

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A
ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ
OBOR: VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**ANALÝZA VYBRANÝCH SENZORŮ PRO
MĚŘENÍ VLHKOSTI PORÉZNÍHO MATERIÁLU**

**Vedoucí: Ing. Lukáš Jačka, Ph. D.
Bakalant: Kryštof Bučok**

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Kryštof Bučok

Krajinářství
Vodní hospodářství

Název práce

Analýza vybraných senzorů pro měření vlhkosti porézního materiálu

Název anglicky

Analysis of selected sensors for moisture measurement of porous material

Cíle práce

- 1) Provést základní test vybraných vlhkostních čidel založených na měření relativní permitivity v různých vlhkostních stavech v homogenním porézním materiálu (skleněné kuličky).
- 2) Porovnat průběh signálů u testovaných čidel, konkrétně odchylky od lineární závislosti mezi měřeným signálem a skutečným množstvím obsažené vody ve vzorku (referenční gravimetricky stanovená vlhkost).

Metodika

Zpracovat rešerši metod měření půdní vlhkosti s důrazem na elektrické metody.

Zvolit vhodný homogenní porézní materiál (skleněné kuličky) a změřit základní fyzikální vlastnosti tohoto materiálu (pyknometricky stanovit hustotu pevných částic, určit objemovou hmotnost a pórovitost). Provést test vybraných vlhkostních senzorů při různých vlhkostech porézního materiálu. Referenční vlhkost porézního materiálu stanovit gravimetricky. Vyhodnotit vztah měřeného signálu (odvozeného z relativní permitivity) a referenční vlhkosti. Porovnat funkční vztahy mezi výstupním signálem a referenční vlhkostí mezi jednotlivými senzory a vyhodnotit odchylky od lineárního vztahu.

Doporučený rozsah práce

35

Klíčová slova

skleněné kuličky, měření vlhkosti, elektrické metody, relativní permitivita, testování senzorů

Doporučené zdroje informací

- Dane, J. H., Topp, G. C., & Campbell, G. S., 2002. *Methods of soil analysis: Part 4*. Madison, Wis: Soil Science Society of America.
- Kutílek, M., Nielsen, D.R., 1994. *Soil hydrology*. Catena Verlag, Cremlingen – Destedt, Germany.
- Mittelbach, H., Lehner, I., Seneviratne, S.I., 2012. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. *Journal of Hydrology* 430–431, 39–49.
- Robinson, D.A., Campbell, C.S., Hopmans, J.W., Hornbuckle, B.K., Jones, S.B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J., Wendroth, O., 2008. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review. *Vadose Zone J.* 7, 358–389.
- 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. *Agri. For. Meteorol.* 268, 40–47.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 14. 3. 2022

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2022

Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lukáše Jačky, Ph.D., k vypracování bakalářské práce bylo využito odborné literatury a jiných informačních zdrojů, které jsem citoval v práci a neporušil jsem autorská práva dle zákona č. 121/2000 Sb.

V Praze, dne 29.3.2022

Kryštof Bučok

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Lukáši Jačkovi Ph.D, za jeho trpělivost při vedení mé bakalářské práce, dále za věcné rady při zpracování bakalářské práce. Srdečně bych chtěl také poděkovat své rodině včetně blízkých přátel, za podporu a trpělivost během mého studia.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou deseti různých čidel určených pro měření vlhkosti porézního materiálu elektrickými nepřímými metodami. Pro testování byly vybrány skleněné kuličky o průměru 4 mm. Experimentální část bakalářské práce probíhala v laboratořích České Zemědělské univerzity. Čidla byla testována v pěti vlhkostních stupních (vzduch, suché skleněné kuličky, vlhké (odvodněné) skleněné kuličky, nasycené skleněné kuličky, demineralizovaná voda). K testování čidel bylo využívání skleněných nádob s výpustním zařízením pro plnění a prázdnění demineralizovanou vodou. Čidla se osazovala tak, aby nedocházelo ke kontaktu mezi jednotlivými čidly, či mezi čidlem a stěnou skleněné nádoby. U čidel byla hodnocena linearita vztahu měřeného signálu a vlhkosti s využitím lineární regrese a grafů v MS Excel. Nejlepších výsledků dosáhlo čidlo Trime – EZ fungující na principu TDR (prakticky čistý lineární vztah mezi měřeným signálem a referenční vlhkostí). Toto čidlo ve všech aspektech testování předčilo všechna ostatní čidla. Velmi dobrých výsledků dosáhla čidla BND – MT10 Bonad, SMT100 Treubner, dále čidla 5TM a Teros 12 Meter. Naopak nejhorších výsledků dosáhla čidla SoilWatch 10 (SW10) – PINO-TECH a VH400 – Vegetronic. Tato čidla nebyla schopna odlišit vyšší míru nasycení a vykazovala stejné hodnoty pro nasycené kuličky (vlhkost 37 %) a demineralizovanou vodu (vlhkost 100 %). V práci se prokázal předpoklad, že dražší a modernější čidla budou dosahovat lepších výsledků. Avšak výsledky naznačují, že i kvalitně zpracovaná levnější čidla se mohou kvalitativně blížit přesnější technologii TDR. Pro lepší výsledky je nezbytné provést testování s větším množstvím čidel od stejného výrobce a ve větším množství referenčních vlhkostech.

Klíčová slova:

Testování vlhkostních čidel, lineární regrese, referenční vlhkost, dielektrická konstanta

Abstract

This bachelor thesis deals with the analysis of ten different sensors designed to measure the water content of porous material by indirect electrical methods. Glass beads with 4 mm diameter were selected for testing. The experimental part of the bachelor thesis was carried out in the laboratories of the Czech University of Life Sciences in Prague. The sensors were tested at five moisture levels (air, dry glass beads, wet (frainaged) glass beads, saturated glass beads, demineralized water). The sensors were tested using glass containers with a draining device for filling and emptying of demineralised water. The sensors were installed in such a way that there was no contact between the sensors or between the sensor and the wall of the glass container. The sensors were evaluated for the linearity of the relationship between the measured signal and reference water content - using linear regression and MS Excel plots. The best results were achieved by the Trime - EZ sensor working on the TDR principle (practically pure linear relationship). This sensor surpassed all other sensors in all aspects of testing. Among the group of sensors working on SDI - 12 interface, the BND - MT10 Bonad sensor achieved the best results. On the other hand, SoilWatch 10 (SW10) - PINO-TECH and VH400 - Vegetronic achieved the worst results. These sensors could not distinguish between higher saturation levels and showed the same values for saturated beads (37%) and demineralised water (100%). The work confirmed the assumption that more expensive and modern sensors will perform better, but even well-made cheaper sensors, such as the BND - MT10 sensor, can qualitatively match state-of-the-art TDR technology. For stronger conclusions, it is necessary to perform testing with more sensors from the same manufacturer and also at more than only five moisture levels.

Key words

Moistures sensors testing, linear regression, reference water moisture, dielectric constant

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Cíl práce	3
3.	Literární rešerše.....	4
3.1	Vlhkost půdy	4
3.2	Metody měření vlhkosti.....	5
3.2.1	Přímé metody měření vlhkosti půdy.....	5
3.2.2	Nepřímé metody měření vlhkosti	7
4.	Metodika	13
4.1	Charakteristika zkoumaného materiálu	13
4.1.1	Fyzikální vlastnosti použitého materiálu.....	13
4.2	Skleněné nádoby pro měření	15
4.3	Určení referenčních vlhkostí	16
4.3.1	Gravimetrická metoda	16
4.3.2	Stanovení vlhkosti při nasycení	16
4.4	Osazování senzorů do skleněných nádob a průběh testu.....	18
4.5	Testovaná čidla.....	22
4.5.1	Čidla s rozhraním SDI - 12.....	22
4.5.2	Čidla s analogovým rozhraním.....	23
4.5.3	TMS 4 – Tomst.....	24
4.5.4	Trime – EZ.....	25

4.6	Vyhodnocování dat a porovnání senzorů	25
5.	Výsledky měření jednotlivých čidel.....	26
5.1	Výsledky čidel s analogovým rozhraním	26
5.1.1	Výsledek měření čidla SW10	26
5.1.2	Výsledky měření čidla VH400	27
5.1.3	Výsledky měření čidla SM100	28
5.2	Výsledky čidel s rozhraním SDI - 12	29
5.2.1	Výsledky měření čidla Teros 12.....	29
5.2.2	Výsledky měření čidla SMT100.....	30
5.2.3	Výsledky měření čidla 5TM.....	31
5.2.4	Výsledky měření čidla BND–MT10.....	32
5.2.5	Výsledky měření čidla TBSMP03	33
5.3	Výsledky měření čidel TMS 4.....	34
5.4	Výsledky měření čidla TDR Trime-EZ.....	35
5.5	Porovnání senzorů	36
6.	Diskuse.....	37
7.	Závěr	40
8.	Přehled literatury a použitých zdrojů	42

1. Úvod

Voda je jedním z nejdůležitějších nerostných bohatství naší planety. Je důležitým faktorem pro tvorbu půdního roztoku a její koloběh ovlivňuje ve své vlastní podstatě veškeré dění na Zemi. Nesmíme zapomínat i na to, že byla nedílnou součástí vývoje všech kultur, už od pradávna lidé vyhledávali oblasti blízko vodních toků, kde byly ideální podmínky pro život a zemědělství. V dnešní době, vlivem několika faktorů, např., špatným hospodařením s vodou, neadekvátním obhospodařováním půdy a špatnou skladbou pěstovaných plodin, se stále snižuje schopnost půdy a celé krajiny zadržovat vodu. Z těchto důvodů roste potřeba zkoumat veškeré dostupné zdroje. Největšími zdroji sladké vody jsou ledovce, vodní toky, podzemní voda v horninách, nesmíme ale zapomínat ani na vodu obsaženou v půdě, tato voda sice netvoří tak velké zastoupení v globálním měřítku, ale na jejím obsahu v půdě závisí veškeré procesy, které v půdě probíhají, (např. přenášení živin pro rostliny, rozklad humusu a další). Bez vody v půdě by nebylo života v ní ani na ní, a tedy by nefungoval základní zdroj obživy pro člověka – zemědělství. Bohužel dříve nebylo možné efektivně zjišťovat množství vody v půdě a prakticky existovala pouze jediná možnost, a to pomocí gravimetrické metody. Tato metoda je na jednu stranu velmi přesná, vzhledem k postupu měření, kdy se voda ze vzorku odstraňuje sušením, na druhou stranu má tato metoda také podstatné nevýhody. Gravimetrická metoda určování vlhkosti v půdě, je zcela nepraktická pro kontinuální měření půdy, vzhledem k nutnosti odebrat neustále půdní vzorky (a tím porušovat zkoumanou půdu) a časové náročnosti stanovení vlhkosti. V závislosti na výše uvedeném se v posledních letech zvyšuje výzkum a výroba nových vlhkostních čidel, právě za účelem měření množství vody v půdě, nepřímými metodami vycházejícími ze vztahu mezi vlhkostí půdy a jinou měřitelnou fyzikální veličinou (např. relativní permitivita, elektrický odpor, průchod gama záření, odrazivost půdy pro vlnění). V dnešní době můžeme na trhu najít celé spektrum vlhkostních senzorů různých kvalit, technologií měření a cenových hladin. Při vývoji nových čidel je kladen důraz na zvýšení přesnosti měření, je důležitý např. lineární, či jiný funkční vztah mezi měřeným signálem a skutečným množstvím vody v půdě. Čím jasnějšího funkčního vztahu mezi půdní vlhkostí a měřenou veličinou je senzorem dosaženo, tím přesnější určení obsahu vody v půdě dosáhneme. V této práci

je ukázáno fungování a kvalita jednotlivých čidel a jejich potenciální účinnost a spolehlivost pro měření vlhkosti půdy (GARDNER, YUFFA, 1991).

2. Cíl práce

Cílem práce je zkoumat chování vlhkostních čidel v 5 vlhkostních stupních v závislosti na gravimetricky stanovené referenční vlhkosti porézního materiálu. Těmito vlhkostními stupni jsou: vzduch, suché kuličky, plně nasycené kuličky, vlhké kuličky a demineralizovaná voda. Navazujícím cílem je porovnat kvalitu signálů u testovaných čidel. Předpokládaná hypotéza je, že modernější a pokročilejší čidla budou mít nižší odchylku od linearitu mezi měřeným signálem a skutečným množstvím obsažené vody ve vzorku. Čidla budou porovnávána v rámci posunů měřených signálů mezi vzduchem a suchými kuličkami, kde je předpoklad, že kvalitnější čidla budou mít menší odchylku mezi těmito signály. Dále bude chování čidel porovnáváno mezi nasycenými kuličkami a demineralizovanou vodou, kde je předpoklad, že modernější čidla budou mít větší rozdíly mezi těmito signály.

