

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta Životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a enviromentálního modelování



## **Výrobní variabilita různých verzí mikroklimatických TMS senzorů a návrh korekce vlhkostního signálu**

### **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Jan Dlahoweský

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Konzultant práce: Ing. Marta Kuželková

2024

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Dlahoweský

Krajinářství

Název práce

**Výrobní variabilita různých verzí mikroklimatických TMS senzorů a návrh korekce vlhkostního signálu**

Název anglicky

**Production variability of microclimatic TMS sensors in different versions and design of soil-moisture signal correction**

---

### Cíle práce

Cíle práce:

- 1) Provedení laboratorního testování vybraných výrobních sérií (verzí) senzorů TMS Tomst v různých prostředích.
- 2) Vyhodnocení výrobní variability vlhkostních senzorů TMS v rámci jednotlivých sérií TMS.
- 3) Návrh korekce vlhkostního signálu pro snížení nežádoucí výrobní variability.

### Metodika

V rámci teoretické části práce bude, na základě literární rešerše, popsáno obecné půdní prostředí a jeho vlastnosti ve vztahu k půdním hydrologickým procesům. Dále bude zpracováno shrnutí nejpoužívanějších metod měření půdní vlhkosti a identifikace výhod a nevýhod jednotlivých metod.

V praktické části bude provedeno laboratorní testování vybraných sérií senzoru ve výrobních verzích TMS3, TMS4 a TMS5. Měření bude probíhat ve čtyřech odlišných prostředích – demineralizovaná voda, vzduch, suché porózní prostředí a nasycené porézní prostředí. Na základě obdržných hodnot bude vyhodnocena shoda v rámci jednotlivých sérií a shoda s výrobním standardem. Dle dosažených výsledků bude dále navržen postup pro využití korekce u odlehých hodnot.

**Doporučený rozsah práce**

30

**Klíčová slova**

půda, vlhkost půdy, hydropedologie, TMS, korekce měření

**Doporučené zdroje informací**

- Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., & Hussain, S. A. (2012). A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology*, 458, 110-117.
- KUTÍLEK, Miroslav; NIELSEN, Donald R. *Soil hydrology*. Cremlingen-Destedt: Catena, 1994. ISBN 3-923381-26-3.
- KUTÍLEK, Miroslav. *Vodohospodářská pedologie : Vysokošk. učebnice*. Praha: SNTL, 1978.
- Lekshmi, S. U., Singh, D. N., & Shojaei Baghini, M. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurements*, 54, 92-105.
- Robinson, D. A., Campbell, C. S., Hopmans, J. W., Hornbuckle, B. K., Jones, S. B., Knight, R., ... & Wendroth, O. (2008). Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 40-47.

**Předběžný termín obhajoby**

2023/24 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

**Konzultant**

Ing. Marta Kuželková

Elektronicky schváleno dne 6. 3. 2023

**prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 7. 3. 2024

**prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 08. 03. 2024

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Výrobní variabilita různých verzí mikroklimatických TMS senzorů a návrh korekce vlhkostního signálu** vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Zábrodí dne 26.3.2024

.....

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval především vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Lukáši Jačkovi, Ph. D. za možnost zpracování tématu pod jeho odborným vedením, dále pak za jeho ochotu a trpělivost. Mé velké díky patří také konzultantce, paní Ing. Martě Kuželkové za poskytnutí cenných rad, dobrou komunikaci, ochotu a trpělivost.

## Abstrakt

V současné době se často setkáváme s problémy spojenými s hydrologickými extrémy, jako jsou dlouhodobá sucha či přívalové srážky a následné povodně. V rámci ochrany před těmito nepříznivými vlivy jsou realizována opatření podporující zadržování vody v krajině. Za účelem vyhodnocení účinností těchto opatření je třeba mít k dispozici efektivní monitoring zásoby vody v půdě, protože obsah vody v půdě se ukazuje v kontextu klimatické změny jako klíčový. Na trhu je mnoho senzorů měřících půdní vlhkost, které se liší kvalitou a cenou.

Tato práce se zabývá laboratorním testováním vlhkostních senzorů TOMST a možnostmi snižování jejich nežádoucí výrobní variability. Sensory byly k dispozici v 5 různých sériích lišících se datem a způsobem výroby. Na TMS byla provedena měření vlhkostního signálu ve čtyřech různých prostředích (vzduch, demineralizovaná voda, suché kuličky, nasycené kuličky), za účelem porovnání rozdílů mezi sériemi. Bylo zjištěno, že největší rozdíly v hodnotách signálu se objevují v prostředí vzduchu. Z hlediska rozkolísanosti jednotlivých sérií byla jako nejspolehlivější zvolena nejnovější série TMS5. Po analýze výsledků byla vybrána série TMS4 A (rok výroby 2019), jenž vykazovala vysokou rozkolísanost hodnot ve stejném materiálu. U těchto senzorů byl proveden pokus o snížení nežádoucí variability pomocí korekce.

Osazení senzorů z této série proběhlo v lesní půdě na lokalitě Amálie. Po čtyřech měsících byla naměřená data stažena. V laboratoři bylo poté navrženo sedm metod korekce signálu na základě rozdílu laboratorně naměřené hodnoty pro každý senzor a referenční hodnoty dlouhodobého standardu výrobce. Nejvyšší nežádoucí variabilitu vykazovaly senzory bez korekce (nejvyšší rozsah hodnot a 2. nejvyšší koeficient variace (CV)). Jako nejvhodnější korekční metoda byla zvolena korekce vypočtená na základě poměru signálu suchých kuliček a nasycených kuliček v poměru 50:50, která vykazovala 2. nejnižší CV a současně 3. nejnižší rozsah hodnot. Tato korekce využívající hodnotu signálu z kombinace suchého i nasyceného porézního prostředí se blíží hodnotám signálu reálného částečně půdního prostředí. Celkově všechny navržené metody korekce signálu vedou ke snížení nežádoucí výrobní variability mezi senzory a tím zvyšují kvalitu vlhkostního monitoringu.

## Klíčová slova

půdní vlhkost, nepřímé elektrické metody, mikroklimatická stanice TMS Tomst, korekce signálu, snížení nežádoucí výrobní variability

## **Abstract**

Nowadays, we often encounter problems associated with hydrological extremes such as prolonged droughts or heavy rainfall and subsequent flooding. To protect against these adverse effects, measures are implemented to promote water retention in the landscape. To assess the effectiveness of these measures, effective monitoring of soil water storage is needed, as soil water content is proving crucial in the context of climate change. There are many soil moisture sensors on the market, which vary in quality and price.

This work deals with laboratory testing of TOMST soil moisture sensors and how to reduce their undesirable manufacturing variability. The sensors were available in 5 different batches differing in date and method of manufacture. Moisture signal measurements were performed on the TMS in four different environments (air, demineralized water, dry beads, and saturated beads) to compare the differences between the batches. It was found that the largest differences in signal values occur in the air environment. In terms of the variability of the different series, the most recent series TMS 5 was chosen as the most reliable. After analyzing the results, the series TMS4 A (year of production 2019) was selected, which showed a high variability of values in the same material. For these sensors, an attempt was made to reduce the unwanted variability through correction.

Sensors from this series were deployed in the forest soil at the Amalia site. After four months, the measured data were withdrawn. Seven methods of signal correction were then suggested in the laboratory based on the difference between the laboratory-measured value for each sensor and the reference value of the long-term manufacturer's standard. The sensors without correction showed the highest undesirable variability (highest range of values and the 2nd highest coefficient of variation (CV)). A correction calculated based on a 50:50 ratio of the dry bead signal to the saturated bead signal was selected as the most appropriate correction method, showing the 2nd lowest CV and the 3rd lowest range of values simultaneously. This correction, using the signal value from a combination of dry and saturated porous media, approximates the signal values of the realistic partially soil environment. Overall, all the proposed signal correction methods reduce unwanted production variability between sensors and thus improve the quality of moisture monitoring.

## **Keywords**

soil moisture, indirect electrical methods, TMS Tomst microclimatic station, signal correction, reduction of unwanted production variability

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Cíle práce .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Literární rešerše.....</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>Definice a význam půdy .....</b>	<b>6</b>
3.1.1	Vznik půdy.....	6
3.1.2	Složení půdy .....	7
3.1.3	Zrnitost.....	8
3.1.4	Pórovitost.....	9
3.1.5	Půdní vlhkost .....	10
<b>3.2</b>	<b>Měření vlhkosti.....</b>	<b>11</b>
3.2.1	Přímé metody a Gravimetrická metoda .....	12
3.2.2	Nepřímé metody .....	13
3.2.3	Odporová metoda.....	13
3.2.4	Kapacitní metoda .....	14
3.2.5	TDR – time domain reflektory.....	15
3.2.6	TDT – time domain transition .....	17
<b>4</b>	<b>Metodika .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Standardizace a osazení senzorů.....</b>	<b>19</b>
<b>4.2</b>	<b>Zpracování dat .....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>Výsledky.....</b>	<b>27</b>
<b>5.1</b>	<b>Porovnávání sérií vlhkostních senzorů v různých prostředích.....</b>	<b>27</b>
<b>5.2</b>	<b>Teplotní rozdíly v sériích senzoru v prostředí vzduch.....</b>	<b>32</b>
<b>5.3</b>	<b>Srovnání průběhu vlhkostního signálu pro různé korekce .....</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>Diskuse .....</b>	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>43</b>
<b>8</b>	<b>Seznam literatury a použitých zdrojů.....</b>	<b>45</b>



# 1 Úvod

V současné době se nacházíme v období, kdy je stále více patrné, že klimatické podmínky se mění a přinášejí s sebou výzvy v oblasti vodohospodářského řízení jako například zvládání hydrologických extrémů v podobě dlouhodobého sucha či přívalových srážek a následných povodní. Jako jeden z přístupů k řešení těchto problémů se využívají různá opatření k zadržení vody v krajině. Abychom mohli tato opatření vyhodnotit, je nutné mít k dispozici spolehlivé nástroje pro monitorování půdní vlhkosti.

Na trhu je k dispozici mnoho typů senzorů, které dokáží měřit půdní vlhkost. Některé z nich jsou velmi drahé, ale zároveň poskytují vysokou přesnost měření, obvykle díky využití technologií, jako je Time Domain Reflectometry (TDR). Tyto senzory však mohou být pro některé uživatele příliš nákladné (v mnoha případech vyžadují externí napájení, dataloger a kabeláž) a neumožňují dostatečné prostorové pokrytí zájmového území. Ve výzkumech pak nemůže být zohledněna vysoká heterogenita prostředí, zejména pokud se jedná o lesní půdu. Protože je však důležité monitorovat půdní vlhkost v různých typech půd a v různých oblastech, je nutné vyvinout metodu pro porovnávání a zpracování dat z různých typů senzorů. Tato metoda by měla být schopna zohlednit vysokou heterogenitu půdního prostředí, odlehle hodnoty, různé typy senzorů a také vývoj senzorických technologií. Na druhé straně, levnější senzory jsou dostupnější, ale jejich kvalita a přesnost měření bývají obvykle nižší. Tyto senzory jsou však neustále vyvíjeny, i proto také často vyžadují specifickou kalibraci pro konkrétní typ půdy, aby mohly poskytnout spolehlivá data.

V této práci byl pro měření půdní vlhkosti zvolen autonomní „low-cost“. Senzor TMS Tomst, který obsahuje dataloger i napájecí zdroj prošel v posledních letech výraznými úpravami, které nejsou na první pohled patrné. V průběhu vývoje došlo ke změnám použitého materiálu i technologie spojování. V důsledku byly těmito zásahy ovlivněny hodnoty signálu senzoru, který je využíván pro přepočítání na půdní vlhkost. Dle informací od výrobce bylo zjištěno, že senzory sestavené z okrajových částí desky tvořící základ pro vlhkostní senzor, dosahují vyšší rozkolísanosti než senzory sestavené ze středu desky. Pro vývoj to znamená, že hodnoty získané z těchto novějších senzorů prokazují menší rozkolísanost, tudíž mohou být naměřená data odlišná (méně zatížená nežádoucí variabilitou) od hodnot získaných při použití dřívějších verzí senzoru, a také od hodnot získaných z jiných typů senzorů.

## 2 Cíle práce

Tato bakalářská práce se zaměřuje na několik cílů. Prvním z nich je provést laboratorní testování vybraných výrobních sérií senzorů TMS Tomst. Senzory TMS (temperature moisture sensor) jsou zařízení, která slouží k měření vlhkosti půdy pomocí funkčního vztahu půdní vlhkosti a hodnoty signálu měřené senzorem. TMS senzory budou testovány ve 4 různých prostředích (suché a nasycené skleněné kuličky, demineralizovaná voda a vzduch)

Druhým cílem této práce je vyhodnocení nežádoucí výrobní variability měření surového vlhkostního signálu jednotlivých sérií senzorů TMS. Je nutné zjistit, zda se výsledky měření u různých sérií senzorů liší a jak velké jsou tyto rozdíly. Tento krok je klíčový pro zjištění vlivu vývoje senzorů na nežádoucí výrobní variabilitu. V rámci naplnění tohoto cíle je předpokládána výzkumná hypotéza H1, že novější série s vylepšenými výrobními postupy budou vykazovat menší variabilitu signálu mezi jednotlivými senzory.

Posledním cílem této práce je navrhnout metodu korekce, která zajistí lepší reprodukovatelnost výsledků měření půdní vlhkosti s použitím senzorů TMS. Tato metoda by měla být schopna odstranit případné chyby v měření způsobené nežádoucí výrobní variabilitou a zajistit konzistentní výsledky, což je důležité pro použití těchto senzorů v praxi.

V rámci naplnění tohoto cíle předpokládána výzkumná hypotéza H2, že čím blíže bude korekční standart reálnému průběhu signálu v půdě, tím úspěšnější bude korekce výrobní variability. Z toho důvodu se předpokládá, že korekční standart vypočtený pro částečně nasycené porézní prostředí (z optimálního poměru suchých a nasycených kuliček) bude nejvhodnější.

Dílčím cílem této bakalářské práce je vypracování literární rešerše na téma hydrofyzikálních vlastností půdy a měření půdní vlhkosti. Tato rešerše by měla poskytnout ucelený přehled o problematice měření půdní vlhkosti a faktorech, které na tuto vlhkost mají vliv.

## 3 Literární rešerše

### 3.1 Definice a význam půdy

Půdu lze definovat jako zvětralou a rozrušenou vnější vrstvu zemské kůry (Hillel 2003). Tvoří rozhraní mezi litosférou a atmosférou, přičemž dochází k její významné interakci s biosférou a hydrosférou (Lal & Shukla 2004). Půda je členěná na horizonty vznikající v pedogenetickém procesu za působení pedogenetických faktorů (Kutílek 1978). Řadí se mezi neobnovitelné přírodní zdroje (Vopravil et al. 2010) a (Lal & Shukla 2004) jí označili za nejzákladnější ze všech přírodních zdrojů.

Dle zákona č. 17/1992 Sb. je půda významnou složkou životního prostředí a podle Pavlů (2018) plní různorodé funkce, které lze rozdělit na produkční a mimoprodukční. MŽP udává, že kvůli složitosti vazeb, na kterých se půda v ekosystému podílí, není možné s jistotou určit, jaká z těchto funkcí je nejdůležitější. Je zásadní složkou všech suchozemských ekosystémů a klíčová pro většinu živých organismů na Zemi, které přímo nebo nepřímo pochází z půdy (Lal & Shukla 2004). Půda zajišťuje prostředí pro rostliny, filtruje a hromadí vodu, má významnou roli při výměně energie a plynů a také ovlivňuje bilanci látek a energií (Kutílek 1978; Vopravil et al. 2010). Vědní obor studující půdu se nazývá pedologie (Šantrůčková et al. 2018).

