

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta Životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování



**Fakulta životního
prostředí**

**Testování vlhkostních senzorů TMS4 TOMST
na lesní půdě v lokalitě Amálie**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Martin Wilczek

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

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Martin Wilczek

Krajinářství
Vodní hospodářství

Název práce

Testování vlhkostních senzorů TMS4 TOMST na lesní půdě v lokalitě Amálie

Název anglicky

Testing of soil moisture sensors TMS4 TOMST in the forest soil at the Amálie locality

Cíle práce

- 1) Provést kalibraci vlhkostních senzorů Tomst TMS4 pro lesní půdu na lokalitě Amálie.
- 2) Na základě dat měřených na lokalitě vyhodnotit rozdíly v půdní vlhkosti mezi kalibrací od výrobce (na základě stanoveného půdního druhu pro testovanou půdu) a laboratorní kalibrací provedenou přímo na testované půdě.
- 3) Porovnání hodnot objemové vlhkosti z referenční gravimetrické metody s hodnotami vypočtenými na základě kalibrace od výrobce a kalibrace provedené přímo na testované půdě.

Metodika

Zpracování rešerše metod měření půdní vlhkosti s důrazem na dielektrické metody. Na základě literatury vyhodnotit výhody a nevýhody používaných metod měření vlhkosti (např. popisat zdroje nepřesností, vzorkovací objem, časovou náročnost provedení). Provedení kalibrace vlhkostních senzorů Tomst TMS4 na lesní půdě v lokalitě Amálie (půdní druh prachovitá hlína) v minerální a organické vrstvě pod třemi druhy dřevin (smrk ztepilý *Picea abies*, buk lesní *Fagus sylvatica*, modřín opadavý *Larix decidua*). Data surových signálů ze senzorů TMS4 umístěných na lokalitě vyhodnotit pomocí kalibračních konstant od výrobce a konstant měřených přímo pro testovanou půdu a porovnat vypočtené vlhkosti. Odebrat na lokalitě neporušené půdní vzorky pro stanovení půdní vlhkosti referenční gravimetrickou metodou. Porovnat hodnoty gravimetrické půdní vlhkosti s hodnotami vypočtenými z kalibrací surového signálu.

Doporučený rozsah práce

35 stran

Klíčová slova

lesní půda, kalibrace senzorů, půdní vlhkost, permitivita, nepřímé metody, TMS4

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.

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

Konzultant

Ing. Marta Kuželková

Elektronicky schváleno dne 9. 3. 2022

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 12. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 27. 03. 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci nazvanou **Testování vlhkostních senzorů TMS4 TOMST na lesní půdě v lokalitě Amálie**, vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Lukáše Jačky, Ph.D., a že jsem použil pouze materiály, které jsem uvedl v seznamu literatury.

V Praze dne 31. 3. 2022

.....

Poděkování

Mé poděkování patří především Ing Lukáši Jačkoví, Ph.D. za odborné vedení práce, ochotu a trpělivost. Dále mé díky patří Ing. Martě Kuželkové za poskytnuté konzultace během práce.

Abstrakt

Voda v půdě je podstatným prvkem, na který je vázaný téměř všechen suchozemský život. Je tedy důležité dokázat co nejpřesněji monitorovat vlhkost půdy. Proto se bakalářská práce zabývá kalibrací a validací senzorů TMS4 od firmy TOMST, které se v současnosti často používají pro monitoring půdní vlhkosti. Sensory měří relativní permitivitu metodou TDT. Cílem práce bylo především zpřesnit a následně ověřit kalibraci TMS4 na lesní půdě v lokalitě Amálie, kde jsou tato čidla osazena a monitorují půdní vlhkost v rámci projektu „Chytrá krajina“.

Kalibrace probíhala v laboratoři FŽP ČZU půdách odebraných pod porosty smrku, modřínu a buku. Z těchto půd byly také odebrány neporušené půdní vzorky, ze kterých byly získány referenční objemové vlhkosti pro následující validaci.

Výsledky ukázaly velké rozdíly mezi laboratorní kalibrací a univerzální kalibrací od výrobce na základě půdního druhu.

Validace pomocí neporušených vzorků nepotvrdila, že námi provedená laboratorní kalibrace na půdě ze zájmové lokality budou přesnější než univerzální kalibrace od výrobce. Ve třech ze čtyř případů byla nejpřesnější kalibrace od výrobce, kde rozdíly od referenčních vzorků objemové vlhkosti se pohybovaly v rozmezí 0,04 až 0,09. Laboratorní kalibrace pouze na organickou část půdy byla velice nepřesná a dosahovala rozdílu až 0,18 objemové vlhkosti. Pouze v jednom ze čtyř případů byla nejpřesnější laboratorní kalibrace.

Vysoké rozdíly mezi kalibracemi a validací mohly být způsobeny vysokou heterogenitou lesní půdy, náročným a méně reprezentativním odběrem neporušených vzorků pro validaci a odlišným chováním laboratorně upravené porušené lesní půdy použité pro kalibraci od neporušené půdy osazené senzory TMS4

Klíčová slova:

Dielektrická konstanta, kalibrace vlhkostních senzorů, validace na lesní půdě, elektrické metody, relativní permitivita

Abstract

Soil water is an indispensable element to which almost all terrestrial life is tied. It is therefore important to be able to monitor soil moisture as accurately as possible. This bachelor thesis discusses calibration and validation of TMS4 sensors from TOMST, which are often used to monitor soil moisture. The sensors measure relative permittivity by the TDT method. The aim of this work was mainly to improve and verify calibration of TMS4 sensors on the forest soil from the locality of Amálie, where these sensors are installed and monitor soil moisture within the project "Chytrá krajina" (Smart landscape).

The calibration took place in FŽP ČZU labs on soil taken from the locality of interest, namely soil from spruce, larch and beech growth. Reference samples were taken from the locality, from which the reference soil moisture was obtained for the following validation.

The results showed large differences between laboratory calibration and universal calibration from the manufacturer based on soil type.

The validation did not confirm that calibrations performed by us on the soil will be more accurate than universal calibrations from the manufacturer. In three of the four cases, the most accurate calibration was from the manufacturer, where the differences from the reference volumetric moisture samples ranged from 0,04 to 0,09. Laboratory calibration on the organic part of the soil was very inaccurate and reached a difference of up to 0.18 volumetric moisture. In one of the four cases, laboratory calibration was the most accurate.

The high differences between calibrations and validation could be due to high forest soil heterogeneity, demanding and less representative intact sampling for validation and different behavior of laboratory treated disturbed forest soil used for calibration from intact soil equipped with TMS4 sensors.

Keywords:

Dielectric constant, calibration of soil moisture sensors, validation on forest soil, electrical methods, relative permittivity

1.	Úvod.....	8
2.	Cíle práce.....	10
3.	Literární rešerše	11
3.1.	Půda a vlhkost půdy.....	11
3.2.	Přímé metody	13
3.2.1.	Gravimetrická metoda.....	13
3.3.	Nepřímé metody	14
3.3.1.	Karbidová metoda.....	15
3.3.2.	Elektrické metody.....	16
3.3.3.	Neutronová metoda.....	21
3.3.4.	DPZ – dálkový průzkum země.....	22
4.	Charakteristika zájmové lokality a popis půdy na lokalitě Amálie	24
5.	Metodika.....	30
5.1.	Odběr vzorků.....	30
5.1.1.	Odběr vzorků pro kalibraci	30
5.1.2.	Odběr referenčních vzorků.....	30
5.2.	Měření a kalibrace	31
5.2.1.	Příprava vzorků	31
5.2.2.	Kalibrační měření	32
5.3.	Stážení a zpracování dat.....	33
6.	Výsledky.....	35
6.1.	Kalibrace čidel na organickou a minerální půdu a jednotlivé lesní porosty 35	
6.2.	Kalibrace pro organickou a minerální půdu.....	38
6.3.	Validace kalibrací pomocí referenčních vzorků.....	40
7.	Diskuse	45
8.	Závěr.....	47
9.	Seznam použité literatury.....	48
10.	Seznam URL odkazů.....	50

1. Úvod

Půda má schopnost zadržet obrovské množství vody rámci České republiky, objem této vody vysoce převyšuje objem vody ve vodních nádržích u nás (Kutílek, 1978). Půdní voda je podstatná z hlediska hydrologického cyklu vody, zadružuje a následně uvolňuje vodu, čímž přispívá ke zmírnění klimatických extrémů jako je například sucho nebo povodně. Dále bez vody v půdě ustává veškerý život v ní. Půdní voda funguje i jako transportní médium pro pohyb živin či kontaminantů. Na to je silně navázáno zemědělství, primárně rostlinná výroba a následně i živočišná výroba (Bouma, 2012).

Monitorování průtoků a zásob povrchové vody v nádržích je v dnešní době běžné a jsou k dispozici podrobné časové řady o délce mnoha desítek let. Oproti tomu, data z monitoringu půdní vlhkosti jsou k dispozici v delších a podrobných časových řadách zřídka. Důvodem je výrazně obtížnější monitoring z důvodu nutnosti využívat nepřímé metody pro kontinuální monitoring. Právě z důvodu důležitosti vlhkosti půdy se neustále vyvíjí nové způsoby jejího měření.

Bakalářská práce se zabývá problematikou měření vlhkosti půdy v reálném prostředí nepřímou metodou, kterou lze používat kontinuálně bez větších nákladů, s použitím kalibrace.

Měření vlhkosti půdy se dá rozdělit na dvě základní metody. Přímá a nepřímá metoda. Přímá metoda je fyzické odebrání vzorku a jeho následné vážení a sušení, tudíž vzorek během měření degraduje. Nepřímá metoda, je relativně nový obor, kde se pozorují fyzikálně-chemické vlastnosti půdy ze kterých, můžeme odvodit její vlhkost. Půda v důsledku měření nepřímou metodou nijak nedegraduje. Možností, jak měřit vlhkost půdy nedestruktivně, je celá řada a je to odvětví, které se rychle rozvíjí. Jsou to metody (Dobriyal et al., 2012; Hillel, 1982; Kutílek, 1978).

- karbidová
- elektrické
- radiometrické
- dálkový průzkum země (DPZ)

Během použití nepřímé metody měření půdní vlhkosti vstupuje do procesu měření mnoho proměnných, které mohou následně ovlivnit přesnost. Vzniká tedy otázka, jaké mají metody úskalí a co je zapotřebí uskutečnit před použitím, jaká je přesnost a jaká je náročnost použití dané metody v terénu. Jednotlivé specifika použití metod jsou pak popsána dále v práci. Je zapotřebí se v tomto oboru zpřesňovat, ať už kvůli zemědělství či jiným odvětvím navázaným na půdu, respektive na vodu v půdě, to je důvod, proč jsem si danou problematiku zvolil.

Pro kalibraci a měření byla vybrána čidla TMS4 od firmy TOMST, kvůli jeho dostupnosti, ceně a rozšíření. Bližší specifikace čidla TMS4 je uvedena dál v práci. Tyto čidla jsou v době tvorby bakalářské práce osazeny v terénu na lesní půdě na lokalitě Amálie, kde probíhá monitoring hydrologického režimu lesa. Tento monitoring je součástí projektu „Chytrá krajina“, který se zabývá optimalizací hospodaření s vodou, minimalizací dopadů hydrologických extrémů (sucho, povodně), udržitelnosti zemědělství a lesnictví, minimalizací eroze atd. (Česká zemědělská univerzita v Praze, 2021).

2. Cíle práce

Hlavním cílem práce je provést kalibraci vlhkostních čidel TMS4 od firmy TOMST na lesní půdě z lokality Amálie, které by mohly být následně používány pro přesnější určování vlhkosti půdy v této lokalitě.

Dílčí cíle práce jsou:

- 1) Provést kalibraci a vytvořit kalibrační rovnice pro lesní půdu na lokalitě Amálie pro čidla TMS4.
- 2) Porovnat rozdíly laboratorní kalibrace a kalibrace od výrobce na základě dat získaných z lokality Amálie.
- 3) Vyhodnotit kvalitu stanovené vlhkosti z laboratorní kalibrace a z výrobcem stanovené kalibrace na základě porovnání s vlhkostí určenou gravimetricky z odebraných neporušených vzorků na testované půdě a případně navrhnout možné způsoby zpřesnění.

Hlavní hypotézy, se kterými se uvažovalo během celé práce jsou následující:

- a) Odchytky mezi kalibracemi od výrobce a laboratorními kalibracemi provedenými přímo na testované půdě budou výrazné. Důvodem tohoto předpokladu je, že kalibrace od výrobce není provedena přímo pro testovanou půdu ale pro půdní druh, který je široce definovaný.
- b) Validační půdní vlhkosti (vlhkost měřená gravimetricky na neporušených vzorcích odebraných v terénu) budou blíže laboratorní kalibraci provedené přímo na testované půdě než hodnotám z kalibrace od výrobce. Tento předpoklad bude naplněn, pokud se podaří v heterogenní půdě zachytit půdními válečky o objemu pouze 100 cm³ dostatečně reprezentativní vzorek v porovnání se vzorkovanou půdou TMS4.

