

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ



VLIV REGULOVANÉ DRENÁŽE NA VLHKOSTNÍ REŽIM
ZEMĚDĚLSKÉ PŮDY NA LOKALITĚ AMÁLIE V PRŮBĚHU
VEGETAČNÍ SEZÓNY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

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

Bakalant: Jakub Machuta

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jakub Machuta

Vodní hospodářství

Název práce

Vliv regulované drenáže na vlhkostní režim zemědělské půdy na lokalitě Amálie v průběhu vegetační sezóny

Název anglicky

Effect of controlled tile drainage on the moisture regime of arable soil at the Amálie location during the growing season

Cíle práce

Hlavním cílem je vyhodnotit vliv regulované drenáže na lokalitě Amálie na vlhkostní režim půdy v průběhu první monitorované vegetační sezóny. Dílčím cílem je založení kontinuálního monitoringu půdní vlhkosti v různých hloubkách pod povrchem pomocí autonomních mikroklimatických stanic TMS Tomst.

Metodika

Provést podrobnou literární rešerši se zaměřením na hydrologické funkce systému regulované drenáže v kontextu klimatické změny. Na základě rešerše také charakterizovat základní hydro-fyzikální vlastnosti půdy (zejména půdní vlhkost, objemová hmotnost, zrnitost) a možnosti jejich stanovení.

V praktické části se podílet na založení kontinuálního monitoringu vlhkosti v půdním profilu (v hloubkách 20, 40 a 60 cm pod povrchem) na půdě odvodněné regulovanou drenáží a na blízké kontrolní půdě bez regulace s využitím zakopávacích kabelových stanic TMS TOMST. Následně v místě osazení senzory také odebrat půdní vzorky pro referenční stanovení objemové vlhkosti, objemové hmotnosti půdy a zrnitosti. Následně vyhodnotit data půdních vlhkostí za období celého monitoringu a stanovit vliv regulované drenáže na vlhkostní režim.

Doporučený rozsah práce

35 stran

Klíčová slova

odvodňování půdy, regulace drenážního odtoku, půdní vlhkost, vodní režim, chytrá krajina

Doporučené zdroje informací

DuEová, R., Poláková, L., Lukas, V., Fučík, P., 2022. The Effect of Controlled Tile Drainage on Growth and Grain Yield of Spring Barley as Detected by UAV Images, Yield Map and Soil Moisture Content. Remote Sens (Basel) 14. <https://doi.org/10.3390/RS14194959>

Isomäki, K., Salla, A., Salo, H., Koivusalo, H., 2024. Hydrological effects of open ditch damming and controlled subsurface drainage in a Nordic agricultural field. Hydrology Research. <https://doi.org/10.2166/NH.2024.053>

Salo, H., Salla, A., Koivusalo, H., 2021. Seasonal effects of controlled drainage on field water balance and groundwater levels. Hydrology Research 52, 1633–1647. <https://doi.org/10.2166/NH.2021.056>

Youssef, M.A., Strock, J., Bagheri, E., Reinhart, B.D., Abendroth, L.J., Chighladze, G., Ghane, E., Shedekar, V., Norman, N.R., Frankenberger, J.R., Helmers, M.J., Dan, D.B., Kladivko, E., Negm, L., Nelson, K., Pease, L., 2023. Impact of controlled drainage on corn yield under varying precipitation patterns: A synthesis of studies across the U.S. Midwest and Southeast. Agric Water Manag 275, 107993. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107993>

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Konzultant

Ing. Martin Kovář

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2024

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2024

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 17. 03. 2024

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Vliv regulované drenáže na vlhkostní režim zemědělské půdy na lokalitě Amálie v průběhu vegetační sezóny vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

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

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne

.....

Machuta Jakub

Poděkování

Mnohokrát děkuji Ing. Lukášovi Jačkovi, Ph.D. za vřelý a vstřícný přístup jak v terénu tak při konzultacích. Rovněž velice děkuji za odborné vedení a nepostradatelné rady při zpracování bakalářské práce.

Dále upřímně děkuji Ing. Martinu Kovářovi za vynikající podporu, cenné rady, postřehy a především trpělivost a povzbuzení během všech činností souvisejících s touto bakalářskou prací.

Další mé vřelé díky patří Ing. Martinovi Kovářovi a Heleně Chalupecké za týmovou práci v terénu a pomoc při laboratorních měřeních.

Abstrakt

Obsahem této bakalářské práce je porovnání vlivu regulované a neregulované drenáže na vlhkost zemědělské půdy na lokalitě Amálie během vegetační sezóny 2023. Na Amálii byl proveden kontinuální monitoring půdních vlhkostí v hloubkách 20, 40 a 60 cm pod povrchem půdy. Měření probíhala na dvou vybraných lokalitách. První byla umístěna na téměř rovinném terénu (sklon pod 1 %) a druhá na svahu (sklon okolo 5 %). Na obou lokalitách byly umístěny části s regulovanými i neregulovanými drenážemi a vyskytoval se zde dominantně půdní druh prachovitá hlína. Půdní vlhkosti byly monitorovány pomocí dvanácti autonomních mikroklimatických stanic TOMST TMS-4. Jako doplňující měření půdní vlhkosti byla využita standardní gravimetrická metoda a metoda TDR. Pro stanovení charakteristik půdy byly z obou lokalit z jednotlivých hloubek odebrány neporušené půdní vzorky pomocí válečků o objemu 100 cm³, ze kterých byla určena objemová hmotnost, objemová vlhkost a pórovitost půdy. Dále byly odebrány i porušené půdní vzorky, ze kterých byla změřena zrnitost půdy pomocí hustoměrné metody.

Výsledky měření ukázaly, že efekt regulované drenáže se nejvíce projevil ve větších hloubkách (40 a 60 cm) zvýšenou půdní vlhkostí, a to až o více než 10 % oproti neregulované drenáži. Naopak v hloubkách 20 cm byla v obou případech zjištěna nižší vlhkost na regulovaných drenážích oproti drenážím neregulovaným. Dále byl potvrzen pozitivní vliv regulované drenáže na udržení vyšší vlhkosti půdy během období sucha po delší dobu, který se ale významně projevil jen na lokalitě v rovinném terénu a v hlubších vrstvách půdy.

Celkově práce ukazuje, že účinnost regulovaných drenáží, kromě sklonu terénu, závisí na mnoha dalších faktorech. Mezi nejdůležitější patří proměnlivost počasí a úhrn srážek, které se každou vegetační sezónou liší. Efektivita regulované drenáže je tak značně proměnlivá v čase, a proto je v jejím monitoringu potřeba dále pokračovat.

Klíčová slova: regulace drenážního odtoku, vliv regulovaného odvodnění, režim půdní vody, hladina podzemní vody, monitoring vlhkosti půdy

Abstract

The scope of this bachelor thesis is to compare the effect of regulated and unregulated drainage on agricultural soil moisture at the Amalia site during the 2023 growing season. Continuous monitoring of soil moisture at depths of 20, 40 and 60 cm below the soil surface was conducted at Amalia. Measurements were taken at two selected sites. The first was located on nearly flat terrain (slope below 1 %) and the second on a slope (slope around 5 %). Both sites contained portions with regulated and unregulated drainage and were dominated by the soil species dusty loam. Soil moisture was monitored using twelve TOMST TMS-4 stand-alone microclimatic stations. Standard gravimetric and TDR methods were used as additional soil moisture measurements. To determine soil characteristics, intact soil samples were collected from both sites at each depth using 100 cm³ cylinders to determine bulk density, bulk moisture content and soil porosity. In addition, disturbed soil samples were also collected and the soil grain size was measured using the densitometric method.

The measurement results showed that the effect of regulated drainage was most pronounced at greater depths (40 and 60 cm) with increased soil moisture, up to more than 10 % compared to unregulated drainage. On the other hand, at depths of 20 cm, lower soil moisture was found in both cases on regulated drainage compared to unregulated drainage. Furthermore, the positive effect of regulated drainage on maintaining higher soil moisture during the dry season for a longer period was confirmed, but it was significant only at the site in flat terrain and in deeper soil layers.

Overall, the work shows that the effectiveness of regulated drainage, in addition to the slope of the terrain, depends on many other factors. Among the most important are weather variability and rainfall, which vary from one growing season to the next. Thus, the effectiveness of regulated drainage is highly variable over time and needs to be further monitored.

Keywords: drainage runoff regulation, effect of regulated drainage, soil water regime, groundwater level, soil moisture monitoring

Obsah

1. Úvod	10
2. Cíle práce	11
3. Literární rešerše	12
3.1 <i>Půda a její význam</i>	12
3.1.1 Třífázový systém půdy	13
3.2 <i>Základní hydrofyzikální vlastnosti půd</i>	17
3.2.1 Měrná hmotnost půdy	17
3.2.2 Objemová hmotnost půdy	17
3.2.3 Půdní pórovitost	18
3.2.4 Vlhkost půdy	19
3.2.5 Půdní zrnitost	21
3.2.6. Nasycená hydraulická vodivost	23
3.3 <i>Odvodňování půdy pomocí drenáží</i>	25
3.3.1 Hlavní účel drenáží	26
3.3.2 Terminologie z oboru drenáží	27
3.3.3 Přehled drenážních systémů	28
4. Charakteristika lokality Amálie	33
5. Metodika	35
5.1. <i>Odběr neporušeného vzorku</i>	35
5.2. <i>Příprava vzorků</i>	36
5.3. <i>Objemová hmotnost</i>	36
5.4. <i>Objemová vlhkost</i>	37
5.5. <i>Pórovitost</i>	37
5.6. <i>Stanovení půdní zrnitosti hustoměrnou metodou</i>	37
5.7. <i>Senzory TOMST TMS-4</i>	42

5.7.1. Standardizace a kalibrace senzorů	42
5.7.2. Osazení senzorů do půdy	43
5.8. Měření metodou <i>Time Domain Reflectory (TDR)</i>	45
5.9. Vyhodnocení naměřených dat	46
6. Výsledky	47
6.1. Porovnání vlhkostí půdy	47
6.1.1. Porovnání senzorů TOMST TMS-4 a objemové vlhkosti	47
6.1.2. Porovnání objemové vlhkosti a metody TDR	54
6.2. Porovnání teplot půdy	56
6.3. Porovnání objemové hmotnosti, objemové vlhkosti a pórovitosti půdy	58
6.4. Porovnání zrnitosti půdy	59
7. Diskuse	61
8. Závěr	64
9. Přehled literatury a použitých zdrojů	67
10. Seznam obrázků	73
11. Seznam tabulek	75

1. Úvod

Česká republika, ale i většina území Evropy je ohrožována zvyšující se extremitou meteorologických jevů, v podobě nárazových přívalových srážek, které střídají delší období sucha (Kulhavý a Pelíšek, 2017). Ročně v průměru narůstá počet extrémních srážek, jsou však rozloženy do krátkých vlhkostních částí roku. Lokální přívalové srážky a jejich nedostatečné vsakování do půdy může mít za následek bleskové povodně a erozi půdy. Důsledkem těchto výrazných výkyvů počasí a změn vlhkostí půdy jsou významné poklesy výnosů plodin v zemědělství (Talián a kol., 2017). Tento stav je do budoucna neudržitelný a je na něj třeba účinně reagovat různými přírodě blízkými, ale i technickými opatřeními. Jedním z takových technických opatření pro zvýšení retence vody v zemědělské půdě jsou i regulované drenáže, kterým se tato práce věnuje.

Regulované drenáže umožňují v obdobích sucha zadržet v půdě větší objem vody a naopak ve vlhkých obdobích ji dokáží odvodnit. Ideálním řešením je výstavba nových dvojfunkčních drenážních soustav, v současné době je to však velmi obtížné z finančních i legislativních důvodů. Proto je reálnější variantou přestavba a modernizace stávajících zemědělských drenáží na drenáže regulované a to doplněním o regulační objekty. Klasické zemědělské drenážní systémy jsou v ČR velmi rozsáhlé, avšak často dlouhodobě velmi zanedbané (Kulhavý, 2019).

Tato bakalářská práce se zabývá vyhodnocením vlivů regulované drenáže na půdní vlhkost na zemědělské lokalitě Amálie během první monitorované vegetační sezóny 2023. Pro pozorování byly na Amálii vybrány 2 lokality s označením 7 a 8. Na každé se nachází šachtice pro regulaci podzemní hladiny vody a ta rozděluje pole na regulovanou a neregulovanou část. Následně byly měřeny půdní vlhkosti pomocí autonomních mikroklimatických stanic TOMST TMS-4, které byly osazeny na obou vybraných lokalitách 7 a 8 na regulovaných i neregulovaných částech a to v hloubkách 20, 40 a 60 cm pod povrchem půdy. Z těchto lokalit (7 a 8), ze všech zmiňovaných hloubek, byly také odebrány porušené i neporušené půdní vzorky z nichž byla stanovena objemová hmotnost, objemová vlhkost, pórovitost a zrnitost pro zjištění vlastností půdy. Současně bylo také provedeno doplňkové měření půdní vlhkosti pomocí metody TDR. Závěrem byly naměřené výsledky vlhkosti půdy vyhodnoceny a porovnány s jinými autory.

2. Cíle práce

Hlavním cílem této bakalářské práce je vyhodnotit efektivitu a vliv regulované a neregulované drenáže na vlhkost zemědělské půdy na lokalitě Amálie v průběhu první monitorované vegetační sezóny 2023.

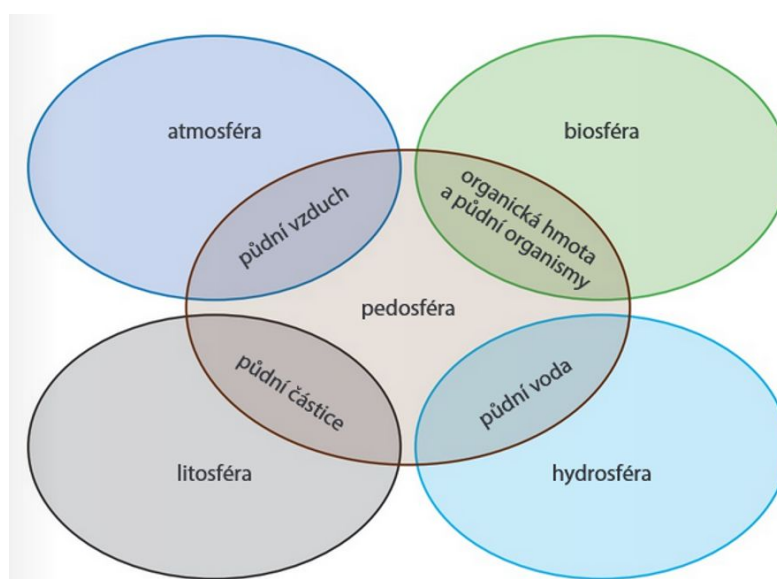
Dílčím cílem je založení kontinuálního monitoringu půdní vlhkosti v hloubkách 20, 40 a 60 cm pod povrchem půdy. Pro měření vlhkostí byly využity autonomní mikroklimatické stanice TOMST TMS-4, které byly osazeny v uvedených hloubkách, na dvou vybraných lokalitách s regulovanou i neregulovanou částí.