#### 3.1.1 Vznik půdy

Vznik a vývoj půd je celistvý a dlouhodobý proces, při kterém za působení abiotických a biotických faktorů dochází k zvětrávání matečné horniny, přičemž se uskutečňují změny tvaru a změny chemické. To má za následek vznik půdotvorného substrátu a tím i látek, které potřebují k životu organismy. Ty naopak zajišťují přísun uhlíku a dusíku (Šantrůčková et al. 2018; Vavříček & Kučera 2014). Půdotvorné činitele lze rozdělit na půdotvorné faktory a podmínky prostředí. Do první skupiny náleží zejména matečná hornina, klimatické podmínky, voda, půdní organismy, vegetace a působení člověka. Mezi podmínky lze zařadit reliéf Země a čas (Pavlů 2018).

### 3.1.2 Složení půdy

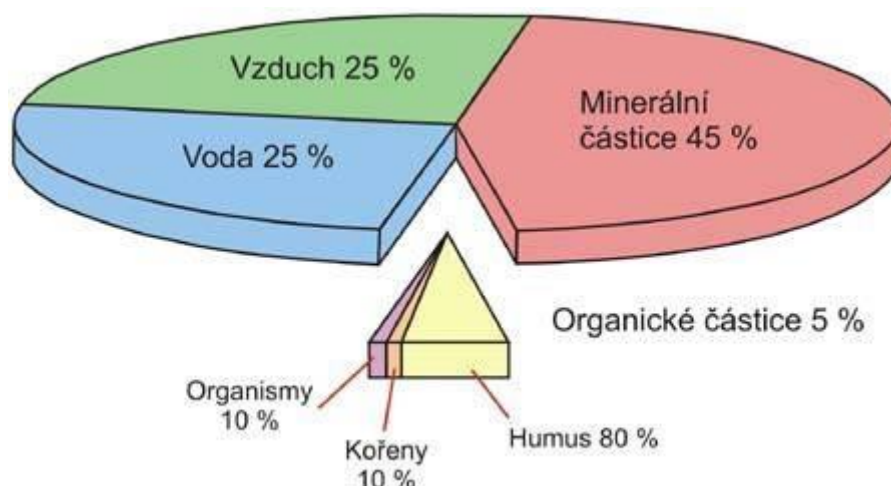
Pro složky, které tvoří půdu, existuje rozdělení z více hledisek (Pavlů 2018). Jedním z nich je chápání půdy jako trojfázového systému, jehož celek tvoří pevná, kapalná a plynná fáze (Vavříček & Kučera 2014). Lze také rozlišit živou a neživou složku půdy, jak lze vidět na obrázku 3.1. V klasifikaci je možné zacházet i více dopodrobna. Tyto individuální složky a jejich kombinace mají za následek tvorbu různých půdních typů a subtypů (Pavlů 2018).

Pevná fáze půdy zahrnuje minerální částice, jejichž tvar, struktura a chemické složení je různorodé, dále pak organickou složku, tvořenou ze živých organismů a mrtvé organické hmoty (Šantrůčková et al. 2018). Důležitou součástí živé pevné složky je humus, který je tvořen organickou hmotou, vznikající přeměnou organických látek během procesu zvaného humifikace (Cílek et al. 2021).

V půdních pórech se vždy nachází voda (Kutílek 2012). Téměř všechna voda přítomná v půdě se označuje jako půdní voda. Tímto termínem ale nelze označit speciální formy vody, a to krystalickou vodu v minerálech a hydroxylové skupiny (Kutílek 1978). Termín půdní voda definuje vodu v půdním profilu, kdy hranicí je přechod do půdotvorného substrátu. Jde buď o vodu ze srážek, nebo o vodu, která prosakuje z okolí (Cílek et al. 2021). Vyskytuje se v půdě ve všech skupenstvích (Vavříček & Kučera 2014). Voda má mnoho funkcí a její přítomnost je zásadní pro mnoho procesů. Kdyby se v půdě nenacházela, neprobíhalo by chemické zvětrávání a v půdním prostředí neexistoval život. Voda se také podílí na pohybu látek v půdním profilu, a tím i na formování půdních typů. Ovlivňuje fyzikální vlastnosti jako tepelný režim nebo objemové změny. Zásadní je i její fyziologický význam (Kutílek 1978). Množství vody ovlivňují síly, které na ní působí, ale také jiné vlastnosti půdy, jako je pórovitost, zrnitost či struktura a fyzikálně-chemické vlastnosti vody (Pavlů 2018). Dle pohybu vody v půdě je možné rozdělení na vodu gravitační, kapilární a adsorpční. Gravitační voda prostupuje půdou vertikálním směrem vlivem působení gravitace, zatímco pohyb kapilární vody může být všesměrný a je typická vzlínáním skrze půdní profil. Adsorpční voda je pouze vázaná na povrch pevné fáze (Vavříček & Kučera 2014).

Půdní vzduch je složením podobný atmosférickému s tím rozdílem, že obsahuje méně kyslíku a více oxidu uhličitého. Nejvyšší rozdíl obsahu CO<sub>2</sub> je u jílovitých a zamokřených půd (Šantrůčková et al. 2018). Vliv na složení vzduchu v půdě mají také

biologické procesy. Čím hlouběji v půdě, tím méně se zde nachází kyslíku. S rostoucí hloubkou dochází ke zpomalení růstu podílu oxidu uhličitého, a navíc klesá objem výměny plynů s atmosférickým vzduchem (Vavříček et al. 2014). K pohybu vzduchu v půdě dochází vlivem difúze či proudění (Šantrůčková et al. 2018).



Obrázek 3.1 – Zobrazení procentuálního zastoupení složek v půdě (URL.1)

### 3.1.3 Zrnitost

Zrnitostní složení půdy je jednou z nejdůležitějších půdních charakteristik mající vliv na fyzikální, chemické (především sorpční) či biologické vlastnosti půdy, ale také na její zpracovatelnost a úrodnost. Určuje ho rozdílná velikost zastoupených minerálních částic (Cílek et al. 2021), které se dělí do jednotlivých velikostních tříd (Šantrůčková et al. 2018) viz obrázek 3.2. Skeletové částice jsou větší než 2 milimetry, zatímco jemnozem zahrnuje částice velikosti pod touto hranicí. Kategorie u skeletu jsou hrubý písek s velikostí 2–4 mm, štěrk 4–30 mm, kameny větší než 30 mm a balvany s velikostí nad 300 mm. Jemnozem se dále dělí na písčité (2-0,05 mm), prachové (0,05 – 0,002 mm) a menší jílové frakce (Kutílek 2012; Šantrůčková et al. 2018). Jílová zrnitostní kategorie, která je menší než 0,001 mm, se vyznačuje koloidním charakterem, což znamená, že nevytváří sedimenty, ale je pouze rozptýlená ve vodní suspenzi (Šantrůčková et al. 2018). Půdní zrnitost se odvíjí od substrátu, ze kterého půda vznikla. Právě u jemnozeme mají minerální částice pro půdu největší význam, je také předmětem většiny půdních rozborů. Existuje více způsobů, jak zrnitost půdy hodnotit. Na území České republiky se již delší dobu používá klasifikační stupnice podle Václava Nováka (Cílek et al. 2021). Ta bere

v úvahu obsah (v %) tzv. I. zrnitostní kategorie, což jsou částice menší než 0,01 mm a definuje 7 různých půdních druhů (Pavlů 2018). Půdní zrnitost má vliv na poměr vody a vzduchu či kapilárních a nekapilárních pórů (Valla et al. 1980). Zrnitost ovlivňuje také pohyb vody v půdě. Písečná zrna vytváří velké póry, což umožňuje vodě pronikat do hloubky, zatímco menší póry u jílovitých půd tento pohyb významně ztěžují (Šantrůčková 2014). Půdy s nízkým podílem jílových částic mají obecně nižší sorpci a méně zadržují vodu, kterou ale dobře infiltrují. Oproti tomu půdy, které obsahují více jílových částic, mají vyšší sorpční schopnost, ale kvůli pevným vazbám se prvky k rostlinám nemusí dostat. Tyto půdy vlivem vlhkosti mění svůj objem. Při nedostatku vlhkosti se smršťují a při vyšší vlhkosti naopak bobtnají (Cílek et al. 2021)



Obrázek 3.2 – Trojúhelníkový klasifikátor (URL.2)

### 3.1.4 Pórovitost

Půdní pórovitost je termín, který se vztahuje k relativnímu objemu pórů a udává poměr objemu pórů v procentech a celkového objemu půdy (Kutílek 1978; Lal a Shukla 2004; Pavlů 2018). Společně s půdní strukturou zajišťuje prostorové uspořádání půdy. Póry lze nalézt mezi půdními částicemi a mezi strukturními prvky (Vavříček & Kučera 2014). Většinou od sebe nejsou odděleny a jsou propojené, i když na některých místech se liší tvarem a velikostí (Kutílek 1978). Vznikají z matečné horniny působením teplotních změn, kořenů a edafonu a jejich velikost se neměří přímo, ačkoliv to lze, ale z důvodu náročnosti se to dělá pouze ve speciálních případech. Jejich zastoupení ve

velikostních třídách se často udává podle sil působících vně pórů na půdní vodu. Právě podle způsobu, jakým je poutána voda v půdě se póry dělí na kapilární, semikapilární, nekapilární a makropóry (Vavříček & Kučera 2014). S rostoucí kyprostí půd roste i pórovitost (Pavlů 2018). Její hodnota se odvíjí dle zrnitosti půdy, obsahu humusu, struktury a půdního horizontu (Kutílek 1978). Může dosahovat až 70 % (Pavlů 2018), Kutílek (1978) udává jako horní hranici 80 % v minerálních půdách a až 90 % v půdách organogenních. Oproti tomu u zhutnělých půd přibližně 30 %. Běžně se pohybuje mezi 40-50 % (Pavlů 2018). Její výpočet je možné provést ze vztahu hodnot měrné hmotnosti a objemové hmotnosti (Vavříček & Kučera 2014). Svou velikostí, tvarem a objemem ovlivňují půdní póry vlastnosti půdní vody, rychlost jejího pohybu a s tím také pohyb látek, čímž je ovlivňován proces pedogeneze. Krom vody působí pórovitost i na vzduch, a to vlivem na jeho obsah v půdě či jeho složení (Kutílek 1978).

### **3.1.5 Půdní vlhkost**

Termínem půdní vlhkost se vyjadřuje množství vody, které půda obsahuje (Pavlů 2019), a které se nachází v prostorách mezi půdními částicemi (Ali 2010). Půdní voda obvykle není volnou vodou, proto se označuje právě jako půdní vlhkost (Lal & Shukla 2004). Na území ČR je výrazně více vody v půdě než ve všech nádržích (Kutílek 1978). Přestože tvoří malý podíl na celosvětových zásobách sladké vody, je důležitou součástí hydrologického cyklu a má významný vliv na řadu hydrologických, biologických a biogeochemických procesů (Dobriyal et al. 2012). Na vlhkosti půdy jsou závislé mechanické vlastnosti půdy, a to například konzistence, hustota, praskání či bobtnání (Susha et al. 2014). Hraje významnou roli v během procesu růstu rostlin (Hora et al. 2011), v organizaci přírodních ekosystémů a biologické rozmanitosti (Susha et al. 2014). Podle Craig (2004) je také vlhkost nezbytnou součástí trojfázového systému půdy. Dostupnost vlhkosti v půdě nepostradatelný aspekt pro koloběh živin, který je předpokladem primární produkce. Půdní vlhkost také ovlivňuje evapotranspiraci půdy, která je klíčovým procesem v klimatickém systému a propojuje koloběh vody, energie a uhlíku (Susha et al. 2014).

Půdní vlhkost může mít následující podoby. Vodu, kterou obsahuje půda v konkrétním okamžiku, vyjadřuje okamžitá vlhkost půdy. Jde o dynamickou veličinu, která závisí na momentálním chodu počasí a také stavu půdy a lze ji určit jako hmotnostní vlhkost ( $w$ ) v hmotnostních % (Kutílek 1978; Lal & Shukla 2004; Vavříček & Kučera

2014), vyjádřením poměru hmotnosti vody a hmotnosti tuhé fáze půdy podle vztahu č. 1 (Kutílek a Nielsen 1994; Pavlů 2019).

$$w = m_w/m_s \text{ (vztah č. 1)}$$

Dle Kutílka (1978) se v této rovnici rovná jmenovatel půdě o vlhkosti nula, čehož se v praxi dosáhne vysušením půdy při teplotě 105 °C. Zmíněný vzorec je zapotřebí z důvodu vyjádření v procentech vynásobit 100 a vzorek půdy, ze kterého je vlhkost zjišťována, může být i porušený (Pavlů 2019).

Veličinu půdní vlhkost lze vyjádřit i pomocí objemových procent, a to vydělením objemu vody a celkového objemu vzorku podle následujícího vztahu č. 2 (Kutílek 1978)

$$\Theta = V_w/V_s \text{ (vztah č. 2)}$$

Z této rovnice vyplývá, že objemová vlhkost udává podíl vody v objemu půdy v procentech. Vyjadřuje, jaký objem mají póry, které jsou zaplněné vodou. Pokud je její hodnota vyšší než hodnota maximální kapilární kapacity, jde o zamokřené stanoviště, na kterém jsou vodou zaplněny vodou kapilární i nekapilární póry (Vavříček & Kučera 2014). Objemová vlhkost vyjadřuje úbytek vody ze známého objemu půdního vzorku, zpravidla fyzikálního válečku o objemu 100 cm<sup>3</sup>. Vzorek pro měření může být neporušený (Pavlů 2018).

### 3.2 Měření vlhkosti

Metody, jak měřit půdní vlhkost, lze rozdělit dle různých hledisek. Jedním z nich je dělení na laboratorní a polní v závislosti na místě, kde bylo měření provedeno. Dále rozdělení metod na destruktivní a nedestruktivní, kdy v prvním případě je zapotřebí odebrat půdní vzorek, zatímco u nedestruktivního způsobu je vlhkost měřena bez zásahu do integrity materiálu (Kutílek 1978). Destruktivní metoda má ovšem své nevýhody. Narušování půdního profilu odběrem vzorků vede ke vzniku makropórů, které poté ovlivňují vodní režim původního půdního profilu. Nedostatkem je též skutečnost, že množství půdní vody nelze na daném místě spolehlivě opakovaně pozorovat, protože dochází k rozdílu mezi hodnotami obsahu vody v půdě po odběru vzorků ve dvou po sobě jdoucích časech kvůli skutečné změně obsahu půdní vody a také heterogenitě půdy. Přesto je tato metoda vhodná v případech, jestliže se měří vlhkost půdy v delších



časových horizontech a také pokud se obsah vody měří ve svrchním horizontu půdy, zvláště při frekventovaném pěstování. Při nedestruktivních metodách se používá senzor, který je trvale umístěn v půdě, pomocí kterého lze měření provádět opakovaně bez narušování půdního profilu a hodnoty obsahu vody v půdě jsou známy ihned po odečtení hodnot ze senzoru (Kutílek & Nielsen 1994). Metody měření vlhkosti půdy se dále dělí podle Kutílka (1978) na přímé a nepřímé, kdy metodou přímou je měřeno množství vody v půdě, naproti tomu nepřímou se zjišťuje určitá fyzikální veličina, a to například elektrický odpor či kapacita, pohlcování  $\gamma$ -záření a jiné. Žádná z metod pro výpočet však zatím nebyla určena jako standartní a všeobecná uznávaná a také neexistuje jednotný způsob výpočtu a interpretace výsledků při měření vlhkosti půdy (Hillel 2003), avšak toto tvrzení je již vyvráceno, jelikož metoda gravimetrická je uznávaná standartní. Tato metoda je založena na přímém měření obsahu vody v odebraných vzorcích, není však použitelná pro kontinuální monitoring.