3. Literární řešerše

3.1. Půda a vlhkost půdy

Půda může být definována jako přírodní útvar, který vzniká díky povrchovému zvětrávání zemské kůry a ze zbytků organické hmoty působením půdotvorných faktorů. Je to stále vyvíjející živý systém, na kterém závisí přežití a prosperita suchozemských biologických skupin (MŽP, 2020).

Půda je složena ze tří složek – pevná složka (minerální částice a organická hmota), půdní voda a vzduch (Obr. 3.1) (Pavlásek & Jačka, 2014; Šantrůčková, 2014).



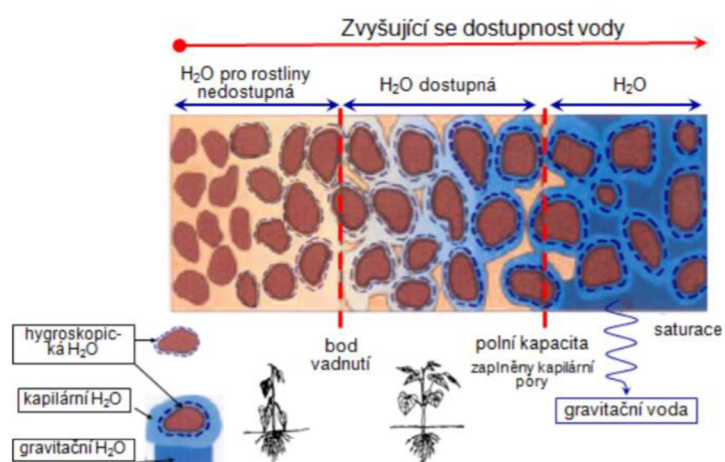
Obr. 3.1, skladba půdy (Šantrůčková, 2014).

Anorganickou složku tvoří minerální částice různých velikostí tvarů a chemických složení a je ovlivněno horninou ze které tyto částice pochází. Zastoupení jemných a hrubých částic ovlivňuje pórovitost půdy, její mechanické vlastnosti, schopnost vázat a udržet vodu, případně osídlení půdními organismy a prostupnost pro kořeny rostlin (Šantrůčková, 2014).

Organická složka půdy tvoří průměrně 5 % hmotnosti půdy, ale obsah se může pohybovat v rozmezí 1 %, v chudých písčítých nebo intenzivně obhospodařovaných půdách, až po 80% v rašelinných půdách. Do organické složky lze zahrnout hmotu v různých stádiích rozkladu a živé organismy (Kutílek, 1978; Šantrůčková, 2014).

Vlhkost půdy nebo půdní vlhkost označuje množství vody v půdě. Voda v půdě se může vyskytovat ve třech formách, a to jako gravitační, kapilární nebo hydrokopičká (Obr. 3.2). Gravitační voda je definována jako volná voda, která se

pohybuje skrz půdu díky gravitační síle. Nachází se v makropórech. Její pohyb je poměrně rychlý, za normálních okolností tato voda odteče z půdy za 2-3 dny po dešti. Kapilární voda se nachází v mikropórech půdy a je zde držena, proti gravitaci, díky kohezi a adhezi. Tato voda je dostupná v pórech a způsobuje všechny fyzikálně-chemicko-mineralogicko-biologické interakce mezi půdou a zbylým životním prostředím. Hydroskopická voda se nachází, jako tenký film, na povrchu půdních částic. Na povrchu je držena díky silné adhezi, její oddělení je tedy velmi náročné, a proto tuto vodu vegetace není schopna využít (Kutílek & Nielsen, 1994; Lekshmi et al., 2014).



Obr. 3.2 Plnění půdních pórů vodou v závislosti na vlhkost vody (Lekshmi et al., 2014).

Množství vody v půdě je definována obdobně jako koncentrace:

Hmotnostní vlhkost půdy je poměr hmotnosti vody (m_w) k hmotnosti tuhé fáze vody (m_z): $w = \frac{m_w}{m_z}$ (vzor. 1.1)

Kde m_w označuje hmotnost vody a m_z označuje zcela vysušenou půdu.

Objemová vlhkost půdy je poměr objemu vody k objemu neporušeného půdního vzorku: $\theta = \frac{V_w}{V_s}$ (vzor. 1.2)

Kde V_w označuje objem vody a V_s označuje objem vzorku půdy.

Při bilancování zásoby půdní vody se dává přednost vyjádření objemové vlhkosti půdy. Objemová vlhkost se snadno přepočítá na zásobu vody v dané části půdního profilu. Často se udává v procentech. Podstatné úskalí, které se vyskytuje

nejen u měření půdní vlhkosti, je měření v terénu. Pohyb vody, rozložení pórů a další aspekty jsou v terénu nerovnoměrné (Kutílek, 1978).

3.2. Přímé metody

Přímé metody měření vlhkosti půdy jsou založeny na odstranění vlhkosti z půdního vzorku pomocí evaporace nebo chemické reakce. Při zjišťování dochází ke zničení půdního vzorku. Do této kategorie spadá gravimetrická metoda (Lekshmi et al., 2014).

3.2.1. Gravimetrická metoda

Princip gravimetrické metody spočívá ve vážení vlhkého a vysušeného půdního vzorku a následném výpočtu vlhkosti podle vzorce hmotnostní vlhkosti (vzor. 1.1). Tato metoda je přímá a destruktivní, a zároveň je to tedy jediná metoda podle které můžeme porovnávat nepřímé metody měření. Používá se jak v laboratorním prostředí, tak i pro terénní stanovení (Dobriyal et al., 2012; Kutílek, 1978).

Pokud je vzorek půdy reprezentativní, pak přesnost metody závisí na dokonalosti vysušení. Část vody v půdě je pevně vázaná na povrchu půdních částic a je obsažena i v krystalové mřížce půdních minerálů. Proto je potřeba pro jiné typy zemin zvolit jiné způsoby vysušování. U normálních, minerálně lehkých až středně těžkých půd s malým obsahem humusu se vysušuje při teplotě 105 °C až do konstantní hmotnosti. Při objemu vzorku do 100 cm³ dostačuje vysoušet 24 hodin, při hmotnosti 10-20 g vzorku stačí 6 hodin (obr. 3.3 a 3.4). Jílové vzorky lze vysušovat až při 160 °C. Naopak u vzorků s vyšším obsahem humusu může dojít při vyšších teplotách vysoušení k oxidaci organické hmoty, proto se vysušují při maximální teplotě 70 °C.

Největší nevýhoda této metody je její potřeba destrukce vzorku. Odběr, příprava, sušení a vyhodnocení je poměrně časově náročné. Tato metoda rozhodně není vhodná pro dlouhodobé sledování vlhkosti půdy. Po sušení při teplotě 105 °C, v jílovitých zeminách, může zůstat ve vzorku jisté množství vody. Ve vzorcích bývá obsažena i organická hmota, která působením sušení může oxidovat a dále se rozkládat, čímž přispívá ke změně hmotnosti vzorku, která není způsobena vypařováním vody ze vzorku. I přes výčet těchto nevýhod, gravimetrická metoda měření půdní vlhkosti se nejvíc přibližuje, z ostatních metod, skutečné vlhkosti, a proto

výsledky měření lze použít pro kalibraci nepřímých metod (Hillel, 1982; Kutílek, 1978; Lekshmi et al., 2014; Robinson et al., 2008).



Obr. 3.3 Vzorky půdy připravené na sušení (foto autor)



Obr. 3.4 Vzorky půdy v horkovzdušné sušárně (foto autor)

3.3. Nepřímé metody

Nepřímá metoda měření vlhkosti půdy je založena na měření fyzikálních nebo fyzikálně chemických vlastnostech půdy, které jsou závislé na vlhkosti půdy. Existuje

celá řada metod měření těchto vlastností, avšak žádná z nich nelze použít univerzálně ve všech případech. Je tedy nutné zvážit, která metoda se hodí pro daný případ (Kutílek, 1978). Dále si popíšeme metody, které se v praxi používají.

3.3.1. Karbidová metoda

Oproti gravimetrické metodě je ta karbidová použitelná jak v laboratoři, tak i v terénu. Metoda zkoumá tlak plynu vytvořeného z důvodu chemické reakce činidla, na bázi karbidu vápníku, s vodou v odebraném vzorku. Tlak plynu, acetylén produkovaný dle množství dostupné vody ve vzorku, je měřen díky uzavření výsledného plynu v utěsněné komoře. Zdánlivá obsah vody lze získat z tlakoměru zařízení.

Některé vysoce plastické jílovité půdy, nebo jiné půdy, které nejsou dostatečně drobné, aby se rozmělnily, nemusí poskytovat reprezentativní výsledky, protože část vody bývá zachycena uvnitř hrud, které nemohou přijít do kontaktu s činidlem. Navíc pro 20g je vyžadováno 22g činidla, zkoumání vlhkosti půdy ve větším měřítku může být tedy nákladné. Pro testování je vyžadována odbornost provádějícího personálu (ASTM International, 2018; Hillel, 1982).



Obr. 3.5 Souprava pro měření vlhkosti karbidovou metodou URL č.1

3.3.2. Elektrické metody

Tyto způsoby měření vlhkosti půdy jsou v dnešní době hojně používané a rychle se rozvíjející. V některých případech mohou sloužit i jako část kalibrace pro DPZ. Lze je využívat jak v laboratoři, tak i v terénu.

3.3.2.1. TDR – time domain reflectory

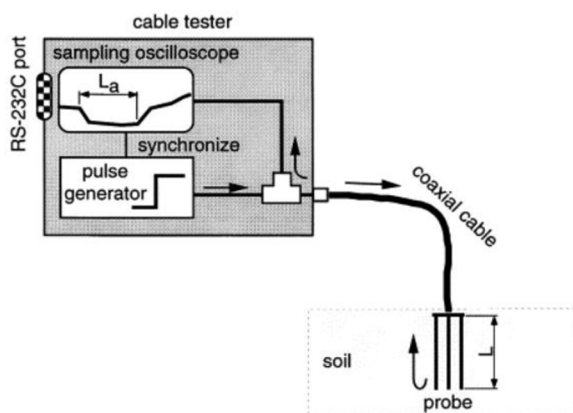
TDR určuje relativní permitivitu pomocí jednoduchých elektrod vložených do předmětu. Metoda je založena na empirickém vztahu mezi relativní permitivitou a obsahem vody v půdě (Kutílek, 1978; Noborio, 2001).

Relativní permitivita, dříve nazývána dielektrická konstanta, ϵ_r je určována měřením doby šíření elektromagnetických vln, vyslaných z pulzního generátoru (Obr. 3.6). Elektromagnetické vlny se šíří koaxiálním kabelem k TDR sondě, která je obvykle tyčová, vyrobená z nerezové oceli nebo mosazi. Část dopadající elektromagnetické vlny se odráží na začátku sondy díky rozdílu impedance mezi kabelem a sondou. Zbytek vlny se šíří sondou, dokud nedosáhne konce, kde se vlna odráží (Obr. 3.7). Čas doběhu vlny t od začátku do konce sondy, který je měřen vzorkovacím osciloskopem na kabelovém testeru, lze popsat jako (Noborio, 2001; Robinson et al., 2003):

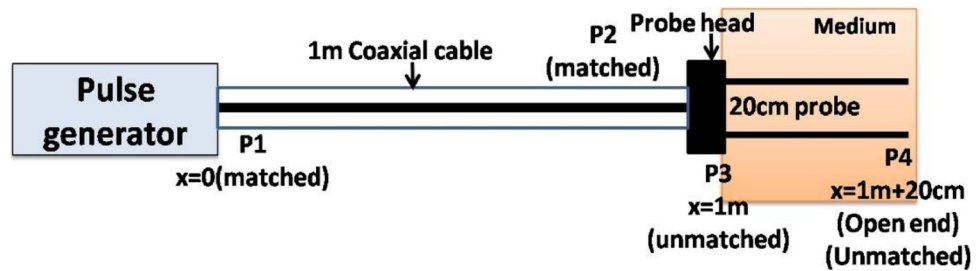
$$t = 2L\epsilon_r^{0.5}c \quad (\text{vzor- 3.1})$$

Kde t je čas doběhu vlny (s), L – délka sondy (m), ϵ_r – relativní permitivita prostředí a c – rychlost elektromagnetického vlnění ve vakuu ($m*s^{-1}$)*($3*10^8$). Po úpravě, s důrazem na dielektrickou konstantu, dostáváme vzorec (Noborio, 2001):

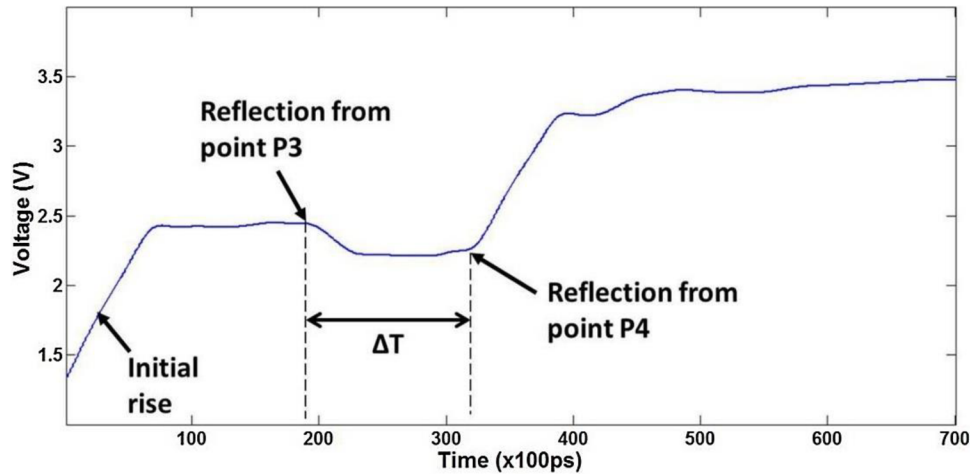
$$\epsilon_r = ct2L^2 \quad (\text{vzor- 3.2})$$



Obr. 3.6 Schéma systému TDR (Noborio, 2001)



Obr. 3.7 Model přenosového vedení TDR (Gurav et al.)



