Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra pedologie a ochrany půd

Kalibrace senzorů pro měření půdní vlhkosti

Bakalářská práce

Autor práce: Kristýna Váchová

Obor studia: Veřejná správa v zemědělství a krajině

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Fér, Ph.D.

© 2019 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Kalibrace senzorů pro měření půdní vlhkosti" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne _____ Podpis: _____

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Miroslavu Férovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této práce, Ing. Antonínu Nikodemovi Ph.D., Dis. za pomoc při realizaci laboratorních pokusů a katedře pedologie a ochrany půd za možnost realizace laboratorních pokusů. Také bych chtěla poděkovat své rodině a partnerovi za podporu.

Kalibrace senzorů pro měření půdní vlhkosti

Souhrn

Bakalářská práce se skládá z teoretické a praktické části. Teoretická část obsahuje informace o půdní vlhkosti a přehled metod měření půdní vlhkosti. Jednotlivé metody byly popsány, byl vysvětlen jejich princip a také výhody a nevýhody jejich využití v terénu. K jednotlivým metodám byly také přiřazeny příklady konkrétních senzorů, sloužících k měření půdní vlhkosti.

Původním cílem bakalářské práce bylo provést kalibraci senzoru TMS-3 na různých půdních vzorcích. Během zpracovávání práce se naskytla možnost provést kalibraci novější verze senzoru TMS-4. Proto jsme se po konzultaci s mým vedoucím práce rozhodli provést kalibraci pouze na jednom půdním vzorku, za pomoci obou senzorů, TMS-3 i TMS-4. Dále byl sledován vliv přirozeného zasolení půd na měření vlhkosti půdy pomocí senzoru TMS-4.

Zájmové území pro odběr vzorku půdy použitého ke kalibraci bylo vybráno na pozemku demonstrační a výzkumné stanice v Praze-Tróji. Důvodem pro výběr tohoto místa byl především probíhající experiment katedry pedologie a ochrany půd – vliv mulčovacího materiálu na půdní vlastnosti, hydraulické vlastnosti a vlhkost půdy. V tomto experimentu jsou pro měření půdní vlhkosti používány senzory TMS-3 a od roku 2018 také TMS-4.

V praktické části byly stanoveny základní fyzikální a chemické vlastnosti půdy pomocí standardních laboratorních metod. Byla provedena kalibrace senzoru TMS-3 a TMS-4 při použití destilované vody. Pro senzor TMS-4 byla provedena kalibrace při použití roztoku KBr o různých koncentracích Br simulující zasolení půdy.

Byly porovnány výsledky kalibrace senzoru TMS-3 a TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou. Tyto výsledky ukázaly, že starší senzor TMS-3 podhodnocuje výsledky měření vlhkosti půdy. Také bylo zjištěno, že při vlhkosti vyšší než 0,2 cm^3 cm^{-3} se zvětšuje chybovost senzorů. Dále byl sledován vliv rozpustných solí na kalibraci senzoru TMS-4. Výsledky ukázaly, že se zvyšující se koncentrací Br v roztoku KBr jsou hodnoty odezvy senzoru TMS-4 pro stejnou objemovou vlhkost vyšší. Práce tak v této části potvrzuje vliv rozpustných solí na měření senzorů TMS-4.

Klíčová slova: vlhkost půdy, zasolení půdy, senzor TMS-3, senzor TMS-4, půdní vlastnosti

Calibration of sensors for soil moisture measurement

Summary

The bachelor thesis consists of theoretical and practical part. The theoretical part contains information about soil moisture and summery of soil water content measurements methods. The principles of all methods, their advantages and disadvantages of the field use were explained. For each method of the soil water content measurement, the examples of particular sensors were described.

The original goal of bachelor thesis was to make calibration of the TMS-3 sensor on the various soil samples. During the working on the bachelor thesis, the possibility of the new sensor TMS4 calibration occurred. Therefore, after consulting with my supervisor, we decided to make calibrate only on soil sample, with the both sensors (TMS-3 and TMS-4). Next the effect of natural soil salinity on the TMS-4 sensor measurement was also monitored.

The soil samples used for calibration were taken in Praha-Trója demonstration and research station. The reason for choosing this place was the ongoing experiment of the Department of Soil Science and Soil Protection: The influence of mulching material on soil properties, hydraulic properties and soil water content. In this experiment, TMS-3 and newly TMS-4 sensors are used to monitor soil water content.

In the practical part, the basic physical and chemical properties of the soil were determined using standard laboratory methods. TMS-3 and TMS-4 sensor calibration was performed using distilled water. For the TMS-4 sensor, calibration was performed also using KBr solution at different concentrations Br simulating salinization of the soil.

The results of the calibration of the TMS-3 and TMS-4 sensor with the distilled water wetting were compared. These results showed that the older TMS-3 sensor underestimates the soil moisture measurement. It was documented that the sensor error rate is higher at soil water content greater than 0.2 cm^3 cm^{-3}. Next, the effect of soluble salts on the TMS-4 sensor calibration was investigated. For the same soil water content, the resulting values (counts) of sensor TMS-4 are higher in salinity soil. The results showed that with increasing concentration of Br in KBr solution the TMS-4 sensor resulting values, for the same soil water content, were higher. In this part of the thesis is was confirmed that the increased soil salinity affects the calibration.

Keywords: soil moisture, salinization of the soil, sensor TMS-3, sensor TMS-4, soil properties

Obsah

1 Úvod 1

2 Cíl práce 2

3 Literární rešerše 3

3.1 Půdní vlhkost 3

3.2 Vlastnosti půdy 4

3.2.1 Fyzikální vlastnosti půdy 4

3.2.2 Chemické vlastnosti půdy 4

3.3 Měření půdní vlhkosti 5

3.3.1 Přímé metody 5

3.3.1.1 Gravimetrická metoda 5

3.3.2 Nepřímé metody 5

3.3.2.1 Dielektrické metody 6

3.3.2.2 Odporové metody 9

3.3.2.3 Radioaktivní metody 11

3.3.2.4 Ostatní metody 12

3.3.2.5 Tenzometrické metody 13

3.4 Senzor TMS-4 a TMS-3 14

3.4.1 Měření teploty 15

3.4.2 Měření vlhkosti 15

3.4.3 Omezení 15

4 Metody a materiál 16

4.1 Odběr vzorku 16

4.1.1 Demonstrační a výzkumná stanice Praha-Trója 16

4.2 Analýza vzorku 17

4.2.1 Fyzikální vlastnosti půdy 17

4.2.2 Chemické vlastnosti půdy 19

4.3 Kalibrace senzorů TMS-3 a TMS-4 21

5 Výsledky 24

5.1 Základní fyzikální vlastnosti 24

5.2 Základní chemické vlastnosti 24

5.3 Výsledky kalibrace senzorů 25

5.3.1 Senzor TMS-3 25

5.3.1.1 Kalibrace senzoru TMS-3 při použití destilované vody 25

5.3.2 Senzor TMS-4 26

5.3.2.1 Kalibrace senzoru TMS-4 při použití destilované vody 27

5.3.2.2 Kalibrace senzoru TMS-4 při simulaci zasolené půdy 28
5.3.2.3 Porovnání kalibrace TMS-3 a TMS-4 za použití destilované vody 33
5.3.2.4 Porovnání kalibrace TMS-4 za použití destilované vody a roztoku KBr o různých koncentracích 33

6 Diskuze 38
6.1 Dielektrické senzory 38
6.2 Kalibrace senzorů TMS-3 a TMS-4 39
6.3 Vliv rozpustných solí na měření senzoru TMS-4 40

7 Závěr 41

8 Literatura 42

9 Seznam obrázků 46

10 Seznam tabulek 48

11 Doplňkové grafy I
11.1 Senzor TMS-3 H_2O I
11.2 Senzor TMS-4 H_2O II
11.3 Senzor TMS-4 KBr III

1 Úvod

Vlhkost půdy je základní půdní vlastností, je zdrojem vody pro zemědělství ale také pro veškerou vegetaci. Monitoring půdní vlhkosti je nezbytný pro efektivní řízené zavlažování (Visconti et al. 2014). Rešeršní část této práce popisuje půdní vlhkost a metody měření půdní vlhkosti. Obsah vody v půdě lze stanovit přímo, metodou gravimetrickou, nebo nepřímo. Nepřímé metody měří různé proměnné, které přímo souvisí s vlhkostí půdy a za pomoci kalibrovaných vztahů se tak určí vlhkost půdy.

Největší pozornost při popisu metod je věnována elektromagnetickým senzorům, které jsou v posledních desetiletích nejvíce rozvíjenou metodou měření půdní vlhkosti (Muños-Carpena 2018). Dielektrické metody měří obsah vody v půdě na základě závislosti relativní permitivity půdy (relativní dielektrické konstanty) na vlhkosti půdy. Jednotlivé metody měření vlhkosti jsou hodnoceny z několika hledisek, například možnost využití v terénu, pořizovací cena, přesnost měření, doba získání výsledků či životnost přístroje. K jednotlivým metodám jsou přiřazeny příklady konkrétních senzorů pro měření půdní vlhkosti. V práci jsou také zmíněny půdní vlastnosti, které mohou měření vlhkosti půdy ovlivňovat.

Metodická část práce se měla zabývat kalibrací senzoru TMS-3 na různých půdních vzorcích, naskytla se však možnost provést kalibraci nové verze tohoto senzoru, senzoru TMS-4. Proto je provedena kalibrace pouze na jednom půdním vzorku, ovšem jsou kalibrovány obě zařízení, TMS-3 i TMS-4. Jedná se o nízkonákladové senzory fungující na principu dielektrické metody, konkrétně metody TDT.

Kalibrace senzorů je provedena při ovlhčování destilovanou vodou (TMS-3 a TMS-4) a při ovlhčování roztokem KBr o různých koncentracích Br (TMS-4). Tento roztok simuluje přirozené zasolení půdy. Právě salinita půdy může způsobovat tzv. dielektrické ztráty, a může ovlivňovat výsledky měření půdní vlhkosti pomocí dielektrických senzorů.

2 Cíl práce

Cílem této práce bylo v rešeršní části popsat vybrané metody měření půdní vlhkosti, uvést konkrétní typy senzorů pro měření půdní vlhkosti a uvést výhody a nevýhody těchto metod. Byla také popsána půdní vlhkost a vliv půdních vlastností na měření půdní vlhkosti.

V praktické části byla provedena a popsána kalibrace dvou senzorů (TMS-3 a TMS-4). na vybraném půdním vzorku (fluvizem modální). Byly také stanoveny základní fyzikální a chemické vlastnosti půdy. Kalibrace těchto dvou senzorů byla porovnána. Byla provedena aplikace roztoku KBr o různých koncentracích Br, který simuloval zasolení půdy. Poté byl sledován vliv rozpustných solí na provedenou kalibraci senzoru TMS-4.

3 Literární rešerše

3.1 Půdní vlhkost

Vlhkost půdy je obsah vody v půdě, který se udržuje v meziagregátových prostorech půdy (Ali 2010). Vlhkostí půdy se z pedologického hlediska vyjadřují různé významné vlhkostní charakteristiky jako je polní vodní kapacita, bod snížené dostupnosti vody a bod vadnutí. Půdní vlhkost je základní environmentální, hydrologická a klimatická proměnná (Mittelbach et al. 2012). Její hodnoty se během roku mění v závislosti na výpadu a srážkách.

Voda má v půdě nezastupitelnou funkci, jedná se o velmi důležitou složku půdy. Půdní vlhkost je hlavním zdrojem přírodní vody pro zemědělství a vegetaci a ovlivňuje procesy, které souvisí s růstem rostlin v zemědělské produkci (Rodriguez-Iturbe 2000). Dostupnost vody pro rostliny závisí na formě výskytu i na vazbách vody s půdními částicemi. Voda v půdě představuje pouze malou část (0,15 %) světové dostupné sladké vody (Dingman 1994), ale představuje důležitou zásobu vody v hydrologickém cyklu a ovlivňuje spoustu půdních procesů (White 1997).

Údaje o obsahu vody v půdě jsou nezbytné pro analýzu procesů, které jsou interakcí mezi půdou a vzduchem (Mittelbach et al. 2012). Obzvláště důležitá je znalost obsahu vody v půdě v oblasti kořenové zóny rostlin, protože zpětná vazba půdní vlhkosti ke klimatu je většinou zprostředkována vegetací (Seneviratne et al. 2010). Efektivní řízené zavlažování vyžaduje monitorování obsahu vody v půdě (Visconti et al. 2014).

Objemová vlhkost (θ) a hmotnostní vlhkost (w)

Vlhkost půdy lze vyjádřit dvěma způsoby, a to vlhkostí objemovou a hmotnostní.

Objemová vlhkost (θ) se určuje jako objem vody v půdě v poměru k celkovému objemu vzorku.

$$\theta = V_w / V_v \qquad [cm^3\ cm^{-3}] / *100\ [\%] \tag{1}$$

kde V_w je objem vody a V_v je celkový objem vzorku.

Hmotnostní vlhkost (w) se určuje jako hmotnost půdní vody v poměru k hmotnosti suchého vzorku.

$$w = m_w / m_v \qquad [g\ g^{-1}] / *100\ [\%] \tag{2}$$

kde m_w je hmotnost půdní vody a m_v je hmotnost zcela suchého vzorku. Hmotnost suchého vzorku se zjistí vysušováním vzorku při 105 °C do konstantní hmotnosti.

3.2 Vlastnosti půdy

Chemické a fyzikální vlastnosti půdy určují kvalitu a produktivitu půdy (Burk & Dalgliesh 2008).

3.2.1 Fyzikální vlastnosti půdy

Některé fyzikální vlastnosti půdy mohou ovlivnit měření vlhkosti půdy. Jedná se zejména o specifickou hmotnost půdy, teplotu, pórovitost a zrnitostní složení (Topp et al. 2000).

Některé senzory pro měření vlhkosti půdy vyžadují přímý kontakt s půdou, což není možné v půdách s vyšším obsahem skeletu nebo vysokým obsahem pórů (Wild et al. 2019). Kontakt senzoru s půdou může také ovlivnit přítomnost kořenů rostlin nebo fauna (Visconti et al. 2014). Senzory fungující na principu dielektrických metod mají také teplotní limity, při kterých jsou schopné měřit s danou přesností. Mohou být negativně ovlivněny teplotami menšími než 5 °C a vyššími než 40 °C (Merlin et al. 2007; Wraith & Or 1999).

Některé senzory nemohou měřit vlhkost v příliš písčitých půdách z důvodu rychlého zasakování do profilu půdy. Písčité půdy jsou problémem při měření vlhkosti pomocí sádrových bločků a senzorů GMS (Muños-Carpena 2018).

3.2.2 Chemické vlastnosti půdy

Při měření obsahu vody v půdě senzory fungujícími na elektromagnetickém principu může docházet k tzv. dielektrickým ztrátám (Topp et al. 2000).

Půda působí jako vodič vlivem přítomnosti iontů, které se pohybují v elektrickém poli. Vodivost půdy je ovlivněna převážně prostřednictvím dvou paralelních vodičů. Těmito vodiči jsou ionty uvnitř půdních pórů naplněných vodou a ionty ve dvojité difúzní vrstvy půdních částic (Rhoades et al. 1999). Pokud dielektrické ztráty souvisí se salinitou půdy, jsou způsobeny zdánlivou elektrickou vodivostí. Tyto dielektrické ztráty může také způsobovat obsah jílovitých částic v půdě, poté dochází k Maxwell-Wagnerovým ztrátám a vodním dielektrickým ztrátám (Hasted, 1973).

Ovlivnění měření vlhkosti salinitou půdy také závisí na frekvenci, kterou používají dielektrické senzory pro měření půdní vlhkosti. Senzory, které používají frekvenci v rozmezí 1 až 200 MHz mohou být spíše ovlivněny salinitou půdy (Muños-Carpena 2018). Tyto frekvence používá většina kapacitních senzorů (viz kapitola 3.3.2.1).

Senzory fungující na principu dielektrické metody TDR měří obsah vody v půdě pomocí vysokých frekvencí (> 500 MHz). Výsledky měření půdní vlhkosti pomocí těchto senzorů tak nejsou ovlivněny běžnou salinitou půdy (Muños-Carpena 2018).

3.3 Měření půdní vlhkosti

V posledních desetiletích byly vyvinuty různé metody měření vlhkosti půdy. Nejvíce jsou rozvíjeny elektromagnetické metody. (např. Dobriyal et al. 2012, Muños-Carpena 2018). Nejčastěji používané jsou právě elektromagnetické senzory jako velmi efektivní in situ metoda (Mittelbach et al. 2012).

Metody měření půdní vlhkosti lze rozdělit z několika hledisek. Jedno z možných rozdělení je na metody destruktivní a nedestruktivní, další je rozdělení na metody, při kterých je přístroj v přímém kontaktu s půdou a metody, kdy probíhá měření na dálku (GPR radar nebo metoda dálkového průzkumu Země). Lze je také rozdělit na metody přímé a nepřímé.

3.3.1 Přímé metody

Při použití přímých metod se stanoví hmotnost vody rozdílem mezi hmotností vzorku půdy před vysušením a po vysušení (Evett & Parkin 2005).

3.3.1.1 Gravimetrická metoda

Gravimetrická metoda je jediná přímá metoda a také nejpřesnější metoda měření vlhkosti půdy. Vzorky půdy jsou odebrány z místa, a tak tato metoda není vhodná pro průběžné a dlouhodobé měření vlhkosti půdy. Metoda také není vhodná pro plošné měření půdní vlhkosti. Jedná se o metodu pracnou a časově náročnou (Rowlandson et al. 2018). Tato metoda je nutná pro zjištění přesné vlhkosti půdy a také pro potřeby kalibrace nepřímých metod.

3.3.2 Nepřímé metody

Při použití nepřímých metod se stanoví obsah vody v půdě pomocí senzorů. Senzory měří různé měřitelné proměnné, které jsou na obsahu vody v půdě přímo závislé a podle těchto proměnných se vlhkost půdy určuje (Evett & Parkin 2005). Nepřímé metody se dělí na metody, které měří objemovou vlhkost půdy (viz 3.3.2.1, 3.3.2.2, 3.3.2.3 a 3.3.2.4) a metody, které měří sací tlak půdní vody (viz 3.3.2.5; Muños-Carpena 2018). Výhodou nepřímých metod je jejich nedestruktivnost a výsledky měření jsou k dispozici zpravidla okamžitě.

Kalibrace je proces, při kterém se za specifikovaných podmínek určí vztah mezi hodnotami, které jsou výstupem z přístroje a známými hodnotami vlhkosti. Většina přístrojů obsahuje kalibrační křivku od výrobce, která udává rozsah měření a citlivost snímače. Specifická kalibrace ale poskytuje přesnější výsledky než kalibrace, která je dodávána výrobcem. Proto při provedení kvalitní kalibrace mohou výsledky lépe sloužit pro potřebné účely (Seyfried & Murdock 2004).

Existují sítě sledování půdních vlhkostí pomocí různých metod měření obsahu vody v půdě. Tyto sítě jsou mimo jiné nezbytné pro vývoj a hodnocení nových odhadů půdní vlhkosti založených na dálkovém snímání Země. Jedná se například o tyto sítě sledování půdních vlhkostí: RHEMEDUS ve Španělsku, SMOSMANIA ve Francii, SwissSMEX ve Švýcarsku, observatoře TERENO v Německu, OzNet v Austrálii nebo Mesonet ve Spojených státech amerických (Mittelbach et al. 2012).

Tyto kampaně jsou často prováděny na jednom místě s určitým časovým rozestupem. Rowlandson et al. (2018) ve své studii ukazuje, že časový a prostorový přenos kalibračních rovnic senzorů vede ke zvýšené chybě při určování vlhkosti půdy. Tato zvýšená chyba je způsobena časovou variabilitou vlhkosti půdy a variabilitou půd. Pokud tedy chceme udržet chybu měření pod 0,04 cm^3 cm^{-3}, je žádoucí kalibrační rovnice časově ani prostorově nepřenášet (Rowlandson et al. 2018).

3.3.2.1 Dielektrické metody

Tyto metody měří obsah vody v půdě na principu elektromagnetické metody, měřením relativní permitivity půdy ε_r (dříve relativní dielektrické konstanty K_a), kterou určuje rychlost elektromagnetické vlny nebo impulzu v půdě. Protože je relativní permitivita vody (ε_{rw} = 80) mnohem větší, než ostatních složek půdy (u minerálních půd ε_r = 2-5 a u vzduchu ε_r = 1), je absolutní permitivita nebo objemová permitivita závislá hlavně na obsahu vody v půdě (Muños-Carpena 2018).

