**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra pedologie a ochrany půd**

Česká zemědělská univerzita v Praze

# Vliv úpravy půdního povrchu na teplotní a vlhkostní režim půd

## Bakalářská práce

**Autor práce: Šárka Sokolářová**

**Obor studia: Veřejná správa v zemědělství a krajině**

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

**© 2021 ČZU v Praze**

**Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Vliv úpravy půdního povrchu na teplotní a vlhkostní režim půd" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 22.4.2021 _____

**Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Miroslavu Férovi, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady, trpělivost a také pomoc s analýzou vzorků půdy v laboratoři. Dále děkuji své rodině a přátelům za podporu po celou dobu psaní bakalářské práce i celého bakalářského studia.

# Vliv úpravy půdního povrchu na teplotní a vlhkostní režim půd


**Souhrn**

Cílem práce bylo na základě literatury a terénního experimentu popsat vlhkostní a teplotní režim půd, které jsou pokryty různými povrchy. Těmito povrchy byly betonová dlažba, mulčovací kůra, sekaná tráva, nesekaná tráva a holá půda.

Tato bakalářská práce se skládá z literární rešerše a metodické části.

V literární rešerši byly popsány fyzikální a chemické vlastnosti půdy. Z fyzikálních vlastností jsou to barva půdy, struktura, textura půdy, pórovitost, měrná a objemová hmotnost. Chemické vlastnosti půdy jsou především půdní reakce, salinita, ale i obsah a kvalita organické hmoty, obsah živin a sorpce v půdě. Dále byla v literární rešerši popsána přítomnost vody v půdě, tedy půdní vlhkost, spolu s metodami jejího měření. Vlhkost půdy je pro produkční funkci i další funkce půdy naprosto nezbytná. Popsána byla také teplota půdy, která má významný vliv na procesy v půdě i mimo ni. Na konci literární rešerše byly popsány různé úpravy půdních povrchů a jejich vlastnosti, především pak jejich vliv na teplotní a vlhkostí režim půd pod těmito povrchy.

V metodická části práce byl popsán především laboratorní postup kalibrace senzorů TMS-4, které byly použity pro měření vlhkostí a teplot půdy na experimentální lokalitě. Kalibrace probíhala ve vzorcích půdy odebraných na experimentální lokalitě. Kalibraci bylo nutné provést pro přepočet naměřených vlhkostních hodnot „Countů“ na vlhkostní procenta. Výzkumná lokalita se nacházela v Semicích ve Středočeském kraji, poblíž Lysé nad Labem a asi 1 kilometr od řeky Labe. Teploty a vlhkosti byly na studované lokalitě měřeny celkem pod pěti typy povrchů – betonovou dlažbou, holou půdou, sekanou a nesekanou trávou a mulčovací kůrou a zároveň v pěti různých hloubkách – 5 cm, 10 cm, 25 cm, 50 cm a 80 cm pod povrchem. Při zadání bakalářské práce bylo již měření na této lokalitě založeno. Kromě kalibrace senzorů byly v laboratoři analyzovány porušené a neporušené půdní vzorky odebrané z různých horizontů na výzkumné lokalitě. Na odebraných vzorcích byly měřeny fyzikální a chemické vlastnosti půdy.

Výsledky měření na lokalitě mezi dny 1.1.2020 a 31.12.2020 byly na základě poznatků z literární rešerše vyhodnoceny a popsány prostřednictvím grafů, obsahujících naměřené hodnoty. Zvlášť byl popsán režim teplot a režim vlhkosti půdy pod sledovanými povrchy. V laboratoři byla provedena také analýza fyzikálních a chemických vlastností studované půdy. Dále byly výsledky diskutovány a porovnány s dostupnými výzkumy jiných autorů. Výsledky dokazují, že různá úprava půdního povrchu má vliv na teplotní i vlhkostí režim půd ve všech sledovaných hloubkách, přičemž s rostoucí hloubkou se tento vliv snižuje.



**Klíčová slova:** úprava půdy, vlhkost půdy, teplota půdy, senzor TMS-4

# Effect of soil surface treatment on soil temperature and water regime


**Summary**

The aim of this bachelor thesis is to describe the humidity and temperature regime of soils, which are covered with different surfaces based on both literature and field experiment. These surfaces were concrete paving, bark mulch, cut grass, uncut grass and bare soil.

This bachelor thesis consists of a literary research and a methodical part.

The physical and chemical properties of the soil were described in the literary research. The physical properties are soil color, structure, soil texture, porosity, specific gravity and soil bulk density. The chemical properties of the soil are mainly soil reactions, salinity, but also the quantity and quality of soil organic matter, nutrient content and sorption in the soil. Then the water in the soil, i.e. soil moisture, was described in the literature research together with the methods of its measurement. Soil moisture is essential for the production function and other soil functions as well. Soil temperature has also been described. It has a significant effect on processes inside and also outside the soil. At the end of the literature research, various modifications of soil surfaces and their properties were described, especially their impact on the soil temperature and soil moisture regime of soils under these surfaces.

In the methodological part of the thesis mainly the laboratory method of TMS-4 sensors calibration was described. These sensors were used to measure soil moisture and temperature at the experimental site. Calibration was performed on soil samples taken at the experimental site. Calibration had to be performed to convert the measured humidity values of „Counts“ to humidity percentages. The research location was placed in Semice in Central Bohemian Region, near Lysá nad Labem and about 1 kilometer from the river Elbe. Temperatures and humidity at the studied locality were measured under a total of five types of surfaces – concrete paving, bare soil, cut and uncut grass and bark mulch and at the same time in five different depths of 5, 10, 25, 50 and 80 cm. When submitting the bachelor ‘s thesis, the measurement system was already set in the research locality. In addition to the calibration of the sensors, the laboratory analyzed disturbed and intact soil samples taken from different horizons at the research site. The physical and chemical properties of the soil were measured on the samples taken.

The results of measurement in the research locality between 1 January 2020 and 31 December 2020 were evaluated and graphs containing measured values were described based on findings from literature search. The temperature regime and the soil moisture regime under the monitored surfaces were described separately. Furthermore, the results were discussed and compared with available researches done by other authors. An analysis of the physical and chemical properties of the studied soil was also performed in the laboratory. The results show that different soil surface treatments have an impact on the temperature and humidity regime of soils in all monitored depths. This effect decreases with increasing depth.



**Keywords**: soil treatment, soil moisture, soil temperature, sensor TMS-4

# Obsah

**1 Úvod ..... 1**

**2 Cíl práce ..... 2**

**3 Literární rešerše ..... 3**

**3.1 Půda ..... 3**

**3.2 Vlastnosti půdy ..... 4**

3.2.1 Fyzikální vlastnosti ..... 4

3.2.1.1 Barva půdy ..... 4

3.2.1.2 Struktura půdy ..... 5

3.2.1.3 Textura půdy ..... 5

3.2.1.4 Pórovitost ..... 6

3.2.1.5 Měrná a objemová hmotnost ..... 7

3.2.2 Chemické vlastnosti ..... 8

3.2.2.1 Půdní reakce ..... 8

3.2.2.2 Salinita ..... 8

3.2.2.3 Obsah a kvalita organické hmoty ..... 9

3.2.2.4 Obsah živin v půdě ..... 9

3.2.2.5 Sorpce ..... 9

**3.3 Voda ..... 10**

3.3.1 Povrchové vody ..... 10

3.3.2 Půdní voda ..... 10

3.3.3 Metody měření půdní vlhkosti ..... 11

3.3.3.1 Přímé metody měření vlhkosti ..... 12

3.3.3.2 Nepřímé metody měření vlhkosti ..... 12

**3.4 Teplota půdy ..... 12**

**3.5 Vlastnosti různých povrchů ..... 13**

3.5.1 Holá půda ..... 14

3.5.2 Tráva ..... 14

3.5.3 Mulčovací kůra ..... 15

3.5.4 Betonová dlažba ..... 16

**4 Metodika ..... 17**

**4.1 Lokalita ..... 17**

4.1.1 Popis půdy na vybrané lokalitě ..... 17
**4.2 Analýza půdních vlastností ..... 18**
4.2.1 Fyzikální vlastnosti ..... 18
4.2.1.1 Objemová hmotnost ($\rho_d$) ..... 18
4.2.1.2 Pórovitost (P) ..... 19
4.2.1.3 Zrnitost půdy ..... 19
4.2.1.4 Specifická hmotnost zeminy ($\rho_z$) ..... 19
4.2.2 Chemické vlastnosti ..... 19
4.2.2.1 Půdní reakce ..... 19
4.2.2.2 Salinita ..... 20
4.2.2.3 Kvalita humusu (Q4/6) ..... 21
4.2.2.4 Obsah organického uhlíku (Cox) ..... 21
**4.3 Měření teploty a vlhkosti ..... 21**
4.3.1 Senzor TMS-4 ..... 22
4.3.2 Instalace senzorů ..... 23
**4.4 Kalibrace senzorů ..... 24**
**5 Výsledky a diskuse ..... 26**
**5.1 Fyzikální vlastnosti ..... 26**
**5.2 Chemické vlastnosti ..... 27**
**5.3 Kalibrace ..... 28**
**5.4 Teplota půdy ..... 29**
**5.5 Vlhkost půdy ..... 39**
**6 Závěr ..... 50**
**7 Literatura ..... 51**
**8 Seznam obrázků ..... 54**
**9 Seznam tabulek ..... 55**
**10 Seznam použitých zkratek a symbolů ..... 56**
**11 Samostatné přílohy ..... I**
**11.1 Příloha I ..... I**

# 1 Úvod

Vlhkost a teplota půdy patří mezi základní vlastnosti půdy, které ovlivňují mnoho půdních procesů. Půdní vlhkost i teplota půdy jsou popsány v literární rešerši této práce.

Monitoring vlhkosti půdy je důležitý zejména pro zjištění stavu vlhkosti a případnou prevenci před výskytem sucha, které má negativní dopad na rostliny a tím i na lidskou populaci a populaci ostatních živočichů, pro které rostliny slouží jako potrava. V opačném případě, při dlouhodobém zamokření půdy, také dochází k nechtěným dopadům na rostliny, které nemohou vykazovat optimální kvantitu a kvalitu produkce (Blažek a kol. 2006). Dále jsou znalosti o vlhkosti půdy důležité pro stanovení optimální závlahy rostlin na zemědělských plochách.

Teplota půdy má významný vliv na půdní procesy a má také, stejně jako vlhkost půdy, značný vliv na produkci plodin. Pro každou rostlinu jsou vhodné jiné teploty a velké výkyvy teplot pak nejsou vhodné pro žádnou rostlinu, je tedy třeba zabezpečit vhodné podmínky pro jejich život (Šarapatka 2014). Kromě vlivu na rostliny můžeme pozorovat i vliv teploty půdy na procesy mimo půdu, těmi může být například oteplování okolních oblastí.

Kromě těchto půdních vlastností jsou v literární rešerši popsány také základní fyzikální a chemické vlastnosti půd, které jsou následně v metodické části práce analyzovány na vzorcích půdy odebraných na experimentální lokalitě. Stanovení těchto vlastností půd je důležité pro pochopení různých půdních procesů, které jsou na těchto vlastnostech závislé. Mezi tyto procesy patří například schopnost infiltrace nebo evaporace, některé vlastnosti půd ale ovlivňují i již zmíněnou teplotu nebo vlhkost půdy.

Různé povrchy pokrývající půdu mohou také významně ovlivňovat vlhkostní a teplotní režimy v půdě, i mimo ni. Každý sledovaný povrch má své výhody i nevýhody a jeho použití je tak vhodné pro jiné účely.

Vlhkostní a teplotní režimy půd jsou měřeny senzory, které je potřeba pro správné výsledky nejprve zkalibrovat v laboratoři. Kalibraci senzorů je třeba provádět v podmínkách odpovídajících podmínkám na lokalitě, na které probíhá měření.

# 2 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce bylo popsat teplotní a vlhkostní režim půd pokrytých různými povrchy, kterými byly holá půda, sekaná a nesekaná tráva, mulčovací kůra a betonová dlažba. Tyto povrchy jsou typické pro zemědělské plochy, zahrady a centra menších i větších měst.

Zároveň bylo cílem zjistit, jaký je režim teplot a vlhkostí pod těmito povrchy v různých hloubkách, a to mezi 5 cm a 80 cm pod povrchem.

Pro vyhodnocení dat získaných z měření na experimentální lokalitě bylo třeba provést kalibraci senzorů TMS-4, které byly na lokalitě využity.

Důvodem výběru experimentální lokality byla půda s vysokým obsahem písku. Písčité půdy zatím nebyly použity při podobných výzkumech, takže dalším cílem bylo porovnat režim vlhkosti a teplot písčité půdy s výzkumy provedenými na jiných druzích půd.

# 3 Literární rešerše

## 3.1 Půda

Půda je přírodní složkou krajiny, podobně jako rostliny, živočichové, nebo vodstvo (Bičík a kol. 2009). Vzniká zvětráváním hornin, rozkladem organické hmoty a působením půdotvorných faktorů (Pavlů 2018). Těmi jsou matečná hornina, klimatický faktor, biologický faktor, čas a reliéf. Dalším faktorem může být například i ten lidský. Půda vzniká zvětráváním matečné horniny, která je pro půdu základním stavebním kamenem (Pavlů 2018). Klima je důležité například pro vlhkostní a teplotní režim půd nebo vegetační pokryv. Biologický faktor představují především mikroorganismy a rostliny, které v půdě žijí, nebo zde mají kořeny. Půdní organismy a vegetace, stejně jako klima, ovlivňují vlhkost v půdě i obsah živin. Vznik půdy trvá značné časové období, v současné době se podle Pavlů (2018) odhaduje pro různé půdní typy tisíce až více než deset tisíc let. Reliéf, tedy sklonitost a orientace svahu má na vznik půdy také značný vliv. Ovlivňuje délku slunečního záření a množství dopadajících srážek. Lidskou činností se mění kvalita a množství již vzniklých půd. Lidskou činností a nevhodným hospodařením dochází především k erozi půdy, ztrátám organické hmoty a dalším nežádoucím účinkům (Morvan a kol. 2018). Je důležité půdu chránit před těmito degradacemi, aby byly zachovány její schopnosti i pro budoucí generace. Jedním z možných řešení je přechod na ekologické zemědělství, které praktikuje například kompostování organických zbytků a jejich následnou aplikaci do půdy, střídání plodin nebo prodloužení času půdního pokryvu (Morvan a kol. 2018). Praxí ekologického zemědělství dochází ke zvyšování organické hmoty v půdě, větší stabilitě půdních agregátů a snížení míry eroze půdy.

Půdní prostředí je zastoupeno třemi složkami, pevnou, kapalnou i plynnou. Pevná složka půdy se skládá z organických i anorganických (minerálních) částic. Kapalná složka půdy se nazývá půdní voda. Tato kapalná složka v půdě neobsahuje pouze vodu, ale také mnoho ve vodě rozpuštěných organických i anorganických látek, které jsou důležité nejen pro výživu rostlin. Plynná složka se nazývá půdní vzduch a je spolu s půdní vodou obsažena v půdních pórech. V průměru dosahují tyto tři složky půdy následujících hodnot – přibližně polovinu, tedy 50 % zastupují půdní částice a po 20-30 % půdní voda a půdní vzduch (Šarapatka 2014). V případě vlhké půdy se zvyšuje podíl vody a klesá podíl vzduchu, naopak u suché půdy se zvyšuje podíl půdního vzduchu na úkor podílu půdní vody. Pokud je půda utužená, obsahuje ve stejném objemu méně pórů, a naopak více půdních částic.

Půda má mnoho funkcí – produkční, hydrologickou a vodohospodářskou, ekologickou, hygienickou, kulturní a další (Bičík a kol. 2009). Produkční funkce je schopnost půdy zajišťovat produkci plodin potřebných pro obživu obyvatelstva a produkci krmiv pro hospodářská zvířata. Hydrologická a vodohospodářská funkce představuje především zadržování vody, půda je hlavním zdrojem napájení vodních toků a vytváří vhodné podmínky pro život lidí, živočichů i rostlin. Bez půdy by voda rychle odtékala a například v České republice by tak panovaly podmínky podobnější spíše pouštním oblastem. Ekologická funkce půdy – půda určuje rozmanitost ekosystémů, výskytu společenstev různých druhů rostlin i živočichů, nebo také rozmanitost celé krajiny (Bičík a kol. 2009). Je třeba myslet také na negativní dopady antropogenní činnosti na tuto funkci půdy, která může vést například ke ztrátě biodiverzity rostlin i živočichů. Hygienická funkce půdy je přeměna toxických látek a jejich degradace

dříve, než se dostanou k podzemní vodě, kterou tak chrání před znečištěním. Půda má, podle vědeckovýzkumné práce Johna Stanforta (Bičík a kol. 2009), také příznivý vliv na imunitní systém člověka, na rozdíl od městské zástavby, která má na lidské zdraví spíše opačný vliv. Kulturní funkcí půdy rozumíme uchování informací o minulých generacích a jejich hospodaření v půdě. Půda byla hospodařením v minulosti velmi ovlivněna a je ovlivňována stále. Proto je také nutná její ochrana, aby bylo zabezpečeno hospodářské využití půdy i pro budoucí generace.

Půda je nepostradatelná pro růst rostlin, je domovem mnoha živočichů a také zdrojem poznatků o klimatických poměrech na daném místě v dávné historii. Půda posykuje domov vysokému počtu organismů, od bakterií přes houby, plže, hmyz, až po žížaly a brouky. Živočichy, kteří žijí v půdě, nazýváme edafon.

## 3.2 Vlastnosti půdy

Rozlišujeme fyzikální a chemické vlastnosti půdy. Vlastnosti půd ovlivňují vhodnost použití půd pro produkci potravin, mohou nám poskytnout informace o předpokladech pro zadržování vody v půdě, nebo o vhodnosti použití půdy pro stavební účely.

Mezi vlastnosti půdy se řadí barva, struktura, textura, skeletovitost, vlhkost půdy, konzistence, měrná a objemová hmotnost, pórovitost, obsah humusu, půdní reakce, sorpce, oxidačně-redukční potenciál, obsah živin a další vlastnosti.

### 3.2.1 Fyzikální vlastnosti

Mezi fyzikální vlastnosti půdy řadíme barvu, strukturu, texturu, pórovitost, měrnou a objemovou hmotnost.

Fyzikální vlastnosti půdy ovlivňují například schopnost půdy zadržovat vodu, nebo také vytvářet vhodné prostředí pro správný růst a vývoj rostlin.

#### 3.2.1.1 Barva půdy

Barva půdy je úzce spojena s obsahem organické hmoty v půdě. Barva půdy je na první pohled dobře viditelná, přesto má její určení jasná pravidla. Nejčastěji se používá určení barvy podle Munsellovy barevné škály, kde lze hodnotit barvu, odstín a sytost (Bičík a kol. 2009; Sáňka a kol. 2018). Barva se nemění pouze v závislosti na lokalitě, ale také v horizontu, v různých hloubkách. Barvu půdy ovlivňuje, kromě obsahu organických látek, také mnoho dalších faktorů, například půdotvorný substrát, obsah železa a jiných minerálních složek, zrnitost nebo vlhkost. Obsah organických látek, jinak také humusu, lze z barvy půdy odhadnout, většinou platí, že čím více organických látek, tím tmavší půda je. Není to však pravidlem, barva půdy může také odrážet kvalitu organické hmoty a mění se také v závislosti na dalších faktorech, například na již zmíněném obsahu železa. Železo, nejčastěji ve formě oxidů, může půdy zbarvovat do širokého spektra barev od červené, přes žlutou, až po zelenou. Vždy záleží na různých dalších faktorech (například oxidační a redukční procesy nebo vlhkost půdy) a na formě železa v půdě obsažené. Další minerální složky obsažené v půdě mohou být křemičitany, uhličitan vápenatý, soli a oxidy manganu.

#### 3.2.1.2 Struktura půdy

Půdní struktura udává seskupení a uspořádání částic půdy v prostoru. Půdní struktura je důležitá pro zadržování vody v půdě, infiltraci vody do půdy, či pro růst a vývoj kořenů rostlin (Šarapatka 2014). Struktura půdy vzniká přirozeně, je ale ovlivňována různými faktory. Například texturou půdy, teplotními změnami půdy, obsahem humusu (organických látek), činností půdních organismů (edafonu, například žížal), půdní vodou a půdním vzduchem nebo koagulací (shlukováním) půdních koloidů. Půdní strukturu ovlivňuje také lidský faktor. Podle tvarů můžeme strukturu rozdělit na kulovitou, polyedrickou, prismatickou, sloupkovitou a deskovitou (Šarapatka 2014). Struktura může být ve stavu elementárním, koherentním (slitém), nebo agregátovém. Agregáty mají různou stabilitu a mohou mít také různé tvary a velikost. Agregáty vznikají koagulací částic půdy (půdních koloidů), za pomoci fyzikálních a chemických procesů. Pevnost i vznik agregátů ovlivňuje také kořenový systém rostlin a množství organických látek, které fungují jako lepidlo a drží tak koloidy pohromadě. Můžeme také hodnotit stabilitu agregátů. Některé mohou být za sucha pevné, ale při zvýšené vlhkosti jsou nestabilní a rozpadají se. Agregáty dělíme podle velikosti na primární částice, mikroagregáty a makroagregáty.

#### 3.2.1.3 Textura půdy

Textura bývá jinak nazývána také zrnitostí půdy. Je to rozdělení půdy do zrnitostních frakcí nebo kategorií podle velikosti částic a jejich procentuálního zastoupení v půdě. Půdu dělíme do frakcí na písek, prach, jíl a další. Tyto frakce lze seskupit do čtyř kategorií I.-IV. a podle procentuálního zastoupení frakcí či kategorií rozdělit na půdní druhy (Tabulka 1). Kromě těchto čtyř kategorií se v půdě vyskytuje i takzvaný skelet, který se skládá zpravidla z částic větších rozměrů, jako jsou například štěrk nebo kameny (Pavlů 2018). Pro hodnocení půdy je třeba tyto částice nejprve odstranit.

**Tabulka 1** Rozdělení zrnitostních kategorií a frakcí (upraveno podle Pavlů 2018)

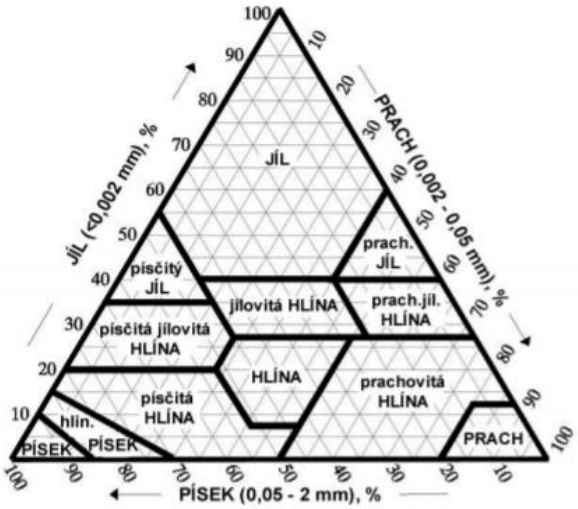
| **Název frakce** | **Velikost částic (mm)** | **Kategorie** |
|---|---|---|
| Koloidní jíl | <0,0001 | I. kategorie |
| Fyzikální jíl | 0,0001-0,002 | |
| Jemný prach | 0,002-0,01 | |
| Prach | 0,01-0,05 | II. kategorie |
| Práškový písek | 0,05-0,1 | III. kategorie |
| Písek | 0,1-2 | IV. kategorie |
| Hrubý písek | 2-4 | Skelet |
| Štěrk | 4-30 | |
| Kamení | >30 | |

Existuje několik možných klasifikací půdních druhů, z nichž nejznámější a nejpoužívanější je Novákova klasifikace. Novákova klasifikace rozlišuje 7 půdních druhů: písčitá, hlinitopísčitá, písčitohlinitá, hlinitá, jílovitohlinitá, jílovitá a jíl (Sáňka a kol. 2018; Pavlů 2018). Pro vyhodnocení touto klasifikací je třeba znát procentuální zastoupení I. zrnitostní kategorie (jílu) v půdě, na základě které dochází k rozdělení (Pavlů 2018) (Tabulka 2).

**Tabulka 2** Rozdělení půdních druhů Novákovou klasifikací (upraveno podle Sáňky a kol. 2018; Pavlů 2018)

| **Půdní druh** | **Obsah I. kategorie** | |
|---|---|---|
| Písčitá | <10 % | Lehké půdy |
| Hlinitopísčitá | 10-20 % | |
| Písčitohlinitá | 20-30 % | Středně těžké půdy |
| Hlinitá | 30-45 % | |
| Jílovitohlinitá | 45-60 % | Těžké půdy |
| Jílovitá | 60-75 % | |
| Jíl | >75 % | |

Dále známe například klasifikaci USDA. Tato klasifikace používá trojúhelníkový diagram (grafické znázornění) (Obrázek 1). Klasifikace USDA rozlišuje celkem 12 půdních druhů (Pavlů 2018; Sáňka a kol. 2018). Klasifikace textury půdy se používá například pro zařazení půdy do bonitovaných půdně ekologických jednotek – BPEJ (Sáňka a kol. 2018).




**Obrázek 1** Trojúhelníkový diagram klasifikace půdních druhů podle USDA (Pavlů 2018)

3.2.1.4 Pórovitost

Pórovitost udává, kolik je v půdě pórů v porovnání s celkovým objemem půdy, udává se v procentech. Hodnoty se mohou pohybovat od 30 do 70 %, nejčastěji však pórovitost

dosahuje hodnot 40-50 % (Pavlů 2018). Póry jsou volné prostory mezi částicemi, které mohou být vyplněné půdní vodou nebo půdním vzduchem v různém poměru. Póry ovlivňují půdotvorné procesy a zvětrávání hornin (Šarapatka 2014). Velikost pórovitosti je ovlivněna půdním druhem (písčité půdy mají nižší hodnoty než jemnější jílovité), obsahem organických látek (půdy s větším obsahem organických látek mají také větší procento pórovitosti) a utužením půdy – čím více je půda utužená, tím nižší je pórovitost (Šarapatka 2014). Utužení půdu mohou způsobovat například zemědělské stroje (Jordán a kol. 2010). Při nižší pórovitosti může být negativně ovlivněn růst kořenů rostlin. (Šarapatka 2014).