3. Literární rešerše

3.1 Vlhkost půdy

Pojmem půdní vlhkost se rozumí obsah vody vázané v půdě neboli mezi jednotlivými částicemi půdy. Tato voda má několik funkcí v půdě a je velmi důležitým faktorem v hydrologickém cyklu, který řídí výměnu s atmosférou nad a s podzemní vodou pod ní. Voda v půdě má v podstatě jeden z největších vlivů na většinu fyzikálních, chemických a biologických procesů, které probíhají v půdě. Voda v půdě dále funguje jako jakési pojivo mezi jednotlivými částicemi půdy, tím ovlivňuje strukturu a pevnost půdních a geologických materiálů. Její vliv můžeme pozorovat i na střídání teplotních cyklů na povrchu půdy, kdy díky své vysoké teplotní kapacitě zmírňuje denní a sezónní teplotní cykly. Chemicky voda slouží jako transportní činidlo pro rozpouštěné anorganické chemikálie a suspendované biologické složky, tyto složky jsou nedílnou součástí vývoje a degradace půdy (HILLEL, 1998; DANE, HOPMANS, 2002; COOPER, 2016; TOPP, et al., 2008).

Vlhkost půdy můžeme rozdělit na dvě základní skupiny, na vodu ve vrchní deseticentimetrové vrstvě půdy a na půdní vlhkost v kořenové zóně půdy. Voda v kořenové zóně, je dostupná rostlinám a je zpravidla měřena do hloubky 2 metrů. (GAJA, 2013). Půdní vlhkost je obvykle vyjadřována několika možnými vztahy, lze ji vyjádřit jako poměr hmotnosti vody ku hmotnosti vzorku půdy (HILLEL, 2004).

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (3.1)$$

V tomto vzorci vyjadřuje značka m_s vlhkost půdy vysušené na 105 °C do konstantní hmotnosti. Značka m_w vyjadřuje hmotnost vody v půdě.

Další vyjádření půdní vlhkosti je pomocí objemové vlhkosti, tedy vztahem mezi objemem vody ku objemu vzorku půdy (KUTÍLEK, 1978).

$$\theta = \frac{V_w}{V_s} \quad (3.2)$$

V_w zde vyjadřuje objem vody ve vzorku a značka V_s vyjadřuje objem celého vzorku (vody, vzduchu i pevných částic) dohromady.

Pro určení vlhkosti půdy porušeného půdního vzorku (3.3), lze použít vzájemný vztah vyplývající z výše uvedených rovnic (3.1) a (3.2). V tomto vzorci je hmotnostní vlhkost porušeného půdního vzorku přímo úměrná objemové hmotnosti suché půdy ρ_d a nepřímo úměrná hustotě vody ρ_w .

$$\theta = \frac{w * \rho_d}{\rho_w} \quad (3.3)$$

Vlhkost půdy je úzce spjatá s půdními vlastnostmi, dá se předpokládat, že v půdách s vyšší pórovitostí bude obsahovat více vody vázané v ní.

3.2 Metody měření vlhkosti

Podle způsobu měření můžeme rozdělit metody měření vlhkosti na dvě základní skupiny, metody přímé a nepřímé. (LITSCHMANN, 2010). U metod přímých, jak již název napovídá měříme přímo množství vody v půdě. U metod nepřímých naopak určíme fyzikální veličinu, kterou měříme. Tato veličina je funkčně závislá na množství vody v půdě, tím jsme schopni dále určit reálné množství vody v půdě (HANZLÍKOVÁ, 2018).

3.2.1 Přímé metody měření vlhkosti půdy

Máme hned několik metod přímého měření vlhkosti půdy, můžeme sem řadit například Karl Fisherova metoda nebo například metoda zrcátkových vlhkoměrů. V této práci byla použita gravimetrická metoda, proto se více zaměříme právě na ni. Mezi nejstarší metody měření vlhkosti půdy patří gravimetrická metoda. Při tomto způsobu měření se v podstatě zjišťuje úbytek hmotnosti, tedy úbytek vody ve vzorku důsledkem zahřívání vzorku. Vzorky se mohou zahřívát různými způsoby, jako jsou například zahřívání žárovkou na řízenou teplotu pro dosažení konstantní hmotnosti. Nejběžnější metody jsou ohřívání vzorku v pecích využívající žárovkové ohříváče a konvekční přenos tepla, nebo například vakuová destilace vody na požadovanou úroveň tlaku, či pomocí mikrovlnné trouby, kdy sušení pochází z mikrovlnné energie pronikající do vzorku a tím umožňuje rychlejší ohřev vzorku a sušení. Oproti ostatním

metodám se při sušení mikrovlnou energií nezahřívá na požadovanou referenční teplotu, ale zahřívá se po zvolenou dobu, dostačující k zajištění vysušení vzorku. Tato metoda je klasifikována jako destruktivní, což znamená, že se během měření mění obsah vody ve vzorku. Gravimetrická metoda může být použita v terénu i v laboratoři (DANE, HOPMANS, 2002).

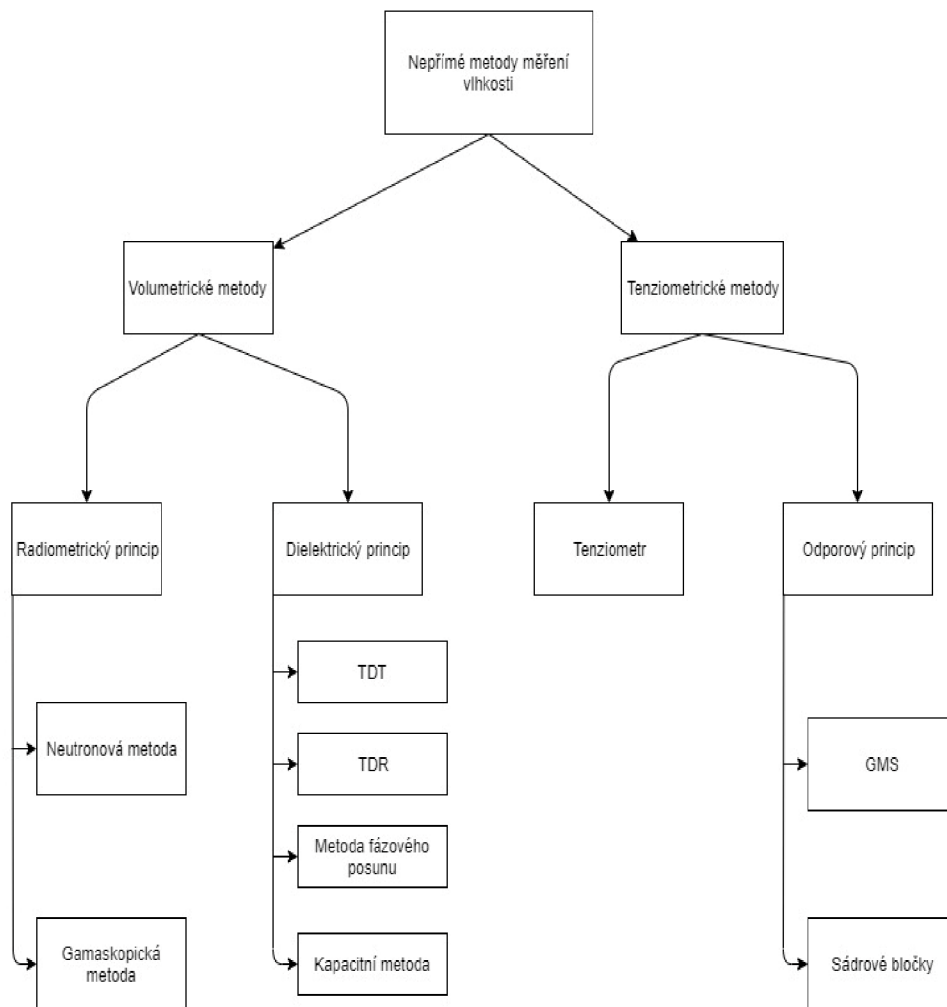
Gravimetrická metoda je velmi přímočará s předpokladem, že výsledky této metody jsou absolutní. Tato teorie je však chybná hned z několika důvodů. Voda v půdě je zadržována ve velkém množství energetických úrovní a neexistuje žádný absolutní čas, kdy půda dosáhne „suchého“ stavu při udržování teploty 105°C. Vzorky půdy pomalu snižují svoji hmotnost několik dní při této teplotě (GARDNER, 1986). Dalším důvodem je obsah organických látek v půdách, z nichž některé jsou těkavé při 105°C, to znamená že část úbytku hmotnosti závisí na těkání jiných látek než právě vody. Dalším problémem této metody je regulace teploty v peci, kdy u některých sušáren se liší teplota zahřívání vzorků v závislosti na umístění v sušárně. Přestože tato metoda nese jisté nedokonalosti, je velmi jednoduchá a používaná v mnoha laboratořích (DANE, HOPMANS, 2002).

3.2.1.1 Získávání vzorků

Pro tuto metodu je velmi důležité dodržovat přesný postup odebírání vzorků. K tomuto účelu slouží několik typů nástrojů (lopaty, šneky, odběrné trubice). V závislosti na typu materiálu a hloubce odebírání je třeba zvolit správný nástroj. Dále je třeba přesně měřit hloubku odebírání, k čemuž slouží metr. Po odebrání vzorku je nutné vzorek neprodleně uzavřít buď přímo do tárovaných sušících nádob s pevně přiléhajícím víčkem, aby nedocházelo ke ztrátě vody odpařováním. Vzorky mohou být také převáženy do laboratoří pomocí plastových sáčků s uzavíráním. Ze sáčků jsou dále vzorky umístěny do sušících nádob. Vzorky musí být váženy na kalibrovaných vahách s přesností 0,05g (DANE, HOPMANS, 2002; BÁŤKOVÁ, MATULA, MIHÁLIKOVÁ, 2013).

3.2.2 Nepřímé metody měření vlhkosti

Oproti přímým metodám měření vlhkosti mají ty nepřímé řadu velkých výhod. Nespornou výhodou je fakt že tyto metody nejsou destruktivní, můžeme tedy měřit stejný vzorek několikrát i po delší období, hodí se pro dlouhodobější zkoumání půd. Další nespornou výhodou je rychlost měření, kdy prakticky ihned dostáváme výsledky, s kterými můžeme dále pracovat. Principem nepřímého měření vlhkosti půdy je stanovení fyzikální veličiny, na která je přímo spjata objemová vlhkost půdy. (MUÑOZ-CARPENA, 2018; CHARLESWORTH, 2005). Takových veličinami je několik a každá z nich má svůj specifický způsob a metodu měření. Rozdělení nepřímých metod měření je poněkud složité, jak již bylo řečeno výše, máme zde několik možností, jakým principem vlhkost měřit, základní rozdělení je blíže popsáno v následujících kapitolách. V obrázku Obr. 3.1 je přehledně naznačeno rozdělení nepřímých metod měření vlhkosti.



Obr. 3.1: Rozdělení nepřímých metod měření

3.2.2.1 Volumetrické měření vlhkosti

První kategorií nepřímého měření vlhkosti je volumetrické měření neboli měření pomocí objemové vlhkosti. U těchto metod vždy existuje vztah mezi měřenou veličinou (relativní permitivita, elektrický odpor, objemová hmotnost atd.) a právě objemovou vlhkostí. Volumetrické metody dále dělíme na dvě podskupiny, a to na radiometrický princip a dielektrický princip. Obě podkategorie se dále dělí na několik dalších.

3.2.2.1.1 Radiometrický princip

Metody na radiometrickém principu v podstatě využívají změny energií vysílaných paprsků k nepřímému určení vlhkosti půdy. Na tomto principu fungují dvě metody. Gamaskopická metoda, využívající gama záření a neutronová metoda.

3.2.2.1.1.1 Gamaskopická metoda

Při této metodě využíváme vztahu mezi půdní vlhkostí a objemovou hmotností půdy. Při změně půdní vlhkosti dochází ke změně objemové hmotnosti půdy, tu lze měřit díky rozptylu vysílaných gama paprsků. Gama paprsky integrují s elektronovými obaly atomů a vlivem Comptonova jevu dochází ke změně energie fotonů. Počet interakcí spolu s rozptylem paprsků a změnou energie fotonů závisí na počtu elektronů v námi měřeném materiálu neboli na objemové hustotě (COOPER, 2016).