Topp et al. (1980) definoval společný přístup k stanovení vztahu mezi relativní permitivitou ε_r a objemovou půdní vlhkostí (θ) empirickou rovnicí. Ta funguje u většiny minerálních půd a při vlhkostech do 50 %. Při větším obsahu vody, organické nebo vulkanické půdě je třeba specifická kalibrace (Muños-Carpena 2018).

Studie Topp et al. (2000) také zjistila, že dielektrická permitivita, kterou měří dielektrické senzory, není závislá pouze na vlhkosti půdy, ale také na jiných půdních vlastnostech, jako je půdní salinita nebo půdní struktura, a dochází k tzv. dielektrickým ztrátám. Při vyšších frekvencích jsou výsledky méně ovlivněny salinitou půdy (Blonquist et al. 2005a). Senzory na měření relativní permitivity mohou být také citlivé na změnu teploty (Merlin et al. 2007; Wraith & Or 1999). U většiny senzorů se problémy projevují při teplotách nižších než 5 °C (Rosenbaum et al. 2011) a vyšších než 40 °C (Rosenbaum et al. 2011; Wraith & Or, 1999).

Níže popsané dielektrické metody používají empirické kalibrované vztahy mezi obsahem vody v půdě a výstupními hodnotami senzoru (čas, frekvence, impedance, vlnová fáze). Tyto techniky jsou stále více používány, protože lze získat výsledky měření téměř okamžitě, nevyžadují údržbu a mohou měřit nepřetržitě díky automatizaci (Muños-Carpena 2018). Dielektrické senzory jsou velmi funkční metodou pro měření obsahu vody v půdě v terénu. Důkladná kalibrace jednotlivých senzorů je však nezbytná pro to, aby byly výsledky co nejpřesnější (Rowlandson et al. 2018).

TDR (Time Domain Reflectometry)

Metoda pulsní reflektometrie (nebo také Time Domain Reflectometry, TDR) měří rychlost šíření elektromagnetických vln v půdě (Blonquist et al. 2005b). Jsou vysílány velmi krátké impulzy do senzoru, který se skládá z dvou nebo třech rovnoběžných kovových tyčí. Impulzy jsou o vysokých frekvencích (až 3 000 MHz). Objemová vlhkost půdy se získá porovnáním vyslaných a odražených impulsů (Dobriyal et al. 2012).

Výsledky nejsou ovlivněny specifickými vlastnostmi půdy jako je salinita, struktura nebo teplota (Muños-Carpena 2018). Není nutná specifická kalibrace pro každou půdu (Zazueta & Xin 1994). Senzor také umožňuje současně měřit elektrickou vodivost půdy. Senzory jsou

konstruovány tak, aby byly přenosné a snadno se instalovaly. Jedná se o jednu z nejpřesnějších metod měření obsahu vody v půdě, společně s neutronovou metodou (Dobriyal et al. 2012).

Pokud je však salinita půdy vysoká, můžou být výsledky ovlivněny. Je nutné, aby byl senzor po celé své délce v kontaktu s půdou, v případě mezery mezi půdou dochází k chybám měření (Dobriyal et al. 2012). Senzory jsou také relativně drahé, právě proto, že většinou měří také teplotu a elektrickou vodivost půdy (Muños-Carpena 2018).

Příkladem zařízení, které funguje na principu TDR je senzor TRIME PICO 64 od výrobce IMKO GmbH (obrázek 1). Senzor měří vlhkost, teplotu a elektrickou vodivost půdy. Je navržen pro použití v terénu. Je určen pro horizontální i vertikální umístění v půdě. Tento senzor používá frekvence o výšce 1000 MHz a pracují při teplotách od -15 °C do 50°C. Výrobce uvádí přesnost 0,01 – 0,02 m^3 m^{-3} (Van Walt 2011).

Obrázek 1 Senzor TRIME PICO 64 (www.imko.de).

TDT (Time Domain Transmission)

Tato metoda měří dobu, kdy se elektromagnetický impuls šíří podél přenosové linky. Impuls je přenášen jednosměrně. Tato metoda je podobná metodě TDR, ovšem vyžaduje elektrické spojení na začátku a na konci přenosové linky. Přenosový obvod je ve srovnání se senzory TDR jednoduchý. Tyto metody používají impulz o frekvencích 2 000-3 500 MHz. Jedná se o metodu přesnou a levnou díky použití standardních obvodů. Tyto senzory jsou konstruovány tak, aby bylo možné jejich praktické využití v terénu (Muños-Carpena 2018).

Příkladem senzoru, měřícího na principu této metody je senzor TMS-3 a TMS-4 od firmy TOMST, s.r.o. Tento senzor je podrobně popsán v kapitole 3.5 této práce a byl také použit pro laboratorní experiment kalibrace popsané v dalších částech práce.

Dalším senzorem je například SDI-12 (obrázek 2) od firmy Acclima. Výrobce uvádí, že se jedná o nízkonákladový senzor, který poskytuje přesné výsledky (± 0,02 cm^3 cm^{-3}) v širokém rozsahu teplot a vodivosti půdy (Acclima Ltd. 2016).

Obrázek 2 Senzor SDI-12 (www.acclima.com).

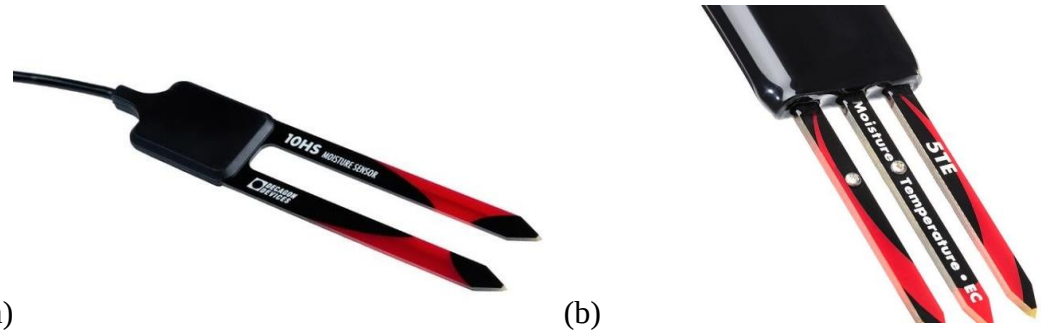
Kapacitní senzory – Frequency Domain (FD) Capacitance a Frequency Domain Reflectometry (FDR)

V případě těchto metod je použit jako senzor kondenzátor s hroty a půdou mezi nimi. Elektrická kapacita kondenzátoru je závislá na objemové vlhkosti půdy. Jako dielektrikum je zde použita půda. Frekvence senzorů se mění na základě změny vlhkosti půdy. Tato změna oproti původní frekvenci pak slouží k určení vlhkosti půdy (Bogena et al. 2007).

Senzor je tvořen dvěma nebo více elektrodami. Ty se vkládají do půdy. Tato metoda poskytuje přesné výsledky, ale doporučuje se provádět specifickou kalibraci pro každou půdu (Muños-Carpena 2018). Většinou tyto senzory používají k měření frekvence mezi 1–200 MHz. Měření tedy může být ovlivněno salinitou, ale také teplotou, vzduchovými mezerami mezi senzorem a půdou nebo obsahem jílu v půdě (Dobriyal et al. 2012).

Příkladem těchto zařízení jsou senzory ECH$_2$O 10HS (obrázek 3a) a ECH$_2$O 5TE (obrázek 3b) od výrobce Meter group, Inc. Oba tyto senzory používají k měření dielektrické permitivity frekvenci 70 MHz. Senzor 5TE měří také teplotu a elektrickou vodivost půdy. Výrobce uvádí, že chyba měření vlhkosti půdy se u obou senzorů pohybuje v rozmezí 0,01 – 0,03 cm^3 cm^{-3} v závislosti na použité kalibraci a při elektrické vodivosti do 8 dS m^{-1}(METER Group, Inc. 2018; METER Group Inc. 2019).

Kodešová et al. (2011) ve své studii provádí kalibraci dalšího senzoru, který funguje na tomto principu. Jedná se o senzor SM200 (obrázek 4) od firmy Delta-T Devices Ltd. K měření dielektrické permitivity používá tento senzor frekvenci 100 MHz (Delta-T Devices Ltd., 2006).



(a) (b)

Obrázek 3 (a) Senzor ECH$_2$O 10HS (www.metergroup.com)**,** (b) Senzor ECH$_2$O 5TE (www.ekotechnika.cz).

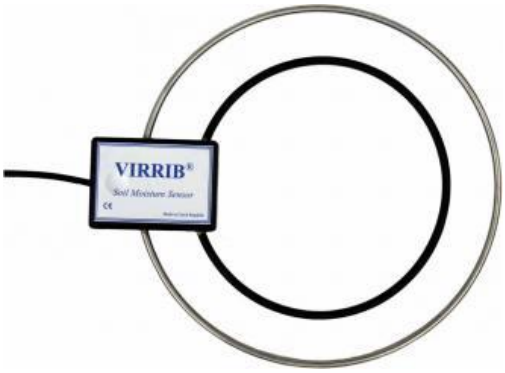
Obrázek 4 Senzor SM200 (www.delta-t.co.uk).

Fázový posun (Phase Transmission)

Tento senzor se skládá z dvou soustředných otevřených kovových kruhů, které umožňují změření frekvence na začátku a na konci vodičů. Po cestě na určitou vzdálenost zobrazí fázový posun vztažený k fázi na počátku (Muños-Carpena 2018).

Jedná se o metodu levnou. Je doporučována kalibrace pro jednotlivé půdy. Senzor je také citlivý na salinitu půdy. Přesnost senzoru je snížená, protože impulz je během přenosu v senzoru zkreslován (Muños-Carpena 2018).

Zařízení Virrib (obrázek 5) od firmy Amet měří obsah vody v půdě na základě této metody. Výrobce uvádí, že měření je v určitém rozsahu nezávislé na druhu půdy a jejím chemickém složení. Tyto senzory se nejčastěji používají k trvalému monitorování obsahu půdní vlhkosti (Amet, 2019).



Obrázek 5 Senzor Virrib (www.fiedler.cz).

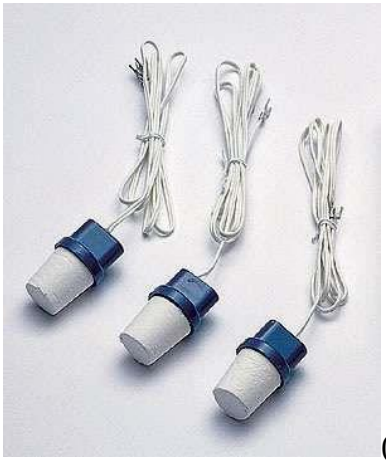
3.3.2.2 Odporové metody

Sádrové bloky

Sádrové bloky obsahují kovové elektrody, kolem kterých se tvoří nasycený roztok síranu vápenatého, který vytvoří elektrolyt. Odpor mezi elektrodami se zjistí za použití malých střídavých proudů, aby nedošlo k polarizaci bloku (Muños-Carpena 2018). Bloky absorbují vlhkost z půdy a elektrody měří elektrickou vodivost, která se zvyšuje se zvyšující se vlhkostí v bloku. Naměřené hodnoty slouží k určení obsahu vody v půdě (Werner 2002). Rozsah měření je 0,3 – 2 bar (Muños-Carpena 2018).

Tato metoda je levná, jednoduchá, potřebuje minimální údržbu. Sádra slouží k zabránění ovlivnění výsledků salinitou, ovšem jen do určité úrovně. Blok začne po určité době, obzvlášť v zasolených půdách degradovat a ztrácet kalibrační vlastnosti. Sádrové bloky mají dlouhou odezvu a výsledky jsou závislé na teplotě. Metoda není vhodná pro použití v písčitých půdách (Muños-Carpena 2018).

Příkladem tohoto zařízení jsou sádrové bloky Soilmoisture 5201F1 (obrázek 6a) a čtecí jednotka Soilmoisture 5910F1 (obrázek 6b) od firmy Soilmoisture. Všechny tyto bloky jsou testovány tak, aby bylo měření shodné a opakovatelné (Ekotechnika s.r.o. 2019).

(a)  (b)

Obrázek 6 (a) Sádrové bloky Soilmoisture 5201F1, (b) Čtecí jednotka Soilmoisture 5910F1 (www.ekotechnika.cz).

GMS (Granular matrix Sensor)

Senzory se skládají z elektrod zabudovaných do granulovaného křemenného materiálu, který je obklopen syntetickou membránou a ochrannou nerezovou síťovinou. Uvnitř senzoru je sádra, která slouží jako ochrana proti ovlivnění výsledků salinitou. Rozsah měření je 0,1 – 2 bar (Muños-Carpena 2018).

Tato metoda je levná, jednoduchá, potřebuje minimální údržbu. Mají delší životnost než sádrové bloky. Mohou být použity v půdách s vyšším obsahem vody. Podobně jako u sádrových bloků, má senzor dlouhou odezvu, výsledky jsou závislé na teplotě a není vhodný pro použití v písčitých půdách. Senzory GMS nejsou vhodné do příliš suché půdy, musí být poté znovu nasyceny a uměny zpět do půdy (Muños-Carpena 2018). Firma Irrometer Co. vyrábí senzor Watermark 200SS-5 fungující na tomto principu (obrázek 7).

Obrázek 7 Watermark 200SS-5 (irrometer.com).

3.3.2.3 Radioaktivní metody

Neutronová metoda

Neutronová metoda funguje na radioaktivním principu a měření souvisí s fyzikálně-chemickými vlastnostmi půdy (Keys 1989). Rychlé neutrony se uvolňují do půdy z radioaktivního zdroje, tam jsou zpomalovány při kontaktu s jádry atomů vodíku přítomných v molekulách vody v půdě (Chanasyk & Naeth 1996). Zpomalené neutrony vytváří kolem sondy útvar kulovitého tvaru. Se zvyšující se vlhkostí se zmenšuje poloměr kulovitého útvaru (Dobriyal et al. 2012). Jsou dva typy neutronových sond, a to sondy hloubkové, kterými lze měřit vlhkost ve větších hloubkách a sondy povrchové, kterými lze měřit vlhkost v nejvyšší vrstvě půdy (Schmuggle et al. 1980).

Příkladem zařízení měřícího vlhkost půdy na základě neutronové metody je Model 4300 Soil Moisture Gauge od firmy Troxler (obrázek 8).

Obrázek 8 Model 4300 Soil Moisture Gauge (www.troxlerlabs.com).

Gamaskopická metoda

Gamaskopická metoda funguje na principu absorpce a rozptylu γ-záření při průchodu půdou. Vychází z předpokladu závislosti jevů na vlhkosti půdy. Metoda je vhodná k využití v laboratoři i v terénu v kombinaci s předchozí metodou (Zazueta & Xin 1994).

Jedná se o nedestruktivní metody. Tyto metody poskytují přesné výsledky a výsledky nejsou ovlivněny salinitou (Muños-Carpena 2018). Jedná se o jedny z nejpřesnějších metod měření obsahu vody v půdě, společně s metodou TDR (Dobriyal et al. 2012).

Zařízení vyžadují kalibrace a jejich pořízení je velmi nákladné (Muños-Carpena 2018). Přístroje také vyžadují školenou obsluhu z důvodu používání radioaktivního zdroje a jsou potencionálně nebezpečné pro zdraví a životní prostředí (Tarantino et al. 2008).

3.3.2.4 Ostatní metody

Dálkový průzkum Země

Tato metoda zahrnuje použití družic a radarů. K měření pomocí těchto metod je využíváno aktivní a pasivní mikrovlnné a elektromagnetické záření. Tyto metody jsou v současnosti předmětem mnoha výzkumů (Muños-Carpena 2018). Jedná se o alternativní způsob, jak rychle odhadnout půdní vlhkost. Dálkové snímání je vhodné pro použití na velkých plochách, kde je třeba zjistit vlhkost půdy opakovaně, a tak by bylo použití bodových senzorů vlhkosti půdy náročné časově i finančně (Dobriyal et al. 2012).

Snímání vlhkosti pomocí dálkového průzkumu Země závisí na elektromagnetické energii, která se odráží nebo vyzařuje z povrchu půdy. Intenzita tohoto záření se mění v závislosti na vlhkosti půdy. Toto záření ovlivňují dielektrické vlastnosti půdy a teplota půdy (Schmuggle et al. 1980). Vztah mezi teplotou, jasností a vlhkostí půdy není přesně jasný, takže výsledky této metody nejsou dostatečně přesné (Wang & Qu 2009). Je možné zjistit vlhkost půdy pouze v malé vrstvě půdy. Použití této metody na místech s hustou vegetací není možné (Dobriyal et al. 2012).

GPR (Ground Penetrating Radar)

Jedná se o fyzikální metodu, kdy je využíváno elektromagnetické záření v mikrovlnném pásmu rádiového spektra. Senzor snímá odražené záření a detekuje změny elektrický vlastností pod povrchem, a tak zobrazuje podpovrchové struktury. Tuto metodu lze využít na různých substrátech, například na ledu, horninách či stavbách. Lze touto metodou zjistit změny ve struktuře materiálu nebo vznik dutin či prasklin v materiálu (Daniels 2004).

Jedná se o metodu nedestruktivní, rychlou a lze jí použít na velkých plochách (Huisman et al. 2001). Některé půdy však mohou mít vysokou elektrickou vodivost, čímž se stávají neprůhledné pro toto záření (Doolittle & Collins 1995). Tato metoda je také finančně náročnější. Použití této metody znesnadňují skalní svahy, nerovnost a svažitost terénu. Je také obtížné použití v lesích, kde vznikají chybné údaje (Dobriyal et al. 2012).

Příkladem zařízení využívajícího tuto metodu je UtilityScan (obrázek 9) od firmy GSSI.

Obrázek 9 Přístroj UtilityScan využívající metodu GPR (www.geophysical.com).

3.3.2.5 Tenzometrické metody

Vlhkostní potenciál (sací tlak) je základní veličinou, která určuje energii, kterou má voda v porézním prostředí.

Tenzometr

Tenzometr měří vlhkostní potenciál na základě síly, která působí na vodu z půdy (Schmuggle et al. 1980). Přístroj se skládá z vzduchotěsné trubky s propustnou porézní keramickou miskou na jedné straně a s vakuometrem (vytvářejícím podtlak) na druhé straně. Přístroj je vložen do půdy, k misce je připojen manometr, který je vložen do půdy společně s tenzometrem. Systém je naplněn vodou a utěsněn. Při změnách kapilárního napětí půdy se pohybuje voda skrze póry, dokud není kapilární napětí uvnitř nádoby stejné jako mimo ni. Kapilární napětí měří manometr a průtok vody je určen změnou objemu vody v nádobě před zahájením nového čtení manometru (Wallhan 1939). Pro správné měření za potřebí zajistit dostatečně dlouhou dobu instalace zařízení v půdě (Muños-Carpena 2018).

Jedná se o techniku nákladově efektivní a nedestruktivní. Při pravidelné údržbě je možné dlouhodobé použití. Dokáže stanovit distribuci vlhkosti v nasycených i nenasycených podmínkách, je také vhodný k použití v písčité půdě (Zazueta & Xin 1994). Není zde zapotřebí složité elektroniky (Schmuggle et al. 1980) a také není za potřebí provádět kalibraci přístroje (Muños-Carpena 2018). Tyto zařízení však nejsou vhodné pro použití v suchých půdách a vysoké požadavky na údržbu omezují jejich použití ve výzkumu (Schmuggle et al. 1980).

Příkladem tohoto zařízení je tenzometr 2710ARL (obrázek 10) od firmy Soilmoisture Equipment Corp. Jedná se o levné a univerzální zařízení (Soilmoisture Equipment Corp. 2011).

Obrázek 10 Tenzometr 2710ARL (www.soilmoisture.com).

3.4 Senzor TMS-4 a TMS-3

Senzory TMS-3 (obrázek 11a) a TMS-4 (obrázek 11b) jsou zařízení od firmy TOMST, s.r.o. Tyto zařízení slouží k měření teploty vzduchu, povrchu země a půdy a měření půdní vlhkosti. Výroba senzoru TMS-4 navazuje na model TMS-3. Měření a rozměry jsou u obou zařízení identické, změnily se jen konstrukční parametry. Teploměry jsou u verze TMS-4 zapuštěny v zařízení, což snižuje riziko fyzického poškození nebo odlomení teploměrů. Také je u verze TMS-4 zpevněna středová část, což snižuje riziko naprasknutí (TOMST 2019a).

(a) (b)

Obrázek 11 (a) Senzor TMS-3, (b) Senzor TMS-4.

Zařízení obsahuje dvě lithiové baterie o kapacitě 6 V/1500 mAh. Senzor ukládá data po celou dobu životnosti, uživatel nemůže zastavit sběr dat nebo data vymazat, tím je zabráněno ztrátě dat v důsledku špatného nastavení nebo chyby. Senzor tak ukládá data i při skladování. Datová kapacita dataloggeru je 32Mbit (Wild et al. 2019), dokáže tak uložit až 500 000 hodnot při měření každých deset minut po dobu deseti let (TOMST 2019a). Data jsou do počítače stahována pomocí speciálního adaptéru, který je do počítače připojen pomocí kabelu USB (TOMST 2019b).