3. Literární rešerše

3.1 Půda a její význam

Dnešní vnímání definice půdy má svůj širší kontext, jehož základem jsou pracovní materiály mezinárodních i evropských organizací. Na základě toho je možné půdu definovat takto:

Půda vzniká na rozhraní biosféry, atmosféry, hydrosféry a litosféry – a to díky fyzikálním, chemickým a biologickým interakcím, které vedou ke specifické vertikální stavbě a morfologii dané minerálními sloučeninami, organickými látkami, vodou a vzduchem. Půda je unikátní přírodní terestrický útvar s vlastním metabolismem, probíhajícím v produktech zvětrávání půdotvorného substrátu a dekompozice odumřelé organické hmoty. Půda vytváří tenkou oživenou svrchní část litosféry (zvanou pedosféra) charakteristickou půdním poměrem 3:2:1 pevných částic, půdního roztoku a půdních plynů (Rejšek a Vácha, 2018). Souvislost mezi pedosférou a ostatními sférami – viz obrázek 1.



Obrázek 1: Souvislosti mezi zemskými sférami (Šarapatka, 2021)

Mezi nejvíce citované systémy členění funkcí půdy patří ten, který definoval Blum v roce 1998. Rozlišuje se v něm šest hlavních funkcí půdy (Šimek a kol., 2019).

Hlavní funkce půdy jsou následující:

- **Produkce potravin a biomasy.** Odhaduje se, že zhruba 95 % veškerých potravin pochází z půdy přímo (potravinářské plodiny) nebo nepřímo (maso ze zvířat krmených krmnými plodinami). Zbýlých 5 % potravin pochází především z moře (Šimek a kol., 2019).
- **Zadržování, filtrace a transformace látek.** Půda je rozhraním ostatních zemských sfér, proto přes ni probíhá výměna různých látek a energií. Voda přichází na povrch půdy ve formě srážek, závlahy či záplav. Tato voda zasakuje do půdy, akumuluje se v půdních pórech a postupně se uvolňuje pro potřeby rostlin a pro doplňování podzemních vod (Šimek a kol., 2019). Důležité jsou také emise plynů z půdy do atmosféry, které přispívají ke globálním klimatickým změnám (Blum, 2011).
- **Prostředí a genová zásobárna pro organismy.** Půda poskytuje životní prostředí pro půdní organismy, rostliny a organismy žijící na půdním povrchu. Počet druhů je u půdních organismů vyšší než u nadzemní bioty. Půdy se tak významně podílejí na druhové rozmanitosti (Šimek a kol., 2019). Geny získané z půdy jsou také stále více důležité pro mnohé biotechnické a bioinženýrské procesy (Blum, 2011).
- **Podklad pro lidské činnosti a stavby.** Převážná většina lidské činnosti se odehrává na zemském povrchu. Proto je půda přirozeným podkladem pro budování obytných domů, průmyslových podniků, skladišť, nákupních center, sportovišť, rekreačních zařízení, silnic, dálnic, skládek, výsypek atd. Zábor půdy pro účely výstavby je však velkým problémem (Šimek a kol., 2019).
- **Zdroj surovin.** Půda je zdrojem surovin, například jílu, písku, šterku a různých nerostů. Je také zdrojem energie a vody. Suroviny jsou základem technického, průmyslového a socio-ekonomického rozvoje. Spotřebu půdy při rozvoji infrastruktury a při těžbě surovin lze považovat za nevratnou (Blum, 2011).
- **Materiální a kulturní dědictví.** V půdě jsou ukryty cenné paleontologické a archeologické nálezy důležité pro pochopení historie lidstva i planety. Tyto pozůstatky minulosti se uchovaly díky zakonzervování v půdní hmotě (Šimek a kol., 2019).

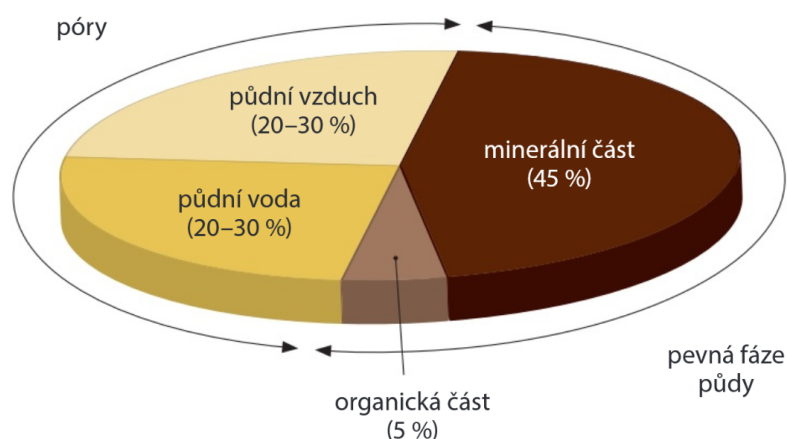
3.1.1 Třífázový systém půdy

Tři fáze známé z běžné přírody jsou v půdě zastoupeny následovně: pevnou fází tvoří pevná půdní hmota, kapalnou fází představuje půdní voda, plynnou fází představuje půdní vzduch. Poměrné zastoupení těchto tří fází v půdě není stálé, ale mění se vlivem proměnlivých podmínek jako je počasí, růst rostlin a hospodaření

(Hillel, 2004). Mění se zejména obsah vody na úkor vzduchu a naopak (Šimek a kol., 2015).

V typické minerální půdě zaujímají pevné částice přibližně polovinu až dvě třetiny objemu, póry vyplňují polovinu až třetinu objemu. Póry bývají přibližně z poloviny zaplněny vodou a z poloviny vzduchem (Šimek a kol., 2015). Průměrné zastoupení jednotlivých půdních složek u minerální půdy je uvedeno na obrázku 2.

Půda může produkovat biomasu, pouze když jsou přítomné všechny tři fáze. Půdní vzduch je potřebný pro dýchání kořenů rostlin, půdní voda je transportérem živin z půdy do rostliny, pevná půdní hmota rostlinu stabilizuje (Novák a Hlaváčková, 2016).



Obrázek 2: Průměrné objemové složení minerálních půd (Šarapatka, 2021)

Pevná půdní hmota

Pevná fáze půdy sestává převážně z anorganických látek, podíl organické hmoty je celkem malý. Anorganickou složku půdy tvoří buď částice s konkrétní krystalickou strukturou (minerály) nebo látky bez konkrétní struktury (amorfní či nekystalické látky). Amorfní složku půdy tvoří hlavně směsi hydratovaných oxidů hliníku, křemíku, železa a manganu. Krystalickou složku tvoří směsi původních půdních minerálů a sekundárních minerálů vzniklých zvětráváním v půdě (Singh a kol., 2014).

Základem půdní struktury jsou půdní agregáty. Tvoří je různé veliké pevné částice, navzájem poutané silami, zabraňujícími jejich rozpadu. Podle velikosti rozlišujeme makroagregáty (větší než 250 μm) a mikroagregáty (menší než 250 μm).

V půdě jsou uspořádány hierarchicky – velké agregáty jsou tvořeny shluky menších agregátů, a ty jsou tvořeny shluky minerálních částic a humusu (menších než 20 μm). Makroagregáty vznikají volným shlukováním minerálních a organických částic (Šimek a kol., 2015). Uspořádáním pevných složek půdy je určena geometrická charakteristika pórových prostorů, ve kterých se přenáší a zadržuje voda a vzduch (Hillel, 2004).

Organickou hmotu půdy utvářejí rostlinné nebo živočišné zbytky a odumřelé buňky mikroorganismů, v různém stadiu rozkladu a přeměny na nové látky. Část organické půdní hmoty, která již prošla rozkladnými a syntetickými procesy, se nazývá "humus". Humusové látky napomáhají tvorbě agregátů, jsou zásobárnou živin pro rostliny, a jsou zdrojem energie. Významně ovlivňují vodní režim půdy (Šimek a kol., 2015).

Půdní voda

Za půdní vodu považujeme veškerou vodu v půdě obsaženou – včetně vody obsažené v půdních plynech nebo vody ledových krystalků. Rozlišují se tři formy půdní vody: 1) gravitační voda – pohybující se ve směru gravitace; 2) adsorpční voda – vázaná koloidními silami na povrch půdních částic; 3) kapilární voda – vázaná kapilárními silami; většinou se pohybující proti směru gravitace (Rejšek a Vácha, 2018). Půdní voda zadržovaná v pórech kapilárními silami není snadno přístupná pro využívání lidmi. Rostliny však mají schopnost tyto kapilární síly překonávat a získávat tak vodu pro svoji obživu (Narasimhan, 2009).

Půdní voda ve skutečnosti představuje vodný roztok různých minerálních i organických látek, který zajišťuje zásobování rostlin vodou a živinami, a ovlivňuje půdu jako celek. Celková koncentrace látek v půdním roztoku většinou nepřesahuje 1 % a často bývá mnohem nižší (cca 0,05 %). Vedle chemického složení půdního roztoku je důležitou charakteristikou jeho pH (acidita nebo alkalita) a také celkový obsah vody v půdě (Šimek a kol., 2015).

Pohyb vody v půdní zóně je převážně vertikální: zahrnuje vertikální vzestupné odpařovací proudění a dolů směřující gravitační proudění. Voda pohybující se dolů vlivem gravitace dosahuje až k hladině podzemní vody a doplňuje její zásobu (Narasimhan, 2009).

Hlavním zdrojem vody v půdě je voda srážková – infiltrující do půdy shora, a voda podzemní – vzlínající do půdy zdola. K dalším zdrojům patří povrchový či podzemní přítok do půdy v horizontálním směru. Nejdůležitějším antropogenním zdrojem vody jsou závlahy. K méně významným zdrojům kapalné vody v půdě patří kondenzace vodních par nebo rozklad odumřelých těl rostlin a živočichů (Pavlů, 2018).

Půdní vzduch

Plynnou fází půdy představuje půdní vzduch. Je obsažen v půdních pórech, které nejsou vyplněny půdní vodou. Vedle celkového obsahu vzduchu v půdě je důležité jeho chemické složení, odlišné od složení atmosférického vzduchu. Půdní vzduch má často až 100% relativní vlhkost, obsahuje více oxidu uhličitého a méně kyslíku než nadzemní vzduch. K dalším více zastoupeným plynům patří: metan a jiné uhlovodíky, oxidy dusíku a síry, sirovodík atd. (Šimek a kol., 2015).

Odlišné složení půdního a atmosférického vzduchu je dáno tím, že biologické reakce v půdě většinou spotřebovávají kyslík, zatímco rozklad organických látek produkuje oxid uhličitý. Ten sice může pronikat difuzí skrze půdní póry do atmosféry, ale jeho unikání z půdy je pomalejší než jeho vytváření. V kořenové zóně půdy bývá koncentrace CO_2 více než desetinásobná oproti atmosféře, a s hloubkou se může zvětšit až na třicetnásobek. Spolu s tím ubývá koncentrace kyslíku. Zatímco v atmosféře se koncentrace CO_2 blíží 0,039 % objemu, v půdním humusovém horizontu je to 0,4 % objemu (Kutílek, 2012).

Zdrojem kyslíku v půdním vzduchu bývá spodní vrstva atmosféry, ze které se kyslík dostává do půdy difuzí nebo prouděním. Kyslík je v půdě přítomen především v plynné fázi, protože jeho rozpustnost je poměrně nízká. V dobře provzdušněné půdě koncentrace kyslíku v půdním vzduchu neklesá pod 15 % objemu. Zdrojem oxidu uhličitého v půdě jsou zejména biologické procesy – respirace a rozklad organických látek. V dobře provzdušněné půdě obsah CO_2 obvykle nepřesahuje několik objemových procent (Šimek a kol., 2015).

Při výměně plynů mezi půdou a atmosférou se uplatňují dva procesy: difuze (hlavní mechanismus) a advekce. K difuzi dochází vlivem koncentračních gradientů vznikajících při dýchání půdních organismů a rostlin, při produkci plynů spojené s biologickými reakcemi apod. Na difuzi vodní páry v půdě mají vliv také teplotní rozdíly a vypařovací podmínky na povrchu půdy. Naproti tomu advekce je řízena tlakovými

gradienty. K jejich vzniku přispívají: změny atmosférického tlaku, vítr vanoucí přes povrch půdy, infiltrace vody do půdy vlivem srážek či zavlažování, přeskupení mezi vodou a půdou, odpařování, teplotní gradienty u povrchu půdy, a rozdíly v hustotě plynů (Rolston & Møldrup, 2012).

3.2 Základní hydrofyzikální vlastnosti půd

3.2.1 Měrná hmotnost půdy

Měrná hmotnost půdy představuje hmotnost jednoho kubického metru pevné, neporézní zeminy (tj. pouze pevné fáze půdy), vyjádřenou v tunách ($t.m^{-3}$) nebo gramech ($g.cm^{-3}$). Tato charakteristika je v průběhu času na daném stanovišti prakticky neměnná. Měrná hmotnost půdy závisí především na mineralogickém složení a na obsahu organické hmoty (Rejšek a Vácha, 2018). K výpočtu měrné hmotnosti půdy ρ_m používáme vztah (Pavlásek a Jačka, 2014):

$$\rho_m = \frac{m_m}{V_m} \quad (1)$$

kde m_m je hmotnost pevných částic ve vysušeném vzorku, V_m je objem pevné fáze půdy.

Většina půd má průměrnou měrnou hmotnost částic 2,6 až 2,7 $g.cm^{-3}$, což odráží převahu křemenných a jílových minerálů v půdní matrici. Výjimkou je půda s vysokým obsahem organické hmoty; například humus má měrnou hmotnost obvykle menší než 1,5 $g.cm^{-3}$. Opakem jsou půdy bohaté na železo; například feromagnetické minerály mají měrnou hmotnost 2,9 až 3,5 $g.cm^{-3}$; v případě oxidů železa a dalších tzv. těžkých minerálů to může být přes 4 $g.cm^{-3}$ (Smettem, 2006).

V laboratoři se měrná hmotnost zjišťuje pyknometricky. Pyknometr je přesně kalibrovaná tenkostěnná skleněná nádobka s úzkým hrdlem, obsahující zabroušenou skleněnou zátku s kapilárním otvorem. Jeho velikost je úměrná objemu analyzovaného vzorku – při vlastní analýze je pyknometr vzorkem zaplněn zhruba do čtvrtiny své výšky (Zoubková, 2014). Půda v pyknometru se pokryje vrstvou vody a odstraní se vzduch, aby se zajistilo úplné nasycení půdy před doplněním pyknometru. Během celého postupu se používá destilovaná voda; organická hmota bývá obvykle odstraněna předem (Smettem, 2006).

3.2.2 Objemová hmotnost půdy

Objemová hmotnost udává hmotnost jednoho kubického metru půdy při jeho přirozeném uložení; vyjadřuje se v gramech (g.cm^{-3}) nebo v tunách (t.m^{-3}). Platí pro ni dvě skutečnosti: je vždy nižší než měrná hmotnost a je ovlivněna půdní zrnitostí – zvláště příměsí skeletu a velikostí jeho částic, strukturou, vlhkostí a pórovitostí – zvláště přítomností různých dutin, například po odumřelých kořenech. (Rejšek a Vácha, 2018). K výpočtu objemové hmotnosti půdy ρ_s používáme vztah (Pavlásek a Jačka, 2014):

$$\rho_s = \frac{m_m}{V_s} \quad (2)$$

kde m_m je hmotnost pevných částic v půdním vzorku, V_s je objem půdního vzorku.