3.2.2.1.1.2 Neutronová metoda

Tato metoda je v běžné praxi nevyužívaná, dochází při ní ke kontaminaci zkoumaného materiálu a je velmi finančně nákladná. Tato metoda využívá neutronové záření, kterého je docíleno správnou směsí ^{241}Am a ^9Be . Při této metodě dochází k vyzařování alfa částic izotopem ^{241}Am , tyto částice kolidují s ^9Be . Touto reakcí vzniká ^{12}C a volný neutron s energií 2-6 MeV. (COOPER, 2016) Při této metodě vycházíme z toho, že neutron nemá žádný náboj dochází ke kolizím s jádry atomů. Tím, jak neutron prochází půdou dochází ke kluzkým kolizím s jádry, při kterých ztrácí svou energii. Těmito kolizemi dochází k termalizaci neboli přechodu části energie do tepelného pohybu částic. Podle toho, do jakého atomu neutron narazí se liší úbytek jeho energie. Největší úbytek je patrný při nárazu do atomu vodíku, při tomto střetu neutron ztrácí zhruba polovinu své energie. (MUÑOZ-CARPENA, 2018; COOPER, 2016). Při vyšší vlhkosti půdy se tedy snižuje dráha, kterou neutron uletí, než je při nekluzké kolizi zachycen jádrem některého z atomů. Při jeho průchodu půdou vzniká i velké množství termalizovaných neutronů. Některé z nich se odráží a jsou zachycovány detektorem.

3.2.2.1.2 Dielektrický princip

3.2.2.1.2.1 Kapacitní metoda

Tento princip měření vychází z rozdílných permitivit vody a půdy (LITSCHMANN, 2010; MUÑOZ-CARPENA, 2018). Při vyjádření vztahu mezi kapacitou kondenzátoru a objemovou vlhkostí využíváme vzorce:

$$C(\theta) = g\varepsilon(\theta) \tag{3.4}$$

Ve vzorci g zastupuje geometrické uspořádání elektrod v kapacitoru. Tato, ač jednoduchá rovnice vyjadřuje velice důležitou skutečnost, že při nemění se geometrii kapacitoru dochází k přímé úměrnosti mezi kapacitou a permitivitou dielektrika. Z toho můžeme vyvodit vztah mezi objemovou vlhkostí měřené půdy a kapacitou. Jelikož je půdní prostředí elektronicky vodivé, měli bychom zohledňovat svod kapacitoru a použít model paralelního dipólu $R_p || C_p$ (COOPER, 2016). Dále musíme zohledňovat proměnnou relativní permitivitu vody při změnách teploty. Při metodách založených na dielektrické permitivitě se proto využívá kompenzace vlivu teploty. Pro příklad maximální rozdíl mezi kladnou a zápornou odchylkou od střední hodnoty teploty půdy se mezi povrchem a hloubkou 50 cm liší v rozsahu 24 °C–32 °C (PAVLŮ, 2019; MALMBERG, MARYOTT, 1956).

3.2.2.1.2.2 TDR metoda

Metoda TDR je založena na změnách parametrů vedení. Využívá se zde změny rychlosti vysílané elektromagnetické vlny do půdy. Čidla využívající tuto metodu produkují impulzy o frekvenci 20MHz – 3GHz. Impulzy jsou vysílány různě dlouhými hroty osazenými do půdy. Princip měření je jednoduchý, měří se časový rozdíl odrazu signálů na začátku a na konci vedení (na konci transmisivních tyčí). Na základě naměřeného času lze zjistit rychlost šíření vysílaných vln. Z rychlosti vysílaných vln lze následně určit vlhkost půdy (REGALADO, RITTER, BECKER, 2006; ROBINSON, et al., 2008; KUTILEK, NIELSEN, 1994; LITSCHMANN, 2010).

3.2.2.1.2.3 TDT metoda

Rovněž jako TDR metoda je i TDT metoda založena na měnící se rychlosti šíření vysílaných vln. Hlavním rozdílem mezi nimi je, že TDT metoda je (uzavřená), čidlo měří dobu uplynulou od vyslání a následného přijetí vyslané vlny (MUÑOZ-CARPENA, 2018).

3.2.2.1.2.4 Metoda fázového posunu

Podobně jako TDT metoda je i metoda fázového posunu (uzavřená). Čidlo měří rychlost vysílaných vln, výsledná vlhkost je určena z rozdílu fáze signálu, který je přiváděn k vedení (LITSCHMANN, 2010; MUÑOZ-CARPENA, 2018).

3.2.2.2 Tenziometrické měření

K tomuto způsobu měření se využívá tenziometr. Tenziometr je tvořen porézní špičkou, trubicí a manometrem. Princip fungování tenziometru je následující: přes porézní špičku proudí voda z tenziometru do půdy. Tenziometr má na začátku měření tlak 0 Pa. Po dosažení vyrovnaného prostředí mezi pod tlakem v tenziometru a sacím tlakem půdy dochází k ustálení výměny vody mezi tenziometrem a půdou. Pro tento druh měření je nezbytné znát retenční křivku půdy pro dopočet sacího potenciálu na vlhkost (CHARLESWORTH, 2005; BÁŤKOVÁ, MATULA, MIHÁLIKOVÁ, 2013).

3.2.2.2.1 Odporový princip

Metody měření založené na tomto principu jsou rozepsány v následujících podkapitolách, v kapitole 3.2.2.2.1.1 a v kapitole 3.2.2.2.1.2

3.2.2.2.1.1 Metoda sádrových bločků

Tato metoda je založena na měření odporu mezi elektrodami. Elektrody jsou umístěny v sádrových bločcích a kolem nich se vytváří nasycený roztok síranu vápenatého, který tvoří elektrolyt. Odpor je měřen nízkým střídavým proudem, aby nedošlo k polarizaci elektrod. U této metody je potřeba teplotní kompenzace, vliv teploty zde hraje velkou roli.

Velkou výhodou této metody je její jednoduchost a cenová nenáročnost. Dá se využívat i v místech s vysokou salinitou, ale značnou nevýhodou je náchylnost k rozpouštění a nízká přesnost měření (LITSCHMANN, 2010).

3.2.2.2.1.2 GMS metoda

Tato metoda je velice podobná metodě sádrových bločků. Liší se zde zejména konstrukce čidla. U GMS metody jsou elektrody umístěny v porézním křemenném materiálu, který je potažený syntetickou membránou a kovovým pouzdem. Vnitřek tělíška opět tvoří sádra (COOPER, 2016).

3.2.2.3 Měření vlhkosti pomocí DPZ

Měření vlhkosti půdy pomocí DPZ je založeno na 2 základních předpokladech. Na předpokladu že změna obsahu půdní vlhkosti vede ke spektrálním změnám chování půdy a na předpokladu, že změna půdní vlhkosti se projevuje změnami na vegetačním krytu. Tato metoda je oproti ostatním časově náročnější než měření vlhkosti pomocí senzorů, dá se však mapovat velká část území (CHEN et al., 2008).

4. Metodika

4.1 Charakteristika zkoumaného materiálu

Pro bakalářskou práci bylo klíčové zajistit a přesně určit homogenní prostředí s ideálními vlastnostmi pro připravovaná měření. K tomuto účelu bylo použito skleněných kuliček ve dvou různých velikostních frakcích. Měření byla prováděna v kuličkách o průměru 4 mm za předpokladu, že velikost kuliček bude vždy stejná. Nespornou výhodou zvoleného materiálu byla jejich homogenita, díky které je možné vyloučit, že by měření bylo narušeno nežádoucími prvky obsaženými v měřených vzorcích.

4.1.1 Fyzikální vlastnosti použitého materiálu

Pro tento pokus byly určeny kuličky z internetového obchodu (Skleněné-kuličky.cz). Tyto kuličky jsou vyrobeny ze skla typu BKZ. Jedná se o čiré krystalové sklo, ve větším množství však kuličky působí namodrale. Prodejce uvádí rozměrovou toleranci +/- 0,2 mm. Od prodejce je také možné získat přehledný souhrn všech charakteristik pro tyto kuličky viz Obr. 4.1. Cena vybraných kuliček u 4mm frakce je 134 Kč za kilogram kuliček.

	hodnoty udávané výrobcem	námi naměřené hodnoty
počet kuliček na 1 kg	11933	neměřeno
hmotnost 1 kuličky (g)	0,0838	neměřeno
průměrný počet kuliček v 1 l	18861	neměřeno
průměrná hmotnost 1 l kuliček (g)	1580,13	1606,42
pórovitost	0,368	0,371

Obr. 4.1 Tabulka fyzikálních vlastností

Výrobce dále uvádí hustotu materiálu dle tabulek 2,5 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), což bylo ověřeno pyknometrickou metodou.



Obr. 4.2 Pycnometr použitý při pokusu



Obr. 4.3 Pycnometr naplněný kuličkami

Pyknometrická metoda spočívá v určení objemu vody, která je v našem případě vytlačena pevnou látkou (skleněnými kuličkami), k tomuto pokusu byla použita pomůcka zvaná pyknometr viz Obr. 4.2 a Obr. 4.3. Při pokusu byly použity dva pyknometry pro eliminaci možné chyby a pokus byl několikrát opakován. Tento pokus probíhal tak, že jsme nejprve zvážili samotné pyknometry, poté byly pyknometry naplněny kuličkami, opět zváženy a celý postup se opakoval po doplnění pyknometru vodou. Na závěr byly pyknometry převáženy naplněné čistě vodou. Při tomto pokusu byla velmi důležitá pečlivost a byl kladen velký důraz na dokonalé vysušení povrchu pyknometru před každým vážením. Hustota skleněných kuliček se poté vypočítala ze vztahu objemu a hmotnosti podle vzorce:

$$\rho_P = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_1 - m_3 + m_2} \cdot (\rho_K - 0,0012) + 0,0012$$

ρ_P – znázorňuje hustotu pevné látky

ρ_K – znázorňuje známou hustotu, námi používané kapaliny

m_1 – znázorňuje hmotnost pyknometru bez kapaliny a kuliček

m_2 – znázorňuje hmotnost pyknometru, který obsahuje pevnou látku (skleněné kuličky)

m_3 – znázorňuje hmotnost pyknometru, který je naplněn kapalinou a pevnou látkou

m_4 – znázorňuje hmotnost pyknometru, který je naplněn kapalinou

0, 0012 – veličina (hustota vzduchu, při určité teplotě)

Z našeho měření vyplývá, že hustota pevné látky (skleněných kuliček) pro vzorek s 4mm průměrem vychází hustota 2,557 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

Měření bylo pro zpřesnění výsledku a eliminaci možných chyb při měření prováděno 4x.

4.2 Skleněné nádoby pro měření

K pokusu byly dále používány skleněné nádoby viz Obr. 4.3 o průřezové ploše 171,37 cm^2 . Použité nádoby jsou vyrobeny z průhledného skla, díky čemuž bylo možné přesně určit hladinu vody v kuličkách pro výpočty potřebné k dalšímu určování veličin potřebných při pokusu. Nádoby byly vybaveny výpustním zařízením pro plnění a prázdnění nádoby, díky tomu nedocházelo k porušení pórovitostního uspořádání kuliček, ke kterému by mohlo docházet při plnění shora. Hmotnost jedné nádoby byla 1357,35 g.



Obr. 4.4 Skleněná nádoba používaná při pokusech

4.3 Určení referenčních vlhkostí

Základním faktorem pro přesné ověření kvality zkoumaných čidel bylo určení referenčních vlhkostí. Vycházeli jsme z faktu, že vlhkost vzduchu i suchých kuliček by měla mít hodnotu 0, z toho vyplývá, že by neměly obsahovat žádnou vázanou vodu. Dále jsme přesně věděli, že demineralizovaná voda bude mít naopak maximální nasycení, tedy hodnotu 100. Bylo nutné zjistit hodnotu referenční vlhkosti pro nasycené kuličky a pro vlhké kuličky. Pro zjištění této veličiny bylo použito dvou metod. První metodou byla gravimetrická metoda a následně bylo využito výpočtu pomocí průřezové plochy nádob, která se později ukázalo jako lepší varianta.

4.3.1 Gravimetrická metoda

Gravimetrická neboli vážková metoda je metoda založená na změně hmotnosti měřeného vzorku. Při této metodě je odebraný vzorek navážen v nasyceném stavu a následně vysušen. Uvedeným způsobem je možné přesně změřit rozdíl hmotnosti a tím pádem i množství odpařené vody ze vzorku. Tato metoda je velmi přesná, její jedinou nevýhodou je časová náročnost.

Jak již bylo řečeno výše, tato metoda určení referenčních vlhkostí spočívala v odebrání vzorků v předem stanovených hloubkách. Hloubky odběru byly stanoveny na 3 cm, 8 cm a 12 cm. Pro každou hloubku bylo kvůli zpřesnění měření a eliminaci případných chyb odebrány tři vzorky. Vzorky byly odebrány pomocí keramické lžice a sypány do keramických váženek. Odebrané vzorky se pak zvažily a daly se vysušit. Při porovnání hmotností vlhkého a vysušeného vzorku jsme byly schopni dopočítat míru vlhkosti v námi předem určených hloubkách. Tato metoda se ovšem ukázala jako nedostačující. Vzhledem k náročnosti odebrání vzorků ze skleněných nádob docházelo k promíchání jednotlivých vrstev a tím k možnému ovlivnění přesnosti výsledků jednotlivých vlhkostí. Z tohoto důvodu byla použita metoda výpočtu pomocí průřezové plochy nádob.