Póry můžeme rozdělit podle velikosti na kapilární, semikapilární a nekapilární (Sáňka a kol. 2018). Celková pórovitost je vždy součtem všech pórů, které jsou v půdní jednotce obsaženy (kapilární, semikapilární i nekapilární). Písčité (lehké) půdy mají vyšší podíl větších pórů, díky kterým jsou více provzdušněné, naopak jílovité (těžké) půdy mají větší podíl menších, kapilárních pórů a provzdušněnost je zde nižší (Sáňka a kol. 2018). Ideální provzdušněnost a obsah vody je tak v hlinitých půdách, které jsou řazeny mezi středně těžké půdy (Šarapatka 2014).

Kapilární póry hrají důležitou roli při zadržování vody a růstu a vývoji rostlin. Obsahují kapilární vodu, která je pro rostliny, na rozdíl od ostatní vody v jiných pórech, snadno dostupná (Pavlů 2018). Voda v kapilárních pórech nepodléhá gravitačním silám, ale může se pohybovat i vzhůru (Šarapatka 2014).

Semikapilární póry jsou vyplněné jak vodou, tak vzduchem a představují přechod mezi kapilárními a nekapilárními póry (Sáňka a kol. 2018).

Nekapilární póry jsou největší a nejčastěji jsou vyplněny vzduchem (Sáňka a kol. 2018). Mohou obsahovat gravitační vodu, která je zde přítomná pouze krátký čas, především bezprostředně po srážkách, rychle odtéká a pro rostliny je proto nevyužitelná.

#### 3.2.1.5 Měrná a objemová hmotnost

Měrná hmotnost, jinak také specifická hmotnost zeminy, udává hmotnost pevné fáze půdy, tedy půdy bez pórů, ku objemu této půdy. Měrná hmotnost půdy se udává v jednotkách g/cm$^3$, stejně jako tomu je u objemové hmotnosti. Tato veličina nabývá hodnot 1,8-2,92 g/cm$^3$, nejčastěji však mezi 2,6 a 2,7 g/cm$^3$ (Sáňka a kol. 2018). Vyšší hodnoty mají půdy s vyšším obsahem minerálů, naopak půdy s obsahem humusu mají hodnotu nižší (Sáňka a kol. 2018). Měrnou hmotnost lze vypočítat podle vzorce (Šarapatka 2014):

$$Měrná\ hmotnost = \frac{Hmotnost\ půdy}{Objem\ pevné\ fáze\ půdy}$$

Objemová hmotnost vyjadřuje, na rozdíl od měrné hmotnosti půdy, hmotnost objemové jednotky (cm$^3$) půdy i s póry, tedy v neporušeném stavu. Pro stanovení objemové hmotnosti se používají Kopeckého válečky, nejčastěji o objemu 100cm$^3$ (Sáňka a kol. 2018). Zákonitě je tato hodnota nižší než měrná hmotnost. Objemová hmotnost se v ČR podle Sáňky a kol. (2018) pohybuje nejčastěji okolo 1,46 g/cm$^3$. Objemová hmotnost se mění při změně pórovitosti, ovlivňuje ji například způsob hospodaření (Šarapatka 2014). Pokud je pórovitost půdy snížíi, zvýší se tak objemová hmotnost a naopak. Půdy s jemnějším zrnitostním složením mají

přirozeně vyšší objemovou hmotnost než písčité půdy. Vyšší objemovou hmotnost mají také půdy v hlubších vrstvách pod povrchem. V porovnání půd organických a minerálních mají vyšší objemovou hmotnost půdy minerální (Sáňka a kol. 2018). Objemovou hmotnost půdy se počítá podle vzorce:

$$Objemová\ hmotnost = \frac{Hmotnost\ půdy}{Objem\ neporušeného\ vzorku\ půdy}$$

Pokud mezi sebou porovnáme měrnou a objemovou hmotnost stejného vzorku půdy, můžeme tak zjistit míru zhutnění půdy. Zhutnění může vznikat v důsledku nevhodného hospodaření na půdě, nebo vysoké intenzity chovu hospodářských zvířat (Sáňka a kol. 2018). Zhutnění má negativní dopady na růst kořenů rostlin (Sáňka a kol. 2018), které se mohou deformovat, což je především u hospodářských plodin nevhodné. Dále může mít zhutnění půdy za následek zhoršení produkční schopnosti půdy, kdy se snižuje kvalita i kvantita produkce (Javůrek a Vach 2008). Zhutněná půda nemůže dostatečně dobře plnit potřeby infiltrace a zadržování vody v půdě, naopak zvyšuje odtok z povrchu i půdního profilu.

### 3.2.2 Chemické vlastnosti

Mezi chemické vlastnosti půdy řadíme půdní reakci, obsah a kvalitu organické hmoty, obsah další látek (minerálního i organického původu), které mohou být živinami pro rostliny. V neposlední řadě patří mezi chemické vlastnosti sorpce v půdě.

Chemické vlastnosti půdy jsou velmi důležitým ukazatelem při hodnocení produkčních schopností půdy. Zejména obsah humusu a živin v půdě má na rostlinnou produkci značný vliv.

#### 3.2.2.1 Půdní reakce

Udává se v čísle pH. Půdní reakce dosahuje hodnot od 0 do 14, kdy nízké číslo značí extrémní kyselost a vysoké naopak silnou alkalitu. Půdní reakce měří koncentraci hydroxionových iontů $H_3O^+$ (Pavlů 2018), lze vypočítat jako záporný dekadický logaritmus koncentrace těchto kationtů. Půdní reakci můžeme rozlišovat aktivní ($pH_{H2O}$) nebo výměnnou ($pH_{KCL}$). Aktivní půdní reakce měří pouhou koncentraci hydroxionových iontů v suspenzi půdy a vody, výměnná půdní reakce pak měří i ionty poutané v půdě, které musí být za pomoci extrakčního činidla nejprve z půdy odpoutány (Pavlů 2018). Výměnná půdní reakce je měřena v suspenzi půdy s roztokem chloridu draselného.

Půdní reakce má vliv na mnoho procesů v půdě, například chování prvků, růst rostlin nebo složení mikroorganismů (Pavlů 2018).

#### 3.2.2.2 Salinita

Salinita (jinak také elektrická vodivost) půdy udává koncentraci rozpuštěných solí v půdním roztoku. Elektrická vodivost půdy, je ovlivňována teplotou (Corwin a Lesch 2005). Při zvyšující se teplotě roste i hodnota elektrické vodivosti. Jednotkou salinity je µS/cm, měří se pomocí konduktometru.

V případě vysoké koncentrace solí v půdním roztoku mluvíme o zasolení půdy, které může mít negativní vliv na úrodnost půdy (Corwin a Lesch 2005). Zasolení vzniká vlivem lidské činnosti, ale i přirozeně.

#### 3.2.2.3 Obsah a kvalita organické hmoty

Obsah a kvalita organické hmoty lze jinak také nazvat obsahem a kvalitou humusu. Je velmi důležitým faktorem pro hodnocení půdní úrodnosti (Bičík a kol. 2009; Sáňka a kol. 2018). Kvalita se určuje poměrem C:N, tedy poměrem uhlíku a dusíku ve vzorku hodnocené půdy. Pokud je výsledné číslo menší než 10, je humus kvalitní, v opačném případě je kvalita nízká. Další možností hodnocení kvality organické hmoty je poměr mezi huminovými kyselinami a fulvokyselinami. Půdy s vyšším obsahem fulvokyselin jsou světlejší, půdy s vyšším obsahem huminových kyselin jsou naopak tmavší, půda může být až černá.

Důsledkem ztráty organické hmoty je degradace půdy, poté je potřeba přistoupit k dodávce organické hmoty do půdy, například formou hnojiv (Bičík a kol. 2009).

#### 3.2.2.4 Obsah živin v půdě

Obsah živin v půdě je důležitým ukazatelem pro hodnocení kvality půdy pro zemědělské využití (Bičík a kol. 2009). Základními živinami v půdě jsou zejména dusík a fosfor, dále také draslík, vápník, hořčík, stopovými prvky jsou například železo a měď (Sáňka a kol. 2018). Vápník v půdě má vliv na půdní reakci, stabilizuje humusový podíl a je využíván rostlinami (Vráblíková a Vráblík 2006). Železo má v půdě naopak spíše negativní účinky.

Půda obsahuje živiny potřebné pro růst rostlin, dlouhodobě se ovšem obsah živin snižuje. Ke snižování obsahu živin dochází například vlivem eroze půdy nebo nevhodným hospodařením. V důsledku snižování obsahu živin je především na půdách s intenzivním hospodařením potřeba hnojení.

Písčité půdy mají živin málo, proto se na těchto půdách rostlinám, které živiny potřebují, tak dobře nedaří (Pavlů 2018). Půdy s vyšším obsahem humusu pak mají živin dostatek.

#### 3.2.2.5 Sorpce

Sorpce v půdě udává, jak je půda schopna poutat ionty různých prvků a živin (Sáňka a kol., 2018). Sorpce v půdě je závislá na půdních koloidech (částicích specifické velikosti). Sorpce může být mechanická, fyzikální, fyzikálně-chemická, chemická nebo biologická (Pavlů 2018).

Sorpci ovlivňuje také kvalita organické hmoty v půdě. Fulvokyseliny sorbují lépe než huminové kyseliny, živiny a další látky tak lépe pronikají do větších hloubek (Pavlů 2018).

## 3.3 Voda

### 3.3.1 Povrchové vody

Povrchové vody jsou využívány pro běžnou potřebu v domácnostech, v průmyslu, v zemědělství, ve vodní dopravě, rekreaci nebo jako zdroj energie. Využívání povrchových vod vede ke změnám v jakosti i kvantitě vod.

Povrchové vody působí i škodlivé účinky jako jsou povodně, sucho, vodní eroze a zdravotní rizika (Blažek a kol. 2006). Povodně jsou způsobeny především nadměrným úhrnem srážek za krátké časové období, případně také vytrvalým deštěm, nebo táním sněhových srážek v jarním období. Srážky způsobují přeplněnost koryt vodních toků, kdy může dojít až k zaplavení přilehlých území. Povodně mají za následek erozi, kontaminaci půdy nebo ohrožení zdrojů pitné vody. Sucho vzniká v důsledku nedostatku srážek, většinou po delší dobu (Koncepce ochrany před následky sucha pro území České republiky). Můžeme rozlišit sucho meteorologické, zemědělské, hydrologické a socioekonomické, kdy meteorologické sucho nastává zpravidla nejdříve a s postupem času může dojít až k suchu socioekonomickému. Meteorologické sucho je přirozené, při delším deficitu srážek nastává zemědělské sucho, kdy začíná být nedostatek vody pro rostliny. Hydrologické sucho nastává při snížení hladiny vody v korytech vodních toků a hladiny podzemní vody (Koncepce ochrany před následky sucha pro území České republiky). Socioekonomické sucho nastává ve chvíli, kdy začíná mít dlouhotrvající sucho negativní vlivy na ekonomiku státu, například kvůli sníženým výnosům. Vodní eroze vzniká v důsledku nadměrného množství srážek v kombinaci se svažitostí terénu nebo na půdách s malým podílem vegetace.

Vodní eroze má za následek zhoršení kvality vody v řekách a také zanášení koryt. Řešením může být například zalesňování či zatravňování (Bičík a kol. 2009).

Teplota povrchových vod se mění podobně jako teplota vzduchu, tedy kolísá v průběhu roku, kdy je v zimě zpravidla nižší než v letních měsících. Teplota vody kolísá také v průběhu dne, kdy v noci je nižší a ve dne vyšší, v letních měsících bývá rozdíl teplot mezi dnem a nocí vyšší. Povrchové vody jsou v současnosti vystaveny tepelnému znečištění, v důsledku velkých objemů vody čištěných v čistírnách odpadních vod, provozu tepelných elektráren a atomových elektráren (Bičík a kol. 2009). Oteplení vody má za následek horší rozpustnost kyslíku ve vodě, a tudíž možný úhyn ryb v řekách a rybnících.

### 3.3.2 Půdní voda

Půdní vodou označujeme množství vody v půdě, přesněji v půdních pórech. Voda v půdě obsahuje i malý podíl rozpuštěných látek, takže se vlastně jedná o půdní roztok (Šarapatka 2014). Největším zdrojem vody v půdě jsou srážky, které se do půdy dostávají infiltrací.

Voda má v půdě nezastupitelnou funkci, je důležitá pro růst a vývoj rostlin, pro život půdních organismů, pro transport látek a živin, ovlivňuje také teplotní režim půdy a produkční schopnost půdy. Na obsah vody v půdě má vliv mnoho faktorů, jako je infiltrace, srážky, teplota, evaporace a další.

Obsah vody v půdě můžeme charakterizovat tzv. půdními hydrolimity. To jsou například bod vadnutí, bod snížené dostupnosti, polní vodní kapacita nebo maximální vodní kapacita.

Bod vadnutí je taková půdní vlhkost, pod jejíž hranicí je nedostatek vody pro rostliny a ty nenávratně vadnou (Pavlů 2018). V bodě snížené dostupnosti je voda pro rostliny hůře dostupná a rostliny začínají vadnout (Šarapatka 2014). Bod snížené dostupnosti je ovšem narozdíl od bodu vadnutí vratný, tedy pokud zvýšíme vlhkost v půdě, rostliny se vrátí do stavu před vadnutím. Polní vodní kapacita je ustálený stav, který nastane po nadměrném zavlažení půdy, kdy jsou všechny kapilární póry vyplněny vodou (Pavlů 2018; Sáňka a kol. 2018). Nad touto kapacitou se postupně zaplňují i nekapilární póry a ubývá tak objem půdního vzduchu v pórech (Sáňka a kol. 2018). Maximální vodní kapacita udává maximální množství vody, které půda může pojmout, odpovídá velikosti celkové pórovitosti (Sáňka a kol. 2018). Při maximální vodní kapacitě jsou tedy všechny póry vyplněny vodou. Dále je možno využít pojem využitelná vodní kapacita, která udává takové množství vody, které je rostlinou využitelné, vypočítá se jako rozdíl hodnoty mezi polní vodní kapacitou a bodem vadnutí (Kodešová a kol. 2015). Jinak tento obsah můžeme nazvat také dostupnou vodou (Warner 2002). Při hodnotách nasycení blíže k polní vodní kapacitě je voda v půdě pro rostliny snadno dostupná, při hodnotách blízko bodu vadnutí je voda dostupná hůře (Warner 2002).

Všechny tyto hydrolimity se nacházejí na takzvané retenční křivce nebo retenční čáře, která ukazuje vlhkost v různých podmínkách a která má specifický průběh v závislosti na hodnocené půdě (Pavlů 2018).

Potenciál půdní vody naznačuje sílu zadržování vody v půdě, která tak může být hůře dostupná pro rostliny (Warner 2002). Sušší půda má vyšší potenciál a tím více energie musí rostlina pro extrakci vody z půdy vynaložit.

Voda může na trvale zamokřených plochách způsobovat škody, je proto potřeba přebytečnou vodu z půdy odvést. Přemokření může být způsobeno nevhodně zvoleným objemem závlahy zemědělských plodin a následkem toho může být poté například eroze půdy. Odvodňování může mít poté za následek zvýšený odtok vody z půdního profilu, který bude mít na rostliny, stejně jako zamokření, negativní vliv (Blažek a kol. 2006). Mezi pozitivní vlivy odvodňování se ale řadí například zlepšení produkčních schopností půdy.

### 3.3.3 Metody měření půdní vlhkosti

Měření půdní vlhkosti je důležité pro správné hospodaření s vodou, díky kterému lze například určit optimální míru zavlažení pro růst rostlin a předcházet tak zamokření půdy, nebo naopak suchu. Výběr metody měření vlhkosti závisí na několika faktorech, například náročnosti použití, přesnosti, ceně nebo rychlosti vyhodnocení (Warner 2002).

Vlhkost půdy můžeme měřit přímými nebo nepřímými metodami. Přímé metody měří přímo vlhkost půdy, metody nepřímé měří jiné veličiny závislé na vlhkosti půdy, na základě kterých se pak hodnoty přepočítávají na vlhkost půdy. Další dělení může být na destruktivní a nedestruktivní metody. Destruktivní metody jsou takové metody, u kterých je třeba odebrat vzorek půdy pro stanovení vlhkosti. U nedestruktivních metod není odběr vzorku nutný, vlhkost lze stanovit přímo v půdním profilu. Můžeme rozlišit také stanovení vlhkosti půdy v terénu, nebo v laboratoři.

#### 3.3.3.1 Přímé metody měření vlhkosti

Jediná přímá a zároveň také nejpřesnější metoda se nazývá gravimetrická. Řadí se ale také mezi destruktivní metody. Přestože jde o poměrně přesnou metodu, není vhodná pro dlouhodobé měření vlhkosti, právě kvůli její destruktivitě (Pavlů 2018). Není totiž možné odebírat vzorky ze stále stejného místa. Další nevýhodou této metody je poměrně velká časová náročnost (Rowlandson a kol. 2018). Touto metodou stanovujeme rozdíl mezi hmotností vlhké a vysušené pevné fáze půdy odebraného vzorku (Pavlů 2018). Sušení vzorku probíhá v peci po dobu 24 hodin a při teplotě 105 °C (Dobriyal a kol. 2012). Gravimetrická metoda také slouží pro kalibraci nepřímých metod.

#### 3.3.3.2 Nepřímé metody měření vlhkosti

Nepřímé metody bývají méně přesné, rozlišujeme například: odporovou metodu, gamaskopickou metodu, kapacitní metodu, neutronovou metodu, TDR metodu nebo metody DPZ. Každá z těchto metod měří jiné hodnoty, které jsou na vlhkosti půdy závislé. Hlavní výhodou nepřímých metod je především vhodnost pro nepřetržité měření vlhkosti půdy (Pavlů 2018). Výběr vhodné metody závisí na různých faktorech, jako jsou cena, časová náročnost, náročnost instalace nebo přesnost (Dobriyal a kol. 2012).

Odporová metoda je nedestruktivní, měří vodivost elektrického proudu v půdě, který je závislý na vlhkosti půdy (Pavlů 2018). Vlhká půda vede elektrický proud lépe než suchá. Senzory pro měření vlhkosti odporovou metodou je třeba nejdříve zkalibrovat (popis kalibrace těchto senzorů bude popsán v metodické části této práce). Kalibrace by měla být prováděna pravidelně, nejlépe jednou ročně, aby bylo zamezeno větším chybám v měření (Rowlandson a kol. 2018).

Kapacitní metoda je také nedestruktivní, měří dielektrickou konstantu (Pavlů 2018). Výhodou kapacitní metody je, že po instalaci v půdě není již potřeba její další údržba (Dobriyal a kol. 2012). Naopak nevýhodou je vysoká pořizovací cena senzorů. Dielektrickou konstantu v půdě měří také metoda TDR (Warner 2002).

Gamaskopická metoda měří chování gama záření v půdním profilu.

Neutronová metoda měří počet odražených neutronů od prvků s nízkou atomovou hmotností, jako je například vodík (Šarapatka 2014). Nevýhodou neutronové metody je cena a potřeba školení, výhodou je ovšem její poměrně dobrá přesnost (Warner 2002).

Dálkový průzkum země lze použít pro větší oblasti, ovšem přesnost táto metody zatím není dostačující (Pavlů 2018).

## 3.4 Teplota půdy

Teplota půdy ovlivňuje například půdní procesy nebo růst rostlin. Každá rostlina má optimální rozptyl teplot, při kterých nejlépe klíčí nebo při kterých nejlépe roste (Šarapatka 2014). Průměrná roční teplota půdy je vyšší než teplota vzduchu, a to asi o 2 °C. Teplota půdy je závislá na mnoha faktorech, například na vegetačním pokryvu půdy, slunečním záření, nadmořské výšce a dalších faktorech, jako je tepelná kapacita nebo tepelná vodivost (Pavlů 2018).

Tepelná kapacita půdy udává, kolik tepla je nutné dodat do jednotky půdy, aby došlo k ohřátí o 1 °C (Pavlů 2018). Pouze asi 10 % slunečního záření může být půdou absorbováno a využito pro oteplení půdy (Šarapatka 2014). K ochlazování půdy pak dochází vlivem evaporace. Zbytek slunečního záření je absorbován oblačností, nebo je využit jako energie pro evaporaci z povrchu. Tepelná vodivost půdy udává, jak je půda schopna vést teplo (Pavlů 2018). Teplejší půdy mají tepelnou vodivost vyšší (Kodešová a kol. 2013). Vlhká půda vede teplo lépe a suchá hůře (Šarapatka 2014). Ve studii Kodešové a kol. (2013) byly naměřeny nejvyšší tepelné vodivosti na písčitých půdách. Podle Kodešové a kol. (2013) byla takto vysoká hodnota způsobena příměsí křemenu v měřené půdě, který má výrazně vyšší tepelnou vodivost než ostatní složky půdy. Tepelná vodivost byla také vyšší na půdách s vyšší objemovou hmotností a menší na půdách s nižším obsahem organických látek. Povrch mulčovací kůry má tepelnou vodivost nízkou, má proto dobré schopnosti udržovat konstantní teplotu půdy (Kodešová a kol. 2013).

Půda s nižší vlhkostí se zahřívá lépe, naopak půdy velmi vlhké se zahřívají hůře. Důvodem je vysoká tepelná kapacita vody (Šarapatka 2014).

Rozdíly teplot půdy se mění v závislosti na hloubce pod povrchem a tyto rozdíly ovlivňuje také vlhkost půdy. Obecně platí, že čím větší hloubka je, tím menších teplotních výkyvů zde půda dosahuje, naopak na povrchu se půda zahřeje velmi rychle a výkyvy jsou tak větší (Pavlů 2018). S rostoucí hloubkou se také prodlužuje zpoždění výkyvu teplot (oteplení půdy ve vyšších hloubkách nastává později).

Dále se mění schopnost zahřívání půdy v závislosti na velikosti částic. Písčité půdy s vyšším obsahem větších částic, se zahřívají rychleji, naopak jílovité půdy, které mají částice menší, se zahřívají pomaleji (Pavlů 2018).

Teplota půdy se mění v průběhu roku i v průběhu dne. V zimě je zpravidla nižší než v letním období, stejně tak v noci je teplota půdy nižší než ve dne. V průběhu roku dosahuje půda nejvyšších teplot v červenci a srpnu, nejnižších pak v lednu a únoru (Šarapatka 2014). Teplotu půdy v zimě ovlivňuje sníh, díky kterému půda méně promrzá. Pokud se na půdě v chladném období roku sníh nevyskytuje, půda promrzne rychleji a více. Písčité půdy promrzají již při teplotách těsně pod bodem mrazu a promrznutí se může dostat až do hloubky 1 metru (Pavlů 2018). Jílovité půdy promrzají při nižších teplotách, pomaleji a do menších hloubek. Na promrzání půdy má vliv také vegetační pokryv. Půda s vegetací promrzá hůře než půda holá (Šarapatka 2014). Postupné rozmrzání půdy v jarních měsících může způsobit například erozi půdy.

V letních měsících je teplota půdy v porovnání s teplotou vzduchu díky vegetaci ve dne nižší, a naopak v noci vyšší, než je teplota okolního vzduchu. Dochází k tomu proto, že půda si lépe udržuje konstantní teplotu než vzduch. Půda se tedy v noci ochladí mnohem méně než vzduch, který má výkyvy teplot výrazně vyšší.

Teplotní rozdíly půdy mohou negativně ovlivňovat rostliny, které jsou ke změnám teplot náchylné. Teplota půdy může například ovlivňovat také správný chod fotosyntézy.

## 3.5 Vlastnosti různých povrchů

Různé povrchy půdy, jako jsou například tráva, mulčovací kůra, či beton mají významný vliv na teplotu a vlhkost půdy pod tímto povrchovým krytem.

Podle studie Kodešové a kol. (2014) prováděné mezi červnem 2011 a prosincem 2012, kdy bylo prováděno měření v různých hloubkách pod různými povrchovými pokryvy (tráva, kůra, písek, betonová dlažba a štěrk), za účelem studování vlivů různých povrchových krytů na vodní a teplotní režim technosolů (antropogenně ovlivněných půd), byla naměřena největší denní variabilita obsahu půdní vody v hloubce 7 cm pod povrchem trávy a nejmenší pod betonovou dlažbou. Největší denní teplotní rozdíly, v hloubce 7 cm pod povrchem, byly naměřeny pod betonovou dlažbou, nejmenší pak pod trávou a kůrou. Jako nejvhodnější pro vedení tepla se ukázal být povrch štěrku, pod kterým byly za chladného období naměřeny nejvyšší teploty. S rostoucí hloubkou se snižuje vliv různých půdních povrchů na teplotní a vlhkostní režim půdy. Podle studie Kodešová a kol. (2014) lze také posoudit vhodnost povrchů pro různé účely.

V městských oblastech dochází k zakrývání půdy různými typy povrchů, nejčastěji betonovou dlažbou nebo například také asfaltem na silnicích. Tyto povrchy upravují teplotu půdy, ale také zvyšují odtok vody a zamezují infiltraci vody do půdního prostředí (Kodešová a kol. 2014). Může docházet také ke kontaminaci vody.

### 3.5.1 Holá půda

Na holé půdě lze podle Kader a kol. (2017a) pozorovat větší teplotní výkyvy než na mulčovaných plochách. Ovšem ještě větší teplotní výkyvy lze zaznamenat pod povrchem betonové dlažby.

Holá půda, která je využívána především pro účely zemědělství, je více ohrožena vodní erozí než zakryté půdy (Montenegro a kol. 2013). Holá půda má nižší schopnost infiltrace při delších srážkových úhrnech než mulčované plochy (Montenegro a kol. 2013), což je například právě pro zemědělství nevhodné. Při snížené schopnosti infiltrace dochází ke ztrátám půdy v důsledku eroze. Při studii Kader a kol. (2017b) byly na holé půdě zaznamenány větší vlhkostní výkyvy, v porovnání s mulčovanými plochami. Nevýhodou holé půdy je také vysoký výpar a tím i větší spotřeba vody při závlahách, než by tomu bylo pod jinými povrchy. Podle studie Kader a kol. (2017b) také byly na povrchu holé půdy zaznamenány nižší výnosy sóji luštinaté než pod mulčovanými plochami.