Objemová hmotnost půd jílovito-hlinitých a jílovitých činí 1,0 až 1,6 g.cm^{-3} , písčitých a hlinito-písčitých 1,2 až 1,8 g.cm^{-3} . Podpovrchové utužené vrstvy půdy mají objemovou hmotnost 2,0 g.cm^{-3} nebo více (Šimek a kol., 2019).

Pro stanovení hustoty vysušené půdy je nutné odebrat neporušený vzorek půdy do kovového válečku o známém objemu. Po odběru se ze vzorku odstraní voda (vysuší se) a následně zvaží. Hmotnost vysušeného půdního vzorku je rovna hmotnosti pevného podílu v půdním vzorku; hmotnost vzduchu ve vzorku se zanedbává (Pavlásek a Jačka, 2014).

3.2.3 Půdní pórovitost

Pórovitost charakterizuje poměrné zastoupení pórů v půdě. Vyjadřuje podíl objemu pórů k celkovému objemu půdy. Je to bezrozměrná veličina (Novák a Hlaváčiková, 2016). Hlinité půdy mají pórovitost obvykle 0,52 až 0,64, protože k pórům mezi částicemi musíme přičíst póry mezi agregáty, které přispívají k vyšší celkové pórovitosti. Jíly a jílovité půdy mají pórovitost obvykle o něco nižší než půdy hlinité. V půdách jsou póry různé velikosti a celková pórovitost se může zmenšit – například po hutnění těžkými zemědělskými stroji (Kutílek, 2012). K výpočtu pórovitosti P používáme vztah (Pavlásek a Jačka, 2014):

$$P = \frac{V_p}{V_s} = \frac{V_a + V_w}{V_a + V_w + V_m} \quad (3)$$

kde V_p je objem půdních pórů, V_s je objem vzorku, V_a je objem plynné fáze, V_w je objem kapalně fáze, V_m je objem pevné fáze.

Póry se rozlišují například podle schopnosti zadržovat vodu, a to na mikropóry a makropóry. Mikropóry jsou na průřezu menší než 30 až 60 μm , zadržují vodu působením kapilárních sil a hrají důležitou roli při zadržování (retenci) vody v půdě. Makropóry jsou pro zachycení vody pomocí kapilárních sil příliš velké, ale jsou důležité pro zasakování vody do půdy a proudění půdního roztoku a také půdního vzduchu. Specifickým případem makropórů jsou biopóry vytvářené růstem kořenů rostlin a žížalami (i dalšími skupinami půdních živočichů). V hlubších vrstvách půdy převládají menší póry a s nimi se zmenšuje i velikost organismů, které je obývají (Šimek a kol., 2015).

Rozdělení půdních pórů podle velikosti a jejich typické zastoupení (procenta objemu) v základních skupinách podle půdního druhu je uvedeno v tabulce 1 (Rejšek a Vácha, 2018).

druh pórů	Velikost [μm]	lehká půda [% objemu]	střední půda [% objemu]	těžká půda [% objemu]
makropóry	nad 50	20 – 30	10 – 15	5 – 15
zásobní mikropóry	0,2 – 50	5 – 15	20 – 25	15 – 20
reziduální mikropóry	pod 0,2	5 – 10	15 – 20	25 – 35
pórovitost	–	35 – 45	45 – 55	50 – 70

Tabulka 1: Klasifikace půdních pórů (Rejšek a Vácha, 2018)

3.2.4 Vlhkost půdy

Vlhkost půdy je termín používaný nejčastěji pro okamžitý obsah vody v půdě. Hodnota půdní vlhkosti se neustále mění tím, že se půdní voda rozptyluje do pórů s větším kapilárním napětím a tím, že je neustále odsávána kořeny rostlin (ÚVTIZ, 1992).

Existují dvě možnosti pro vyjádření vlhkosti půdy: 1) hmotnostní vlhkost – což je poměr hmotnosti kapalné fáze (půdní vody) ke hmotnosti pevné fáze půdy; 2) objemová vlhkost – což je poměr objemu kapalné fáze k objemu celého půdního vzorku (Pavlásek a Jačka, 2014). Hmotnostní vlhkost půdy se vypočte ze vztahu:

$$w = \frac{m_w}{m_m} \quad (4)$$

kde w je hmotnostní vlhkost [kg.kg^{-1}], m_w je hmotnost vody [kg], m_m hmotnost pevné fáze půdního vzorku [kg] (Pavlásek a Jačka, 2014).

Hmotnost pevné fáze půdního vzorku se určuje jako hmotnost vysušeného půdního vzorku. Při sušení vzorku má být odstraněna pouze voda, nesmí dojít k odstranění organické či minerální složky půdy (Pavlásek a Jačka, 2014). Objemová vlhkost půdy se vypočte ze vztahu:

$$\theta = \frac{V_w}{V_s} \quad (5)$$

kde θ je objemová vlhkost [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$], V_w objem vody ve vzorku [m^3], V_s objem půdního vzorku [m^3] (Pavlásek a Jačka, 2014).

Při měření půdní vlhkosti se využívají změny fyzikálních nebo fyzikálně-chemických vlastností půdy se změnou vlhkosti. Tyto metody se člení na přímé (voda se oddělí od půdy a změří se její množství) a nepřímé (vlhkost se stanoví ze změny vlastností půdy závislých na vlhkosti). Měření je komplikováno tím, že měřená fyzikální nebo fyzikálně-chemická veličina se nemění pouze při změně vlhkosti, ale také při změně dalších veličin: teploty, objemové hmotnosti, chemického složení atd. (ÚVTIZ, 1992).

Za základní metodu měření půdní vlhkosti lze považovat gravimetrickou metodu. Její princip vychází z definice hmotnostní vlhkosti. Vlhkost stanovujeme na porušeném půdním vzorku, případně na neporušeném vzorku – v tom případě určujeme přímo vlhkost objemovou (Kuráž, 2003). Princip této metody spočívá ve stanovení půdní vlhkosti na základě zvážení vlhkého půdního vzorku, jeho vysušení v elektrické sušárně při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti za 4 až 6 hodin, a po ochlazení v exsikátoru zvážení vysušeného půdního vzorku. Přesnost metody závisí na přesnosti vážení a na definování pojmu vysušený stav půdy (Pospíšilová a kol., 2016).

Výhodou této metody je její jednoduchost – mezi potřebné vybavení patří pouze technické váhy s přesností 0,01 g a sušárna. Nevýhodou je destruktivnost metody a nutnost odběru půdních vzorků. Metoda je nevhodná pro dlouhodobý monitoring půdní vlhkosti, půdní vzorek je většinou poměrně malý a neodpovídá tzv. reprezentativnímu elementárnímu objemu (REO). Při vícenásobném odběru půdních vzorků dochází k porušení půdního profilu, místa odběru je nutné měnit, proto časové změny vlhkosti mohou být ovlivněny prostorovou variabilitou půd (Kuráž, 2003).

Měření vlhkosti metodou TDR (time domain reflectometry) je založeno na poznatku, že rychlost šíření elektromagnetického impulzu podél vodiče závisí nejen

na vlastnostech vodiče, ale také dielektrika okolo vodiče. Aplikace této metody na měření vlhkosti půdy je založena na tom, že při frekvenci elektromagnetického pole nad 10 MHz má voda vysokou hodnotu relativní permitivity ($\epsilon_r =$ cca 80) oproti ostatním složkám půdy, přičemž pevná fáze minerálních půd má relativní permitivitu o řád nižší ($\epsilon_r = 3$ až 7), vzduch má $\epsilon_r = 1$. Z toho plyne, že na rychlost šíření impulsu má největší vliv voda. Zařízení tvoří dva až tři vodiče, které se vloží do půdy a koaxiálním kabelem se spojí s generátorem impulzů a se snímačem času. Výsledná hodnota vlhkosti se odečítá na displeji (Novák a Hlaváčiková, 2016).

Hlavní výhody metody TDR oproti jiným metodám pro opakované měření půdní vlhkosti jsou: vynikající přesnost, minimální požadavky na kalibraci specifickou pro půdu, žádná radiační rizika (na rozdíl od metod s neutronovou sondou nebo gama zářením), vynikající prostorové a časové rozlišení, jednoduché kontinuální měření vlhkosti půdy s využitím automatizace. K nevýhodám metody TDR patří: poměrně vysoké náklady na vybavení, omezená použitelnost ve slaném prostředí (kvůli zeslabení signálu) a kalibrace nutná pro půdy s vysokým obsahem jílu nebo organické hmoty (Or a kol., 2012).

3.2.5 Půdní zrnitost

Zrnitost udává velikost a poměrné zastoupení jednotlivých půdních frakcí. Zrnitost patří mezi agronomické a ekologické charakteristiky půdy a má velký vliv na průběh pedogenetických procesů. Zrnitost půdy je ovlivněna procentuálním obsahem zrnitostních frakcí jemnozeme (částice o průměru do 2 mm) a skeletu (částice o průměru nad 2 mm). Podle aktuálního systému Němečka a kol. (2011) klíčovými zrnitostními frakcemi jemnozeme jsou: jíl, prach a písek. Tyto zrnitostní frakce se stanovují různými metodami zrnitostních analýz (Rejšek a Vácha, 2018).

Podle velikosti členíme půdní částice takto:

- **Písek.** Částice o velikosti 0,05 až 2 mm, tvořené křemenem a úlomky křemičitanových hornin či živců. Písečná složka půdy zajišťuje dobrou propustnost půdy, voda se mezi částicemi rychle vsakuje, ale dlouho se v půdě neudrží. Půdy s vysokým obsahem písku jsou dobře propustné a provzdušněné, za sucha však rychle vysychají.
- **Prach.** Částice o velikosti 0,002 až 0,05 mm. Prachové částice, obsažené hlavně v půdách vytvořených na spraších, zajišťují dobré fyzikální vlastnosti a optimální poměr mezi obsahem vody a vzduchu pro organismy a procesy v půdě.

- **Jíl.** Částice o velikosti pod 0,002 mm. Půdy s vyšším obsahem jílu jsou méně propustné pro vodu a málo vzdušné (Šimek a kol., 2015).

Půdní druh je důležitý parametr, který ovlivňuje další vlastnosti půdy. Základní členění půd je na půdy lehké s hmotnostním podílem jílu v jemnozemi do 20 % (s dominantní frakcí písku), půdy střední s hmotnostním podílem jílu v jemnozemi 20 až 45 % (s dominantní frakcí prachu) a půdy těžké s hmotnostním podílem jílu v jemnozemi nad 45 % (s dominantní frakcí jílu). Novákova klasifikace půdního druhu je uvedena v příloze č. 8 k vyhlášce č. 275/1998 Sb. ve znění pozdějších předpisů – viz tabulka 2 (Rejšek a Vácha, 2018).

procento jílnatých částic < 0,01 mm	půdní druh	označení	kategorie půd
0 – 10	písčítá	P	lehké
10 – 20	hlinitopísčítá	Hp	
20 – 30	písčitohlinitá	Ph	střední
30 – 45	hlinitá	H	
45 – 60	jílovitohlinitá	Jh	těžké
60 – 75	jílovitá	Jv	
> 75	jíl	J	

Tabulka 2: Půdní druhy (Rejšek a Vácha, 2018)

Zrnitostní (texturální) rozbor je základem klasifikace půdy podle druhu a slouží ke stanovení procentuálního zastoupení částic určité velikosti. Třídění půdních zrn se provádí prostřednictvím vody, ve které je vzorek půdy rozptýlen. Nejčastěji se používají metody sedimentační, z nichž se pro servisní laboratoře nejlépe hodí pipetovací a hustoměrná metoda (ÚVTIZ, 1992). Obě metody patří do skupiny metod neopakované sedimentace, kdy všechna měření probíhají během jediného usazovacího procesu (Pospíšilová a kol., 2016).

Sedimentační metody zrnitostní analýzy částic pevné fáze půdy vycházejí z poznatku, že rychlost sedimentace pevných částic v suspenzi závisí na jejich velikosti. Je-li známý čas od počátku sedimentace částic a poloha pevné částice, je možné určit její průměr. Tyto metody využívají tzv. Stokesovu rovnici, vyjadřující závislost mezi rychlostí sedimentace a velikostí částice. Předpoklad je, že částice mají tvar koule, proudění vody je laminární, a částice jsou dost velké vůči molekulám vody, aby nebyly neovlivněny mezimolekulárními interakcemi (Novák a Hlaváčiková, 2016).

Při použití pipetovací metody se suspenze promíchá a nechá volně sedimentovat. Pro stanovení zrnitostních frakcí se ze suspenze odebírá vzorek

určitého objemu z hloubky, která odpovídá délce sedimentační dráhy částic hledané zrnitostní frakce určitého průměru (a všech menších) po určité době. Obsah pipety se po odběru vypouští do vysoušečky, vysuší se, zváží a přepočítá na procentuální zastoupení. Metoda je poměrně přesná (ÚVTIZ, 1992). Pokud známe vlastnosti vody a měrnou hmotnost pevných částic, můžeme vypočítat průměr částic, odpovídajících příslušné rychlosti sedimentace (Novák a Hlaváčiková, 2016).

Metoda hustoměrná (areometrická) vychází z použití speciálních hustoměrů (areometrů), monitorujících změny hustoty půdní suspenze ve vodě a souvislosti se změnou doby sedimentace částic různých průměrů. Příčinou změn hustoty je přitom sedimentace neboli v souvislosti s rostoucí délkou měření hustota hydrosuspenze klesá (Zoubková, 2014). Pro určení průměru zrn se používá speciálního nomogramu a vypočte se procentuální zastoupení příslušných velikostních frakcí s přihlédnutím k sušině navážky, k měrné hmotnosti zeminy, ke čtení na hustoměru, meniskové, eventuálně teplotní korekci. Výsledky analýz se v případě obou metod vynesou ve formě zrnitostní (součtové) křivky v semilogaritmickém systému (ÚVTIZ, 1992).

3.2.6. Nasycená hydraulická vodivost

K_s neboli nasycená hydraulická vodivost vychází z Darcyho zákona, vyjadřuje schopnost porézního prostředí vést vodu v půdním prostředí, kde jsou teoreticky všechny, nebo většina efektivních pórů vyplněny vodou (část příliš malých pórů zůstává pro vodu uzavřených i při plném nasycení) (Pavlásek a Jačka, 2014).

Proudění vody v půdě zajišťuje spád potenciálu. Voda se vždy pohybuje z místa s vyšším potenciálem do místa s nižším potenciálem (neboli teče z vlhčího místa do suššího) (Kutílek, 1978; Pavlů, 2018).

K_s se vyjadřuje v jednotkách rychlosti $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a především závisí na fyzikálních vlastnostech kapaliny, ty jsou stanovené její hustotou ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], dynamickou viskozitou kapaliny μ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$] a propustností půdy K_p [m^2], která zahrnuje zejména pórovitost, velikost a tvar pórů, měrný povrch a zrnitostní složení. Nasycenou hydraulickou vodivost K_s vyjadřuje vztah:

$$K_s = \frac{K_p \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (6)$$

kde g je gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]. Propustnost K_p je závislá na charakteristice porézního prostředí, nikoliv na vlastnostech kapaliny (Pavlásek a Jačka, 2014).

