnost vzniklou při jeho výrobě; černá barva představuje vzduch.

Porézní elementy s průměrem 1,10 mm se již od počátečního testování s jedinou výjimkou prokázaly jako nefunkční, viz tabulka 3.1. Výjimkou je mikrotenzometr MT6, jehož použitelnost je diskutována výše. Z těchto důvodů lze předpokládat, že rozměr porézního elementu 1,10 mm je v případě použitého materiálu a technologie výroby nevhodný, na což poukazuje i nepřesně vyříznutý porézní element mikrotenzometru MT6 zobrazený obrázkem 5.1.

Během pilotního měření tlakové výšky vody v půdním makropóru, coby odezvu na sérii srážkových událostí byla zjištěna delší reakční doba mikrotenzometru umístěného ve stěně než byla očekávána. Pomalejší reakce tohoto mikrotenzometru mohla být způsobena jeho nepřesným umístěním ve stěně makropóru, respektive vrstvou půdy nahutněné při instalaci mikrotenzometru.

Omezená je také životnost tlakového čidla, jenž je primárně určeno jako veterinární katétr. Předpokládá se tedy omezený počet použití katétru, zatímco za účelem testování mikrotenzometrů byl katétr používán nepřetržitě po dobu minimálně 6 měsíců. Tato skutečnost byla potvrzena, neboť již po 4 měsících selhávala funkčnost tlakového čidla, jež se projevujevovala nejprve velkou rozkolísaností měření a následně měřením nereálných hodnot.

6 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo laboratorně otestovat nově vyvinuté prototypy mikrotenzometrů a z dosažených výsledků určit optimální technologii výroby. Dále byla testována použitelnost mikrotenzometrů pro bodové měření v půdním makropóru a jeho bezprostředním okolí.

Předmětem testování byla série 10 prototypů mikrotenzometrů lišících se technologií zpracování porézního elementu. Již po výrobě se pět mikrotenzometrů prokázalo jako zcela nefunkční a jeden mikrotenzometr byl v průběhu testování zničen. Testována byla přesnost, reakční doba a rozsah měření a teplotní závislost měření 4 mikrotenzometrů.

Přesnost měření tlakové výšky vody mikrotenzometry byla stanovena porovnáním naměřených hodnot s reálnými hodnotami tlakové výšky vodního sloupce vzhledem ke srovnávací rovině a porovnáním naměřených hodnot s konvenčními tenzometry T5 a tenzometrem zařízení Hyprop. U všech testovaných mikrotenzometrů byla zjištěna velmi přesná shoda naměřených hodnot mikrotenzometrem s úrovní vodního sloupce i s naměřenými hodnotami konvenčními tenzometry, s výjimkou mikrotenzometru MT6, jehož přesnost měření byla zatížena rozkolísaností. Reakční doba testovaných mikrotenzometrů na vnější změny tlaku byla okamžitá, prakticky totožná s reakční dobou tenzometru sondy Hyprop. Pouze v případě mikrotenzometru MT6 byla zjištěna nejdelší reakční doba. Rozsah měření mikrotenzometrů MT1 a MT2 byl stanoven limitní hodnotou - 340 hPa, pro mikrotenzometry MT6 a MT7 byly při dvou měřeních naměřeny mírně odlišné vstupní hodnoty vzduchu. Dále byla prokázána zanedbatelná teplotní závislost měření na rostoucí, respektive klesající teplotu, která je v souladu s udanou maximální odchylkou ± 2 hPa garantovanou výrobcem tlakového čidla. Maximální zjištěná standardní odchylka, udávající rozkolísanost měření od průměrné hodnoty tlakové výšky v závislosti na teplotě byla naměřena 1,36 hPa při teplotě 19,5 °C.