Obr. 3.8 Průběh vlny, při umístění sondy TDR ve vodě (Gurav et al.)

Výsledná vlhkost půdy je určována pomocí kalibračních rovnic, které mohou vyjadřovat vztahy mezi θ a dobou šíření vlny nebo mezi θ a relativní permitivitou. Pro rychlé určování vlhkosti může být do měřícího přístroje nahrána kalibrační křivka, pokud to přístroj dovoluje. Senzory TDR mají dvě (Obr. 3.9), nebo tři (Obr. 3.10) hrotové elektrody (Dobriyal et al., 2012; Gurav et al., 2018; Kutílek, 1978).



Obr. 3.9 Senzor TDR se dvěma hroty URL č. 2



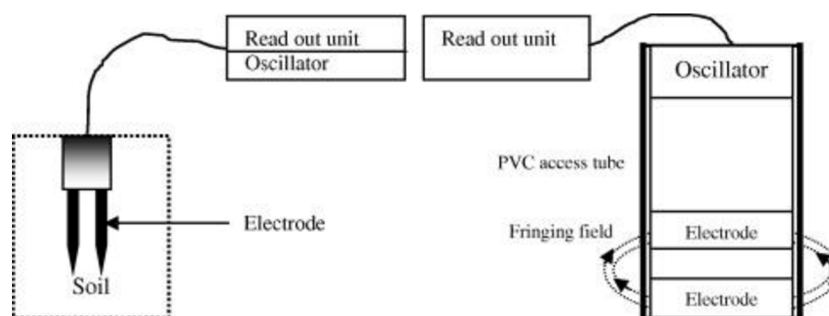
Obr. 3.10 Senzor TDR se třemi hroty URL č. 3

TDR metoda je v dnešní době, díky své přesnosti hojně používaná. Při instalaci dochází k minimálnímu poškození půdy, je možné je instalovat do různých hloubek. Během měření je relativně necitlivý vůči běžné salinitě půdy a dokáže zároveň měřit i vodivost půdy. Na druhou stranu pořizovací cena senzoru je poměrně vysoká. Dále většinou vyžaduje kalibraci před použitím a odborně způsobilé pracovníky při instalaci, měření a vyhodnocování dat. Metoda je potenciálně omezená ve vysoce slaných podmínkách nebo ve vysoce vodivé jílové půdě. Snímá poměrně malý objem půdy. (Kutílek, 1978; Muñoz-Carpena, 2004; Zhao & Ling, 2016).

3.3.2.2. *FDR – frequency domain reflektory*

FDR je kapacitní metoda založena na oscilačním obvodu a snímací části zapuštěné do půdy. Pracovní frekvence závisí na relativní permitivitě půdy. Tento způsob určuje relativní permitivitu půdy měřením doby nabíjení kondenzátoru, ve kterém půda tvoří dielektrikum (Mukhlisin et al., 2021).

Senzory se skládají z páru elektrod (pole paralelních hrotů nebo kruhové kovové kroužky), které tvoří kondenzátor s půdou jako dielektrikem (Obr. 3.11). Kondenzátor spolupracuje s oscilátorem a vytváří obvod. Změny vlhkosti půdy jsou detekovány změnami provozní frekvence (10 - 150MHz) (Lekshmi et al., 2014; Muñoz-Carpena, 2004).



Obr. 3.11 Schéma kapacitního (vlevo) a FDR senzoru (vpravo) (Lekshmi et al., 2014)

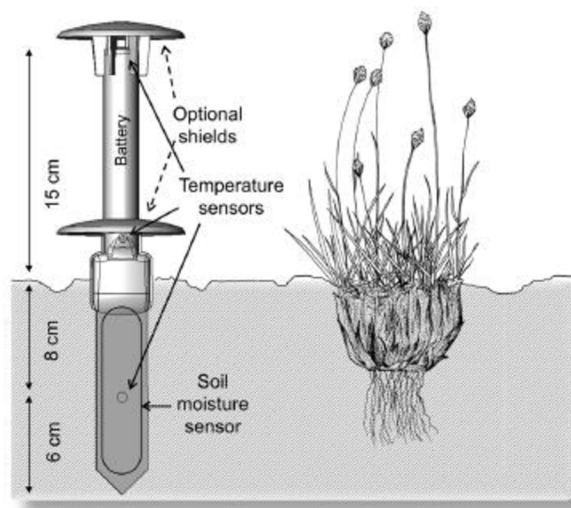
Metoda je poměrně přesná, může pracovat i při vysoké salinitě, kde už TDR nefunguje tak jak má. Senzory mohou být ve více provedeních a často jsou levnější oproti TDR. Nevýhoda, stejně jako u TDR, je velikost snímání. Musí být zajištěn dobrý kontakt mezi elektrodami a půdou. Instalace musí být pečlivá a nesmí vznikat okolo elektrod vzduchové kapsy. Metoda FDR mívá větší citlivost na teplotu, objemovou hmotnost, obsah jílu a vzduchové mezery než TDR. Metoda vyžaduje specifickou kalibraci pro každou specifickou půdu (Muñoz-Carpena, 2004).

3.3.2.3. TDT – time-domain transmission

TDT čidla TMS4 od firmy TOMST, byla vyprána pro tuto práci, proto vnější popis a specifické fungování je vztáhnuto na toto čidlo. Ostatní TDT čidla se můžou lišit v některá specifických (velikost, tvar, způsob ukládání dat, atd.).

Metoda TDT je podobná TDR metodě s tím rozdílem, že vlna se neodráží na konci zpět, ale na konci je tato vlna přijata a je zjištěn fázový posun po vyslání pulsu. Díky tomu čidla nemají hroty (Litschmann, 2010; Sun & Young, n.d.; Will, 2011).

Čidla TMS jsou designována na dlouhodobě měření vlhkosti půdy a teplot v terénu. Při osazení nejsou větší než běžné rostliny – nad povrchem je přibližně 15 cm dlouhé tělo čidla. Teploměry na čidle jsou umístěny ve výškách +15, 0 a -8 cm při osazení. Měří tedy teplotu nad povrchem půdy, těsně nad povrchem půdy a v půdě. Takto rozmístěné teploměry reprezentují listy rostlin, přezimující pupeny a kořeny (obr. 3.12) (Wild et al., 2019).

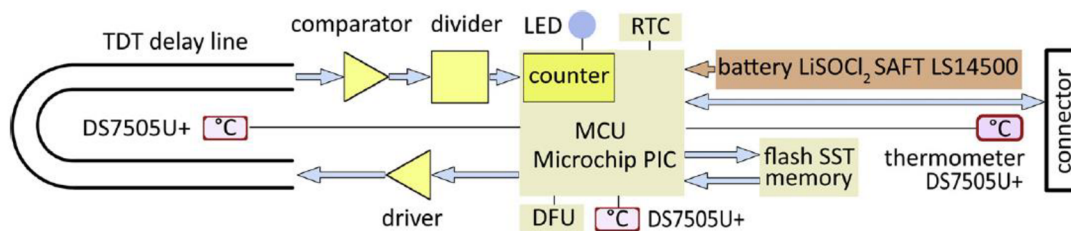


Obr. 3.12 Schéma TMS čidla s popisem rozmístění teploměrů a vlhkostního senzoru (Wild et al., 2019).

Vnější konstrukce čidla by se dala rozdělit na dvě části – podzemní a nadzemní. Podzemní část je vyrobena jako vícevrstvá deska plošných spojů. Ve vrchní části konstrukce čidla se nachází elektronika, ta je zapečetěna v pevné, ale elastické, voděodolné epoxidové pryskyřici. Kvůli lepší mechanické odolnosti je tato část umístěna v plastové trubce ze styren akrylonitrilu. Nadzemní část je ještě umístěna v bílé mechanicky odolné plastové trubici (Speedpex Barrier), která navíc obsahuje baterii a senzor pro měření teploty. Horní část nadzemní konstrukce je osazen železnou čepičkou, která funguje i jako konektor pro propojení s počítačem (Wild et al., 2019).

Paměť zvládne pojmout až 524288 záznamů, které senzor skladuje po celou svou životnost od své první inicializace ve výrobě. Uživateli je zabráněno zastavit sběr dat, kvůli předejití ztráty dat nesprávným nastavením. Senzory tedy sbírají data i během skladování. Základní časový krok sběru dat je 15 minut, který se dá po propojení s počítačem zkrátit nebo prodloužit. Při připojení senzoru k počítači se vždy synchronizuje čas a počítačem, aby nedocházelo k časovému posunu. Senzor je napájen lithiovou baterií, která má teoretickou životnost až 15 let (Wild et al., 2019).

V senzoru se nachází několik elektronických komponentů. Nejpodstatnější částí senzoru je MCU (mikročip), který provádí operace v systému senzoru. Data jsou zapisována a ukládána do paměti (jednotlivé komponenty viz. Obr. 3.13) (Wild et al., 2019).



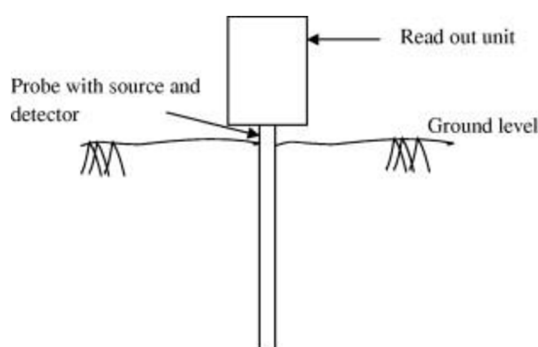
Obr. 3.13 Schéma elektronických komponentů v TMS a jejich komunikace (Wild et al., 2019).

Výhodou senzorů využívající TDT metodu je poměrně vysoká přesnost při použití kalibrace, velký objem měřené zeminy, dlouhodobé měření a nízká pořizovací cena. Nevýhody TDT je však porušení přirozeného půdního profilu při instalaci, vyžaduje kalibraci, je citlivá na zasolení a není vhodná pro jednorázové použití (Litschmann, 2010).

3.3.3. Neutronová metoda

Měření vlhkosti půdy pomocí neutronové metody využívá pro měření radioaktivní zářiče (Mukhlisin et al., 2021).

Tato metoda měření vlhkosti se zakládá na principu interakce rychlých neutronů emitujících zdrojem s jádry elementů, ze kterých je složena vlhká zemina. Jako zdroj neutronů se používá americium nebo beryllium. Rychlé neutrony vyzařované těmito prvky ztrácí největší množství energie po srážce s jádrem vodíku (který je obsažen v molekule vody). Vodík se v minerální složce půdy téměř nevyskytuje, proto se na základě toho dá stanovit vlhkost půdy (obr. 3.14) (Kutílek & Nielsen, 1994; Lekshmi et al., 2014).



Obr. 3.14 Schéma měření vlhkosti půdy pomocí neutronové sondy (Lekshmi et al., 2014).

Neutronová metoda se nejčastěji používá pro terénní měření vlhkosti půdy v profilu. Nevýhodami jsou neschopnost měřit povrchové půdní vrstvy, vysoká cena,

dobře zaučená obsluha a práce s radioaktivním zářičem. Na druhou stranu naměřená hodnota reprezentuje průměrnou vlhkost v dané hloubce a měřit lze do poměrně velkých hloubek (Dobriyal et al., 2012; Kutílek, 1978; Lekshmi et al., 2014).