K ovládání senzoru pomocí počítače slouží program Lolly Manager. Pomocí něj se také dá změnit interval ukládání dat. Senzor má 5 možností intenzity měření. Základní, a zároveň nejdelší režim pro ukládání se nazývá Basic a ukládání probíhá každých 15 minut. Tento režim se doporučuje pro dlouhodobé měření nebo v době uskladnění senzorů. Dále je možné nastavit Meteo režim, kdy se ukládají data každých 10 minut. V režimu Smart probíhá měření v každé 10., 15., 20., 30., 40., 45., 50. a 60. minutě. V režimu Intensive probíhá měření každých 5 minut. Poslední režim pro ukládání je Experiment, data se ukládají každou minutu a tento interval je doporučen pouze pro krátkodobé intenzivní experimenty (TOMST 2019b).

3.4.1 Měření teploty

Pro měření teploty jsou použity digitální teploměry DS7505U+ vyrobené společností Maxim Integrated. Výrobce udává přesnost ± 0,5 °C v rozmezí 0 °C až 70 °C (Wild et al. 2019). Zařízení obsahuje tři snímače teploty, první je snímač teploty vzduchu ve výšce 15 cm nad zemí, druhý u země a třetí v hloubce 8 cm pod zemí (TOMST 2019b).

3.4.2 Měření vlhkosti

K měření vlhkosti používá senzor TMS-4 vlastní patentované čidlo (patent č. CZ304153). Funguje na principu elektromagnetické metody založené na dielektrické permitivitě, konkrétně na principu přenosu časové domény (TDT). Elektromagnetické impulsy o vysokých frekvencích (cca 2 500 MHz) jsou odeslány přes tištěný obvod o délce asi 20 cm. Když se impuls dostane k počítací jednotce, dojde k vyslání dalšího impulsu. K tomu dojde během 640 mikrosekund. Impulsy jsou počítány jako signál o intenzitě 50-200 MHz. Výstupními daty z čidla jsou relativní hodnoty counts. Počet impulsů přímo souvisí s vlhkostí půdy, při zvyšující se vlhkosti se snižuje počet přijatých impulsů. Počet impulsů je pak obrácen a je v rozsahu 1-4095 counts. Typicky zaznamenaná data jsou od 100 counts (vlhkost okolního vzduchu) do 3500 counts (vlhkost destilované vody). K přepočtu této relativní hodnoty na objemovou půdní vlhkost je třeba provést kalibraci (Wild et al. 2019).

Od výrobce jsou poskytovány kalibrační křivky pro různé půdy, ale pro specifické půdy nebo pro přesnější výsledky se doporučuje provést vlastní kalibrace pro danou lokalitu (TOMST 2019a).

3.4.3 Omezení

Wild et al. (2019) zjistili, že volně instalovaná čidla TMS jsou často poškozovány volně žijící zvěří, a tak se doporučuje jejich ochrana například zakrytím drátěnou klecí. Poruchy z technických důvodů byli zaznamenány pouze u 1 % senzorů během prvních 6 měsíců po instalaci (Wild et al. 2019).

Pro správné měření vlhkosti musí být celá spodní část senzoru v přímém kontaktu s půdou. V půdách s vyšším obsahem skeletu může dojít k poškrábání senzoru, a to způsobit chybu a nefunkčnost (Wild et al. 2019).

Snímač vlhkosti je kalibrován a testován pouze pro měření vlhkosti v půdě a výrobce nedoporučuje jeho používání ve zmrzlé půdě (Wild et al. 2019). Toto období lze rozpoznat díky teploměru umístěném v senzoru.

4 Metody a materiál

4.1 Odběr vzorku

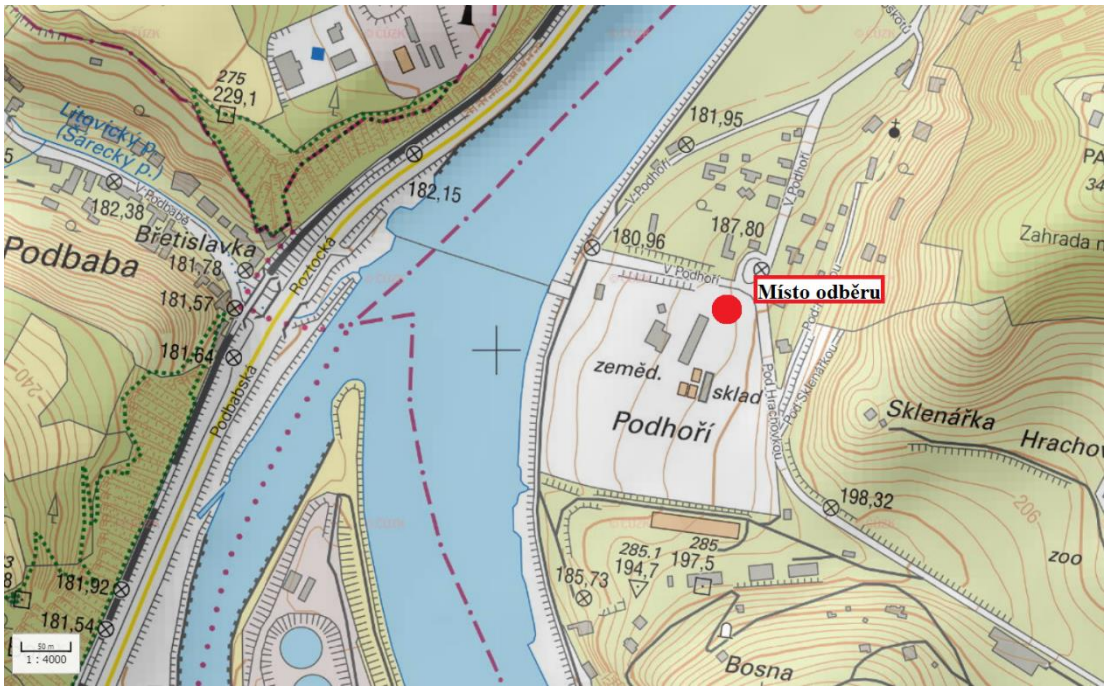
4.1.1 Demonstrační a výzkumná stanice Praha-Trója

Pro odběr vzorků půdy byla vybrána demonstrační a výzkumná stanice Praha-Trója (obrázek 12) katedry zahradnictví fakulty agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů České zemědělské univerzity. Stanice je důležitým experimentálním zázemím pro výzkum, především v oblasti zahradnictví, ale i v dalších oborech fakulty.

Jeden z hlavních důvodů pro výběr tohoto zájmového území byl probíhající experiment katedry pedologie a ochrany půd vliv mulčovacího materiálu na půdní vlastnosti, hydraulické vlastnosti a vlhkost půdy. V tomto experimentu jsou k měření půdní vlhkosti používány senzory TMS-3 a od roku 2018 také senzory TMS-4.

Na vybrané lokalitě je půdní typ fluvizem, subtyp modální. Tyto půdy se vytvářejí v nivách řek a potoků z povodňových sedimentů (Němeček et al. 2011). To odpovídá umístění zájmového území, které leží nedaleko řeky Vltavy (obrázek 13).

Obrázek 12 Experimentální plochy zájmového území osázené senzory TMS-3 (autor Ing. Miroslav Fér, Ph.D.).



Obrázek 13 Mapa zájmového území (geoportal.gov.cz).

Na vybraném místě byl odebrán porušený půdní vzorek pro potřeby kalibrace. Porušený půdní vzorek byl dále použit k určení základních fyzikálních a chemických vlastností. Také byly odebrány neporušené půdní vzorky za pomoci Kopeckého válečků o objemu 100 cm^3. Válečky byly za pomocí odběrové hlavy a palice zatlačeny do půdy tak, aby nedošlo k porušení půdní struktury. Po vyjmutí válečků z půdy byly seříznuty horní a dolní okraje a váleček byl opatřen víčky. Válečky byly umístěny do igelitových sáčků a v chladícím boxu přepraveny do laboratoře.

Základní chemické a fyzikální vlastnosti půdy byly měřeny na vzorcích půdy, které byly vysušeny na vzduchu, rozemlety a přesáty přes síto o průměru ok 2 mm (ISO 11464:2006 2006).

4.2 Analýza vzorku

Základní fyzikální a chemické vlastnosti půdy byly zjištěny pomocí standartních laboratorních metod při konstantní laboratorní teplotě 20 °C: specifická hmotnost půdy (ρ_z) pyknometricky, objemová hmotnost půdy, pórovitost, zrnitostní složení, půdní reakce, salinita, oxidace organického uhlíku, obsah $CaCO_3$.

4.2.1 Fyzikální vlastnosti půdy

Specifická hmotnost půdy

Specifická (měrná) hmotnost půdy (ρ_z) nebo také zdánlivá hustota půdních částic je hmotnost objemové jednotky vysušené pevné fáze půdy. Její hodnota se pohybuje nejčastěji v rozmezí 2,2 – 2,9 $g.cm^{-3}$ (Flint & Flint 2002).

Stanovení probíhalo pomocí pyknometru. Pyknometr byl naplněn až po okraj destilovanou vodou a otevřený byl temperován na teplotu 20°C. Takto vytemperovaný pyknometr byl uzavřen a zvážen (P_{H2O}). Dále byl připraven vzorek půdy. Bylo naváženo 10 g

půdy, navážka byla zapsána. Ve varné misce byl vzorek půdy vařen z důvodu rozbití malých agregátů na individuální částice zeminy. Vychladnutý vzorek byl kvantitativně převeden do prázdného pyknometru, doplněn destilovanou vodou a otevřený byl temperován na 20°C. Poté byl pyknometr zavřen a zvážen (P_z). Specifická hmotnost půdy byla určena podle následující rovnice:

$$\rho_z = N_z \,.\, \rho_v / (N_z + P_{H2O} - P_z) \quad [g\ cm^{-3}] \tag{3}$$

kde N_z je navážka půdy (g), ρ_v je hustota vody (1 g cm^{-3}), P_{H2O} je váha pyknometru s destilovanou vodou (g) a P_z je váha pyknometru se suspenzí půdy (g) (Flint & Flint 2002).

Objemová hmotnost půdy

Objemová hmotnost půdy (ρ_d) je hmotnost objemové jednotky vysušené půdy v neporušeném stavu. Byla zjištěna pomocí Kopeckého válečku. Její hodnota se pohybuje nejčastěji v rozmezí 1,2 – 1,8 g cm^{-3}. Objemová hmotnost půdy byla určena podle následující rovnice:

$$\rho_d = m_s / V \qquad [g\ cm^{-3}] \tag{4}$$

kde m_s je hmotnost vysušeného vzorku (g) a V je objem vzorku (cm^3).

Pórovitost

Celková pórovitost (P) popisuje podíl pórů ve vzorku. Podle pórovitosti se dá hodnotit ulehlost půdy. Její hodnota se pohybuje nejčastěji okolo 40–50 %. Pórovitost byla určena podle následující rovnice:

$$P = (\rho_z - \rho_d) / \rho_z \qquad *100\ [\%] \tag{5}$$

kde ρ_z je specifická hmotnost půdy (g $cm^{-}3$) a ρ_d je objemová hmotnost půdy (g cm^{-3}) (Zbíral 2002).

Zrnitostní složení

Zrnitost byla měřena pomocí hustoměrné metody. V půdním vzorku byly nejdříve rozrušeny agregáty a byl vypuzen vzduch přidáním 10 ml dispergačního činidla (hexametafosfát Na) na každých 10 gramů navážky půdního vzorku a vařením. Takto připravená suspenze se nechala vychladnout a byla kvantitativně převedena do válce. Válec byl doplněn po rysku 1000 ml. Suspenze byla rozmíchána pomocí míchadla a byl opatrně vložen hustoměr. V jednotlivých časech byly zapisovány hodnoty hustoměru R. Byla také zaznamenávána teplota suspenze. V prvních čtyřech časech zůstával hustoměr v suspenzi, mezi ostatními měřeními byl hustoměr ze suspenze vyndán. Naměřené hodnoty byly základem pro konstrukci zrnitostní křivky a stanovení obsahu jednotlivých frakcí (Gee & Or 2002). Podle Nováka byla vyhodnocena zrnitost půdy (Zbíral 2002).

4.2.2 Chemické vlastnosti půdy

Půdní reakce

Měření probíhalo pomocí skleněné elektrody. Aktivní půdní reakce pH (H_2O) byla měřena podle normy ISO 10390:2005. Měření probíhalo v suspenzi půdy ve vodě v poměru 1:2,5. Výsledky byly hodnoceny podle kritérií v tabulce 1. Potencionální (výměnná) půdní reakce pH (KCl) byla měřena podle normy ISO 10390:2005. Měření probíhalo v roztoku chloridu draselného o koncentraci 1 mol l^{-1} v poměru 1:2,5. Výsledky byly hodnoceny podle kritérií v tabulce 2. Měření obou půdních reakcí bylo provedeno potenciometricky pomocí pH metru inoLab Level 1.

Tabulka 1 Hodnotící stupnice pro pH (H_2O) (Zbíral 2002).

pH (H_2O)	**hodnocení**
<4,9	silně kyselá
4,9 - 5,9	kyselá
5,9 - 6,9	slabě kyselá
6,9 - 7,1	neutrální
7,1 - 8,0	slabě alkalická
8,0 – 9,4	alkalická
>9,4	silně alkalická

Tabulka 2 Hodnotící stupnice pro pH (KCl) (Zbíral 2002).

pH KCl	**hodnocení**
<4,5	silně kyselá
4,5 - 5,5	kyselá
5,5 - 6,5	slabě kyselá
6,5 - 7,2	neutrální
> 7,2	alkalická

Salinita

Bylo provedeno kvantitativní stanovení salinity (elektrické vodivosti) ve vodném extraktu. Bylo naváženo 10 g půdy do PVC lahve a spolu s 50 ml destilované vody byl roztok třepán na třepačce. Poté byl roztok filtrován přes filtrační papír a ve filtrátu byla změřena konduktometrem specifická vodivost. Salinita u běžných nezasolených půd vychází v jednotkách μS cm^{-1} (Rhoades 1996). Salinita půdy se hodnotí podle údajů v tabulce 3.

Tabulka 3 Hodnotící tabulka pro stanovení salinity (Zbíral 2002).

salinita (µS cm^{-1})	**půdy**
do 30	minimální zasolení
30–60	Půda bez negativních účinků solí
60–120	zvýšené zatížení solemi
nad 120	vysoké zatížení solemi

Oxidace organického uhlíku

Pro zjištění obsahu organického uhlíku byla použita modifikovaná Tjurinova metoda. Uhlík organické hmoty byl zoxidován kyslíkem dychromanu draselného v kyselinosírovém prostředí. Množství nespotřebovaného oxidantu bylo zjištěno titrací Mohrovou solí. Bylo použito 0,2 g zeminy na 10 ml chromsírové směsi. Připravená směs byla zakryta hodinovým sklíčkem a po dobu 45 minut byla ve vyhřáté sušárně na 125 °C. Do vzorku byly ponořeny Pt elektrody a vzorek byl titrován Mohrovou solí, dokud nedošlo k trvalému vychýlení ručičky na galvanometru (Skjemstad & Baldock 2008). Výsledky stanovení byly hodnoceny podle tabulky 4.

Tabulka 4 Hodnotící stupnice pro stanovení množství organického uhlíku a humusu (Zbíral 2002).

C_{ox} (%)	**humus (%)**	**označení obsahu**
<0,6	<1,0	velmi nízký
0,6 – 1,1	1,0 – 2,0	nízký
1,1 – 1,7	2,0 – 3,0	střední
1,7 – 2,9	3,0 – 5,0	vysoký
>2,9	>5,0	velmi vysoký

Uhličitany

Bylo provedeno orientační měření obsahu uhličitanů. Malé množství vzorku půdy bylo dáno na hodinové sklíčko a zalito 10% kyselinou chlorovodíkovou (Looppert & Suarez 1996). Podle intenzity šumění byl odhadnut obsah uhličitanů (Tabulka 5).

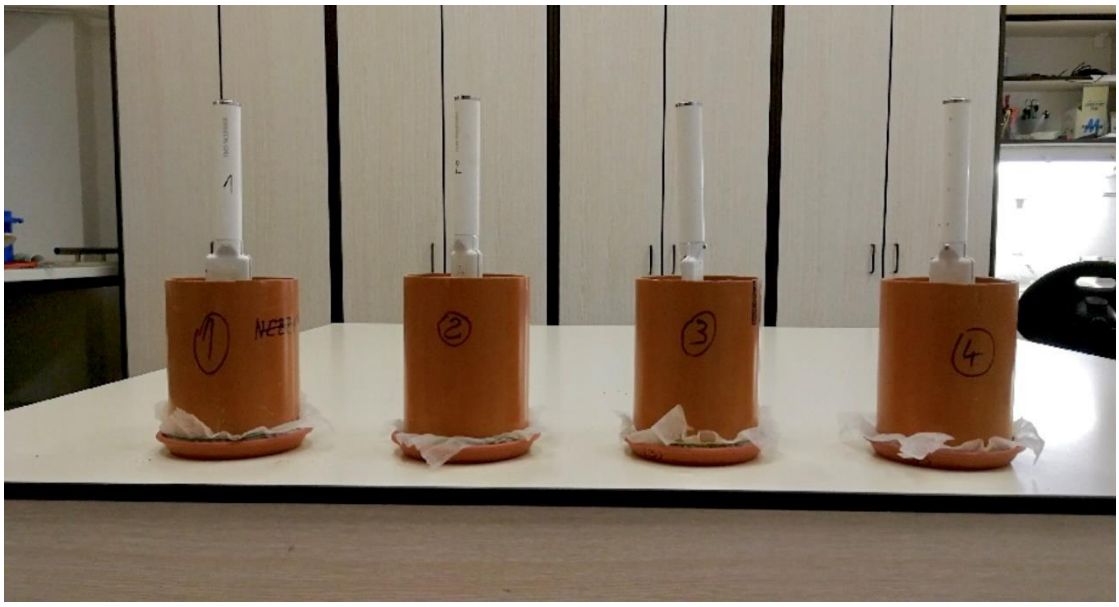
Tabulka 5 Hodnocení zkoušky přítomnosti uhličitanů.

popis reakce	**odhad obsahu uhličitanů**
šumění sotva znatelné nebo žádné	do 0,3 %
šumění silnější, krátce trvající	od 0,3 do 2,0 %
šumění silné, déle trvající	nad 2,0 %

4.3 Kalibrace senzorů TMS-3 a TMS-4

Kalibrace senzorů byla provedena podle standardní metodiky (Kodešová et al. 2015). Pro potřeby kalibrace byly použity plastové válce o objemu V_K = 1144 cm^3 (výška 14 cm a průměr 10,2 cm). Spodní části válců byly překryty netkanou textilií, ta byla připevněna gumičkou a pod válec byla umístěna miska. Netkaná textilie zabraňovala vysypání půdy, ale v případě přesycení půdního vzorku umožňovala odtok přebytečné vody.

Každý válec s netkanou textilií, gumičkou a miskou byl zvážen a označen číslem. Dále byl zvážen a označen senzor. Veškeré navážky byly zapsány. Vysušené a přesáté půdní vzorky, které byly odebrány na vybrané lokalitě, byly nahutněny do válců (obrázek 14).



Obrázek 14 Průběh kalibrace senzoru TMS-4 (vlastní fotodokumentace).

Objemová hmotnost nahutněného půdního vzorku ve válci odpovídala objemové hmotnosti ρ_d = 1,4 g cm^{-3}, zjištěné na základě výsledků z odebraných neporušených půdních vzorků pomocí Kopeckého válečků. Hmotnost půdy nahutněné do válců (m_K) byla pak:

$$m_K = V_K \cdot \rho_d \quad [g] \tag{6}$$

Po naplnění válce půdou byly senzory TMS-3 nebo TMS-4 umístěny vertikálně do válce. Pro variantu se senzorem TMS-3 byly použity tři senzory (opakování). Pro varianty se senzorem TMS-4 byly použity vždy čtyři senzory (opakování). Půdní vzorky byly během kalibrace postupně zvlhčovány. Pro senzory TMS-3 bylo provedeno ovlhčování destilovanou vodou. Pro senzory TMS-4 bylo provedeno ovlhčování destilovanou vodou a tři varianty ovlhčování roztokem KBr o různých koncentracích Br.