Porézní elementy všech testovaných mikrotenzometrů byly vyrobeny ze sintrové nerezové oceli s velikostí pórů 3 μm . Porézní elementy mikrotenzometrů MT1 a MT7 s průměrem 1,73 mm byly vyříznuty laserem s výkonem 400 W, poté zabroušeny a nakonec upraveny pikosekundovým laserem. Na vyříznutí porézního elementu mikrotenzometru MT2 s průměrem 1,80 mm byl použit pouze pikosekundový laser. Porézní element mikrotenzometru MT6 s průměrem 1,10 mm byl zpracován pouze 400W laserem s následným zabroušením. Z provedených testů MT6 vykazoval nejhorší výsledky, proto nelze technologii jeho výroby označit jako optimální. Porovnáním technologií zpracování ostatních mikrotenzometrů lze doporučit použití pikosekundového laseru při průměru porézního elementu minimálně 1,73 mm. Dále lze doporučit změnu materiálu na keramický porézní materiál s nižším smáčecím úhlem a vysokou vstupní hodnotou vzduchu. Problémem takového řešení by ale byla menší odolnost mikrotenzometru a nutnost vyhledání alternativní technologie výroby.

Jednoduchým pilotním experimentem v laboratoři byla prokázána použitelnost mikrotenzometrů pro bodové měření tlakové výšky vody ve stěně půdního makropóru a ve vzdálenosti 1 cm od stěny makropóru. Byla sledována reakce mikrotenzometrů na simulovanou sérii srážkových údálostí, při níž byla zjištěna zpočátku delší reakční doba mikrotenzometru než byla očekávána.

Pro přesnější analýzu je tedy potřeba provést další sérii měření v půdním makropóru, ideálně vytvořeném přírodními procesy.

Nově vyvinutý mikrotenzometr se prokázal jako robustní zařízení vhodné pro bodové měření tlakové výšky vody jak v laboratorních experimentech. Navzdory omezenému rozsahu měření je toto zařízení dostatečné pro mnoho aplikací, kde je zapotřebí měřit na malém objemu velmi rychlé změny tlakové výšky. Zvětšení rozsahu měření představuje výzvu pro další fázi vývoje mikrotenzometru.

7 Seznam použitých zdrojů

Literatura

- ANDERSON, A. E., WEILER, M., ALILA, Y., a HUDSON, R. O. (2009a). Subsurface flow velocities in a hillslope with lateral preferential flow. *Water Resources Research*, 45, W11407. doi:10.1029/2008WR007121 W11407
- BAKKER, G., van der PLOEG, M. J., de ROOIJ, G. H., HOOGEN DAM, C. W., GOOREN, H. P. A., HUISKES, C., KOOPAL, L. K., and KRUIDHOF, H. (2007): New polymer tensiometers: Measuring matric pressures down to the wilting point, *Vadose Zone J.*, 6, 196–202.
- BÁŤKOVÁ, K., MATULA, S., MIHÁLIKOVÁ, M. (2013). Multimediální učebnice hydrologických terénních měření. 2. doplněné vydání [on-line]. Česká verze. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha. Nestránkováno. Dostupné z: <http://hydrologie.agrobiologie.cz>. ISBN: 978-80-213-2434-3.
- BEVEN, K., a GERMANN, P. (1982): Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18(5), 1311–1325.
- BEVEN, K., a GERMANN, P. (2013): Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resources Research*, 49(6), 3071–3092.
- BOUMA, J. (1981): Soil morphology and preferential flow along macropores. *Agri. Water Manage.* 3: 235–250.
- BIANCHI W.B. (1962): Measuring soil moisture tension changes. *Agricultural Engineering*, 43, 393–399.
- BLACK, D. K. a LEE, K. L. (1973): Saturating laboratory samples by back-pressure. *J. Geotech. Engng Div., ASCE* 99, No. 1, 75–93.
- BUCKINGHAM E. (1907): Studies in the movement of soil moisture. *Soils Bureau Bulletin*, Vol. 38, U.S. Department of Agriculture.
- ČSN 75 0145. (1994). *Meliorace: Terminologie v pedologii*. Praha: Český normalizační institut
- DURNER, W. a D. OR. (2006): Soil Water Potential Measurement. *Encyclopedia of Hydrological Sciences* [online]. Chichester, UK: John Wiley a Sons, [cit. 2017-02-11]. DOI: 10.1002/0470848944.hsa077a. ISBN 0471491039. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/0470848944.hsa077a>
- EDLEFSEN, N. E., A. B. C. ANDERSON, (1943): Thermodynamics of soil moisture, *Hilgardia*, 15, 31-298

ENGLER, A. (1919): Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Satnd der Gewässer. Zürich: Kommissionsverlag von Beer. p 626.