### 3.5.2 Tráva

Pod travnatou plochou byly podle Kodešové a kol. (2014), při studii vlivu různých povrchových krytů na vodní a teplotní režim technosolů, naměřeny druhé nejnižší denní výkyvy teplot, po půdě kryté kůrou, která vykázala vůbec nejnižší výkyvy teplot. Zároveň bylo také prokázáno, že tráva poskytovala v chladném období poměrně vysoké minimální teploty půdy.

Naopak v porovnání s uvedenými povrchy (holá půda, mulčovací kůra, betonová dlažba) poskytoval při studii Kodešové a kol. (2014) povrch trávy, v hloubce 7 cm pod povrchem, největší denní variabilitu v obsahu vody v půdě. Důvodem velkých vlhkostních výkyvů je lepší schopnosti infiltrace a evaporace tohoto povrchu. Právě schopnosti infiltrace travnatého povrchu významně snižují riziko eroze půdy (Kader a kol. 2017a). Pod travnatým povrchem byl také při studii Kodešové a kol. (2014) pozorován největší příjem vody kořenovým systémem rostlin.

Z povrchu nesekané trávy lze pozorovat větší výpar vody, především z důvodu větší listové plochy vegetace. Povrch nesekané trávy také poskytuje stabilnější režim teplot.

### 3.5.3 Mulčovací kůra

Mulčovacím materiálem nemusí být pouze kůra, ale například i organické zbytky plodin, sláma, listí, tráva, větvičky, štěrk, písek nebo i plastová fólie (Kader a kol. 2017a). Tyto materiály se narozdíl od hnojiv a pesticidů nezapracovávají do půdy, ale aplikují se pouze na povrch. Pro správné účinky je nutné vybrat vhodný materiál, který se liší v závislosti na druhu plodiny, pro kterou je mulčování určeno. Výběr materiálu je ovlivněn také cenou materiálu a cenou jeho aplikace na půdu.

Účinky se projevují v závislosti na dávce mulče, která tak může pozitivně ovlivnit půdní vlastnosti, například zásobu organického uhlíku a dalších prvků v půdě, mikrobiální aktivitu a obsah organické hmoty (Mulumba a Lal 2008). Zvýšení zásoby organického uhlíku dokládá také studie Pavlů a kol. (2021), spolu se zvýšením stability půdních agregátů. Kromě stability agregátů (struktury půdy) může mulčování ovlivnit také další vlastnosti a schopnosti půdy, jako zejména udržení konstantní vlhkosti a teploty, infiltraci, snížený odtok a výpar vody, zabraňuje také erozi půdy a růstu plevelů. Mulčování má také vliv na zvýšení produkce plodin a snížení výskytu chorob na mulčovaných plochách. Kromě pozitivních vlastností mohou mít mulčovací materiály také negativní vlastnosti. Například použití plastových mulčovacích materiálů vede k vyšší spotřebě fosilních zdrojů potřebných pro výrobu, výroba poté produkuje množství nežádoucích odpadních látek (Kader a kol. 2017a). Uměle vytvořené plastové fólie nejsou schopny se v přírodě rozložit, tudíž je nutné tyto materiály dále likvidovat, ať už spalováním, nebo skládkováním. Případné rozkládání těchto materiálů v půdě vede ke kontaminaci nežádoucími látkami, jako jsou například mikroplasty. Další nevýhodou plastových mulčovacích materiálů je pořizovací cena i cena aplikace a likvidace materiálu, nebo také degradace půdy. Nevýhodami organických mulčovacích materiálů jsou například snížení pH půdy (okyselení), což dokládá například studie Pavlů a kol. (2021), nebo růst plevelů ze semen použitých materiálů (trávy, sena). Možnou další nevýhodou může být snížení obsahu dusíku, v důsledku rozkladu mulčovacího materiálu, kterého je následně nedostatek pro využití rostlinami (Kader a kol. 2017a).

V porovnání s holou půdou zůstává vlhkost pod mulčovacími materiály vyšší (Kader a kol. 2017a). Naopak se pod mulčí oproti holé půdě snižuje teplota v letním období. Aplikací mulčovací kůry lze významně ovlivnit teploty v průběhu chladného období roku (Kodešová a kol., 2014), které se díky mulčování zvýší. Stejný proces lze pozorovat i v průběhu dne a noci. Nejvyšší denní teploty pod mulčovanými povrchy byly naměřeny při studii Kader a kol. (2017b) o 1-2 °C nižší než pod holou půdou. Mulčování tedy zmenšuje výkyvy teplot, což je pozitivní pro růst rostlin, jak již bylo zmíněno v kapitole 3.4. Teplota půdy. Zmírnění teplotních rozdílů v půdě závisí také na mulčovacím materiálu a jeho barvě. Podle Pavlů a kol. (2021) byly zjištěny nejnižší výkyvy teplot pod povrchy s organickým mulčováním, v porovnání s povrchy krytými fóliemi nebo drceným kamenem. Organické mulčování může ovšem zpomalit jarní oteplování půdy.

Mulčovací kůra snižuje odpařování vody z půdy, proto je využívána v zemědělských oblastech (Kodešová a kol. 2014). Dlouhodobé použití mulčovacích materiálů může mít

pozitivní dopad na půdní vlastnosti, jak fyzické, tak ty chemické, především na půdách s nižší přirozenou vlhkostí (Jordán a kol. 2010). Ovšem vysoký kryt mulče může mít negativní účinek, v podobě přehnaného zachycování srážek a tím až příliš vysoké vlhkosti půdy (Montenegro a kol. 2013). Větší hustota mulčování má při srážkách lepší schopnost zadržování vody a větší schopnost infiltrace než nižší hustota mulčování. Zároveň má také účinek na nižší odtok vody z půdního profilu a zvyšuje schopnost odvodnění, které má na půdu negativní vliv.

### 3.5.4 Betonová dlažba

Betonový povrch je hojně využíván ve městech, kde brání zasakování srážkových vod, a naopak podporuje odtok vody (Kodešová a kol. 2014). Ve studii Kodešové a kol. (2014) bylo zjištěno, že v porovnání s holou půdou, trávou a mulčovací kůrou má betonová dlažba nejnižší výkyvy obsahu vody v půdě, které jsou důsledkem povrchového odtoku a nízkého výparu z povrchu. Kromě kvantity vody může být také ve městech ovlivněna její kvalita. V důsledku splachů ze zakrytých ploch, jako jsou například parkoviště, může docházet ke znečištění vody ropnými zbytky a dalšími nebezpečnými látkami. Městské prostředí s betonovými povrchy také ovlivňuje teplotu půdy bezprostředně pod nimi, i ve vyšších hloubkách. V důsledku zakrytí půdy nepropustnou vrstvou betonového materiálu dochází k zamezení potřebné interakce mezi půdou a vzduchem (Scalenghe a Marsan 2009). Ta je potřebná především pro zajištění správného koloběhu a výměny vody, živin a tepla v prostředí. Zakrytí půdy betonovou dlažbou také znemožňuje produkci plodin na dané lokalitě. V Evropě je podle Scalenghe a Marsan (2009) zakryto nepropustnými materiály přibližně 9 % půdy. Podle studie Kodešové a kol. (2014) dochází na plochách zakrytých dlažbou k největšímu odtoku vody z povrchu. Tento jev lze připsat především zanedbatelné schopnosti infiltrace betonového povrchu.

Betonová dlažba z velké části ovlivňuje teplotu v půdě, oproti jiným materiálům má poměrně vysoké výkyvy teplot (Kodešová a kol. 2014). Také reakce na změny teplot přichází velmi brzy. Při vyšších teplotách se rychle zahřívá a při nízkých teplotách naopak rychle chladne. Teplota vzduchu ve městech se značně liší od teplot vzduchu mimo městské oblasti. To můžeme přisuzovat právě zakrývání povrchů, které lépe absorbují a následně vyzařují teplo ze slunečního záření než povrchy přírodní (Scalenghe a Marsan 2009). Kromě typu povrchu může záležet také na barvě povrchu, která ovlivňuje albedo (schopnost povrchu odrážet sluneční záření).

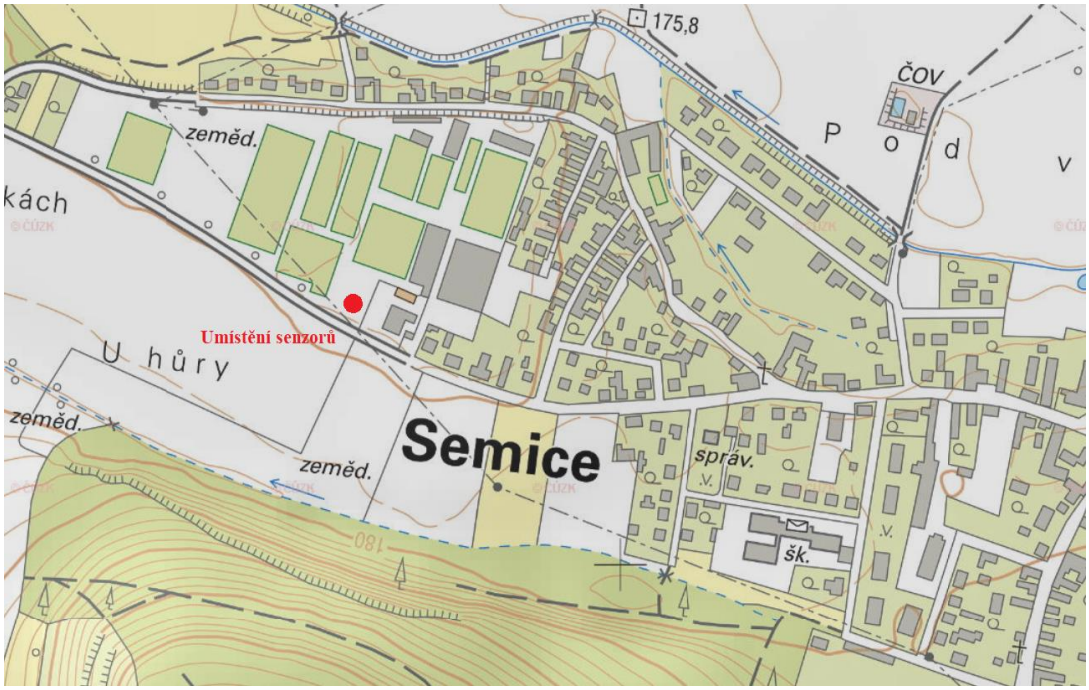
Vliv různých povrchů na teplotu a vlhkost půdy nebyl dostatečně prostudován na písčitých půdách. Dále se také většina studií zabývá vlivem povrchů na teplotu půdy přímo pod studovaným povrchem. Výzkum na naší experimentální lokalitě byl tedy zaměřen především právě na písčitou půdu a měření probíhalo až do hloubky 80 cm pod povrchem.

# 4 Metodika

## 4.1 Lokalita

Pro sběr dat byla vybrána lokalita v Semicích, kde byly 4.10.2019 nainstalovány senzory. Lokalita byla vybrána především z důvodu již probíhajícího měření. Cílem experimentu bylo zjistit a popsat režim vlhkosti a teploty půdy v půdním profilu a pod různými povrchy.

Semice se nacházejí ve Středočeském kraji, v okrese Nymburk. Okres Nymburk je nížinný polabský okres, většina jeho území se nachází do výšky 200 m n.m., nejvyšší bod se nachází ve výšce 298,5 m. n. m. (Ložek a kol. 2005). Experimentální pozemek se nachází v blízkosti našeho největšího toku – Labe, není ohrožen suchem a má zanedbatelnou expozici svahu. Půda na pozemku není ohrožena vodní ani větrnou erozí. Senzory jsou umístěny v blízkosti zahradnictví, v oplocené zahradě (Obrázek 2).




**Obrázek 2** Umístění senzorů na lokalitě v Semicích (geoportal.gov.cz)

Geomorfologická jednotka: VIB-3A-5 (Česká tabule – Středočeská tabule – Středolabská tabule – Nymburská kotlina – Středolabská niva), ovšem nedaleko se nachází hranice se Sadskou rovinou (VIB-3A-1). Středolabská niva se nachází v těsné blízkosti řeky Labe, s mnoha bývalými koryty, z nichž jedno se stalo přírodní rezervací s názvem Vrť, která se nachází přibližně jeden kilometr vzdušně od experimentální lokality. Na jih od lokality se necelých 500 metrů nachází 231 metrů nad mořem vysoký vrch s názvem Semická hůra, s přírodní památkou Polabské hůry (Demek a kol. 2006).

### 4.1.1 Popis půdy na vybrané lokalitě

Půda na této lokalitě spadá do bonitované půdně ekologické jednotky (BPEJ) 2.21.10. Tato půdní jednotka spadá mezi velmi málo produkční půdy a do třídy ochrany IV., kam se řadí

velmi málo produkční půdy, jejichž nejvhodnější využití je zejména pro zástavbu, pro zemědělství tyto půdy vhodné nejsou (EKatalog BPEJ - 2.21.10). Lokalita se nachází v teplém a mírně suchém klimatickém regionu, označovaném číslem 2. Tento region se nachází převážně na severu Středočeského kraje a v Praze, dále také v Jihomoravském kraji, mezi městy Znojmo a Brno. V tomto klimatickém regionu je průměrná roční teplota 8-9 °C a průměrný roční úhrn srážek 500-600 mm. Hlavní půdní jednotka 21 zařazuje tuto lokalitu mezi půdy s dobrou schopností infiltrace, a to i při vysokém stupni nasycenosti půdy vodou (EKatalog BPEJ - 2.21.10). Půdotvorným substrátem jsou především štěrky a písky. Retenční vodní kapacita a využitelná vodní kapacita spadá do kategorie nízká. Půda není trvale ani periodicky zamokřená, ani vysychavá. Sklonitost a expozice této jednotky je nízká. Skeletovitost a hloubka půdy má hodnotu 0, tedy bezskeletovitá (obsahuje jen malé množství částic o velikosti štěrku a větších) a hluboká půda (vymezuje prostředí vhodné pro růst rostlin).

## 4.2 Analýza půdních vlastností

Za pomoci rýče a odběrové hlavice byly odebrány neporušené půdní vzorky do Kopeckého válečků o objemu 100 $cm^3$ a po vyjmutí byly obě strany seříznuty. Vzorky byly odebrány ze tří různých horizontů – 0-30 cm pod povrchem, 50-55 cm pod povrchem a 80-85 cm pod povrchem, pro potřeby analýzy nazývané S1, S2 a S3. Vzorky byly poté v laboratoři použity pro stanovení pórovitosti a objemové hmotnosti půdy. Na základě takto změřených pórovitostí a objemových hmotností neporušených půdních vzorků byly vypočítány přesné navážky hmotností půdy do válců určených pro kalibraci senzorů.

Kromě neporušených půdních vzorků byly odebrány také porušené půdní vzorky. Z porušených půdních vzorků všech tří horizontů byly v laboratoři změřeny další fyzikální a chemické vlastnosti půdy.

Stanovení teploty a vlhkosti půdy, které probíhalo pomocí senzorů TMS-4, bude popsáno v následující kapitole (4.3 Měření teploty a vlhkosti).

### 4.2.1 Fyzikální vlastnosti

Na neporušených půdních vzorcích odebraných na experimentální lokalitě v Semicích byla stanovena objemová hmotnost půdy a pórovitost.

Na porušených půdních vzorcích odebraných na stejném místě byly změřeny hodnoty obsahů jednotlivých zrnitostních frakcí, obsah fyzikálního jílu, zastoupení různých velikostí částic v půdě a také specifická (měrná) hmotnost zeminy.

#### 4.2.1.1 Objemová hmotnost ($\rho_d$)

Neporušený půdní vzorek v Kopeckého válečku o objemu 100 $cm^2$ byl nejprve zvážen a následně vysušen v peci při teplotě 105 °C po dobu 24 hodin. Vysušený váleček byl opět zvážen a následně byla vypočtena objemová hmotnost pomocí následujícího vzorce:

$$\rho_d = \frac{m}{V} \; [g\ cm^{-3}]$$

kde m je hmotnost vysušeného vzorku půdy a V je objem válečku použitého pro stanovení.

#### 4.2.1.2 Pórovitost (P)

Pro stanovení pórovitosti bylo třeba nejprve stanovit hodnoty objemové hmotnosti půdy a specifické hmotnosti půdy. Pórovitost byla poté vypočtena podle následujícího vzorce:

$$P = \frac{\rho_z - \rho_d}{\rho_z} \times 100\ [\%]$$

#### 4.2.1.3 Zrnitost půdy

Zrnitost půdy byla měřena sedimentační (hustoměrnou) metodou, pomocí hustoměru. Bylo naváženo 80 g zeminy a spolu s dispergačním činidlem a vodou přesunuto do válce o objemu 1000 ml. Do takto připravené suspenze byl vložen hustoměr a v jednotlivých časových intervalech byly odečítány hodnoty na hustoměru. Pomocí nomogramu pro určení velikosti částic byly tyto hodnoty přepočteny na velikost částic. Velikosti částic poté byly rozřazeny do zrnitostních frakcí a půdních druhů podle Tabulky 1 a Tabulky 2. Zrnitost půdy byla vyhodnocena Novákovou klasifikací.

#### 4.2.1.4 Specifická hmotnost zeminy ($\rho_z$)

K měření specifické hmotnosti zeminy bylo třeba navážit 10 g zeminy a ve třecí misce rozmělnit na nejjemnější částice a poté spolu s 60 ml destilované vody povařit. Po vychladnutí byla tato zemina přesunuta do vytemperovaného pyknometru a doplněna destilovanou vodou tak, aby byl pyknometr plný. Dále byl pyknometr temperován po dobu 20 minut při teplotě 20 °C a zvážen. Rozdílem hodnot pyknometru se suspenzí zeminy a pyknometru s čistou destilovanou vodou byla vypočítána specifická hmotnost zeminy.

### 4.2.2 Chemické vlastnosti

Byly měřeny hodnoty aktivní a výměnné půdní reakce, elektrické vodivosti (salinity), kvality humusu a obsahu organického uhlíku.

#### 4.2.2.1 Půdní reakce

Pro stanovení půdní reakce $pH_{H2O}$ bylo naváženo 10 g zeminy a smícháno s 20 ml destilované vody. Pomocí pH-metru byla změřena hodnota aktivní půdní reakce.

Podobně byla změřena také hodnota $pH_{KCL}$, ovšem vzorek o stejné hmotnosti byl zředěn 25 ml KCL. Pro správné smíchání zeminy s chloridem draselným byla použita třepačka a po 45 minutách opět pH-metrem změřena hodnota výměnné půdní reakce.

Naměřené hodnoty aktivní půdní reakce lze vyhodnotit podle Tabulky 3, hodnoty výměnné půdní reakce podle Tabulky 4.

**Tabulka 3** Hodnotící tabulka pro $pH_{H2O}$ (Zbíral 2002)

| Hodnota $pH_{H20}$ | Půdní reakce |
|---|---|
| <4,9 | Silně kyselá |
| 4,9-5,9 | Kyselá |
| 5,9-6,9 | Slabě kyselá |
| 6,9-7,1 | Neutrální |
| 7,1-8,0 | Slabě alkalická |
| 8,1-9,4 | Alkalická |
| >9,4 | Silně alkalická |

**Tabulka 4** Hodnotící tabulka pro $pH_{KCL}$ (Zbíral 2002)

| Hodnota $pH_{KCL}$ | Půdní reakce |
|---|---|
| <4,5 | Silně kyselá |
| 4,5-5,5 | Kyselá |
| 5,5-6,5 | Slabě kyselá |
| 6,5-7,2 | Neutrální |
| >7,2 | Alkalická |

#### 4.2.2.2 Salinita

Stanovení salinity (elektrické vodivosti nebo elektrické konduktivity) půdy bylo stanoveno ve vzorku 10 g zeminy a 50 ml destilované vody, který byl nejdříve třepán na třepačce po dobu 45 minut. Protřepaný vzorek byl přefiltrován přes filtrační papír a poté byla změřena pomocí konduktometru elektrická vodivost půdy (EC).

Naměřené hodnoty elektrické vodivosti (salinity) lze zařadit podle Tabulky 5.

**Tabulka 5** Hodnotící tabulka pro salinitu (Zbíral 2002)

| Salinita ($\mu S\ cm^{-1}$) | Hodnocení půdy |
|---|---|
| <30 | Minimálně zasolená |
| 30-60 | Bez negativních účinků soli |
| 60-120 | Zvýšené zatížení solemi |
| >120 | Vysoké zatížení solemi |

#### 4.2.2.3 Kvalita humusu (Q4/6)

Stanovení Q4/6, tedy barevného kvocientu humusu, proběhlo měřením ve spektrofotometru. Nejprve bylo třeba navážit 2 g zeminy, smíchat s 40 ml roztoku pyrofosforečnanu sodného a následně 1 hodinu třepat na třepačce, aby bylo dosaženo důkladného promíchání. Poté byla suspenze odstředěna po dobu 2 minut při 11000 otáčkách za vzniku čirého extraktu, podle potřeby zředěna pyrofosforečnanem sodným a v kyvetě vložena do spektrofotometru. Ve spektrofotometru byla pro několik vlnových délek λ (400, 450, 500, 550 a 600) změřena absorbance světelného záření. Hodnota Q4/6 byla vypočítána podílem hodnot absorbance při λ400 a λ600. Nízká hodnota kvocientu značí kvalitnější a stabilnější humusové látky a vyšší hodnota naopak méně kvalitní (Fér a kol. 2020).

#### 4.2.2.4 Obsah organického uhlíku (Cox)

Pro stanovení hodnoty Cox byly pro každé stanovení nejprve naváženy 2 g zeminy a spolu s 10 ml chromsírové směsi byl vzorek v kádince zakryté hodinovým sklem sušen v sušárně po dobu 45 minut při teplotě 125 °C. Následně byly do vzorku vloženy elektrody pro potenciometrickou titraci a pomocí Mohrovy soli proběhla titrace do tzv. mrtvého bodu.

Z hodnoty obsahu organického uhlíku lze vypočítat obsah humusu pomocí vzorce:

$$Cox\ (\%) \times 1{,}724 = Humus\ (\%)$$

pokud předpokládáme, že obsah uhlíku v humusu je 58 % (Sáňka a Materna 2014). Obsah organického uhlíku a obsah humusu lze vyhodnotit podle Tabulky 6.

**Tabulka 6** Hodnotící tabulka pro obsah humusu a organického uhlíku (Zbíral 2002)

| Cox (%) | Humus (%) | Obsah |
|---|---|---|
| <0,6 | <1,0 | velmi nízký |
| 0,6-1,1 | 1,0-2,0 | nízký |
| 1,1-1,7 | 2,0-3,0 | střední |
| 1,7-2,9 | 3,0-5,0 | vysoký |
| >2,9 | >5,0 | velmi vysoký |

## 4.3 Měření teploty a vlhkosti

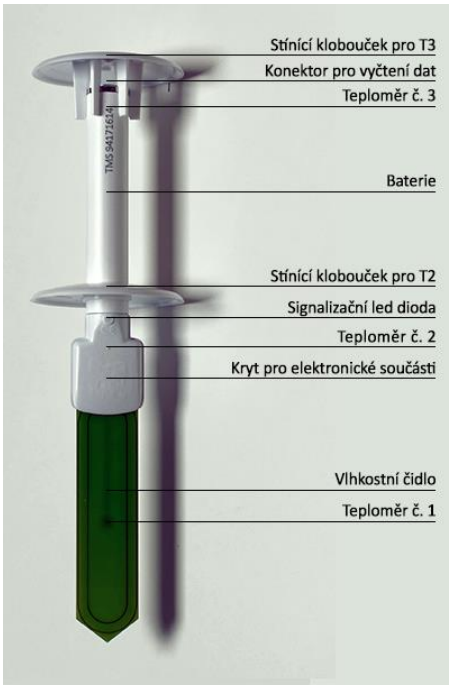
Měření teplot a vlhkostí na experimentální lokalitě probíhalo pomocí senzorů TMS-4, instalovaných v půdě po celou dobu měření. Cílem tohoto měření bylo vyhodnocení vlivu různých povrchů na teplotní a vlhkostní režimy půdy. Naměřená data byla následně vyhodnocována v čase od 1.1.2020 do 31.12.2020, tedy přesně 1 rok. Senzory umístěné v hloubce 5 a 10 cm pod povrchem betonové dlažby přestaly 26.8.2021 pracovat a v důsledku toho nejsou data z těchto hloubek kompletní.

### 4.3.1 Senzor TMS-4

Senzor TMS-4 od české firmy TOMST s.r.o. slouží k měření teploty půdy, teploty vzduchu a půdní vlhkosti. Senzor má možnost nastavení různě dlouhého intervalu měření, od 15 minut až po 1 minutu (TOMST Measurement System TMS). Stažení dat probíhá za pomoci USB adaptéru a počítačového programu „Lolly Manager“, kde si lze vybrat určité období měření a není proto nutné stahovat všechna data.

Existuje několik variant senzorů, pro použití v různých hloubkách pod povrchem. K měření v hloubkách bezprostředně pod povrchem slouží nejkratší „standardní“ senzor (Obrázek 3), pro měření ve větších hloubkách pod povrchem lze použít variantu „Long“ a pro hloubky až do 2 metrů slouží senzor s kabelem (Obrázek 4). Všechny tyto varianty disponují třemi teploměry pro měření teploty pod povrchem i na povrchu a jeden senzor pro měření vlhkosti. Senzor musí být pro spolehlivé měření zasunut v půdě celou snímací plochou a být tak s půdou v bezprostředním kontaktu (Wild a kol. 2019).

Senzor funguje díky lithiové baterii, která má životnost až 10 let (TMS-4), spolu s velkokapacitní pamětí je vhodný pro dlouhodobé měření. Dalším pozitivem tohoto senzoru je dobrá cenová dostupnost a velký teplotní rozsah.