Přidané množství vody (ΔV_w) se se řídilo celkovým objemem pórů v půdním vzorku (V_P) a zvoleným počtem zvlhčovacích kroků (N):

$$V_P = V_K \,.\, P \tag{7}$$

$$Ve = V_P / N \tag{8}$$

Pro správné promísení půdy s vodou bylo třeba při prvních krocích půdu z válců vysypat na tác, pomocí rozprašovače půdu navlhčit a pomocí lopatky homogenizovat. Poté byla půda nasypána zpět do válce. Po každém navlhčení byl válec zvážen. Díky zvážení po každém kroku bylo možné zjistit gravimetricky hmotnostní půdní vlhkost (w). Také byly v průběhu vlhčení odečítány jednotky (counts). Mezi jednotlivými kroky byl časový interval jedna hodina. Tento postup ovlhčování vzorku byl opakován šestkrát. V každém kroku bylo pro ovlhčení použito 32 cm^3 vody, což odpovídalo objemové vlhkosti 2 %. Část přidávané vody se však odpařila během ovlhčování, proto byl skutečný objem vody zjištěn po vysušení vzorku gravimetricky. Během celé kalibrace byl znám objem vzorku, proto mohla být určena objemová vlhkost vzorku pro potřeby kalibrace.

Poslední kroky kalibrace byly prováděny bez vysypávání válců na tác, ale pouze zalitím válců požadovaným množstvím vody. V tomto případě se jednotky (counts) odečítaly až po delší době, když se voda nalitá do válce rozdistribuovala do celého vzorku. V těchto krocích bylo použito 64 cm^3 vody. Po dobu distribuce vody ve vzorku byl válec pečlivě zakrytý igelitovým pytlíkem, aby nedocházelo k výparu z povrchu válce (viz obrázek 15).

Obrázek 15 Kalibrace senzoru TMS-4, válec zakrytý igelitovým pytlíkem po dobu distribuce vody (vlastní fotodokumentace).

Stejný postup jako při kalibraci s destilovanou vodou byl použit i při sledování vlivu rozpustných solí, kdy byl aplikován roztok KBr o různých koncentracích Br, který simuloval zasolení půdy. Roztok KBr byl aplikován v koncentracích Br 0,01 mol l^{-1} (0,01 M), 0,05 mol l^{-1} (0,05 M) a 0,1 mol l^{-1} (0,1 M).

U senzoru TMS-3 a TMS-4 je předpokládána lineární závislost mezi měřenými jednotkami (C) a půdními vlhkostmi podle následující rovnice (Kodešová et al. 2015):

$$\theta = a\, C/10^4 + b \quad [cm^3\, cm^{-3}] \tag{9}$$

kde a a b jsou parametry kalibrační rovnice, která vznikla na základě dat získaných během provedené kalibrace.

Dále byly vyhodnoceny vztahy mezi objemovými vlhkostmi stanovenými gravimetricky (θ_m) a vypočtenými pomocí kalibračních rovnic (θ_p), a chyby měření vypočtené jako rozdíl půdních objemových vlhkostí stanovených gravimetricky (θ_m) a vypočtených pomocí kalibračních rovnic (θ_p) (Kodešová et al. 2015).

Dále byly porovnány kalibrace senzoru TMS-3 a TMS-4 na stejném půdním vzorku při ovlhčování destilovanou vodou, a kalibrace senzoru TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou a při ovlhčování roztokem KBr o různých koncentracích Br.

5 Výsledky

5.1 Základní fyzikální vlastnosti

Proběhlo stanovení následujících základních fyzikálních vlastností: specifická hmotnost zeminy ρ_z (g cm^{-3}) a zrnitostní složení na porušených půdních vzorcích, a objemová hmotnost zeminy ρ_d (g cm^{-3}) a celková pórovitost P (%) na neporušených půdních vzorcích. Výsledky těchto stanovení jsou zobrazeny v tabulce 6 a tabulce 7.

Hodnota celkové pórovitosti vzorku byla 48 %, což je hodnota průměrné pórovitosti půd. Specifická hmotnost byla stanovena 2,58 g cm^{-3}, což je průměrná hodnota specifické hmotnosti zeminy. Vybraný vzorek obsahuje 60 % písčitých (křemenných) částic. Hodnota specifické hmotnosti rozemletého křemene je 2,65 g cm^{-3}. Proto se hodnota specifické hmotnosti našeho vzorku přibližuje hodnotám křemene.

Podle údajů z tabulky 7 byl určen půdní druh. Pro určení půdního druhu dle klasifikace podle Nováka je rozhodující procentuální zastoupení kategorie částic menších než 0,01 mm. Tyto částice byly zastoupeny 20,54 %, a tak se dle klasifikace podle Nováka jedná o půdní druh písčito-hlinitý.

Tabulka 6 Stanovené hodnoty základních fyzikálních vlastností a jejich směrodatné odchylky.

specifická hmotnost ρ_z (g cm^{-3})	**objemová hmotnost ρ_d (g cm^{-3})**	**pórovitost P (%)**
2, 58 ± 0,010	1,45 ± 0,057	48 ±0,021

Tabulka 7 Stanovené hodnoty pro určení zrnitosti.

fyz. jíl (%)	**obsah zrn (%)**			
<0,002 mm	<0,01 mm	0,01-0,05 mm	0,05-0,1 mm	0,1-2 mm
11,74	20,54	10,41	9,92	59,11

5.2 Základní chemické vlastnosti

Proběhlo stanovení následujících základních chemických vlastností: aktivní půdní reakce pH (H_2O) a výměnná půdní reakce pH (KCl), salinita (μS cm^{-1}), obsah oxidovatelného uhlíku Cox (%) a obsah uhličitanů (%). Výsledky těchto stanovení jsou zobrazeny v tabulce 8.

Aktivní půdní reakce pH (H_2O) byla hodnocena podle tabulky 1. Naměřená hodnota 7,06 odpovídá neutrální reakci. Výměnná půdní reakce pH (KCl) byla hodnocena podle tabulky 2. Naměřená hodnota 5,88 odpovídá slabě kyselé reakci.

Elektrická vodivost má hodnotu 100,13 μS cm^{-1}, což podle tabulky 3 odpovídá půdě se zvýšenou zátěží zasolením.

Podle výsledku obsahu oxidovatelného uhlíku z tabulky 8 v porovnání s tabulkou 4 vyplývá, že vzorek má střední obsah organického uhlíku. Vzorek neobsahoval uhličitany, jedná se o půdu bezkarbonátovou.

Tabulka 8 Stanovené hodnoty základních chemických vlastností a jejich směrodatné odchylky.

pH (H_2O) (-)	**pH (KCl)** (-)	**salinita** (**µS cm^{-1}**)	**Cox** (%)	**uhličitany** (%)
7,06 ± 0,023	5,88 ± 0,045	100,13 ± 1,210	1,62 ± 0,011	do 0,3

5.3 Výsledky kalibrace senzorů

5.3.1 Senzor TMS-3

První varianta byla kalibrace senzoru TMS-3 při ovlhčování destilovanou vodou. Pro tuto kalibraci byly použity 3 senzory (3 opakování).

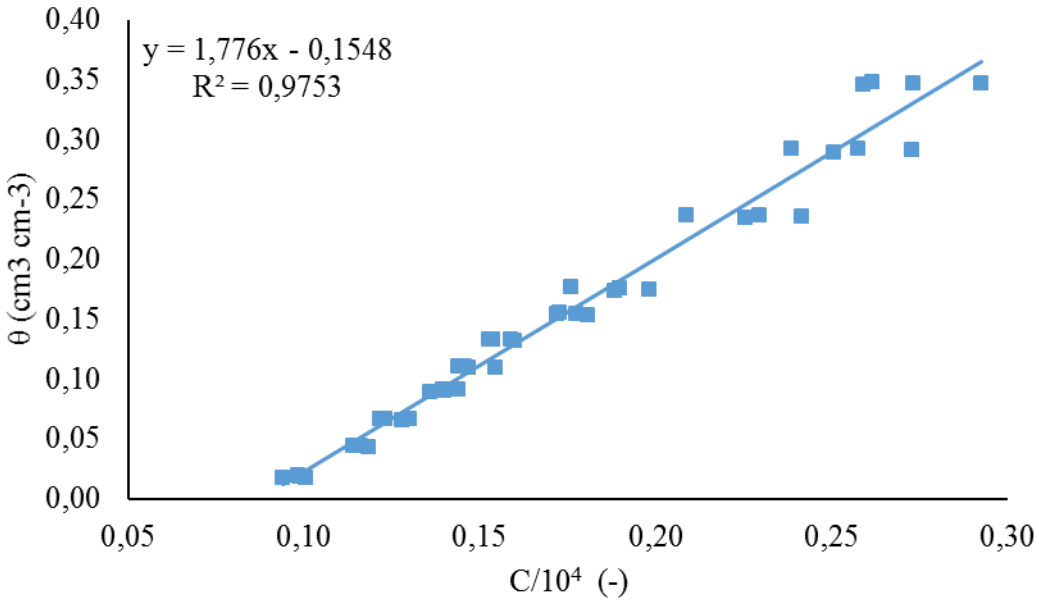
5.3.1.1 Kalibrace senzoru TMS-3 při použití destilované vody

Výsledný graf závislosti objemové vlhkosti půdy (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí senzorů TMS-3 při použití destilované vody je znázorněn na obrázku 16. V tomto grafu je také kalibrační rovnice. Pro tento graf byly použity výsledky ze všech 3 senzorů. Výsledné grafy pro jednotlivé senzory obsahující kalibrační rovnice jsou umístěny v příloze 10.1.

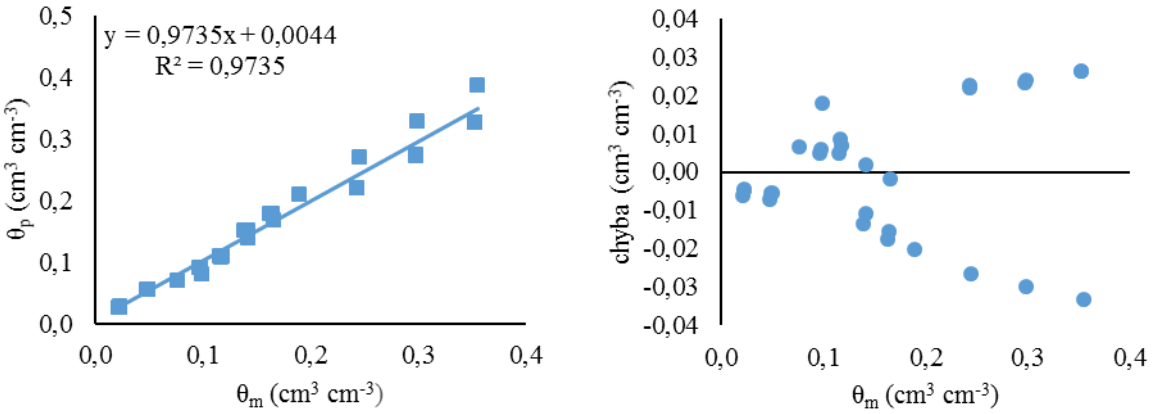
Dále byly porovnány výsledné hodnoty vlhkostí změřených gravimetricky (θ_m) a vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p), které byly vypočítány podle rovnice 9 (viz kapitola 4.3). Závislost těchto vlhkostí (θ_m, θ_p) je znázorněna na grafu a) na obrázku 17. Také byla určena chyba měření, vypočítána jako rozdíl mezi vlhkostí určenou gravimetricky (θ_m) a vlhkostí zjištěnou pomocí senzorů (θ_p) TMS-3. Tyto chyby jsou znázorněny v grafu b) na obrázku 17.

K výpočtu vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p) byly použity parametry z kalibrační rovnice z výsledných kalibrací za použití výsledků všech tří opakování (3 senzory). Tyto vlhkosti (θ_p) jsou pak použity v grafech a) a b) na obrázku 17.

Také byly k výpočtu vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p) použity parametry z kalibračních rovnic jednotlivých opakování senzorů TMS-3 při ovlhčování destilovanou vodou. Tyto vlhkosti jsou pak použity v grafech závislosti vlhkostí změřených gravimetricky (θ_m) a vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p) a chyby měření v příloze 10.1.



Obrázek 16 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí TMS-3 při ovlhčování destilovanou vodou.



(a) (b)

Obrázek 17 Graf (a) závislosti půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření pro senzor TMS-3 při ovlhčování destilovanou vodou.

5.3.2 Senzor TMS-4

Druhá varianta byla kalibrace senzoru TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou. Dalšími variantami byla kalibrace senzoru TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o třech různých koncentracích Br. Roztok KBr simuluje přirozené zasolení půdy. Pro tyto varianty byly použity 4 senzory (4 opakování).

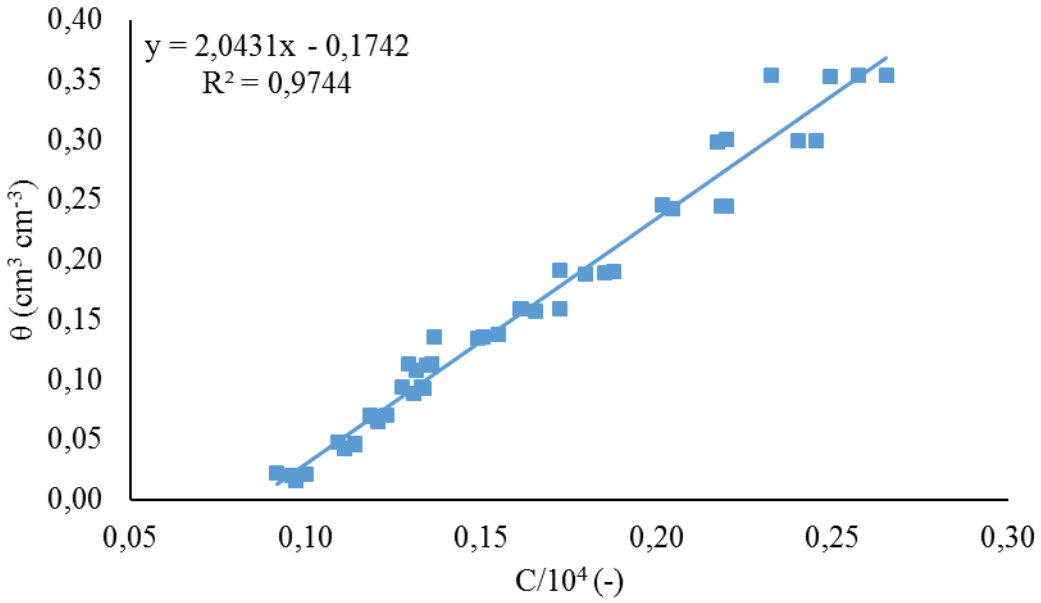
5.3.2.1 Kalibrace senzoru TMS-4 při použití destilované vody

Výsledný graf závislosti objemové vlhkosti půdy (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí senzorů TMS-4 při použití destilované vody je znázorněn na obrázku 18. V tomto grafu je také kalibrační rovnice. Pro tento graf byly použity výsledky ze všech 4 senzorů. Výsledné grafy pro jednotlivé senzory obsahující kalibrační rovnice jsou umístěny v příloze 10.2.

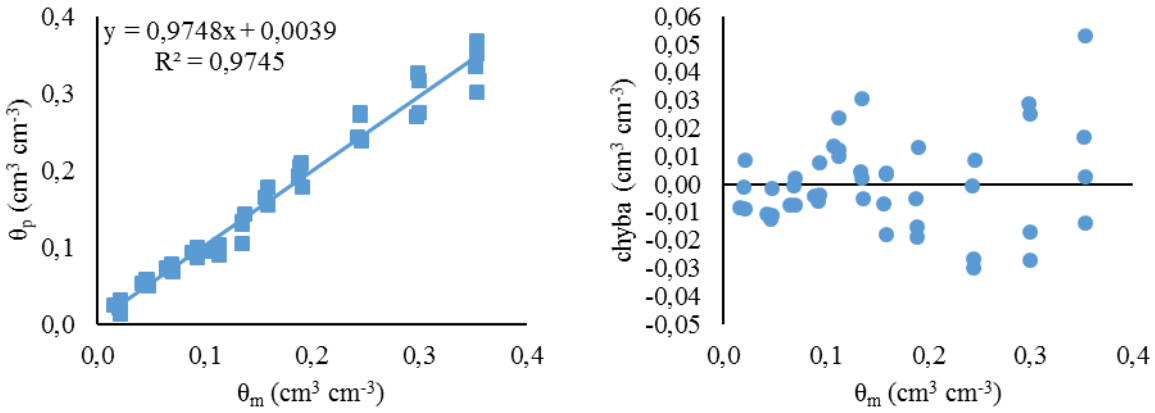
Dále byly porovnány výsledné hodnoty vlhkostí změřených gravimetricky (θ_m) a vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p), které byly vypočítány podle rovnice 9 (viz kapitola 4.3). Závislost těchto vlhkostí (θ_m, θ_p) je znázorněna na grafu a) na obrázku 19. Také byla určena chyba měření, vypočítána jako rozdíl mezi vlhkostí určenou gravimetricky (θ_m) a vlhkostí zjištěnou pomocí senzorů (θ_p) TMS-4. Tyto chyby jsou znázorněny v grafu b) na obrázku 19.

K výpočtu vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p) byly použity parametry z kalibrační rovnice z výsledných kalibrací za použití výsledků všech čtyř opakování (4 senzory). Tyto vlhkosti (θ_p) jsou pak použity v grafech a) a b) na obrázku 19.

Také byly k výpočtu vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p) použity parametry z kalibračních rovnic jednotlivých opakování senzorů TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou. Tyto vlhkosti jsou pak použity v grafech závislosti vlhkostí změřených gravimetricky (θ_m) a vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p) a chyby měření v příloze 10.2.



Obrázek 18 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou.



(a) (b)

Obrázek 19 Graf (a) závislosti půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření po senzor TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou.

5.3.2.2 Kalibrace senzoru TMS-4 při simulaci zasolené půdy

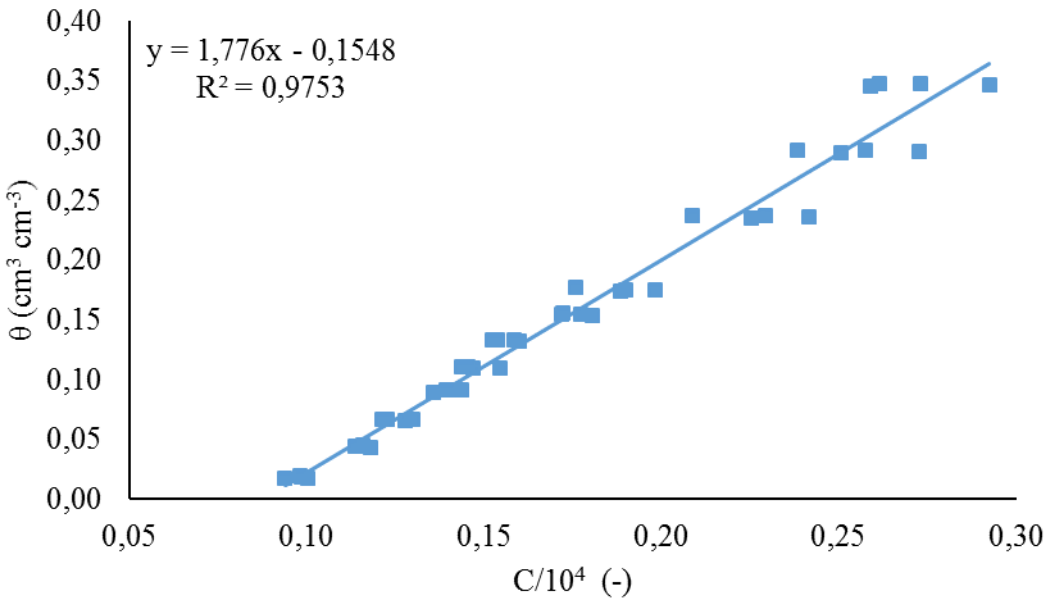
Pro kalibraci senzoru TMS-4 byl také použit roztok KBr o různých koncentracích Br – koncentrace Br 0,1 M, koncentrace Br 0,05 M a koncentrace 0,01 M. Tento roztok simuluje přirozené zasolení půd. Použitím tohoto roztoku sledujeme vliv rozpustných solí na provedenou kalibraci.