### **3.2.1 Přímé metody a Gravimetrická metoda**

Jediná přímá a referenční metoda pro stanovení vlhkosti v půdě je metoda gravimetrická. Tato metoda zahrnuje přímý, destruktivní postup (Kutílek & Nielsen 1994) a patří mezi nejpoužívanější způsob měření půdní vlhkosti (Kutílek 1978; Susha et al. 2014). Je jednoduchá, levná a snadno použitelná (Lal & Shukla 2004) a není závislá na půdním typu a obsahu soli (Dobriyal et al. 2014). Z důvodu přesného určení půdní vlhkosti se tato metoda používá jako kalibrační pro ostatní metody měření (Kutílek 1978). Spočívá v odebrání vzorku, který se zváží, vysuší a následně opět zváží. Rozdíl v těchto hodnotách vyjadřuje původní hmotnost vody v půdě (Hillel 2003). Přesnost této metody závisí na správném odběru a vážení. Je zapotřebí po odběru zajistit, aby nedocházelo ke ztrátám vody odtokem či vypařováním mezi odebráním a zvážením (Kutílek & Nielsen 1994) a důležitá je preciznost sušení vzorku. Během tohoto procesu je zapotřebí, aby byly porušeny vazby mezi molekulami vody a půdních částic (Kutílek 1978). Je doporučeno sušit při teplotě 105 °C po dobu 24 hodin, pokud je objem vzorku do 100 cm<sup>3</sup> (Sushi et al. 2014; Dobriyal et al. 2014). Při hmotnosti vzorku 10–20 g postačí 6 hodin (Kutílek 1978). Během sušení v peci ale nemusí dojít k odstranění veškeré vody, což je závislé na obsahu jílovitých minerálů ve vzorku půdy (Hillel 2003). Při zvýšení teploty by ovšem mohlo dojít k nežádoucím účinkům (Kutílek 1978). U organických půd je dostačující teplota 60 °C (Kutílek & Nielsen 1994), 50–70 °C (Sushi et al. 2014), při vyšších teplotách by mohlo docházet k oxidaci organických látek (Hillel 2003). U tohoto typu

půd lze využít vakuové sušárny, která proces sušení urychluje (Kutílek 1978) a díky sníženému tlaku se voda bude vypařovat při nižších teplotách a nebude poškozovat organiku. Mezi nevýhody gravimetrické metody patří časová náročnost, destruktivní charakter (Baláš & Moskalík 2009; Dobriyal et al. 2014) a pracnost odběru vzorků (Hillel 2003). Není vhodná pro dlouhodobé pozorování z důvodu nestálých vlastností stanoviště a tím i vzorků při opakujících se odběrech (Kutílek 1978). Opakované odběry proto není možno provádět, protože se stanoviště poruší natolik, že se změní jeho charakter.

### **3.2.2 Nepřímé metody**

Existuje více nepřímých metod, pomocí kterých lze monitorovat obsah vody v půdě. Jejich využitím je možné zjistit vlhkost půdy formou kalibrovaného vztahu s některou jinou měřitelnou proměnnou (Muñoz-Carpena 2018), jejíž charakteristiky jsou závislé na obsahu vody v půdě (Kutílek & Nielsen 1994). Vzhledem k měřené veličině se nepřímé metody dělí na dvě kategorie, a to volumetrické a tenziometrické. Zatímco volumetrické metody fungují na základě vztahu některé z měřených fyzikálních veličin s objemovou vlhkostí půdy, tenziometrické jsou založeny na principu změny vodního potenciálu půdy. Vlhkost v půdě se v tomto případě zjišťuje pomocí odvození z retenční křivky půdní vody specifickou pro danou půdu, jelikož u různých půdních druhů mají tyto křivky rozdílný charakter (Muñoz-Carpena 2018). Mezi měřené veličiny patří například elektrický odpor, relativní permitivita půdy, objemová vlhkost a jiné (Vaněk 2021). Volumetrické lze rozdělit na princip radiometrie, ze kterého vychází metody gamaskopická a neutronová a dielektrický princip, při kterém záleží na míře propustnosti půdy a rychlosti průniku elektromagnetických vln skrze půdu. Do tohoto principu řadíme metody kapacitní, TDR, TDT a metodu fázového posunu (Charlesworth 2005). TDT zařízením je například TSM-4, což je již čtvrtá generace tohoto typu přístroje (Wild et al. 2019). Vybrané nepřímé metody jsou popsány níže.

### **3.2.3 Odporová metoda**

Mezi nepřímé metody k určení půdní vlhkosti patří odporová metoda. Ta je nedestruktivní a funguje na principu změny elektrického odporu půdy se změnou půdní vlhkosti (Kutílek & Nielsen 1994). Je zde zapotřebí umístit dvě elektrody tak, aby byly v kontaktu s měřenou půdou a byl umožněn volný průchod elektrického proudu. K ukotvení elektrod lze využít sádrových či nylonových bločků, které umožní přesnou

geometrii uložení a dokonalý kontakt. Sádrové bločky stabilizují pH půdního roztoku, aby chemické změny příliš nepůsobily na vodivost. Kvůli minimalizaci polarizačního napětí se využívá slaboproud nebo proud střídavý a měření lze zajistit pomocí různých měřičů odporu. Nevýhoda této metody spočívá ve velké nepřesnosti měření s rostoucí vlhkostí vzorku z důvodu nelineární závislosti na odporu. Zároveň je třeba počítat s vlivem změn teplot na výsledek přesnosti měření (Kutílek 1978).

### 3.2.4 Kapacitní metoda

Kapacitní metoda je relativně nová, nedestruktivní nepřímá elektrická metoda založena na principu kondenzátoru, kde půda zastává funkci dielektrika mezi dvěma elektrodami. Její základní podstatou je neobvykle vysoká relativní permitivita vody (Kutílek 1978; Hillel 2003) a závisí na polarizaci jejích molekul v elektrickém poli (Kutílek & Nielsen 1994). Funguje tedy na základě změny relativní permitivity půdy s měnící se vlhkostí a pro účely měření je půda vložena do slabého proměnného elektrického pole (Kutílek 1978). Relativní permitivita je bezrozměrná jednotka větší než 1, značená řeckým písmenem  $\epsilon$  (*epsilon*) (Kalvová & Velický 2006), vyjadřující vztah mezi kapacitním odporem kondenzátoru s danou látkou jako dielektrikem a kapacitním odporem stejného kondenzátoru, kde je jako dielektrikum využito vzduch nebo vakuum (Hillel 2003). Pomocí měření permitivity půdy lze odhadnout hodnotu  $\Theta$ , a proto se touto metodou zjišťuje přímo  $\epsilon$  nebo hodnota elektrického parametru závislého na  $\epsilon$  (Kutílek & Nielsen 1994). Důležitým aspektem pro tuto metodu je velký rozdíl mezi permitivitou suché půdy, dosahující hodnot od 2 do 5 (Susha et al. 2014), Kutílek & Nielsen (1994) udávají hodnotu 4-8, popřípadě 4-5 (Kutílek 2012) a čistou vodou, jejíž hodnota dosahuje hodnoty 81 při teplotě 18 °C (Susha et al. 2014; Kutílek 1978; Kutílek & Nielsen 1994). Využívá se plastová přístupová trubice, která se vertikálně aplikuje do půdy či alternativní verze sondy, u které jsou použita statická čidla v půdě pro nepřetržitý záznam vlhkosti půdy (Bell 1987). Měření lze provést pomocí některého ze způsobů slaboproudé elektrotechniky, které jsou vhodné pro malé kapacity a velké ztrátové úhly (Kutílek 1978) s vyšší frekvencí v řádu desítek MHz (Kutílek & Nielsen 1994), čímž se omezí působení iontové vodivosti dielektrika a tím i vliv ztrátového úhlu na měření (Kutílek 1978). Jednodušší a vhodnější přístroj je rezonanční měřič na zjištění relativní permitivity půdy zachycující rezonanční frekvence (Kuráž et al. 1970), který je navíc nedestruktivní (Kutílek 1978).

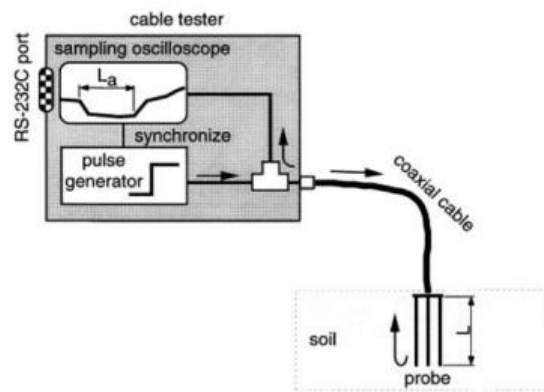
Mezi výhody kapacitní metody se řadí její přesnost, kvalitní hloubkové rozlišení, poměrně nízká cena, snadné zaznamenávání výstupního signálu automatickým datovým záznamníkem a také téměř okamžité získání údajů, přičemž nedochází k náhodné chybě při měření. Nevýhodou je nutná kalibrace, jelikož je méně lineární a tím i hůře aplikovatelná a také citlivost na nepravidelnosti či dutiny v okolí trubice. Například u bobtnajících půd vznikají trhliny mezi přístupovou trubicí a materiálem, které se chovají jako makropóry a obsahují pouze vzduch, pokud nejsou zaplaveny, významně přispívají k permitivitě půdy a činí měření nepřesné. Je také důležitá precizní aplikace trubice, aby se zamezilo výskytu chyb (Bell 1987; Kutílek & Nielsen 1994).

### 3.2.5 TDR – time domain reflektory

TDR je zkratkou z termínu *Time Domain Reflectometry* a jedná se o nejčastěji užívanou elektromagnetickou nedestruktivní metodu (Dobriyal et al. 2012; Kutílek 2012). Patří mezi senzory zachycující průchod elektrického impulsu vodou (Pavlu 2018) a postupem času se TDR stalo obecně přijímaným způsobem měření obsahu půdní vlhkosti (Shukla et al. 2014). Tato metoda funguje na principu, kdy je vysokofrekvenční elektrický puls v půdě více zpomalovaný s rostoucí permitivitou celkového objemu půdy, tudíž s rostoucí vlhkostí půdy (Kutílek 2012). Měří se zpoždění mezi dopadajícími a odraženými elektromagnetickými impulsy, které se šíří skrze sondy či vodiče (Shukla et al. 2014). Rychlost impulsu se koreluje s půdní vlhkostí a nižší rychlost značí vlhčí půdu (Dobriyal et al. 2012). Měřič viz. obrázek 3.4 je napojen pevně na dvě či tři vodičí tyčky, které se umísťují do půdy, viz obrázek 3.3. Uvnitř měřiče se nachází generátor pulsu. Abychom mohli určit vlhkost, potřebujeme kalibrační křivku vyobrazující závislost půdní vlhkosti na měřené hodnotě. Případně lze tuto křivku zakomponovat do přístrojové paměti a půdní vlhkost pak zjišťujeme přímo z displeje měřiče. Metoda je vhodná pro dlouhodobé sledování. V tomto případě se sonda pevně ukotví v půdě a přiložením kabelu k měřiči je pak kdykoliv možné zjistit aktuální vlhkost půdy (Kutílek 2012).

Výhodou této metody je zmíněná možnost dlouhodobého měření a rychlost pořízení výsledků (Shukla et al. 2014). Tato technika není příliš náročná na práci, jak lze vidět na obrázku 3.5, měřicí přístroj je přenosný, přesný s chybovostí  $\pm 1\%$  a snadno se aplikuje včetně kalibrace na odlišené půdní typy (Dobriyal et al. 2012), jelikož je na nezávislá na struktuře půdy, teplotě a obsahu soli (Shukla et al. 2014). Také je bezpečná a zachovává přirozený stav půdy (Kutílek 2012).

Nevýhodou tohoto přístroje je cena. Ve vysoce zasolených půdách může docházet ke zkreslení, jelikož vyšší koncentrace soli v půdě zapříčiňuje větší vodivost, a tím se i větší část elektrického signálu ztrácí do okolní půdy. Nevýhodou je také zvýšená vodivost s rostoucí půdní vlhkostí (Kutílek & Nielsen 1994; Shukla et al. 2014).



Obrázek 3.3 - Schéma systému TDR (Noborio, 2001)



Obrázek 3.4 – senzor TDR se třemi hroty (URL č.3)



Obrázek 3.5 – Ukázka měření půdní vlhkosti se senzorem TDR (URL č.4)

### 3.2.6 TDT – time domain transition

Metoda TDT neboli *Time Domain Transition* (Pavlů 2018), stejně jako TDR zjišťuje permitivitu materiálu na základě rychlosti šíření elektromagnetického signálu podél páru elektrod a stala se v nedávné době komerčně dostupná v digitální formě a její operační frekvence v odlišných půdních texturách je podobná jako u metody TDR (Blonquist et al. 2005; Robinson et al. 2008). Ovšem s tím rozdílem, že u TDT se elektromagnetické impulsy neodráží zpět, ale měří se jednosměrný čas mezi vysláním a přijetím impulsu skrze přenosové vedení viz obrázek 3.6. Nejedná se tedy o vedení otevřené jako u TDR. U TDT je navíc přenosové vedení jednodušší (Muñoz-Carpena 2018). Podle Blonquista et al. (2005) zvyhodňuje TDT senzor oproti TDR přítomnost speciální elektroniky v sondě, která redukuje omezení a překovává útlum, proto není potřeba dlouhých souosých kabelů jako u TDR a TDT je také oproti druhé zmíněné metodě levnější.

Podle Pottera et al. (2013) jsou v mnoha ekologických studiích chybně zahrnuty klimatické údaje, které vycházejí z měření z meteorologických stanic, a to z důvodu, že tyto stanice nezachycují skutečné prostředí, kde organismy žijí a výsledky proto mohou být více či méně zkreslené. Problémy jsou však i s nástroji na měření vlhkosti v dlouhodobém časovém horizontu (Robinson et al. 2008). Mezi ně patří například poměrně častá poruchovost (Wild et al. 2019) a omezená velikost paměti či kapacita baterie u dataloggeru neboli datového záznamníku (Letten et al. 2013). Z důvodu snahy o eliminaci těchto nedostatků byl vyvinut a otestován nový mikroklimatický datalogger, jehož název zní Temperature-Moisture-Sensor se zkratkou TMS. Kompaktně spojuje

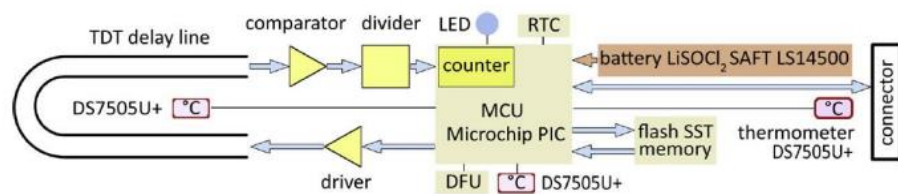
senzory na měření teploty vzduchu, půdy a její vlhkosti s vylepšenou výdrží baterie a zdokonalenou kapacitou paměti (Wild et al. 2019).

Konstrukce vychází z napodobení 15 cm vysoké byliny, v jejímž okolí jsou měřeny klimatické podmínky. Tři teplotní senzory jsou umístěny v různých výškách (-8, 0, 15) cm jako simulace odlišných částí rostlin pro zachycení různých teplot (vzduchu, povrchu a půdy). Sonda má i svou spodní část, která měří objemovou vlhkost půdy, a to do hloubky asi 14 cm. Přístroj je zkonstruován na modelu menší byliny, rozsah jeho využití může být ve skutečnosti mnohem širší včetně jiných organismů. Skládá se ze spodní a vrchní části, ve které je umístěná elektronika zařízení včetně USB konektoru pro export dat. Životnost díky lithiové baterii při dodržení výchozích intervalů sběru dat dosahuje 15 let (Wild et al 2019).