**Obrázek 3** Popis jednotlivých částí „standardního“ senzoru TMS-4 (TOMST Measurement System TMS)

**Obrázek 4** Senzor TMS-4 s kabelem (Wild a kol. 2019)

### 4.3.2 Instalace senzorů

Senzory byly nainstalovány pod každým povrchem celkem do pěti různých hloubek – 5 cm, 10 cm, 25 cm, 50 cm a 80 cm pod povrch (Obrázek 5). Při zakládání experimentu bylo vybráno pět typů povrchů, pod které byly senzory nainstalovány – povrch holé půdy, betonové dlažby, mulčovací kůry, nesekané a sekané trávy. Pro všechny tyto povrchy byly na pozemku vyčleněny čtverce o straně 1,5 metru, pod kterými byly senzory instalovány (Obrázek 6). Celkem se tedy na lokalitě nacházelo 25 senzorů TMS-4, které měřily teplotu a vlhkost v intervalu 15 minut po celou dobu instalace v půdě. Půdní profil na experimentální lokalitě lze vidět na Obrázku 7.

**Obrázek 5** Instalace senzorů na experimentální lokalitě (autor Miroslav Fér)

**Obrázek 6** Senzory instalované na experimentální lokalitě (autor Miroslav Fér)

**Obrázek 7** Půdní profil na experimentální lokalitě (autor Miroslav Fér)

## 4.4 Kalibrace senzorů

Kalibrace je nutné provádět pro všechny senzory, používané pro měření půdní vlhkosti. Pro měření vlhkosti půdy na lokalitě v Semicích byly použity senzory TMS-4 od české firmy TOMST s.r.o. Tyto senzory měří vlhkost půdy v hodnotách „Countech“, které je nutné pomocí kalibrační rovnice přepočíst na vlhkostní %.

Pro kalibrace senzorů TMS-4 použitých na experimentální lokalitě bylo nutné odebrat vzorky půdy z půdního profilu, ve kterém byly senzory umístěny. V případě, že by byly senzory kalibrovány v jiném vzorku půdy, výsledné hodnoty by neměly vypovídající hodnotu. Pro kalibraci senzorů v laboratoři je nutné vytvořit co nejpodobnější podmínky jako na sledované lokalitě, proto by i pórovitost a objemová hmotnost vzorků určených pro kalibraci měly být stejné. Také, pokud je to možné, by měly kalibrace probíhat přímo na senzorech použitých pro měření. Pro potřeby analýzy měřených dat byla provedena vlastní kalibrace

v laboratoři KPOP. Při kalibraci nemohly být použity stejné senzory, protože kalibrace probíhaly v době, kdy byly senzory zabudovány v půdě a probíhalo měření na lokalitě.

Nejprve byly tedy na experimentální lokalitě odebrány vzorky půdy ze tří různých horizontů (s označením S1, S2 a S3). Následně byly rozdrobeny na elementární částice, převezeny do laboratoře a vysušeny.

Kalibrace probíhaly ve dvou opakováních pro všechny tři horizonty (0-30 cm, 50-55 cm a 80-85 cm). Dvě opakování byla použita pro kontrolu odchylky měření a následného vytvoření průměru těchto dvou vzorků, aby byl přepočet na vlhkostní % co nejpřesnější. Celkem bylo tedy kalibrováno 6 senzorů.

Pro kalibrace byly využity plastové válce o známém objemu, dále byla ze spodní strany každého válce gumičkami přichycená netkaná textilie, která slouží k zamezení vysypání obsahu zeminy, je ale zároveň dobře propustná a přebytečná voda tak může ze vzorku odtéct. Dále byl ještě válec opatřen miskou a senzor TMS-4 s kabelem (Obrázek 3) byl k válci pevně přilepen lepící páskou. Takto připravený válec a další výše zmíněné pomůcky byly zváženy.

Prvním hlavním krokem bylo navážení přesné hmotnosti suché zeminy z prvního horizontu, která byla vypočtena na základě naměřené objemové hmotnosti a pórovitosti, stanovené na neporušených půdních vzorcích z experimentální lokality, a umístění celé této hmotnosti do válce, aby došlo k co nejmenším ztrátám. Stejně tak proběhl tento krok i pro dalších 5 vzorků.

Válec se suchou zeminou byl opět zvážen a váha spolu s časem byly zapsány do tabulky. Dalším krokem bylo přemístění celkového objemu půdy z válce na tác, kde proběhlo za pomoci rozstřikovače zvlhčení suché půdy, nejprve na vlhkost 0,02 %. Následně bylo nutné opět celý objem půdy vložit zpět do válce a zvážit. Takto bylo provedeno zvlhčení půdy ve všech válcích. Dále proběhlo zvlhčování stejným způsobem na vlhkost 0,04 %, 0,06 %, 0,08 % atd. Při vlhkosti půdy 0,14 % byla půda ve válcích s půdou z prvního horizontu, po zvážení ponechána a zvlhčování nadále probíhalo pouze přidáním daného množství vody svrchu s následnou infiltrací a distribucí do celého objemu válce. Pro válce s půdou ze druhého a třetího horizontu byl tento krok proveden již při vlhkosti půdy 0,12 %. Bylo tak dosaženo konstantní vlhkosti v celém vzorku. Všechny vzorky byly nadále váženy a zvlhčovány do doby, než došlo k přesycení půdy vodou a voda se spodem vylila do misky. Nejprve došlo k přesycení druhého horizontu S2, poté nejhlubšího horizontu S3 a naposledy prvního horizontu S1.

Kalibrace probíhala 4 dny, bylo tedy zapotřebí zakrýt válce se zeminou přes noc igelitovými sáčky, aby nedošlo ke změně vlhkosti z důvodu výparu z vrchní strany válce.

Výsledné gravimetricky stanovené vlhkosti válců zeminy byly použity pro tvorbu kalibračních rovnic. Tyto kalibrační rovnice byly poté použity pro přepočet hodnot „Countů“ naměřených senzory na lokalitě a přepočteny na objemovou vlhkost půdy. Mezi naměřenými County a objemovou vlhkostí půdy je předpokládána lineární závislost (Kodešová a kol. 2015).

Kalibrační rovnice byly vytvořeny podle vzorce (Kodešová a kol. 2015):

$$\theta = a1\frac{County}{10000} + b1$$

kde a1 a b1 jsou parametry kalibrační rovnice, které udávají směr přímky v grafu závislosti objemové vlhkosti půdy a naměřených Countů.

# 5 Výsledky a diskuse

## 5.1 Fyzikální vlastnosti

Na neporušených vzorcích půdy odebraných na experimentální lokalitě byla stanovena celková pórovitost a objemová hmotnost, které byly následně využity pro spočítání správné navážky zeminy pro kalibraci senzorů. Specifická hmotnost zeminy byla měřena na porušených půdních vzorcích. Naměřené hodnoty objemové hmotnosti ($\rho_d$), pórovitosti a specifické hmotnosti ($\rho_z$) jsou v Tabulce 7.

Objemová hmotnost v prvním horizontu byla mírně nižší než průměrná objemová hmotnost v České republice, která má hodnotu 1,46 g/cm$^3$ (Sáňka a kol. 2018). Hodnoty ve druhém a třetím horizontu byly naopak nadprůměrné. Zvyšování objemové hmotnosti s rostoucí hloubkou je přirozené, podle Šarapatky (2014) může být zvýšení objemové hmotnosti způsobeno také menší hodnotou pórovitosti, nebo jemnějším zrnitostním složením půdy.

Specifická hmotnost zeminy se obvykle pohybuje v rozmezí 2,6-2,7 g/cm$^3$ (Sáňka a kol. 2018), jak již bylo zmíněno v literární rešerši. Naměřené hodnoty vzorků z druhého a třetího horizontu tedy odpovídaly průměrným hodnotám na území České republiky. První horizont S1 dosáhl nižší hodnoty měrné hmotnosti, což může být podle Sáňky a kol. (2018) způsobeno například větším množstvím humusu ve vzorku (to potvrzují hodnoty Cox v Tabulce 11).

**Tabulka 7** Naměřené hodnoty objemové hmotnosti, pórovitosti a specifické hmotnosti vzorků

| | **$\rho_d$ (g/cm$^3$)** | **Pórovitost (%)** | **$\rho_z$ (g/cm$^3$)** |
|---|---|---|---|
| S1 | 1,4 | 44,0 | 2,52 |
| S2 | 1,6 | 47,0 | 2,63 |
| S3 | 1,7 | 47,0 | 2,62 |

Na porušených vzorcích ze tří vrstev z experimentální lokality byla dále změřena velikost částic a jejich následné rozřazení do zrnitostních kategorií, frakcí a půdních druhů.

Hustoměrnou metodu bylo stanoveno zastoupení různých velikostí částic ve vzorku a podle Tabulky 1, byl vzorek rozřazen do čtyř zrnitostních kategorií I.-IV (Tabulka 8).

Obsah fyzikálního jílu (Tabulka 9) představuje zastoupení nejjemnější zrnitostní frakce. Ve třetím horizontu byl naměřen obsah fyzikálního jílu více než 30 %, tedy mnohem vyšší než v prvních dvou horizontech. Půda na lokalitě je tedy v mělčích vrstvách spíše písčitá a v hlubších naopak s vyšším obsahem jílu.

Podle procentuálního zastoupení I. zrnitostní kategorie ve vzorcích byla půda zařazena do půdních druhů (Tabulka 10). Půda v prvním horizontu měla zastoupení I. zrnitostní kategorie 19,26 %, což půdu zařazuje do půdního druhu hlinitopísčitá. Půda ve druhém horizontu S2 měla hodnotu 6,89 %, tady půda písčitá a v horizontu S3 měla 44,08 %, tedy půda hlinitá.

**Tabulka 8** Naměřené hodnoty zrnitostních frakcí v %

| | **I. Z. k. (<0,01 mm)** | **II. Z. k. (0,01-0,05 mm)** | **III. Z. k. (0,05-0,1 mm)** | **IV. Z. k. (0,1-2 mm)** |
|---|---|---|---|---|
| S1 | 19,26 | 9,63 | 11,24 | 59,84 |
| S2 | 6,89 | 3,21 | 10,07 | 79,82 |
| S3 | 44,08 | 16,92 | 7,27 | 31,7 |

**Tabulka 9** Obsah fyzikálního jílu ve vzorcích

| | **fyz. jíl (%)** |
|---|---|
| S1 | 9,14 |
| S2 | 5,26 |
| S3 | 30,47 |

**Tabulka 10** Rozdělení půdních druhů dle Novákovy klasifikace

| | **Půdní druh** |
|---|---|
| S1 | Hlinito písčitá |
| S2 | Písčitá |
| S3 | Hlinitá |

## 5.2 Chemické vlastnosti

Z odebraného vzorku půdy byly stanoveny hodnoty $pH_{H2O}$, $pH_{KCL}$, EC (elektrická vodivost), Q4/6 (kvalita humusu) a Cox (obsah organického uhlíku), výsledné hodnoty jsou v Tabulce 11.

Aktivní půdní reakce všech tří horizontů byla vyhodnocena jako slabě alkalická. Výměnná půdní reakce v prvních dvou horizontech S1 a S2 byla vyhodnocena jako neutrální, pH ve třetím horizontu S3 byla slabě kyselá.

Hodnoty elektrické vodivosti (salinity) dosáhly v prvním horizontu S1 poměrně vysokých hodnot a byly zařazeny mezi půdy se zvýšeným zatížením solemi. Ve druhém horizontu byly naměřeny hodnoty naopak nejnižší a půda byla vyhodnocena jako minimálně zasolená. Třetí horizont S3 pak byl vyhodnocen jako půda bez negativních účinků solí.

Naměřené kvocienty kvality humusu v prvních dvou horizontech lze vyhodnotit jako kvalitní, naopak ve třetím horizontu byl humus kvalitní výrazně méně.

Obsah organického uhlíku lze v prvním horizontu S1 vyhodnotit jako velmi vysoký a v horizontech S2 a S3 jako nízký.

**Tabulka 11** Naměřené hodnoty pH, salinity, kvality humusu a obsahu organického uhlíku

| | $pH_{H2O}$ | $pH_{KCL}$ | EC ($\mu S/cm^{-1}$) | Q4/6 | Cox (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| S1 | 7,17 | 6,70 | 72,9 | 3,56 | 2,15 |
| S2 | 7,70 | 6,89 | 18,9 | 2,79 | 0,07 |
| S3 | 7,61 | 6,33 | 44,2 | 5,50 | 0,10 |

## 5.3 Kalibrace

Výsledky kalibrace senzorů jsou ve formě grafů závislostí objemových vlhkostí půd a laboratorně změřených Countů pomocí senzorů TMS-4 a jsou uvedeny v Příloze I této bakalářské práce. Na základě těchto závislostí byly vytvořeny kalibrační rovnice pro všechny kalibrované senzory (Tabulka 12). Sloučením hodnot objemových vlhkostí a naměřených Countů ze dvou senzorů pro stejný horizont byly vytvořeny kalibrační rovnice pro každý horizont a vypočteny jejich parametry, které jsou uvedeny v Tabulce 13. Parametry z Tabulky 13 byly následně použity pro výpočet reálných vlhkostí naměřených senzory na experimentální lokalitě. Hodnoty parametrů prvního horizontu S1 odpovídají prvním třem hloubkám půdy na experimentální lokalitě (5 cm, 10 cm a 25 cm), hodnoty druhého horizontu S2 odpovídají hloubce 50 cm a parametry horizontu S2 jsou shodné s hloubkou 80 cm.

**Tabulka 12** Kalibrační rovnice kalibrovaných senzorů

| **Senzor** | **Kalibrační rovnice** |
|---|---|
| S1a | y = 1.8015x - 0.179<br>$R^2$ = 0.9862 |
| S1b | y = 1.9523x - 0.1751<br>$R^2$ = 0.9437 |
| S2a | y = 1.5022x - 0.1195<br>$R^2$ = 0.9718 |
| S2b | y = 1.4886x - 0.1453<br>$R^2$ = 0.9873 |
| S3a | y = 1.798x - 0.2186<br>$R^2$ = 0.9821 |
| S3b | y = 1.915x - 0.2049<br>$R^2$ = 0.9855 |

**Tabulka 13** Parametry kalibračních rovnic pro jednotlivé horizonty

| | a1 | b1 |
|---|---|---|
| S1 | 1,8393 | -0,1708 |
| S2 | 1,4734 | -0,1275 |
| S3 | 1,8128 | -0,2023 |

## 5.4 Teplota půdy

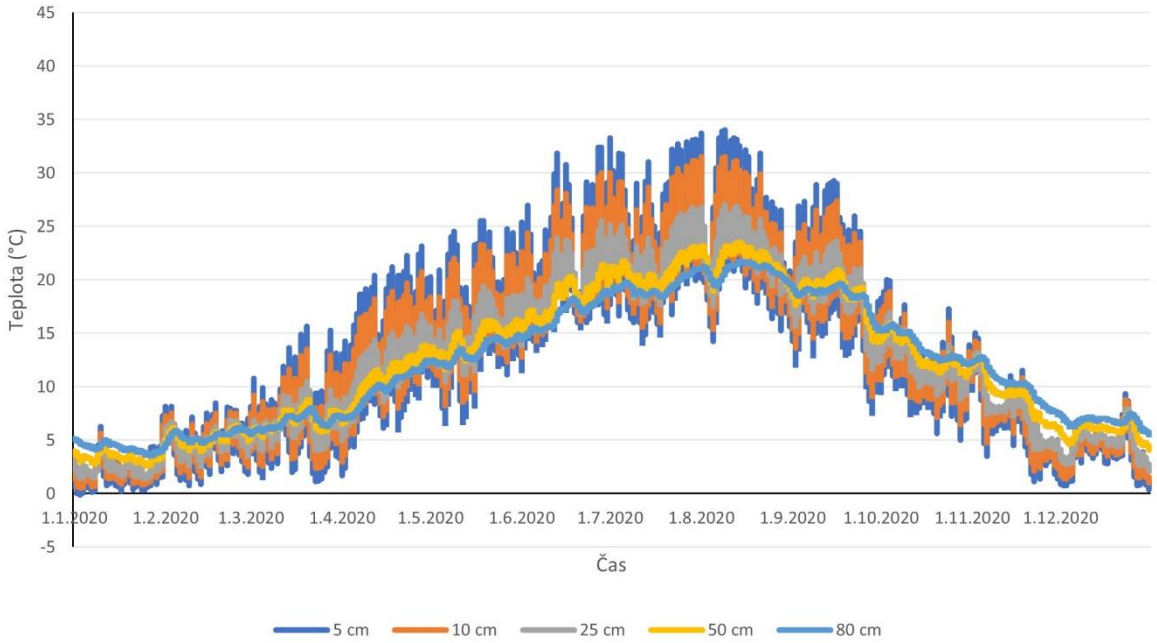
Jedním z hlavních cílů této práce bylo popsat teplotní režim půd pod různými povrchovými kryty. Data byla vyhodnocována od 1.1.2020 do 31.12.2020.

Rok 2020 ve Středočeském kraji, kam spadá i experimentální lokalita v Semicích, byl z hlediska teplot vzduchu oproti dlouhodobému průměru z let 1981-2010 teplejší, konkrétně o 1,3 °C (Územní teploty 2020). Průměrná roční teplota v letech 1981-2010 byla 8,6 °C, v roce 2020 byla průměrná roční teplota 9,9 °C. Největší teplotní rozdíl byl zaznamenán v únoru roku 2020, kdy byly ve Středočeském kraji naměřeny hodnoty přesně o 5 °C vyšší než dlouhodobé průměrné únorové teploty.

Na teplotu půdy má vliv i řada dalších faktorů než jen teplota vzduchu, jak bylo zjištěno na základě literární rešerše. Jedním z faktorů je například tepelná vodivost půdy. Podle Kodešové a kol. (2013) má větší tepelnou vodivost půda písčitá, která se vyskytuje na naší experimentální lokalitě, kromě hloubky 80 cm pod povrchem, který je s vyšším obsahem jílu. Dalším z faktorů, který má na teplotu půdy značný vliv, je půdní profil, tedy v jaké hloubce pod povrchem jsou teploty měřeny. Teploty byly zaznamenávány v různých hloubkách, 5-80 cm pod povrchem. Teploty se s rostoucí hloubkou zpožďují v čase, tedy například maximální teploty v největší hloubce nastanou později než maximální teploty v hloubkách mělčích. Podle Morgenroth a Buchan (2009) dosahuje půda své maximální teploty na povrchu přibližně 1 hodinu po maximální teplotě vzduchu, v hloubce 30 cm pak až 10 hodin po maximální teplotě vzduchu. Zpožďování teplot pozorovali také Chang a kol. (2021), kteří dále popsali také postupné snižování teplotních oscilací s rostoucí hloubkou, tedy že v malých hloubkách jsou velké teplotní rozdíly, a naopak ve větších hloubkách jsou rozdíly malé.

Prvním z hodnocených povrchů je povrch holé půdy. Režim teplot pod povrchem holé půdy popisuje graf na Obrázku 8. Teploty v hloubce 5 cm pod povrchem vykazovaly nejvyšší teplotní rozdíly, naopak teploty v hloubce 80 cm pod povrchem rozdíly nejmenší. V jarních a letních měsících byly výkyvy teplot především v mělčích hloubkách vyšší než v ostatních obdobích roku. Nejnižší naměřené teploty měly hodnotu -0,13 °C a byly dosaženy 3.1.2020 v hloubce 5 cm pod povrchem. Ve stejnou dobu byly v hloubce 80 cm pod povrchem naměřeny teploty 4,75 °C, které se postupně snižovaly a dosáhly minima 4,13 °C až 9.1.2020. Nejvyšší teplota 34 °C byla zaznamenána 9.8.2020 v hloubce 5 cm pod povrchem. V profilu 10 cm pod povrchem byla naměřena nejvyšší teplota 31,5 °C, která nastala o půl hodiny později, než maximální teplota v 5 cm. Nejvyšší teplota byla nižší i v hloubce 25 cm pod povrchem, která dosáhla na hodnotu 27 °C, 3,5 hodiny po maximální teplotě v hloubce 5 cm. V hloubkách 50 a 80 cm pod povrchem nastaly maximální teploty 23,5 °C a 21,75 °C o několik dní později,

konkrétně 14.8.2020 v případě 50 cm a 19.8.2020 v případě nejhlubší, 80 cm hloubky. Tyto hodnoty odpovídají již výše zmíněnému zpožďování teplot v čase, popsaném ve studiích Morhenroth a Buchan (2009) a Chang a kol. (2021). Dále lze také pozorovat, podobně jako pozorovali Chang a kol. (2021), postupné snižování teplotních oscilací s rostoucí hloubkou.

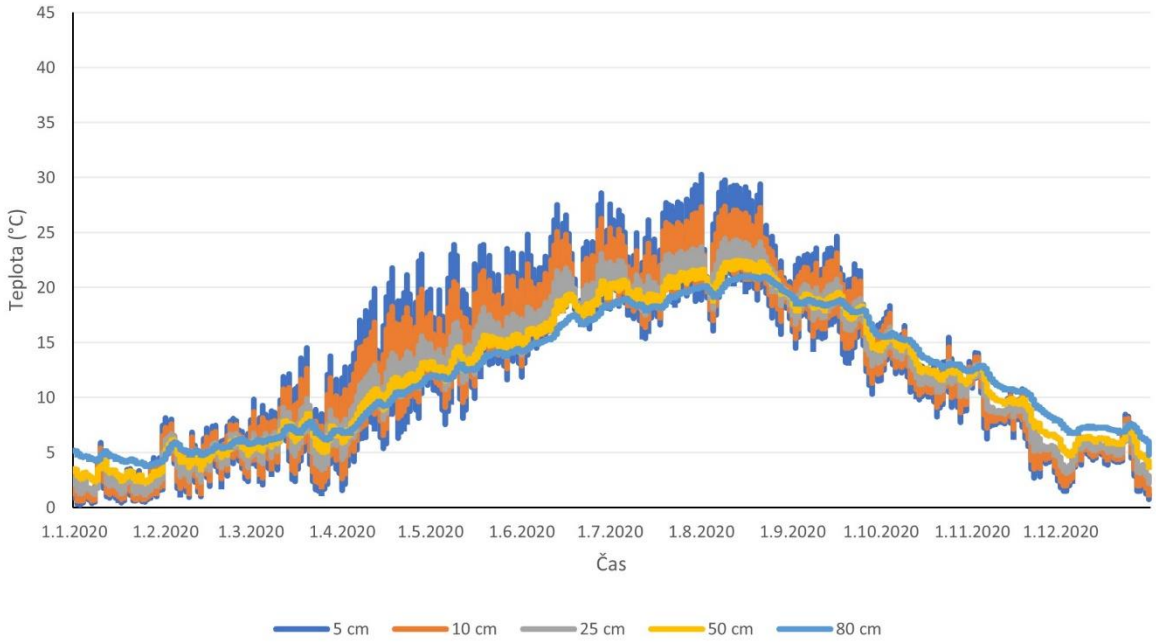



**Obrázek 8** Režim teplot půdy pod povrchem holé půdy

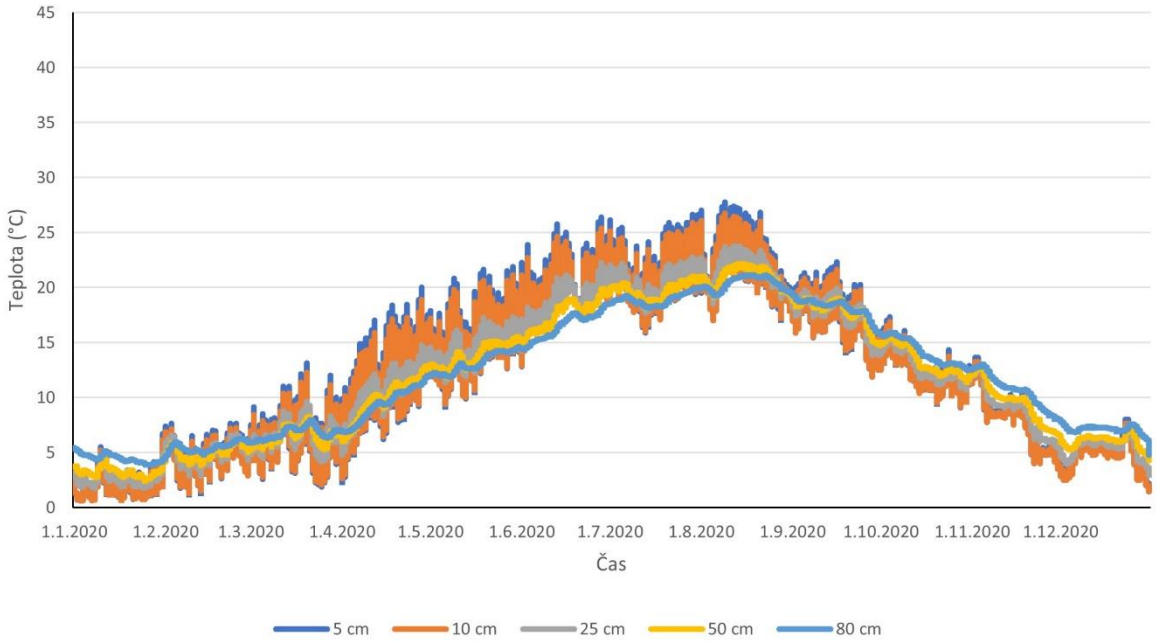
Obrázek 9 zobrazuje graf s režimem teplot půdy pod povrchem sekané trávy. Nejnižší hodnota, naměřena 3.1.2020 v hloubce 5 cm pod povrchem, byla 0,25 °C. Nejnižší teploty tedy neklesly pod bod mrazu. S rostoucí hloubkou se teplota 3.1.2020 postupně zvyšovala, až dosáhla v hloubce 80 cm hodnoty 4,8 °C. Nejvyšší hodnota teploty byla naměřena 1.8.2020 v hloubce 5 cm pod povrchem a dosahovala 30,25 °C. Ve stejnou dobu byla v 80 cm pod povrchem naměřena teplota 20 °C.