ESSERT, S.(1998): Combined tensiometer-solution sampling probe. *Soil and Tillage Research* [online]. 45(3-4), 299-309 [cit. 2016-06-21]. DOI: 10.1016/S0933-3630(97)00022-6. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0933363097000226>

GARDNER W., ISRAESEN O.W., EDLEGEN N.E. and CLYDE D. (1922): The capillary potential function and its relation to irrigation practice, (Abstract). *Physical Review*, 20, 196.

GREEN, W. H., AMPT G. A. (1911): Studies on soil physics. *The Journal of Agricultural Sciences*. Sv 4, (1), p. 1-24.

GUAN, Y. a FREDLUND, D. G. (1997): Use of the tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction. *Can. Geotech. J.* 34, 604–614.

HARVEY, E. N., BARNES, D. K., McELROY, A. H., WHITELEY, A. H., PEASE, D. C. a COOPER, K. W. (1944): Bubble formation in animals, 1. Physical factors. *J. Cell. Comp. Physiol.* 24, No. 1, 1–22.

HELLING, C.S and T.J. GISH. (1991): Physical and chemical processes affecting preferential flow. Gish T.J., Shirmohammadi A. (eds.) *Preferential Flow*. Am. Soc. Agri. Engin. 77–86 (EI)

HILLEL, D. (1998): Environmental soil physics. San Diego, CA: *Academic Press*, c1998, xxvii, 771 p. ISBN 01-234-8525-8.

HOLEČKOVÁ, Martina. (2015): Vodní režim substrátu vegetační střechy. Praha. Bakalářská práce (Bc.). ČVUT v Praze, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

HOLTON, H. N., (1961): A concept for infiltration estimates in watershed engineering. U.S. Dept. Agr. Agr. Res. Service Publication, 41-51.

HORTON, R. E. (1933): Role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions of the AGU 14th annual meeting*, Washington, D.C. s. 446-460.

JURY, W. A. a R. HORTON.(2004): Soil physics. 6th ed. Hoboken, NJ: J. Wiley, c2004. ISBN 0-471-05965-x.

KUTÍLEK, M., V. KURÁŽ, M. CÍSLEROVÁ. (2000): *Hydropedologie* 10. Vyd. 2., přeprac. Praha: České vysoké učení technické, s. 75-161. ISBN 8001022374.

LU, W., CHENG, J., WANG, W., ZHANG, H., ZHOU, H. (2015): Application of the method of spatial point pattern analysis to the horizontal spatial distribution of preferential flow paths, *The Forestry Chronicle*, 91(4): 384-394

KÄTTERER, T., SCHMIED, B., ABBASPOUR, K.C., SCHULIN, R., (2001): Single- and dualporosity modelling of multiple tracer transport through soil columns: effects of initial moisture and mode of application. *Eur. J. Soil Sci.* 52 (1), 25–36.

- KIRKHAM, M. B.(2005): Principles of soil and plant water relations. Amsterdam: *Elsevier Academic Press*, c2005. ISBN 0-12-409751-0.
- LAWES, J. B., GILBERT, J. H., a WARINGTON, R. (1882): On the Amount and Composition of the Rain and Drainage Water Collected at Rothamsted. London: Williams, Clowes and Sons Ltd. p 167.
- LIVINGSTON B.E. (1908): A method for controlling plant moisture. *Plant World*, 11, 39–40.
- LIVINGSTON B.E. (1918): Porous clay cones for the auto-irrigation of potted plants. *Plant World*, 21, 202–208.
- MORRISON, R.D., SZECSODY, J.E., (1987): A tensiometer and pore water sampler for vadose zone monitoring. *Soil Sci.* 144 _5., 367–372.
- MOUTONNET, P., PAGANEL, J.F., FARDEAU, J.C., (1993): Simultaneous field measurement of nitrate-nitrogen and matric pressure head. *Soil Sci. Soc. Am.* 57, 1458–1462.
- NOGUCHI, S., Y. TSUBOYAMA and R.C. SIDLE. (1999): Morphological characteristics of preferentials and the distribution of preferential flow pathways in a forested slope segment. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 63: 1413–1423.
- OR D. (2001): Who invented the tensiometer? *Soil Science Society of America Journal*, 65, 1–3.
- OR D. and WRAITH J.M. (2002): Soil water content and water potential relationships. In *Soil Physics Companion*, Warrick A. (Ed.), CRC Press: Boca Raton, pp. 49–84.
- PECK A. J. and RABBIDGE, R. M.(1966): Soil-water potential: Direct measurement by a new technique, *Science*, 151, 1385–1386.
- PECK A. J. and RABBIDGE, R. M.(1969): Design and performance of an osmotic tensiometer for measuring capillary potential, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33, 196–202.
- PHILIP, J. R. (1957): Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity concentration-dependent. II. *Australian Journals of Physics* 10, s. 29-42.
- PHILIP, J. R., J. D. OSTER, (1986): Solute content, p. 985-1006. In A. Klute (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, Second edition. ASA. Madison, WI, 1986
- RICHARDS L.A. (1928): The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigators. *Journal of Agricultural Research (Cambridge)*, 37, 719–742.
- RICHARDS, S.J. (1965): Soil suction measurements with tensiometers. In *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling* (Black, C.A., Evans, D.D., Ensminger, L.E., White, J.L., and Clark, F.E., Eds.), pp. 153–163. *American Society of Agronomy*: Madison, Wisconsin.
- RIDLEY, A. M. (1993): The measurement of soil moisture suction. *PhD dissertation*. Imperial College, University of London.