K měření obsahu vody v půdě se u TMS využívá metoda TDT (Wild et al. 2019), která patří mezi časté metody měření obsahu půdní vody na základě dielektrické permitivity (Blonquist et al. 2005). Impulsy jsou zde vysílány skrze přibližně 30 centimetrů dlouhý obvod (Wild et al. 2019) a proces probíhá dle popisu uvedeného v kapitole TDT.

Výhodou při využívání TMS je, že měří půdní vlhkost a teplotu půdy, povrchu a vzduchu zároveň. Další výhodou je možnost dlouhodobého pozorování v horizontu několika let, a to i v extrémních podmínkách. TMS přináší výsledky, které zahrnují i působení biologických procesů. Navíc nevyžaduje častou obsluhu a je také levnější než TDR metoda.

Mezi nevýhody, které se ale projevují i u vlhkostních senzorů jiného typu, patří časté poškozování zvěří a složitější aplikace v kamenitých půdách, jelikož může dojít k narušení funkcí přístroje vlivem mechanického poškození (Wild et al. 2019).



Obrázek 3.6. – Schéma elektronických komponentů v senzoru TMS a jejich vzájemná komunikace (Wild et al., 2019)

## 4 Metodika

### 4.1 Standardizace a osazení senzorů

Za účelem porovnání hodnot signálů vlhkostního čidla v rámci odlišných sérií senzoru TMS bylo provedeno laboratorní měření a porovnání ve čtyřech různých prostředích. Pro laboratorní testování bylo vybráno celkem 5 výrobních sérií TMS, obsahující senzory ze 3 vývojově odlišných verzí: TMS3, TMS4 (2 série) a TMS5 (2 série). Nejstarší model, který byl k dispozici je verze TMS3, od kterého byla k dispozici pouze jedna série. Následně prošel sensor vývojem, kde byla především změněna konstrukce teplotních senzorů viz. Obrázek 4.1, ale zároveň i firmware vlhkostního čidla. (Wild *et al.*, 2019). Dále byl v průběhu výroby TMS4 změněn dodavatel desek na výrobu tištěných spojů pro vlhkostní sensor. Z tohoto důvodu jsou zde vylišeny 2 série TMS4 A (z roku 2019) a TMS4 B (z roku 2022 s jinou verzí desky). V nejnovější verzi, označené zde pracovním jako – TMS5 extreme, jsou pro výřezy vlhkostních senzorů používány pouze středy desek, které mají přesněji zachovány uniformní šířku desky. Ze série TMS5 byly opět vybrány dvě série. Takto bylo vybráno tedy celkem 5 sérií (podrobně popsanych v tabulce 4.1) Výběr byl proveden za účelem testování, zda dochází s vývojem senzoru ke snížení nežádoucí variability mezi senzory.

Tabulka 4.1 – Popis jednotlivých sérií TMS

Popis jednotlivých sérií senzorů TMS					
označení série	TMS3 A	TMS4 A	TMS4 B	TMS5 A	TMS5 B
výrobní číslo (první trojčíslí)	931	941	942	952	952
výrobní číslo (min a max)	93148337 - 93148351	94192201 - 94192230	94249011 - 94249042	95228801 - 95228850	95228101 - 95228110
datum výroby	02.12.2014	04.03.2019	14.10.2022	27.09.2022	06.09.2022
význačná charakteristika	nejstarší senzory ze 3.série	deska neřešena různá šířka desky	nejnovější TMS4, nová deska pro měření vlhkosti, lepší způsob lisování desky, uniformnější šířka	nejnovější typ, eliminace okrajového efektu desky použitím pouze	nejnovější varianta extreme
počet senzorů který byl testován	9	27	24	50	10
poznámka		použito v terénu			



Standardizace je prováděna za účelem porovnání hodnot z jednotlivých senzorů. K tomuto procesu byla použita čtyři prostředí, a to vzduch, demineralizovaná voda, suché skleněné kuličky a nasycené skleněné kuličky. Na začátek byl každý senzor samostatně připojen přes USB čtečku k PC, kde byla v programu načtena veškerá naměřená data tímto senzorem už od jeho vyrobení a zároveň zde mohla být provedena konfigurace přístroje. Interval byl změněn na minutový krok. Takto byl změněn časový interval u všech kusů.

Poté už mohlo začít samotné měření, nejdříve bylo provedeno měření ve vodě viz obrázek 4.3 a obrázek 4.4. Byly naplněny 4 kbelíky destilovanou vodou, za každý z nich se postavil stojan s dvěma držáky, do kterých se usadily samotné senzory. Tudíž mohlo být měřeno 8 senzorů najednou. Měnily se po 5 minutách, abychom získali více než 3 hodnoty. Následně proběhlo měření senzorů v dalších prostředích – suchých a nasycených skleněných kuličkách viz obrázek 4.5, které zajišťují porézní homogenní materiál podobný vlastnostem půdy.

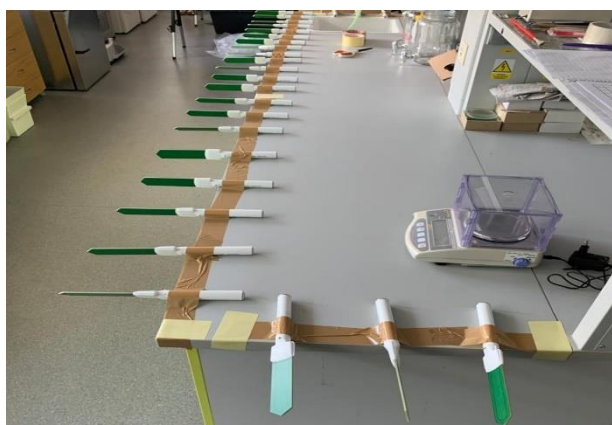
Poté byly všechny senzory důkladně očištěny a vysušeny od vody a následně byly přilepeny lepící páskou ke stolu pro měření hodnot ve vzduchu viz obrázek 4.2. Páska musela být vedena tak, aby nepřekrývala žádný ze tří teplotních senzorů, takže byla nalepena mezi střední a horní senzor.

Senzory byly ponechány k měření do dalšího dne, abychom měli co nejvíce dat pro porovnání případných výkyvů.

Další den byly senzory odlepeny a pracovní plocha uklizena, poté už jen zbývalo je opět připojit k PC a stáhnout z nich naměřená data, exportovat je do excelu, a nakonec je zpracovat. Tímto způsobem byla provedena standardizační měření pro všechny série senzorů. Celkem bylo změřeno 120 senzorů v 5 výrobních sériích.



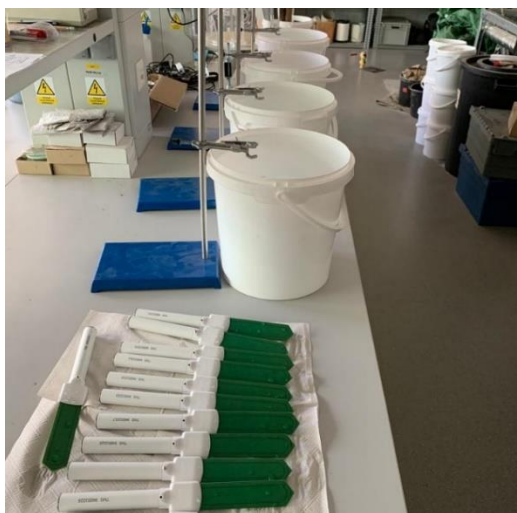
Obrázek 4.1 – Srovnání různých verzí zařízení TMS. TMS1 – vlevo, TMS3 – uprostřed, TMS4- vpravo, polohy teplotních čidel jsou označené žlutými kroužky (Wild et al., 2019)



Obrázek 4.2 - Rozmístění senzorů na pracovní desce při měření signálu vzduchu (autor)



Obrázek 4.3 – Uchycení senzorů ve stojanu při měření signálu demineralizované vody (autor)



Obrázek 4.4 – Soustava stojanů a nádob s demineralizovanou vodou při měření (autor)



Obrázek 4.5 – Měření signálu v suchých a nasycených kuličkách (autor)

Po analýze výsledků standardizace byla vybrána série TMS4 A, jenž vykazovala vysokou rozkolísanost hodnot danou nežádoucí výrobní variabilitou. U těchto senzorů byl proveden pokus o snížení nežádoucí variability signálu pomocí stanovení korekce. Osazení senzorů z této série (TMS4 A) proběhlo v lesní půdě na lokalitě Amálie v červnu 2022. Po čtyřech měsících byla naměřená data stažena a využita pro testování korekčních metod. Osazení senzoru proběhlo i pro účely dalších experimentů probíhajících na lokalitě Amálie v rámci souběžně zpracovávané studentské práce (Kirchhof 2023). Zde bylo třeba vybrat dva stromy, představující typického jedince. Byl vybrán jeden smrk ztepilý (*Picea abies*) viz. obrázek 4.6 a jeden buk lesní (*Fagus sylvatica*) viz. obrázek 4.7. Na samotné osazování bylo třeba použít předražedlo, kterým byl vytvořen otvor pro samotný senzor, důležité bylo zajistit dobrý kontakt senzoru s půdou. K oběma stromům se v několika od sebe odsazených kruzích usadilo 13–14 senzorů, jak lze vidět na

obrázcích 4.8, 4.9 a 4.10. Nakonec se každý senzor přikryl klecí viz obrázek 4.11, která ho má chránit před poškození od lesní zvěře např. prasete divokého (*Sus scrofa*). Data z těchto senzorů byla následně využita pro analýzu signálu, který je funkčně závislý na vlhkosti půdy. Pro standardizaci signálu bylo náhodně vybráno 5 senzorů ze série TMS4.



Obrázek 4.6 – Výběr reprezentativního zástupce jehličnatého porostu (autor)



Obrázek 4.7 – Výběr reprezentativního zástupce listnatého porostu (autor)



Obrázek 4.8 – Rovnoměrné rozmístění senzorů kolem reprezentativního jedince (autor)



Obrázek 4.9 – Osazení senzorů i s ochranou klecí (autor)



Obrázek 4.10– Osazení senzorů kolem druhého reprezentativního stromu, ještě před instalací ochranných klecí (autor)



Obrázek 4.11– Detail na zabezpečení senzoru ochrannou klecí (autor)

## 4.2 Zpracování dat

Další část práce už probíhala mimo terén. Tentokrát bylo zapotřebí nejprve provést porovnání dat z pěti odlišných sérií senzorů ve čtyřech různých prostředích (vzduch, demineralizovaná voda, suché kuličky a nasycené kuličky). Potřebná data byla stažena ze senzorů a poté převedena do MS Excel. Vstupní data byla od každého série: kód senzoru, signál z každého ze čtyř prostředí a tři teplotní hodnoty z každého prostředí.

Dále byly vytvořeny čtyři tabulky, ve kterých byl pro všech pět sérii ve všech čtyřech prostředích spočítán průměr, medián, maximální hodnota, minimální hodnota, směrodatná odchylka, koeficient variace (CV) ze staženého signálu surového vlhkostního signálu TMS a celkový počet senzorů v sérii a průměrné teploty pro každý ze tří teplotních čidel na senzoru.

V dalším kroku byly vytvořeny krabicové grafy tzv. box-ploty, na kterých je možno vidět srovnání vlhkostních signálů opět ze všech sérií senzorů ve všech prostředích. Všechny série jsou barevně rozlišeny.

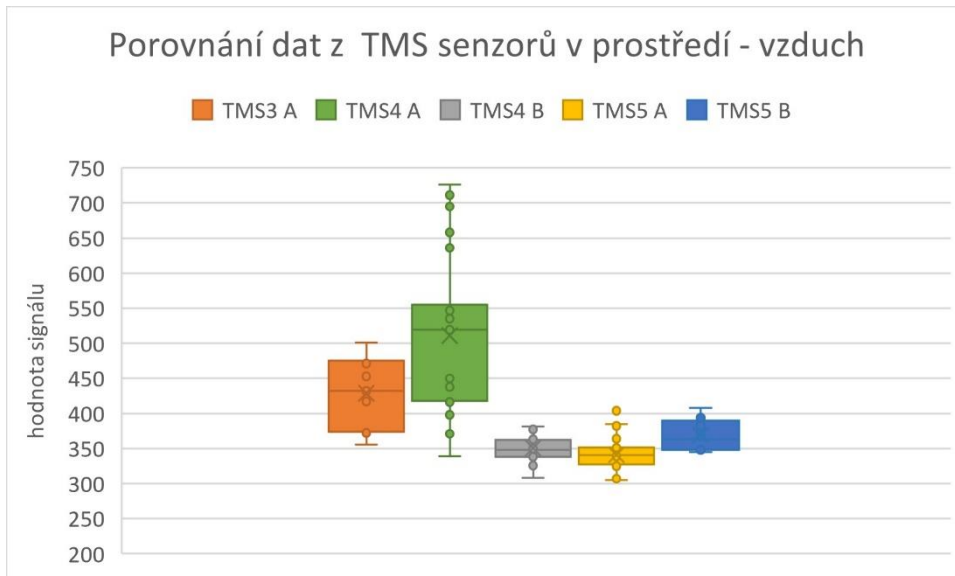
Na závěr byla provedena standardizace signálu jednotlivých senzorů různými korekčními metodami. Byla pro ni vybráno náhodně 5 senzorů ze série TMS4 A, která byla výrazně rozkolísaná a snížení nežádoucí výrobní variability zde tedy bylo potřebné. Na základě měření ve čtyřech prostředích, popsanych v úvodu bylo navrženo sedm metod korekce signálu (vzduch, demineralizovaná voda, suché kuličky, nasycené kuličky, poměr kuliček suché/nasycené 50/50, poměr 30/70 a poměr 70/30. Korekce jsou založeny na vypočtení rozdílu signálu konkrétního senzoru naměřeného v prostředí a

dlouhodobého průměrného standardu v daném prostředí a následně úpravě signálu o stanovený rozdíl. Tyto standardy signálu byly zvoleny následovně: (vzduch = 340, demineralizovaná voda = 3670, suché kuličky = 840, nasycené kuličky = 3470, poměr 50/50 = 2155, poměr 30/70 = 2681, poměr 70/30 1629). Tímto způsobem byla stanovena odchylka senzoru od standardu. Vzduch byl zvolen vzhledem ke snadnému měření s nižší časovou náročností. Demineralizovaná voda proto, že voda se v terénu se v půdní složce velice často vyskytuje, takže její hodnoty signálu musíme také testovat a suché a nasycené kuličky nejlépe simulují půdní prostředí, zvláště pak jejich vypočítaná průměrná hodnota. Byla stažena data ze senzorů z terénu a podle dat, která byla zvolena, provedena korekce. Korekci děláme tak, že data, která byla naměřena v terénu odečteme od dat, která byla zvolena jako standard a o výslednou korekci byl změněn signál. Takto byl signál změněn celkem sedmkrát, jelikož byla korekce provedena celkem v sedmi prostředích: voda, vzduch, suché kuličky, nasycené kuličky a tři poměry ze suchých a nasycených kuliček. Poměr suchých a nasycených kuliček děláme proto, že je to nejpodobnější simulace skutečného prostředí v terénu. Výsledky korekcí byly zobrazeny nejen v tabulkách, ale i v bodových grafech s vyhlazenými spojnicemi.