Hydraulická vodivost je ovlivněna strukturou a texturou půdy. Rychlost proudění se zvyšuje s porézností, rozrušeností a agregovaností půdy, naopak s její kompaktností klesá. K_s závisí nejen na celkové pórovitosti, ale převážně pak na velikostech vodivých pórů. Hydraulická vodivost nasycené půdy nezůstává konstantní, ale většinou klesá v čase z důvodu řady chemických, fyzikálních a biologických procesů, které mohou ovlivnit, jak voda proniká půdou a jak v ní proudí. Hydraulickou vodivost dále ovlivňuje rozdílná koncentrace rozpuštěných látek ve vodě vstupující do půdy a půdního roztoku, do kterého vstupuje (Hillel, 2004).

Metody stanovení nasycené hydraulické vodivosti

Metody pro stanovení nasycené hydraulické vodivosti se člení na: 1) metody laboratorní; 2) metody terénní; 3) metody nepřímé. Laboratorní metody jsou založeny na řešení Darcyho rovnice. Rozlišujeme metody s konstantním a proměnným hydraulickým spádem (Kuráž, 2003).

Laboratorní metody

Pro laboratorní stanovení K_s se používají neporušené půdní vzorky, obvykle o průměru a délce 4 až 20 cm. Metodou s konstantním spádem se měří hodnoty K_s v rozsahu 10^{-2} až $10^{-7} m \cdot s^{-1}$. Metodou s proměnným spádem se měří málo propustné půdní vzorky s nižší hodnotou K_s , většinou s vyšším obsahem jílu (Pavlásek a Jačka, 2014).

- **Metoda s konstantním spádem**

U metody s konstantním spádem se měří průtok vody nasyceným porézním prostředím, kde dochází k proudění v důsledku konstantního spádu udržovaného na vstupu. V určitých časových intervalech jsou zaznamenávány odtoky vody. Pokud je v daném časovém intervalu několik odečtů podobných, s malými odchylkami, vypočte se pomocí přeskupeného Darcyho zákona nasycená hydraulická vodivost půdy pro svislý tok směrem dolů. Tuto metodu lze používat ke stanovení hydraulické vodivosti různých typů půd, u vysoce propustné půdy však může být obtížné udržovat konstantní spád (Shukla, 2014).

- **Metoda s proměnným (klesajícím) spádem**

U metody s klesajícím spádem je obvykle v horní části půdního vzorku připevněna stoupací trubka. Spád v horní části vzorku tak může během daného časového intervalu klesnout na odlišnou hodnotu. Nasycená hydraulická vodivost půdy se určí výpočtem (Shukla, 2014).

Metoda s klesajícím spádem je užitečná pro půdy s velmi nízkou hydraulickou vodivostí. Sběr dostatečného množství odtoku trvá několik hodin, takže může být přesnost měření ovlivněna odpařováním. Obecně jsou hodnoty nasycených hydraulických vodivostí ovlivněny vzduchem zachyceným uvnitř sloupce půdy (Shukla, 2014).

Základní nevýhody uvedených laboratorních metod jsou následující. Hydraulická vodivost se měří na neporušených půdních vzorcích. Většina permeametrů používá vzorky objemu 100 cm^3 , což je objem z hlediska REO zcela nedostatečný. U půdních vzorků je nutné zabránit riziku zatékání po obvodu válečku. Při měření je nutné zabránit vyplavování jemné frakce ze vzorku a redistribuci této frakce ve vzorku. U těžkých půdních vzorků jsou problémy s plným nasycením půdního vzorku (Kuráž, 2003).

Guelphský permeametr

V případě, kdy je hladina podzemní vody ve větší hloubce, se používá k měření hydraulické vodivosti tzv. Guelphský permeametr, který patentovali Reynolds a Elrick roku 1985. Přístroj funguje na principu Mariottovy láhve. Zařízením měříme ve válcové nezapažené sondě o poloměru r (2 až 5 cm). Měřit můžeme po vrstvách o mocnosti cca 15 cm v půdním profilu, teoreticky do hloubky 8 m, prakticky měříme zhruba do hloubky 1 m. Měříme časový průběh poklesu vody v rezervoáru do dosažení dostatečného podtlaku (to znamená udržování konstantní úrovně hladiny vody v sondě). Hydraulickou vodivost spočítáme na základě změřené ustálené hodnoty průtoku (ÚVTIZ, 1992).

3.3 Odvodňování půdy pomocí drenáží

Zamokřené půdy jsou zcela nasyceny nebo povrchově zaplaveny vodou. Hladina podzemní vody dosahuje nebo se blíží k povrchu půdy a ovlivňuje kořenový systém rostlin. Půdní vlhkost odpovídá maximální vodní kapacitě, zatímco vzdušná kapacita půdy je rovna nule (Slavík a Neruda, 2014). Silně zamokřená půda má vyšší

kyselost, je tudíž nevhodná pro běžně pěstované plodiny. Takovou půdu hodnotíme jako neúrodnou. Její zúrodnění umožňují vodohospodářské meliorace. Jsou to náročná technická opatření, jejichž cílem je zachovat nebo zlepšit úrodnosti a kvalitu půd. Odvodnění poskytuje příznivé podmínky pro růst kořenů rostlin a pro rozklad organické hmoty v půdě. V České republice bylo odvodněno přes 25% území zemědělského půdního fondu (Vopravil, Kulířová a Kulhavý, 2015).

3.3.1 Hlavní účel drenáží

Odvodnění slouží konkrétně k následujícím účelům (Vlotman & Wong, 2007):

Regulace zamokření. Ve špatně odvodněné podmáčené půdě je většina pórů v kořenové zóně zaplněna vodou, což vede k nedostatku vzduchu. Obecně lze růst plodin zlepšovat drenáží přebytečné vody – což bylo tradičně hlavním účelem odvodnění. Zamokření také omezuje využití zemědělských strojů a efektivitu zemědělských operací, a ovlivňuje výběr plodin a načasování zemědělských prací.

Regulace slanosti. V aridní zóně je zavlažovaná půda ohrožena zasolením kvůli akumulaci přebytečných solí v kořenové zóně. Tento stav bývá obvykle způsoben kombinací nedostatečného vyplavování solí dodávaných závlahovou vodou a kapilárního vztlínání solí ze slaných podzemních vod. Přestože mají plodiny odlišné tolerance vůči soli, růst a výnosy mnoha běžných plodin jsou vážně ohroženy.

Regulace eroze. V semi-aridní zóně představuje pokles podílu ornice vážnou hrozbu pro produktivitu a udržitelnost u velké části zemědělské půdy, která má na začátku období dešťů příliš málo vegetace, aby mohla být chráněna před erozivními silami intenzivního deště.

Protipovodňová ochrana. Odvodňovací problémy mohou být způsobeny nejen lokálními vodními zdroji (déšť, průsaky, zavlažování atd.), ale také vpádem vody pocházející z vnějšího zdroje. Přestože protipovodňová ochrana většinou nespadá do oboru odvodňování půd, některé lokální záplavy lze pravidelným odvodňováním půdy regulovat.

Ochrana životního prostředí. Odvodňovací projekty by měly respektovat výše uvedené cíle zemědělského odvodnění a zároveň udržovat (nejlépe zvyšovat) ekologické hodnoty odvodňované oblasti. Nadměrné odvodnění však může způsobit nedostatek vody u výše položených pozemků. Pro ochranu životního prostředí a

biologické rozmanitosti je zásadní pochopit transport rozpuštěných látek v půdní vodě, podzemní vodě a povrchové vodě.

Veřejné zdraví a hygiena na venkově. Zlepšená drenáž omezuje možnosti rozmnožování hmyzích přenašečů, kteří se rodí ve vodě, a může tak významně přispět ke kontrole malárie a dalších chorob. Dále může odvodnění pomoci zlepšovat hygienické podmínky v oblastech se zahnívající a znečištěnou vodou.

Ochrana infrastruktury. Záplavy často narušují mnohé hospodářské činnosti, ale mohou způsobovat i značné přímé škody na silnicích a další infrastruktuře. V mnoha zavlažovaných oblastech stoupající hladina podzemní vody ovlivňuje sjízdnost silnic, zvyšuje náklady na údržbu silnic, a podemílá základy budov.

Rozvoj venkova a zabezpečení potravin. Odvodňování je vhodným nástrojem pro rozvoj venkova. Ve vyspělých zemích se drenáže k tomuto účelu hojně využívaly ve druhé polovině 20. století, což významně přispělo k rozvoji zemědělství a blahobytu venkova, a také k zabezpečení potravin na národní i globální úrovni.

3.3.2 Terminologie z oboru drenáží

V oboru drenáží se používají následující odborné termíny podle Poleno a kol. (1994 a 1995):

Drenáž. Odvodnění zamokřeného území soustavou drénů včetně drenážních objektů pro odvedení přebytečné vody, provzdušnění a proteplení půdy.

Drén. Odvodňovací prvek určený převážně ke sbírání a odvádění vody ze zamokřeného prostředí. Rozeznáváme drény sběrné a drény svodné.

Drén sběrný. Sbírá a přivádí přebytečnou vodu ze zamokřeného půdního profilu do drénu svodného (Poleno a kol., 1994). Podle směrového založení sběrných drénů se rozlišují čtyři typy: podélná drenáž, příčná drenáž, drenáž v umělém sklonu, a drenáž blesková (Kulhavý a Kulhavý, 2008).

Drén svodný. Svádí vodu ze sběrných drénů do drénu hlavního nebo přímo do hlavního odvodňovacího kanálu (odpadu) či recipientu. Umisťuje se do nejnižších míst území, aby sem mohly gravitačně zaústovat sběrné drény.

Pramenná jímka. Slouží k zachycování vody z pramenů pomocí drenáží. V jímce se voda shromažďuje v usazovací komoře. Z ní teče do sběrné komory, ve

kteře je umístěn přeliv a odběrné potrubí. Přelivem se odvádí přebytečná voda do odpadního potrubí.

Recipient. Vodní tok, kanál, nádrž, zdrž, jezero, moře nebo propustné půdní vrstvy – pokud přijímají vodu z určitého povodí nebo odpadní vodu.

Šachtice. Malá, hluboká a úzká jáma vyhloubená do země, upravená podle požadovaného účelu. Šachtice drenážní je objekt na styku více svodných drénů. Šachtice regulační umožňuje progresivně řídit vlhkostní režim půdy oboustrannou regulací úrovně hladiny podzemní vody.

Výust'. Objekt umožňující vyústění hlavních (svodných) drénů do odvodňovacího kanálu nebo přímo do recipientu odvodňovací soustavy. Výust' může být různé konstrukce a materiálového provedení, a musí zajišťovat bezproblémové a stálé odvádění drenážních vod.

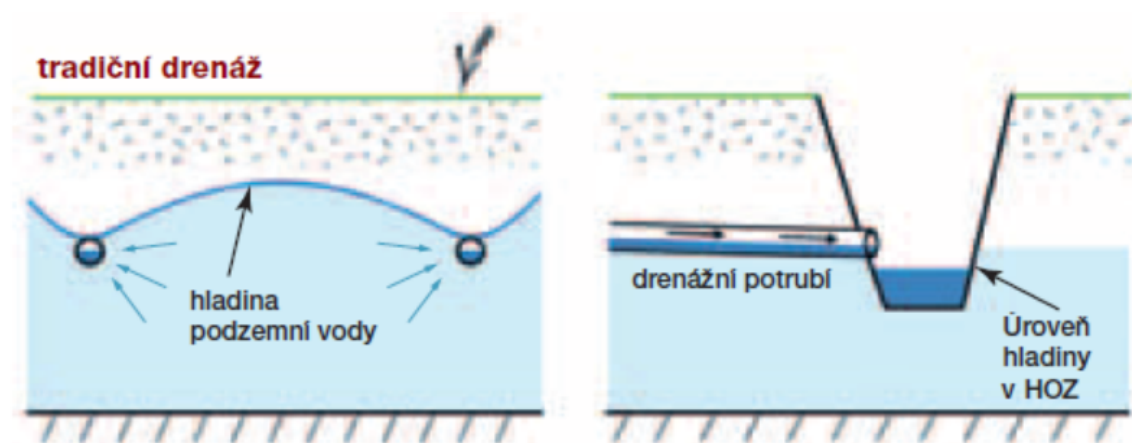
3.3.3 Přehled drenážních systémů

Intenzivní rozvoj podpovrchových potrubních odvodňovacích systémů v Evropě začal již koncem 19. století výrobou prvních moderních hliněných trubek. Významný pokrok v odvádění přebytečné vody ze zemědělské půdy potrubím však nastal až v polovině 20. století, kdy se začaly používat trubky vyrobené z polyvinylchloridu (Ondrasek a kol., 2014). Odvodňovací kanály se nejprve kopaly ručně, ale tento proces byl během let značně zmechanizován. V současnosti se pro instalaci podpovrchových drenážních systémů běžně používají velké stroje s automatickým řízením hloubky a sklonu dna kanálu (Fausey, 2005). U nás vybudované drenážní odvodnění je většinou jednofunkční – sloužící pouze k odvodnění pozemku. Přibližně od poloviny 70. let v Evropě a USA a od začátku 80. let v ČR se začaly používat dvojfunkční drenážní systémy – tedy systémy s možností regulace odtoku. Tyto systémy byly v ČR instalovány v rovinných částech produkčních zemědělských oblastí jako je Polabí a jižní Morava (Fučík, Kulhavý a Duffková, 2021). V dokumentu Ministerstva zemědělství ČR "Plán opatření pro řešení sucha prostřednictvím pozemkových úprav a adaptací hydromeliací v horizontu 2030" z června 2020 je doporučeno přebudovat stávající odvodňovací systémy na regulační systémy. Tyto systémy lze v ČR efektivně realizovat na ploše až 450 000 ha (Kulhavý, Fučík, Tlapáková, 2020).

Jednofunkční drenážní systémy

a) Plošná (systematická) drenáž

Pro podzemní odvodnění drenáží se používá trubková drenáž, kde jednotlivé drény jsou tvořeny trubkami z pálené hlíny nebo z plastů. Systematická drenáž se používá pro odvodnění větší souvislé plochy (Švehla a Vaňous, 1995). Drenážní síť tvoří sběrné drény zaústěné do jednoho svodného drénu, doplněné drenážními šachticemi a tvoří tak drenážní souřad, který může být uspořádán pravidelně či nepravidelně (Slavík, 2000). Několik souřadů tvoří drenážní skupinu s jediným vyústěním (viz obrázek 3).



Obrázek 3: Schéma tradiční drenáže (Fučík, Kulhavý a Duffková, 2021)

Páteří celé soustavy je hlavní odvodňovací kostra. Je tvořena sítí odvodňovacích kanálů (do kterých ústí jednotlivé drenážní skupiny), částí upraveného vodního toku, případně ochrannými kanály pro zachycení cizí povrchové vody (Švehla a Vaňous, 1995).

Typ sběrného drénu závisí na konfiguraci území a jeho sklonitosti. Podélnou drenáž používáme na území se sklonem menším než 5 ‰ (v písčitých půdách do 10 ‰), příčnou drenáž pro sklony 10 až 100 ‰ a protisměrnou (bleskovou) drenáž pro sklony nad 100 ‰ (Duffková, 2007). Délka sběrného drénu závisí na konfiguraci terénu; obvykle bývá 120 až 150 m, výjimečně až 200 m. Trasy sběrných drénů se navrhují v přímkách a paralelně tak, aby vytvářely pravidelné geometrické celky. Hloubky drénů se volí podle pěstovaných plodin (Poleno a kol., 1994).