4.3.2 Stanovení vlhkosti při nasycení

Při této metodě určení referenčních vlhkostí bylo využito výhod námi používaných skleněných nádob, kdy šlo přesně odměřovat výšku vodního sloupce v nádobě. Nejprve byla do nádoby naplněna voda zhruba 2 cm nad výpustní zařízení,

výška vodního sloupce byla označena ryskou a následně byla nádoba převážena. Hmotnost nádoby m_1 byla 2307 g. Následně byla nádoba naplněna pod zúžený okraj tak, aby voda byla pouze v prostoru, který má stejný tvar. Opět byla výška vodního sloupce označena ryskou a nakonec byla celá nádoba převážena. Hmotnost naplněné nádoby m_2 byla 4052 g. Z rozdílu obou hmotností jsme dostali hmotnost vodního sloupce, tedy $m = m_2 - m_1$. Díky znalosti hustoty demineralizované vody jsme pomocí vztahu:

$$V = \frac{m}{\rho} \tag{4.1}$$

dokázali spočítat objem vodního sloupce, $V = 1748,146 \text{ cm}^3$. Průřezovou plochu jsme dále vypočetli pomocí vztahu mezi objemem vody a výškou vodního sloupce:

$$Sp = \frac{m}{h} \tag{4.2}$$

Pro námi zvolenou nádobu vyšla průřezová plocha $171,376 \text{ cm}^2$.

Stejným způsobem bylo postupováno již s nádobou naplněnou kuličkami. Nejprve byla nádoba nasypána skleněnými kuličkami. Poté byla pomocí výpustního zařízení naplněna vodou zhruba 2 cm nad výpustní zařízení a pro vyšší přesnost výpočtu byla výška hladiny označena na čtyřech místech kolem celé nádoby. Pak byla nádoba převážena – m_1 g. Poté byla nádoba opět naplněna vodou pod úroveň zúženého okraje a hladina označena na čtyřech místech kolem celé nádoby, tak aby první a druhé hladiny byly nad sebou pro lepší odečítání výšky vodního sloupce. Všechny výšky byly dále zprůměrované, výsledná výška vodního sloupce byla 12,815 cm. Nádoba s kuličkami nasycenými vodou byla opět převážena – m_2 g.

Pro výpočet pórovitosti bylo potřeba: 1) určit objem prostoru s kuličkami, toho bylo docíleno pomocí vztahu mezi průřezovou plochou a průměrnou výškou vody v kuličkách, tedy:

$$V_{\text{celk}} = S_p \cdot h$$

(4.3)

Kde V vyšlo $2196,18 \text{ cm}^3$, a 2) dále bylo potřeba určit objem vody V_{por} v nasycených kuličkách, toho jsme docílili dosazením naměřených hodnot do vzorce:

$$V_{\text{por}} = \frac{m_2 - m_1}{\rho_{\text{vody}}}$$

(4.4)

Výsledná pórovitost byla vypočtena pomocí vztahu mezi objemem prostoru s kuličkami a hmotností vody. Námí vypočtená pórovitost byla $37,017 \%$.

4.4 Osazování senzorů do skleněných nádob a průběh testu

Po přesném definování zkoumaného prostředí a referenčních vlhkostí jsme mohli přejít k vlastnímu pokusu. Nejprve byla čidla měřena ve vzduchu, kde bylo dbáno na jejich umístění tak, aby nebyla v kontaktu s žádnou pevnou plochou a tím nedocházelo ke zkreslení měřených hodnot. K tomuto účelu bylo použito plastové bedny, na kterou byla čidla uchycována pomocí lepící pásky tak, aby měrná část čidla nebyla v kontaktu s žádným povrchem. Měření ve vzduchu viz. Obr. 4.5 a Obr. 4.6



Obr. 4.5 Osazování senzorů na vzduchu



Obr. 4.6 Osazování senzorů na vzduchu

Takto byla čidla ponechána, dokud se měřený signál neustálil na určité hladině a potom byla čidla osazena do skleněných nádob s kuličkami. Při osazování čidel do skleněných nádob byl opět kladen důraz na mnoho faktorů. Kuličky musely být naprosto suché, aby opět nedocházelo ke zkreslování výsledného signálu. Dále bylo potřeba čidla osazovat, aniž by se dotýkala stěn nádoby a byla v dostatečné vzdálenosti od sebe, a to kvůli možnému rušení jednotlivých signálů mezi sebou. Dalším hlavním aspektem, na který byl kladen důraz byl fakt, aby byla čidla vždy zanořena po v celé své délce. Přesné osazení čidel v suchých kuličkách viz Obr. 4.7 a Obr. 4.8



Obr. 4.7 Osazení čidel ve skleněných kuličkách

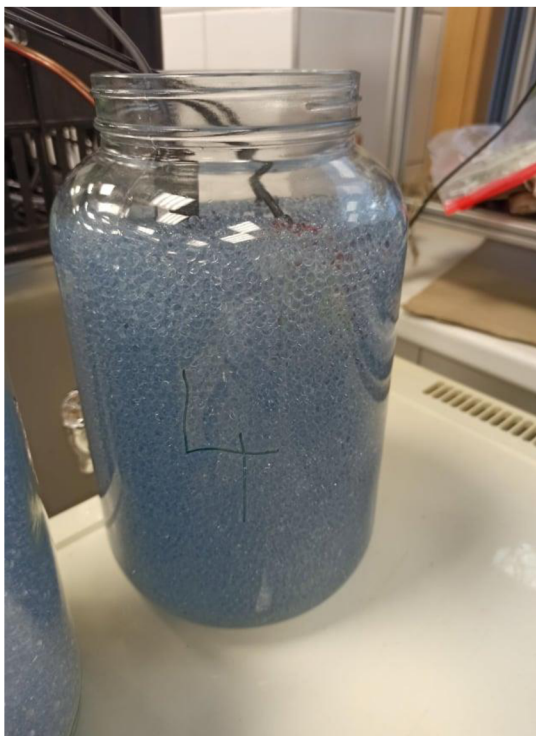


Obr. 4.8 Osazení dvou čidel ve skleněných kuličkách

Vzhledem k omezenému množství kuliček byly naplněny pouze čtyři nádoby. Pro měření byla čidla vždy osazována na dvě etapy. V každé nádobě byla osazena jedno až tři čidla podle jejich velikosti. Čidla se tedy nechala opět ustálit a po hodině byla vyměněna za zbylá čidla, která nebyla dosud měřena. Čidla byla opět osazena stejným způsobem. Po ustálení měřeného signálu byla čidla ponechána v nádobách a následně zalita vodou. Opět byl kladen důraz na maximální naplnění nádoby tak, aby byla celá čidla zavodněna až po okraj viz. Obr. 4.9 a Obr. 4.10. Po získání potřebných dat bylo potřeba čidla vyměnit za zbylá. Tímto způsobem byla naměřena všechna čidla.



Obr. 4.9 Osazení čidel v nasycených kuličkách



Obr. 4.10 Ponoření celých čidel do vody v nádobě 4

Dalším krokem bylo měření signálů v odvodněných kuličkách. Nádoby byly tedy pomocí výpustního zařízení vypuštěny a dále toto měření probíhalo

obdobným způsobem, jak již bylo uváděno. Jediným problémem bylo zachování stejných podmínek pro všechna čidla, proto byla nově osazená čidla znovu zavodněna a po ustálení signálu opět vypuštěna právě pro docílení stejných podmínek a tím eliminaci případných chyb.

Posledním krokem bylo naměření signalů v čisté demineralizované vodě. K tomuto účelu sloužily plastové kbelíky, do kterých byla čidla osazována opět tak, aby se nedotýkala stěn ani sama sebe.

4.5 Testovaná čidla

V první řadě bych rád poděkoval společnosti Ekotechnika, s.r.o., která dodala veškeré senzory, s kterými byl test prováděn. Ve výběru najdeme celou škálu čidel různých cenových a kvalitativních tříd. Základní rozdělení čidel můžeme pojmut na analogová čidla a čidla fungující na principu SDI. Výběr probíhal s důrazem na pokrytí co nejširšího spektra čidel, aby bylo možné vyzorovat a najít odchylky mezi jednotlivými čidly, a vzhledem k tomu, že jednotlivá čidla fungují na jiných principech tedy i možnost určit nejlépe fungující systém měření pro případné další zkoumání.

4.5.1 Čidla s rozhraním SDI - 12

4.5.1.1 Teros 12 - METER

Tento senzor používá SDI – 12 rozhraní a funguje na FDR principu, přičemž vrací přímo VWC signál. Cena tohoto senzoru se pohybuje okolo 8 000 Kč s DPH. Tento senzor vyrábí společnost METER, která vznikla v roce 2016. Více informací spolu s přesným návodem, jak senzor používat je možné nalézt přímo na stránkách výrobce viz. (TEROS 12 Tech Specs (online)). Teros byl pro testování vybrán kvůli své pokročilé technologii pro porovnání s méně pokročilými senzory. Výsledky porovnání viz. kapitola 5.

4.5.1.2 SMT 100 – Treubner

Čidlo SMT 100 od společnosti Treubner pocházející z Německa je dalším čidlem používajícím SDI – 12 rozhraní. Toto čidlo opět jako Teros 12 přímo vrací VWC signál, avšak toto čidlo funguje již na jiném principu, a to na principu

FDR – TD. Dle tabulek se dala předpokládat opět velmi vysoká přesnost, čemuž odpovídá i cena čidla, která se s DPH pohybuje kolem hranice 4 000 Kč.

4.5.1.3 5TM – METER

5TM je jedno ze starších čidel, v dnešní době se již nevyrábí. Do našeho testování bylo zahrnuto kvůli porovnání s novějšími čidly. Jedná se o čidlo, které vrací signál VWC s přesností $\pm 2\%$ VWC. Čidlo měří v teplotním rozmezí -40 až $+60$ °C s přesností ± 1 °C.

4.5.1.4 BND–MT10 – BONAD

Bonad je zástupce čínských čidel. Toto čidlo vyrábí stejnojmenná společnost Bonad sídlící v Guangdongu. Jedná se o čidlo vyšší cenové kategorie, výrobce zde uvádí cenu okolo 3500 Kč včetně DPH. Bonad využívá rozhraní SDI – 12 s rozpětím signálu 0-100 % VWC s možnou odchylkou $\pm 2\%$ VWC. Dále tento senzor umožňuje měření teploty, a to s odchylkou ± 1 °C.

4.5.1.5 TBSMP03 – TekBox

Na první pohled se toto čidlo odlišuje od ostatních svou robustní stavbou, dá se tedy předpokládat jeho vyšší odolnost vůči mechanickému poškození. TBSMP03 je čidlo pocházející od singapurského výrobce TEK BOX. Čidlo je dalším zástupcem využívajícím systém SDI – 12 a vrací signál TBD s rozsahem měření 0–100 %, přičemž výrobce uvádí rozlišení 10 %. U tohoto čidla stejně jako u většiny čidel vyšší cenové kategorie můžeme nalézt také možnost měření teploty s rozsahem -20 °C až $+65$ °C s přesností ± 0.5 °C.

4.5.2 Čidla s analogovým rozhraním

4.5.2.1 VH400 – Vegetronic

VH400 je zástupcem levnějších čidel. Nespornou výhodou tohoto čidla je jeho zpracování, kdy je celé vyrobeno z vodě odolných materiálů, tudíž se dá předpokládat jeho velká životnost vzhledem k eliminaci možné koroze. Čidlo funguje na analogovém principu a vrací signál TBD, tedy VWC v %. Výrobce uvádí přesnost 2 % při 25 °C a rozsah měření v celém rozsahu VWC. Cena tohoto čidla se pohybuje kolem 1 000 Kč s DPH.

4.5.2.2 WaterScout SM100 – Spectrum

Dalším zástupcem čidel vyrobených v USA je čidlo WaterScout SM100, toto čidlo vyrábí společnost SPECTRUM. Funguje na analogovém principu a vrací VWC signál. Výrobce uvádí rozsah měření od 0 % VWC až do maximální sytosti s rozlišením 0.1 % VWC. Čidlo s DPH stojí okolo 2 500 Kč.

4.5.2.3 SoilWatch 10 (SW10) – PINO-TECH

SW10 je čidlo vyráběné Polským výrobcem PINO – TECH. Toto čidlo využívá analogového rozhraní a vrací TBD signál. Využívá kapacitní metodu měření při frekvenci 75MHz. Výrobce uvádí efektivní měření od -20 až + 80 °C. SW10 je zástupcem levných čidel, jeho cena se pohybuje okolo 700 korun bez DPH.