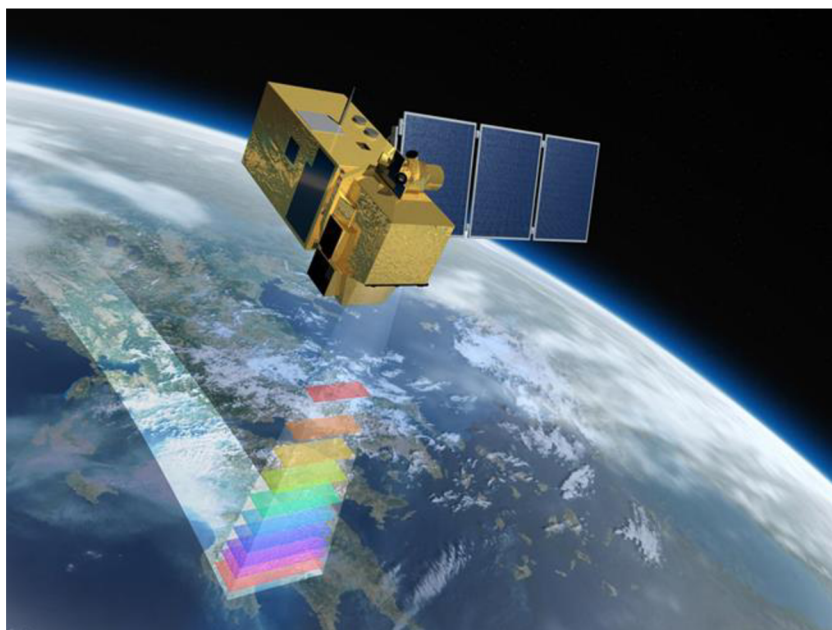
3.3.4. DPZ – dálkový průzkum země

Mezi metody DPZ patří všechny metody, které nevyžadují přímý kontakt se sledovaným objektem. Jde tedy o družice, letecké snímkování, ale i měření z pevných, nebo mobilních platform, spektrometrická měření ze stativů apod (obr. 3.15 a obr. 3.16). DPZ je založena zejména na dvou principech. První podstatou je, že díky změně obsahu vody v půdě je pozměněno její spektrální chování. Druhým principem je změna v množství půdní vláhy, která vede k fyziologickým změnám vegetačního pokryvu. Takové změny mají vliv na charakteristiku listů, a tím i na souhrnnou odrazivost vegetace (Lu et al., 2017).



Obr. 3.15 Použití GDP (ground penetrating radar) URL č. 4

Předpokladem úspěšného využití DPZ je podrobný průzkum zkoumané oblasti a zpracování tzv. klíče pro interpretaci dat. Při kalibraci narážíme na problém, jak spojit dálkové a pozemní měření. Obě mají značně odlišná měřítka a nesrovnatelnou přesnost. Dále vyvstává problém, že pro terénní měření využíváme nepřímé metody měření, které se musí kalibrovat, uplatňují se zde vnější vlivy a ty znesnadňují interpretaci dat. Při kalibraci dat DPZ tedy jde o dvojnásobnou kalibraci se všemi možnými nepříznivými důsledky. Nespornou výhodou však zůstává velikost obsažené oblasti v krátkém čase (Dobriyal et al., 2012; Huisman et al., 2003).

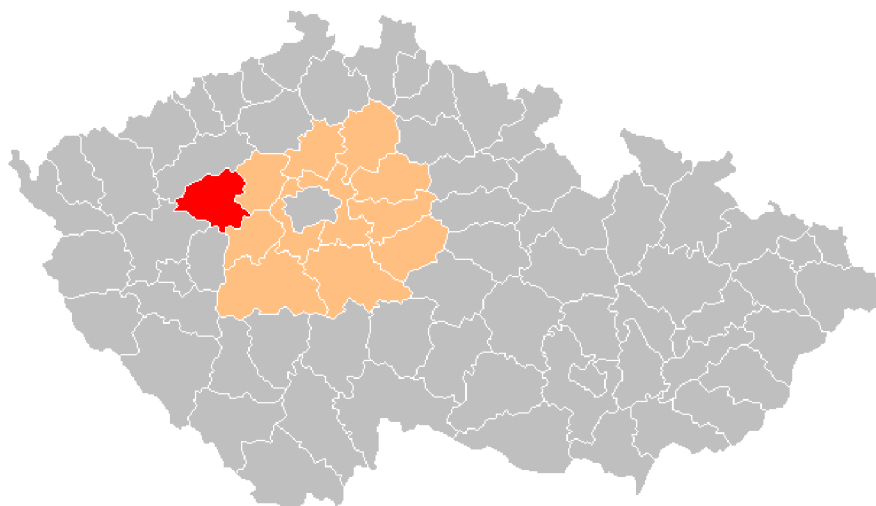


*Obr. 3.16 Družice Sentinel 2 snímající sluneční záření odražené od zemského povrchu URL
č. 5*

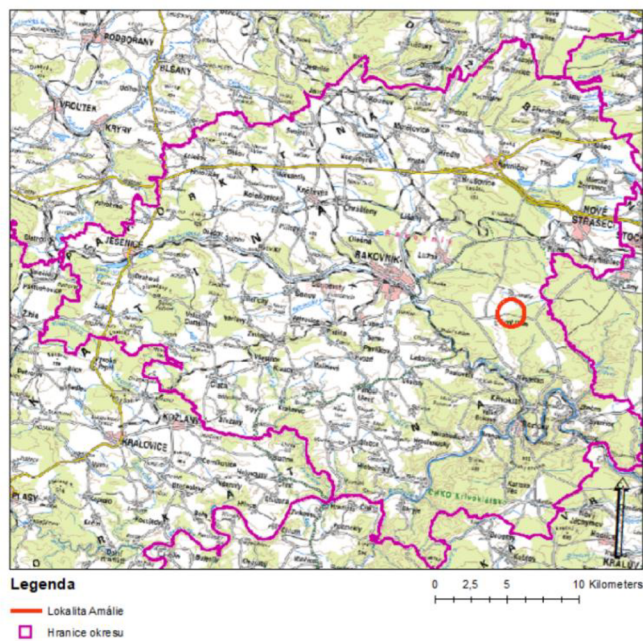
4. Charakteristika zájmové lokality a popis půdy na lokalitě Amálie

Laboratorní kalibrace byly použity na senzorech osazených na lokalitě Amálie, kde probíhá projekt „Chytrá krajina“. Tato oblast spadá do CHKO Křivoklátsko (AOPK, 2022). Zájmové území se rozkládá v povodí Brejlského potoka a Karlova luhu, v katastrálním území Ruda u Nového Strašecí, v okrese Rakovník v Středočeském kraji (obr. 4.1, obr. 4.2 a obr.4.3). Rozloha území je přibližně 2,2 ha (ČÚZK, 2022).

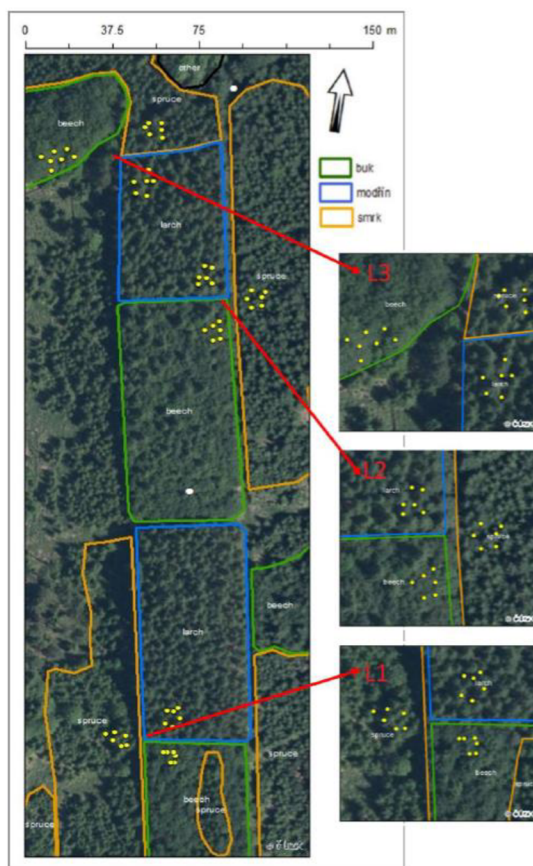
V lokalitě povodí Brejlského potoka v blízkosti transektu BP I probíhá podrobný monitoring na vybraných porostech smrku, buku a modřínu na třech lokalitách (9 polygonů, na každé lokalitě 3 polygony s různými porosty, viz obrázek 3). Celkem je osazeno pro podrobný monitoring v této lokalitě 55 čidel. V monokulturách smrku (3 x 3 čidel ve vrchní vrstvě, 3 x 3 čidel ve spodní vrstvě), buku (3 x 3 + 1 čidel ve vrchní vrstvě, 3 x 3 čidel ve spodní vrstvě) a modřínu (3 x 3 čidel ve vrchní vrstvě, 3 x 3 ve spodní vrstvě) (viz obr. 4.3). Čidla umístěná ve vrchní vrstvě měří vlhkost od povrchu do hloubky 14 cm a čidla umístěná ve spodní vrstvě měří vlhkost v hloubce od 15 cm do hloubky 29 cm (Jačka et al., 2021).



Obr. 4.1 Okres Rakovník v rámci ČR URL 6



Obr. 4.2 Lokalita Amálie v rámci okresu URL (ČÚZK, 2022, upraveno)



Obr. 4.3 jednotlivé senzory umístěné v rozdílných porostech buku lesního (uvnitř zeleně ohraničeného polygonu), modřínu opadavého (modře) a smrku ztepilého (oranžově) na třech lokalitách (L1, L2 a L3) (Jačka et al., 2021).

V souvislosti s probíhajícím projektem byl na lokalitě proveden hydrofyzikální průzkum půd.

Při odebrání půdy pro laboratorní kalibraci by zjištěná velká diverzita půdního profilu, jak v rámci celé lokality, tak i v rámci jednotlivých lesních porostů, kde i na pár metrech byl rozdíl mocnosti organické vrstvy poměrně velký (rozdíl v rozmezí 1 až 8 cm) (viz. obr. 4.4 a 4.5).



Obr. 4.4 Mocnost organické a minerální části půdy (bukový porost, BP I/1) na lokalitě Amálie, kde červená příčka zvýrazňuje přechod mezi organickou a minerální částí půdy (foto autor)



Obr. 4.5 Mocnost organické a minerální části půdy (bukový porost, BP I/1) na lokalitě Amálie, kde červená přímká zvýrazňuje přechod mezi organickou a minerální částí půdy (foto autor)

Z provedených zrnitostních rozborů vyplynulo, že se zde vyskytuje vysoký podíl prachových částic a to přes 60 %. Půdní druh byl klasifikován, z většiny měření, jako prachovitá hlína (silt loam). V ojedinělých případech byl půdní druh určen jako prachovitá jílovitá hlína (silty clay loam). Výsledky jednotlivých zrnitostních rozborů jsou uvedeny v tabulce č. 1. Na lokalitě minerální část půdy tvoří půda typu kambizem mesobazická a kambizem oglejená meosbazická (Státní geologická služba, 2022). U všech odebraných vzorků byla stanovena velmi podobná využitelná vodní kapacita (Jačka et al., 2021).

Lokalita Vrty	Jíl [%] ($< 2 \mu\text{m}$)	Prach [%] ($2\mu\text{m} - 0.05 \text{ mm}$)	Písek [%] ($0.05 - 2 \text{ mm}$)	Skelet [%] ($> 2 \text{ mm}$)	Půdní druh dle USDA
Amálie - BP 1/1 s 6.1.; smrk, v 10 cm	23.33 \pm 1.53	60.17 \pm 2.75	16.50 \pm 2.60	5.5	Silt loam (prachovitá hlína)
Amálie - BP 1/1 s 6.2.; smrk, v 30 cm	27.67 \pm 1.53	53.83 \pm 1.61	18.50 \pm 3.04	10.5	Silt loam (prachovitá hlína)
Amálie - BP 1/1 s 5.1.; buk, v 10 cm	23.67 \pm 1.15	63.50 \pm 1.80	12.83 \pm 2.93	6.6	Silt loam (prachovitá hlína)
Amálie - BP 1/1 s 5.2.; buk, v 30 cm	35.33 \pm 1.15	55.83 \pm 1.04	8.83 \pm 0.29	4.76	Silty clay loam (prachovitá jílovitá hlína)
Amálie - BP 1/2 s 4.1.; modřín, v 10 cm	18.5 \pm 2.12	67 \pm 4.24	14.5 \pm 2.12	2.6	Silt loam (prachovitá hlína)
Amálie - BP 1/2 s 4.2.; modřín, v 30 cm	19.25 \pm 1.06	62.25 \pm 3.18	18.5 \pm 2.12	6.1	Silt loam (prachovitá hlína)
Amálie - BP 1/2 s 3.1.; buk, v 10 cm	19.67 \pm 1.61	65.67 \pm 0.29	14.67 \pm 1.53	4	Silt loam (prachovitá hlína)
Amálie - BP 1/2 s 3.2.; buk, v 30 cm	21.5 \pm 1.32	64.5 \pm 3.28	14 \pm 3.46	4.1	Silt loam (prachovitá hlína)
Amálie - BP 1/3 s 1.1.; smrk, v 10 cm	22 \pm 1.00	63.67 \pm 1.53	14.33 \pm 2.31	5.1	Silt loam (prachovitá hlína)
Amálie - BP 1/3 s 1.2.; smrk, v 30 cm	23.33 \pm 0.58	60.33 \pm 0.58	16.33 \pm 0.58	3.9	Silt loam (prachovitá hlína)
Amálie - BP 1/3 s 2.1.; jasan, v 10 cm	24.25 \pm 0.35	61.25 \pm 1.77	14.5 \pm 2.12	1.9	Silty clay loam (prachovitá jílovitá hlína)
Amálie - BP 1/3 s 2.2.; jasan, v 30 cm	29 \pm 1.41	60 \pm 0.00	11 \pm 1.41	1.4	Silty clay loam (prachovitá jílovitá hlína)

Tab. 1. Zrnitostní rozbor a klasifikace půdního druhu (Jačka et al., 2021).