- RITSEMA, C.J., DEKKER, L.W., HENDRICKX, J.M.H., HAMMINGA, W., (1993): Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil. *Water Resour. Res.* 29 (7), 2183–2193.
- ROOIJ, G., M. PLOEG, H. GOOREN, G. BAKKER, C. HOOGENDAM, C. HUISKES, H. KRUIDHOF a L. KOOPAL. (2009): Measuring very negative water potentials with polymer tensiometers: principles, performance and applications. *Biologia* [online], 64(3), - [cit. 2017-01-29]. DOI: 10.2478/s11756-009-0077-8. ISSN 1336-9563. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/biolog.2009.64.issue-3/s11756-009-0077-8/s11756-009-0077-8.xml>
- SCHUMACHER, W. (1864). *Die Physik des Bodens*. Berlin: Wiegandt and Hempel.
- SEGAL, E., T. KUSHNIR, Y. MUALEM a U. SHANI. (2008): Microsensing of Water Dynamics and Root Distributions in Sandy Soils. *Vadose Zone Journal* [online], 7(3), 1018- [cit. 2017-01-29]. DOI: 10.2136/vzj2007.0121. ISSN 1539-1663. Dostupné z: <https://www.soils.org/publications/vzj/abstracts/7/3/1018>
- SISSON J. B., G.W. GEE, J. M. HUBBELL, W. L. BEATTON, J. C. RITTER, A. L. WARD and T. G. CALDWELL. (2002): Advances in tensiometry for long-term monitoring of soil water pressures. *Vadose Zone Journal*, 1, 310–315.
- SLAVÍK, R., JULINOVÁ M., (2010): *Elektronická učebnice remediačních technologií*. [online]. Česká verze. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Zlín. Nestránkováno. Dostupné z: <http://ucebnice.remediace.cz/default.asp?oid=03010500000afid=154>
- SNĚHOTA, Michal a Martin ŠANDA (2008). Studijní podklad, online přednáška. ČVUT v Praze, [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: storm.fsv.cvut.cz/pro-studenty/bakalarske-studijni-programy/stavebni-inzenyrstvi-bc/inzenyrstvi-zivotniho-prostredi-bc/pedologie/?lang=cz
- SUBEDI, S., K. KAWAMOTO, A. K. KARUNARATHNA, P. MOLDRUP, L. WOLLESEN DE JONGE a T. KOMATSU. (2013): Mini Tensiometer-Time Domain Reflectometry Coil Probe for Measuring Soil Water Retention Properties. *Soil Science Society of America Journal* [online]., 77(5), 1517- [cit. 2017-02-18]. DOI: 10.2136/sssaj2012.0106. ISSN 0361-5995.
- ŠANTRŮČKOVÁ, H. (2014): *Základy ekologie půdy* [online]. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. ISBN: 978-80-7394-480-3. [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: http://kbe.prf.jcu.cz/sites/default/files/prednasky/skripta/skripta_puda_metody_final.pdf
- TAKE, W. A. a M. D. BOLTON. (2003): Tensiometer saturation and the reliable measurement of soil suction. *Géotechnique* [online], 53(2), 159-172 [cit. 2016-06-21]. DOI: 10.1680/geot.2003.53.2.159. ISSN 0016-8505. Dostupné z: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.2003.53.2.159>
- TAKE, W. A. a M. D. BOLTON. (2003): Tensiometer saturation and the reliable measurement of soil suction. *Géotechnique* [online]. 2003, 53(2), 159-172 [cit. 2016-06-21]. DOI: 10.1680/geot.2003.53.2.159. ISSN 0016-8505. Dostupné z: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.2003.53.2.159>