4.5.3 TMS 4 – Tomst

Tms 4 je čidlo vyráběné v České republice, vrací přímo WVC signál. U tohoto čidla musí být dle výrobce kladen důraz na ponoření celé měrné části v měřeném prostředí, výrobce dále uvádí, že případné vzduchové kapsy v půdě již mohou mít špatný vliv na výsledek měření. Toto čidlo funguje na principu TDT a měří celý rozsah vlhkosti. Dále čidlo poskytuje měření teploty, a to v rozsahu od -40 až +60 °C, s přesností ± 0.5 °C. Toto čidlo má velkou výhodu a to, že nepotřebuje připojení na datalogger, protože v sobě již obsahuje i datalogger s pamětí dostačující na 10 let. To z něj při aktuální ceně 2000 Kč bez DPH celkově bezkonkurenčně nejlevnější systém pro monitoring vlhkosti. U všech ostatních senzorů je nutné dokupovat drahé datalogger a rozmístění ostatních senzorů v terénu je limitováno počtem dataloggerů a délkou kabeláže. Více informací uvádí výrobce na svých webových stránkách (*Eshop TOMST – TOMST* (online)). Fungování čidla je popsáno v publikaci (WILD, et al, 2019), která popisuje vývoj čidla a jeho největší výhody oproti ostatním čidlům.

4.5.4 Trime – EZ

Toto čidlo funguje na principu TDR, který je popsán v podkapitole 3.2.2.1.2.2. Vývojově je oproti ostatním testovaným nejmodernější a mělo by poskytovat nejpresnější měření vlhkosti z testovaných senzorů. Čidlo měří v rozsahu od 0–100 % VWC. Výrobce udává v rozsahu měření 0-40% přesnost ± 1 %, v rozsahu 40-70 % přesnost ± 2 %. Výrobce dále udává teplotní rozsah měření od -15 °C do 50 °C. Tento model se již nevyrábí.

4.6 Vyhodnocování dat a porovnání senzorů

Při analýze dat byl kladen důraz na rozdíly signálů mezi jednotlivými referenčními vlhkostmi. Z chování signálů mezi jednotlivými referenčními vlhkostmi bylo možné určit kvalitu jednotlivých testovaných čidel. Dále byla zjišťována linearita mezi jednotlivými signály. Pro vyhodnocování získaných dat byl použit program Excel. Výsledky měření byly nejprve stahovány z webového rozhraní Envirodata a poté vkládány do excelových tabulek a grafů zobrazujících vztah měřeného signálu a referenční vlhkosti.

V rámci porovnávání senzorů byla vyhodnocena kvalita senzorů podle 4 kritérií:

1. Poměr rozdílu (mezi signálem ve vzduchu a v suchých kuličkách) ku celkovému rozsahu signálu (vzduch – voda). Nižší poměr znamená lepší chování senzoru
2. Poměr rozdílu signálu (mezi nasycenými kuličkami a demi – vodou) ku celkovému rozsahu signálu. Bližší poměr k hodnotě 0,63 (1 – nasycená vlhkost (0,37)), tím lépe senzor měří
3. Koeficient determinace R^2 . Vyšší hodnota znamená lepší chování senzoru znamená kvalitnější chování čidla
4. Vizuální posouzení vychýlení od lineární regrese dle lineárního trendu v grafech. Vyšší shoda s čarou lineárního trendu znamená lepší chování čidla.

5. Výsledky měření jednotlivých čidel

Během testu bylo měřeno deset čidel. Měření v jednotlivých vlhkostních stupních probíhalo zhruba jednu hodinu kvůli urovňování hladiny signálu. Čidla byla testována v laboratořích České zemědělské Univerzity. Celé testování probíhalo od května roku 2021 do března roku 2022.

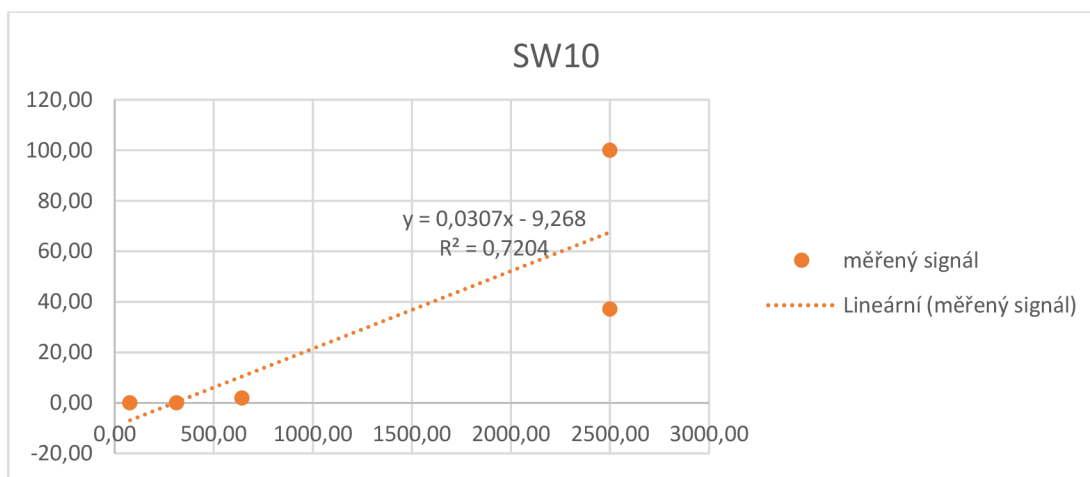
5.1 Výsledky čidel s analogovým rozhraním

5.1.1 Výsledek měření čidla SW10

	měřený signál	referenční vlhkost
vzduch	77,53	0,00
suché kuličky 4 mm	313,19	0,00
vlhké kuličky 4 mm	643,47	1,93
nasyčené kuličky 4 mm	2500,00	37,10
demi-voda plně nasycené	2500,00	100,00

Obr. 5.1 Tabulka naměřených hodnot čidla SW10

* demi – voda: demineralizovaná voda



Obr. 5.2 Graf naměřených hodnot čidla SW10

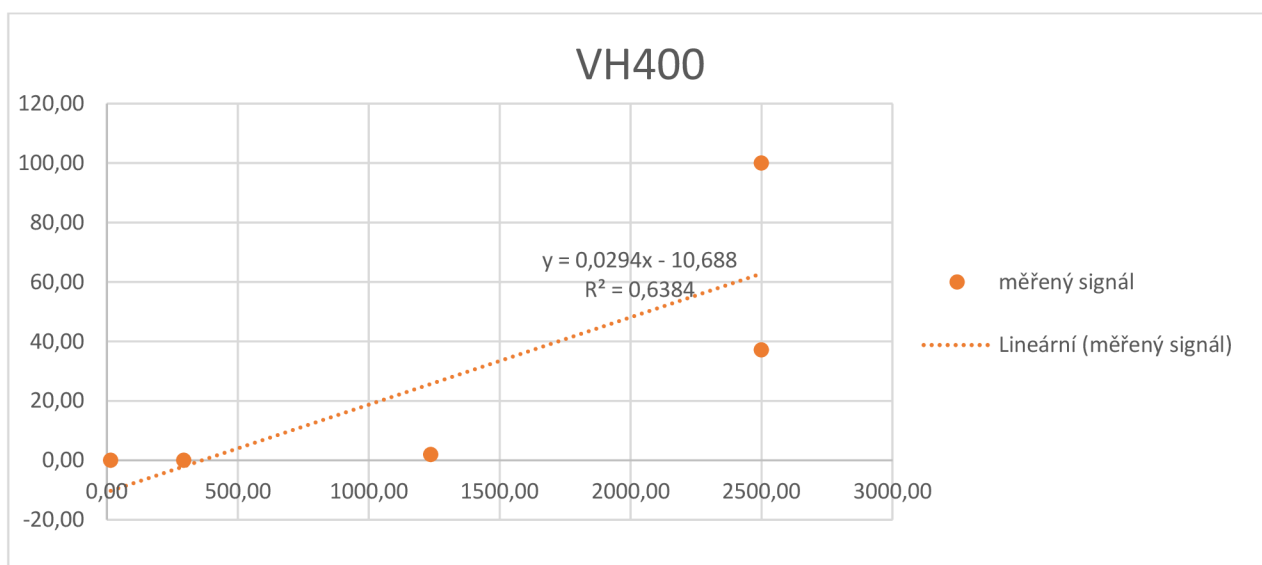
V tabulce Obr. 5.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty signálů pro jednotlivé vlhkostní stupně. U tohoto čidla byl zjištěn fakt, že nedokáže efektivně měřit vyšší vlhkost půdy, viz. graf Obr. 5.2. Tento fakt vychází z hodnot naměřených při referenčních vlhkostech 37,10 % a 100 %, je patrné, že výsledky pro tyto dvě

referenční vlhkosti vyšly se stejnou hodnotou signálu, z čehož vychází, že čidlo vyhodnocuje nižší referenční vlhkost maximálním měřitelným signálem. Vzhledem k tomuto faktu není námi testované čidlo ideální pro měření s nutností vyšší přesnosti.

5.1.2 Výsledky měření čidla VH400

	měřený signál	referenční vlhkost
vzduch	14,65	0,00
suché kuličky 2 mm	293,96	0,00
vlhké kuličky 2 mm	1236,88	1,93
nasyčené kuličky 2 mm	2500,00	37,10
demi-voda plně nasyčené	2500,00	100,00

Obr. 5.3 Tabulka naměřených hodnot u čidla VH400



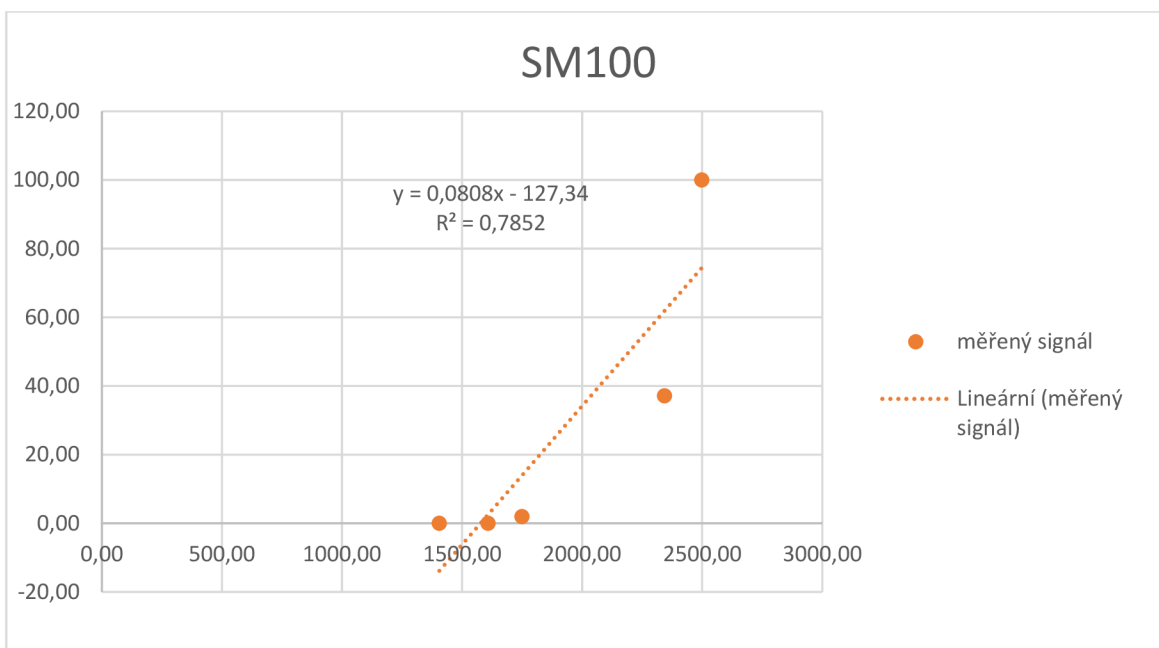
Obr. 5.4 Graf naměřených hodnot čidla VH400

U čidla VH400 je jako u předchozího opět patrná jeho nedostatečná přesnost viz. graf Obr. 5.4 a tabulka Obr. 5.3, kdy získáváme maximální měřitelný signál již při referenční vlhkosti 37,10 %. Z našeho pokusu je tedy možné usoudit, že čidlo není vhodné pro měření vyžadující vyšší přesnost.