Vyhodnocení kvality korekce bylo provedeno konstrukcí tabulky 5.5, kam byla vložena veškerá vypočtená data důležitá pro vytvoření vhodné korekce sloužící k snížení nežádoucí výrobní variability signálu. Bylo zpracováváno osm signálů, z nichž sedm bylo upravených každý jinou korekcí. Odečtením minimální hodnoty od maximální hodnoty byl pro každý signál vypočítán rozsah. Poté byl pro každý signál spočítán koeficient variace (CV). Tato hodnota byla získána vydělením směrodatné odchylky průměrem a následně vynásobením stem. Tyto dvě hodnoty byly spočítány pro každý signál a zařazeny do sloupců v již zmiňované tabulce 5.5, kde se dále tyto hodnoty srovnaly v dalších dvou sloupcích od nejhorší po nejlepší. V dalším sloupci byl součet těchto dvou pořadníků a tím jsme získali přehled o tom, jak která korekce signálu dopadla. V posledním sloupci bylo zobrazeno konečné pořadí korekcí. Námi byla vybrána jako nejlepší korekce č.3 (poměr suchých a nasycených kuliček 50/50).

## 5 Výsledky

### 5.1 Porovnávání sérií vlhkostních senzorů v různých prostředích



Obrázek 5.1 – Porovnání dat z TMS senzorů v prostředí vzduch

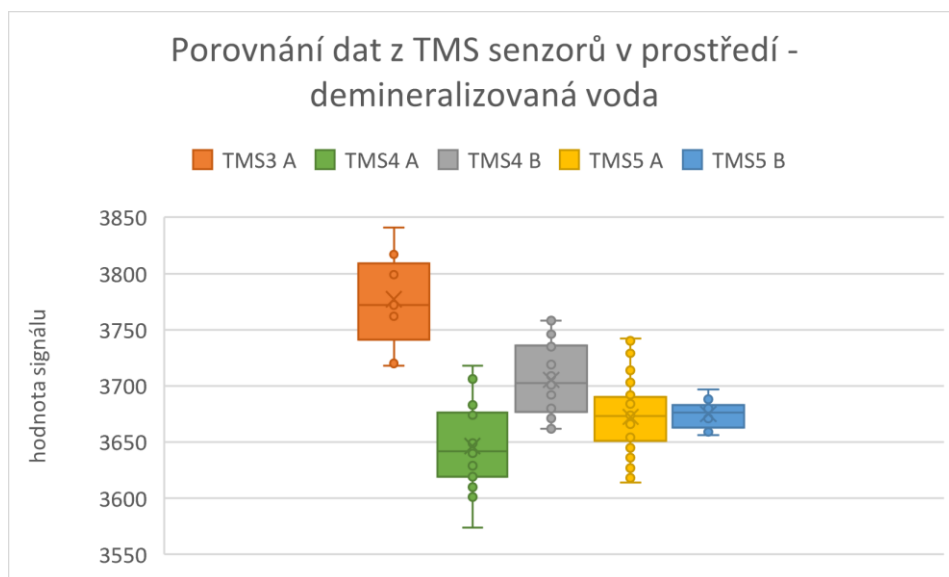
Na obrázku 5.1 můžeme vidět graf, který znázorňuje naměřené hodnoty v prvním prostředí – vzduchu. Jednotlivé série – TMS3 A, TMS4 A, TMS4 B, TMS5 A, TMS5 B jsou znázorněny ve formě krabicových grafů (boxplotů). Jak můžeme dále vidět, v rámci série TMS3 A a TMS4 A byly naměřeny vyšší hodnoty signálu než ve zbývajících sériích. Je tedy zřejmé, že u nich dochází k výraznému nadhodnocení signálu. Z hlediska rozkolísanosti jednotlivých sérií, můžeme u TMS4 A pozorovat nejvyšší variabilitu hodnot signálu (maximum – minimum), téměř 400 jednotek signálu. Druhá nejvyšší variabilita se nachází u série TMS3 A. Zbylé série mají výrazně nižší variabilitu nepřesahující 100 jednotek signálu.

Tabulka 5.1 – Základní statistické výpočty z 5 sérií senzorů v prostředí vzduch

vzduch	TMS3 A	TMS4 A	TMS4 B	TMS5 A	TMS5 B
průměr	428,56	510,89	350,50	340,92	369,40
medián	432	519	348,50	340,50	363,50
max	501	726	381	404	408
min	356	339	308	305	345
rozsah	145	387	73	99	63
směrodatná odchylka	51,92	114,27	18,71	20,48	22,26
CV (%)	12,11	22,37	5,34	6,01	6,03
počet senzorů	9	27	24	50	10
teplota $\varnothing$					
T1	20,22	21,66	20,23	19,43	21,55
T2	20,17	21,60	20,46	19,65	21,97
T3	20,62	21,68	20,63	19,79	21,86



V tabulce 5.1 jsou číselně vyjádřeny základní popisné statistiky v rámci každé série. Dále je uvedena průměrná hodnota teploty pro jednotlivá teplotní čidla T1, T2, T3, které byly zaznamenány v průběhu měření signálu ve vodě. Vzhledem k tomu, že měření jednotlivých sérií neprobíhalo v jeden den, můžeme pozorovat rozdíly v těchto hodnotách. Nejnižší koeficient variace byl v prostředí vzduch změřen u série TMS4 B a nejnižší rozsah u série TMS5 B.



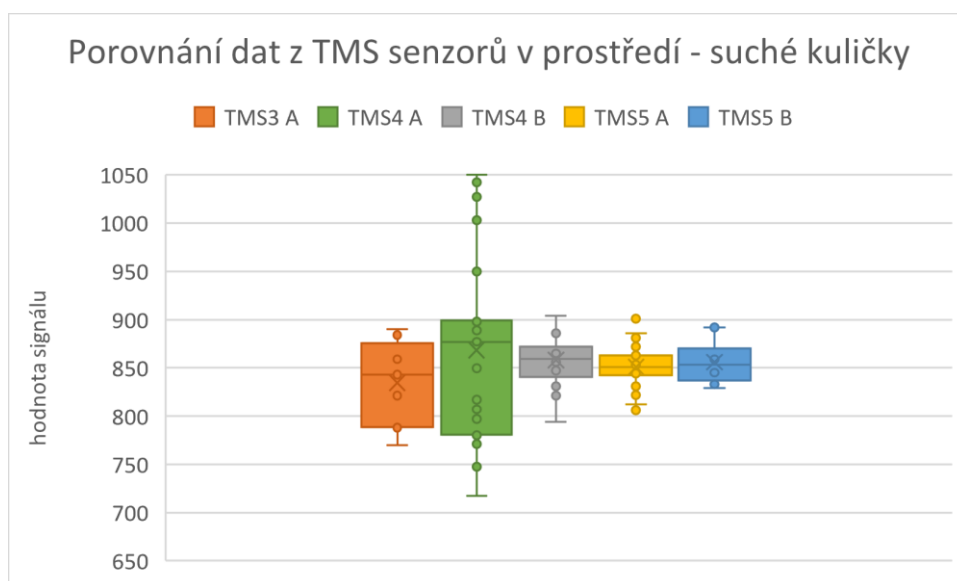
Obrázek 5.2 – Porovnání dat z TMS senzorů v prostředí demineralizovaná voda

Na obrázku 5.2 můžeme vidět graf, který znázorňuje naměřené hodnoty v druhém prostředí – demineralizované vodě. Je zřejmé, že série TMS3 vykazuje opět nejvyšší hodnoty signálu ze všech sérií, tudíž můžeme konstatovat, že i v tomto prostředí dochází k nadhodnocování signálu. Dále můžeme vidět, že série TMS4 A vykazuje v tomto prostředí mírně nižší hodnoty než všechny ostatní skupiny, tudíž mírně podhodnocuje. Z hlediska rozkolísanosti jednotlivých sérií je zde výrazně menší variabilita než u grafu č.1, jelikož nejvyšší variabilitu zde vidíme u série TMS4 A, přibližně 140 hodnot signálu. Série TMS3 A a TMS5 A mají všechny variabilitu 120-130 hodnot signálu, přičemž ale v sérii TMS5 A je více senzorů, takže vykazuje nižší koeficient variace. Poslední série TMS5 B má variabilitu suverénně nejmenší, její hodnota signálu je 41.

Tabulka 5.2 – Základní statistické výpočty z 5 sérií senzorů v prostředí voda

voda	TMS3 A	TMS4 A	TMS4 B	TMS5 A	TMS5 B
průměr	3777,11	3646,41	3705,46	3672,40	3674,90
medián	3772	3642	3702,50	3673	3676,50
max	3841	3718	3758	3742	3697
min	3718	3574	3662	3614	3656
rozsah	123	144	96	128	41
směrodatná odchylka	39,31	35,16	30,68	30,54	12,14
CV (%)	1,04	0,96	0,83	0,83	0,33
počet senzorů	9	27	24	50	10
teplota ∅					
T1	20,70	21,19	20,09	19,91	21,10
T2	21,05	21,84	20,21	20,25	21,81
T3	21,44	23,02	20,74	20,44	21,89

V tabulce 5.2 je opět přehledně uvedena popisná statistika, vypočtená v rámci jednotlivých sérií. Signál v tomto prostředí dosahoval dle předpokladů nejvyšších hodnot. Dále je uvedena průměrná hodnota teploty pro jednotlivá teplotní čidla T1, T2, T3, které byly zaznamenány v průběhu měření signálu na vzduchu. Vzhledem k tomu, že měření jednotlivých sérií neprobíhalo v jeden den, můžeme pozorovat rozdíly v těchto hodnotách. U série TMS5 B byl v prostředí voda naměřen nejnižší koeficient variace a rozsah.



Obrázek 5.3 – Porovnání dat z TMS senzorů v prostředí suché kuličky

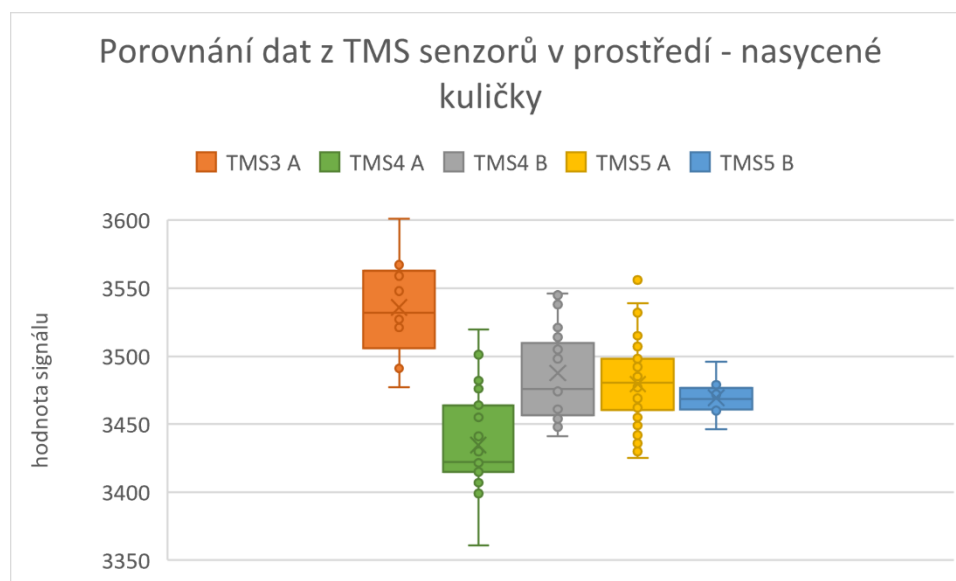
Obrázek 5.3 nám představuje graf, který znázorňuje naměřené hodnoty v třetím prostředí – suchých kuličkách. Hodnoty signálu mají u všech sérií podobné střední hodnoty. Hodnoty mediánů se u všech sérií pohybují okolo 850. Přesto nejvyšší naměřené hodnoty můžeme znovu vidět u série TMS4 A. Z hlediska rozkolísanosti jednotlivých sérií je na tomto grafu na první pohled vidět, že nejvyšší variabilitu má opět série TMS4 A, konkrétně necelých 300 jednotek signálu, vyšší rozdíl měla tato série už jen na grafu č.1 viz obrázek 5.1 v prostředí vzduch, kde byla její hodnota přibližně 400. Zároveň je

ale nutné konstatovat, že je to především způsobeno těmi čtyřmi senzory, které oproti ostatním nadhodnocovaly. Rozkolísanost hodnot u sérií TMS3 A, TMS4 B, TMS5 A se pohybuje okolo 100 jednotek signálu. Nejmenší variabilitu má opět série TMS5 B a to hodnotu signálu 63. U série TMS5 A se vyskytly odlehlé hodnoty (outliery), jsou to hodnoty, které nejsou podobné ostatním a vyčnívají z mezních hodnot série. V tabulce č.3 můžeme opět vidět základní popisné statistiky v rámci každé série, v tomto případě se jednalo o prostředí suchých kuliček, které mělo naměřenými hodnotami nejbližší ke vzduchu. Z nichž pro nás byla nejdůležitější hodnota mediánu a také rozdílová hodnota mezi maximem a minimem.

Tabulka 5.3 – Základní statistické výpočty z 5 sérií senzorů v prostředí suché kuličky

suché kuličky	TMS3 A	TMS4 A	TMS4 B	TMS5 A	TMS5 B
průměr	834,56	868,39	858,08	850,78	856
medián	843	877	859	851	853,50
max	890	1050	904	901	892
min	770	717	794	806	829
rozsah	120	333	110	95	63
směrodatná odchylka	41,94	95,19	24,79	19,10	21,08
CV (%)	5,03	10,96	2,89	2,24	2,46
počet senzorů	9	27	24	50	10
teplota $\varnothing$					
T1	20,99	21,50	20,31	20,09	21,35
T2	21,14	21,76	20,65	20,41	22,15
T3	21,72	22,48	20,59	20,38	21,99

Tabulka 5.3 ukazuje přehled výpočtů pro jednotlivé série v prostředí suchých kuliček. Rozsah byl zde nejnižší u série TMS5 B zatímco koeficient variace byl nejnižší u starší série a to TMS5 A.



Obrázek 5.4 – Porovnávání dat z TMS senzorů v prostředí nasycené kuličky

Na obrázku 5.4 můžeme vidět graf, který znázorňuje naměřené hodnoty ve čtvrtém prostředí – nasycených kuličkách. Jak můžeme vidět, tak série TMS3 A naměřila stejně tak jako v grafu č.2 nejvyšší hodnoty. Je tedy zřejmé, že zde opět dochází k nadhodnocování signálu. U série TMS4 A byly naopak naměřené hodnoty nejnižší, což opět kopíruje trend grafu č.2. Série TMS4 B a TMS5 A jsou si opět nejbližší, stejně tomu bylo na vzduchu a v suchých kuličkách. U série TMS5 A se stejně tak jako u předchozího grafu 5.3 vyskytuje odlehlá hodnota. Nejvyšší variabilita je u série TMS4 A jde o necelých 160 jednotek signálu. U sérií TMS3 A, TMS4 B a TMS5 A je to podobné, rozkolísanost se u těchto tří sérií se pohybuje okolo 120 jednotek signálu. Nejmenší variabilita je stejně tak jako u všech předchozích grafů u série TMS5 B, konkrétně necelých 50 jednotek signálu. V tabulce č.4 vidíme základní statistické výpočty, tentokrát v prostředí nasycených kuliček. Zde se hodnoty dle očekávání nejvíce ze všech měřených prostředí podobaly tomu ve vodě.