Dále z neporušených půdních vzorků byly objemové hmotnosti, objemové vlhkosti, laboratorní hodnoty K_s a retenční křivky. Nejvyšší hodnoty objemových hmotností (1,34 - 1,4) dosahovaly vzorku z hloubky přibližně 10 cm v okolí buku. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce č. 2. Hydraulická vodivost (K_s) byla stanovena ze vzorků z hloubky 5 cm a 20 cm. Vyšší hodnoty nabývaly vzorky odebrané v okolí smrku v horní vrstvě, která je ovlivněná kořeny a organickou hmotou (tab. č. 3). Ze stanovených plných vodních kapacit (pF 0) a polní vodní kapacity (pF 2) vyplývá, že maximálního nasycení dosahují vzorky odebrané u smrku, avšak polní kapacita u těchto vzorků byla nejnižší, z čehož vyplývá, oproti ostatním lesním porostům, horší schopnost dlouhodobého zadržení vody. Nejnižší pokles mezi pF 0 a pF2 byl zaznamená u vzorků odebraných u buku (tab. č. 4) (Jačka et al., 2021).

Lokalita	Lesní porost	Objemová hmotnost	Objemová vlhkost
BP I/1	smrk	1.23 ± 0.16	0.21 ± 0.06
	buk	1.40 ± 0.11	0.27 ± 0.02
	modřín	1.25 ± 0.06	0.25 ± 0.01
BP I/3	smrk	1.27 ± 0.13	0.24 ± 0.08
	buk	1.34 ± 0.03	0.32 ± 0.01
	modřín	1.31 ± 0.15	0.33 ± 0.02

Tab. 2. Objemové hmotnosti a vlhkosti, odběr pro BP I/1 dne 28.6.2021 a pro BP I/3 dne 12.7.2021 (Jačka et al., 2021).

Lokalita	Lesní porost	Hloubka odběru [cm]	K_s [$m \cdot s^{-1}$]
BP I/1	smrk	5	2.55E-04 ± 3.25E-02
		20	3.15E-06 ± 2.36E-04
	buk	5	3.96E-06 ± 4.69E-04
		20	2.48E-05 ± 3.61E-03
	modřín	5	2.97E-05 ± 3.26E-03
		20	3.29E-05 ± 4.04E-03
BP I/3	smrk	5	1.63E-04 ± 2.50E-02
		20	1.02E-06 ± 6.91E-05
	buk	5	5.41E-05 ± 7.01E-03
		20	3.86E-05 ± 2.19E-03
	modřín	5	1.76E-04 ± 3.06E-02
		20	6.41E-07 ± 6.50E-05

Tab. 3. Laboratorní hodnoty nasycené hydraulické vodivosti (K_s) měřené laboratorním permeametrem - odběr neporušených vzorků dne 28. 6. 2021 pro BP I/1 a 12. 7. 2021 pro BP I/3 (Jačka et al., 2021).

Lokalita	Lesní porost	Plná vodní kapacita (pF 0)*	Polní vodní kapacita (pF 2)
BP I/1	smrk	0.47 ± 0.01	0.30 ± 0.02
	buk	0.45 ± 0.05	0.33 ± 0.02
	modřín	0.46 ± 0.02	0.31 ± 0.02
BP I/3	smrk	0.46 ± 0.02	0.31 ± 0.02
	buk	0.44 ± 0.00	0.34 ± 0.02
	modřín	0.46 ± 0.05	0.37 ± 0.03

* Plná vodní kapacita je odhadem celkové pórovitosti zeminy

Tab. 4. Plná vodní kapacita a polní vodní kapacita – odběr neporušených vzorků dne 28. 6. 2021 pro BP I/1 a 12. 7. 2021 pro BP I/3 (Jačka et al., 2021).

5. Metodika

5.1. Odběr vzorků

5.1.1. Odběr vzorků pro kalibraci

Za účelem precizní laboratorní kalibrace senzorů na podmínky výzkumného stanoviště, byly na zájmové lokalitě Amálie (viz. „Popis lokality“), odebrány vzorky lesní půdy. Odběr byl proveden pro půdu vzniklou pod třemi rozdílnými porosty: smrku, buku a modřínu.

Samotný odběr jednotlivých vzorků probíhal tak, že v daném typu lesního porostu byl nejprve očištěn půdní povrch od rostlinného opadu a jeho nerozložených částí, které nebyly kompaktně integrovány do půdního profilu. Dále byla odebrána svrchní organická vrstva půdy v dostatečném množství. Spodní, minerální část půdy, byla získána po odebrání vrstvy organické obdobným způsobem, avšak neodebírala se z větší hloubky, než do jaké se dostávají čidla TMS4.

Výsledkem odběrů bylo šest nádob půdy. Dva pro každý lesní typ. Jeden s minerální a druhý s organickou částí půdy.

5.1.2. Odběr referenčních vzorků

Pro validaci kalibračních křivek měřených ve výše zmíněných vzorcích lesní půdy a pro další laboratorní měření, byly dále odebrány neporušené půdní vzorky do Kopeckého válečku (obr. 5.1) o objemu 100 cm³ a výšce 4,06 cm v blízkosti čidel TMS4 (1 až 2 m).



Obr 5.1 Kopeckého váleček (vzadu) a násada pro provádění odběru (vpředu) (foto autor)

Odebrána byla ve třech úrovních, ve kterých jsou čidla osazena, a to: horní (2 až 6 cm), střední (8 až 12 cm) a hluboká (18 až 22 cm). Vzorky byly po získání váženy hned v terénu.

5.2. Měření a kalibrace

5.2.1. Příprava vzorků

Odebrané půdní vzorky byly v laboratoři před samotným měřením vysušeny. Sušení probíhalo na plachtě na vzduchu, během kterého byly z půdy odstraněny cizí předměty (kameny, dřevo atd), dále byly rozdrceny půdní agregáty (obr. 5.2). Tímto způsobem byly připraveny všechny odebrané půdy určené pro kalibraci.



Obr 5.2 Sušení organické (vlevo) a minerální (vpravo) půdy v laboratoři (foto autor)

Neporušené půdní vzorky z Kopeckého válečků byly rozděleny dle hloubek odběrů. Vzorky odebrané z mělké a hluboké části půdního profilu byly určeny pro stanovení retenčních čar kvůli popisu půdních vlastností v lokalitě. Tyto vzorky byly umístěny do pískového tanku na plné nasycení a následně byly měřeny charakteristické hodnoty pF 0 – 4,18 s využitím pískového a kaolínového tanku, přetlakové aparatury a přístroje WP4C pro stanovení bodu vadnutí (není předmětem BP). Vzorky odebrané ze střední části půdního profilu byly sušeny v sušící peci při 60 °C po dobu tří dnů, kvůli následovnému určení objemových hmotností a objemových

vlhkostí při jejich odběru. Výsledné hodnoty vlhkosti byly použity pro porovnání půdních vlhkostí získaných ze senzorů instalovaných na lokalitě.

5.2.2. Kalibrační měření

Principem laboratorní kalibrace bylo postupné vytvoření několika vlhkostních stavů pro každý připravený vzorek půdy, ke kterému byla následně přiřazena průměrná hodnota signálu naměřená senzory, umístěnými v kalibrační nádobě s půdou. Jednotlivé vlhkosti stavy půdy byly připraveny tímto způsobem:

Vzorek půdy byl nejprve pomalu provlhčen tlakovým ručním postřikovačem a pečlivě promíchán. Tímto způsobem bylo do vzorku rovnoměrně zapracováno předem stanovené množství vody.

Před plněním kalibrační nádoby byly odebrány tři vzorky pro gravimetrické určení hmotnostní vlhkosti (viz. 3.2.1 Gravimetrická metoda). Plnění nádoby a odběr vzorků probíhalo standardizovaným způsobem. Kalibrační nádoba byla plněna do přibližně 2/3 svého objemu, který odpovídal přibližně 8 až 10 kg suché minerální půdy a 5 až 7 kg suché organické půdy. Na základě objemu půdy v nádobě a hmotnosti vlhké půdy a gravimetricky stanoveném obsahu vody byla vypočtena objemová hmotnost suché půdy (dále objemová hmotnost). S využitím objemové hmotnosti vlhkost půdy byla hmotnostní vlhkost přepočtena na objemovou vlhkost (viz. 3.2.1 Gravimetrická metoda). U plnění bylo třeba předpokládat, že v průběhu změny vlhkostních stupňů může docházet k objemovým změnám v důsledku bobtnání a sesedání půdy a objemová hmotnost musela být tedy stanovena pro každý vlhkostní stav. Do nádoby byla následně vložena čidla. Nakonec byla nádoba neprodyšně zakryta folií, aby nedocházelo k nechtěnému výparu vody z půdy, které by způsobilo zkreslení hodnot vlhkosti půdy (obr. 5.3).



Obr 5.3 Nádoba naplněna minerální půdou osazena senzory a zakryta fólií (foto autor)

V tomto stavu se nádoba ponechala 1 až 2 dny v závislosti na tom, jak moc byl vzorek nasycen. Při vyšším nasycení trvá déle, než dojde k ustálení signálu čidel. Počáteční kolísání hodnot signálu je způsobeno prosycováním půdy v celém objemu.

Po uplynutí dostatečně doby byla čidla vyjmuta z nádoby. Nádoba byla vyprázdněna a půdní vzorek byl připravena pro další měření.

Pro každou půdu bylo tímto způsobem stanoveno 5-8 vlhkostních bodů přiřazených průměrné hodnotě signálu senzorů. Tyto vlhkostní stavy byly připraveny rovnoměrným vmícháváním známého množství vody do půdy. Pro přesné stanovení hodnoty vlhkosti byly odebrány vzorky viz výše.

5.3. Stažení a zpracování dat

Stažení dat proběhlo za použití aplikace od firmy TOMST – Lolly manager. Z gravimetricky určené hmotnostní vlhkosti byla dopočítána objemová vlhkost díky známému objemu a hmotnosti nádoby, ve které bylo prováděno kalibrační měření. Hodnota signálu byla zprůměrována ze čtyř čidel umístěných v nádobě a k ní přiřazena objemová vlhkost. Takto byla stanovena objemová vlhkost pro daný signál pro každý vlhkostní stav. Dále byla vytvořena kalibrační křivka pro minerální a organickou půdu každého lesního typu, kde na ose x byly hodnoty signálu a na ose y hodnoty signálu.

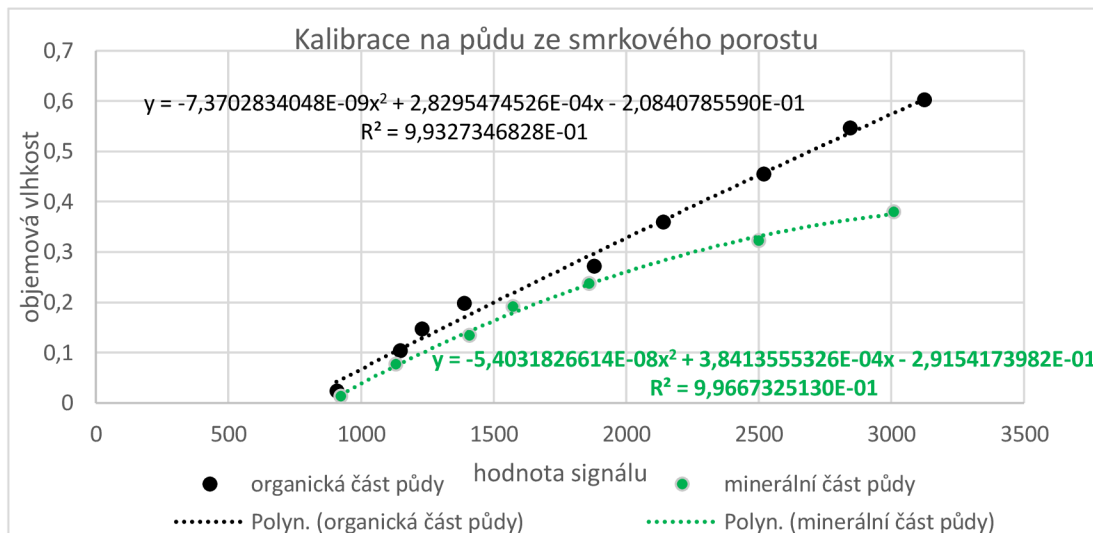
Vynesené body byly proloženy polynomem druhého stupně, díky kterým byly získány kalibrační rovnice (předpis kalibrační křivky) pro konkrétní půdu.