5.1.3 Výsledky měření čidla SM100

	měřený signál	referenční vlhkost
vzduch	1405,4	0,00
suché kuličky 4 mm	1608,67	0,00
vlhké kuličky 4 mm	1750	1,93
nasyčené kuličky 4 mm	2343,71	37,10
demi-voda plně nasycené	2498,47	100,00

Obr. 5.5 Tabulka naměřených hodnot u čidla SM100



Obr. 5.6 Graf naměřených hodnot čidla SM100

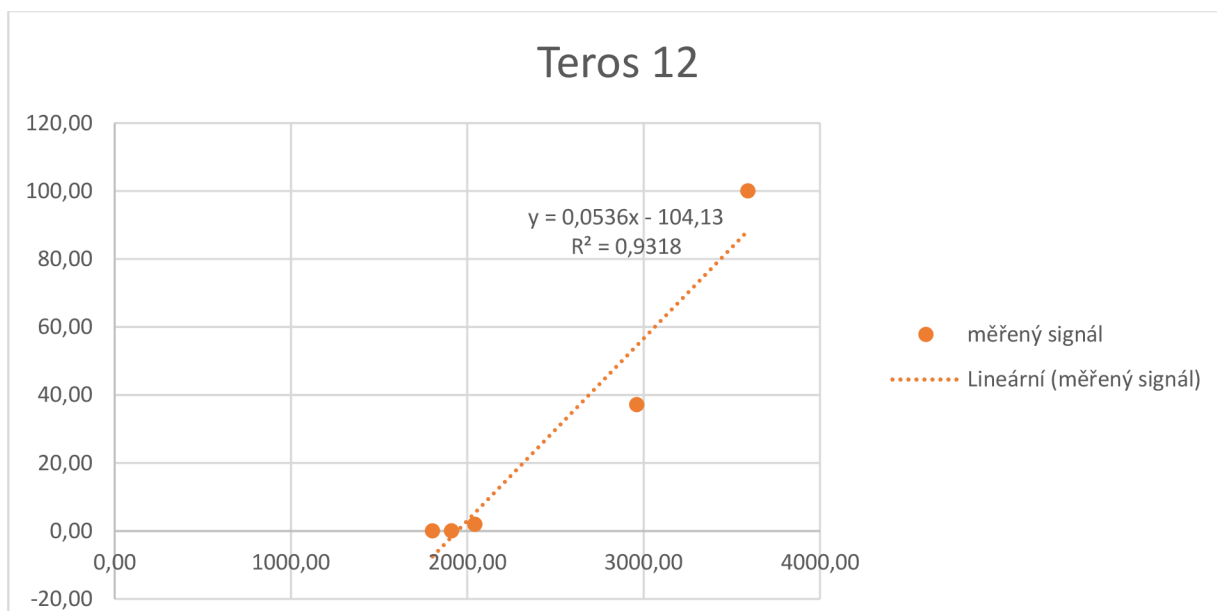
Toto čidlo jako jediné z kategorie čidel využívajících analogové rozhraní dokázalo měřit ve vyšších referenčních vlhkostech. V tabulce Obr. 5.5 jsou uvedeny výsledky měření a v grafu Obr. 5.6 jsou výsledky proloženy přímkou linearity.

5.2 Výsledky čidel s rozhraním SDI - 12

5.2.1 Výsledky měření čidla Teros 12

	měřený signál	referenční vlhkost
vzduch	1803,06	0,00
suché kuličky 4 mm	1911,38	0,00
vlhké kuličky 4 mm	2043,47	1,93
nasyčené kuličky 4 mm	2961,54	37,10
demi-voda plně nasycené	3591,84	100,00

Obr. 5.7 Tabulka naměřených hodnot u čidla Teros 12



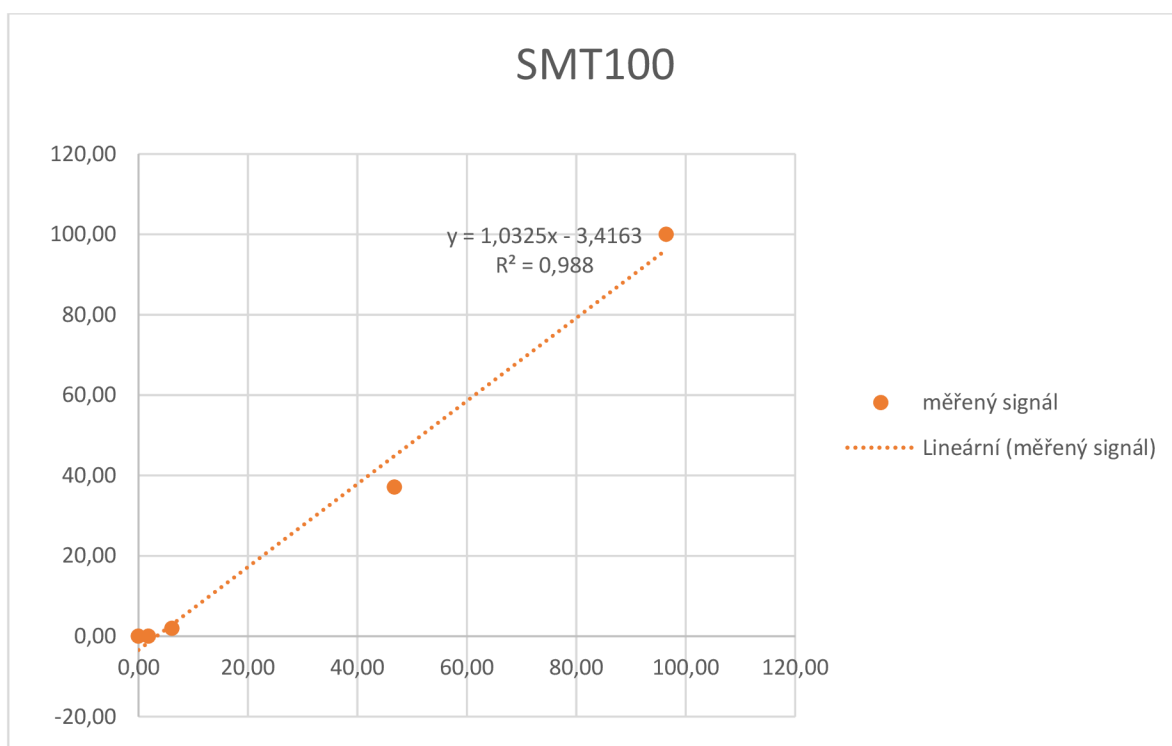
Obr. 5.8 Graf naměřených hodnot čidla Teros 12

Dle předpokladů čidlo Teros 12 vykazovalo velmi kvalitní výsledky měření. Naměřené signály nebyly nijak výrazně vychýleny od lineární přímky. V tabulce Obr. 5.7 jsou uvedeny naměřené hodnoty signálů a v grafu Obr. 5.8 je znázorněna linearita mezi jednotlivými naměřenými hodnotami.

5.2.2 Výsledky měření čidla SMT100

	měřený signál (měřená vlhkost)	Referenční vlhkost
vzduch	0,00	0,00
suché kuličky 4 mm	1,82	0,00
vlhké kuličky 4 mm	6,12	1,93
nasyčené kuličky 4 mm	46,80	37,10
demi-voda plně nasycené	96,460	100,00

Obr. 5.9 Tabulka naměřených hodnot u čidla SMT100



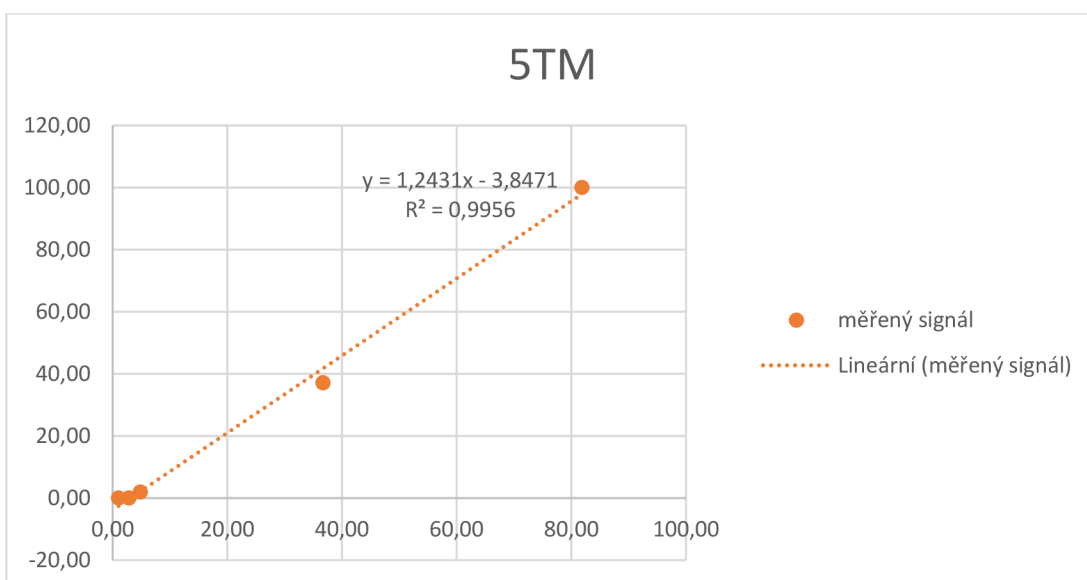
Obr. 5.10 Graf naměřených hodnot čidla SMT100

Předpokládalo se, že toto čidlo bude kvalitní, což se ukázalo během vyhodnocování výsledků. Jak je vidět z tabulky Obr. 5.9 a grafu Obr. 5.10 čidlo vykazuje velmi plynulý přechod mezi jednotlivými vlhkostními stupni a poměrně malou odchylku od linearity.

5.2.3 Výsledky měření čidla 5TM

	měřený signál	referenční vlhkost
vzduch	1,04	0,00
suché kuličky 4 mm	2,86	0,00
vlhké kuličky 4 mm	4,84	1,93
nasycené kuličky 4 mm	36,70	37,10
demi-voda plně nasycené	81,88	100,00

Obr. 5.11 Tabulka naměřených hodnot u čidla 5TM.



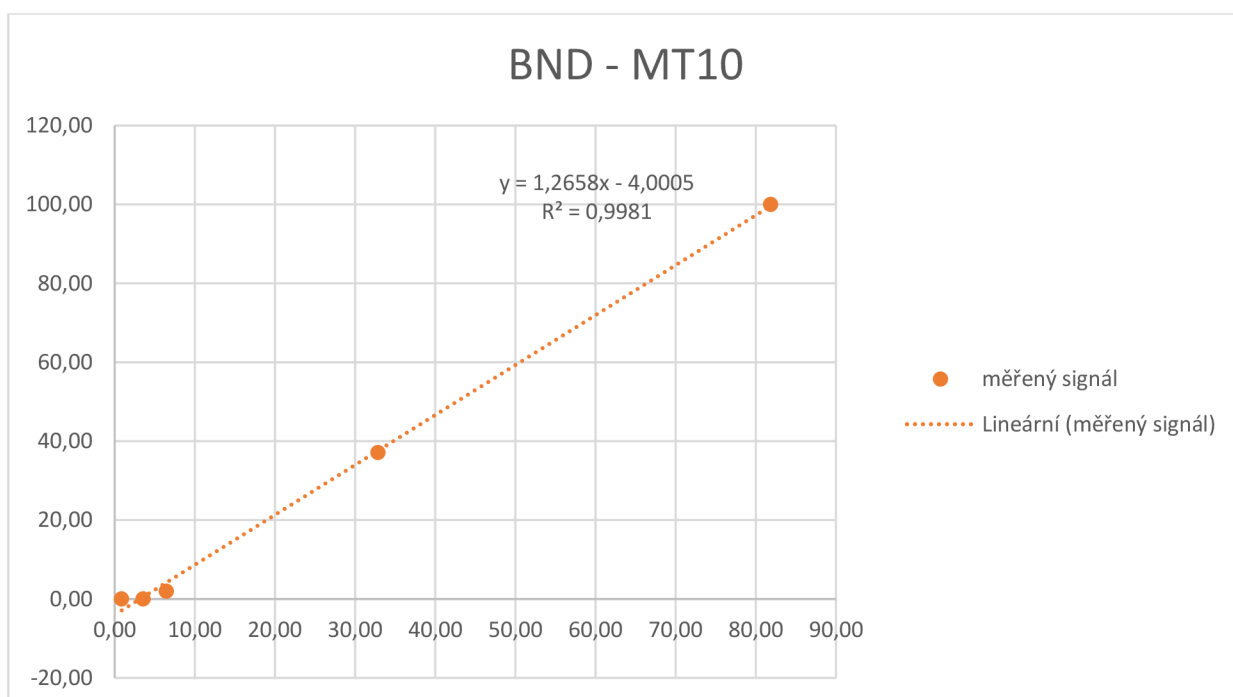
Obr. 5.12 Graf naměřených hodnot čidla 5TM

Velmi překvapivých výsledků dosahovalo čidlo 5TM. S malými odchylkami se výsledky tohoto čidla shodovaly s předem určenými referenčními vlhkostmi, jak je patrné z tabulky Obr. 5.11. Zároveň se naměřené hodnoty nijak nevychylovaly od linearity viz graf 5.12.