Hlavním účelem svodných drénů je zajišťovat plynulý odtok vody přiváděné sběrnými drény. Trasy svodných drénů se navrhují v co nejdelších přímkách. V rovinatém území se navrhují do pravidelných ortogonálních systémů se směrovou návazností sběrných i svodných drénů. Z důvodu údržby se delší úseky svodných

drénů rozdělují na kratší (optimálně 200 m, nejvýše 400 m) drenážními šachticemi. Tyto šachtice (s optimálním vnitřním průměrem 0,8 až 1 m) se umísťují také v místech náhlé změny směru nebo sklonu dna a v místě styku tří či více svodných drénů (Kulhavý a Kulhavý, 2008). Svodný drén má být vzdálen od stromů a keřů 15 až 20 m a musí být chráněn před zarůstáním. Hloubka jeho uložení závisí na hloubce drénů sběrných (Poleno a kol., 1994).

Základní parametry (trasy svodných a sběrných drénů, objekty na nich, maximální délky a minimální sklony sběrných drénů, návrhové průměry při zvoleném materiálu atd.) se určují podle ČSN 75 4200 Hydromeliorace – Úprava vodního režimu zemědělských půd odvodněním (Kulhavý a Kulhavý, 2008).

b) Ojedinělá (sporadická) drenáž

Slouží k odvedení nadbytečné vody z lokálního zamokření v zájmovém území – zejména vody z mokřin a pramenišť (často v kombinaci se záchytnými drény a pramennými jímkami) a vody z terénních depresí. Ojedinělou drenáž tvoří jednotlivý drén nebo nepravidelná menší skupina drénů (Slavík, 2000). Pro určení návrhových parametrů je rozhodující konfigurace terénu, hydrologické a pedologické poměry, vydatnost pramene a velikost zamokřené plochy (Kulhavý a Kulhavý, 2008).

Vícefunkční drenážní systémy

Pro zavedení regulačních způsobů odvodnění, včetně rekonstrukce stávajících systémů, je využitelná norma TNV 75 4221: "Regulace a retardace odtoků na zemědělských pozemcích odvodněných trubkovou drenáží" (Slavík a Neruda, 2014).

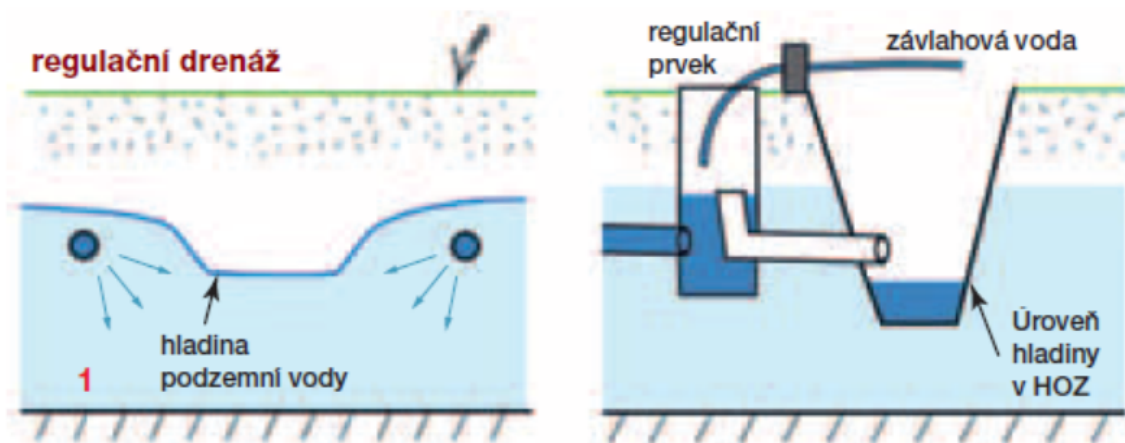
a) Regulační drenáž

Regulační drenáž představuje odvodňovací systém, umožňující optimálně řídit vlhkost půdy regulací úrovně hladiny podzemní vody (Kulhavý a Kulhavý, 2008). Tento systém spojuje závlahu a odvodnění do jediného celku. Zdroj závlahové vody může být různý, podle podmínek lokality. Při provozu regulační drenáže se rozlišují tři fáze: odvodňovací, zavlažovací a udržovací (MZe a Hydroprojekt, 2004).

Odvodňovací fáze se uplatňuje, když je půda zamokřena nadbytkem vody. V tom případě se voda odvádí odvodňovacím systémem do recipientu. V zavlažovací fázi se drény naplňují vodou přiváděnou závlahovým přivaděčem a potrubím při

uzavřeném odtoku. Tím vzniká přetlak, kterým voda proniká drenážními spárami do půdy, kterou zavlažuje (Dufková, 2007). Ve fázi udržovací dochází k doplňování vody spotřebované evapo-transpirací, průsakem apod. (MZe a Hydroprojekt, 2004).

Regulační drenáž bývá vybavena zařízením pro přívod zavlažovací vody a pro regulaci výšky hladiny podzemní vody, což se provádí úpravou odtoku vody v regulačních šachticích (Slavík, 2000). V těchto šachticích jsou umístěny regulační prvky (viz obrázek 4), které mohou být ovládány manuálně nebo automaticky. Jinak má regulační drenáž podobnou konstrukci jako tradiční plošná drenáž: obsahuje svodné drény a sběrné drény, doplněné případně o drény větrací (MZe a Hydroprojekt, 2004).



Obrázek 4: Schéma regulační drenáže (Fučík, Kulhavý a Duffková, 2021)

Instalace regulační drenáže vyžaduje vhodné terénní podmínky, zdroj vody pro plnění zavlažovací funkce, a dostatečnou hydraulickou vodivost v hloubce uložení drénů. Nejlépe se tento typ drenáže uplatňuje v údolních nivách velkých řek a podél menších vodních toků (Slavík, 2000).

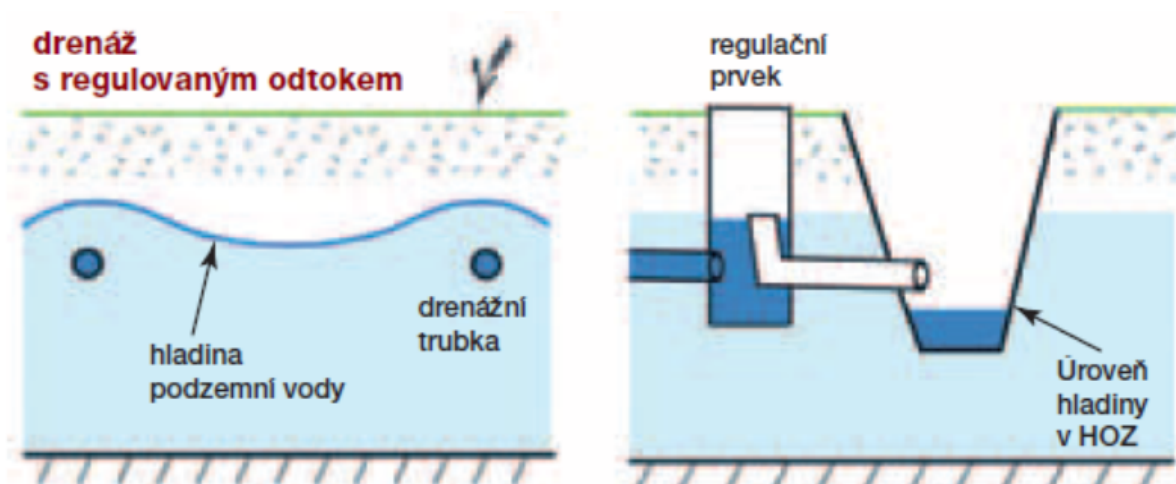
b) Drenáž s regulovaným odtokem

Tento drenážní systém zajišťuje retardaci (zpomalení odtoku) srážkové i podzemní vody. Návrh základních parametrů systému je shodný s návrhem tradiční potrubní odvodňovací soustavy. U nově navrhovaných soustav se navíc uvádí optimální počet a rozmístění retardačních šachet. Tento drenážní systém v průběhu roku nebo během daného období (určeného potřebami zemědělství) hospodaří pouze s vodou, nasbíranou ve výše položené části systému. Zdrojem jsou srážkové vody, ale mohou to být i vody podzemní, převáděné, infiltrované apod. U nových i stávajících odvodňovacích systémů se retardační prvky montují do běžných (obvykle

nadzemních) typových šachet. Nejjednodušším prvkem je dřevěná tabule nebo plastová tvarovka namontovaná na vtokovém či výtokovém potrubí (Kulhavý a Kulhavý, 2008).

Drenáž s regulovaným odtokem (viz obrázek 5) je ovladatelná drenáž umožňující podle potřeby zadržovat odtok a vzduté vody v drenážním systému (Slavík, 2000). Základem funkce systému je vzduť vody v regulačním prvku, který vodu vzdouvá proti směru odtoku. Prvky mají nastavitelnou přetokovou hranu, přes kterou odtéká přebytečná voda. Regulační prvky mohou být ovládány ručně nebo servomotorem. Ke vzdouvání vody se používají různě upravená hradítka. Dosahuje se tak efektu retardace drenážního odtoku a akumulace vody v půdním prostředí (Kulhavý a kol., 2015).

Limitujícím prvkem pro uplatnění této drenáže je to, že využívá pouze vodu, pocházející z vlastního odvodňovacího systému. Využití této drenáže je výhodné u velkoplošných odvodňovacích soustav, kde lze zabezpečit dodávku vody. Uplatňuje se tam, kde drenážní systém zachycuje přítok cizí vody (pramenné vývěry, záchytné drény). Drenáž se výhodně uplatňuje ve sféře vodohospodářských zájmů jako jsou oblasti přirozené akumulace podzemních vod, pásma hygienické ochrany povrchových vodních zdrojů aj. (Slavík, 2000). Vhodnými podmínkami pro použití tohoto drenážního systému jsou mírně svažité lokality, optimálně se sklonem terénu do 1 % u písčitých a písčitohlinitých půd, a maximálně se sklonem 4 % u ostatních druhů půd (Kulhavý a Kulhavý, 2008).



Obrázek 5: Schéma drenáže s regulačním odtokem (Fučík, Kulhavý a Duffková, 2021)

4. Charakteristika lokality Amálie

Veškerá měření probíhala na lokalitě Amálie (viz obrázek 6) nacházející se v obci Ruda zhruba 2,5 kilometrů jihozápadně od Nového Strašecí ve středočeském kraji a asi 8,5 kilometrů západním směrem od města Rakovník na pozemku s parcelním číslem 508/1. (ČÚZK, 2023)



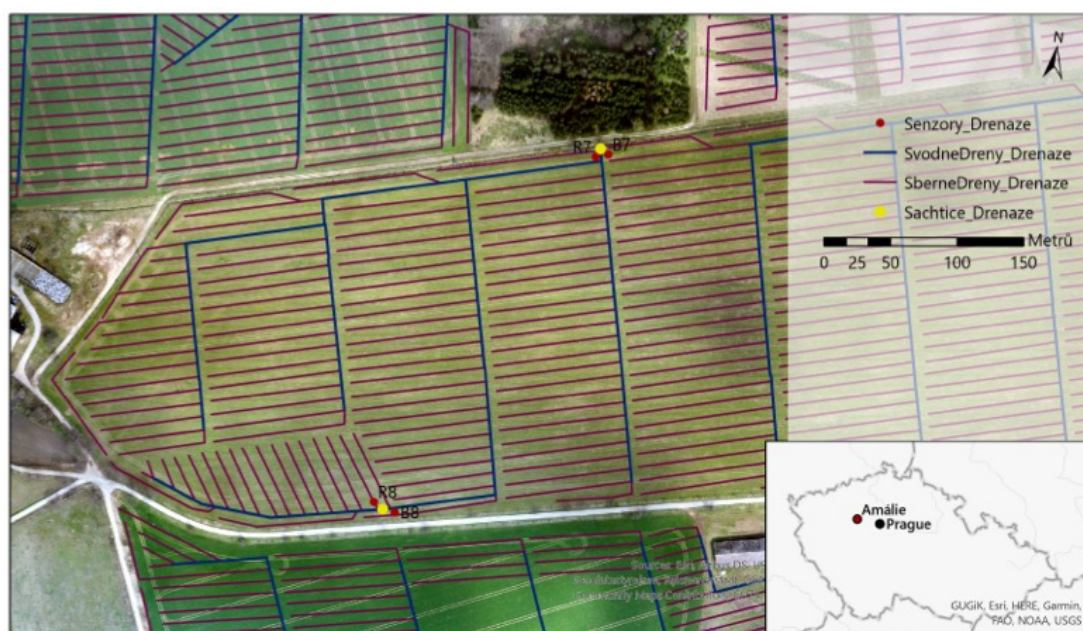
Obrázek 6: Pohled shora na lokalitu Amálie na pole kde probíhala měření

Klimatické podmínky zájmové oblasti jsou charakteristické dlouhým, teplým a mírně suchým létem, krátkým mírně teplým jarem a podzimem a krátkou mírně teplou a velmi suchou zimou s nedlouhou dobou trvání sněhové pokrývky. Amálie leží ve srážkovém stínu s průměrným ročním úhrnem srážek 534 mm a průměrnou roční teplotou je 8,5 °C (Quitt, 1971; Kahuda, 2021).

Dle geomorfologického členění spadá území Amálie do okrsku Klíčavské pahorkatiny. Tento okrsek představuje členitou pahorkatinu s erozně denudačním reliéfem se zbytky zarovnaného povrchu, která je tvořena především z proterozoických břidlic a drob s vložkami spilitů a žil křemenného porfyru. Klíčavská pahorkatina leží v západní části Lánské pahorkatiny a je rozdělena údolím řeky Klíčavy a jejími přítoky (Demek, 2006; Kahuda, 2021; Novák a Hejduk, 2011).

Pro účely měření byla konkrétně zvolena čtyři místa vyskytující se na dvou lokalitách s čísly 7 a 8 nacházející se na poli proti kolně. První lokalita s číslem 8 leží

asi 215 metrů vzdušnou čarou západním směrem od křižovatky u statku Amálie a je vzdálená 10 metrů od cyklostezky s označením 201, 0103 v nadmořské výšce 451 m. n. m. Druhá lokalita číslo 7 se nachází přibližně 450 metrů severozápadně od zmíněné křižovatky a asi 10 metrů od přilehlé polní cesty v nadmořské výšce 436 m. n. m. Lokalita 8 se nachází v téměř rovinném terénu, s průměrným sklonem 0,5 %, ten se postupně více svažuje severozápadním směrem k lokalitě 7, která se vyskytuje ve svahu s průměrným sklonem 5 %. Lokality 7 a 8 jsou od sebe vzdálené 313 metrů, na obou se nachází šachtice regulované drenáže, které rozdělují pole na regulovanou a neregulovanou stranu. Lokalita 8 je rozdělena na regulovanou stranu R8 a stranu bez regulace B8. Obdobně je to pak i pro lokalitu 7, kde R7 označuje stranu s regulacemi a B7 stranu bez regulací. Lokality 7 a 8 s regulovanými (R) a neregulovanými (B) drenážemi jsou zobrazeny v přehledové mapě na obrázku 7.



Obrázek 7: Mapa ukazuje na severu lokalitu 7 s regulovanou (R7) a neregulovanou (B7) stranou a na jihu lokalitu 8 s regulovanou (R8) a neregulovanou (B8) stranou

5. Metodika

5.1. Odběr neporušeného vzorku

Pro zjištění hydrofyzikálních vlastností a hodnot půdy byly z pozorovaných lokalit R7, B7, R8 a B8 v hloubkách 20, 40 a 60 cm odebrány neporušené půdní vzorky. Vzorky byly odebrány pomocí kovového odběrného válečku (tzv. Kopeckého válečku) o známém objemu 100 cm³.