Roztok KBr o koncentraci 0,1 M

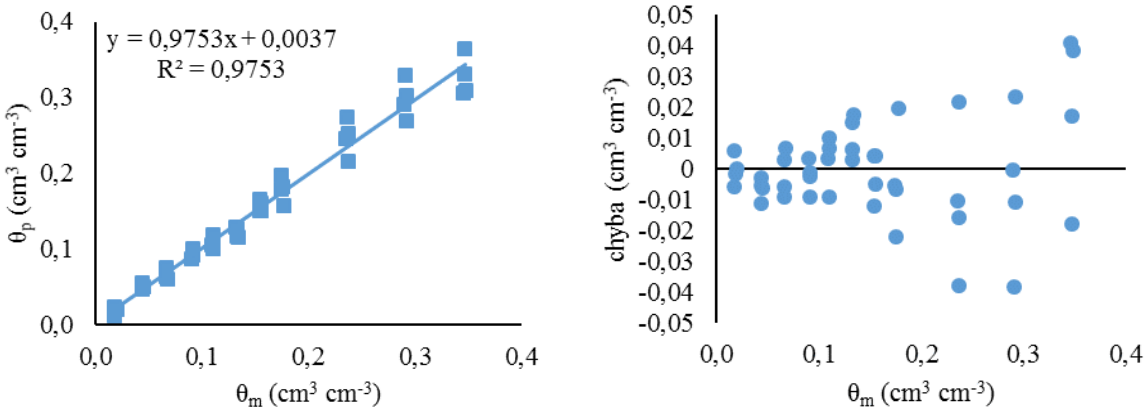
Výsledný graf závislosti objemové vlhkosti půdy (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí senzorů TMS-4 při použití roztoku KBr o koncentraci 0,1 M je znázorněn na obrázku 20. V tomto grafu je také kalibrační rovnice. Pro tento graf byly použity výsledky ze všech 4 senzorů. Výsledné grafy pro jednotlivé senzory obsahující kalibrační rovnice jsou umístěny v příloze 10.3.

Dále byly porovnány výsledné hodnoty vlhkostí změřených gravimetricky (θ_m) a vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p), které byly vypočítány podle rovnice 9 (viz kapitola 4.3). Závislost těchto vlhkostí (θ_m, θ_p) je znázorněna na grafu a) na obrázku 21. Také byla určena chyba měření, vypočítána jako rozdíl mezi vlhkostí určenou gravimetricky (θ_m) a vlhkostí zjištěnou pomocí senzorů (θ_p) TMS-4. Tyto chyby jsou znázorněny v grafu b) na obrázku 21.

K výpočtu vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p) byly použity parametry z kalibrační rovnice z výsledných kalibrací za použití výsledků všech čtyř opakování (4 senzory). Tyto vlhkosti (θ_p) jsou pak použity v grafech a) a b) na obrázku 21.



Obrázek 20 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci 0,1 M.



(a) (b)

Obrázek 21 Graf (a) závislosti půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření po senzor TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci 0,1 M.

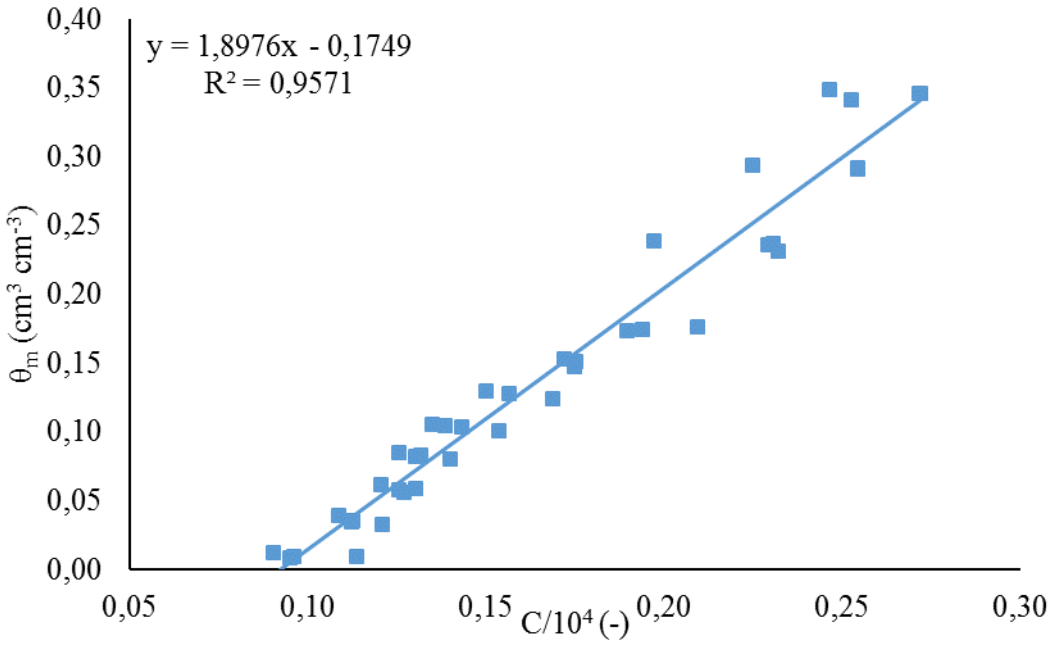
Roztok KBr o koncentraci 0,05 M

Výsledný graf závislosti objemové vlhkosti půdy (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí senzorů TMS-4 při použití roztoku KBr o koncentraci 0,05 M je znázorněn na obrázku 22. V tomto grafu je také kalibrační rovnice. Pro tento graf byly použity výsledky ze všech 4 senzorů. Výsledné grafy pro jednotlivé senzory obsahující kalibrační rovnice jsou umístěny v příloze 10.3.

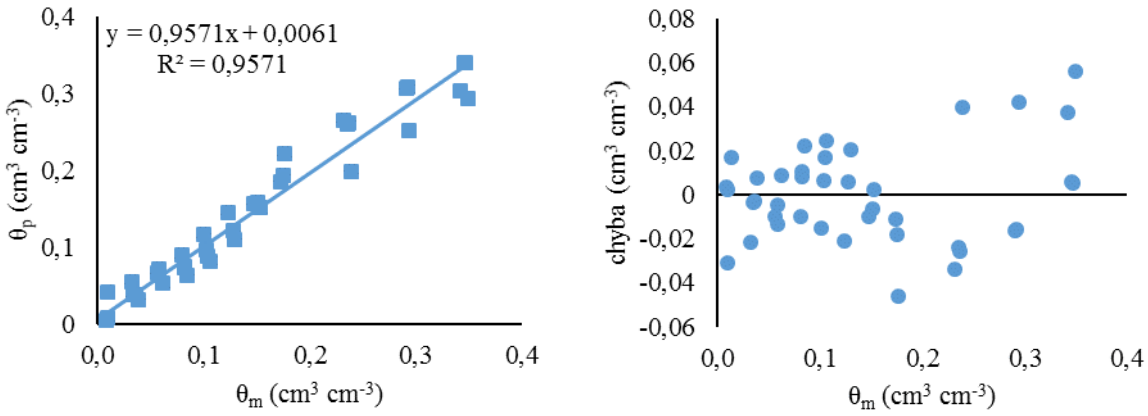
Dále byly porovnány výsledné hodnoty vlhkostí změřených gravimetricky (θ_m) a vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p), které byly vypočítány podle rovnice 9 (viz kapitola 4.3). Závislost těchto vlhkostí (θ_m, θ_p) je znázorněna na grafu a) na obrázku 23.

Také byla určena chyba měření, vypočítána jako rozdíl mezi vlhkostí určenou gravimetricky (θ_m) a vlhkostí zjištěnou pomocí senzorů (θ_p) TMS-4. Tyto chyby jsou znázorněny v grafu b) na obrázku 23.

K výpočtu vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p) byly použity parametry z kalibrační rovnice z výsledných kalibrací za použití výsledků všech čtyř opakování (4 senzory). Tyto vlhkosti (θ_p) jsou pak použity v grafech a) a b) na obrázku 23.



Obrázek 22 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci 0,05 M.



(a) (b)

Obrázek 23 Graf (a) závislosti půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření po senzor TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci 0,05 M.

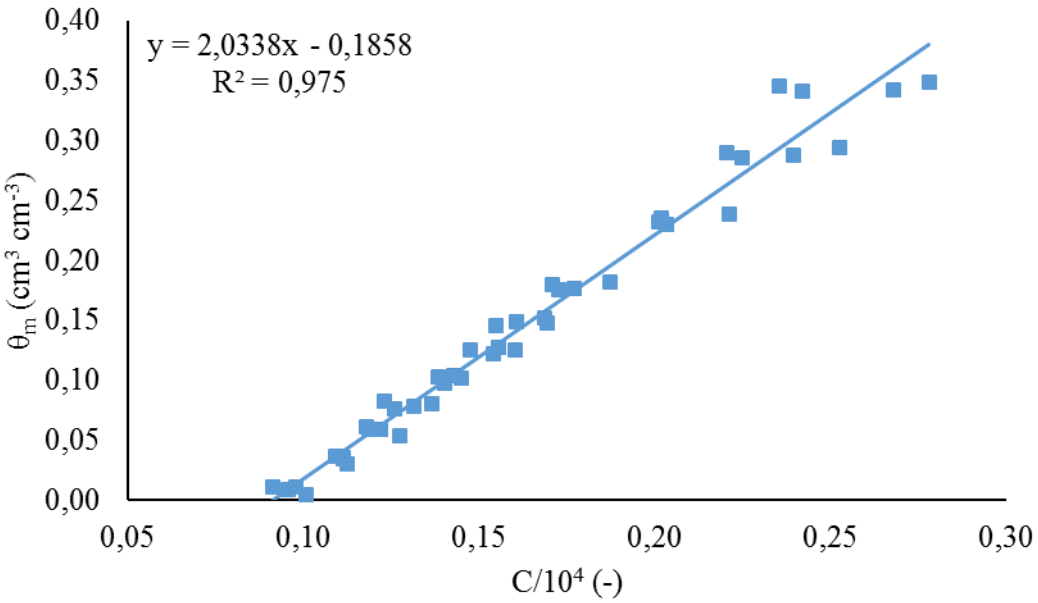
Roztok KBr o koncentraci 0,01 M

Výsledný graf závislosti objemové vlhkosti půdy (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí senzorů TMS-4 při použití roztoku KBr o koncentraci 0,01 M je znázorněn na obrázku 24. V tomto grafu je také kalibrační rovnice. Pro tento graf byly použity výsledky ze všech 4 senzorů. Výsledné grafy pro jednotlivé senzory obsahující kalibrační rovnice jsou umístěny v příloze 10.3.

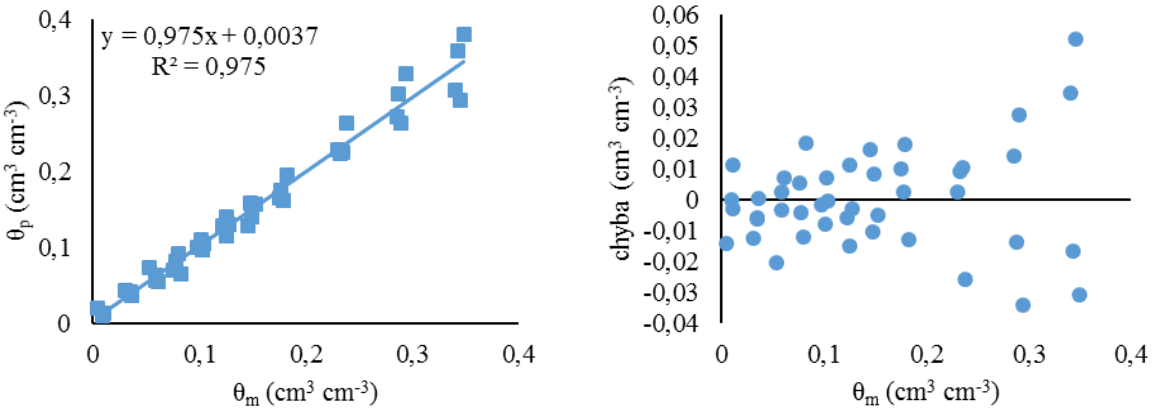
Dále byly porovnány výsledné hodnoty vlhkostí změřených gravimetricky (θ_m) a vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p), které byly vypočítány podle rovnice 9 (viz kapitola 4.3). Závislost těchto vlhkostí (θ_m, θ_p) je znázorněna na grafu a) na obrázku 25.

Také byla určena chyba měření, vypočítána jako rozdíl mezi vlhkostí určenou gravimetricky (θ_m) a vlhkostí zjištěnou pomocí senzorů (θ_p) TMS-4. Tyto chyby jsou znázorněny v grafu b) na obrázku 25.

K výpočtu vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p) byly použity parametry z kalibrační rovnice z výsledných kalibrací za použití výsledků všech čtyř opakování (4 senzory). Tyto vlhkosti (θ_p) jsou pak použity v grafech a) a b) na obrázku 25.



Obrázek 24 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci 0,01 M.



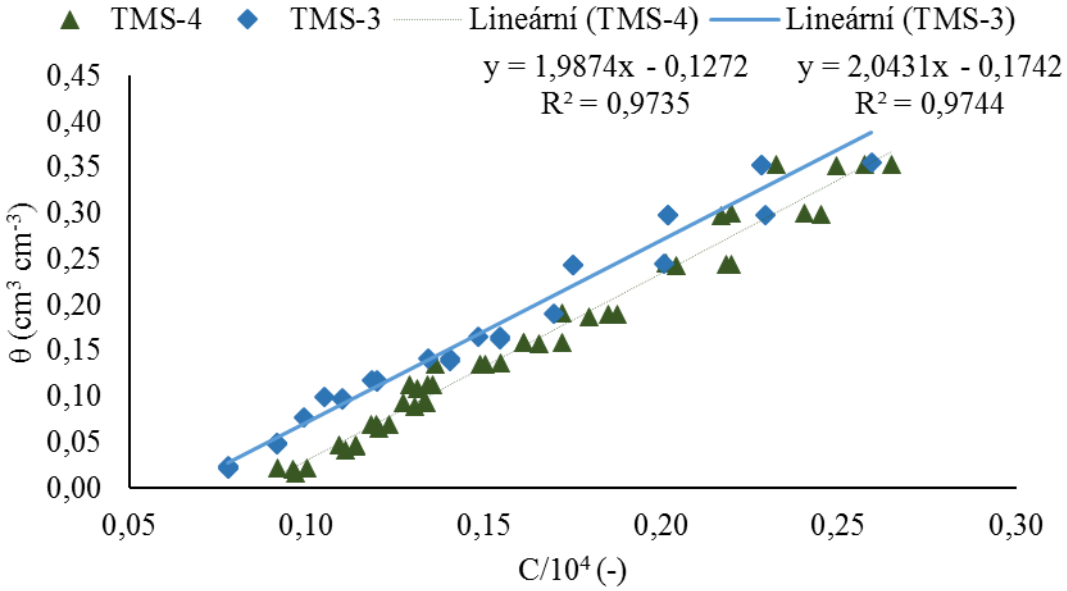
(a) (b)

Obrázek 25 Graf (a) závislosti půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření po senzor TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci 0,01 M.

K výpočtu vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p) byly také použity parametry z kalibračních rovnic jednotlivých opakování senzorů TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o vybraných koncentracích. Tyto vlhkosti jsou pak použity v grafech závislosti vlhkostí změřených gravimetricky (θ_m) a vlhkostí zjištěných pomocí senzoru (θ_p) a chyby měření, při aplikaci jednotlivých roztoků KBr o koncentracích Br 0,1 M, 0,05 M a 0,01 M, umístěných v příloze 10.3.

5.3.2.3 Porovnání kalibrace TMS-3 a TMS-4 za použití destilované vody

Výsledné hodnoty z provedené kalibrace senzorů TMS-3 při ovlhčování destilovanou vodou a výsledné hodnoty z provedené kalibrace senzorů TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou byly porovnány na obrázku 26. Z grafu je patrné, že pro stejnou objemovou vlhkost (θ_m) jsou hodnoty odezvy ($C/10^4$) senzoru TMS-3 nižší než hodnoty odezvy ($C/10^4$) senzoru TMS-4.

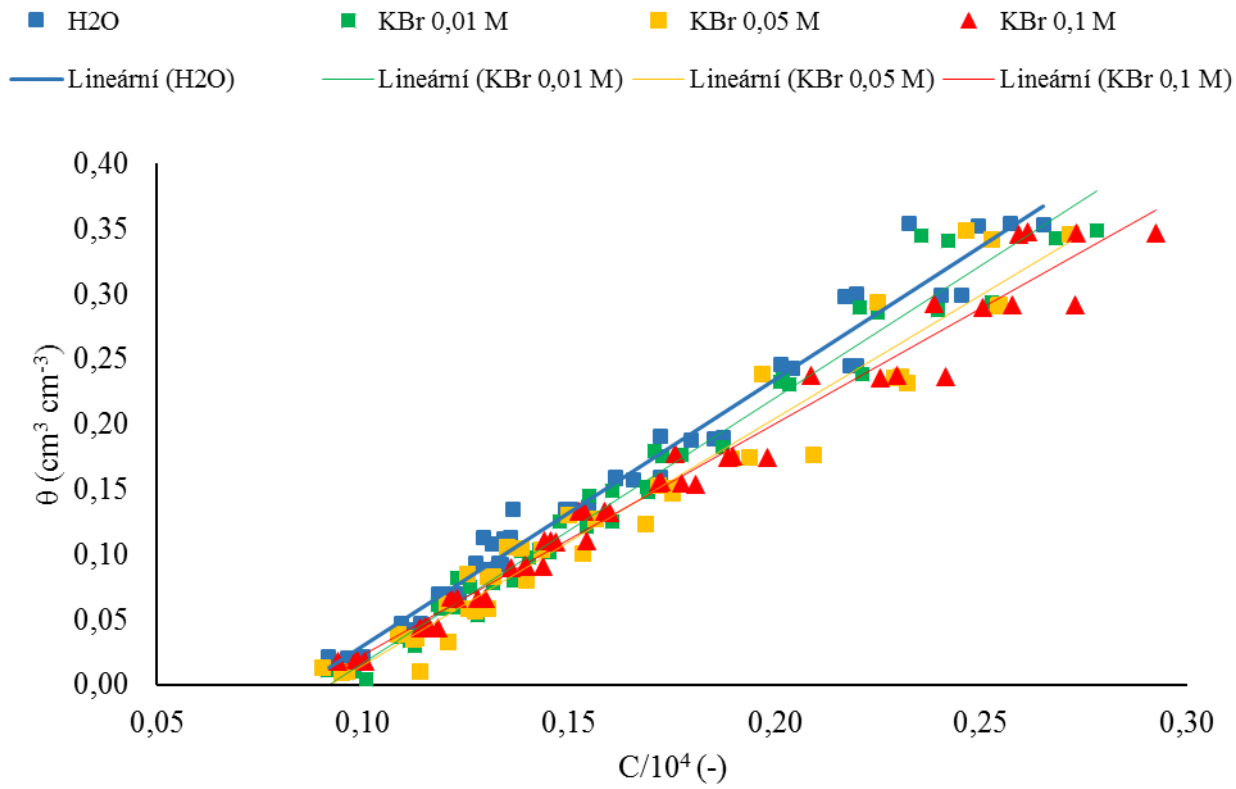


Obrázek 26 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí TMS-3 při ovlhčování destilovanou vodou (♦) a závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí senzorů TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou (▲).

5.3.2.4 Porovnání kalibrace TMS-4 za použití destilované vody a roztoku KBr o různých koncentracích

Byl sledován vliv rozpustných solí na prováděnou kalibraci. V grafu na obrázku 27 je zobrazeno porovnání závislosti vlhkosti na senzoru TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou a kalibrace senzoru TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o různých koncentracích Br – koncentrace Br 0,1 M, koncentrace Br 0,05 M a koncentrace 0,01 M. V tomto grafu, z důvodu přehlednosti, nejsou zobrazeny kalibrační rovnice.

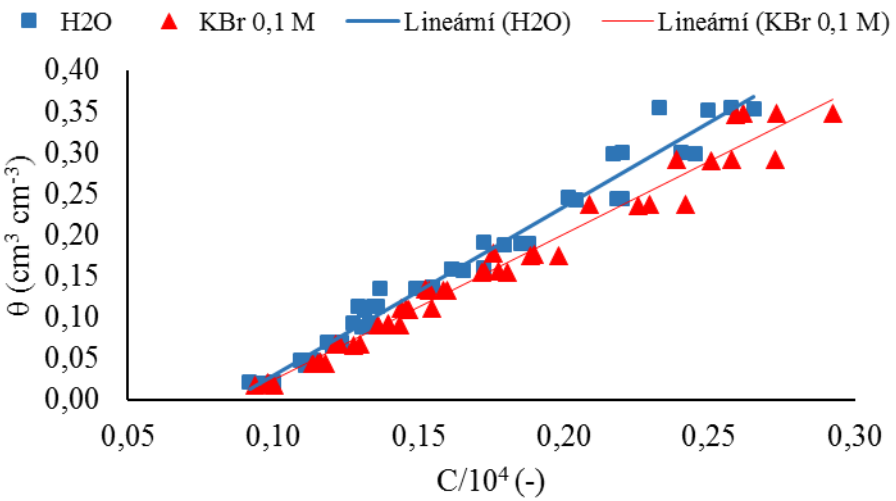
Z grafu je patrné, že při nižších objemových vlhkostech (θ_m) do 0,15 $cm^3\ cm^{-3}$, jsou hodnoty odezvy ($C/10^4$) senzoru TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou i při ovlhčování všemi roztoky KBr podobné. Při vyšší objemové vlhkosti (θ_m) jsou hodnoty odezvy ($C/10^4$) senzoru TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou nižší, než hodnoty odezvy ($C/10^4$) senzoru TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr. Se zvyšující se koncentrací Br v roztoku KBr jsou hodnoty odezvy ($C/10^4$) senzoru TMS-4 pro stejnou objemovou vlhkost (θ_m) vyšší.