5.2.4 Výsledky měření čidla BND–MT10

	měřený signál	referenční vlhkost
vzduch	0,88	0,00
suché kuličky 4 mm	3,57	0,00
vlhké kuličky 4 mm	6,46	1,93
nasycené kuličky 4 mm	32,86	37,10
demi-voda plně nasycené	81,87	100,00

Obr. 5.13 Tabulka naměřených hodnot u čidla BND–MT10



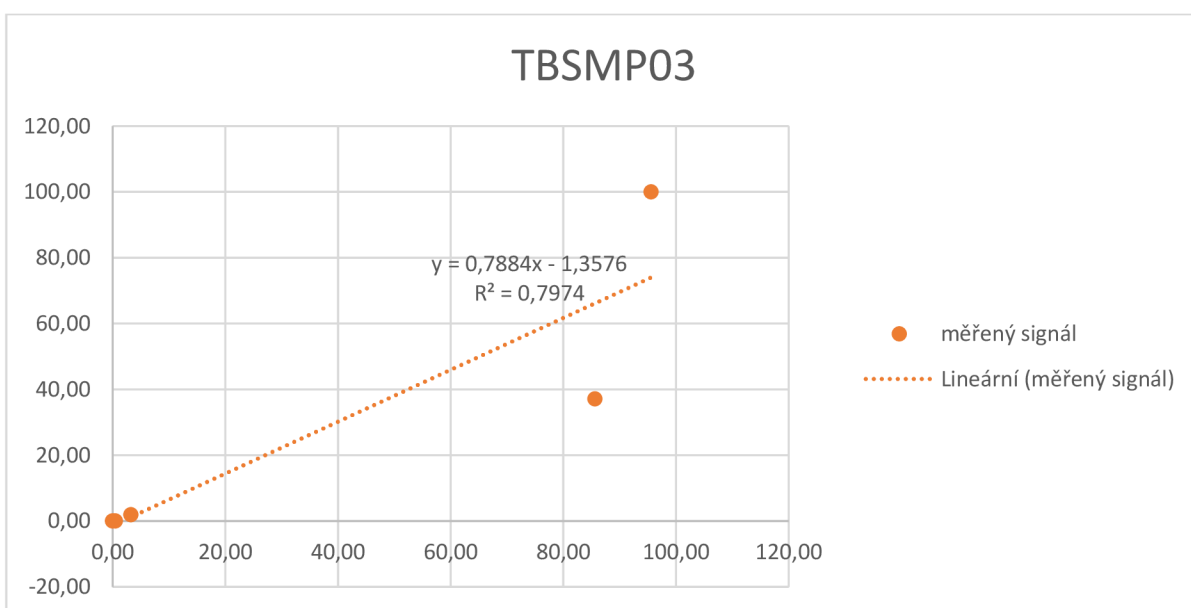
Obr. 5.14 Graf naměřených hodnot čidla Bonad

Čidlo BND – MT10 se po vyhodnocení výsledků projevil jako kvalitní čidlo s velmi malou odchylkou naměřených hodnot od linearity. Tabulka Obr. 5.13 znázorňuje naměřené hodnoty. V grafu Obr. 5.14 můžeme vidět linearitu mezi jednotlivými naměřenými výsledky.

5.2.5 Výsledky měření čidla TBSMP03

	měřený signál	referenční vlhkost
vzduch	0,00	0,00
suché kuličky 4 mm	0,49	0,00
vlhké kuličky 4 mm	3,24	1,93
nasycené kuličky 4 mm	85,62	37,10
demi-voda plně nasycené	95,60	100,00

Obr. 5.15 Graf naměřených hodnot čidla TBSMP03



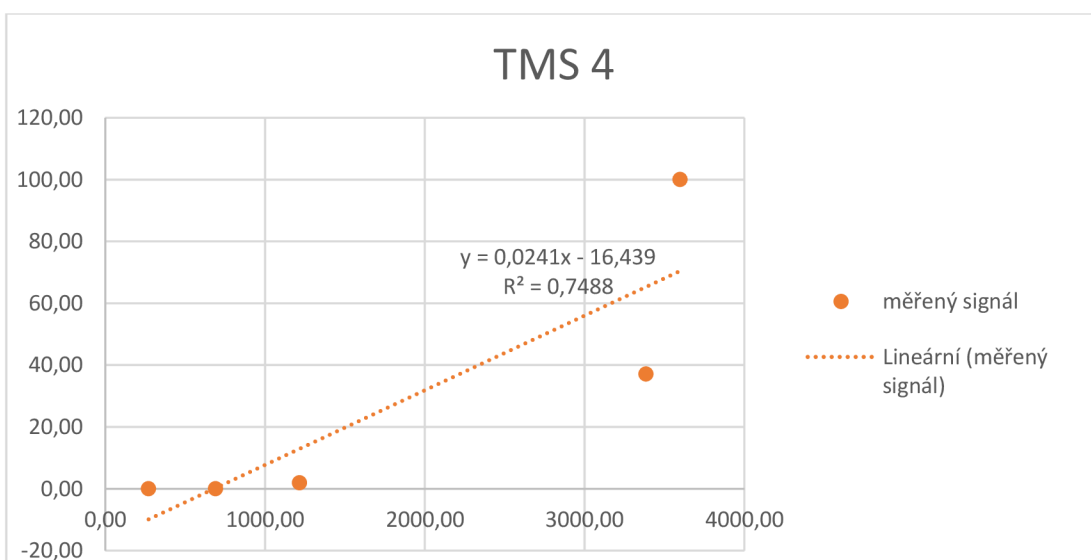
Obr. 5.16 Graf naměřených hodnot čidla TBSMP03

Toto čidlo nevykazovalo příliš dobré výsledky oproti ostatním čidlům využívajícím SDI – 12 rozhraní. V tabulce Obr. 5.15 jsou uvedeny naměřené hodnoty a v grafu Obr. 5.16 jsou výsledky proloženy čarou linearity.

5.3 Výsledky měření čidel TMS 4

	měřený signál	referenční vlhkost
vzduch	271,00	0,00
suché kuličky 4 mm	691,00	0,00
vlhké kuličky 4 mm	1216,00	1,93
nasyčené kuličky 4 mm	3385,00	37,10
demi-voda plně nasycené	3598,00	100,00

Obr. 5.17 Tabulka naměřených hodnot u čidla TMS 4



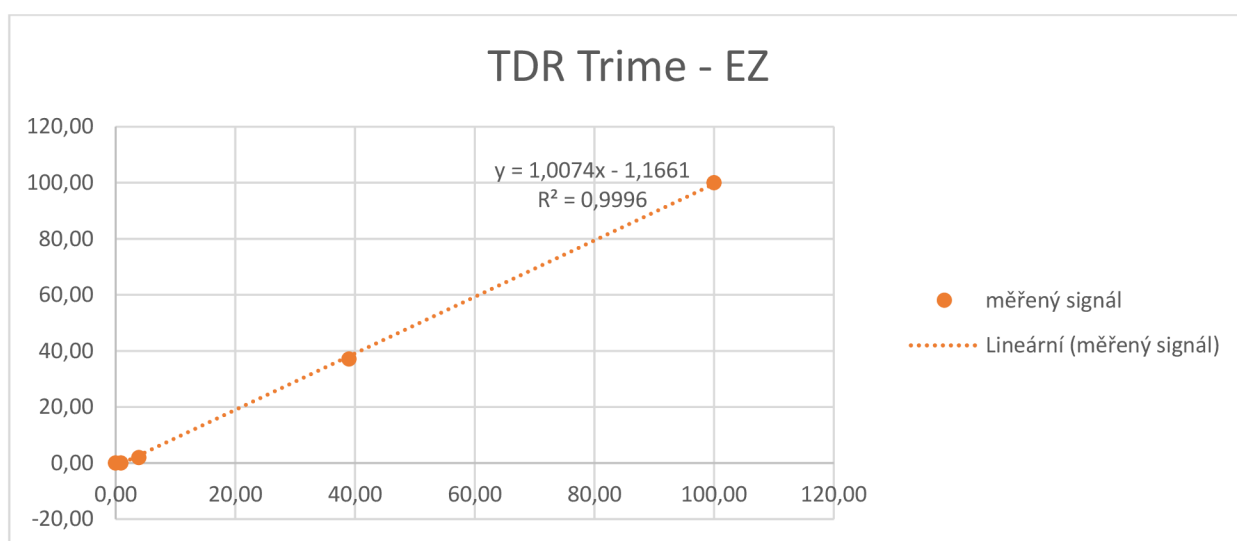
Obr. 5.18 Graf naměřených hodnot čidla TMS - 94208521

Dle předpokladů čidlo od výrobce Tomst prokazovalo kvalitní výsledky během měření. Naměřené výsledky mají nízkou odchylku od linearity. V tabulce Obr. 5.17 jsou uvedeny naměřené hodnoty čidla TMS - 94208521 a v grafu Obr. 5.18 jsou výsledky proloženy přímkou linearity.

5.4 Výsledky měření čidla TDR Trime-EZ

	měřený signál	referenční vlhkost
vzduch	0,00	0,00
suché kuličky 4 mm	0,90	0,00
vlhké kuličky 4 mm	3,90	1,93
nasyčené kuličky 4 mm	39,00	37,10
demi-voda plně nasyčené	100,00	100,00

Obr. 5.19 Graf naměřených hodnot čidla Trime – EZ



Obr. 5.20 Graf naměřených hodnot čidla Trime – EZ

Dle předpokladů čidlo Trime – EZ vykazovalo kvalitních výsledků. Naměřené výsledky prokazují malé vychýlení od linearitě přičemž se výsledky velmi podobají námi určeným referenčním vlhkostem. V tabulce Obr. 5.19 jsou uvedeny naměřené hodnoty a v grafu Obr. 5.20 jsou výsledky proloženy čarou linearitě.

5.5 Porovnání senzorů

Tabulka vyhodnocených výsledků				
název senzor	R ²	Rovnice lineární regrese	A	B
TDR TRIME EZ	0,9996	1,0074x - 1,1661	0,009	0,61
SMT100	0,9880	1,0325x - 3,4163	0,0188	0,5148
BND – MT10	0,9981	1,2658x - 4,0005	0,0332	0,6051
5TM	0,9956	1,2431x - 3,8471	0,0225	0,5589
TBSMP03	0,7974	0,7884x - 1,3576	0,0051	0,1044
TEROS 12	0,9318	0,0536x - 104,13	0,0606	0,3524
Tomst TMS4	0,7488	0,0241x - 16,439	0,1262	0,0640
SM100	0,7852	0,0808x - 127,34	0,1860	0,1416
SW10	0,7204	0,0307x - 9,268	0,0973	0,0000
VH400	0,6384	0,0294x - 10,688	0,1124	0,0000

Obr. 5.21 Tabulka vyhodnocení naměřených výsledků

* sloupec A – poměrná odchylka mezi signály (vzduch, suché kuličky) /rozsahu signálu

* sloupec B – poměrná odchylka mezi signály (nasycené kuličky, demi – voda) /rozsahu signálu

V tabulce 5.21 jsou zaznamenány výsledky porovnání senzorů. Nejlepší naměřené výsledky jsou označeny tučným písmem. Čidla jsou dále barevně rozlišena na základě vyhodnocených výsledků. Nejlepších výsledků ve všech atributech hodnocení dosáhlo čidlo TDR TRIME EZ. Velmi dobrých výsledků dosáhla čidla označená žlutou barvou, tedy čidla SM100, BND - MT10, 5TM. Z výsledků je patrné, že čidla vykazovala kvalitní hodnoty R² a kvalitní hodnoty odchylek na přechodech mezi jednotlivými vlhkostními stavy (v tabulce Obr. 5.21 označení A, B). Za zmínku stojí čidlo TEROS 12, které dosáhlo kvalitního výsledku na základě hodnocení podle R², ale nedosahovalo stejně kvalitních výsledků u dalších atributů hodnocení. To může být způsobeno špatným kalibračním klíčem, který uvádí výrobce. Naopak nejhorších výsledků ve všech ohledech hodnocení vykazovala čidla SW10 a VH400 (v tabulce Obr. 5.21 označena červeně). Tato čidla vykazovala nízké hodnoty R², měla příliš vysoké odchylky při porovnání ((vzduch, suché kuličky) /rozsahu signálu) a dokonce 0 odchylku při porovnání ((nasycené kuličky, demi – voda) /rozsahu signálu). Z testu tedy vyplývá, že tato čidla jsou pro potřeby přesnějšího měření naprosto nedostačující.