Pro každou výše jmenovanou lokalitu byla vyhloubena jáma s plochým dnem nejprve o hloubce 20 cm, dno bylo srovnáno a začištěno a z místa, které neobsahovalo žádné viditelné kamínky, kořínky či jiné narušení byly odebrány dva vzorky. Ty se odebíraly pomocí Kopeckého válečku, odběrné hlavy a speciální palice s plastovou údernou plochou.

Kopecký váleček byl nasazen do odběrné hlavy tak, aby strana s ostrým okrajem válečku směřovala ven, přiložila se na zvolené místo a pomocí úderů do odběrné hlavy palicí byl zatlučen, tak aby byl celý v půdě. Poté byla za pomoci lopatky a zednické lžíce odstraněna okolní zemina a váleček byl vyrýpnut z půdy. Přebytečná zemina byla opatrně seříznuta ostrým nožem a zarovnána s okrajem válečku (viz obrázek 8). Pokud se po seříznutí u povrchu objevil větší kámen, kořínek či jiné další porušení vzorku, byl celý proces odběru zopakován. Začištěná strana válečku byla zavíčkována plastovým víčkem a váleček byl vyjmut z odběrné hlavy. Následně byla začištěna a zavíčkována i druhá strana válečku.



Obrázek 8: Zarovnání neporušeného půdního vzorku nožem

Poté byla jáma prohloubena do 40 cm a celý proces odběru se opakoval. Stejný postup byl proveden i pro hloubku 60 cm. Odběry v hloubkách 20, 40 a 60 cm byly analogicky provedeny na všech zvolených lokalitách. Všechny válečky byly ihned po odběru umístěny do speciálního kufru (aby se zamezilo jejich vysychání a tím ovlivnění následných hodnot).

5.2. Příprava vzorků

V laboratoři byly odebrané vzorky i s platovými víčky co nejdříve zváženy. Následně byla víčka sundána a zvážena samostatně. Válečky byly položeny na sklíčka a ta byla následně vložena do sušící pece, kde byly ponechány při teplotě 60 °C po dobu 72 hodin. Poté byly vyndány a znovu i se sklíčky zváženy. Následně z nich byla zemina přemístěna do plastových uzavíratelných sáčků a válečky i sklíčka byly zváženy samostatně.

5.3. Objemová hmotnost

Nejprve byla vypočítána hmotnost vzorku po odběru (celková hmotnost vzorku) m_s [g] odečtením zvážených víček a prázdného válečku od celkové hmotnosti

vzorku. Poté byla vypočítána hmotnost vysušeného vzorku m_m [g] odečtením zvážených sklíček a prázdného válečku od hmotnosti vysušeného vzorku. Objemová hmotnost půdy neboli hustota půdního vzorku ρ_s [g.cm⁻³] byla získána jako podíl hmotnosti vysušeného vzorku m_m a celkového objemu vzorku V_s [cm³], který je v případě Kopeckého válečku 100 cm³. Objemová hmotnost ρ_s byla vypočítána podle vzorce z kapitoly 3.2.2.

5.4. Objemová vlhkost

Objem vody V_w [cm⁻³] neboli hmotnost vody m_w [g] byl získán rozdílem celkové hmotnosti vzorku m_s a hmotnosti vysušeného vzorku m_m .

$$V_w = m_w = m_s - m_m \quad (7)$$

Následně byla vypočítána objemová vlhkost θ [-] jako podíl objemu vody V_w a celkového objemu vzorku V_s podle vzorce z kapitoly 3.2.4.

5.5. Pórovitost

Pórovitost P [-] byla stanovena jako 1 méně podíl objemové hmotnosti ρ_s a hustoty minerálu ρ_m [g.cm⁻³] (pro ρ_m byla použita hodnota křemene 2,65 [g.cm⁻³]).

$$P = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_m} \quad (8)$$

5.6. Stanovení půdní zrnitosti hustoměrnou metodou

Zrnitost odebraných porušených půdní vzorků byla měřena Casagrandeho hustoměrnou metodou. Nejprve byl porušený půdní vzorek vysušen a následně byl vložen do hmoždíře, kde byly půdní agregáty mechanicky rozmělněny. Poté byla využita suchá metoda prosetí pro oddělení jemnozeme od skeletu, za použití síta o velikosti ok 2 mm (viz obrázek 9). Následně byla pro hustoměrnou metodu připravena 30 g navážka jemnozeme. Současně bylo také naváženo cca 15 g jemnozeme pro korekci hmotnosti.



Obrázek 9: Rozmělnění porušeného půdního vzorku a jeho prosévání přes síto o velikosti ok 2 mm

Dále byla provedena chemická dispergace 30 g navážené jemnozeme za pomoci dispergačního činidla Hexametafosfátu sodného (NaPO_3)_n neboli Grahamovi soli s hmotnostní koncentrací 43,7 g.l⁻¹. Pro smíchání byl použit poměr 1 ml NaPO_3)_n na 1 g jemnozeme. Do kádinky s touto suspenzí byla dolita demineralizovaná vod tak, aby byl celkový objem 200 ml. Poté byla suspenze ponechána v klidu po dobu 24 hodin, aby došlo k odstátí.

Následně byla provedena mechanická dispergace získané suspenze a to jejím vařením po dobu 20 minut za stálého míchání. Dále byl vzorek v kádince ochlazen ve vodní lázni a za použití mokré cesty byl proset přes síto o průměru ok 0,25 mm (viz obrázek 10). Neprosetý, zbylý materiál na síti byl vložen do pece, vysušen a zvážen.



Obrázek 10: Prosévání vzorku mokrou cestou přes síto o velikosti ok 0,25 mm

Suspenze přecezená přes síto s průměry ok 0,25 mm, byla přelita do odměrného válce a dolita demineralizovanou vodou tak, že celkový objem ve válci dosahoval 1000 ml (viz obrázek 11). Poté byla stejnoměrnými vertikálními pohyby míchána po dobu jedné minuty. Ihned po rozmíchání bylo na stopkách spuštěno měření času. Hustota a teplota suspenze byla měřena v časových intervalech: 30 s; 1 min; 2 min; 3 min; 4 min; 5 min; 15 min; 45 min; 2 hod; 2,5 hod; 5 hod a cca 24 hod od zahájení měření. Hustota byla měřena ponorným hustoměrem, který byl vždy ustálen pro přesné odečtení hustoty ze stupnice a následně vytažen. Teplota byla měřena až po vytažení hustoměru ponořením skleněného teploměru do suspenze. Vždy po vytažení byly hustoměr i teploměr opláchnuty demineralizovanou vodou. Pro všechna měření během prvních pěti minut byla použita stejná teplota suspenze jako její naměřená teplota těsně před začátkem míchání.



Obrázek 11: Příprava na měření hustot suspenzí v odměrných válcích

Po dokončení měření hustoměrné metody bylo přikročeno k výpočetní části. Referenční hustota vzorku ρ_{ref} byla spočítána jako součet hustoty demineralizované vody ρ_w [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] a dispergačního činidla v závislosti na teplotě podle následujícího vzorce:

$$\rho_w = \frac{a_0 \cdot a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2}{1 + b \cdot t} \quad (9)$$

kde a_0 je rovno $999,8395 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a_1 je rovno $16,95258 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}(\text{°C}^{-1})$, a_2 je rovno $-7,990513 \cdot 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}(\text{°C}^{-2})$, b je rovno $0,0168872 \text{ °C}^{-1}$ a t [°C] je teplota demineralizované vody. Zjednodušeno dle Durner a kol. (2017).

Následně byla vypočtena hustota referenčního vzorku ρ_{ref} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] podle vzorce:

$$\rho_{ref} = \rho_w + \frac{m_{disp}}{V_{ref}} \quad (10)$$

kde m_{disp} [kg] je hmotnost dispergačního činidla a V_{ref} [m^3] je objem referenčního vzorku (Durner a kol., 2017).

Velikost průměru náhradního zrna r [m] byla vypočtena podle Stokesova zákona:

$$r = \sqrt{\frac{9 \cdot \eta \cdot h_r}{2 \cdot g \cdot (\rho_M - \rho_{ref})}} \quad (11)$$

kde η [N.m⁻².s] je dynamická viskozita vody, h_r [m] je efektivní hloubka hustoměru, tíhové zrychlení g je rovno 9,81 m.s⁻² a ρ_m [kg.m⁻³] je zdánlivá hustota pevných částic (pro výpočet bylo použito $\rho_m = 2\,650$ kg.m⁻³) (Stokes, 1851).

Efektivní hloubka hustoměru h_r [m] byla vypočtena podle následujícího vzorce:

$$h_r = \frac{(S - \rho_s)}{S} \cdot L + \frac{h}{2} - \frac{V}{2 \cdot F} \quad (12)$$

kde S [-] je počet velkých dílků na stupnici hustoměru, ρ_s [kg.m⁻³] je hustota suspenze v odpovídajícím čase, L [m] je délka stupnice, h [m] je délka od krku baňky hustoměru k její špičce, V [m³] je objem těla baňky hustoměru a F [m²] plocha průřezu baňky hustoměru.

Dále byl vypočten hmotnostní podíl proseté frakce zrn N [%], který byl menší nebo roven průměru náhradního zrna a to podle vzorce:

$$N = \frac{100}{m_s} \cdot \frac{\rho_M}{\rho_M - \rho_{ref}} \cdot (\rho_s - \rho_{ref}) \quad (13)$$

kde m_s [kg] je hmotnost suché navážky a ρ_M [kg.m⁻³] je zdánlivá hustota pevných částic.

Následně byla pomocí dvou půdních vzorků (vysušené a nevysušené zeminy) určena hmotnost suché navážky. Půdní vzorky byly zváženy, poté vysušeny v peci při teplotě 60 °C pod dobu 24 hodin a následně znovu zváženy. Ze vzorků byl zjištěn obsah vody, podle kterého byla poté stanovena korekce pro výpočet hmotnosti suché navážky. Obsah vody w [-] byl vypočten podle vzorce:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \quad (14)$$

kde m_1 [kg] je hmotnost zeminy před vysušením a m_2 [kg] je hmotnost zeminy po vysušení.

Na závěr byla vypočtena hmotnost suché navážky m_s [kg] podle následujícího vzorce:

$$m_s = \left(1 - \frac{w_1 + w_2}{2}\right) \cdot m \quad (15)$$

kde w_1 a w_2 [-] jsou obsahy vody ve vzorcích zeminy a m [kg] je hmotnost navážky.

5.7. Senzory TOMST TMS-4

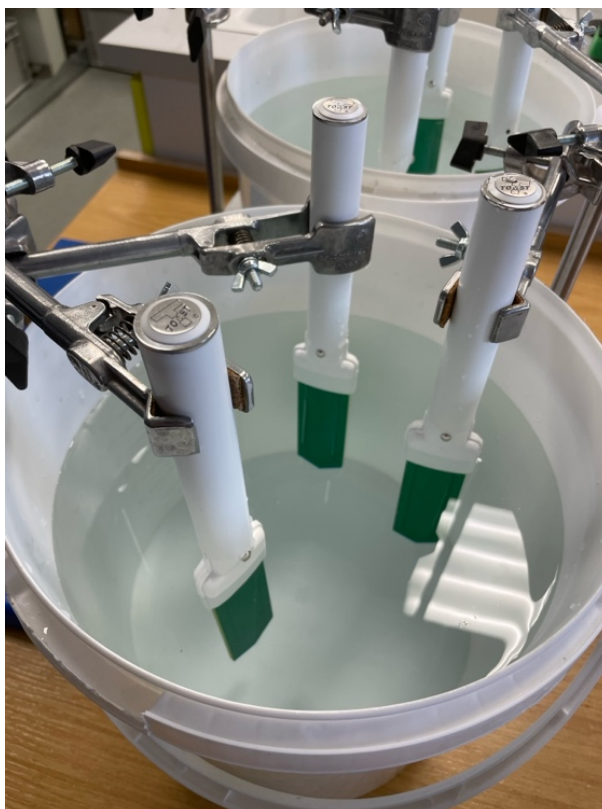
5.7.1. Standardizace a kalibrace senzorů

Pro standardizaci byly nejprve senzory TOMST TMS-4 připojeny k počítači pomocí čtečky a přepnuty z 15 min intervalu měření na interval 1 min. Následně byly senzory položeny na okraj stolu, tak aby byla vlhkostní čidla, respektive plochy, které měří vlhkost, celá ve vzduchu bez kontaktu se stolem. Takto byly v klidu ponechány 10 min. Poté byly senzory postupně svise zasunuty do kbelíku se skleněnými kuličkami tak, aby byly zcela ponořeny až po plastové (bílé) kryty pro elektronické součásti (viz obrázek 12). Zároveň se vlhkostní senzory nedotýkaly kbelíku a ani vzájemně mezi sebou, aby nedošlo k ovlivnění naměřených hodnot signálu. Opět byly takto ponechány 10 min.



Obrázek 12: Senzory TOMST TMS-4 v kbelíku se sklenými kuličkami

Následně byla do kbelíku přilita demineralizovaná voda a to do úrovně skleněných kuliček. Senzory byly ve vodě ponechány 10 min. Na závěr byly senzory umístěny do nového kbelíku s demineralizovanou vodou (bez skleněných kuliček). Tyto senzory byly uchyceny do držáků tak, aby byly kolmo ponořeny ve vodě, aniž by se dotýkaly dna, stěn nebo vzájemně mezi sebou (viz obrázek 13). Opět byly takto ponechány 10 min.



Obrázek 13: Senzory TOMST TMS-4 v kbelíku s demineralizovanou vodou

Následně byly senzory pomocí čtečky připojeny k počítači a byly z nich staženy naměřené intervaly signálů. Ty byly následně zprůměrovány pro každé jednotlivé prostředí zvlášť. Po zprůměrování byly signály každého senzoru nastaveny tak, aby odpovídaly získané průměrné hodnotě, pro minimalizaci odchylek měření mezi jednotlivými senzory. Na závěr byly senzory přepnuty zpět do 15 min intervalu měření.

Po standardizaci byly senzory instalovány na vybraných lokalitách, kde následně probíhala i kalibrace dle manuálu od výrobce. Výsledné zkalibrované hodnoty, naměřené pomocí senzorů, byly pro kontrolu porovnány s objemovou půdní vlhkostí z odebraných Kopeckého válečků a s vlhkostí naměřenou metodou TDR.

5.7.2. Osazení senzorů do půdy

Pro monitorování vlhkostí na lokalitě Amálie byly použity vlhkostní-teplotní senzory Tomst TMS-4 zakopávacího typu. Tyto senzory byly osazeny na lokalitě 7, konkrétně na části s regulovanou drenáží R7 a části bez regulace B7. Analogicky pak byly senzory osazeny i na lokalitě 8, kde byly umístěny na regulovanou část R8 a neregulovanou část B8. Senzory byly pro všechna místa pozorování (R7, B7 a R8, B8) osazeny do hloubek 20, 40 a 60 cm.