Hodnoty signálu získané z terénu byly přepočítány laboratorně určenou kalibrační rovnicí v různých variacích (pouze minerální kalibrace, pouze organická kalibrace, organická a minerální kalibrace v poměru 50:50, organická a minerální kalibrace v poměru 30:70 a kalibrační rovnicí od výrobce (TOMST) v programovacím jazyku R.

Validace laboratorně určených kalibračních křivek a kalibračních křivek od výrobce proběhla porovnáním s vlhkostmi zjištěnými z Kopeckého válečků. K čidlům standart byly přiřazovány mělké referenční vzorky z hloubky – 2 až 6 cm a kalibrace k tomu odpovídající. K čidlům long byly přiřazovány hluboké referenční vzorky z hloubky 18 až 22 cm a kalibrace tomu odpovídající. Hodnoty objemové hmotnosti z referenčních vzorků byly, pro každý lesní porost a hloubku, zvlášť zprůměrovány a byly určeny směrodatné odchylky. Hodnoty objemové vlhkosti, vypočtených pomocí kalibrací (laboratorní, TOMST), byly stejným způsobem zprůměrovány a porovnány s referenční objemovou vlhkostí. Poté byly vypočteny rozdíly mezi jednotlivými kalibracemi a referenční objemovou vlhkostí. Výsledná přesnost jednotlivých kalibrací byla určena pomocí průměru rozdílů jednotlivých kalibrací (čím bližší nule, tím přesnější). Ty byly následně porovnány v tabulce a graficky znázorněny, dle jednotlivých kalibrací a přesnost kalibrací na jednotlivých lokalitách a hloubkách měření.

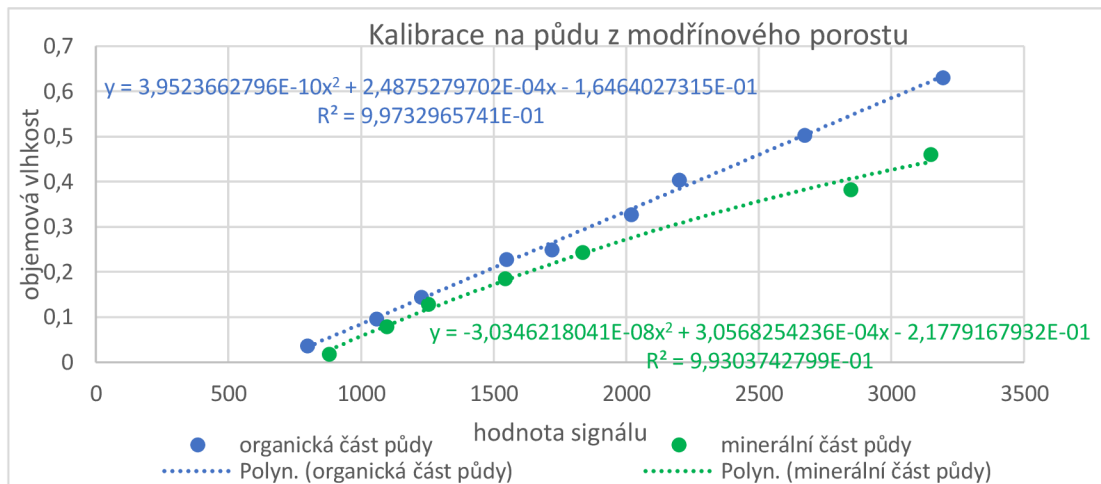
6. Výsledky

6.1. Kalibrace čidel na organickou a minerální půdu a jednotlivé lesní porosty



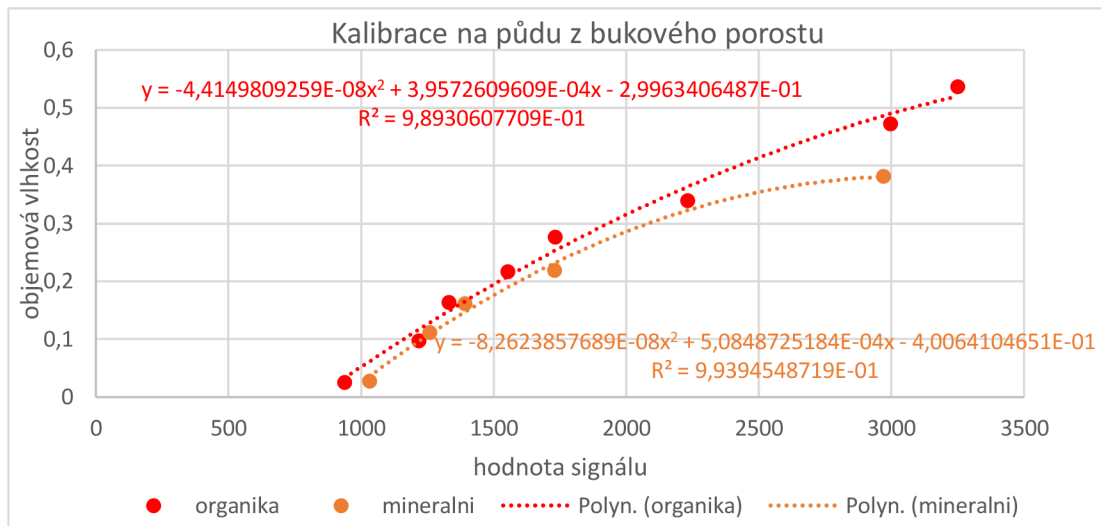
Graf 1. Hodnoty signálu z čidla s příslušnou vypočtenou objemovou vlhkostí ve smrkovém porostu

V grafu z kalibrace čidel jsou hodnoty signálu na organickou a minerální část půdy ze smrkového porostu (osa x) a k nim vypočtené objemové vlhkosti (osa y). pro organickou a minerální půdu jsou zvlášť vytvořeny polynomy druhého řádu a jejich rovnice s hodnotou spolehlivost R^2 . Počáteční hodnoty obou kalibrací začínají v téměř stejném bodě, kde objemová vlhkost je přibližně 0,02 a hodnota signálu okolo 920. Konečné hodnoty (plné nasycení) jsou však rozdílné. U minerální části plné nasycení došlo k plnému nasycení při 0,39 objemové vlhkosti. U organické části půdy byl konečný bod mnohem vyšší a to 0,6 objemové vlhkosti. Z grafu je patrné, že polynom u organické části půdy se tvarem blíží k přímce. U polynomu k minerální části půdy není přesně zachycen kalibračními body bod lomu křivky polynomu.



Graf 2. Hodnoty signálu z čidla s příslušnou vypočtenou objemovou vlhkostí v modřínovém porostu

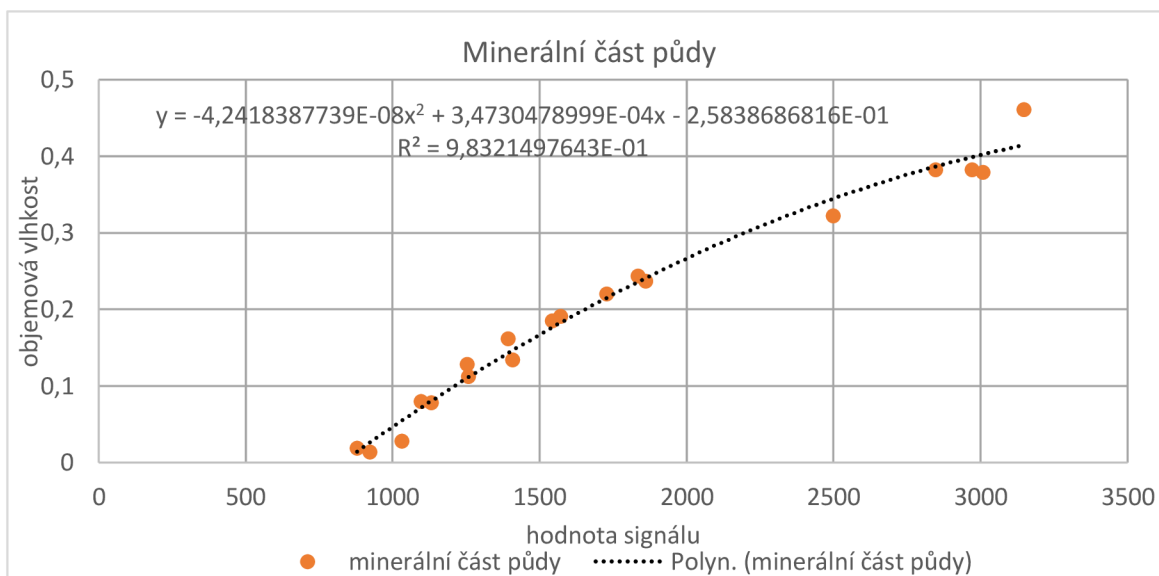
V grafu z kalibrace čidel jsou hodnoty signálu na organickou a minerální část půdy z modřínového porostu (osa x) a k nim vypočtené objemové vlhkosti (osa y). pro organickou a minerální půdu jsou zvlášť vytvořeny polynomy druhého řádu a jejich rovnice s hodnotou spolehlivost R^2 . Počáteční hodnoty jsou mírně odlišné. Organická část začíná v bodě 0,04 objemové vlhkosti a minerální část v bodě 0,02 objemové vlhkosti. Koncové body (plné nasycení) jsou od sebe vzdálenější. Minerální část je plně nasycena u hodnoty 0,46 objemové vlhkosti a u organické části došlo k plnému nasycení u hodnoty 0,63 objemové vlhkosti. Tvar křivky polynomu organické půdy se blíží k přímce, za to polynom minerální půdy je zakřiven, ale není však přesněji zachycen kalibrační lom polynomu v rozmezí 0,24 až 0,38 objemové hmotnosti.



Graf 3. Hodnoty signálu z čidla s příslušnou vypočtenou objemovou vlhkostí v bukovém porostu

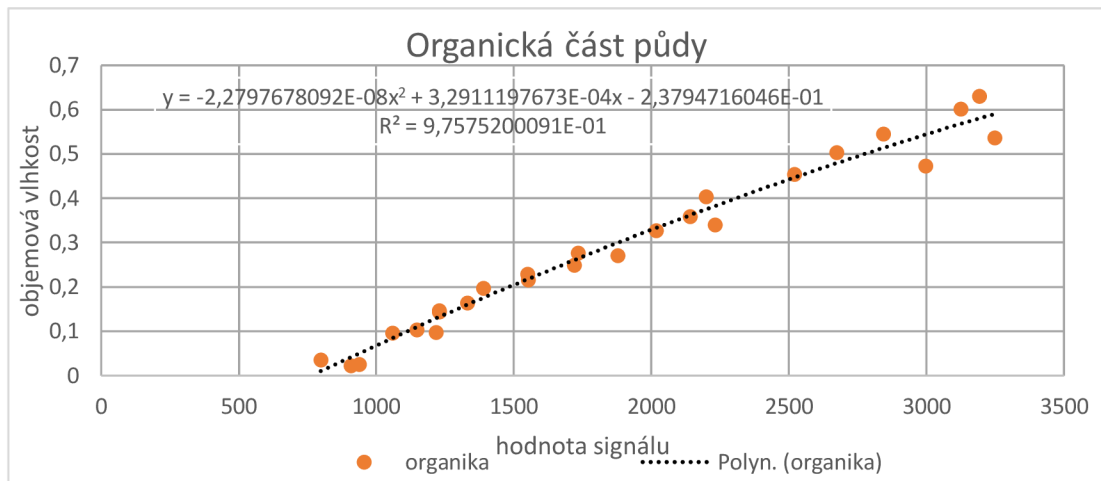
V grafu z kalibrace čidel jsou hodnoty signálu na organickou a minerální část půdy z bukového porostu (osa x) a k nim vypočtené objemové vlhkosti (osa y). pro organickou a minerální půdu jsou zvlášť vytvořeny polynomy druhého řádu a jejich rovnice s hodnotou spolehlivost R^2 . Počáteční hodnoty mají téměř stejnou hodnotu objemové hmotnosti, ale mírně jinou hodnotu signálu. U organické části půdy je to 937 a u minerální části půdy je to 1031. Hodnoty plného nasycení jsou rozdílné podobně jako u předchozích kalibrací. U organické části půdy je hodnota objemové vlhkosti 0,53 a u minerální části půdy 0,38 objemové vlhkosti. Tvar obou polynomů je zakřivený. U polynomu minerální části půdy je velmi špatně zachycen lom křivky v rozmezí 0,21 až 0,38 objemové vlhkosti.