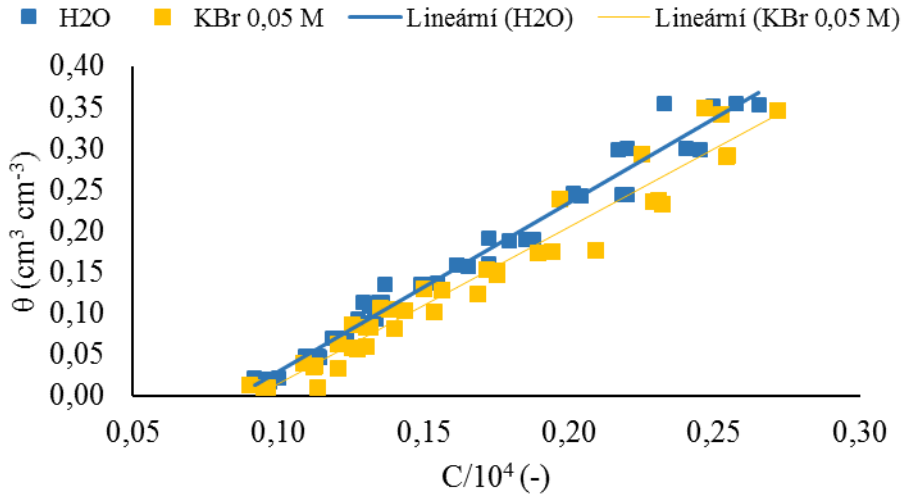
Obrázek 27 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou (■) a závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí senzorů TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o různých koncentracích Br (koncentrace Br 0,01 M ■; koncentrace Br 0,05 M ■; koncentrace Br 0,1 M ▲).

Na obrázku 28 jsou také porovnány výsledky závislosti objemové vlhkosti (θ) a změřených jednotek counts ($C/10^4$) pomocí TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou s jednotlivými variantami měření senzoru TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr – (a) ovlhčování roztokem KBr o koncentraci Br 0,1 M, (b) ovlhčování roztokem KBr o koncentraci Br 0,05 M a (c) ovlhčování roztokem KBr o koncentraci Br 0,01 M. V těchto grafech, z důvodu přehlednosti, nejsou zobrazeny kalibrační rovnice.

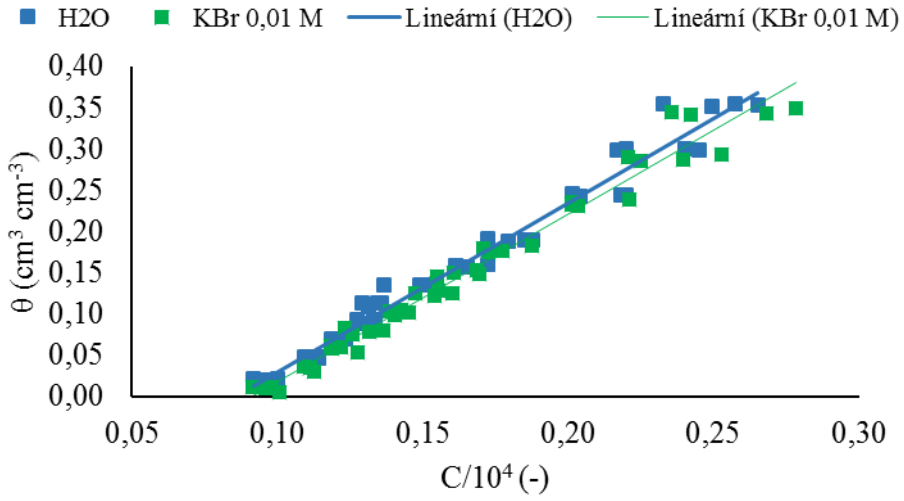
Na těchto grafech je lépe vidět, že při použití roztoku KBr s vyšší koncentrací Br jsou hodnoty odezvy ($C/10^4$) senzoru TMS-4 pro stejnou objemovou vlhkost (θ) vyšší než při použití destilované vody. Ovlhčování roztokem KBr o koncentraci Br 0,01 M již nevykazuje tak výrazně rozdílné hodnoty odezvy ($C/10^4$) pro jednotlivé objemové vlhkosti (θ) ve srovnání s hodnotami odezvy ($C/10^4$) při ovlhčování destilovanou vodou.



(a)



(b)



(c)

Obrázek 28 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou (■) a závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí senzorů TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o různých koncentracích Br – (a) koncentrace Br 0,1 M ▲; (b) koncentrace Br 0,05 M ■; (c) koncentrace Br 0,01 M ■.

Průměrné hodnoty (P) z jednotlivých měření (S1, S2, S3, S4) výsledných parametrů kalibračních rovnic (a, b) a hodnot spolehlivosti (R^2) pro všechny měřené varianty (senzor TMS-3 ovlhčováno vodou – TMS-3 H_2O; senzor TMS-4 ovlhčování vodou – TMS-4 H_2O; senzor TMS-4 ovlhčováno roztokem KBr o koncentraci Br 0,1 M – TMS-4 KBr 0,1 M; senzor TMS-4 ovlhčováno roztokem KBr o koncentraci Br 0,05 M – TMS-4 KBr 0,05 M a senzor TMS-4 ovlhčováno roztokem KBr o koncentraci Br 0,01 M – TMS-4 KBr 0,01 M) jsou zobrazeny v tabulce 9.

V tabulce lze vidět, při použití roztoku KBr o koncentraci Br 0,1 M jsou v rovnici parametry a výrazně nižší a parametry b výrazně vyšší (a = 1,7760; b = -0,1548) než při ovlhčování destilovanou vodou (a = 2,0431; b = -0,1742). Také při použití roztoku KBr o koncentraci Br 0,05 M je patrný rozdíl mezi parametry (a = 1,8976; b = -0,1749) při porovnání s parametry při ovlhčování destilovanou vodou (a = 2,0431; b = -0,1742). Při použití roztoku KBr o koncentraci Br 0,01 M jsou již parametry rovnice velmi podobné (a = 2,0338; b = -0,1858) parametrům při ovlhčování destilovanou vodou (a = 2,0431; b = -0,1742). To znamená, že se zvyšující se salinitou půdy se snižuje hodnota parametru a, a zvyšuje hodnota parametru b kalibračních rovnic.

Tabulka 9 Průměrné hodnoty (P) z jednotlivých měření (S1, S2, S3, S4) výsledných parametrů kalibračních rovnic (a, b) a hodnot spolehlivosti (R^2) pro všechny měřené varianty (senzor TMS-3 ovlhčováno vodou – TMS-3 H_2O, senzor TMS-4 ovlhčování vodou – TMS-4 H_2O, senzor TMS-4 ovlhčováno roztokem KBr o koncentraci Br 0,1M – TMS-4 KBr 0,1M, senzor TMS-4 ovlhčováno roztokem KBr o koncentraci Br 0,05M – TMS-4 KBr 0,05M a senzor TMS-4 ovlhčováno roztokem KBr o koncentraci Br 0,01M – TMS-4 KBr 0,01M).

		a	b	R^2
TMS-3 H_2O	P	1,9874	-0,1272	0,9735
	S1	1,7357	-0,0980	0,9878
	S2	1,7386	-0,1051	0,9912
	S3	2,2131	-0,1548	0,9898
TMS-4 H_2O	P	2,0431	-0,1742	0,9744
	S1	2,1902	-0,1953	0,9942
	S2	2,0559	-0,1815	0,9885
	S3	2,5059	-0,2399	0,9828
	S4	1,8089	0,1371	0,9889
TMS-4 KBr 0,1M	P	1,7760	-0,1548	0,9753
	S1	1,9813	-0,1869	0,9817
	S2	1,6248	-0,1360	0,9887
	S3	2,0326	-0,1893	0,9961
	S4	1,8182	-0,1601	0,9893
TMS-4 KBr 0,05M	P	1,8976	-0,1749	0,9571
	S1	2,1624	-0,2306	0,9571
	S2	1,7806	-0,1518	0,9786
	S3	1,8509	-0,1697	0,9892
	S4	2,1217	-0,1869	0,9929
TMS-4 KBr 0,01M	P	2,0338	-0,1858	0,9750
	S1	2,4114	-0,2380	0,9912
	S2	1,9583	-0,1766	0,9959
	S3	2,2312	-0,2163	0,9922
	S4	1,8025	-0,1529	0,9969

6 Diskuze

6.1 Dielektrické senzory

Na základě literární rešerše bylo zjištěno, že dielektrické senzory pro měření obsahu vody v půdě fungující na principu TDR jsou považovány za nejpřesnější metodu (Dobriyal et al. 2012). Jako cenově dostupná alternativa mohou sloužit další dielektrické senzory, fungující na jiných principech, například kapacitní senzory nebo TDT senzory.

Tyto nízkonákladové senzory jsou většinou dodávány s kalibrační rovnicí a křivkou od výrobce, která udává rozsah měření a citlivost přístroje, a kterou lze použít při vyhodnocení výsledků měření obsahu vody v půdě. Některé studie uvádějí, že při použití kalibračních rovnic od výrobce neposkytovaly nízkonákladové senzory dostatečně přesné výsledky. Pokud byla provedena specifická kalibrace pro půdu, přesnost měření senzorů se zlepšila a senzory poskytovaly dostatečně přesné výsledky měření obsahu vody v půdě (např. Kodešová et al. 2011; Vable & Chávez 2011; Visconti et al. 2014).

Nízkonákladový TDT senzor SDI-12 od firmy Acclima měří obsah vody v půdě, teplotu a elektrickou vodivost půdy (Acclima Ltd. 2018). Varble & Chávez (2011) ve své práci uvádějí, že TDT senzor SDI-12 neposkytoval výsledky s přesností udanou výrobcem při použití tovární kalibrace poskytované výrobcem. V případě měření v půdě s větší elektrickou vodivostí (0,9 – 5,9 dS m^{-1}) vykazuje tento senzor vyšší chybovost. V této studii byla provedena kalibrace specifická pro jednotlivé půdy, a při použití těchto kalibračních rovnic se chyby měření velmi zmenšily oproti použití kalibračních údajů od výrobce (Varble & Chávez, 2011). Varble & Chávez (2011) dále uvádí, že na měření tohoto senzoru nemá vliv teplota.

Visconti et al. (2014) ve své práci hodnotí kapacitní senzory ECH_2O 5TE a ECH_2O 10HS a uvádí, že pro dostatečně přesné výsledky měření vyžadují oba senzory vlastní kalibraci pro jednotlivé půdy. Také potvrdil lepší výkon u senzoru 5TE. Senzor 10HS nadhodnocoval výsledky měření i přes provedenou kalibraci (Visconti et al. 2014). Specifickou kalibraci senzoru 5TE pro jednotlivé půdy doporučuje i studie Varble & Chávez (2011). Také uvádí, že tento senzor byl ovlivněn kolísáním teploty. Při porovnání s výsledky TDT senzoru SDI-12 byl senzor 5TE více citlivý na zvýšenou salinitu půdy (Varble & Chávez 2011).

Kodešová et al. (2011) ve své studii provádí kalibraci senzoru SM200 od firmy Delta-T. Výsledky této kalibrace ukazují, že získané lineární rovnice, které určují vztah mezi dielektrickou konstantou a vlhkostí půdy, mají parametry a vždy u všech půd nižší a parametry b vždy u všech půd vyšší než parametry lineárních rovnic pro tyto půdy dodané výrobcem. Výrobce také deklaroval omezený vliv salinity na měření, v případě aplikace roztoku KBr o koncentraci Br 0,1 M byly výsledky značně ovlivněny. Ovlivnění měření salinitou je však u senzoru SM200 výrazně nižší ve srovnání s ovlivněním salinitou měření senzoru ECH_2O EC-5 (Kodešová et al. 2011).

6.2 Kalibrace senzorů TMS-3 a TMS-4

V praktické části práce byla provedena kalibrace dvou senzorů pro měření půdní vlhkosti, senzoru TMS-3 a novějšího senzoru TMS-4. Tyto senzory fungují na principu dielektrické metody, jedná se o metodu TDT. Byl také sledován vliv rozpustných solí na fungování senzoru TMS-4. Kalibrace proběhla na vybraném půdním vzorku odebraném na demonstrační a pokusné stanici Praha-Trója.

V příloze 10.1, 10.2 a 10.3 jsou umístěny grafy jednotlivých opakování měření pro všechny uskutečněné varianty kalibrace a v tabulce 9 jsou umístěny parametry kalibračních rovnic těchto opakování (S1, S2, S3 a S4). Z těchto grafů a tabulky 9 je patrné, že naměřená data pro stejný půdní vzorek a variantu jsou podobná a jejich průměrná kalibrační rovnice může být použita pro všechny senzory při použití ve vybrané půdě (fluvizem modální).

Byla porovnána kalibrace senzoru TMS-3 a senzoru TMS-4 při ovlhčování půdy destilovanou vodou. Z grafu na obrázku 26 je patrné, že při stejné objemové vlhkosti (θ) jsou výsledné hodnoty ($C/10^4$) senzoru TMS-3 nižší než výsledné hodnoty ($C/10^4$) senzoru TMS-4. Senzor TMS-3 tedy podhodnocuje měření půdní vlhkosti.

Parametry kalibračních rovnic těchto dvou senzorů se liší. Senzor TMS-3 při ovlhčování destilovanou vodou má parametr a nižší (a = 1,9874) a parametr b vyšší (b = -0,1272) než kalibrační rovnice senzoru TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou (a = 2,0431; b = -0,1742). Postup kalibrace a vyhodnocené kalibrační rovnice jsou v souladu s metodikou Kodešové et al. (2015), kde byly provedeny kalibrace pro vzorky z různých půdních typů a o různém zrnitostním složení.

Podhodnocení výsledků senzorem TMS-3 může být způsobeno stářím senzorů. Tyto senzory byly již aktivně využívány katedrou pedologie a ochrany půd jak pro měření v terénu, tak i v laboratoři v minulých letech.

Při objemové vlhkosti půdy (θ) do 15 % se chyba senzoru TMS-3 (obrázek 17b) a chyba senzoru TMS-4 (obrázek 19b) pohybuje do 0,02 cm^3 cm^{-3}. Výsledky měření při těchto vlhkostech jsou velmi přesné. Při vyšších vlhkostech, obzvlášť při objemové vlhkosti (θ) vyšší než 20 % dosahuje chyba měření až hodnot 0,04 cm^3 cm^{-3}. To je patrné na grafu na obrázku 17a a na grafu na obrázku 19a, kde je znázorněna závislost půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p).

V příloze 10.1 je umístěn graf chyby měření senzoru TMS-3 při ovlhčování destilovanou vodou, kdy k výpočtu půdní vlhkosti zjištěné pomocí senzorů (θ_p) byly použity parametry z kalibračních rovnic jednotlivých opakování senzorů TMS-3, jejichž grafy jsou umístěny také v příloze 10.1 a hodnoty těchto parametrů jsou v tabulce 9 (S1, S2 a S3). V tomto grafu chyb vycházejí chyby vyšší (až 0,07 cm^3 cm^{-3}). Jako referenční hodnoty této kalibrace jsou brány průměrné hodnoty parametrů kalibračních rovnic (P) v tabulce 9.

V příloze 10.2 je umístěn graf chyby měření senzoru TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou, kdy k výpočtu půdní vlhkosti zjištěné pomocí senzorů (θ_p) byly použity parametry z kalibračních rovnic jednotlivých opakování senzorů TMS-4 jejichž grafy jsou umístěny také v příloze 10.2 a hodnoty těchto parametrů jsou v tabulce 9 (S1, S2, S3 a S4). V tomto grafu chyb vycházejí chyby ještě vyšší (až 0,06 cm^3 cm^{-3}). Jako referenční hodnoty této kalibrace jsou brány průměrné hodnoty parametrů kalibračních rovnic (P) v tabulce 9.

6.3 Vliv rozpustných solí na měření senzoru TMS-4

Při kalibraci senzoru TMS-4 byl sledován vliv rozpustných solí na provedenou kalibraci. Zasolení půdy bylo simulováno pomocí ovlhčování roztokem KBr o různých koncentracích Br. Jednalo se o koncentrace Br 0,1 M, 0,05 M a 0,01 M. Stejné koncentrace roztoku KBr pro simulaci zasolení půdy byly použity také v Kodešová et al. (2011) při kalibraci senzorů ECH_2O EC-5 a SM200.

Při objemové vlhkosti půdy (θ) do 15 % nejsou rozdíly mezi výslednými hodnotami ($C/10^4$) při ovlhčování destilovanou vodou a při ovlhčování roztoky KBr o různých koncentracích Br tak výrazné, jako při vlhkostech vyšších. Při objemové vlhkosti půdy (θ) nad 20 % jsou již výsledné hodnoty ($C/10^4$) výrazně vyšší při ovlhčování roztoky KBr o různých koncentracích Br než při ovlhčování destilovanou vodou. Výsledné hodnoty ($C/10^4$) senzoru TMS-4 se také při stejné objemové vlhkosti půdy zvyšují se zvyšující se koncentrací roztoku KBr (obrázek 27).

Se zvyšující se koncentrací Br v roztoku KBr, který byl použit pro ovlhčování vzorku půdy při kalibraci, se zvětšuje rozdíl mezi výslednými hodnotami ($C/10^4$) v porovnání s výslednými hodnotami ($C/10^4$) při použití destilované vody. Ve variantě, kdy byla půda ovlhčována roztokem KBr o nejvyšší koncentraci Br 0,1 M (obrázek 28a) je rozdíl nejvíce patrný. Varianta ovlhčována roztokem KBr o koncentraci Br 0,01 M (obrázek 28c) již nevykazuje takový rozdíl mezi hodnotami ($C/10^4$) této varianty a varianty s ovlhčováním destilovanou vodou.

Také výsledné parametry kalibračních rovnic (tabulka 9) se mění v závislosti na salinitě půdy. Parametr a je výrazně nižší (Br 0,1 M: a = 1,7760; Br 0,05 M: a = 1,8976) a parametr b je poměrně vyšší (Br 0,1 M: b = -0,1548; Br 0,05 M: b = -0,1749) u variant s aplikací roztoku KBr o koncentraci Br 0,05 M a 0,1 M při srovnání s variantou, která byla ovlhčována destilovanou vodou (a = 2,0431; b = -0,1742). Při aplikaci roztoku KBr o koncentraci Br 0,01 M nemá salinita na parametry rovnic téměř žádný vliv (a = 2,0338; b = -0,1858). Tyto výsledky jsou v souladu s výsledky publikovanými v práci Kodešová et al. (2011), kde bylo také ovlivněno měření senzorů roztoky KBr o koncentracích Br 0,1 M a 0,05 M.

V příloze 10.3 jsou umístěny grafy chyby měření senzoru TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o různých koncentracích Br. K výpočtu půdní vlhkosti zjištěné pomocí senzorů (θ_p) byly použity parametry z kalibračních rovnic jednotlivých opakování senzorů TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o různých koncentracích Br, jejichž grafy jsou umístěny také v příloze 10.3 a hodnoty těchto parametrů jsou v tabulce 9 (S1, S2, S3 a S4). V těchto grafech chyb vycházejí chyby vyšší (až 0,07 cm^3 cm^{-3}). Jako referenční hodnoty této kalibrace jsou brány průměrné hodnoty parametrů kalibračních rovnic (P) v tabulce 9.

Při měření obsahu vody v půdě pomocí senzoru TMS-4 je nutno brát v úvahu salinitu půdy, protože rozpustné soli mají vliv na měření tohoto senzoru. Při nižším zasolení je vliv rozpustných solí na měření minimální, pokud je však zasolení půdy vyšší, je nutné provést kalibraci pro půdu s vyšším zasolením.

Výsledné hodnoty kalibračních rovnic senzorů TMS-3 a TMS-4 vyjádřené pro půdu (fluvizem modální) zpracované v rámci této bakalářské práce mohou být použity při vyhodnocování výsledků experimentů katedry pedologie a ochrany půd (např. vliv mulčovacího materiálu na půdní vlastnosti, hydraulické vlastnosti a vlhkost půdy).