Tabulka 5.4 – Základní statistické výpočty z 5 sérií senzorů v prostředí nasycené kuličky

nasycené kuličky	TMS3 A	TMS4 A	TMS4 B	TMS5 A	TMS5 B
průměr	3535,89	3434,63	3487,50	3479,52	3469,30
medián	3532	3422	3476	3480,50	3468,50
max	3601	3519,5	3546	3556	3496
min	3477	3361	3441	3425	3446
rozsah	124	158,5	105	131	50
směrodatná odchylka	36,04	35,39	31,33	28,68	12,75
CV (%)	1,02	1,03	0,90	0,82	0,37
počet senzorů	9	27	24	50	10
teplota $\varnothing$					
T1	20,17	21,65	20,21	19,97	21,28
T2	19,75	21,73	20,35	20,01	22,02
T3	20,92	22,33	20,74	20,71	21,99

Tabulka 5.4 je poslední tabulkou ukazující statistické výpočty pro jednotlivé série tentokrát v prostředí nasycených kuliček. Nejnižší rozsah zde byl opět u série TMS5 B, která měla v tomto prostředí i nejnižší koeficient variace.

Nejvyšší naměřené hodnoty podle prostředí: vzduch = 726 (TMS4 A)

voda = 3841 (TMS3 A)

suché kuličky = 1050 (TMS4 A)

nasycené kuličky = 3601 (TMS3 A)

Nejnižší naměřené hodnoty podle prostředí: vzduch = 305 (TMS5 A)

voda = 3574 (TMS4 A)

suché kuličky = 717 (TMS4 A)

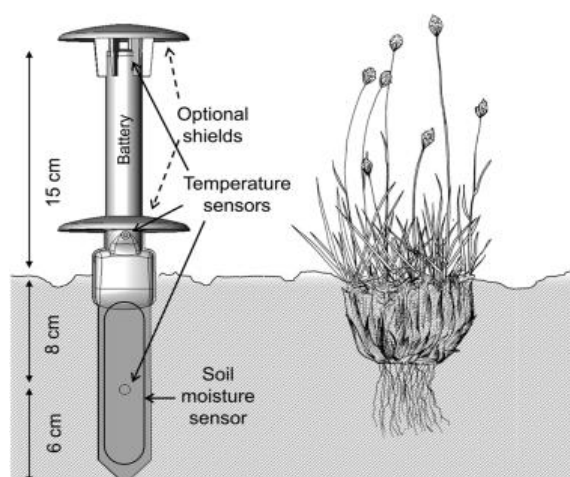
nasycené kuličky = 3361 (TMS4 A)

Z hlediska rozkolísanosti byla naměřena největší hodnota u série TMS4 A v prostředí vzduch a bylo to 387 jednotek signálu. Naopak nejmenší hodnota rozkolísanosti byla naměřena u série TMS5 B v prostředí vody a bylo to 41 jednotek signálu. V prostředí vzduch, voda a nasycené kuličky platilo to, že série TMS4 B a TMS5 B, měly nejmenší rozkolísanost. Oproti tomu série TMS4 A měla největší rozkolísanost ve všech prostředích.

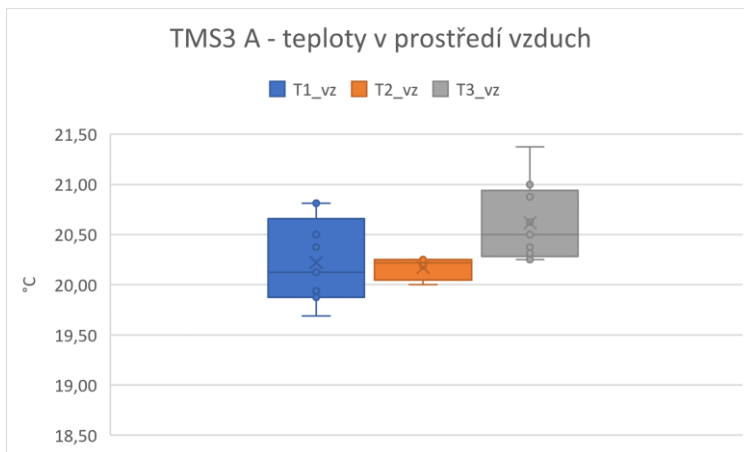
## 5.2 Teplotní rozdíly v sériích senzoru v prostředí vzduch

Na obrázku 5.5 můžeme vidět rozmístění teploměru na senzoru TMS. Teplota, která je v grafu označena jako T1, se nachází dole, T2 se nachází uprostřed a T3 je nahoře pod kloboučkem (ochranný kryt). Předchozí grafy znázorňují teploty naměřené v prostředí vzduch, každý graf zvlášť v rámci jedné série senzorů. Měření probíhalo v laboratoři, kde není konstantní teplotní prostředí.

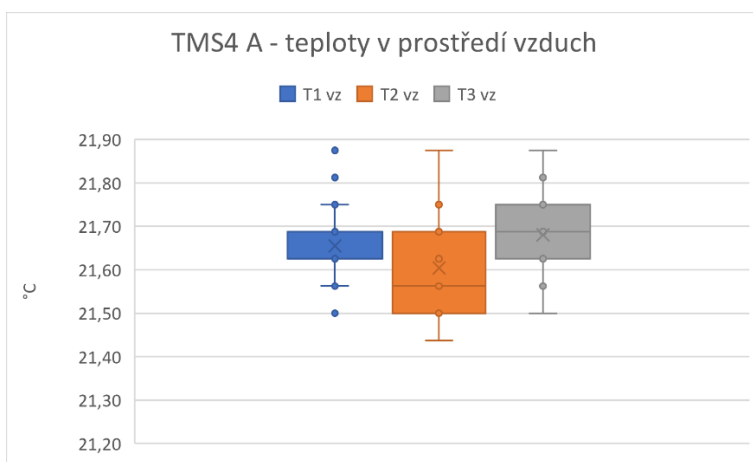
Grafy, které můžeme vidět na obrázcích 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 a 5.10 nám ukazují, že ve většině případech byla nejnižší naměřená teplota v rámci všech sérií na spodním teploměru, tedy T1. Největší variabilita teploty byla zaznamenána u senzoru TMS5 B a byli to 2 °C. Naopak nejmenší variabilitu teploty ukázaly data ze série TMS4 A, kde byl průměrný rozdíl pouze 0,3 °C.



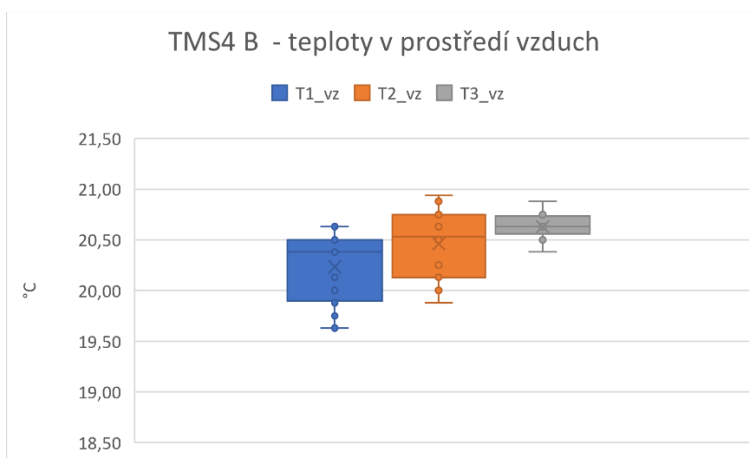
Obrázek 5.5 – Schéma TMS senzoru s popisem rozmístění teploměrů a vlhkostního senzoru (Wild et al., 2019)



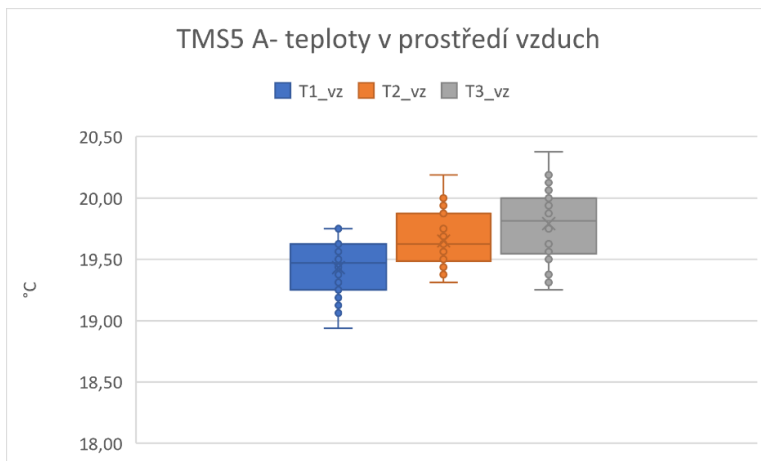
Obrázek 5.6 – Srovnání tří teplotních čidel u senzoru TMS3A v prostředí vzduch)



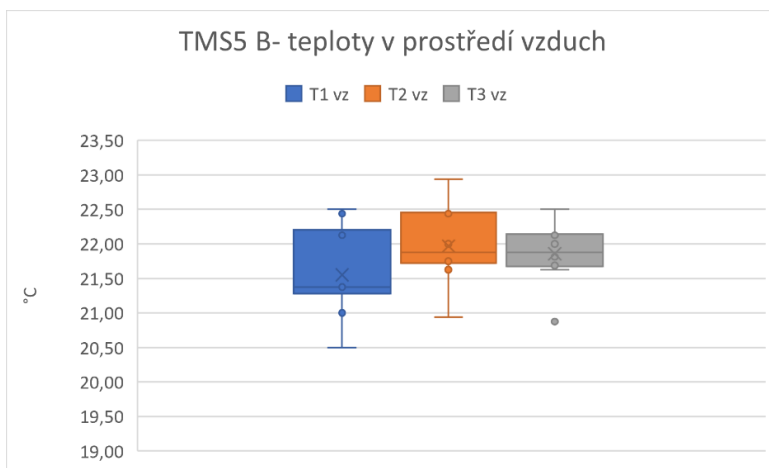
Obrázek 5.7 – Srovnání tří teplotních čidel u senzoru TMS4 A v prostředí vzduch



Obrázek 5.8 – Srovnání tří teplotních čidel u senzoru TMS4 B v prostředí vzduch

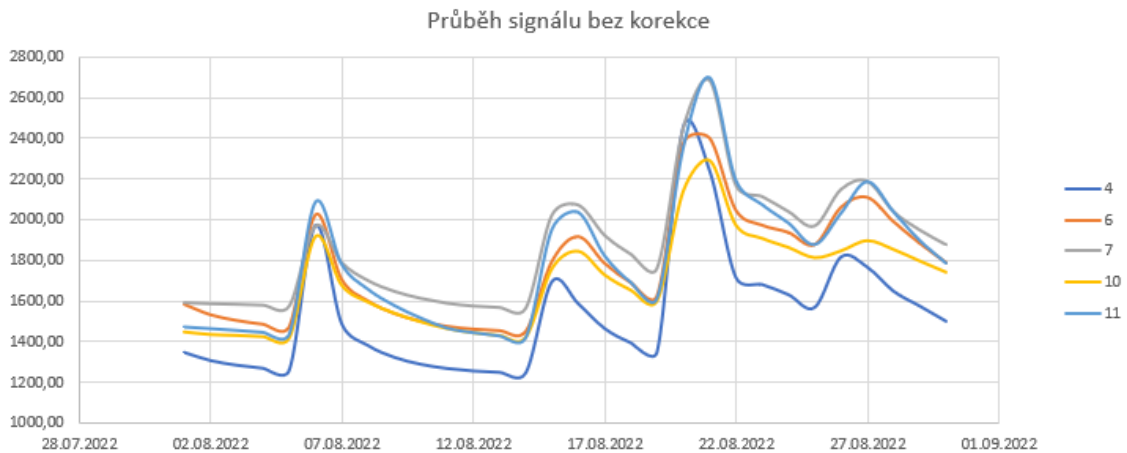


Obrázek 5.9 - Srovnání tří teplotních čidel u senzoru TMS5 A v prostředí vzduch



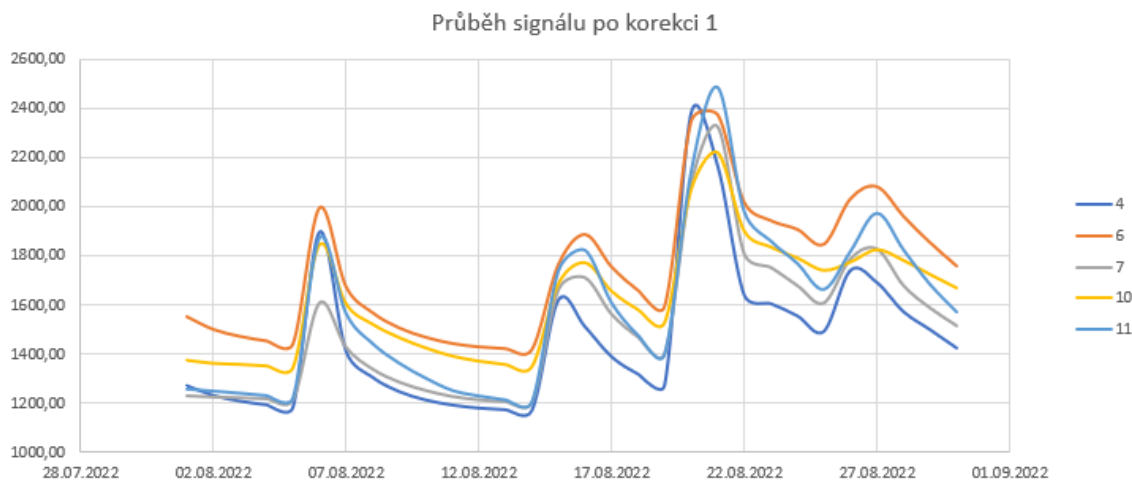
Obrázek 5.10 - Srovnání tří teplotních čidel u senzoru TMS5 B v prostředí vzduch

### 5.3 Srovnání průběhu vlhkostního signálu pro různé korekce



Obrázek 5.11 – Průběh signálu bez korekce

Na obrázku 5.11 můžeme vidět na grafu s vyhlazenými spojnicemi průběh signálu bez použití korekce. Nejvyšší hodnoty vykazovaly po celou dobu měření senzory č.7 a 11. Senzor č.4 se po téměř celou dobu měření držel na nejnižší úrovni, avšak dvakrát za měřené období se dostal výše než jiné senzory. Poprvé tomu bylo tak 6.srpna, kdy s hodnotou signálu 1966 jednotek překonal senzor č.7 a 10. Podruhé se tak stalo 21.srpna, kdy s hodnotou signálu téměř 2500 přeskočil senzory č.6 a 7. Nejvyšší hodnota na tomto grafu je 2696 jednotek signálu a byla naměřena senzorem č.11, oproti tomu nejnižší hodnota je 1246, která byla naměřena senzorem č.4. Výsledný rozdíl hodnot je 1450.

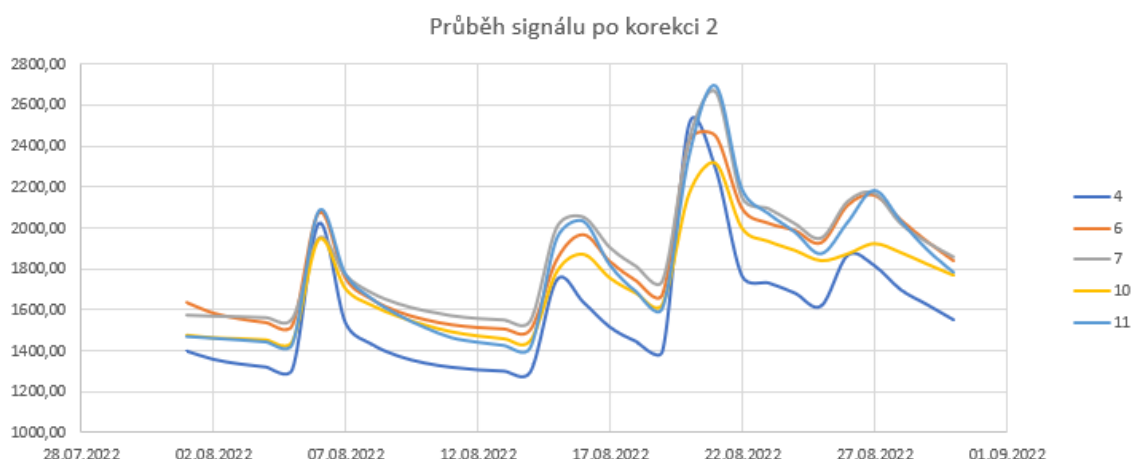


Obrázek 5.12 – Průběh signálu po korekci č.1- vzduch



Na obrázku 5.12 můžeme vidět graf, který znázorňuje průběh signálu po korekci č.1. Zde nám v průběhu měření vykazoval převážně nejvyšší hodnoty senzor č.6, avšak úplně nejvyšší hodnota na tomto grafu byla naměřena senzorem č.11 a bylo to 2481 jednotek signálu. Nejnižší hodnota byla opět naměřena senzorem č.4 a bylo to 1168 jednotek signálu. Výsledný rozdíl mezi mezními hodnotami je 1313 jednotek signálu, což je o 137 jednotek signálu méně, než tomu bylo u průběhu signálu bez korekce viz obrázek 5.11.