Nejnižší teplota pod povrchem nesekané trávy (Obrázek 10) dosáhla na hodnotu 0,63 °C v hloubce 5 i 10 cm, ve stejný den jako v případě sekané trávy, tedy 3.1.2020. Rozdíl nejnižších teplot mezi sekanou a nesekanou trávou byl minimální. Nejvyšší teploty 27,75 °C pak bylo pod povrchem nesekané trávy dosaženo 9.8.2020, v hloubce 5 cm pod povrchem. Ve stejný den, kdy byla naměřena maximální teplota pod povrchem sekané trávy, byla pod povrchem nesekané trávy naměřena teplota 27 °C. Rozdíl teplot mezi těmito povrchy byl 1.8.2020 3,25 °C.

Song a kol. (2013) zjistili, že snížením vegetačního pokryvu dochází ke snížení zastínění půdy, a tedy dochází také ke zvýšení teploty půdy. Podobně se zvýší teplota také v důsledku snížení hustoty vegetačního pokryvu. Song a kol. (2013) dále také pozorovali menší teplotní výkyvy pod vyšším vegetačním pokryvem. Povrch nesekané trávy při našem výzkumu poskytl nižší výkyvy teplot a také nižší maximální hodnoty než sekaná tráva, což potvrzuje výsledky studie Song a kol. (2013), ovšem tyto rozdíly byly poměrně nízké.




**Obrázek 9** Režim teplot půdy pod povrchem sekané trávy

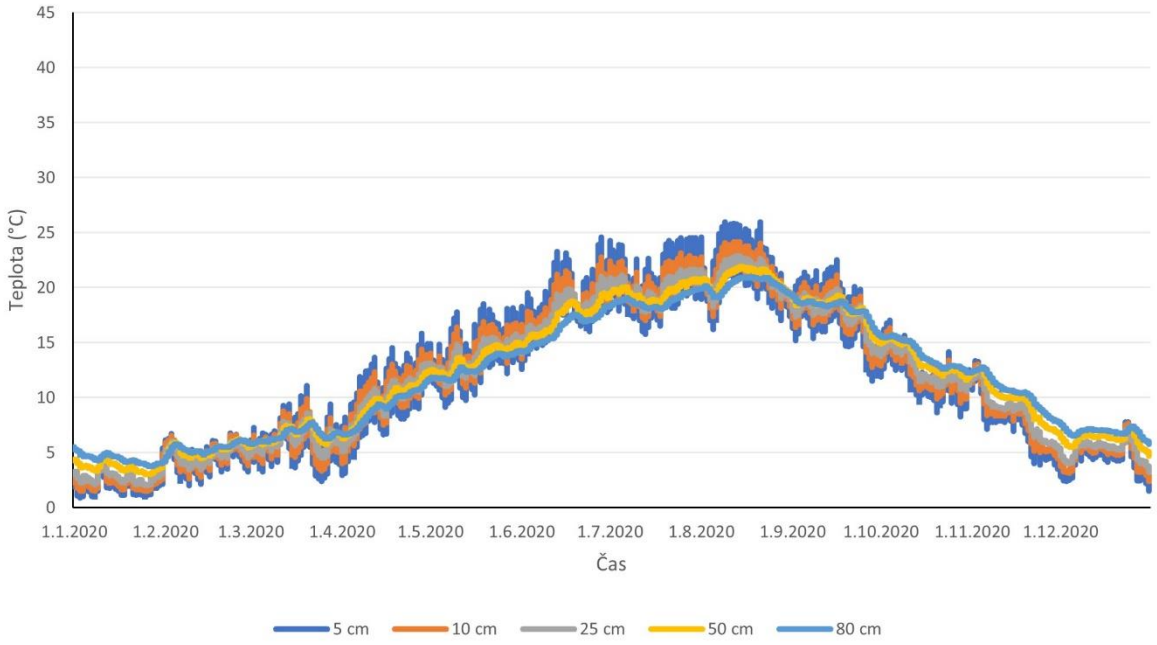



**Obrázek 10** Režim teplot půdy pod povrchem nesekané trávy

Mulčovacím materiálem použitým při experimentu byla mulčovací kůra. Teploty naměřené během roku 2020 pod povrchem mulčovací kůry zobrazuje graf na Obrázku 11. Podobně jako u předchozích povrchů byly naměřeny nejmenší výkyvy teplot v hloubce 80 cm, největší pak 5 cm pod povrchem. Nejnižší teplota byla naměřena 3.1.2020 v hloubce 5 cm pod povrchem, a to 0,86 °C. Ve stejný den bylo možné pozorovat s rostoucí hloubkou i rostoucí teplotu, která v hloubce 80 cm pod povrchem dosáhla na hodnotu 5 °C. Ovšem nejnižší teplota

v 80 cm byla naměřena 4,25 °C, 9.1.2020, tedy o 8 dní později. Lze tedy s rostoucí hloubkou pozorovat mírné zpoždění teplot. Nejvyšší teplota 25,94 °C, byla naměřena 9.8. a 21.8.2020 v hloubce 5 cm pod povrchem.

Ke stejným závěrům při svých studiích dospěli také Kodešová a kol. (2014) a Chang a kol. (2021), kteří zaznamenali větší výkyvy teplot blíže k povrchu, naopak ve větších hloubkách byly výkyvy menší. Podle studie Kodešová a kol. (2013) byla na povrchu mulčovací kůry zaznamenána nejmenší tepelná vodivost (v porovnání s ostatními studovanými povrchy), která je důvodem schopnosti mulčovací kůry udržovat konstantní teplotu půdy pod tímto povrchem. Konstantní teplota půdy je vhodná pro správný růst rostlin. Kader a kol. (2017b) při své studii zaznamenal nižší letní teploty pod povrchem mulčovací kůry než pod povrchem holé půdy, stejně jako tomu bylo i při našem měření.

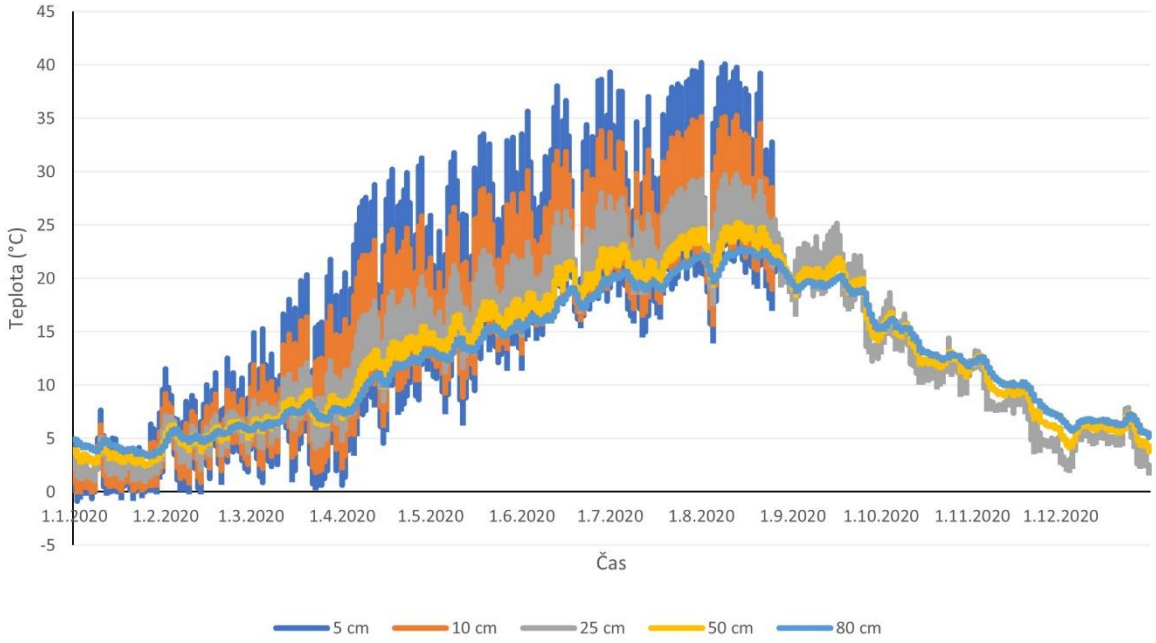



**Obrázek 11** Režim teplot půdy pod povrchem mulčovací kůry

Režim teplot pod povrchem betonové dlažby je v grafu na Obrázku 12. Nejkonstantnější teplota pod betonovou dlažbou zůstala v hloubce 80 cm pod povrchem. V zimním období byla v 80 cm teplota nejvyšší, naopak v teplém období roku byla teplota nejnižší po celý den a nižších hodnot dosahovaly pouze noční teploty blíže k povrchu.

Povrch betonové dlažby má podle Kodešové a kol. (2014) vysoké výkyvy teplot, což lze pozorovat také při našem experimentu. S vysokými výkyvy teplot souvisí také schopnost betonové dlažby, nejrychleji reagovat na změny teplot, v porovnání s dalšími studovanými povrchy. Povrch betonové dlažby je schopen se rychle zahřát a také rychle vychladnout.

Obecně lze u všech povrchů pozorovat, že výkyvy teplot se s rostoucí hloubkou zmenšují v průběhu celého roku. V letních měsících jsou výkyvy teplot v průběhu dne a noci znatelně vyšší než v zimě. V zimních měsících jsou pak teploty ve větších hloubkách spíše vyšší než v hloubkách menších, a naopak v létě jsou teploty ve větších hloubkách nižší. S rostoucí hloubkou lze také ve všech hloubkách pozorovat zpožďování výkyvů teplot.




**Obrázek 12** Režim teplot půdy pod povrchem betonové dlažby

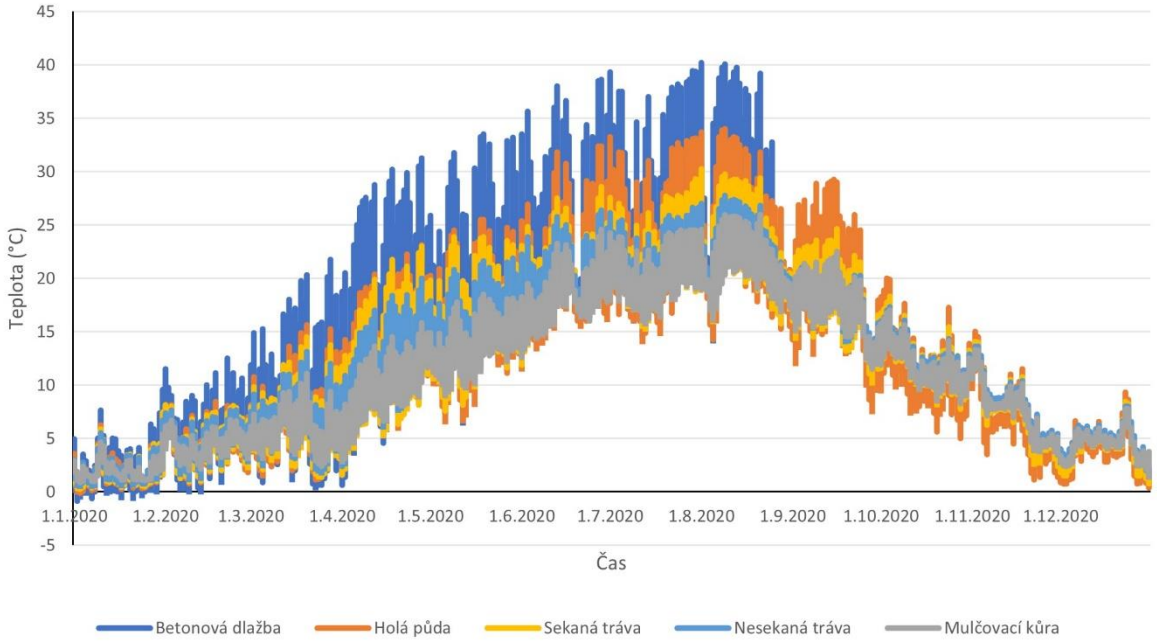
Dalším faktorem majícím vliv na teplotu v půdě je povrch, pod kterým je teplota půdy měřena. Takto byly teploty měřeny ve všech sledovaných hloubkách půdy.

Teploty pod různými povrchovými kryty v hloubce 5 cm pod povrchem jsou zobrazeny na Obrázku 13. V hloubce 5 cm pod povrchem byly naměřeny maximální teploty až 40,19 °C, vůbec nejvyšší ze všech sledovaných hloubek. Maximální teplota byla dosažena pod povrchem betonové dlažby, 1.8.2020. Naopak nejnižší maximální teploty byly naměřeny pod povrchem mulčovací kůry. Maximální teplota pod povrchem mulčovací kůry dosáhla na hodnotu 25,94 °C, 9.8.2020. Minimální teplota -0,89 °C byla v hloubce 5 cm dosažena pod povrchem betonové dlažby, 2.1.2020. Pod bod mrazu se dostala ještě teplota pod povrchem holé půdy (-0,13 °C).

Povrchy betonové dlažby a holé půdy by podle dosavadních poznatků z literární rešerše měly vykazovat nejpodobnější hodnoty. Především v jarních a letních měsících ovšem v hloubce 5 cm pod povrchem vykazují velmi vysoké rozdíly nejvyšších denních teplot. Zatímco pod povrchem holé půdy byla naměřena nejvyšší teplota 34 °C, pod betonovou dlažbou byly naměřeny hodnoty přes 40 °C. Povrch betonové dlažby by měl v porovnání s mulčovací kůrou v hloubce 5 cm dosahovat teplot naopak nejrozdílnějších. Teploty pod povrchem betonové dlažby dosahovaly v nejteplejším období více než 40 °C, zatímco pod mulčovací kůrou byly ve stejném období naměřeny pouze hodnoty nepřesahující 26 °C. Rozdíl teplot tedy tvoří více než 14 °C. V chladném období roku byly naměřeny nižší hodnoty pod betonovou dlažbou, které dosahovaly až pod bod mrazu. Naopak nejnižší teploty pod mulčovací kůrou se v průběhu roku nesnížily pod 1 °C.

Kodešová a kol. (2014) pozorovali v porovnání s ostatními studovanými povrchy, že mulčovací kůra vykazovala nejmenší denní teplotní oscilace, a naopak největší vykazovala betonová dlažba. Mulčovací kůra dále podle Kodešové a kol. (2014) vykazovala nejnižší

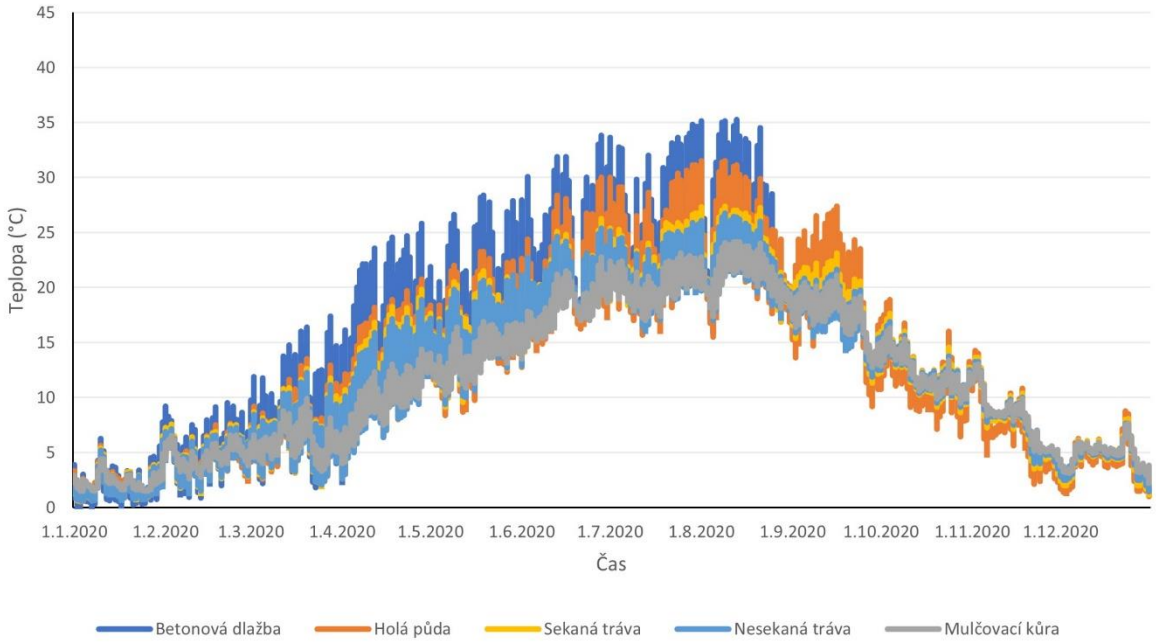
maximální teploty, naopak betonová dlažba ty nejvyšší. Také podle Morgenroth a Buchan (2009) dosahuje dlažbou zakrytá půda vyšších maximálních teplot než půda holá.




**Obrázek 13** Režim teplot půdy v hloubce 5 cm pod povrchem

V hloubce 10 cm pod povrchem byly naměřeny hodnoty zobrazené v grafu na Obrázku 14. Podobně jako v hloubce 5 cm pod povrchem lze pozorovat největší výkyvy teplot a zároveň také nejvyšší maximální teplotu pod povrchem betonové dlažby. Maximální teplota byla dosažena 13.8.2020 a dosáhla na hodnotu 35,25 °C. Druhé nejvyšší maximální teploty byly naměřeny pod povrchem holé půdy.

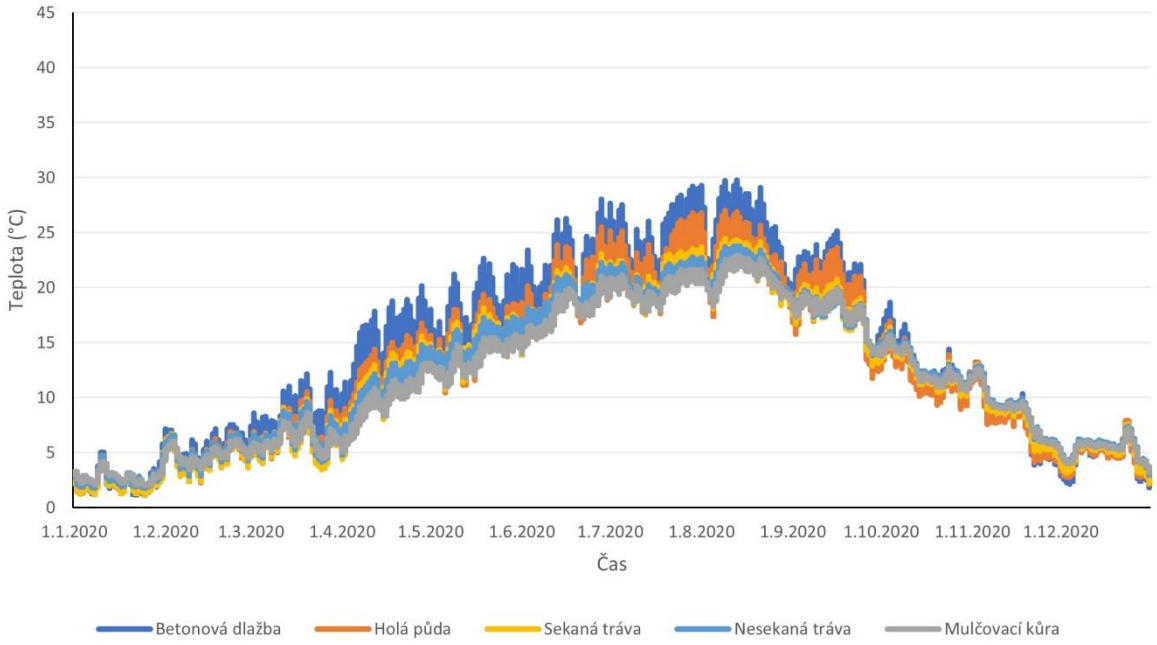
V porovnání betonové dlažby a holé půdy jsou v jarních a letních měsících (od března do srpna) patrné menší výkyvy teplot mezi dnem a nocí právě na holé půdě, na betonové dlažbě pak byly zaznamenány vyšší maximální teploty. V zimních měsících poskytla holá půda vyšší minimální teploty. Můžeme tedy konstatovat, že holá půda, v porovnání s betonovou dlažbou, má lepší schopnosti uchovávat konstantní teplotu v průběhu celého roku. V porovnání betonové dlažby s mulčovací kůrou poskytla mulčovací kůra v chladných měsících vyšší teploty a zároveň zaznamenala menší výkyvy v průběhu dne. Naopak v teplejším období roku zaznamenala půda pod betonovou dlažbou významné výkyvy teplot, kdy nejvyšší denní teploty dosahovaly přes 35 °C. Díky funkcím mulčovací kůry zůstaly nevyšší teploty v tomto období nižší než 25 °C, konkrétně byla naměřena maximální hodnota 24,13 °C. Nižší letní teploty jsou například pro růst domácích rostlin vhodnější.




**Obrázek 14** Režim teplot půdy v hloubce 10 cm pod povrchem

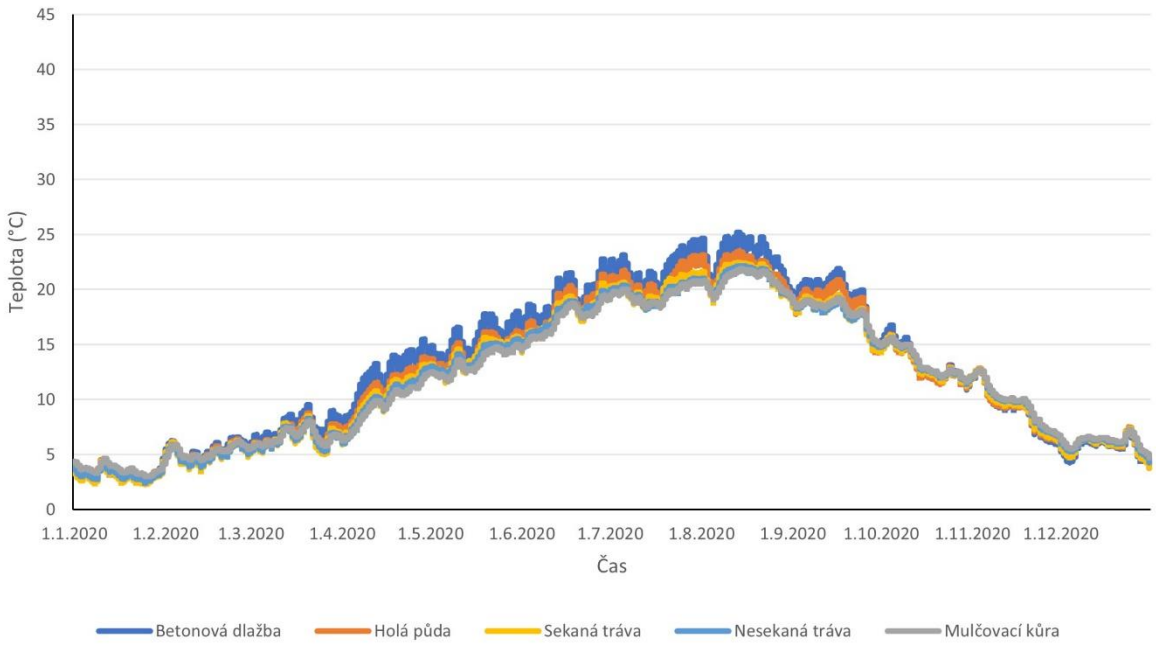
V hloubce 25 cm (Obrázek 15) bylo dosaženo maximální teploty pod povrchem betonové dlažby, kdy vystoupala teplota 13.8.2020 na hodnotu 29,75 °C. Nejnižší hodnoty ve stejný čas byly dosaženy pod povrchem mulčovací kůry, kde vystoupala nejvyšší teplota pouze na 22,89 °C. Rozdíl maximálních teplot tedy byl necelých 7 °C. Minimální teploty byly zaznamenány 25.1.2020 pod povrchem betonové dlažby, a to 1,13 °C, nejvyšší minimální teplota pak byla naměřena pod povrchem mulčovací kůry – 2 °C.

Také v hloubce 25 cm lze pozorovat, podobně jako u Kodešové a kol. (2014), že mulčovací kůra poskytuje nejnižší maximální teploty. Obdobně jako u studie Morgenroth a Buchan (2009) byly pod půdou zakrytou dlažbou naměřeny vyšší maximální teploty než pod holou půdou.




**Obrázek 15** Režim teplot půdy v hloubce 25 cm pod povrchem

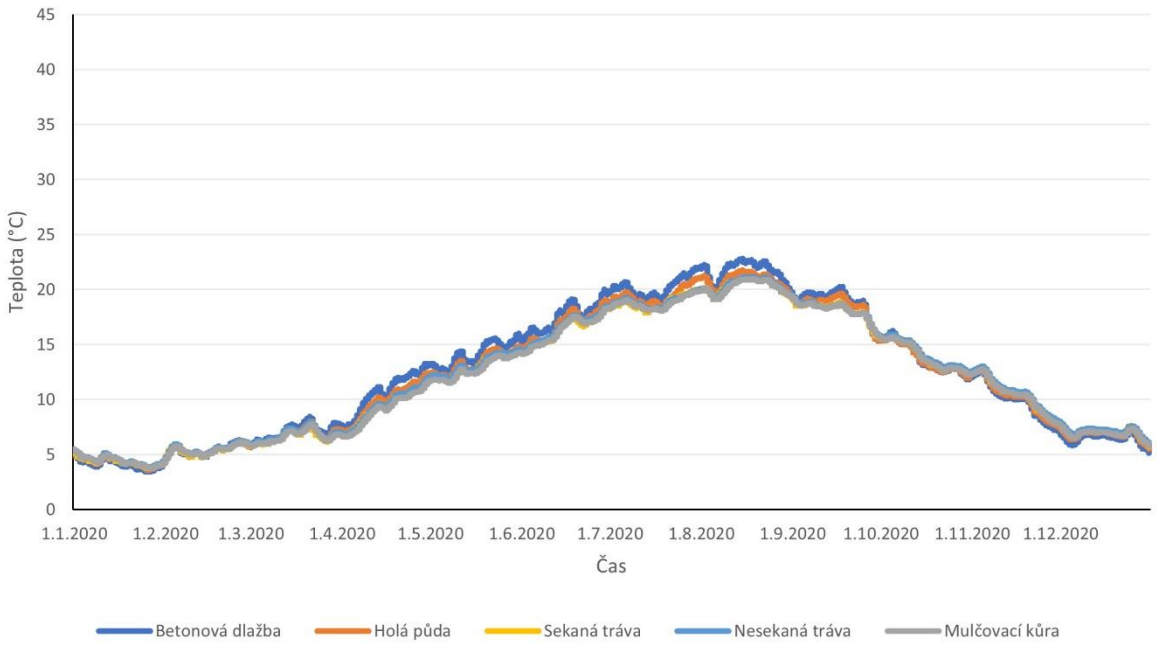
V hloubce 50 cm pod povrchem (Obrázek 16) lze pozorovat výrazně menší výkyvy teplot než v předešlých hloubkách. V čase od listopadu do poloviny února lze pozorovat nejvyšší teploty pod povrchem mulčovací kůry. Tato data reflektují také poznatky o mulčovacích materiálech popsané v literární rešerši. I přes již poměrně vysokou hloubku můžeme vidět nejvyšší výkyvy v teplejších obdobích pod betonovou dlažbou, která měla největší výkyvy zatím ve všech pozorovaných hloubkách. Teploty pod betonovou dlažbou dosahovaly hodnot přes 25 °C. Druhou v pořadí s nevětšími výkyvy teplot byla v roce 2020 holá půda. Naopak nejnižší teploty v hloubce 50 cm pod povrchem neklesly v chladném období roku pod 2 °C. Nejnižší teplota 2,25 °C byla dosažena pod povrchem sekané trávy 25.1.2020. V porovnání s hloubkou 25 cm, lze v hloubce 50 cm pozorovat významné snížení maximálních teplot i teplotních oscilací, které může být způsobeno větší vzdáleností mezi senzory, která byla již 25 cm.