7 Závěr

Úkolem této práce bylo popsat vybrané metody měření obsahu vody v půdě a vlastnosti půdy, které mohou ovlivnit tato měření. K jednotlivým metodám měření byly přiřazeny konkrétní senzory měření obsahu vody v půdě. Byly popsány vlastnosti půdy, které mohou ovlivnit měření vlhkosti půdy. Jedná se především o elektrickou vodivost půdy (salinitu).

Dále byla provedena kalibrace vybraných dielektrických senzorů TMS-3 a TMS-4 na půdním vzorku odebraném na demonstrační a pokusné stanici České zemědělské univerzity v Praze-Tróji. Byl také sledován vliv rozpustných solí na měření senzoru TMS-4.

Bylo zjištěno, že starší senzor TMS-3 podhodnocuje výsledky měření obsahu vody v půdě ve srovnání s měřením senzoru TMS-4. To může být způsobeno stářím senzorů, které jsou aktivně využívány katedrou pedologie a ochrany půd pro terénní i laboratorní účely.

Při měření byl také prokázán vliv zvýšeného obsahu rozpustných solí v půdě na měření senzoru TMS-4. V případě nižšího obsahu rozpustných solí, a zvláště při vlhkosti do 15 %, není vliv rozpustných solí na měření příliš výrazný. Pokud je však salinita půdy vyšší, senzor TMS-4 měří vyšší výsledné hodnoty ($C/10^4$). Měření senzoru TMS-4 je tak ovlivněno salinitou půdy a při použití senzoru TMS-4 je doporučeno sledovat obsah rozpustných solí v půdě.

Chyba měření senzoru TMS-3 i TMS-4 se pohybuje ve všech variantách měření při vlhkosti do 15 % do hodnot 0,02 cm^3 cm^{-3}, se zvyšující se vlhkostí se však chyba měření senzorů ve všech variantách měření zvyšuje.

Výsledky této práce korespondují s výsledky dalších prací (např. Visconti et al. 2014, Kodešová et al. 2011, Varble & Chávez 2011), které potvrzují, že pro nízkonákladové senzory je doporučeno provést kalibraci specifickou pro půdu a také sledovat vliv salinity na měření nízkonákladových senzorů.

Naměřená data jednotlivých senzorů pro stejný půdní vzorek a variantu se téměř shodují. Průměrné kalibrační rovnice a jejich parametry, které vznikly pro vybranou půdu (fluvizem modální), tak mohou být použity pro vyhodnocení měření všech senzorů TMS-3 a TMS-4 v dané půdě. Mohou být také použity při vyhodnocování výsledků experimentů katedry pedologie a ochrany půd (např. vliv mulčovacího materiálu na půdní vlastnosti, hydraulické vlastnosti a vlhkost půdy). V případě vytvoření kalibračních rovnic senzoru TMS-4 pro další půdy by bylo možné jejich efektivnější využití pro měření obsahu vody v půdě v rámci práce katedry pedologie a ochrany půd.

8 Literatura

- Acclima Ltd. 2018. User manual SDI-12 Moisture Sensor. Acclima Ltd. Meridian, Idaho, USA.
- Ali MH. 2010. Fundamentals of Irrigation and On-farm Water Management. Springer, New York.
- Amet. 2019. Návod – VIRRIB – snímač půdní vlhkosti. Amet, Praha.
- Blonquist JM, Jones SB, Robinson DA. 2005a. A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. Journal of Hydrology. **314**:235-245.
- Blonquist JM, Jones SB, Robinson DA. 2005b. Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors: Part 2. Evaluation of seven sensing systems. Vadose Zone Journal. **4**:1059-1069.
- Bogena HR, Huisman JA, Oberdörster C, Vereecken H. 2007. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. Journal of Hydrology, **344**:32-42.
- Burk L, Dalgliesh N. 2008. Estimating Plant Available Water Capacity – a Methodology. CSIRO Sustainable Ecosystems, Canberra.
- Daniels DJ. 2004. Ground Penetrating Radar. The Institution of Electrical Engineers, London, Great Britain.
- Delta-T Devices Ltd. 2006. User manual for the SM200 Soil Moisture Sensor SM200-UM-1.1. Delta-T Devices Ltd. Cambridge, Great Britain.
- Dingman SL. 1994. Physical Hydrology. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- Dobriyal P, Qureshi A, Badola R, Hussain SA. 2012. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. Journal of Hydrology, **458-459**:110-117.
- Doolittle JA, Collins ME. 1995. Use of soil information to determine application of ground-penetrating radar. Journal of Applied Geophysics **33**:101-108.
- Ekotechnika s.r.o. 2019. Přístroje pro diagnostiku životního prostředí. Ekotechnika s.r.o. Available from http://www.ekotechnika.cz/ (accessed March 2019).
- Evett SR, Parkin GW. 2005. Advances in Soil Water Content Sensing: The Continuing Maturation of Technology and Theory. Vadose Zone Journal **4**:986-991.
- Flint AL, Flint LE. 2002. Particle density. Pages 229-240 in Dane JH, Topp GC, editors. Methods of Soil Analysis. Part 4 – Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc., Madison.
- Gee GW, Or D. 2002. Particle-size analysis. Pages 255-294 in Dane JH, Topp GC, editors. Methods of Soil Analysis. Part 4 – Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc., Madison.
- Haase T. 2014. Autonomní modulární stanice pro měření půdní vlhkosti a teploty. Úřad průmyslového vlastnictví ČR, Česká republika. CZ 304369 B6.
- Hasted JB. 1973. Aqueous Dielectrics. John Wiley & Sons, New York.
- Huisman JA, Sperl C, Bouten W, Verstraten JM. 2001. Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. Journal of Hydrology **245**:48-58.

- Chanasyk DS, Naeth MA. 1996. Field measurement of soil moisture using neutron probe. Canadian Journal of Soil Science, **76**:317-323.
- ISO 10390:2005. 2005. Determination of pH. International Organization of Standardization, Standard of Soil quality, Geneve.
- ISO 11474:2006. 2006. Pretreatment of samples for physico-chemical analysis. International Organization of Standardization, Standard of Soil quality, Geneve.
- Keys WS. 1989. Borehole Geopysics Applied to Ground-water Investigations. National Water Well Association, Worthington, Ohio.
- Kodešová R, Jakšík O, Klement A, Fér M, Nikodem A, Brodský L. 2015. Metodika lokálního monitoringu půdních vlhkostí na zemědělských pozemcích ohrožených suchem. České zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra pedologie a ochrany půd, Praha.
- Kodešová R, Kodeš V, Mráz A. 2011. Comparison of Two Sensors ECH_2O EC-5 and SM200 for Measuring Soil Water Content. Soil & Water Resources **6**:102-110.
- Merlin O, Walker JP, Panciera R, Young R, Kalma JD, Kim EJ. 2007. Soil moisture measurement in heterogeneous terrain. Pages 2604-2610 in Oxley S, Kulasiri D, editors. MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.
- METER Group, Inc. 2018. Manual 10HS. METER Group, Inc. Pullman, WA, USA.
- METER Group, Inc. 2019. Manual 5TE. METER Group, Inc. Pullman, WA, USA.
- Mittelbach H, Lehner I, Seneviratne SI. 2012. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. Journal of Hydrology **430-431**:39-49.
- Muños-Carpena R. 2018. Field devices for monitoring soil water content. Agricultural and Biological Engineering Department, IFAS Extension University of Florida. Available from https://edis.ifas.ufl.edu/ae266 (accessed February 2019).
- Němeček J, Muhlhanselová M, Macků J, Vokoun J, Vavříček D, Novák P. 2011. Toxinomický klasifikační systém půd České republiky. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Rhoades JD, Chanduvi F, Lesch S. 1999. Soil Salinity Assessment: Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements. FAO Irrigation and Drainage Paper 57, Rome, Italy.
- Rhoades JD. 1996. Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. Pages 417-435 in Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT, Sumner ME, editors. Methods of Soil Analysis. Part 3 – Chemical Methods. Soil Science Society of America, Inc., Madison.
- Rodriguez-Iturbe I. 2000. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. Water Resource Research **36**:3-9.
- Rosenbaum U, Huisman JA, Vrba J, Vereecken H, Bogena HR. 2011. Correction of temperature and electrical conductivity effects on dielectric permittivity measurements with ECH(2)O sensors. Vadose Zone Journal **10**:582-593.
- Rowlandson TL, Berg AA, Bullock PR, Hanis-Gervais K, Ojo ER, Cosh MH, Powers J, McNairn H. 2018. Temporal transferability of soil moisture calibration equations. Journal of Hydrology **556**:349-358.

- Seneviratne SI, Corti T, Davin E, Hirschi M, Jaeger EB, Lehner I, Orlowsky B, Teuling AJ. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate. Earth-Science Reviews. **99**:125-161.
- Seyfried MS, Murdock MD. 2004. Measurement of soil water content with a 50-MHz soil dielectric sensor. Soil Science Society of America Journal **68**:394-403.
- Schmuggle T, Jackson TJ, McKim HL. 1980. Survey of methods for soil moisture determination. Water Resources Research, **16**:961-979.
- Skjemstad JO, Baldock JA. 2008. Total and organic carbon. Pages 225-237 in: Carter MR, Gregorich EG, editors. Soil Sampling and Method of Analysis. Canadian Society of Soil Science, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Soilmoisture Equipment Corp. 2011. Resource instructions 2710ARL Tensiometer and 2725ARL Jet Fill Tensiometer 0898-2710/2725. Soilmoisture Equipment Corp. Santa Barbara, CA, USA.
- Tarantino A, Ridley AM, Toll DG. 2008. Field measurement of suction, water content, and water permeability. Geotechnical and Geological Engineering, **26**:751-782.
- TOMST s.r.o. 2019a. Měřící systém TMS. TOMST. Available from https://tomst.com/web/cz/systemy/tms/ (accessed February 2019).
- TOMST s.r.o. 2019b. TOMST Measurement Systém TMS – manuál. TOMST. Available from http://tomst.com/Download/TMS_navod.pdf (accessed February 2019).
- Topp GC, Davis JL, Annan AP. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research **16**:574-582.
- Topp GC, Zegelin S, White I. 2000. Impacts of the real and imaginary components of relative permittivity on Time Domain Reflectometry measurements in soil. Soil Science Society of America Journal, **64**:1244-1253.
- Van Walt Ltd. 2011. Manual for TRIME®-PICO 64/32. Van Walt Ltd. Haslemere, Great Britain. Available from https://www.vanwalt.com/pdf/information-sheets/Trime-PICO-64-32-Operating-Manual.pdf (accessed March 2019).
- Varble JL, Chávez JL. 2011. Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. Agricultural Water Management **101**:93-106.
- Visconti F, De Paz JM, Martínez D, Molina MJ. 2014. Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils. Agricultural Water Management **132**:111-119.
- Wallhan EF. 1939. Use of tensiometers for soil moisture measurements in ecological research. Ecology **20**:403-412.
- Wang L, Qu JJ. 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: a review. Front Earth Science China **3**:237-247.
- Werner H. 2002. Measuring Soil Moisture for Irrigation Water Management. Brookings, South Dakota State University. Available from http://agbiopubs.sdstate.edu /articles/FS876.pdf (accessed March 2019).
- White RE. 1997. Principles and Practice of Soil Science: The Soil as a Natural Resource. Blackwell Sci., Oxford, UK

- Wild J, Kopecký M, Macek M, Šanda M, Jankovec J, Haase T. 2019. Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. Agricultural and Forest Meteorology **268**:40-47
- Wraith JM, Or D. 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: experimental evidence and hypothesis development. Water Resources Rearch **35**:361-369.
- Zazueta FS, Xin J. 1994. Soil Moisture Sensors. Florida Cooperative Extension Science, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Florida.
- Zbíral J. 2002. Analýza půd I – Jednotné pracovní postupy. ÚKZÚZ, Brno.

9 Seznam obrázků

Obrázek 1 Senzor TRIME PICO 64 (www.imko.de). 7
Obrázek 2 Senzor SDI-12 (www.acclima.com)....7
Obrázek 3 (a) Senzor ECH$_2$O 10HS (www.metergroup.com)**,** (b) Senzor ECH$_2$O 5TE (www.ekotechnika.cz). 8
Obrázek 4 Senzor SM200 (www.delta-t.co.uk). 8
Obrázek 5 Senzor Virrib (www.fiedler.cz). 9
Obrázek 6 (a) Sádrové bloky Soilmoisture 5201F1, (b) Čtecí jednotka Soilmoisture 5910F1 (www.ekotechnika.cz). 10
Obrázek 7 Watermark 200SS-5 (irrometer.com). 10
Obrázek 8 Model 4300 Soil Moisture Gauge (www.troxlerlabs.com). 11
Obrázek 9 Přístroj UtilityScan využívající metodu GPR (www.geophysical.com). 12
Obrázek 10 Tenzometr 2710ARL (www.soilmoisture.com). 13
Obrázek 11 (a) Senzor TMS-3, (b) Senzor TMS-4. 14
Obrázek 12 Experimentální plochy zájmového území osázené senzory TMS-3 (autor Ing. Miroslav Fér, Ph.D.). 16
Obrázek 13 Mapa zájmového území (geoportal.gov.cz). 17
Obrázek 14 Průběh kalibrace senzoru TMS-4 (vlastní fotodokumentace). 21
Obrázek 15 Kalibrace senzoru TMS-4, válec zakrytý igelitovým pytlíkem po dobu distribuce vody (vlastní fotodokumentace). 22
Obrázek 16 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts (C/10^4) pomocí TMS-3 při ovlhčování destilovanou vodou. 26
Obrázek 17 Graf (a) závislosti půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření pro senzor TMS-3 při ovlhčování destilovanou vodou. 26
Obrázek 18 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts (C/10^4) pomocí TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou. 27
Obrázek 19 Graf (a) závislosti půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření po senzor TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou. 28
Obrázek 20 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts (C/10^4) pomocí TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci 0,1 M. 29
Obrázek 21 Graf (a) závislosti půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření po senzor TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci 0,1 M. 29
Obrázek 22 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts (C/10^4) pomocí TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci 0,05 M. 30
Obrázek 23 Graf (a) závislosti půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření po senzor TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci 0,05 M. 31
Obrázek 24 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts (C/10^4) pomocí TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci 0,01 M. 32

Obrázek 25 Graf (a) závislosti půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření po senzor TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci 0,01 M. 32

Obrázek 26 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí TMS-3 při ovlhčování destilovanou vodou (♦) a závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí senzorů TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou (▲). 33

Obrázek 27 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou (■) a závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí senzorů TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o různých koncentracích Br (koncentrace Br 0,01 M ■; koncentrace Br 0,05 M ■; koncentrace Br 0,1 M ▲). 34

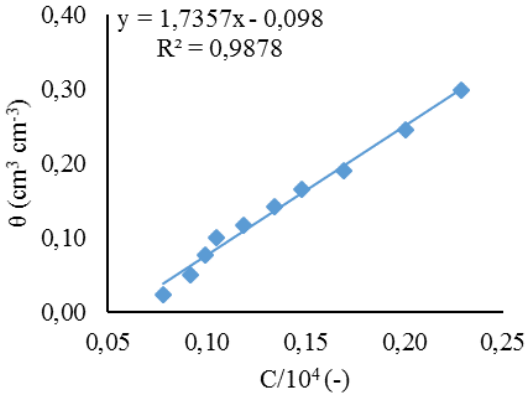
Obrázek 28 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou (■) a závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pomocí senzorů TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o různých koncentracích Br – (a) koncentrace Br 0,1 M ▲; (b) koncentrace Br 0,05 M ■; (c) koncentrace Br 0,01 M ■.....35

10 Seznam tabulek

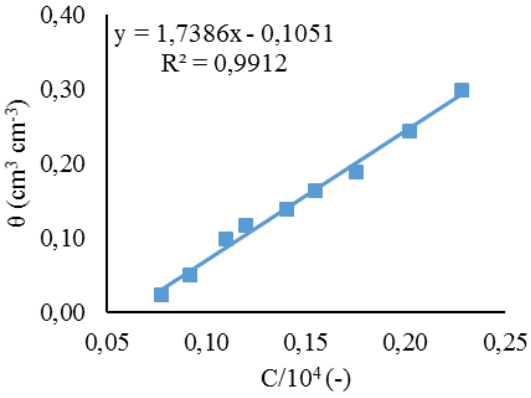
Tabulka 1 Hodnotící stupnice pro pH (H_2O) (Zbíral 2002). 19
Tabulka 2 Hodnotící stupnice pro pH (KCl) (Zbíral 2002). 19
Tabulka 3 Hodnotící tabulka pro stanovení salinity (Zbíral 2002). 20
Tabulka 4 Hodnotící stupnice pro stanovení množství organického uhlíku a humusu (Zbíral 2002). 20
Tabulka 5 Hodnocení zkoušky přítomnosti uhličitanů. 20
Tabulka 6 Stanovené hodnoty základních fyzikálních vlastností a jejich směrodatné odchylky. 24
Tabulka 7 Stanovené hodnoty pro určení zrnitosti. 24
Tabulka 8 Stanovené hodnoty základních chemických vlastností a jejich směrodatné odchylky. 25
Tabulka 9 Průměrné hodnoty (P) z jednotlivých měření (S1, S2, S3, S4) výsledných parametrů kalibračních rovnic (a, b) a hodnot spolehlivosti (R^2) pro všechny měřené varianty (senzor TMS-3 ovlhčováno vodou – TMS-3 H_2O, senzor TMS-4 ovlhčování vodou – TMS-4 H_2O, senzor TMS-4 ovlhčováno roztokem KBr o koncentraci Br 0,1M – TMS-4 KBr 0,1M, senzor TMS-4 ovlhčováno roztokem KBr o koncentraci Br 0,05M – TMS-4 KBr 0,05M a senzor TMS-4 ovlhčováno roztokem KBr o koncentraci Br 0,01M – TMS-4 KBr 0,01M). ...37

11 Doplňkové grafy

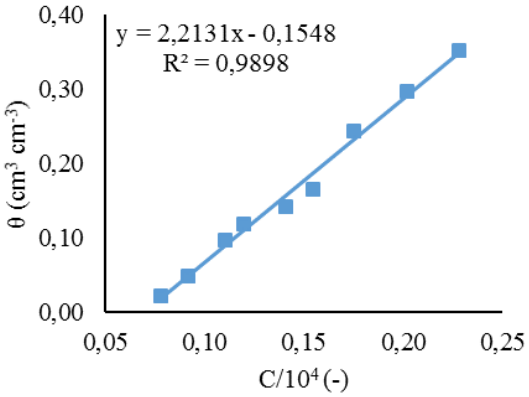
11.1 Senzor TMS-3 H_2O



(a)

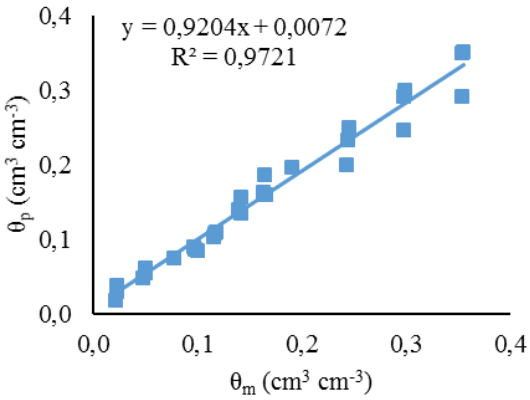


(b)

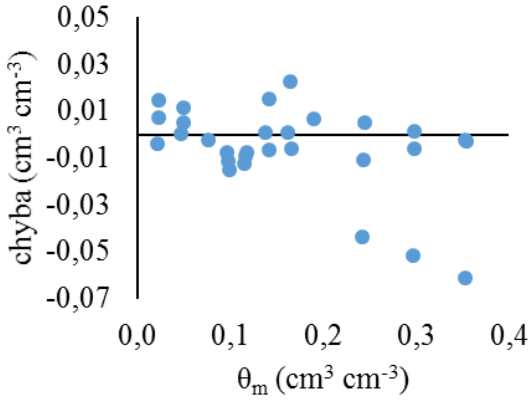


(c)

Obrázek 1 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pro jednotlivé senzory TMS-3 (S1 – (a); S2 – (b); S3 – (c)) při ovlhčování destilovanou vodou