- TOKUNAGA, T., (1992): The pressure response of the soil water sampler and possibilities for simultaneous soil solution sampling and tensiometry. *Soil Sci.* 154, 171–183.
- TOPP G.C. and FERRÉ T. P.A. (2002): 3.1 Water Content. In: *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Dane J.H. and Topp G.C. (Eds.), SSSA Book Series No. 5, Soil Science Society of America: Madison, pp. 417–421.
- TOPP G.C. and FERRÉ T.P.A. (2005) Measuring soil water content. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. [online]. John Wiley a Sons c2005, pp 1089-1003. ISBN: 0471491039. [cit. 2017-02-26]
- TULLER, M., D. OR, L. M. DUDLEY. (1999): Adsorption and capillary condensation in porous media- liquid retention and interfacial configuration on angular pores. *Water Resour. Res.*, Vol. 35, No. 7, 1949-1964,
- VACHAUD G. and THONY J. (1971): Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents. *Water Resources Research*, 7, 111–120.
- VALENTOVÁ, J. (2007): *Hydraulika podzemní vody*. Vyd. 3. Praha: Nakladatelství ČVUT. ISBN: 978-80-01-03625-9.
- VAN DER PLOEG, M. J., H. P. A. GOOREN, G. BAKKER, C. W. HOOGENDAM, C. HUISKES, L. K. KOOPAL, H. KRUIDHOF a G. H. DE ROOIJ. (2010): Polymer tensiometers with ceramic cones: direct observations of matric pressures in drying soils. *Hydrology and Earth System Sciences [online]*, 14(10), 1787-1799 [cit. 2017-04-29]. DOI: 10.5194/hess-14-1787-2010. ISSN 1607-7938. Dostupné z: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/1787/2010/>
- WARRICK, A.W. *Soil Physics companion*. Boca Raton: CRC Press, c2002. ISBN 0-8493-0837-2
- WATSON K.K. (1967): A recording field tensiometer with rapid response characteristics. *Water Resources Research*, 5, 33–39.
- WEILER, M. H. (2001): Mechanisms Controlling Macropore Flow during Infiltration: Dye Tracer Experiments and Simulations. ETH Zürich: Zürich. p 148.
- WEILER, M.H. (2017): Macropores and preferential flow-a love-hate relationship. *Hydrological Processes [online]*., 31(1), 15-19 [cit. 2017-04-03]. DOI: 10.1002/hyp.11074. ISSN 08856087. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.11074>
- WINIARSKI, T., LASSABATERE, L., ANGULO-JARAMILLO, R., GOUTALAND, D. (2013): Characterization of the heterogeneous flow and pollutant transfer in the unsaturated zone in the fluvio-glacial deposit. *Procedia Environ. Sci.* 19, 955–964.
- YOUNG M.H. and SISSONJ.B. (2002): 3.2.2 Tensiometry. In *Methodsof Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Dane J.H. and Topp G.C. (Eds.), SSSA Book Series No. 5, Soil Science Society of America: Madison, pp. 575–608.

Internetové odkazy

229 Heat Dissipation Matric Water Potential Sensor, Instruction manual, Campbell Scientific. Inc Revision 5/2009, dostupné z: <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/229.pdf>

HYPROP, Operational manual, UMS GmbH, Munich, Germany, 2015, dostupné z: www.ums-muc.de/static/bedienungsanleitung_HYPROP.pdf

Micro-Tip® Catheter Pressure Transducer, Millar Instruments, Inc., Texas, 2007, dostupné z: https://millar.com/sites/default/files/004-2129E_5.pdf

WP4C Dew point PotentiaMeter, Operator's manual, Decagon Devices, Inc., 2014, dostupné z: www.ums-muc.de/assets-ums/00A4R.pdf