**Obrázek 16** Režim teplot půdy v hloubce 50 cm pod povrchem

V 80 cm hloubce (Obrázek 17) dosahovaly výkyvy teplot ještě menších rozdílů než v hloubce 50 cm. Stejně jako v předešlých hloubkách dosahovala největších výkyvů betonová dlažba. Povrch betonové dlažby také poskytl v teplém období roku nejvyšší teploty, které přesáhly 23 °C. V porovnání s nejnižšími naměřenými teplotami v hloubce 50 cm byly nejnižší hodnoty v 80 cm přibližně o 2 °C vyšší, okolo 4 °C. Obecně bylo možné vhloubce 80 cm pod povrchem pozorovat nejmenší denní oscilace teploty pod povrchem mulčovací kůry, ovšem ani ostatní povrchy nedosahovaly významných denních teplotních oscilací.

K podobným závěrům dospěli také Kodešová a kol. (2014), kteří tvrdí, že s rostoucí hloubkou se snižuje vliv různých povrchů na režim teplot, a proto lze pozorovat hodnoty pod všemi povrchy velmi podobné. Dále lze v porovnání s ostatními hloubkami pozorovat nejmenší teplotní oscilace a podobné výsledky dokládají i studie Kodešové a kol. (2014) a Chang a kol. (2021).




**Obrázek 17** Režim teplot půdy v hloubce 80 cm pod povrchem

Naměřená teplotní data pod všemi povrchy i ve všech hloubkách lze vyhodnotit v porovnání s dostupnými studiemi jako velmi podobná. Naměřené maximální a minimální teploty pod všemi povrchy a ve všech hloubkách jsou v Tabulce 14.

**Tabulka 14** Maximální a minimální naměřené teploty (°C)

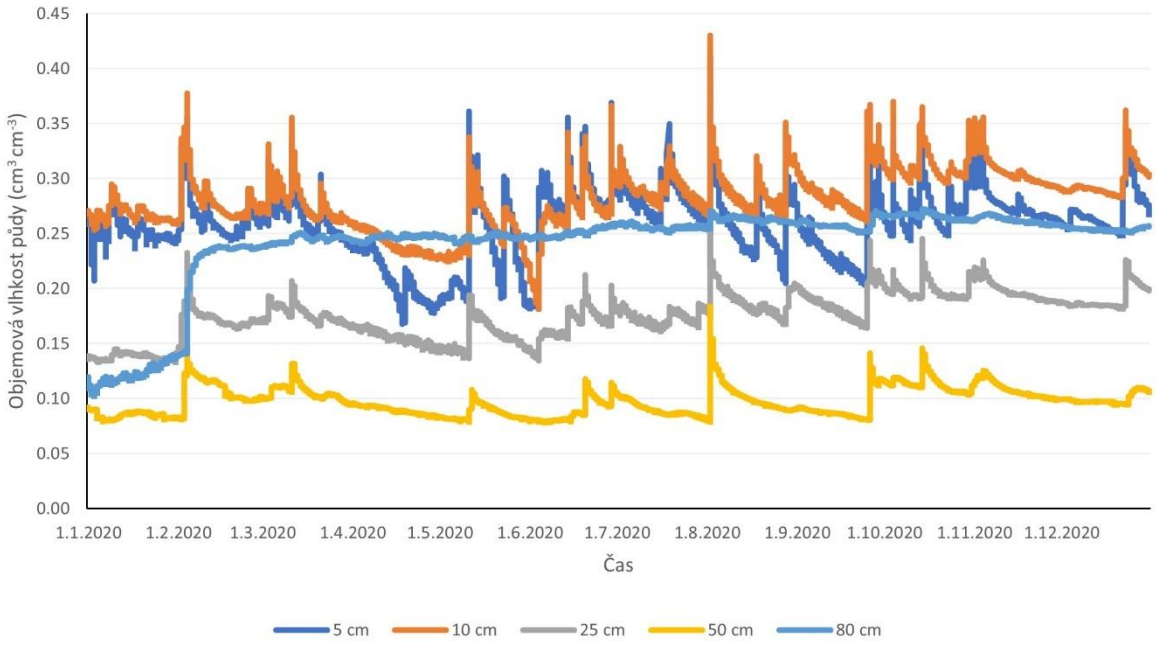
| | **5 cm** | **10 cm** | **25 cm** | **50 cm** | **80 cm** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Holá půda** | -0,13 | 0,50 | 1,50 | 2,69 | 3,63 |
| | 34,00 | 31,50 | 27,00 | 23,50 | 21,75 |
| **Sekaná tráva** | 0,25 | 0,63 | 1,25 | 2,25 | 3,75 |
| | 30,25 | 27,38 | 24,44 | 22,44 | 21,00 |
| **Nesekaná tráva** | 0,63 | 0,63 | 1,75 | 2,50 | 3,88 |
| | 27,75 | 26,75 | 23,75 | 22,13 | 21,13 |
| **Mulčovací kůra** | 0,89 | 1,50 | 2,00 | 3,00 | 3,75 |
| | 25,94 | 24,13 | 22,89 | 21,89 | 20,94 |
| **Betonová dlažba** | -0,88 | 0,13 | 1,13 | 2,44 | 3,44 |
| | 40,19 | 35,25 | 29,75 | 25,19 | 22,81 |

## 5.5 Vlhkost půdy

Kromě výzkumu teplotních režimů půd bylo dalším z hlavních cílů této práce popsat vlhkostní režim půd pod různými povrchy. Data o vlhkosti půdy byla vyhodnocována obdobně jako data teplotní, tedy v průběhu celého roku 2020.

Režim vlhkosti půdy pod povrchem holé půdy lze vidět na Obrázku 18. Nejvyšší vlhkostní oscilace lze pozorovat v hloubkách 5 a 10 cm pod povrchem, s rostoucí hloubkou se oscilace snižují a v největší hloubce 80 cm pod povrchem již lze pozorovat vlhkost poměrně konstantní. Vlhkost půdy se s rostoucí hloubkou snižovala a poté skokově vzrostla v nejvyšší pozorované hloubce. Důvodem vysoké vlhkosti může být jílovité prostředí, které má schopnost zadržovat větší množství vody a také právě vysoká hloubka, které se blíží hladině podzemní vody. S rostoucí hloubkou se také snižuje výpar, který lze označit v hloubce 80 cm pod povrchem za minimální. Maximální průměrná vlhkost za celý rok dosáhla hodnoty 0,28 $cm^3cm^{-3}$ v hloubce 10 cm pod povrchem a nejnižší hodnota byla zaznamenána v hloubce 50 cm pouze 0,10.

Morgenroth a Buchan (2009) zaznamenali pod povrchem holé půdy snížení vlhkostních oscilací s rostoucí hloubkou. Podobně také Chang a kol. (2021) a Zhang a kol. (2021) zaznamenali se zvyšující se hloubkou snižování půdní vlhkosti a také postupné ustalování oscilací. Při našem experimentu bylo možné pozorovat pouze pomalé snižování oscilací, kdy například hloubky 25 a 50 cm jsou z toho hlediska velmi podobné.



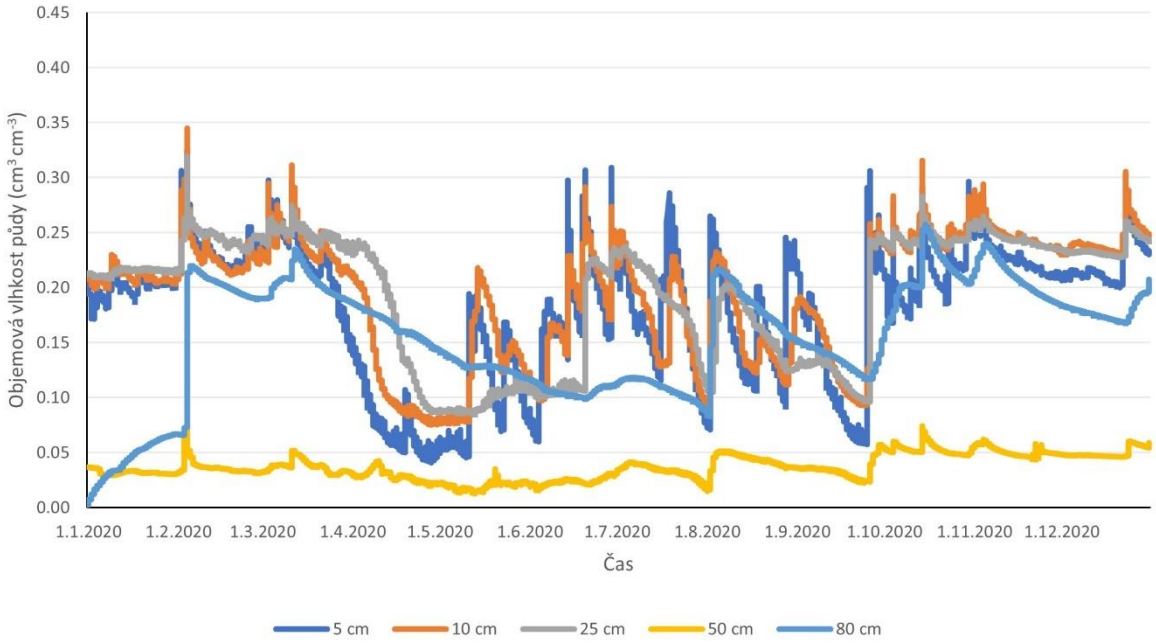

**Obrázek 18** Režim vlhkosti půdy pod povrchem holé půdy

Režim půdní vlhkosti pod povrchem sekané trávy je vyobrazen v grafu na Obrázku 19. Lze pozorovat poměrně vysoké výkyvy vlhkosti v hloubkách 5 cm, 10 cm i 25 cm pod povrchem, naopak v hloubce 50 cm pod povrchem byly změny vlhkosti minimální a také průměrná vlhkost v průběhu celého roku byla velmi nízká (většinou méně než 0,05 $cm^3cm^{-3}$).

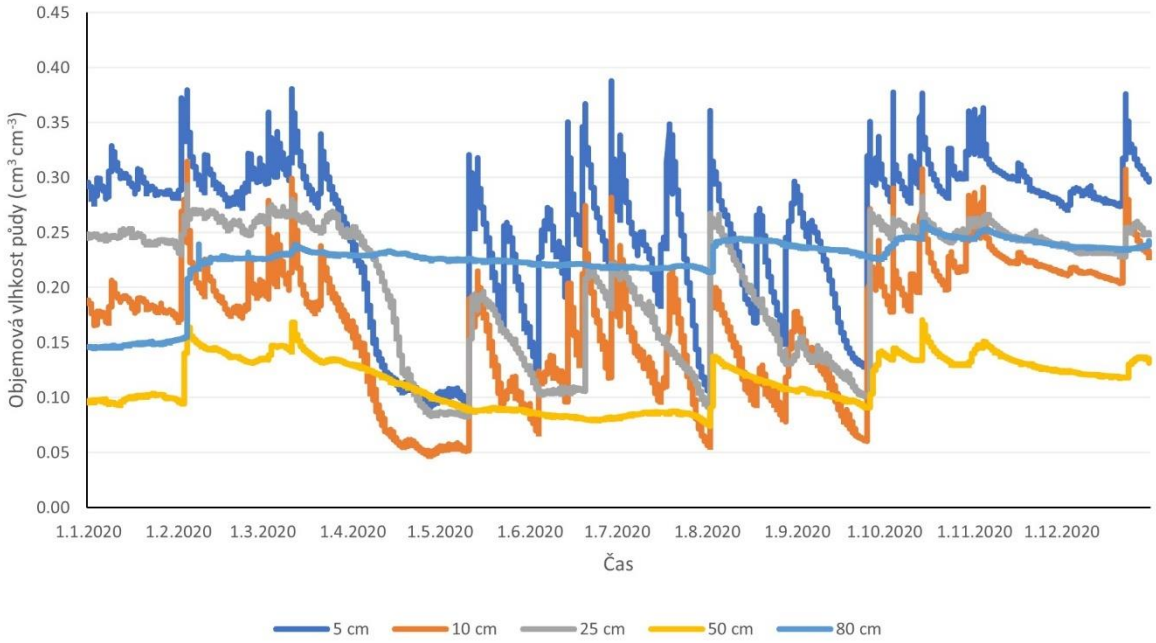
Podobně jako pod povrchem holé půdy lze i pod povrchem sekané trávy pozorovat v hloubce 80 cm skokový nárůst vlhkosti, která se 4.2.2020 zvýšila až na 0,22 $cm^3cm^{-3}$ a následně oscilovala po celý rok mezi 0,08 $cm^3cm^{-3}$ a 0,26 $cm^3cm^{-3}$. Nejkonstantnější vlhkost zůstávala v hloubce 50 cm pod povrchem, kdy se pohybovala pouze mezi 0,013 $cm^3cm^{-3}$ a 0,075 $cm^3cm^{-3}$. Maximální vlhkost byla naměřena 0,34 $cm^3cm^{-3}$ v hloubce 10 cm pod povrchem. Nejvyšší průměrná vlhkost za celý rok byla naměřena v hloubce 10 cm pod povrchem, konkrétně 0,20 $cm^3cm^{-3}$, dále byla nižší v hloubce 25 cm, poté 5 cm a 80 cm a výrazně nejnižší průměrná vlhkost byla zaznamenána v hloubce 50 cm pod povrchem, pouze 0,04 $cm^3cm^{-3}$.

Režim vlhkosti půdy pod povrchem nesekané trávy je na Obrázku 20. Můžeme zde pozorovat poměrně vysoké výkyvy půdní vlhkosti především v hloubkách 5 cm a 10 cm, v dalších hloubkách se pak hodnoty postupně ustalují. Pod povrchem nesekané trávy bylo možné pozorovat znatelně vyšší maximální hodnoty vlhkosti než pod povrchem sekané trávy. Maximální vlhkost byla naměřena v hloubce 5 cm pod povrchem, a to 0,39 $cm^3cm^{-3}$, dne 29.6.2020. Nejvyšší průměrná vlhkost za celý rok byla naměřena v hloubce 5 cm pod povrchem, a to 0,25 $cm^3cm^{-3}$ a postupně se snižovala v hloubce 80 cm, 25 cm, 10 cm a nejnižší byla v hloubce 50 cm, 0,11 $cm^3cm^{-3}$.

Při studii Kodešové a kol. (2014) poskytl travnatý povrch největší denní variabilitu půdní vlhkosti v porovnání s ostatními studovanými povrchy (holá půda, mulčovací kůra, betonová dlažba) a podobné závěry lze vyvodit i z našeho experimentu. Kodešová a kol. (2014) dále také pozorovali vysoký příjem vody kořenovým systémem rostlin, který může mít vliv na menší obsahy vody v půdě. Podle Song a kol. (2013) snížením vegetačního pokryvu dochází ke zvýšení teploty půdy a může tak dojít k následnému zvýšení odpařování vody z půdy, tudíž by pod sekanou trávou měla být vlhkost půdy nižší. Pod povrchem sekané trávy lze při našem experimentu pozorovat nižší průměrné vlhkosti půdy než pod povrchem nesekané trávy, což potvrzuje výsledky studie Song a kol. (2013). Dále může být nižší vlhkost sekané trávy způsobena vyšším příjmem vody prostřednictvím kořenů sekané trávy, která pro svůj růst potřebuje vody více, protože jsou pravidelně narušovány její vegetativní orgány. Další důvod rozdílnosti mezi povrchy sekané a nesekané trávy může být ten, že povrch nesekané trávy si udržuje oproti sekané trávě odlišné mikroklima, díky kterému si zachovává vlhkost mírně vyšší. Důvodem velkých vlhkostních výkyvů obou povrchů může být lepší schopnost infiltrace a evaporace travnatého povrchu. Zhang a kol. (2021) pozorovali významný nárůst vlhkosti v hloubce do 25 cm ihned po zavlažení, zatímco ve větších hloubkách zůstal obsah vody stabilně nízký. Dále také pozorovali vyšší variabilitu obsahu vody v hloubkách blíže k povrchu než v hloubkách větších. Podobné závěry lze vyvodit také z našeho experimentu, kdy byly v hloubkách do 25 cm pozorovány vysoké vlhkostní výkyvy i vyšší vlhkosti než ve větších hloubkách. Výjimku zde představuje hloubka 80 cm pod povrchem, který je, jak již bylo zmíněno, ovlivněn hladinou podzemní vody.




**Obrázek 19** Režim vlhkosti půdy pod povrchem sekané trávy

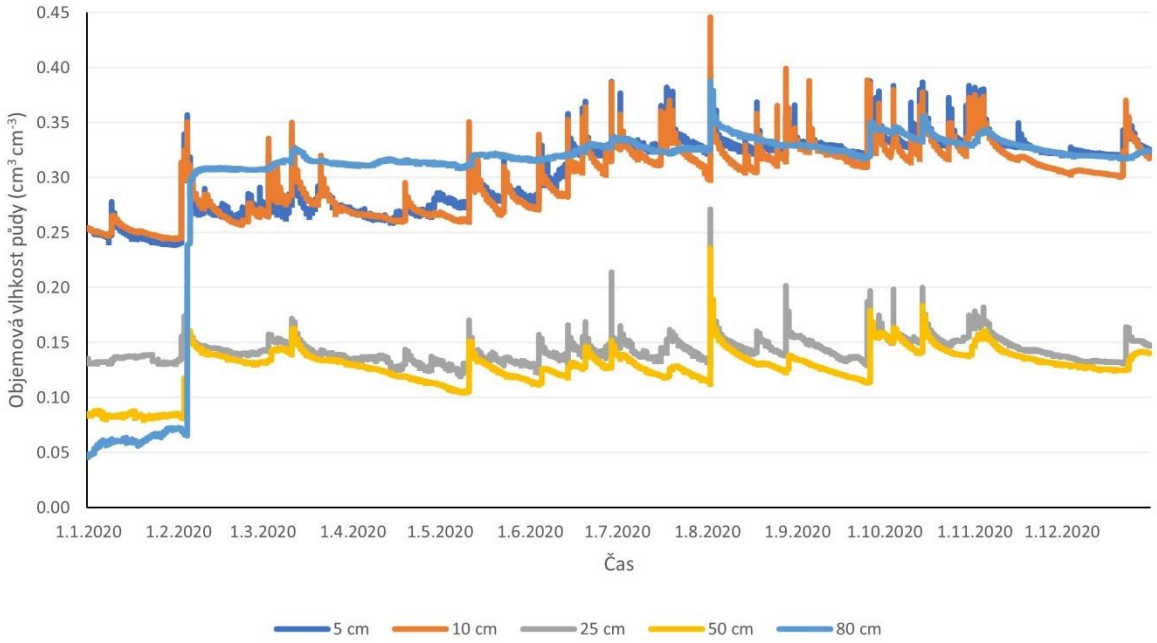



**Obrázek 20** Režim vlhkosti půdy pod povrchem nesekané trávy

Režim vlhkosti půdy pod povrchem mulčovací kůry je v grafu na Obrázku 21. Povrch mulčovací kůry poskytoval ve většině hloubek nejvyšší vlhkost půdy a malé vlhkostní výkyvy. Nejkonstantnější vlhkost byla zaznamenána v hloubce 80 cm pod povrchem. Nejvyšší průměrná vlhkost za celý rok byla naměřena v hloubce 5 cm pod povrchem – 0,31 $cm^3cm^{-3}$, pouze s minimálním rozdílem oproti hloubce 10 cm a 80 cm, které měly průměrnou vlhkost 0,30 $cm^3cm^{-3}$. Nejnižší průměrná vlhkost půdy byla naměřena v hloubce 50 cm pod povrchem

(0,13 $cm^3cm^{-3}$). V porovnání s povrchy holé půdy a trávy byla v hloubce 25 cm pod povrchem mulčovací kůry naměřena významně menší vlhkost – pouze 0,14 $cm^3cm^{-3}$. Maximální naměřená vlhkost byla v hloubce 10 cm – 0,45 $cm^3cm^{-3}$, tedy 45 % a byla vůbec nejvyšší v porovnání s dalšími povrchy a hloubkami. Pórovitost v odpovídajícím horizontu byla 44 %, lze tedy odhadovat, že půda byla maximálně nasycena vodou. Pórovitost by nikdy neměla být menší než naměřená vlhkost půdy, protože voda v půdě se vyskytuje právě v půdních pórech. Důvod vyšší naměřené vlhkosti půdy než hodnoty pórovitosti, může být ten, že pórovitost byla měřena na vzorku půdy odebraném z horizontu 0-30 cm, tedy ne konkrétně 10 cm.

Povrch mulčovací kůry má schopnost udržovat konstantní vlhkost v půdě a také snižuje odpařování vody z půdy (Kodešová a kol. 2014). Podle Kader a kol. (2017a) zůstává pod povrchem mulčovací kůry vyšší vlhkost než pod povrchem holé půdy, což lze většinou pozorovat také u našeho výzkumu, ovšem vyskytly se zde také odlišnosti. V hloubce 25 cm bylo pod povrchem holé půdy dosaženo vyšších vlhkostí půdy než pod povrchem mulčovací kůry, což může být způsobeno větší vlhkostí půdy pod povrchem mulčovací kůry v hloubkách 5 a 10 cm, které zachytily většinu infiltrované vody blíže k povrchu a voda se tak do větších hloubek nedostala. Ve studii Kader a kol. (2017b) byly pod povrchem holé půdy zaznamenány větší vlhkostní výkyvy než pod povrchem mulčovací kůry a stejně tak tomu bylo i při našem výzkumu, jak dokládá porovnání grafů na Obrázcích 18 a 21.

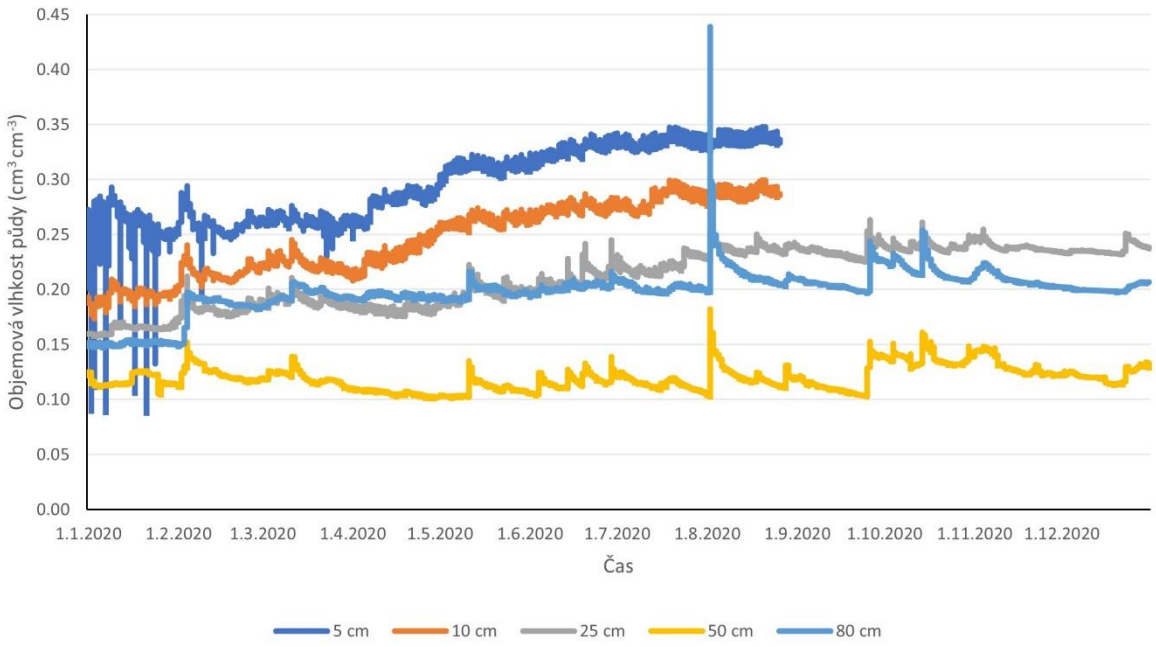



**Obrázek 21** Režim vlhkosti půdy pod povrchem mulčovací kůry

Režim vlhkosti půdy pod povrchem betonové dlažby lze vidět na Obrázku 22. V grafu lze pozorovat menší výkyvy vlhkosti než pod ostatními sledovanými povrchy. Podobně jako u ostatních povrchů byla nejnižší průměrná vlhkost půdy v hloubce 50 cm pod povrchem (0,12 $cm^3cm^{-3}$) a nejvyšší blíže k povrchu. Kvůli nekompletním datům z prvních dvou hloubek nelze s určitostí vyhodnotit, kde byla dosažena nejvyšší průměrná vlhkost půdy, ovšem z dostupných dat lze za nejvyšší považovat hloubku 5 cm. Maximální vlhkost pak byla

naměřena v hloubce 80 cm (0,44 $cm^3cm^{-3}$). Začátkem roku byly v hloubce 5 cm pod povrchem naměřeny teploty půdy pod bodem mrazu, které mohly ovlivnit měření vlhkosti půdy, protože senzory TMS-4 nejsou schopny správně měřit obsah vody v pevném stavu, tedy obsah vody zmrzlé v led.