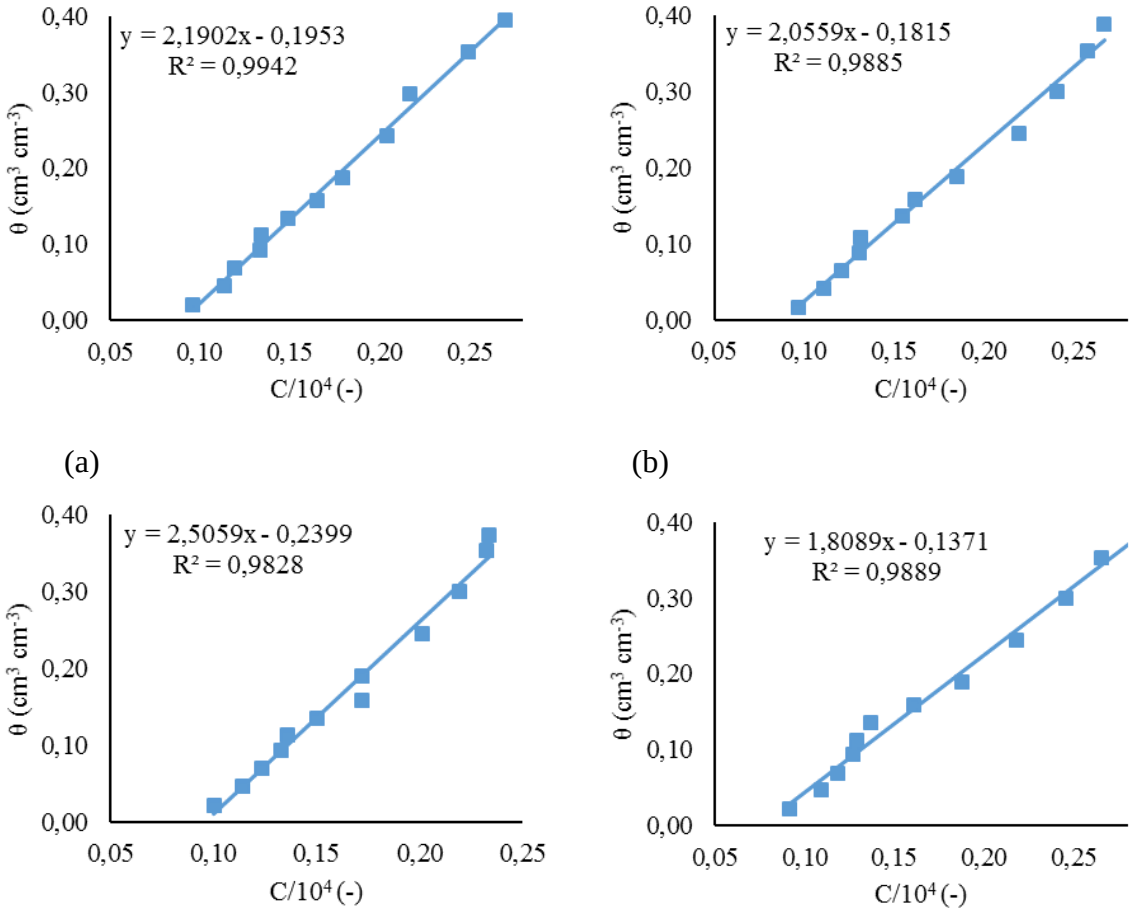
(a)



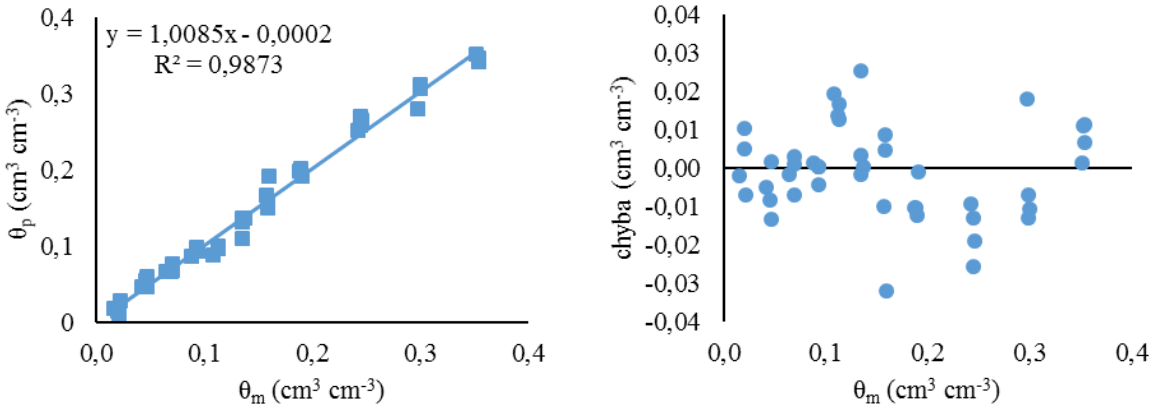
(b)

Obrázek 2 (a) Závislost půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření po senzor TMS-3 při ovlhčování destilovanou vodou

11.2 Senzor TMS-4 H_2O



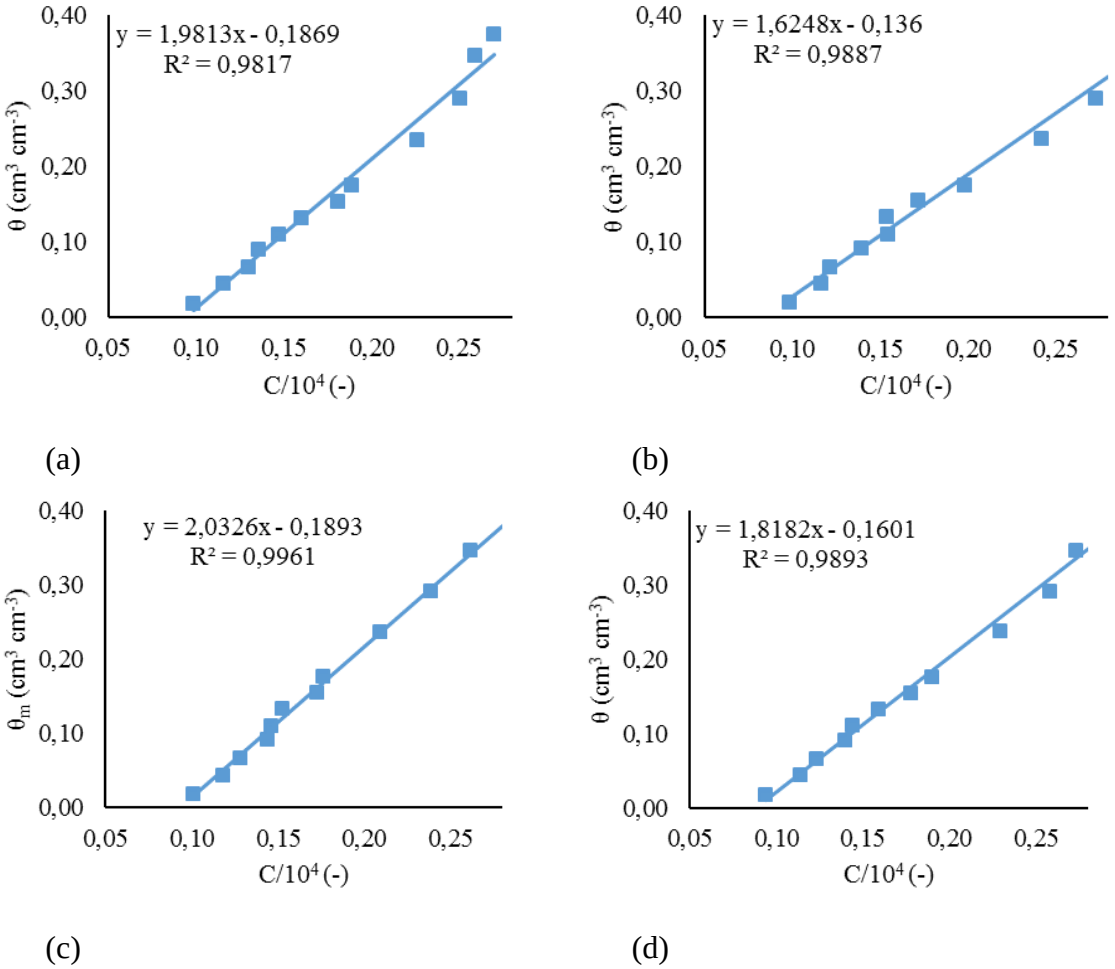
Obrázek 3 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pro jednotlivé senzory TMS-4 (S1 = (a); S2 = (b); S3 = (c); S4 = (d)) při ovlhčování destilovanou vodou



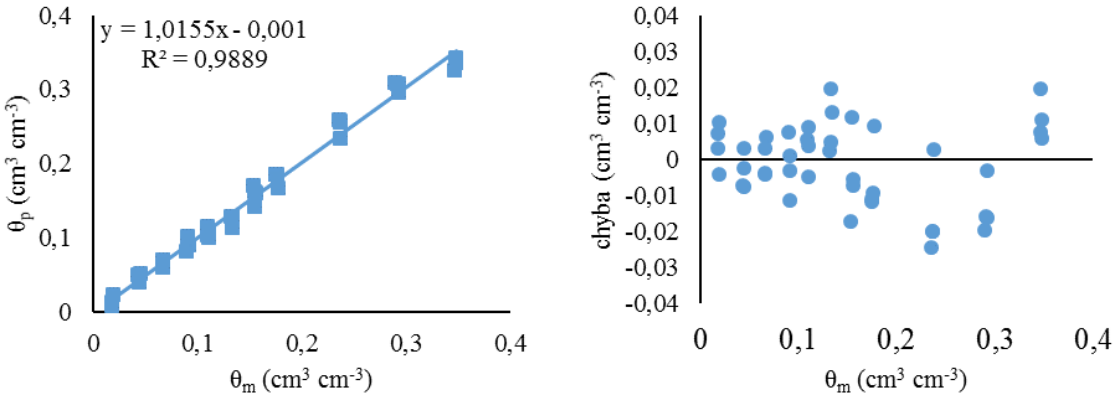
Obrázek 4 (a) Závislost půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření po senzor TMS-4 při ovlhčování destilovanou vodou

11.3 Senzor TMS-4 KBr

KBr 0,1 M

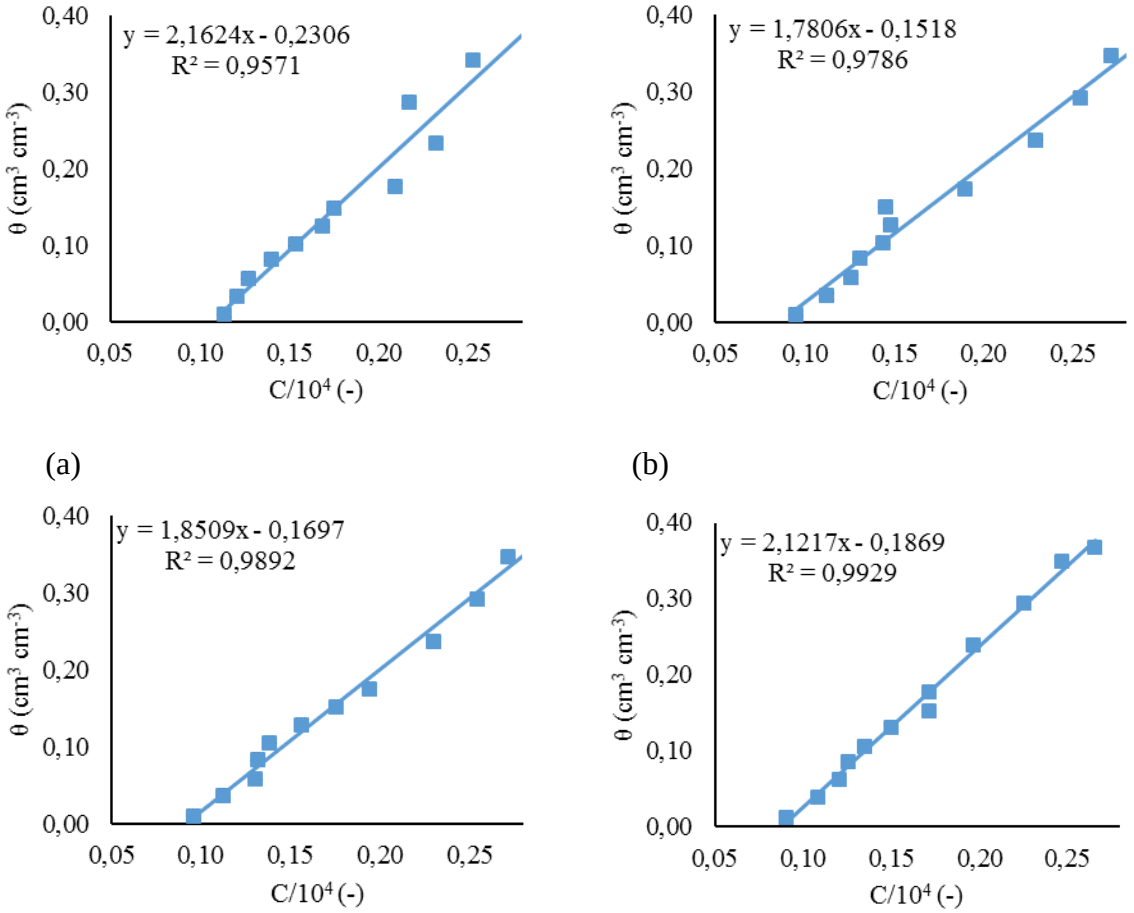


Obrázek 5 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pro jednotlivé senzory TMS-4 (S1 = (a); S2 = (b); S3 = (c); S4 = (d)) při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci Br 0,1 M

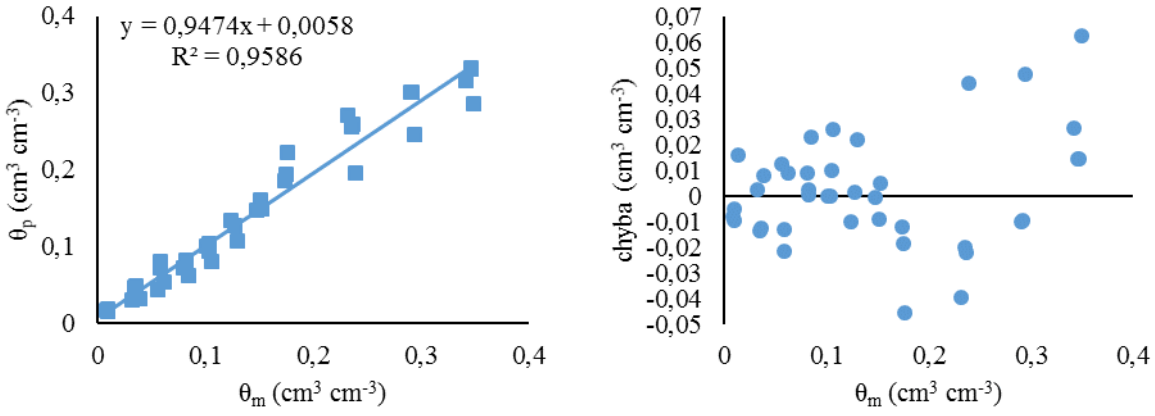


Obrázek 6 (a) Závislost půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření po senzor TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci Br 0,1 M

KBr 0,05 M

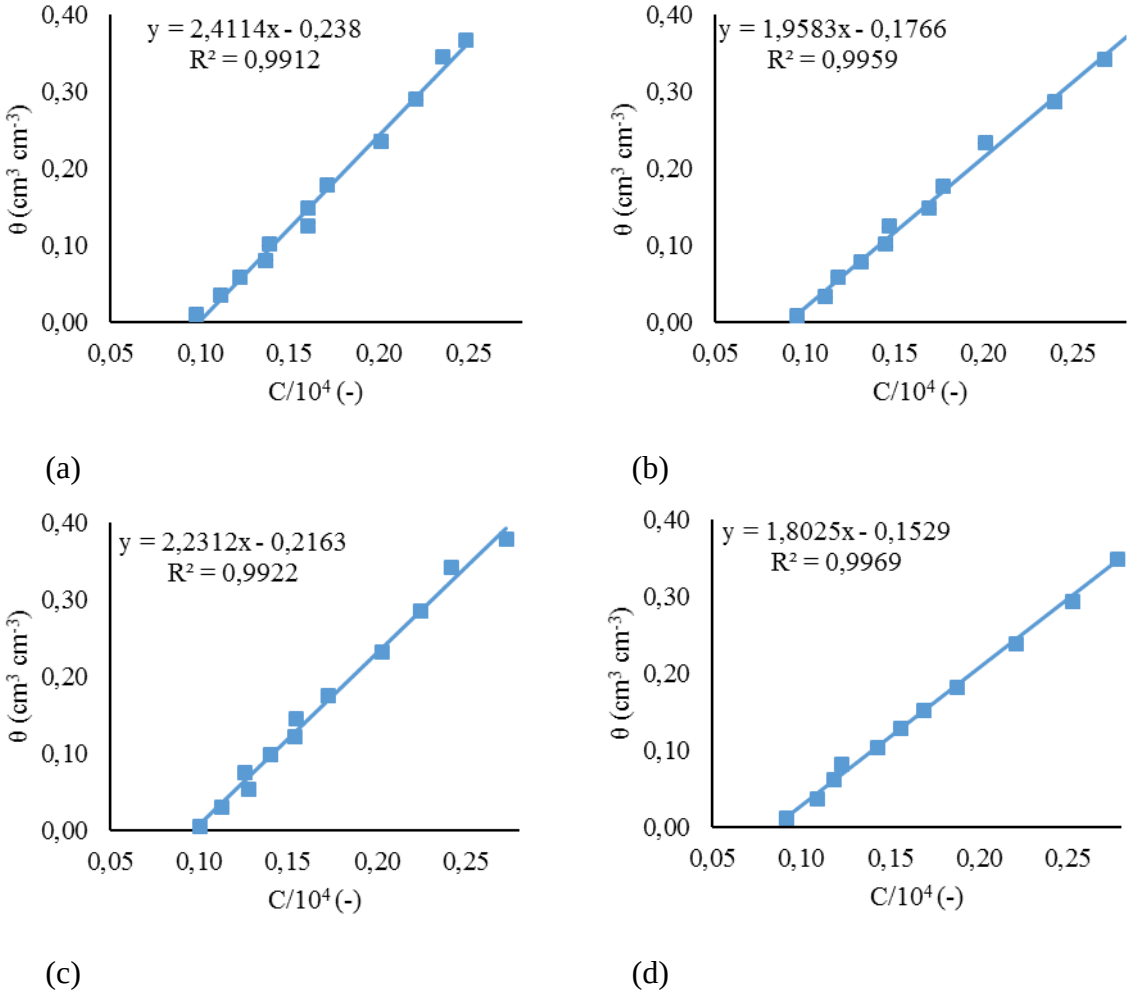


Obrázek 7 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pro jednotlivé senzory TMS-4 (S1 = (a); S2 = (b); S3 = (c); S4 = (d)) při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci Br 0,05 M

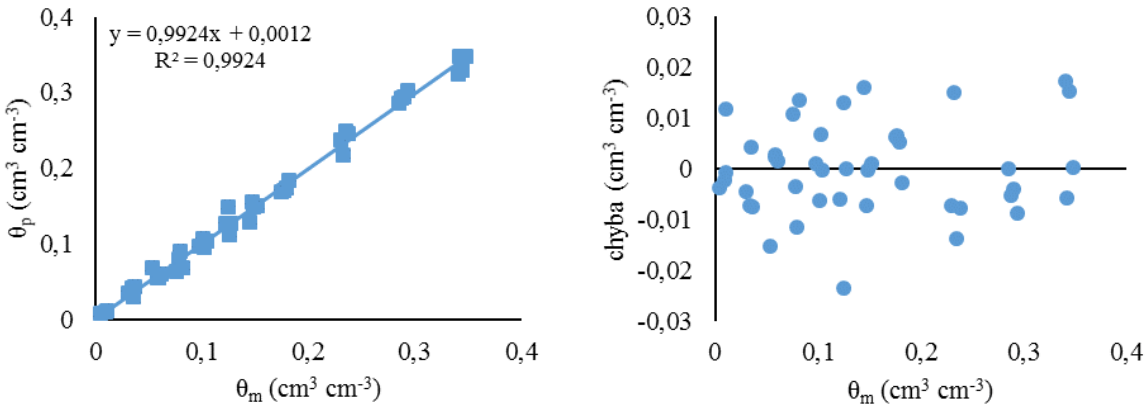


Obrázek 8 (a) Závislost půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření po senzor TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci Br 0,05 M

KBr 0,01 M



Obrázek 9 Závislost objemové vlhkosti (θ) a změřených counts ($C/10^4$) pro jednotlivé senzory TMS-4 4 (S1 = (a); S2 = (b); S3 = (c); S4 = (d)) při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci Br 0,01 M



Obrázek 10 (a) Závislost půdních vlhkostí určených gravimetricky (θ_m) a zjištěných pomocí senzorů (θ_p), (b) chyby měření po senzor TMS-4 při ovlhčování roztokem KBr o koncentraci Br 0,01 M