Terénní práce byly zahájeny vykopáním 60 cm hluboké jámy se zarovnanou kolmou čelní stěnou. Následně byly do této stěny osazeny tři senzory pod sebou v příslušných hloubkách. Nejprve byl kolmo do stěny ve výše zmíněných hloubkách předražen otvor, pomocí kovového předrážedla a palice. Následně byl do otvoru zasunut senzor, tak aby celá část vlhkostního čidla byla v kontaktu s půdou (viz obrázek 14). Okraje v okolí senzoru byly pro co nejlepší kontakt vyplněny zeminou. Senzor byl do otvoru umístěn plochou stranou kolmo dolů tak, aby na jeho vlhkostním čidle nestála srážková voda. A poté byl konec kabelu od senzoru, opatřený konektorem pro čtení dat, vytažen kousek nad povrch. Následně byl stejný postup proveden pro osazení senzoru v hloubce 40 cm a poté 20 cm.



Obrázek 14: Osazené senzory TOMST TMS-4 v půdě v hloubkách 20, 40 a 60 cm

Dále byl nejhlubší (60 cm) senzor opatrně obsypán zeminou a ta byla postupně zhuťněna tak, aby nedošlo k pohnutí či poškození senzoru. Tímto způsobem byly postupně zasypány a upěchovány všechny tři senzory, dokud nedošlo k vyplnění celé jámy. Na závěr byly konce všech kabelů od senzorů zabezpečeny krycími plastovými čepičkami, svázané k sobě, umístěné do kovové klece pro jejich ochranu (viz obrázek 15). A vedle klece byl zatlučen dřevěný kůl (kvůli lepší viditelnosti při pohybu zemědělských strojů).



Obrázek 15: Vytažené konce kabelů od senzorů TOMST TMS-4 opatřené krycími plastovými čepičkami vytažené na povrch a umístěné v ochranné kovové kleci

Tento postup byl proveden pro všechna místa monitorování (R7, B7, R8 a B8) kde byly senzory osazeny analogicky ve stejných hloubkách.

5.8. Měření metodou Time Domain Reflectory (TDR)

Objemová půdní vlhkost byla měřena metodou TDR (Time Domain Reflectory) pomocí vlhkostního senzoru TRIME – PICO 64. Objemová vlhkost byla měřena na lokalitách 7 a 8 v neregulované i regulované části drenáží. Konkrétně pak na místech R7, B7, R8 a B8 v hloubce 0 až 15 cm pod povrchem (povrchové měření) a v hloubce 20 cm v již vykopané jámě pro odběr neporušeného vzorku popsané výše (v kapitole 5.1.)

Pro měření byly vrtačkou předvrtány dva otvory do hloubky 15 cm. Byl použit vrták o průměru 0,6 cm a otvory byly od sebe vzdáleny 4 cm. Pro povrchové měření 0 až 15 cm byly otvory vrtány kolmo k povrchu země (vertikálně) a pro měření v hloubce 20 cm byly vyvrtány otvory kolmo k odkryté půdní stěně (horizontálně). Poté byl do předvrtaných otvorů vsunut vlhkostní senzor TRIME – PICO 64 (viz

obrázek 16), kterým byla změřena objemová půdní vlhkost. Tyto data byly přes Bluetooth odeslány do dataloggeru.



Obrázek 16: Měření půdní vlhkosti metodou TDR pomocí vlhkostního senzoru TRIME – PICO 64

Vlhkostní senzor TRIME – PICO 64 byl kalibrován v souladu s manuálem od výrobce podle jeho kalibračních klíčů.

5.9. Vyhodnocení naměřených dat

Pro výpočty objemové hmotnosti, objemové vlhkosti a pórovitosti stanovené z neporušených půdních vzorků (Kopeckého válečků) byl použit program Excel. Tento program byl dále využit jak pro výpočty zrnitosti naměřené z porušených půdních vzorků tak i pro vyhodnocení naměřených dat půdních vlhkostí a teplot pomocí senzorů TOMST TMS-4. Vlhkosti půdy získané pomocí metody měření TDR byly také vyhodnoceny pomocí Excelu.

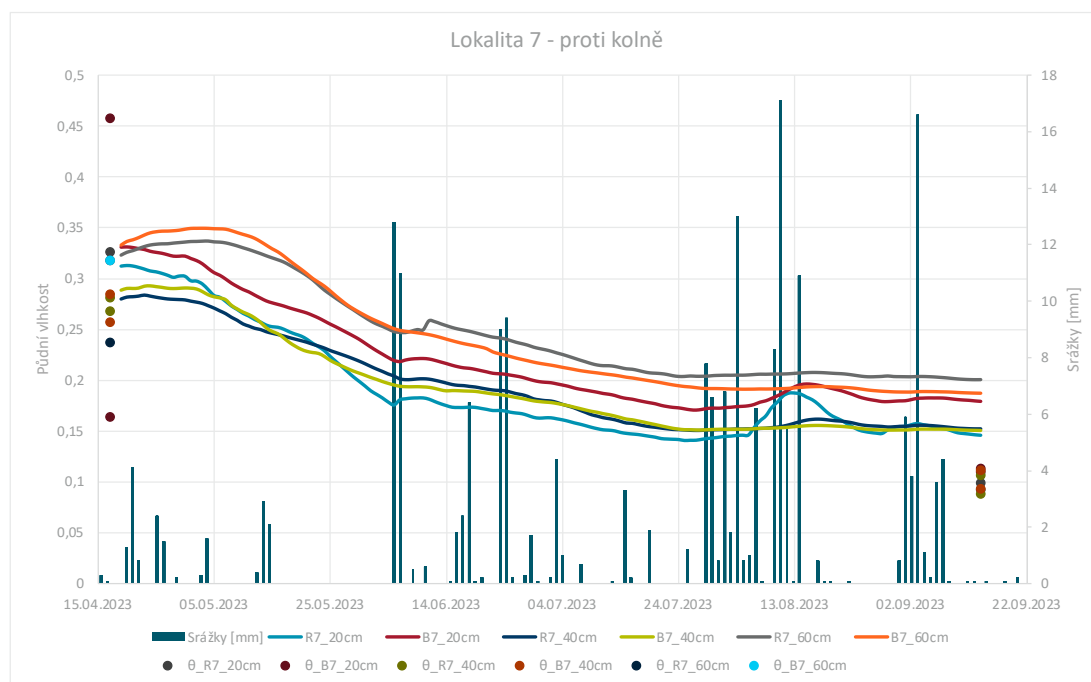
6. Výsledky

6.1. Porovnání vlhkostí půdy

6.1.1. Porovnání senzorů TOMST TMS-4 a objemové vlhkosti

Vlhkosti naměřené senzory TOMST TMS-4 na lokalitách 7 a 8 byly pro kontrolu porovnány s objemovými vlhkostmi z Kopeckého válečků odebraných dne 17.04.2023 a dne 14.09.2023 ve shodných hloubkách jako osazené senzory TMS-4, tedy v 20, 40 a 60 centimetrech. Průběhy vlhkostí naměřené senzory TMS-4 během sledovaného období byly vyneseny v závislosti na srážkách.

Obrázek 17 znázorňuje rozdíly naměřených vlhkostí mezi regulovanou a neregulovanou částí na lokalitě 7 ve všech hloubkách.

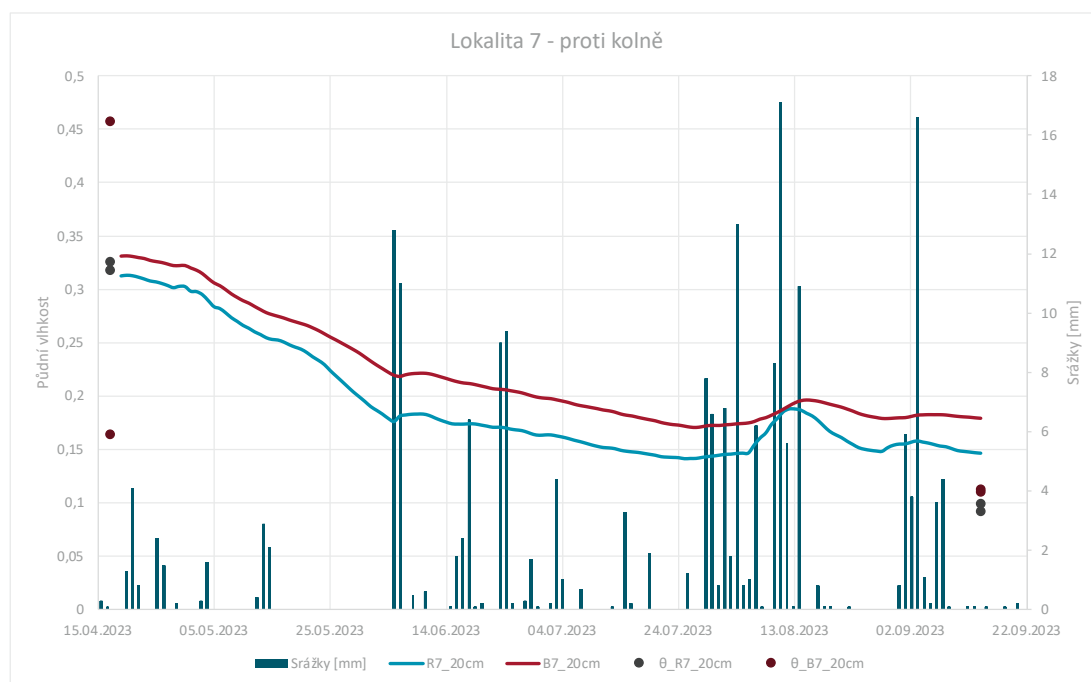


Obrázek 17: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 7 ve všech měřených hloubkách

Z obrázku 17 jsou patrné rozdíly vlhkostí mezi stranou regulovanou drenáží R7 a stranou bez regulací B7 (naměřené pomocí senzorů TMS-4) porovnané ve všech hloubkách (20, 40, 60 cm). Nevyšší vlhkost byla naměřena v hloubce 60 cm na neregulované části a nejnižší vlhkost pak ve 20 cm regulované části. Dále byl průběh naměřených vlhkostí porovnán v závislosti na úhrnu srážek v pozorovaném období. Během června a zejména pak srpna napršel výraznější objem srážek a je možné pozorovat zvýšení vlhkostí napříč hloubkami, převážně pak ve 20 cm. Vypočtené objemové vlhkosti z odebraných Kopeckého válečků jsou proti naměřeným vlhkostem

senzory TMS-4 všeobecně nižší. Jednotlivým hloubkám a bližšímu porovnání regulované a neregulované části bude věnovaná pozornost v následujících grafech.

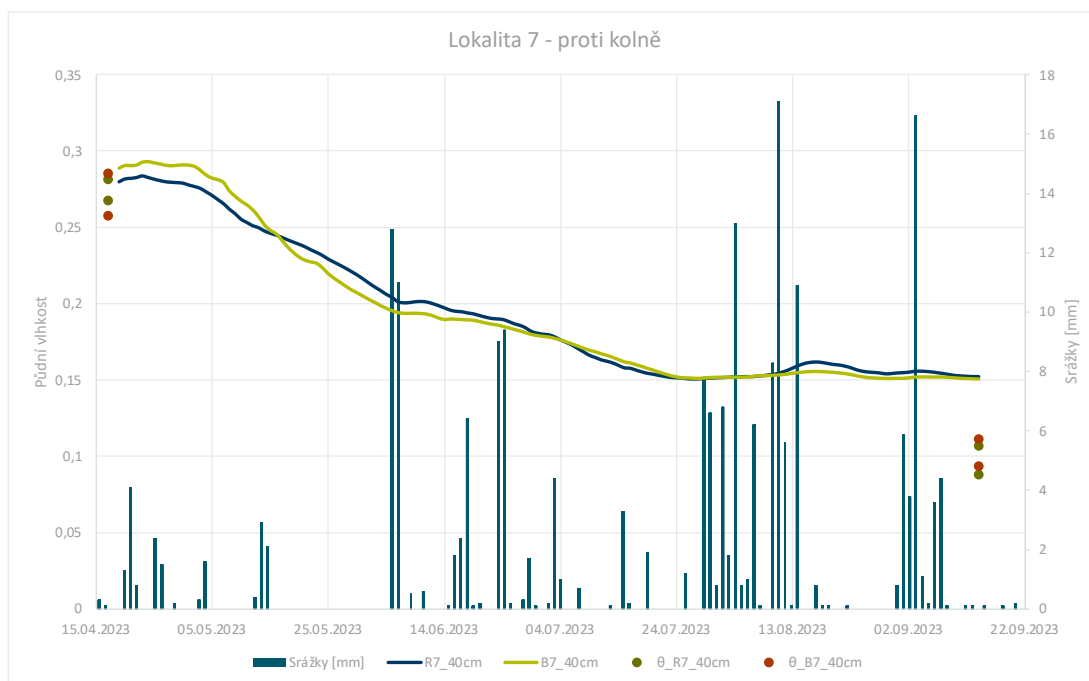
Obrázek 18 ukazuje rozdíly naměřených vlhkostí mezi regulovanou a neregulovanou částí na lokalitě 7 v hloubce 20 cm.



Obrázek 18: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 7 ve 20 cm

Na obrázku 18 je možné pozorovat vyšší vlhkost u neregulované části než u části s regulovanou drenáží. Nejvyšší naměřená vlhkost 33% v hloubce 20 cm byla dosažena v části bez regulované drenáže B7 a to hned na samém počátku měření dne 19.04.2023. V průběhu času se vlhkost snižovala, kromě června a hlavně pak srpna kde vlhkost stoupla v důsledku výraznějších srážek. Naopak nejnižší vlhkost 14% byla naměřena v červenci na části s regulovanou drenáží R7. Objemová vlhkost vypočtená z Kopeckého válečků odebraných dne 17.04.2023 odpovídá naměřené vlhkosti senzory pouze pro lokalitu R7, pro lokalitu B8 byla objemová vlhkost zatížena výraznou odchylkou mezi dvěma odebranými válečky, pravděpodobně způsobenou chybou při jejich odběru. Objemová vlhkost zjištěná z Kopeckého válečků odebraných dne 14.09.2023 byla nižší než vlhkost naměřená senzory. Válečky ale potvrzují nižší naměřenou vlhkost senzory na regulované části R7 oproti neregulované části B7.

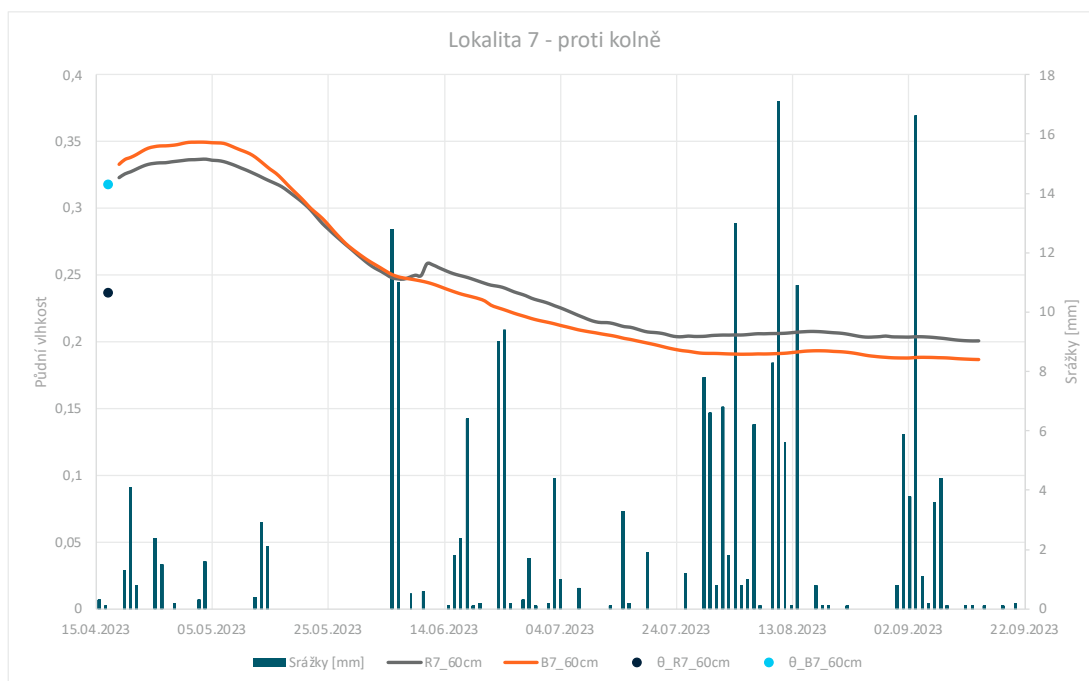
Obrázek 19 vyjadřuje naměřené vlhkosti mezi regulovanou drenáží a částí bez regulace na lokalitě 7 v hloubce 40 cm.