Podle studie Kodešové a kol. (2014) byla pod povrchem betonové dlažby v porovnání s jinými povrchy naměřena nejmenší vlhkost půdy. Poměrné nízké hodnoty vlhkosti mohly být způsobeny malou schopností infiltrace povrchu betonové dlažby. Podle studie Morgenroth a Buchan (2009) ovšem byla pod povrchem zakrytým dlažbou zaznamenána výrazně větší vlhkost než pod povrchem holé půdy. Podle Morgenroth a Buchan (2009) byly tyto výsledky způsobeny bariérou v podobě dlažby, která zabraňovala výparu, naproti tomu holá půda žádnou bariéru neměla. Vlhkost pod dlažbou tak odtékala zpět do půdního profilu. Morgenroth a Buchan (2009) také studovali rozdíl mezi propustnou a nepropustnou dlažbou, kdy očekávali pod propustnou dlažbou větší míru infiltrace a výparu, ovšem výsledkem byly nečekaně velmi podobné hodnoty. Při našem výzkumu bylo možné pozorovat poměrně vysoké vlhkosti půdy pod betonovou dlažbou. Při výše zmíněných studiích tedy došlo k opačným výsledkům a náš experiment lépe koresponduje s výsledky Morgenroth a Buchan (2009). Důvodem vysoké vlhkosti půdy pod povrchem betonové dlažby tak mohla být nepropustnost betonového povrchu, které v případě studie Morgenroth a Buchan (2009) uzavřela vlhkost v půdě, naopak u studie Kodešové a kol. (2014) mohla být při zakládání měření vlhkost v půdě nízká a také zůstala nízkou po celou dobu jejich měření. Druhým důvodem vysoké vlhkosti půdy při našem experimentu by ale také mohly být mezery mezi betonovými dlaždicemi, přes které se ve vyšší míře mohla zasakovat voda. Dále bylo při studii Kodešové a kol. (2014) zjištěno, že v porovnání s dalšími povrchy (holou půdou, mulčovací kůrou a trávou) má betonová dlažba menší vlhkostní výkyvy. Morgenroth a Buchan (2009) pod povrchem dlažby také zaznamenali malé výkyvy vlhkosti v průběhu dne, které nepřesáhly 1 %. Podobné závěry lze vyvodit i z naší studie.

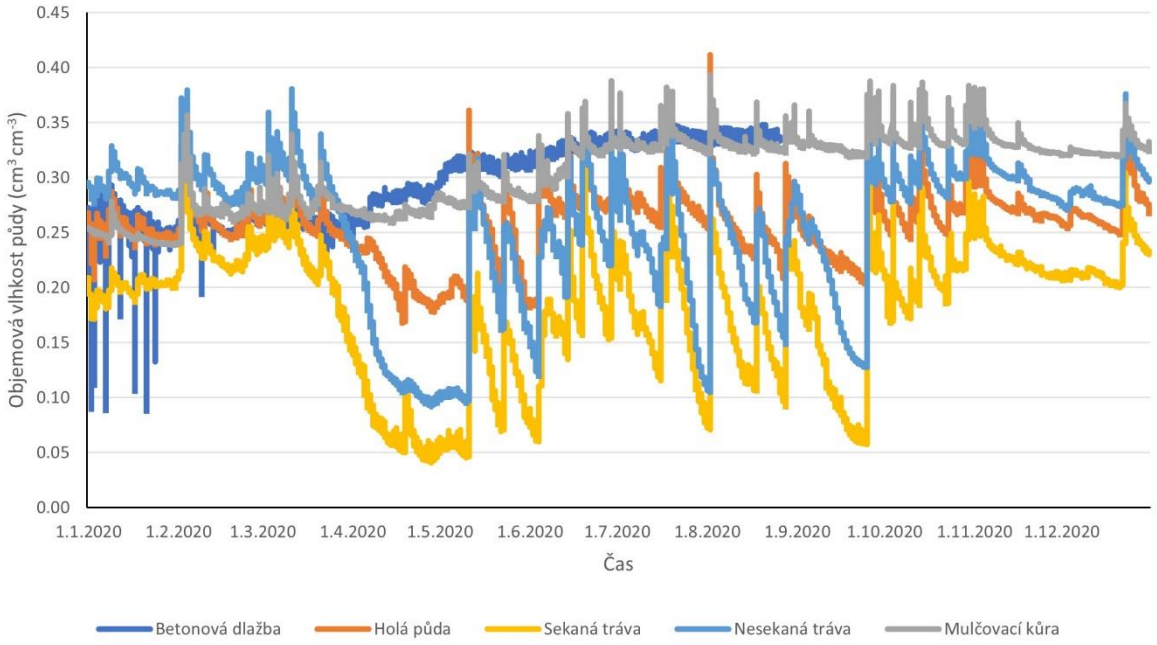



**Obrázek 22** Režim vlhkosti půdy pod povrchem betonové dlažby

Porovnat lze také vlhkosti půdy ve stejných hloubkách ale pod různými povrchy. Zdrojem vlhkosti v půdě nejsou pouze srážky, ale i podzemní voda. V půdách s nižší hladinou podzemní vody se podle Chen a Hu (2004) také snižuje její účinek na vlhkost půdy ve vyšších vrstvách, naopak v místech s vysokou hladinou podzemní vody, typicky v nížinách a v okolí větších řek, je tento vliv významný. Podle Chen a Hu (2004) může být do hloubky 1 metru rozdíl mezi vlhkostí půdy s vysokou a nízkou hladinou podzemní vody až 21 %. Výška hladiny podzemní vody také ovlivňuje míru výparu, transpirace a infiltrace. V porovnání půdy s vyšší a nižší hladinou podzemní vody je půda s vyšší hladinou vlhčí a také tudy prochází více infiltrované vody. V půdě s vyšší hladinou podzemní vody byla zaznamenána při studii Chen a Hu (2004) výrazně větší míra výparu.

V hloubce 5 cm pod povrchem (Obrázek 23) byly naměřeny největší výkyvy vlhkosti pod povrchy sekané a nesekané trávy, což lze připisovat, jak již bylo zmíněno, větší schopnosti infiltrace a evaporace travnatého povrchu. Naopak nejmenší výkyvy vlhkosti byly zaznamenány pod povrchem betonové dlažby.

Malé vlhkostní výkyvy pod betonovou dlažbou korespondují se studií Kodešové a kol. (2014). Podle Morgenroth a Buchan (2009) poskytla holá půda významně větší vlhkostní výkyvy než dlažba.

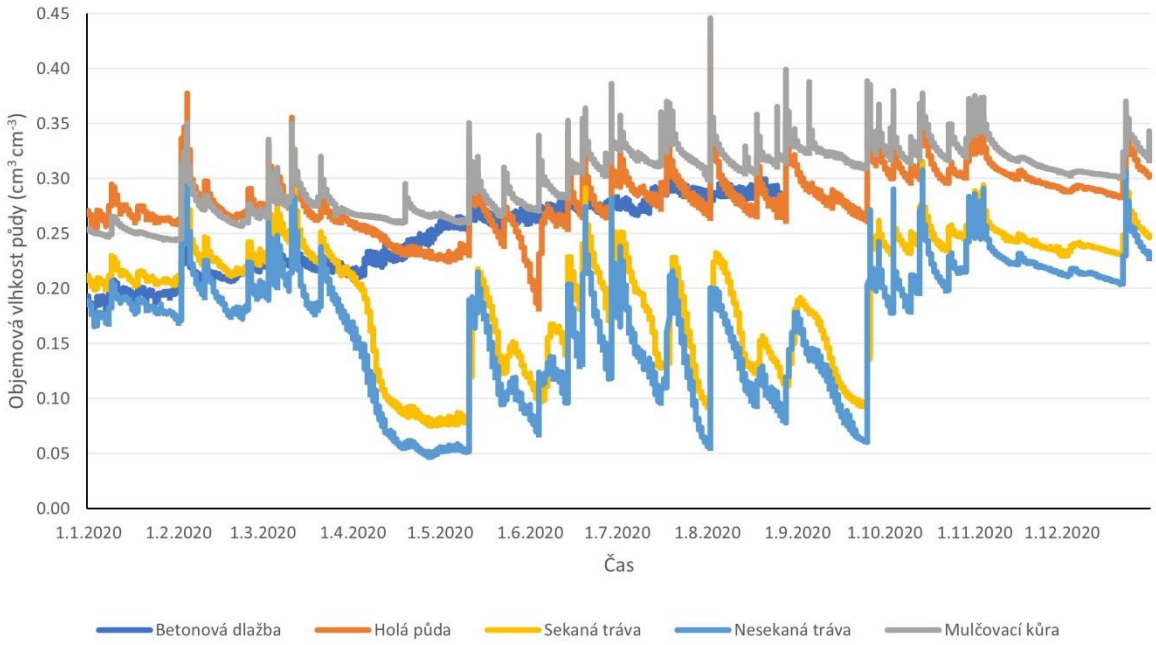



**Obrázek 23** Režim vlhkosti půdy v hloubce 5 cm pod povrchem

Režim vlhkosti půdy v hloubce 10 cm pod povrchem zobrazuje graf na Obrázku 24. Lze pozorovat mírnější oscilace vlhkosti půdy než v hloubce 5 cm pod povrchem, ovšem především pod povrchem sekané a nesekané trávy jsou stále velmi významné. Naopak pod povrchem betonové dlažby zůstává vlhkost půdy konstantní. Nejvyšší průměrná vlhkost půdy byla zaznamenána pod povrchem mulčovací kůry, a to 0,30 $cm^3cm^{-3}$. Maximální vlhkost půdy byla

naměřena pod povrchem mulčovací kůry, 0,45 $cm^3cm^{-3}$, což je také maximální naměřená vlhkost v průběhu celého měření.

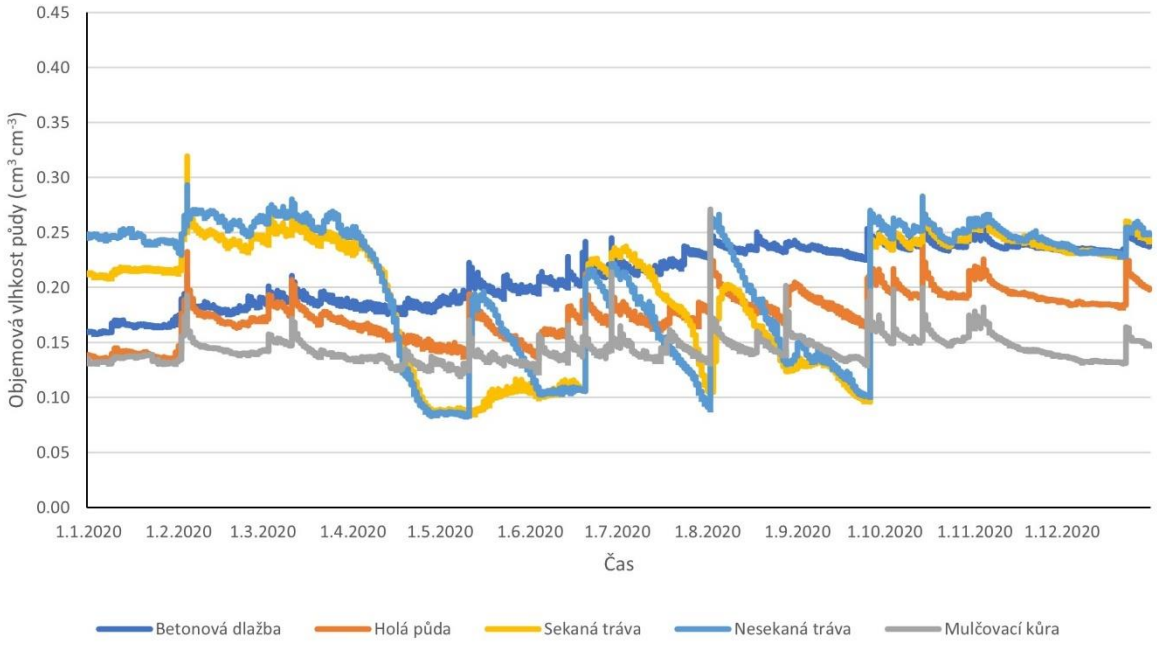
Kodešová a kol. (2014) ve své studii pozorovali nejmenší výkyvy půdní vlhkosti pod povrchem betonové dlažby, které byly způsobeny malou hodnotou výparu a vyšší mírou odtoku vody z betonového povrchu. Podobné závěry lze vyvodit také z našeho experimentu, kdy byly pod betonovým povrchem zaznamenány výrazně menší výkyvy vlhkosti v hloubce 10 cm pod povrchem než pod ostatními povrchy. Chang a kol. (2021) naměřili v povrchových vrstvách půdy (do 20 cm) velké vlhkostní výkyvy a také maximální naměřené hodnoty vlhkosti půdy, i při našem experimentu byla v hloubce 10 cm naměřena maximální vlhkost.




**Obrázek 24** Režim vlhkosti půdy b hloubce 10 cm pod povrchem

Režim půdní vlhkosti v hloubce 25 cm pod povrchem je zobrazen v grafu na Obrázku 25. Největší výkyvy obsahu vlhkosti lze zde pozorovat pod povrchy sekané a nesekané trávy, podobně jako v hloubkách blíže k povrchu. Průměrná vlhkost byla nejnižší pod povrchem mulčovací kůry, pouze 0,14 $cm^3cm^{-3}$, naopak nejvyšší byla pod povrchem betonové dlažby (0,21 $cm^3cm^{-3}$). Z dosavadních poznatků z literární rešerše by měly být hodnoty obou povrchů spíše opačné. Důvodem takto nízké vlhkosti může být zachycení vyššího množství infiltrované vody blíže k povrchu mulčovací kůry, která se tak nedostala až do hloubky 25 cm.

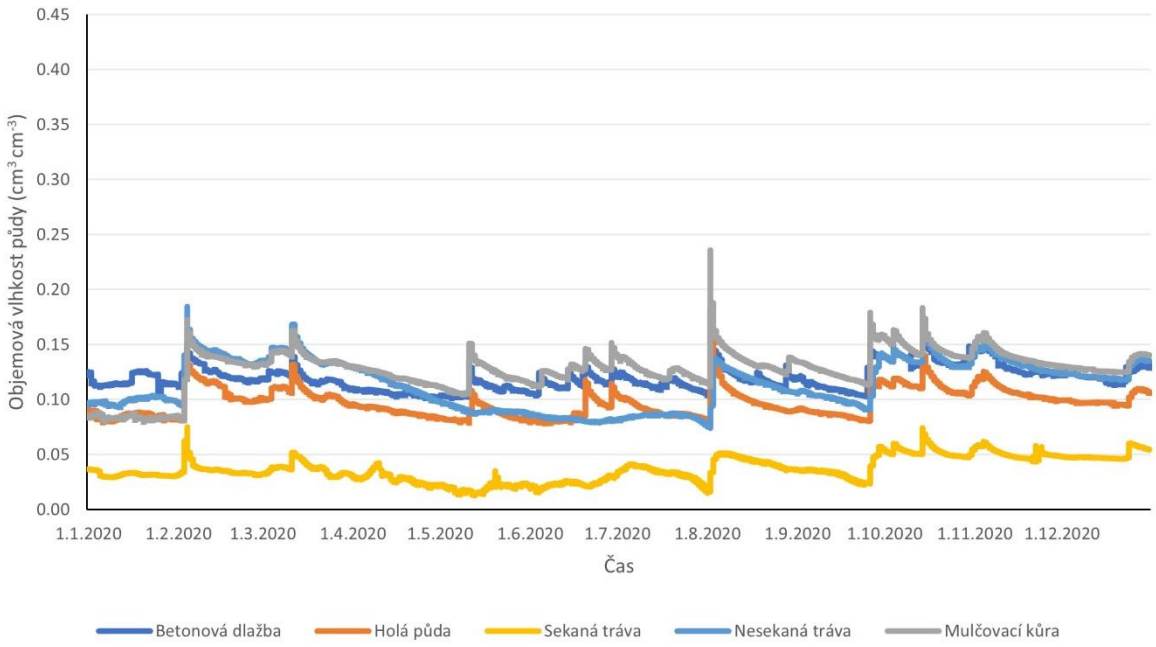
Podle Kodešové a kol. (2014) a Chang a kol. (2021) se s rostoucí hloubkou snižují výkyvy vlhkosti. Podle Chang a kol. (2021) se s rostoucí hloubkou také snižuje vlhkost půdy. Snížení vlhkostních výkyvů i postupné snižování půdní vlhkosti lze poměrně dobře pozorovat také při našem experimentu.




**Obrázek 25** Režim vlhkosti půdy v hloubce 25 cm pod povrchem

V hloubce 50 cm pod povrchem (Obrázek 26) byly zaznamenány nejnižší vlhkosti ze všech sledovaných hloubek. Pod všemi povrchy byly zaznamenány průměrné vlhkosti mezi 0,037 $cm^3cm^{-3}$ a 0,13 $cm^3cm^{-3}$. Nejnižší průměrná vlhkost byla zaznamenána pod povrchem sekané trávy a nepřekročila 0,075 $cm^3cm^{-3}$, pod povrchem mulčovací kůry pak byly průměrné hodnoty nejvyšší (0,13 $cm^3cm^{-3}$). Důvodem nízkých vlhkostí půdy může být, podobně jako u povrchu mulčovací kůry v hloubce 25 cm, větší množství zachycené vody blíže k povrchu. Výrazné změny oproti hloubkám blíže k povrchu byly zaznamenány pod travnatými povrchy, kde došlo k výraznému snížení vlhkostních oscilací.

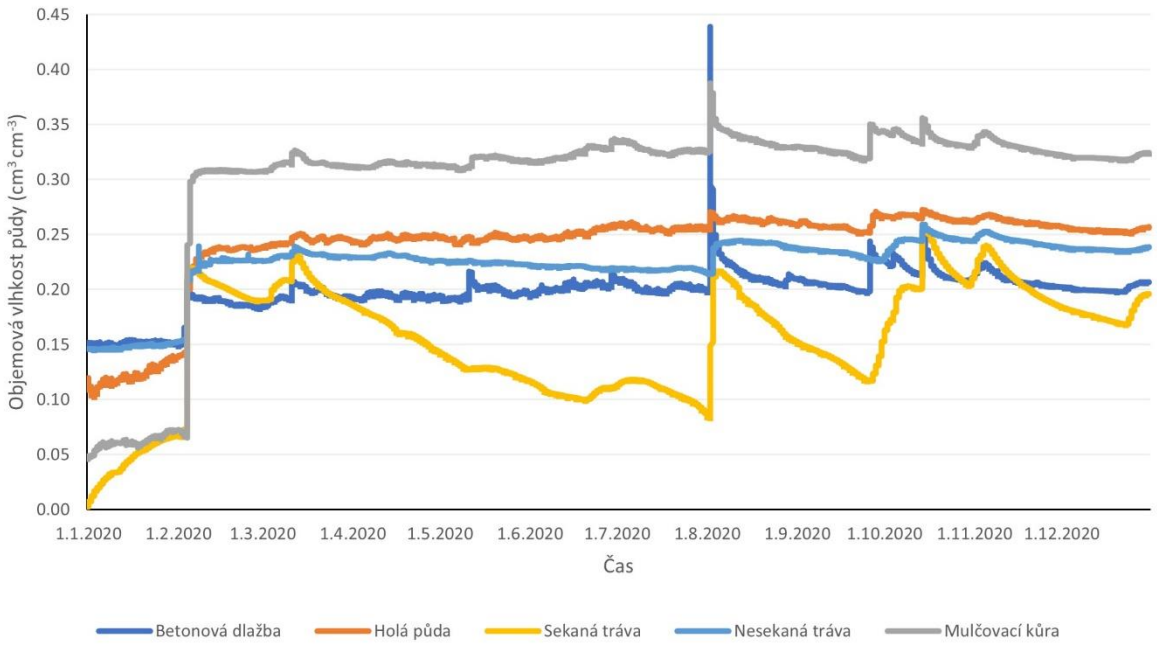
Podle studie Song a kol. (2013) byl měla být pod povrchem sekané trávy nižší vlhkost než pod povrchem nesekané trávy, což lze velmi dobře vidět také na datech naměřených v hloubce 50 cm, kdy byla pod povrchem sekané trávy zaznamenána pouze minimální vlhkost v porovnání s povrchem nesekané trávy, ale i ostatními sledovanými povrchy. Podobně jako při studii Chang a kol. (2021) lze pozorovat postupné snižování vlhkosti půdy s rostoucí hloubkou i snižování vlhkostních oscilací.




**Obrázek 26** Režim vlhkosti půdy v hloubce 50 cm pod povrchem

Režim vlhkosti půdy v hloubce 80 cm pod povrchem lze vidět na Obrázku 27. V porovnání s 50 cm hloubkou zde došlo k nárůstu vlhkosti pod všemi povrchy. Nejvyšší průměrná vlhkost byla naměřena pod povrchem mulčovací kůry, která dosáhla na hodnotu 0,30 $cm^3cm^{-3}$, nejnižší průměrná vlhkost pak byla naměřena pod povrchem sekané trávy, a to 0,15 $cm^3cm^{-3}$. Maximální vlhkost 0,44 $cm^3cm^{-3}$ byla naměřena pod povrchem betonové dlažby a tato hodnota se přiblížila hodnotě pórovitosti této hloubky (47,0 %), půda se tedy blížila své maximální vodní kapacitě. Lze také pozorovat již velmi konstantní vlhkost pod všemi povrchy, kromě sekané trávy, kde vlhkost oscilovala naopak výrazně více než v předešlé hloubce 50 cm pod povrchem.

Kodešová a kol. (2014) a Chang a kol. (2021) zaznamenali ve své studii postupně se snižující výkyvy vlhkosti půdy s rostoucí hloubkou. Podobné výsledky byly zaznamenány také při našem experimentu, kdy se výkyvy vlhkosti půdy ve větších hloubkách snižovaly, ovšem vyskytly se zde také odlišnosti, například v případě sekané trávy v hloubce 80 cm pod povrchem. Chang a kol. (2021) dále při své studii zaznamenali postupné snižování vlhkosti s rostoucí hloubkou. Také při našem experimentu se postupně pod všemi povrchy snižovala vlhkost půdy, kromě 80 cm hloubky, kde naopak vlhkost skokově vzrostla. Rychlý nárůst vlhkosti byl pravděpodobně způsoben především jílovitým prostředím, které zabraňuje odtoku vody z půdního profilu, zanedbatelným výparem a také blízkostí hladiny podzemní vody.




**Obrázek 27** Režim vlhkosti půdy v hloubce 80 cm pod povrchem

Naměřená vlhkostní data byla většinou srovnatelná s dostupnými studiemi, ovšem povrchy betonové dlažby a mulčovací kůry vykázaly některé rozdílnosti. Rozdílnosti se týkaly průměrné vlhkosti půdy pod betonovou dlažbou, která byla ve všech hloubkách naměřena vyšší, než při studii Kodešové a kol. (2014), ovšem korespondovala se studií Morgenroth a Buchan (2009). Pod povrchem mulčovací kůry v hloubce 25 cm byla zaznamenána nečekaně nízká vlhkost půdy, která mohla být způsobena větším množstvím vody zadržované blíže k povrchu. Další rozdílnosti se týkaly hloubky 80 cm pod povrchem, kde skokově vzrostla vlhkost půdy pod všemi povrchy. Důvodem takto vysokého nárůstu vlhkosti byla pravděpodobně blízkost hladiny podzemní vody.

Maximální a minimální naměřené hodnoty vlhkosti pod všemi povrchy a ve všech hloubkách lze vidět v Tabulce 15.

**Tabulka 15** Maximální a minimální naměřená vlhkost ($cm^3cm^{-3}$)

| | **5 cm** | **10 cm** | **25 cm** | **50 cm** | **80 cm** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Holá půda** | 0,17 | 0,18 | 0,13 | 0,079 | 0,10 |
| | 0,41 | 0,43 | 0,26 | 0,18 | 0,27 |
| **Sekaná tráva** | 0,041 | 0,075 | 0,085 | 0,013 | 0,0022 |
| | 0,33 | 0,34 | 0,32 | 0,075 | 0,26 |
| **Nesekaná tráva** | 0,092 | 0,047 | 0,083 | 0,074 | 0,15 |
| | 0,39 | 0,31 | 0,29 | 0,18 | 0,26 |
| **Mulčovací kůra** | 0,24 | 0,24 | 0,12 | 0,080 | 0,046 |
| | 0,39 | 0,42 | 0,24 | 0,24 | 0,39 |
| **Betonová dlažba** | 0,089 | 0,17 | 0,16 | 0,10 | 0,15 |
| | 0,35 | 0,30 | 0,26 | 0,18 | 0,44 |

# 6 Závěr

Cílem práce bylo popsat režim vlhkosti a teploty půdy pod různými povrchy a v různých hloubkách.

Na experimentální lokalitě v Semicích, nedaleko Lysé nad Labem, byly odebrány porušené a neporušené vzorky ze tří horizontů. Z odebraných neporušených a porušených vzorků půdy byly stanoveny základní fyzikální a chemické vlastnosti půdy. Dále byla na porušených vzorcích půdy provedena kalibrace senzorů TMS-4, které byly použity pro měření teploty a vlhkosti půdy na experimentální lokalitě.

Půda na experimentální lokalitě byla v mělčích horizontech písčitá, v nejhlubším studovaném horizontu pak s vyšším obsahem jílu, což mělo významný vliv zejména na vlhkost půdy v tomto horizontu.