6. Diskuse

V dnešní době je mnoho možností, jak měřit vlhkost půdy. Tento test měl ukázat výrazné rozdíly mezi jednotlivými senzory založenými na nepřímém měření vlhkosti, konkrétně relativní permitivity. Test měřených čidel probíhal v homogenním prostředí sleženým ze stejně velkých 4 mm skleněných kuliček, což bylo největší výhodou tohoto testování. Z uvedeného důvodu nemohlo docházet k ovlivnění výsledků vedlejšími faktory, jako například změny velikosti a kvality pórů v okolí senzorů. Můžeme předpokládat, že čidla se budou v nehomogenním prostředí, kdy na ně může působit větší množství vnějších vlivů, chovat jinak než v námi testovaném prostředí. Při měření v půdě může na výsledky měření mít vliv několik faktorů. Měření mohou ovlivňovat například vzduchové kapsy v půdě, různé složení půdy, čidla mohou být také citlivá na mechanické porušení ostrými kusy větší zrnitostních frakcí v půdě.

Jedním z velkých omezení při testování byla možnost testovat pouze jeden kus od každého výrobce. Kvůli takto malému testovanému vzorku nemohlo být na 100 % vyhodnoceno fungování čidel a musela být brána v potaz možná chybovost jednotlivých čidel.

U levnějších čidel se často projevovaly velké rozdíly mezi jednotlivými vlhkostními stupni. U čidla VH400 byly naměřeny velké rozdíly mezi měřením na vzduchu a v suchých kuličkách, dále byly u tohoto čidla zajímavé výsledky mezi nasycenými kuličkami a demi – vodou viz tabulka Obr. 5.3. Z těchto výsledků vyplývá, že čidlo nedokáže správně měřit vyšší vlhkost. Toto může být způsobeno nekvalitním zpracováním čidla, špatnou kalibrací, nebo například špatným těsněním, kdy může docházet k prosakování vody do těla čidla a tím může být měření znehodnoceno. Bohužel z našeho testu nedokážeme určit přesný důvod chování tohoto čidla. S největší pravděpodobností půjde o špatné zpracování u levnějších čidel, neboť se podobný problém vyskytl i u čidla SW10, které také nedokázalo naměřit vysokou vlhkost vody a vyhodnocovalo vlhkost nasycených kuliček stejným signálem jako vlhkost demineralizované vody. Tyto výsledky mohou být také způsobeny špatnou kvalitou analogového rozhraní. Tuto příčinu částečně vyvrací čidlo SM100, které při použití analogového rozhraní dosahovalo daleko lepších výsledků a dokázalo rozlišit

jednotlivé referenční vlhkosti. Toto čidlo je zároveň jedno z dražších, takže se dá předpokládat jeho lepší zpracování a konstrukce čidla.

Mezi nejlépe fungující čidla během testu se zařadilo čidlo SMT100 využívající rozhraní SDI – 12. Při bližším prozkoumání výsledků viz tabulka Tab. 4.4, je vidět velmi plynulý přechod signálů mezi jednotlivými referenčními vlhkostmi. Nevyskytovaly se zde výrazné rozdíly mezi jednotlivými signály, ať již při měření mezi vzduchem a suchými kuličkami, tak mezi nasycenými kuličkami a demi – vodou. Z těchto výsledků bylo usouzeno, že čidla fungující na rozhraní SDI – 12 fungovala velmi spolehlivě. Vliv na to může mít i kvalitnější zpracování, od kterého se odráží i cenová hranice tohoto čidla.

Z výsledků měření se prokázala prvotní teorie dle (Kutilek & Nielsen, 1994), či dle studie (MITTELBACH, LEHNER, SENEVIRATNE, 2012), že čidlo založené na principu TDR bude mít nejkvalitnější výsledky. Čidlo Trime – EZ, které je založeno na TDR metodě se opravdu prokázalo jako nejkvalitnější. Otázkou je, zdali stojí kvalita výsledků měření za vysokou cenu čidel s touto metodou měření. Když porovnáme výsledky například s daleko levnějším čidlem BND – MT10, zjistíme, že výsledky mezi oběma čidly poměrově nesouhlasí s cenovým rozdílem. Při porovnání obou čidel může být brán v potaz fakt rychlosti měření. S čidlem Trime – EZ jsme schopni získávat výsledky během několika sekund. Pravděpodobně bude při porovnávání obou čidel záviset na preferencích uživatelů. Dále, jak ve své práci uvádí (WILD, J., et al, 2019), není většina čidel vyvinuta pro dlouhodobá měření bez potřeby, nebo jen s malou údržbou. K těmto účelům perfektně slouží čidla TMS4. Dle výsledků testování bylo zjištěno, že čidlo nedosahuje takové přesnosti, jako BND – MT10 nebo Trime – EZ, ale v momentě, kdy není potřeba maximální přesnost a jde spíše o dlouhodobá testování určité oblasti, je čidlo TMS4 ideální variantou.

Ze všech výsledků je patrné, že velmi záleží na kvalitativním zpracování a principu měření. Levnější čidla se dle výsledků velmi liší od modernějších čidel, prakticky jsou levná čidla naprosto nevhodná pro potřeby přesnějšího měření a jejich využití může mít své místo pro rekreační využívání, například pro zahrádkáře. Naopak pro potřeby přesnějšího měření, například pro potřeby pěstování plodin, nebo

zkoumání vlhkostí půdy v rámci vědeckých průzkumů, je vhodné používat dražší čidla, nejlépe fungující na principu TDR.

7. Závěr

V této bakalářské práci bylo v laboratorních podmínkách testováno deset různých čidel měřících vlhkost půdy nepřímými elektrickými metodami. Čidla byla použita v homogenním prostředí (skleněné kuličky), u kterého byly přesně stanoveny fyzikální vlastnosti pomocí různých laboratorních metod. Čidla byla testována v pěti vlhkostních stupních, jejichž hodnota byla určena gravimetrickou metodou.

Z výsledků vyplývá, že dražší a vývojově nejnovější čidla vykazovala vyšší přesnost a nižší vychýlení od linearity (vztahu měřeného signálu a referenční vlhkosti). I přes fakt, že čidlo 5TM nepatří mezi nejnovější čidla, dosáhlo spolu s čidlem BND – MT10 nejvyššího koeficient determinace (viz tabulka Obr. 5.21) mezi čidly fungujícími na rozhraní SDI – 12, zároveň tato čidla dosahovala výsledků jen s malými odchylkami od linearity. Čidlo SMT100 také dosáhlo prakticky srovnatelného R^2 s BND – MT10 a současně vykazovalo, hned po čidlu Trime – EZ, nejnižší odchylku mezi vzduchem a suchými kuličkami. Naopak nejhorší koeficient determinace vykazovalo čidlo TBSMP03.

Nejlepších výsledků dle předpokladů dosáhlo čidlo Trime-EZ fungující na principu TDR. Toto čidlo je oproti ostatním čidlům založeným na principu (kondenzátoru/změny oscilační frekvence) vývojově nejpokročilejší, což se prokázalo i na kvalitě výsledků, kdy ve všech kritériích vyhodnocování kvality vykazovalo lepší výsledky než všechna zbylá čidla.

Přestože je čidlo TMS 4 velmi rozšířené, nedosahovalo oproti ostatním dražším čidlům během testování příliš kvalitních výsledků. I přes horší výsledky je jeho největší předností schopnost samostatného měření (nepotřebuje žádný datalogger). Jeho velké rozšíření je také způsobeno poměrem mezi cenou a funkčností.

Analogová (levnější) čidla VH400 a SW10 nebyla schopna měřit vyšší vlhkost, což ukázaly shodné výsledky hodnot u signálů měřených v nasycených kuličkách (při vlhkosti 37 %) a demi – vodě (při vlhkosti 100 %). Z výsledků těchto čidel nelze z provedeného testu určit, při jaké vlhkosti se signál přestává měnit. Pro přesnější vyhodnocení by bylo třeba realizovat nové testování s vyšším počtem referenčních vlhkostí blízko nasycení.

Dále je potřeba uvést, že testování probíhalo vždy na jediném exempláři testovaného senzoru. Musíme tedy brát v potaz možnou chybovost jednotlivých výrobků a opět by do budoucna bylo potřeba otestovat větší množství čidel jednoho typu. Toto testování by bylo opět dobré praktikovat na větším počtu referenčních vlhkostí pro detailnější výsledky funkčnosti jednotlivých čidel.

Pro hlubší závěry je také nutné provést test na materiálech (nejen v homogenních klíčcích). Celkově byly mezi senzory zaznamenány velké rozdíly v kvalitě stanovení vlhkosti. Většina testovaných senzorů byla pro měření vlhkosti testovaného porézního materiálu použitelná, ale existuje u nich velký prostor pro zlepšení.

8. Přehled literatury a použitých zdrojů

BÁŤKOVÁ, K., MATULA, S., MIHÁLIKOVÁ, M. Multimediální učebnice hydroopedologických terénních měření. 2. doplněné vydání [on-line]. Česká verze. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha. nestránkováno. 2013 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <http://hydroopedologie.agrobiologie.cz>. ISBN: 978-80-213-2434-3.

COOPER, J. D. *Soil water measurement: a practical handbook*. West Sussex: John Wiley & Sons, 2016.

CHARLESWORTH, P. *Soil water monitoring*. Irrigation Insights No. 1, Second Edition. Land & Water Australia on behalf of the National Program for Sustainable Irrigation, 2005.

CHEN, Z., et al. *Monitoring and Management of Agriculture with Remote Sensing*. In: Liang, S. *Advances in Land Remote Sensing*. Springer, Dordrecht, 2008.

Číré křišťálové kuličky 4mm. Skleněné-kuličky.cz [online]. Dostupné z: <https://sklenene-kulicky.cz/cire-kristalove-kulicky/3272-cire-kristalove-kulicky-4-mm-2000000002880.html>

DANE, J. H., HOPMANS, J. W. 3.3. 2 Laboratory. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, 2002, 5: 675-720.

GAJA, P. *Analýza půdní vlhkosti a charakteristik sucha prostředky DPZ*. Brno, 2013. Diplomová práce. Masarykova univerzita. Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce doc. RNDr. Petr Dobrovolný, CSc.

GARDNER, J., YUFFA, A. *Soil water content*. In: *Journal of Hydrology*. 1991.

HANZLÍKOVÁ, J. *Vodní režim vegetační vrstvy extenzivní zelené střechy*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Výpočetní a informační centrum. Vedoucí práce doc. Ing. Michal Sněhota, Ph.D.

HILLEL, D. *Soil physics and soil physical characteristics*. Introduction to environmental soil physics. Academic, New York, 2004, 3-19.

HILLEL, D. *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Elsevier, 1998.

ROBINSON, D. A., et al. *Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review*. Vadose Zone Journal, 2008, 7.1: 358-389.

KUTILEK, M., NIELSEN, D. R. *Soil hydrology*. Catena-Verlag: Cremlingen, 1994.

KUTÍLEK, M. *Soil Science in water management*. SNTL: Praha, 1978.

LITSCHMANN, T. *Měření půdní vlhkosti* [online]. Informační systém Masarykovy univerzity, 2010.[cit. 2022-03-16], dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2010/Z0075/um/Prednaska_Dr_Litschmann_PudniVlhkost.pdf

MALMBERG, C. G., MARYOTT, A. A. *Dielectric Constant of Water from 00 to 1000 C*. Journal of research of the National Bureau of Standards, 1956, 56.1: 1-8.

MITTELBACH, H. LEHNER, I., SENEVIRATNE, S. I. *Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland*. Journal of Hydrology, 2012, 430: 39-49.

MUÑOZ-CARPENA, R. *Field Devices For Monitoring Soil Water Content* [online]. University of Florida: Institute of Food a Agricultural Sciences, 2018 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://edis.ifas.ufl.edu/pdf%5CAE%5CAE26600.pdf>

PAVLŮ, L. *Základy pedologie a ochrany půdy* [online]. Česká zemědělská univerzita, 2018. [cit. 2022-03-14], dostupné z: https://katedry.czu.cz/storage/4833_Zaklady-pedologie-a-ochrany-pudy.pdf

REGALADO, C.M., RITTER, A., BECKER, R. *Comments on Monitoring soil water content profiles with a commercial TDR system: comparative field tests and laboratory calibration*. *Vadose Zone J.* 2006. 5:1067–1068

TEROS 12 Tech Specs | METER Group, Inc. USA. *Home of METER | METER Group, Inc. USA* [online]. Dostupné z:<https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/teros-12/teros-12-tech-specs>

TMS čidlo pro měření teploty vzduchu a půdy a vlhkosti půdy. Eshop TOMST – TOMST [online]. Copyright © 2022 [cit. 27.3.2022]. Dostupné z: <https://eshop.tomst.com/home/87-tms-3.html>

TOPP, G. C., et al. Soil water content. *Soil sampling and methods of analysis*, 2008, 939-962.

WILD, J., et al. *Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 268: 40-47.