6.2. Kalibrace pro organickou a minerální půdu



Graf 4. Hodnoty signálu z čidla s příslušnou vypočtenou objemovou vlhkostí z minerální části půdy u všech lesních porostů

V grafu jsou hodnoty signálu a vypočtené objemové vlhkosti pro všechny typy minerální části půdy z předchozích grafů (viz. graf 1. až 3.). Na ose x je hodnota signálu a na ose y příslušná vypočítaná objemová vlhkost. Kalibrace pro všechny typy minerální půdy byly sloučeny do jednoho grafu, kvůli jejím podobnostem. Body jsou proloženy polynomem druhého stupně s rovnicí, použitou dále pro vyhodnocení signálu čidel z terénu, a hodnotou spolehlivost R^2 . Rozsah objemových vlhkostí je od 0,01 až 0,46 objemové vlhkosti. V největším lomu křivky není dostatečný počet kalibračních bodů, to je v rozmezí 0,23 až 0,32 objemové vlhkosti. Křivka polynomu je mírně zakřivena.



Graf 5. Hodnoty signálu z čidla s příslušnou vypočtenou objemovou vlhkostí z organické části půdy u všech lesních porostů

V grafu jsou hodnoty signálu a vypočtené objemové vlhkosti pro všechny typy organické části půdy z předchozích grafů (viz. graf 1. až 3.). Na ose x je hodnota signálu a na ose y příslušná vypočítaná objemová vlhkost. Kalibrace pro všechny typy minerální půdy byly sloučeny do jednoho grafu, kvůli jejím podobnostem. Body jsou proloženy polynomem druhého stupně s rovnicí, použitou dále pro vyhodnocení signálu čidel z terénu, a hodnotou spolehlivost R^2 . Rozsah vlhkostí je, na rozdíl od předchozího grafu, větší. Objemové vlhkosti jsou v rozmezí od 0,02 až 0,63. Je to způsobeno tím, že organická část půdy má větší množství, velikost i kvalitu pórů než minerální část půdy. Křivka polynomu se tvarem blíží k přímce. Oproti kalibraci na minerální půdu je zde lépe zachycen průběh celé křivky kalibračními body.

6.3. Validace kalibrací pomocí referenčních vzorků

Před ukázkou validací je záhodno předvést z jakých referenčních objemových vlhkostí, které byl získány gravimetricky – měly být nejpřesnější, se vycházelo pro validaci.

lokality BP I/1 mělké (-4 cm)					
lesní porost	číslo válečku	objemová hmotnost	objemová vlhkost	průměr objemových vlhkostí	směrodatná odchylka
smrk	100	0,2839	0,3546	0,27898	0,066330136
	107	0,2246	0,2865		
	130	0,5079	0,3119		
	143	0,1993	0,2657		
	102	0,5974	0,1762		
modřín	118	1,2345	0,2841	0,2135	0,044299718
	108	0,3234	0,2027		
	137	0,3391	0,1617		
	138	1,1533	0,2136		
	112	0,7883	0,2054		
buk	98	1,3323	0,2283	0,36162	0,076889999
	103	0,8236	0,3628		
	135	1,0674	0,408		
	129	0,9504	0,3998		
	113	1,066	0,4092		

Tab. 5. objemové vlhkosti referenčních vzorků a jejich směrodatné odchylky

Z tabulky je možno vyčíst, jak se jednotlivé objemové vlhkosti pro určitý lesní porost výrazně lišily. Například u smrku jsou hodnoty objemové vlhkosti od 0,17 až 0,35. U ostatních referenčních vzorků, odebíraných v jiných lesních porostech, hloubkách a lokalitách, jsou objemové vlhkosti podobně rozdílné. Validace pomocí neporušených vzorků nepotvrdila, že námi provedená laboratorní kalibrace na půdě ze zájmové lokality budou přesnější než univerzální kalibrace od výrobce. Ve třech ze čtyř případů byla nejpřesnější kalibrace od výrobce, kde rozdíly od referenčních vzorků objemové vlhkosti se pohybovaly v rozmezí 0,04 až 0,09. Laboratorní kalibrace pouze na organickou část půdy byla velice nepřesná a dosahovala rozdílu až 0,18 objemové vlhkosti. Pouze v jednom ze čtyř případů byla nejpřesnější laboratorní kalibrace

BP I/1	Váleček	směr.	minerální		organika		50/50		30/70		TOMST	
standart-M	obj.vlh.*	odchylka*	vlhmin*	rozdíl	vlhorg*	rozdíl	vlhorgmin*	rozdíl	vlhorgmin2*	rozdíl	univlh*	rozdíl
smrk	0,279	0,066	0,313	0,034	0,395	0,116	0,354	0,075	0,338	0,059	0,258	-0,021
modřín	0,214	0,044	0,365	0,152	0,477	0,263	0,421	0,207	0,399	0,185	0,334	0,121
buk	0,362	0,077	0,375	0,014	0,494	0,133	0,435	0,073	0,411	0,049	0,352	-0,009
Průměr				0,067			0,171		0,119		0,098	0,050

**názvy sloupců: průměrná objemová vlhkost, směrodatná odchylka, průměrná objemová vlhkost z minerální kalibrace, průměrná objemová vlhkost z organické kalibrace, průměrná objemová vlhkost z kalibrace minerální a organice v poměru 50:50, průměrná objemová vlhkost z kalibrace organice a minerální v poměru 30:70 a průměrná objemová vlhkost z kalibrace od výrobce*

Tab. 6. porovnání objemové vlhkosti mělkých referenčních vzorků, s jejich směrodatnou odchylkou, s objemovými vlhkostmi jednotlivých kalibrací pro lokalitu BP I/1, měřenou čidlem TMS4 standart

V tabulce jsou podstatné průměry rozdílů, se kterými se pracuje dál. V tomto případě je z těchto průměrů patrné, že nejpřesnější kalibrace je od výrobce čidel TMS4 od firmy TOMST 0,050. Z kalibrací vytvořených v laboratoři je nejpřesnější kalibrace na minerální část půdy 0,067. Nejméně přesná je kalibrace na organickou část půdy 0,171.

BP I/1	Váleček	směr.	minerální		TOMST	
long-H	obj.vlh.	odchylka	vlhmin	rozdíl	univlh	rozdíl
smrk	0,220	0,043	0,377	0,158	0,355	0,135
modřín	0,220	0,014	0,355	0,135	0,318	0,098
buk	0,249	0,050	0,337	0,088	0,290	0,041
Průměr				0,127		0,091

Tab. 7. porovnání objemové vlhkosti hlubokých referenčních vzorků, s jejich směrodatnou odchylkou, s objemovou vlhkostí vypočtenou pomocí kalibrace pro lokalitu BP I/1, měřenou čidlem TMS4 long

V tabulce je z průměrů patrné, že přesnější kalibrace čidel je od firmy TOMST. Průměr absolutních hodnot rozdílů laboratorní kalibrace je 0,127 a průměr absolutních hodnot rozdílů kalibrace od firmy TOMST je 0,091.

BP I/3	Váleček	směr.	minerální		organika		50/50		30/70		TOMST	
standart-M	obj.vlh.	odchylka	vlhmin	rozdíl	vlhorg	rozdíl	vlhorgmin	rozdíl	vlhorgmin2	rozdíl	univlh	rozdíl
smrk	0,293	0,103	0,327	0,034	0,417	0,124	0,372	0,079	0,354	0,061	0,278	-0,015
modřín	0,346	0,074	0,340	-0,006	0,435	0,089	0,387	0,042	0,368	0,023	0,294	-0,052
buk	0,447	0,017	0,390	-0,057	0,524	0,077	0,457	0,010	0,430	-0,017	0,385	-0,062
Průměr				0,032			0,097		0,043		0,033	0,043

Tab. 8. porovnání objemové vlhkosti mělkých referenčních vzorků, s jejich směrodatnou odchylkou, s objemovými vlhkostmi jednotlivých kalibrací pro lokalitu BP I/3, měřenou čidlem TMS4 standart

V tabulce jsou podstatné průměry rozdílů, se kterými se pracuje dál. V tomto případě je z těchto průměrů patrné, že nejpřesnější kalibrace je laboratorní kalibrace na minerální půdu, kde průměr absolutních hodnot rozdílů je 0,032. Následuje laboratorní kalibrace, hodnotou 0,033, za použití jak organické, tak i minerální kalibrace v poměru 30:70. Poté se stejným výsledkem je kalibrace od výrobce a laboratorní kalibrace na minerální a organickou půdu s hodnotou 0,043. Nejméně přesná je kalibrace na organickou část půdy s hodnotou 0,097.

BP I/3	Váleček	směr.	minerální		TOMST	
long-H	obj.vlh.	odchylka	vlhmin	rozdíl	univlh	rozdíl
smrk	0,252	0,032	0,370	0,118	0,346	0,094
modřín	0,286	0,010	0,378	0,092	0,361	0,075
buk	0,275	0,021	0,382	0,108	0,371	0,096
Průměr				0,106		0,089

Tab. 9. porovnání objemové vlhkosti hlubokých referenčních vzorků, s jejich směrodatnou odchylkou, s objemovou vlhkostí vypočtenou pomocí kalibrace pro lokalitu BP I/3, měřenou čidlem TMS4 long

V tabulce je z průměrů patrné, že přesnější kalibrace čidel je od výrobce Průměr absolutních hodnot rozdílů laboratorní kalibrace je 0,106 a průměr absolutních hodnot rozdílů kalibrace od firmy TOMST je 0,089

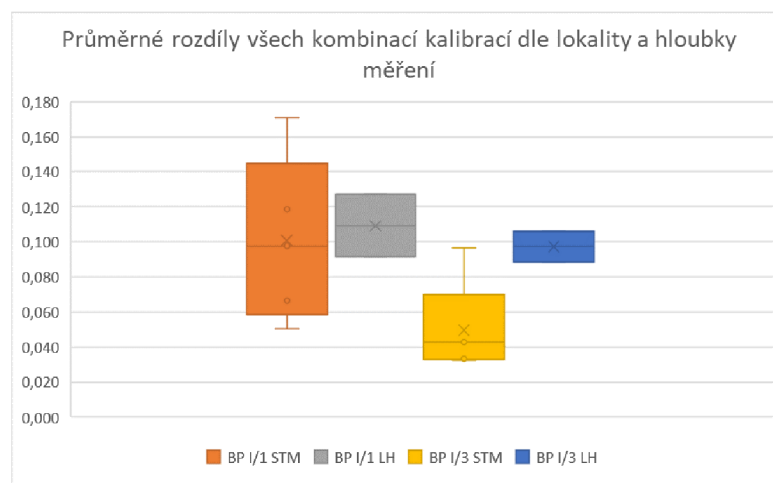
Lokalita, čidlo a hloubka*	Rozdíly kalibrací a jejich kombinací				
	minerální	organická	organická a minerální (50/50)	organická a minerální (30/70)	TOMST
BP I/1 STM	0,067	0,171	0,119	0,098	0,050
BP I/1 LH	0,127				0,091
BP I/3 STM	0,032	0,097	0,043	0,033	0,043
BP I/3 LH	0,106				0,089

*označení lokality (BP I/1), typ čidla (ST – standartní, L – dlouhé), hloubka (M – mělké, H – hluboké)

Tab. 10. porovnání jednotlivých rozdílů absolutních průměrů dle kalibrací, lokalit a hloubky měření a odběru vzorků

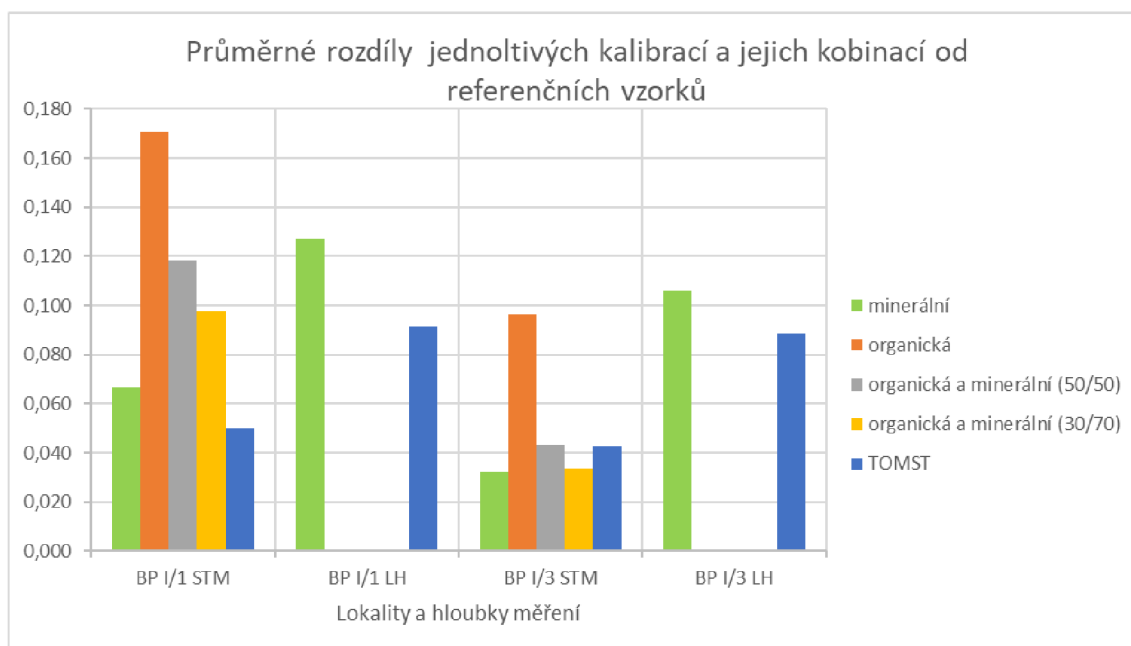
V tabulce jsou všechny průměry rozdílů absolutních hodnot seřazeny a rozděleny použité kalibrace a lokality. Z hodnot lze usoudit že obecně všechny

kalibrace byly přesnější na lokalitě BP I/3. Dále byly všechny kalibrace přesnější v menší hloubce (2 až 6 cm).