Výkyvy probíhaly u všech pěti senzorů téměř totožně. Senzor č.4, který se opět držel dole zaznamenal tentokrát více výkyvů do vyšších hodnot, než jak tomu bylo v grafu č.10. Ve třech ze čtyř případů víceméně kopíroval průběh signálu ostatních senzorů, jen samozřejmě v nižších hodnotách, ale v jednom případě a to dne 15.8 nezaznamenal vzestupný trend, po takovou dobu jako všechny ostatní senzory a začal dříve klesat. Senzor č.10 nezaznamenal dne 26. srpna takový vzestup, jako všechny ostatní senzory.

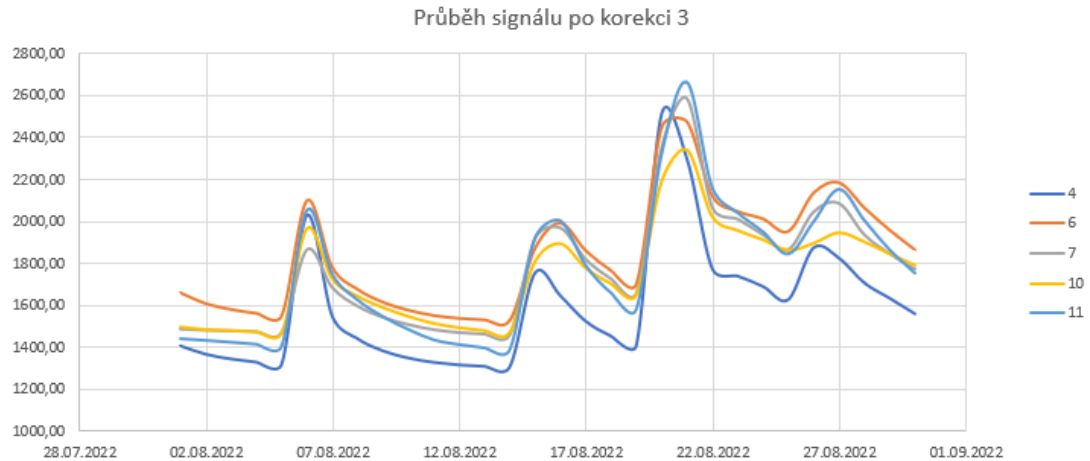


Obrázek 5.13 – Průběh signálu po korekci č.2 - voda

Na obrázku 5.13 můžeme vidět vyznačený průběh signálu po korekci č.2. Nejnižší hodnoty v průběhu celého měření byly stejně tak jako u dvou předchozích grafů naměřeny u senzoru č.4, který zaznamenal i nejnižší hodnotu a to 1297 jednotek signálu. Nejvyšší hodnota byla naměřena senzorem č.11, bylo to 2692 jednotek signálu.

Výsledný rozdíl byl tentokrát 1395 jednotek signálu, což je o 82 jednotek signálu více, než po korekci č.1, ale zase o 55 jednotek signálu méně, než tomu bylo bez korekce. Oproti předchozím grafům je zde vidět, že senzory č. 6,7,10 a 11 se samy sobě velice

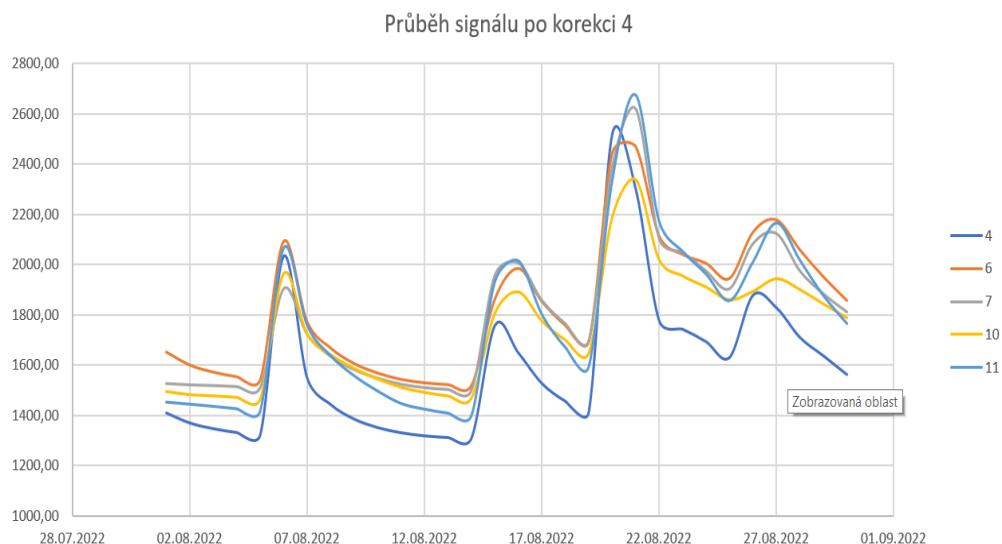
přiblížily a téměř po celou dobu měření se kopírovaly. Senzor č.4 zůstává po použití korekce 2 výrazně pod ostatními.



Obrázek 5.14 – Průběh signálu po korekci č.3 – suché a nasycené kuličky v poměru 50/50

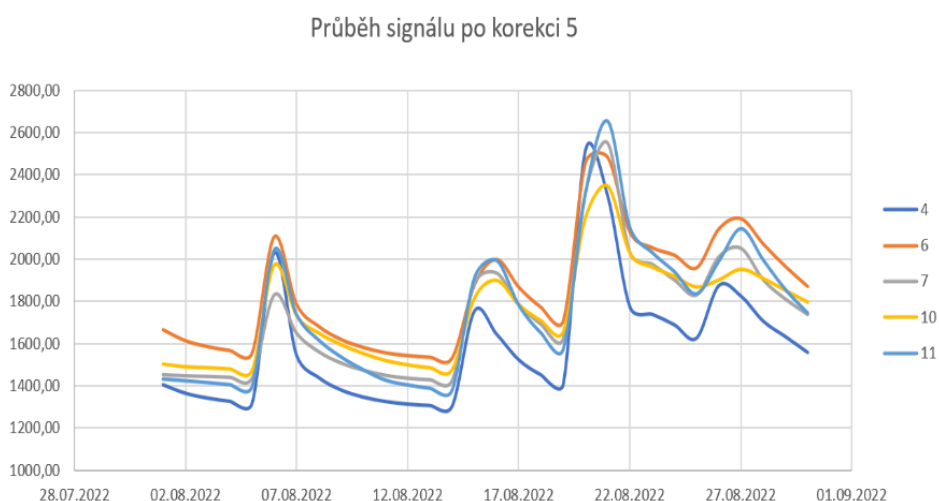
Na obrázku 5.14 můžeme vidět průběh signálu po korekci č.3, kde nejnižší hodnoty v průběhu celého měření vykazoval senzor č.4. Zatímco senzory č.6, 7, 10 a 11 se stále drží u sebe, občas si jen prohodí pozice, ale téměř po celou dobu se kopírují, tak senzor č.4 si drží po většinu času odstupovou vzdálenost. Avšak ve dvou případech přeskočil naměřenými hodnotami dva senzory. Poprvé se tak stalo 6. srpna, kdy přeskočil senzory č. 7 a 10 a poté ještě jednou, tentokrát 21.srpna, kdy přeskočil senzory č. 6 a 10. Nejvyšší naměřená hodnota v tomto grafu dosáhla na 2664 jednotek signálu a nejnižší hodnota byla 1306. Výsledný rozdíl byl 1358, což byla po korekci č.1 druhá nejmenší hodnota.

Na obrázcích, které nám ukazují průběh signálu po korekci, můžeme vidět, že se k sobě signály senzorů přiblížily. Nejvíce tomu tak bylo po korekci č.2, kterou můžeme vidět na obrázku 5.13.



Obrázek 5.15 – Průběh signálu po korekci č.4 - suché a nasycené kuličky v poměru 30/70

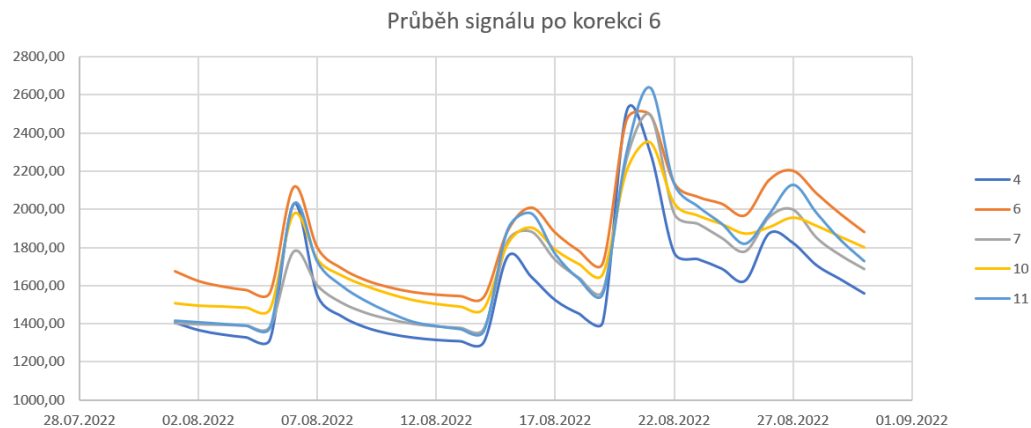
Obrázek 5.15 nám ukazuje graf, kde je promítnutý průběh signálu po korekci č.4 v které převažují nasycenné kuličky nad suchými v poměru 70/30. V tomto měření byla nejnižší hodnota naměřena senzorem č.4 a to konkrétně 1306,60 a stalo se tomu tak 14.8.2022. Tento senzor si po celou dobu měření udržoval podúrovni pozici, pouze dvakrát se jeho pozice zvedla a v obou případech to byla na třetí nejvyšší naměřenou hodnotu, poprvé se to stalo 6.8.2022 a podruhé 21.8.2022. V tentýž den byla naměřena také nejvyšší hodnota tohoto měření a to 2673,97 a zaznamenal ji senzor č.11. Rozdíl byl zde 1367,37 jednotek.



Obrázek 5.16 – Průběh signálu po korekci č.5 – suché a nasycené kuličky v poměru 70/30

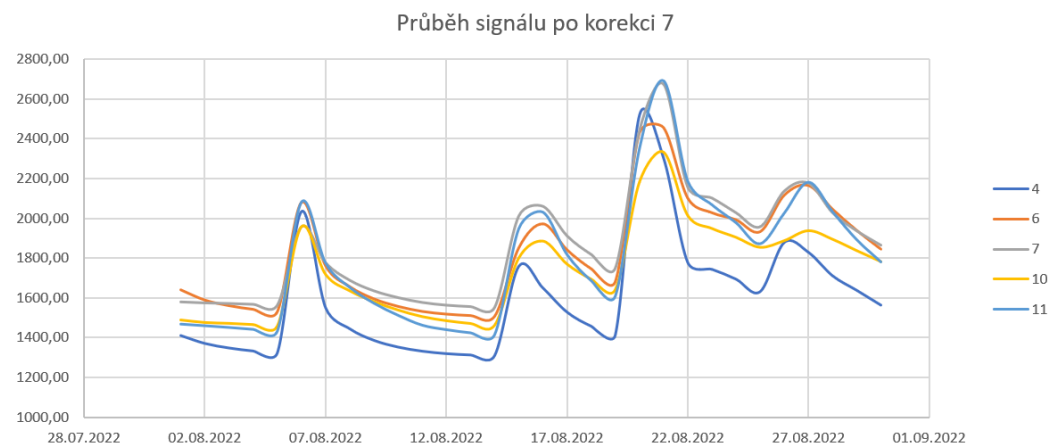
Obrázek 5.16 ukazuje případ, kde byla při korekci použita kombinace dvou prostředí, tentokrát v otočeném poměru, kde převažují suché kuličky nad nasycenými

v poměru 70/30. Zde byla nejnižší hodnota naměřena opět senzorem č.4 a bylo to 1304,40 jednotek a bylo to 14.8.2022. Oproti tomu nejvyšší hodnota 2653,57 jednotek byla naměřena 21.8.2022 a opět to byl jako v předchozím grafu viz. Obrázek 5.15 senzor č.11. Rozdíl zde byl 1349,16 jednotek. Senzor č.4 se jako ve všech zde zobrazených grafech držel v podúrovni. Ostatní senzory měly v tomto měření vyrovnanější průběhy signálu, než tomu bylo v jiných měřeních. I senzor č.11 který se ve všech měřeních pohybuje téměř po celou dobu na nejvyšší pozici byl zde několikrát překonán senzorem č.6.



Obrázek 5.17 – Průběh signálu po korekci č.6 – suché kuličky

Na obrázku 5.17 je zobrazen průběh signálu po korekci, kde byly použity pouze suché kuličky. Tento graf měl druhý nejmenší rozdíl hodnot hned po korekci č.1 která byla v prostředí vzduch. Nejvyšší naměřená hodnota zde byla 2637,97 jednotek, což je nejméně ze všech nejvyšších hodnot, tuto hodnotu zaznamenal opět senzor č.11. Oproti tomu nejnižší hodnota zde byla naměřena senzorem č.4 a bylo to 1302,60 jednotek.



Obrázek 5.18 – Průběh signálu po korekci č.7 – nasycené kuličky

Poslední korekce byla prováděna v prostředí nasycených kuliček. Zde byla nejnižší hodnota naměřena senzorem č. 4 a bylo to 1308,60 jednotek, což bylo ze všech nejnižších hodnot nejvíce. Nejvyšší hodnota byla naměřena senzorem č.11 a bylo to 2689,97. Rozdíl zde byl 1381,36.

Tabulka 5.5 – Přehledné srovnání výsledků hodnot u jednotlivých korekcí

TABULKA KOREKCÍ	MIN	MAX	CV	Rank CV	ROZSAH (MAX - MIN)	Rank ROZSAH	Rank SOUČET	Pořadí
bez korekce	1245,60	2695,97	17,58	7	1450,36	8	15	8.
korekce 1 - vzduch	1167,60	2480,97	18,88	8	1313,37	1	9	5-6.
korekce 2 - voda	1296,60	2691,97	16,99	5	1395,37	7	12	7.
korekce 3 - kuličky 50s/50n	1305,60	2663,97	16,86	2	1358,37	4	6	1-2.
korekce 4 - kuličky 30s/70n	1306,60	2673,97	16,83	1	1367,37	5	6	1-2.
korekce 5 - kuličky 70n/30s	1304,40	2653,57	16,95	4	1349,16	3	7	3.
korekce 6 - suché kuličky	1302,60	2637,97	17,16	6	1335,36	2	8	4.
korekce 7 - nasycené kuličky	1308,60	2689,97	16,87	3	1381,36	6	9	5-6.