Byl pozorován vliv různé úpravy půdního povrchu na teplotní režim půd ve všech pozorovaných hloubkách, přičemž tento vliv se s rostoucí hloubkou snižoval. Nejvyšší maximální teploty byly zaznamenány v hloubce 5 cm pod povrchem betonové dlažby, postupně se snižovaly pod povrchem holé půdy, sekané trávy, nesekané trávy a vůbec nejnižší maximální teploty byly zaznamenány pod povrchem mulčovací kůry. Nejvhodnějším pro udržování stálých teplot se tedy ukázal být povrch mulčovací kůry, který zaznamenal nejmenší výkyvy teplot mezi dnem i nocí a také mezi letním a zimním obdobím. Největší teplotní oscilace byly zaznamenány pod povrchem betonové dlažby. Teplotní oscilace se snižovaly s rostoucí hloubkou pod všemi studovanými povrchy. Všechna naměřená teplotní data byla porovnána s dostupnými studiemi jiných autorů a odchylky se vyskytovaly jen zřídka.

Dále byl studován vliv půdního povrchu a hloubky na vlhkost půdy. Bylo zjištěno, že různé povrchy ovlivňují vlhkost půdy bezprostředně pod povrchem i do vyšších hloubek. Vlhkost půdy se s rostoucí hloubkou snižovala a pod všemi povrchy v hloubce 80 cm skokově vzrostla. V mělčích hloubkách zůstávala nejvyšší průměrná vlhkost pod povrchem mulčovací kůry, která se ovšem v hloubce 25 cm výrazně snížila a byla naopak nejnižší. Vlhkostí oscilace se s rostoucí hloubkou pod všemi povrchy ve většině případů snižovaly. Největší vlhkostní oscilace byly naměřeny pod povrchem sekané a nesekané trávy, nejnižší pak pod povrchem betonové dlažby. Naměřená data byla v diskusi porovnána s dostupnými studiemi. Povrch betonové dlažby poskytl velmi vysoké hodnoty vlhkosti ve všech sledovaných hloubkách, což bylo v rozporu se studií Kodešové a kol. (2014), ovšem ve shodě se studií Morgenroth a Buchan (2009). Mulčovací kůra poskytla v hloubce 25 cm naopak výrazně menší vlhkost, než pozorovali například Kader a kol. (2017a).

Naměřená data mohou být dále použita pro modelování transportu tepla a vodního režimu pomocí složitějších modelovacích programů, například HYDRUS 1D a HYDRUS 2/3D.

# 7 Literatura


- Bičík I a kol., Hauptman I, Kukal Z a Pošmourný K, ed., 2009. *Půda v České republice*. Praha: Consult. ISBN 80-903482-4-6.
- Blažek V a kol., Němec J a Hladný J ed., 2006. *Voda v České republice*. Praha: Consult. ISBN 80-903482-1-1.
- Corwin D.L. a Lesch S.M., 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. **46**(1-3), 11-43. ISSN 01681699. DOI:10.1016/j.compag.2004.10.005
- Demek J a kol., 2006. *Hory a nížiny: Zeměpisný lexikon ČR*. 2. upravené vydání. Brno: MŽP ČR. ISBN 80-86064-99-9.
- Dobriyal P, Qureshi A, Badola R a 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. ISSN 00221694. DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.06.021
- EKatalog BPEJ - 2.21.10. *EKatalog BPEJ* [online]. [cit. 2021-01-29]. Dostupné z: https://bpej.vumop.cz/22110
- Fér M, Kodešová R, Hroníková S a Nikodem A, 2020. The effect of 12-year ecological farming on the soil hydraulic properties and repellency index. *Biologia*. **75**(6), 799-807. ISSN 0006-3088. DOI:10.2478/s11756-019-00373-1
- Chang Y, Zhang R, Hai Ch a Zhang L, 2021. Seasonal variation in soil temperature and moisture of a desert steppe environment: a case study from Xilamuren, Inner Mongolia. *Environmental Earth Sciences*. **80**(7). ISSN 1866-6280. DOI:10.1007/s12665-021-09393-0
- Chen X a Hu Q, 2004. Groundwater influences on soil moisture and surface evaporation. *Journal of Hydrology*. **297**(1-4), 285-300. ISSN 00221694. DOI:10.1016/j.jhydrol.2004.04.019
- Javůrek M a Vach M, 2008. Negativní vlivy zhutnění půd a soustava opatření k jejich odstranění. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby. ISBN 978-80-87011-57-7.
- Jordán A, Zavala L.M. a Gil J, 2010. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *CATENA*. **81**(1), 77-85. ISSN 03418162. DOI:10.1016/j.catena.2010.01.007
- Kader M.A., Senge M, Mojid M.A. a Ito K, 2017. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil and Tillage Research*. **168**, 155-166. ISSN 01671987. DOI:10.1016/j.still.2017.01.001
- Kader M.A., Senge M, Mojid M.A. a Nakamura K, 2017. Mulching type-induced soil moisture and temperature regimes and water use efficiency of soybean under rain-fed condition in central Japan. *International Soil and Water Conservation Research*. **5**(4), 302-308. ISSN 20956339. DOI:10.1016/j.iswcr.2017.08.001
- Kodešová R, Fér M, Klement A, Nikodem A, Teplá D, Neuberger P a Bureš P, 2014. Impact of various surface covers on water and thermal regime of Technosol. *Journal of Hydrology*. **519**, 2272-2288. ISSN 00221694. DOI:10.1016/j.jhydrol.2014.10.035

- Kodešová R, Vlasáková M, Fár M, Teplá D, Jakšík O, Neuberger P a Adamovský R, 2013. Thermal Properties of Representative Soils of the Czech Republic. *Soil Water Res*. **8**, 141-150.
- Kodešová R, Jakšík O, Klement A, Fér M, Nikodem A a Brodský L, 2015. Metodika lokálního monitoringu půdních vlhkostí na zemědělských pozemcích ohrožených suchem. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, katedra pedologie a ochrany půd. ISBN 978-80-213-2547-0.
- *Koncepce ochrany před následky sucha pro území České republiky. SUCHO V KRAJINĚ.* s. 6-11 [cit. 2021-01-29]. Dostupné z: http://suchovkrajine.cz/sites/default/files/podklad/koncepce_sucho.pdf
- Ložek V a kol, 2005. *Střední Čechy*. XIII. Praha: Agentura ochrany přírody a krajiny ČR a EkoCentrum Brno. Chráněná území ČR. ISBN 80-86064-87-5.
- Montenegro A.A.A., Abrantes J.R.C.B., de Lima J.L.M.P., Singh V.P. a Santos T.E.M., 2013. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *CATENA*. **109**, 139-149. ISSN 03418162. DOI:10.1016/j.catena.2013.03.018
- Morgenroth J a Buchan G.D., 2009. Soil Moisture and Aeration Beneath Pervious and Impervious Pavements. *Arboriculture & Urban Forestry*. **35**(3), 135–141.
- Morvan X., Verbeke L, Laratte S a Schneider A.R., 2018. Impact of recent conversion to organic farming on physical properties and their consequences on runoff, erosion and crusting in a silty soil. *CATENA*. **165**, 398-407. ISSN 03418162. DOI:10.1016/j.catena.2018.02.024
- Mulumba L.N. a Lal R, 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil and Tillage Research*. **98**(1), 106-111. ISSN 01671987. DOI:10.1016/j.still.2007.10.011
- Pavlů L, 2018. *Základy pedologie a ochrany půdy*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2876-1.
- Pavlů L, Kodešová R, Fér M, Nikodem A, Němec F a Prokeš R, 2021. The impact of various mulch types on soil properties controlling water regime of the Haplic Fluvisol. *Soil and Tillage Research*. **205**. ISSN 01671987. DOI:10.1016/j.still.2020.104748
- Rowlandson T.L., Berg A.A., Bullock P.R., Hanis-Gervais K, E. Ojo R, Cosh M.H., Powers J a McNairn H, 2018. Temporal transferability of soil moisture calibration equations. *Journal of Hydrology*. **556**, 349-358. ISSN 00221694. DOI:10.1016/j.jhydrol.2017.11.023
- Sáňka M a Materna J, 2014. Indikátory kvality zemědělských a lesních půd ČR. *Edice PLANETA*. 2004, **XII**(11/2004). ISSN 1213-3393.
- Sáňka M, Vácha R, Poláková Š a Fiala P, 2018. *Kritéria pro hodnocení produkčních a ekologických vlastností půd*. Praha: Ministerstvo životního prostředí. ISBN 978-80-7212-627-9.
- Scalenghe R, 2009. The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning*. **90**(1-2), 1-10. ISSN 01692046. DOI:10.1016/j.landurbplan.2008.10.011

- Song Y, Zhou D, Zhang H, Li G, Jin Y a Li Q. Effects of vegetation height and density on soil temperature variations. *Chinese Science Bulletin*. 2013, **58**(8), 907-912. ISSN 1001-6538. DOI:10.1007/s11434-012-5596-y
- Šarapatka B, 2014. *Pedologie a ochrana půd*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. ISBN 978-80-244-3736-1.
- *TMS-4*. Praha: TOMST [cit. 2021-01-30]. Dostupné z: https://tomst.com/web/cz/systemy/tms/tms-4/
- TOMST Measurement System TMS: manuál. *TMS dataloggery*. Praha [cit. 2021-01-30]. Dostupné z: https://tomst.com/web/wp-content/uploads/2019/08/TMS_manual_czech_ver-3.pdf
- Územní teploty 2020. *Portál ČHMÚ*. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty#
- Vráblíková J a Vráblík P, 2006. *Základy pedologie*. Ústí nad Labem: Fakulta životního prostředí UJEP. ISBN 80-7044-805-9.
- Warner H, 2002. Measuring Soil Moisture for Irrigation Water Management.
- Wild J, Kopecký M, Macek M, Šanda M, Jankovec J a 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. ISSN 01681923. DOI:10.1016/j.agrformet.2018.12.018
- Zbíral J, 2002. *Analýza půd I – Jednotné pracovní postupy*. Brno: ÚKZÚZ.
- Zhang J, Li Y, Yang T, Liu D, Liu X a Jiang N, 2021. Spatiotemporal variation of moisture in rooted-soil. *CATENA*. **200**. ISSN 03418162. DOI:10.1016/j.catena.2021.105144

# 8 Seznam obrázků

**Obrázek 1** Trojúhelníkový diagram klasifikace půdních druhů podle USDA (Pavlů 2018) ....6
**Obrázek 2** Umístění senzorů na lokalitě v Semicích (geoportal.gov.cz) ....17
**Obrázek 3** Popis jednotlivých částí „standardního“ senzoru TMS-4 (TOMST Measurement System TMS) ....22
**Obrázek 4** Senzor TMS-4 s kabelem (Wild a kol. 2019) ....23
**Obrázek 5** Instalace senzorů na experimentální lokalitě (autor Miroslav Fér) ....23
**Obrázek 6** Senzory instalované na experimentální lokalitě (autor Miroslav Fér) ....24
**Obrázek 7** Půdní profil na experimentální lokalitě (autor Miroslav Fér) ....24
**Obrázek 8** Režim teplot půdy pod povrchem holé půdy ....30
**Obrázek 9** Režim teplot půdy pod povrchem sekané trávy ....31
**Obrázek 10** Režim teplot půdy pod povrchem nesekané trávy ....31
**Obrázek 11** Režim teplot půdy pod povrchem mulčovací kůry ....32
**Obrázek 12** Režim teplot půdy pod povrchem betonové dlažby ....33
**Obrázek 13** Režim teplot půdy v hloubce 5 cm pod povrchem ....34
**Obrázek 14** Režim teplot půdy v hloubce 10 cm pod povrchem ....35
**Obrázek 15** Režim teplot půdy v hloubce 25 cm pod povrchem ....36
**Obrázek 16** Režim teplot půdy v hloubce 50 cm pod povrchem ....37
**Obrázek 17** Režim teplot půdy v hloubce 80 cm pod povrchem ....38
**Obrázek 18** Režim vlhkosti půdy pod povrchem holé půdy ....39
**Obrázek 19** Režim vlhkosti půdy pod povrchem sekané trávy ....41
**Obrázek 20** Režim vlhkosti půdy pod povrchem nesekané trávy ....41
**Obrázek 21** Režim vlhkosti půdy pod povrchem mulčovací kůry ....42
**Obrázek 22** Režim vlhkosti půdy pod povrchem betonové dlažby ....43
**Obrázek 23** Režim vlhkosti půdy v hloubce 5 cm pod povrchem ....44
**Obrázek 24** Režim vlhkosti půdy b hloubce 10 cm pod povrchem ....45
**Obrázek 25** Režim vlhkosti půdy v hloubce 25 cm pod povrchem ....46
**Obrázek 26** Režim vlhkosti půdy v hloubce 50 cm pod povrchem ....47
**Obrázek 27** Režim vlhkosti půdy v hloubce 80 cm pod povrchem ....48

# 9 Seznam tabulek

**Tabulka 1** Rozdělení zrnitostních kategorií a frakcí (upraveno podle Pavlů 2018) .....5
**Tabulka 2** Rozdělení půdních druhů Novákovou klasifikací (upraveno podle Sáňky a kol. 2018; Pavlů 2018) .....6
**Tabulka 3** Hodnotící tabulka pro $pH_{H2O}$ (Zbíral 2002) .....20
**Tabulka 4** Hodnotící tabulka pro $pH_{KCL}$ (Zbíral 2002) .....20
**Tabulka 5** Hodnotící tabulka pro salinitu (Zbíral 2002) .....20
**Tabulka 6** Hodnotící tabulka pro obsah humusu a organického uhlíku (Zbíral 2002) .....21
**Tabulka 7** Naměřené hodnoty objemové hmotnosti, pórovitosti a specifické hmotnosti vzorků .....26
**Tabulka 8** Naměřené hodnoty zrnitostních frakcí v % .....27
**Tabulka 9** Obsah fyzikálního jílu ve vzorcích .....27
**Tabulka 10** Rozdělení půdních druhů dle Novákovy klasifikace .....27
**Tabulka 11** Naměřené hodnoty pH, salinity, kvality humusu a obsahu organického uhlíku .....28
**Tabulka 12** Kalibrační rovnice kalibrovaných senzorů .....28
**Tabulka 13** Parametry kalibračních rovnic pro jednotlivé horizonty .....29
**Tabulka 14** Maximální a minimální naměřené teploty (°C) .....38
**Tabulka 15** Maximální a minimální naměřená vlhkost ($cm^3cm^{-3}$) .....49

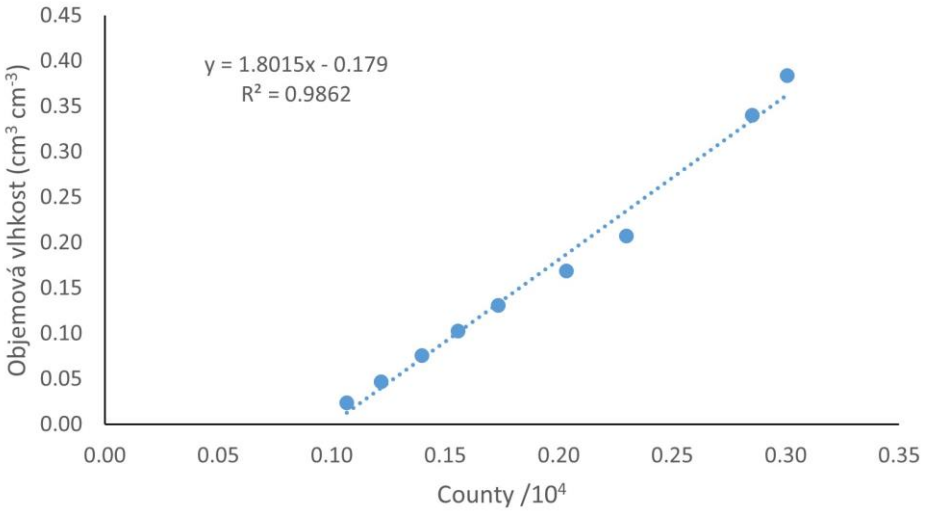
# 10 Seznam použitých zkratek a symbolů

° C – stupně Celsia
µS/cm – jednotka salinity půdy (mikroSiemens na centimetr)
atd. – a tak dále
BPEJ – bonitovaná půdně ekologická jednotka
C:N – poměr uhlíku a dusíku ve vzorku
cm – centimetr
$cm^3$ – centimetr krychlový
$cm^3cm^{-3}$ – jednotka vlhkosti (centimetr krychlový na centimetr krychlový)
Cox – stanovení obsahu organického uhlíku
ČR – Česká republika
DPZ – dálkový průzkum Země
fyz. jíl – fyzikální jíl
g – gram
I. Z. k. – první zrnitostní kategorie
II. Z. k. – druhá zrnitostní kategorie
III. Z. k. – třetí zrnitostní kategorie
IV. Z. k. – čtvrtá zrnitostní kategorie
KCL – chlorid draselný
KPOP – katedra pedologie a ochrany půdy
m n.m. – metrů nad mořem
ml – mililitr
P – pórovitost půdy
pH – jednotka půdní reakce
Q4/6 – stanovení kvality humusu (barevného kvocientu)
tzv – takzvaný
USDA - U.S. Department of Agriculture
$\theta$ – objemová vlhkost půdy
$\lambda$ – vlnová délka
$\rho_d$ – objemová hmotnost půdy [$g/cm^3$]
$\rho_z$ – měrná (specifická) hmotnost zeminy [$g/cm^3$]

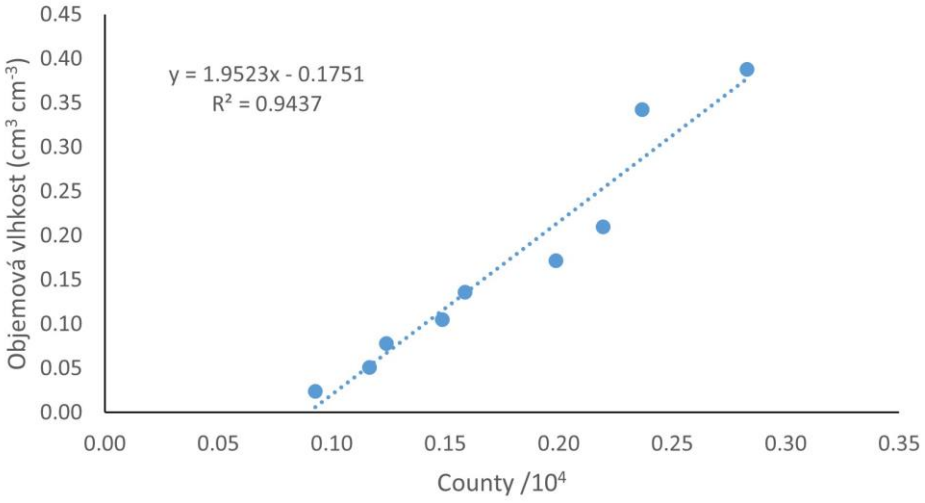
# 11 Samostatné přílohy

## 11.1 Příloha I

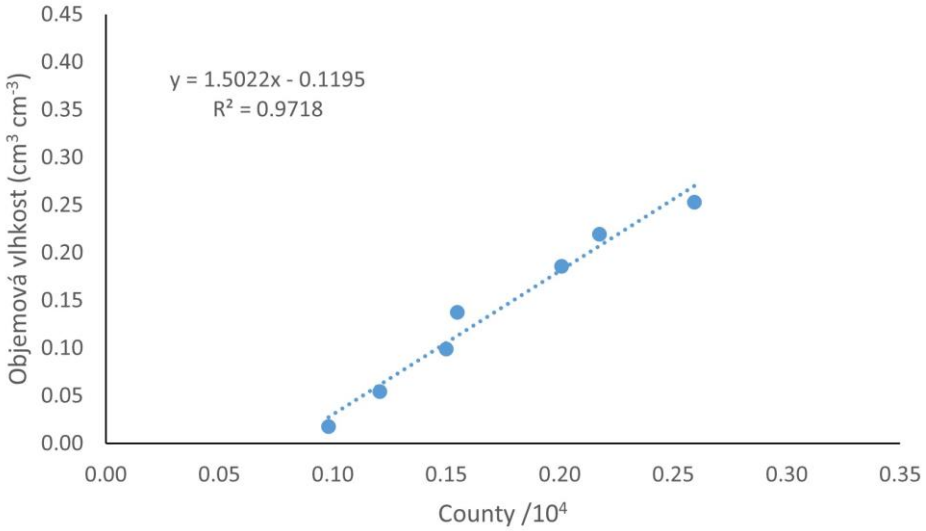
Grafy závislosti objemové vlhkosti půdy a Countů naměřených pomocí senzorů TMS-4, spolu s jejich kalibračními rovnicemi lze vidět na Obrázcích 1, 2, 3, 4, 5 a 6.



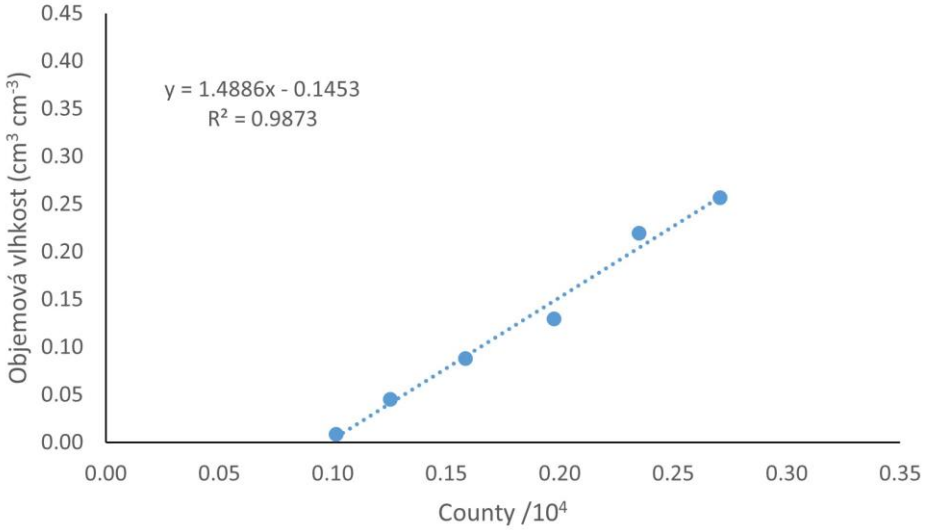

Obrázek 1 Graf závislosti objemové vlhkosti půdy a Countů v horizontu S1a



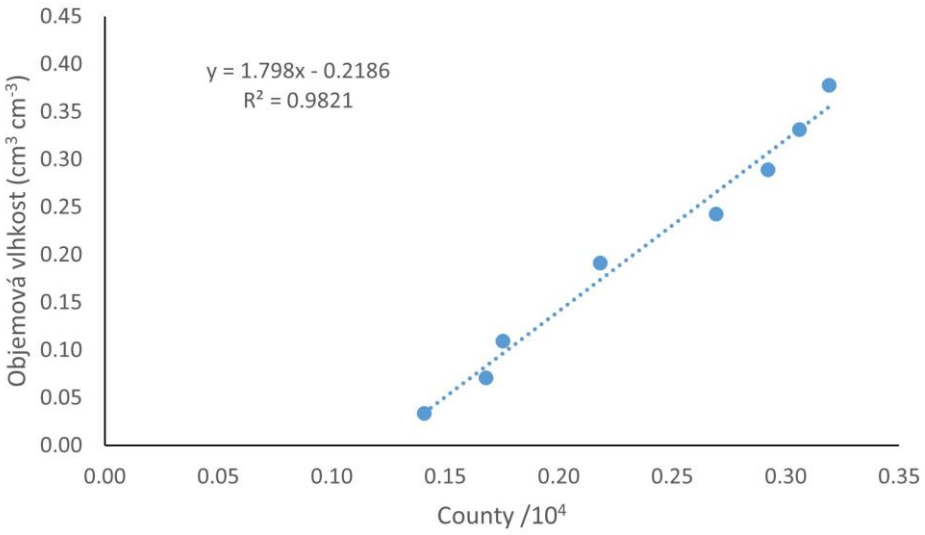

Obrázek 2 Graf závislosti objemové vlhkosti půdy a Countů v horizontu S1b



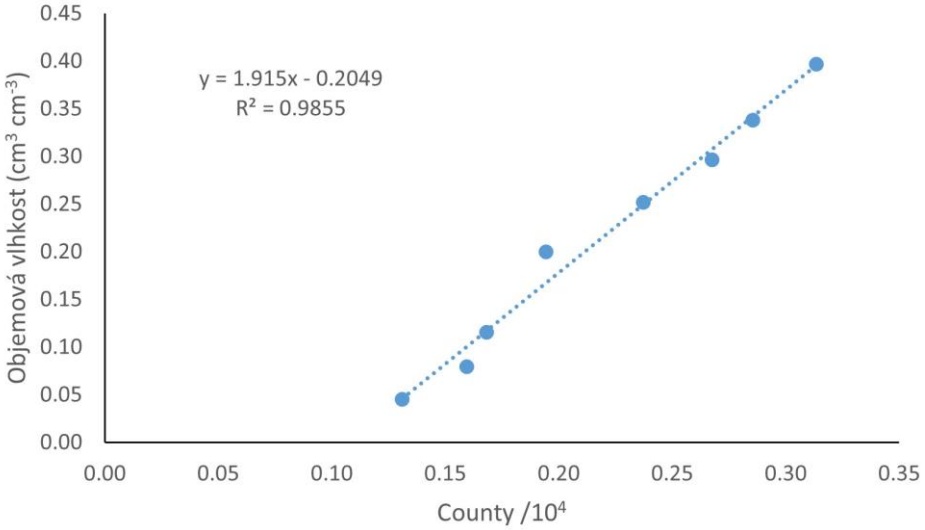

Obrázek 3 Graf závislosti objemové vlhkosti půdy a Countů v horizontu S2a




Obrázek 4 Graf závislosti objemové vlhkosti půdy a Countů v horizontu S2b




Obrázek 5 Graf závislosti objemové vlhkosti půdy a Countů v horizontu S3a




Obrázek 6 Graf závislosti objemové vlhkosti půdy a Countů v horizontu S3b