Graf 6. Přesnost všech kalibrací dle lokality vycházející z tab. 10

Z grafu vyplývá, že nejpřesněji kalibrace fungovaly na lokalitě BP 1/3 na standartních čidlech v malé hloubce, jak už bylo uvedeno u tab. 10.



Graf 7. Přesnost jednotlivých kalibrací a jejich kombinací dle lokalit vycházející z tab. 10

Z grafu je patrné, že ve třech ze čtyř lokalit byla kalibrace od výrobce nejpřesnější. Pouze v jednom nebyly nejpřesnější, a to na lokalitě BP I/3 s odběrem referenčních vzorků v hloubce 2 až 6 cm. Tomto případě byly lepší hned dvě laboratorní kalibrace – kalibrace pouze na minerální půdu, která v tomto případě byla

nejpřesnější, a kalibrace na organickou a minerální půdu v poměru 30:70. V obou případech použití kalibrace pouze na organickou půdu byl výsledek oproti ostatním velmi nepřesný a vyčnívá vůči ostatním kalibracím. Rozdíly kalibrací, které byly výsledkem kombinace kalibrace na organickou a minerální půdu, byly velmi podobné.

7. Diskuse

Byla prováděna kalibrace nepřímé metody měření vlhkosti půdy na lesní půdě z lokality Amálie. Z názvu je patrné, že metoda neměří přímo vlhkost půdy, ale fyzikální vlastnosti, které souvisí s vlhkostí půdy, tím pádem zde vstupuje nespočet proměnných, které nedokážeme ovlivnit (Dane & Topp, 2020; Kutílek, 1978; Kutílek & Nielsen, 1994). K nepřesnostem laboratorní kalibrace přispívá i fakt, že kalibrace byla jak časově náročná, tak i pracná.

Z výsledků kalibrace vyvstává na první pohled jeden problém. Při kalibraci se nepodařilo přesně zachytit vlhkostní body v rozmezí 0,25-0,35 objemové vlhkosti. Pro další kalibrace je potřeba se v tomto rozmezí zpřesnit. Zpřesnění by bylo možné díky měření po menších krocích – přidávání menšího množství vody do půdy, na které se provádí kalibrace a zvýšení počtu kalibračních bodů. Neschopnost zachytit průběh vlhkosti půdy a hodnoty signálu v tomto rozmezí je zásadní i z hlediska toho, že v terénu půda běžně dosahuje těchto vlhkostí čili použití kalibrace na senzorech, osazených v terénu a následné vyhodnocení vlhkosti může být nepřesné. Dále během kalibrace v laboratoři docházelo v nádobách, ve kterých byly prováděna kalibrace, ke značným objemovým změnám, které mají za následek zkreslení výsledků kalibrace. V reálném prostředí k objemovým změnám dochází, ale ne v tako velkém měřítku vzhledem k měřenému objemu půdy.

Během provádění validace kalibrací vyvstalo na povrch několik dalších rizik, které ovlivňují přesnost kalibrace a její následné validace. Objemové vlhkosti referenčních vzorků byly rozkolísané. To je způsobeno heterogenitou lesního prostředí a neschopností přesně zachytit půdní profil, ve kterém jsou senzory osazené. I na malé ploše kolísala mocnost organické (humusové) vrstvy půdy výrazně. Bohužel pro přesné zachycení půdního profilu by bylo potřeba odebrat takové množství referenčních vzorků, že by půda byla tak porušená, že by se změnilo její hydrologické chování a hydraulické vlastnosti (Kutílek et al., 2004).

Dále byly zjištěny v terénu, během sběru dat z čidel, že na senzory působí i další vlivy, jako lesní fauna. I přes použití speciálních sprejů proti ní (Pachové-ohradníky, 2022), bylo bezprostřední okolí některých senzorů rozryto nebo dokonce i samotné senzory vytaženy z půdy. Proto jsme přistoupili nakonec k ochraně pomocí klecí podobně jak doporučuje (Wild et al., 2019). Působení různých faktorů mění

charakteristiku půdy, na které se provádí měření. Podle validace byly výsledné vlhkosti díky kalibracím na lokalitě BP I/3 přesnější než na lokalitě BP I/1. To je pravděpodobně zapříčiněno tím, že lesní porost na lokalitě BP I/3 je značně starší než na lokalitě BP I/1, půdní profil je tedy, v rámci podobné plochy jako na lokalitě BP I/1, méně heterogenní a na validaci méně působí faktor rozdílných mocností organické vrstvy půdy.

Dalším zdrojem nejistot jsou samotná čidla. Čidlo musí být při osazení v kontaktu s měřenou půdou v celé své ploše. Během osazení v terénu může docházet ke vzniku vzduchových prostorů okolo čidla, kde následně vzniká preferenční proudění vody a ovlivňuje tak přesnost měření vlhkosti půdy.

Větší přesnosti měření vlhkosti půdy by bylo možno docílit pomocí aspoň částečné eliminace uvedených faktorů. Heterogenitu půdy v lesním prostředí nelze ovlivnit, takže obecně zachytit a změřit vlhkost půdy v lesním prostředí je poměrně náročné. Další možností by bylo použití jiné nepřímé metody, například TDR čidla (viz. Např. Mittelbach et al., 2012), které je však nákladné na pořízení, ale přesnější a jednodušší na použití. Tímto způsobem by bylo možné měřit vlhkost blíže sensorům TMS4 s omezením rizika porušené hydraulického chování půdy.

8. Závěr

Získané poznatky z validace nepotvrdily větší přesnost laboratorní kalibrace, než je kalibrace od výrobce.

Samotná kalibrace potřebuje zpřesnit. Jak bylo zmíněno výše, je potřeba rovnoměrně zachytit, kalibračními body, celý průběh sycení půdy.

Je potřeba také zlepšit způsob vzorkování neporušených půdních vzorků pro validaci, které je na vysoce heterogenní lesní půdě obtížné. Referenční vzorky odebírané v terénu byly v málem počtu, a podepsala se na nich heterogenita lesní půdy. Do budoucna je potřeba referenční vzorky odebírat blíže osazeným senzorům, ve větším počtu a odebírat je v navazujících hloubkách (např. 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm).

Validace pomocí neporušených vzorků nepotvrdila, že námi provedená laboratorní kalibrace na půdě ze zájmové lokality budou přesnější než univerzální kalibrace od výrobce. Ve třech ze čtyř případů byla nejpřesnější kalibrace od výrobce, kde rozdíly od referenčních vzorků objemové vlhkosti se pohybovaly v rozmezí 0,04 až 0,09. Laboratorní kalibrace pouze na organickou část půdy byla velice nepřesná a dosahovala rozdílu až 0,18 objemové vlhkosti. Pouze v jednom ze čtyř případů byla nejpřesnější laboratorní kalibrace

Na základě provedené kalibrace a validace bylo zjištěno, kde má provádění kalibrace senzorů slabé místa, které je potřeba zlepšit. Krom použití čidel TMS4, by se zároveň mohlo použít TDR, na které je potřeba také provést kalibraci. Díky přesnějším kalibracím bude možné lépe zachytit, monitorovat a popsat vlhkosti půdy na lokalitě Amálie, kde probíhá projekt „Chytrá krajina“.

9. Seznam použité literatury

- AOPK. (2022). *Správa CHKO Křivoklátsko: Charakteristika oblasti - Zemědělství*.
<https://krivoklatsko.ochranaprirody.cz/charakteristika-oblasti/zemedelstvi/>
- ASTM International. (2018). *Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester*.
- Bouma, J. (2012). *Hydropedology as a Powerfull Tool for Environmental Policy and Regulations: Toward Sustainable Land Use, Management and Planning*. In *Hydropedology*.
- Česká zemědělská univerzita v Praze. (2021). *Chytrá krajina*.
<https://cvpk.czu.cz/cs/r-13920-chytra-krajina>
- ČÚZK. (2022). *Geoprohlížeč*. <https://nahlizeni.dokn.cuzk.cz/>
- Dane, J. H., & Topp, C. G. (2020). Part 4: Physical Methods. In *Methods of Soil Analysis*,.
- 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*, 458–459, 110–117.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021>
- Gurav, M., Sarik, S., Singh, K., Pendharkar, G., & Shojaei Baghini, M. (2018). IITB_TDR: A portable TDR system with DWT based denoising for soil moisture measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, 283, 317–329.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.09.065>
- Hillel, D. (1982). *Introduction to Soil Physics*. Academic Press.
- Huisman, J. A., Hubbard, S. S., Redman, J. D., & Annan, A. P. (2003). Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review. *Vadose Zone Journal*. www.vadosezonejournal.org
- Jačka, L., Kuželková, M., & Kovář, M. (2021). *Souhrnná zpráva Amálie Chytrá krajina II - lesní půda: Teploty a vlhkost lesní půdy*.
- Kutílek, M. (1978). *Vodohospodářská pedologie*. Praha: SNTL.
- Kutílek, M., & Nielsen, D. R. (1994). Soil Hydrology. In *Soil Science* (Issue 2).
- Lekshmi, S. S. U., Singh, D. N., & Shojaei Baghini, M. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, 54, 92–105.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
- Litschmann, T. (2010). *Měření půdní vlhkosti*.
https://is.muni.cz/el/1431/jaro2010/Z0075/um/Prednaska_Dr_Litschmann_Pudn_iVlhkost.pdf
- Lu, Y., Song, W., Lu, J., Wang, X., & Tan, Y. (2017). An Examination of Soil Moisture Estimation Using Ground Penetrating Radar in Desert Steppe. *Water*, 9(7), 521. <https://doi.org/10.3390/w9070521>
- 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.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169412000844>
- Mukhlisin, M., Astuti, H. W., Wardihani, E. D., & Matlan, S. J. (2021). Techniques for ground-based soil moisture measurement: a detailed overview. In *Arabian Journal of Geosciences* (Vol. 14, Issue 19). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08263-0>
- Muñoz-Carpena, R. (2004). *Field Devices For Monitoring Soil Water Content*.
<http://edis.ifas.ufl.edu>

- MŽP. (2020). *Definice půdy*.
[https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/definice_pudy/\\$FILE/OOHPP-Definice_pudy-20080820.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/definice_pudy/$FILE/OOHPP-Definice_pudy-20080820.pdf)
- Noborio, K. (2001). Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31(3), 213–237. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(00\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00184-8)
- Pachové-ohradníky, (2022) <https://www.pachove-ohradniky.eu/SADA-STOP-divocakum-proti-ryti-cerne-zvere-d113.htm>
- Pavlásek, J., & Jačka, L. (2014). *Hydropedologie*. Česká Zemědělská Univerzita.
- 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 Journal*, 7(1), 358–389.
<https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>
- Robinson, D. A., Jones, S. B., Wraith, J. M., Or, D., & Friedman, S. P. (2003). A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry. *Vadose Zone Journal*, 2(4), 444.
<https://doi.org/10.2136/vzj2003.0444>
- Šantrůčková, H. (2014). *Základy ekologie půdy*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.
- Státní geologická služba (2022) <http://www.geology.cz/extranet/mapy/mapy-online/mapove-aplikace>
- Sun, Z. J., & Young, G. D. (n.d.). *A cost effective soil moisture instrument based on time-domain transmission measurement*.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.018>
- Will, B. (2011). Time domain transmission sensors for soil moisture measurements. *2011 19th Telecommunications Forum (TELFOR) Proceedings of Papers*, 16–19. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2011.6143881>
- Zhao, Y., & Ling, D. (2016). Study on a calibration equation for soil water content in field tests using time domain reflectometry. *Journal of Zhejiang University Science A*, 17(3), 240–252. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1500065>

10. Seznam URL odkazů

URL č. 1 – <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/souprava-pro-stanoveni-vlhkosti-karbidovou-metodou.html> [cit. 2022.20.3]

URL č. 2 - <https://www.e-test.eu/field-tdr-probe.html> [cit. 2022.20.3]

URL č. 3 - <https://www.landscapetechnologies.com.au/rd1200-handheld-reader-new-2> [cit. 2022.20.3]

URL č. 4 - https://en.wikipedia.org/wiki/Ground-penetrating_radar [cit. 2022.20.3]

URL č. 5 - <https://worldfrom.space/cs/sentinel-2/> [cit. 2022.20.3]

URL č. 6 - https://cs.wikipedia.org/wiki/Okres_Rakovník [cit. 2022.20.3]