- s – znamená podíl suchých kuliček, n – nasycených kuliček

V tabulce 5.5 můžeme vidět, že největší rozkolísanost byla zaznamenána při pokusu bez použití jakékoliv korekce. Vzduch nám vyšel svými hodnotami zvláště, nejspíš kvůli malému množství počtu senzorů, a tak jsou jeho naměřená data poněkud zavádějící, proto mu v této práci nedáváme takovou váhu. Naopak nejmenší rozkolísanost vyšla u korekce s čistě suchými kuličkami a poté u korekce, kde suché kuličky převažovaly v poměru 70/30 s nasycenými kuličkami. V celkovém součtu bylo zjištěno, že nejlépe vyšly dvě korekce. Obě byly kombinací suchých a nasycených kuliček. Ta, která byla námi zvolená jako úplně nejlepší, byla kombinace suchých a nasycených kuliček v poměru 50/50, druhá nejlepší byla kombinace, kde převažovaly suché kuličky nad nasycenými v poměru 70/30. U těchto dvou korekcích vyšel nejlépe koeficient variace.

## 6 Diskuse

Pro standardizaci byla správně zvolena čtyři prostředí (vzduch, voda, suché kuličky, nasycené kuličky), která nám poskytla širokou škálu rozsahu signálu. Měření v prostředí vzduchu bylo nejméně náročné na přípravu a poskytovalo také možnost měření všech senzorů v sérii najednou. To poskytuje výhodu zajištění stálé teploty pro všechny senzory v průběhu celého měření a díky tomu bylo následně možné teploty v rámci jednotlivých sérií porovnávat. Nicméně v laboratoři i tak může teplota mírně kolísat vzhledem ke konstrukci vzduchotechniky se jedná pouze o přibližné srovnání. V rámci tohoto prostředí byla pozorována nejvyšší rozkolísanost signálu, zdá se, že se mohly projevit drobné odchylky v umístění senzoru na kraj stolu a zároveň vzhledem k tomu, že se jedná o půdní senzor, který není určen pro měření ve vzduchu. Dalším měřeným prostředím byla zvolena demineralizovaná voda, zde se vyskytovaly nejvyšší hodnoty signálu. Zde bylo uchycení senzorů ve stojanu precizní a zajišťovalo nám to vysokou stabilitu při měření viz obrázek 4.3. Zbývající měření probíhalo v homogenním prostředí továrně vyrobených skleněných kuliček. Skleněné kuličky jsme ještě rozdělili na suché a nasycené, což nám představovalo porézní prostředí, blízké se vlastnostem půdy. Na konci měření byla všechna data zpracována a porovnána v MS Excelu.

Bylo provedeno porovnání všech senzorů v rámci sérií dohromady, abychom zjistili, jak jsou na tom vůči sobě vzájemně v každém prostředí zvlášť. Díky krabicovým grafům jsme viděli, která série má největší rozkolísanost, nebo která série nadhodnocuje, či naopak podhodnocuje. Například na obrázku 5.7, se vyskytly tzv. outliery neboli odlehlé hodnoty, které však mohly být způsobeny chybou při měření, konkrétně špatným uložením senzoru do nádoby se suchými kuličkami a tím mohlo dojít k nedostatečnému kontaktu. Na základě informací od výrobce, bylo zjištěno že vývoj senzoru TMS stále probíhá a jednotlivé výrobní série mají částečně jinou konstrukci (Wild et al,2019). Dále dochází i k variabilitě mezi senzory z důvodu pájených spojů a občasné nehomogenity výrobního materiálu. Také byl zjištěn značný rozdíl mezi sériemi TMS4 A a TMS4 B, je to způsobeno tím, že byl změněn výrobce lisovaných desek, z kterých se vyrábí vlhkostní senzor. U novější série TMS4 B byla snížena nežádoucí výrobní variabilita oproti TMS4 A, což je v souladu s hypotézou H1. Nutno podotknout, že počet senzorů se v jednotlivých sériích lišil. Nejméně senzorů jsme měli u série TMS3 A, bylo jich tam

pouze 9, oproti tomu v sérii TMS5 A jsme jich měli 50. Což mohlo způsobit zkreslení některých výsledků. Vše je podrobně znázorněno a vysvětleno ve výsledcích této práce.

Limit této práce může být to, že se pro korekci signálu náhodně vybralo pouze 5 senzorů. Tyto senzory byly osazeny na lesní půdě v Amálii a s jejich daty jsme poté nadále pracovali. Zde je taky důležité podotknout, že v lesní půdě je větší heterogenita, než např. na louce (Vavříček & Kučera 2014), tudíž je zde složitější rozlišit přirozenou variabilitu vlhkostí u senzorů způsobenou reálnými rozdíly vlhkosti v půdě a nežádoucí výrobní variabilitu. Je důležité připomenout, že TMS vlhkovostní senzor neměří napřímo půdní vlhkost, ale fyzikální vlastnosti, které s ní souvisí, čímž se zde objevuje nespočet proměnných, které nedokážeme ovlivnit (Kutílek & Nielsen 1994). Signál naměřený těmito senzory se poté upravoval korekcemi. Avšak důležité je, že se korekcí podařilo snížit nežádoucí výrobní variabilitu, nejvíce pak korekcí č. 3 (poměr suchých a nasycených kuliček 50/50), čímž se potvrdila hypotéza H2, že je vhodné používat korekční standard odpovídající částečně nasycenému poréznímu prostředí. Nejvyrovnanější průběh přinesl obrázek 5.14, kde je znázorněná úprava signálu po korekci suchých a nasycených kuliček v poměru 50/50, nejvyrovnanější je proto, že tato korekce nejvíce odpovídá reálnému poréznímu prostředí. Výsledek je opět v souladu s hypotézou H2 a ukazuje, že nejlepší pro korekci nežádoucí výrobní je použít výrobní standard vypočtený z poměru suchých a nasycených kuliček odpovídající částečně nasycenému poréznímu prostředí. Všech 7 korekcí signálu vyšlo lépe než signál bez korekce. Průměrná hodnota surového nekorigovaného signálu vlhkosti z terénu z 5 použitých senzorů byla 1733 jednotek. Hodnota standardizačního signálu pro poměr 50/50 činí 2155. Hodnoty signálu v tomto poměru jsou si tedy výrazně bližší k reálné půdě než standardizační signál pro vzduch (340), suché kuličky (840), nasycené kuličky (3470) nebo demineralizovanou vodu (3670).

## 7 Závěr

Pro hodnocení účinnosti opatření pro zadržování vody v krajině je nutný efektivní monitoring. Avšak levné senzory půdní vlhkosti mohou mít menší přesnost a vykazovat větší odchylky v měření. Je proto důležité ověřit kvalitu provedení těchto senzorů pomocí laboratorních testů a v případě potřeby přizpůsobit hodnoty jejich signálu. Navíc se výrobci senzorů neustále snaží zlepšit jejich funkčnost, což může způsobit odchylky v hodnotách mezi staršími a novými verzemi senzorů.

V rámci našeho výzkumu bylo provedeno laboratorní testování pěti různých sérií senzorů půdní vlhkosti TMS, které představují široce používané „low-cost“ řešení. Bylo provedeno měření ve čtyřech různých prostředích (vzduch, demineralizovaná voda, suché kuličky, nasycené kuličky). Následně byly vyhodnoceny rozdíly v těchto prostředích v rámci všech testovaných sérií. Celkově si ve všech prostředích byly nejpodobnější novější série TMS4 B, TMS5 A a TMS5 B, které měly menší hodnoty variability (CV, rozsah). Naopak nejvyšší nežádoucí variabilitu vykazovaly starší senzory ze sérií TMS3 A (vyrobena v roce 2014) a TMS4 A (vyrobena v roce 2019). Vyšší rozsah hodnot u TMS4 A mohl být způsoben výrazně vyšším počtem testovaných senzorů (27) než u TMS3 A (9). Výzkumná hypotéza H1 byla potvrzena a skutečně jsou novější série (TMS4 B, TMS5 A, TMS5 B) méně zatížené nežádoucí výrobní variabilitou. Pro následné osazení na lokalitě Amálie byla vybrána série senzorů TMS4 A, která byla nejvíce rozkolísaná (vysokou výrobní variabilitou). Data z těchto senzorů byla použita pro testování metod korekcí signálu.

Bylo navrženo sedm metod korekce těchto odchylek, přičemž nejvhodnější se zdá být metoda kombinace suchých a nasycených kuliček v poměru 50/50. Nejhorší hodnoty byly u signálu bez korekce. Nejhorší výsledek upraveného signálu, bylo po korekci č.2 – voda. O něco lepší byla korekce č.1 – vzduch, která vyšla také z hlediska rozsahu hodnot překvapivě dobře ale přisoudili jsme to pouhé náhodě při výběru senzorů. Koeficient variace byl na vzduchu nejvyšší. Korekce č. 7 – nasycené kuličky měla podobné výsledky jako předchozí korekce. Poslední korekce v samostatném prostředí bez použití kombinace dvou různých prostředí byla korekce č. 6 – suché kuličky. Nejlepší výsledky měly kombinace suchých a nasycených kuliček na třetím místě byla kombinace kuliček, kde převažovaly ty nasycené nad suchými v poměru 70/30. Jako druhý nejlepší byl zvolen otočený poměr oproti předchozí korekci, a to kombinace kuliček, kde převažovaly suché



nad nasycenými v poměru 70/30. Nejlepší korekce signálu vyšla z vyrovnané kombinace suchých a nasycených kuliček v poměru 50/50.

Výzkumná hypotéza H2 byla tedy potvrzena, je vhodné použít korekční standard odpovídající částečně nasycenému poréznímu prostředí.

Celkově práce přináší důležité informace o nežádoucí výrobní variabilitě senzorů TMS Tomst, které jsou hojně využívány pro monitoring vlhkosti po celém světě. Práce také ukazuje vliv vývoje senzorů na tuto variabilitu. Práce přináší návrh pro korekci nežádoucí výrobní variability a může pomoci zpřesnit vlhkostní monitoring senzory TMS. Do budoucna se bude třeba snažit najít další možnosti korekce signálu, které zohlední, že rozdíly v hodnotách senzorů nejsou lineární a že se mohou lišit v závislosti na vlhkosti půdy. Místo korekce pouze jednou konstantou lze využít i standardizaci signálu pomocí škálovací funkce. Této problematice bych se rád věnoval ve své diplomové práci.

## 8 Seznam literatury a použitých zdrojů

### Zdroje:

- Ali, H., 2010. *Fundamentals of irrigation and on-farm water management*. Springer Science & Business Media, vol. 1, p. 559.
- Baláš, M., Moskalík, J., 2009. Měření vlhkosti paliv. *Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy X“*. VUT v Brně, vol. 25, p. 1-6.
- Bell, J. P., Dean, T. J., Hodnett, M. G., 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part II. Field techniques, evaluation and calibration. *Journal of Hydrology*, vol. 93, p. 79-90.
- Blonquist Jr, J. M., Jones, S. B., Robinson, D. A., 2005. A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. *Journal of hydrology*, vol. 314, p. 235-245.
- Charlesworth, P., 2005. *Soil water monitoring*. Irrigation Insights, p. 100.
- Cílek, V., Hladík, J., Havel, T., Turek, J., Záhora, J., Vopravil, J., Fučík, P., Khel, T., Meduna, P., Mudra, P., Navrátil, T., Sůvová, Z., Kinský, V., Keřka, J., Křížek, P., 2021. *Půda a život civilizací, Co děláme půdě, děláme sobě*. Dokořán, Praha, p. 253.
- Craig, R. F., 2004. *Craig's soil mechanics*. CRC press, p. 447.
- Zákon č.17/1992 Sb., o životním prostředí, v platném znění
- Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., & Hussain, S. A., 2012. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology*, p. 110-117.
- Hillel, D., 2003. *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier, Amsterdam, p. 494.
- Hora, P., Kohut, M., Knozová, G., 2011. Vlhkost Půdy v lokalitě Hodonín-Pánov. *Úroda*, Lednice, p. 111–121.
- Kalvová, A., Velický, B., AVČR, F.Ú., 2006. Zpomalené a zastavené světlo. *Matematika, Fyzika*, p. 1-132.
- Kuráž, V., Kutílek, M., Kašpar, I., 1970. Resonance-capacitance soil moisture meter. *Soil Science*, vol. 110, p. 278-279.
- Kutílek, M., 1978. *Vodohospodářská pedologie*. Nakladatelství technické literatury, Praha, p. 295.

- Kutílek, M., 2012. *Půda planety země*. Dokořán, Praha, p. 199.
- Kutílek, M., Nielsen, D. R., 1994. *Soil hydrology*. Catena Verlag, Cremligen-Destedt, Germany, p. 370.
- Lal, R., Shukla, M.K., 2004. *Principles of soil physics*. CRC Press, p. 682.
- Letten, A.D., Ashcroft, M.B., Keith, D.A., Gollan, J.R., Ramp, D., 2013. The importance of temporal climate variability for spatial patterns in plant diversity. *Ecography*, vol. 36, p. 1341-1349.
- Muñoz-Carpena, R., 2018. Field Devices For Monitoring Soil Water Content. *University of Florida, Institute of Food a Agricultural Sciences*, p. 1-14.
- Pavlů, L., 2018. *Základy pedologie a ochrany půdy*. Česká Zemědělská Univerzita v Praze, p. 77.
- Potter, K.A., Arthur Woods, H., Pincebourde, S., 2013. Microclimatic challenges in global change biology. *Global Change Biology*, vol. 19, p. 1-24.
- Robinson, D. A., Campbell, C. S., Hopmans, J. W., Hornbuckle, B. K., Jones, S. B., Knight, R., Wendroth, O., 2008. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. *Vadose zone journal*, vol. 7, p. 358-389.
- Susha L. SU., Singh D. N., Shojaei B. M., 2014. A critical review of soil moisture measurement, *Measurement*, vol. 54, p. 92-105.
- Šantrůčková, H., 2014. *Základy ekologie půdy 1*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, p. 125.
- Šantrůčková, H., Kaštovská, E., Bárta, J., Miko, L., Tajovský, K., 2018. *Ekologie půdy*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, p. 260.
- Valla, M., Kozák, J., Drbal, J., 1980. *Cvičení z půdoznalectví – II*. Praha, VŠZ, p. 280.
- Vaněk, K., 2021. Měření vlhkosti a teploty půdy. *Diplomová práce*, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- Vavříček, D., Kučera, A., 2014. Lesnická pedologie pro posluchače LDF Mendelu v Brně. *Ústav geologie a pedologie*, p. 1-176.
- Vopravil, J., Vrabcová, T., Khel, T., Novotný, I., Banýrová, J., 2010. Vývoj a degradace půd v podmínkách očekávaných změn klimatu. *Voda v krajině*, p. 23-30.

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*, vol. 268, p. 40-47.

URL odkazy:

URLč.1:

<[https://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/print.php?page=3969&typ=html](https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3969&typ=html)>

[cit.26.3.2024]

URLč.2:

<[https://bagry.cz/cze/clanky/navody/hrabeme\\_se\\_v\\_hline\\_ale\\_co\\_o\\_ni\\_vime/trojuhelni\\_kovy\\_klasifikator](https://bagry.cz/cze/clanky/navody/hrabeme_se_v_hline_ale_co_o_ni_vime/trojuhelni_kovy_klasifikator)> [cit.26.3.2024]

URL č.3:

<<https://www.instrumentchoice.com.au/tdr-digital-soil-moisture-sensor-reader-kit-ic-rd1200>> [cit.26.3.2024]

URL č.4:

<<https://harvest.com/products/sensors/soil/acclima-tdr-315h>> [cit.26.3.2024]