Obrázek 19: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 7 ve 40 cm

Na obrázku 19 jsou naměřené vlhkosti mezi regulovanou a neregulovanou částí velmi podobné, na počátku byla naměřena vyšší vlhkost u neregulované části B7, ale v průběhu došlo k vyrovnání a poté byla vlhkost na regulované části R7 dokonce mírně vyšší díky jejímu pomalejšímu vysychání, ale následně došlo téměř k opětovnému vyrovnání mezi částmi R7 a B7. Výraznější srážky v období srpna měly vliv na regulovanou část R7, kde došlo k mírnému nárůstu vlhkosti. Naměřené rozdíly ve vlhkostech mezi regulovanou R7 a neregulovanou B7 byly velmi malé, maximální naměřený rozdíl byl pouze 0,9 %. Objemové vlhkosti z odebraných válečků na počátku (dne 17.04.2023) odpovídají naměřeným vlhkostem senzory a potvrzují, že byla vlhkost na neregulované části v toto období skutečně vyšší. Na konci časové řady (dne 14.09.2023) byly objemové vlhkosti nižší než vlhkosti naměřené senzory.

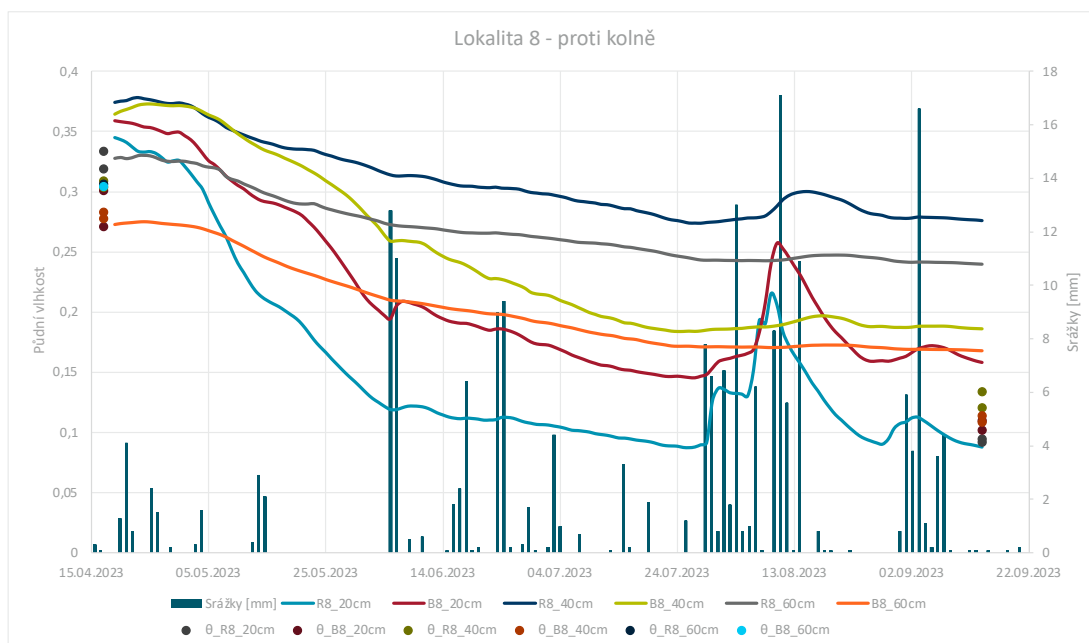
Obrázek 20 ukazuje rozdíly mezi naměřenými vlhkostmi na regulované a neregulované části na lokalitě 7 v hloubce 60 cm.



Obrázek 20: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 7 v 60 cm

Na obrázku 20 je na počátku měření možné sledovat vyšší vlhkost u neregulované části B7, poté vlhkost klesala a vyrovnala se regulované části R7. Po srážkách, které spadly v průběhu června se vlhkost na regulované části R7 zvýšila a již zůstala vyšší až do konce měření, oproti B7. Objemová vlhkost z odebraných válečků ze dne 17.04.2023 odpovídá vlhkosti naměřené senzory, avšak pouze pro část bez regulace B7.

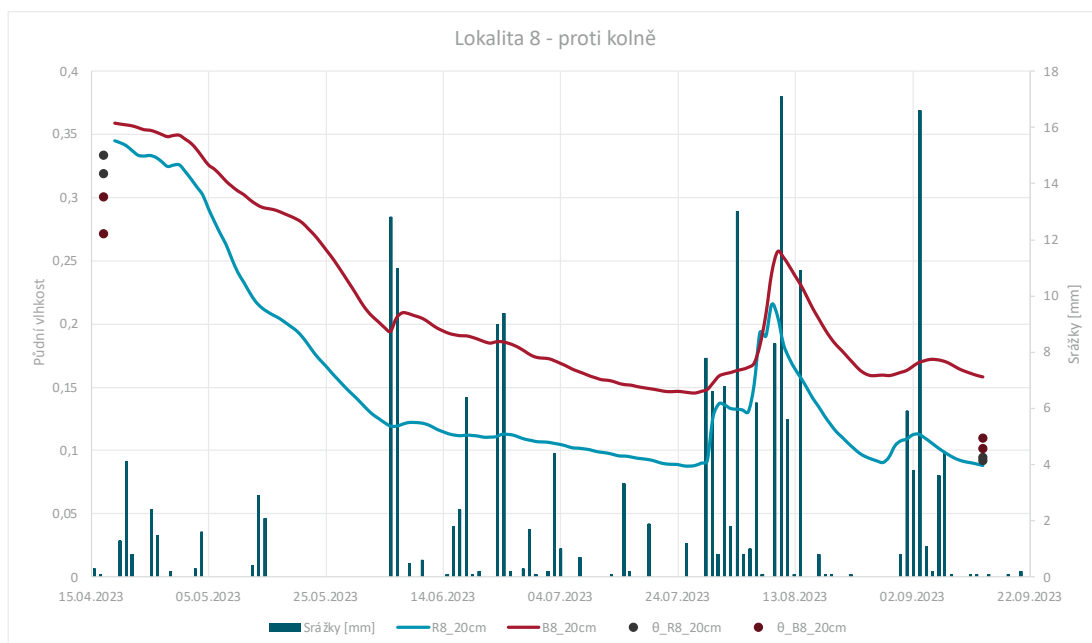
Obrázek 21 znázorňuje rozdíly naměřených vlhkostí mezi regulovanou a neregulovanou částí na lokalitě 8 ve všech hloubkách.



Obrázek 21: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 8 ve všech měřených hloubkách

Z obrázku 21 jsou patrné rozdíly vlhkostí mezi stranou regulovanou drenáží R8 a stranou bez regulací B8 (naměřené pomocí senzorů TMS-4) porovnané ve všech hloubkách (20, 40, 60 cm). Nejvyšší vlhkost byla naměřena v hloubce 40 cm na regulované části R8 a nejnižší vlhkost pak v hloubce 20 cm na regulované části R8. Dále byl průběh naměřených vlhkostí porovnán v závislosti na úhrnu srážek v pozorovaném období. Během června a zejména pak srpna napršel výraznější objem srážek a je možné pozorovat zvýšení vlhkostí napříč hloubkami, převážně pak ve 20 cm. Vypočtené vlhkostranné objemy z odebraných Kopeckého válečků jsou proti naměřeným vlhkostranným objemům senzory TMS-4 všeobecně mírně nižší. Jednotlivým hloubkám a bližšímu porovnání regulované a neregulované části na lokalitě 8 bude věnována pozornost v následujících grafech.

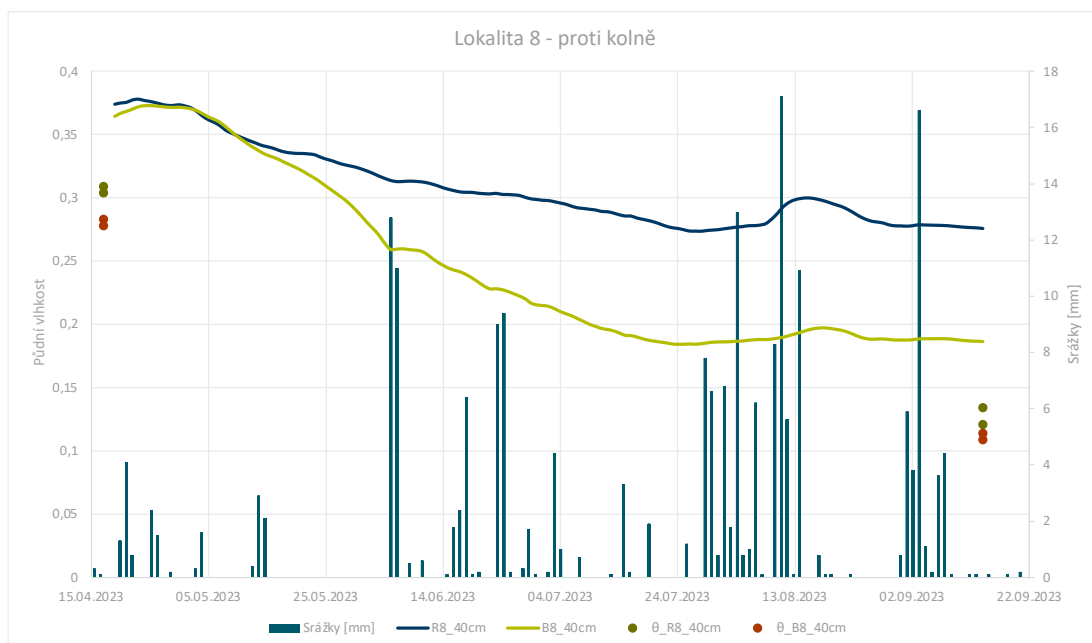
Obrázek 22 ukazuje rozdíly naměřených vlhkostí mezi regulovanou a neregulovanou částí na lokalitě 8 v hloubce 20 cm.



Obrázek 22: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 8 ve 20 cm

Na obrázku 22 je možné pozorovat vyšší vlhkost na neregulované části B8, kde byla oproti regulované části R8 vlhkost vyšší po celou dobu až na jednu výjimku, během začátku července. V hloubce 20 cm byla na regulované části R8 naměřena nejnižší vlhkost, pouhých 8,7 %, což už bylo pod bodem vadnutí. Během měřeného období byly zaznamenány dvě výraznější reakce na srážky. Konkrétně během června a především pak během srpna stoupla vlhkost u obou částí (R8 i B8) o více jak 10 %. Vzápětí velmi rychle zase klesla. Objemová vlhkost z Kopeckého válečků odebraných dne 17.04.2023 byla nižší než vlhkost naměřená senzory. Objemová vlhkost z válečků ze dne 14.09.2023 byla oproti neregulované části B8 nižší, ale shoduje se regulovanou částí R8 a také potvrdila vyšší vlhkost naměřenou senzory na neregulované části B8.

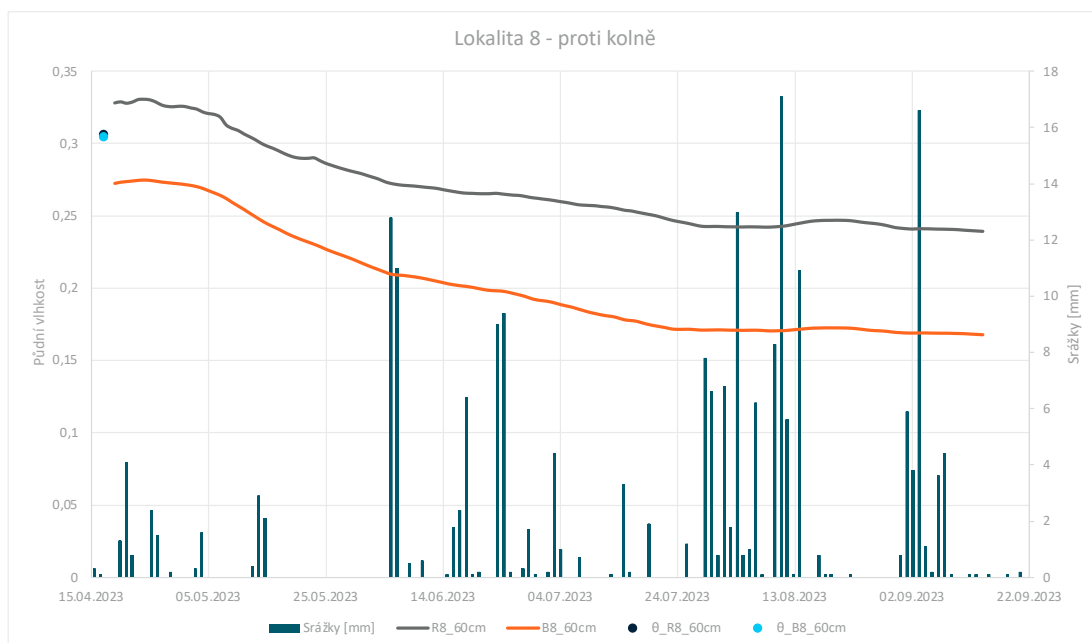
Obrázek 23 vyjadřuje rozdíly mezi naměřenými vlhkostmi na regulované a neregulované části na lokalitě 8 v hloubce 40 cm.



Obrázek 23: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 8 ve 40 cm

Na obrázku 23 jsou vlhkosti na počátku měření velmi podobné (mírně vyšší vlhkost u regulované drenáže R8). V průběhu času obě vlhkosti klesají, přičemž regulovaná část R8 klesá pomaleji. V období srpna během výraznějších srážek došlo ke zvýšení vlhkostí na obou částech, zejména na regulované části R8. Nejvyšší vlhkost byla naměřena na počátku měření na regulované části R8 kde v hloubce 40 cm dosahovala hodnoty 37,8 %. Objemové vlhkosti z odebraných válečků ze dne 17.04.2023 byly nižší než vlhkosti naměřené pomocí senzorů, ale potvrdily vyšší vlhkost na regulované části R8. Objemové vlhkosti z druhého odběru dne 14.09.2023 byly oproti vlhkostem ze senzorů výrazně nižší, avšak potvrdily vyšší vlhkost na regulované části R8.

Obrázek 24 ukazuje rozdíly mezi naměřenými vlhkostmi na regulované a neregulované části na lokalitě 8 v hloubce 60 cm.



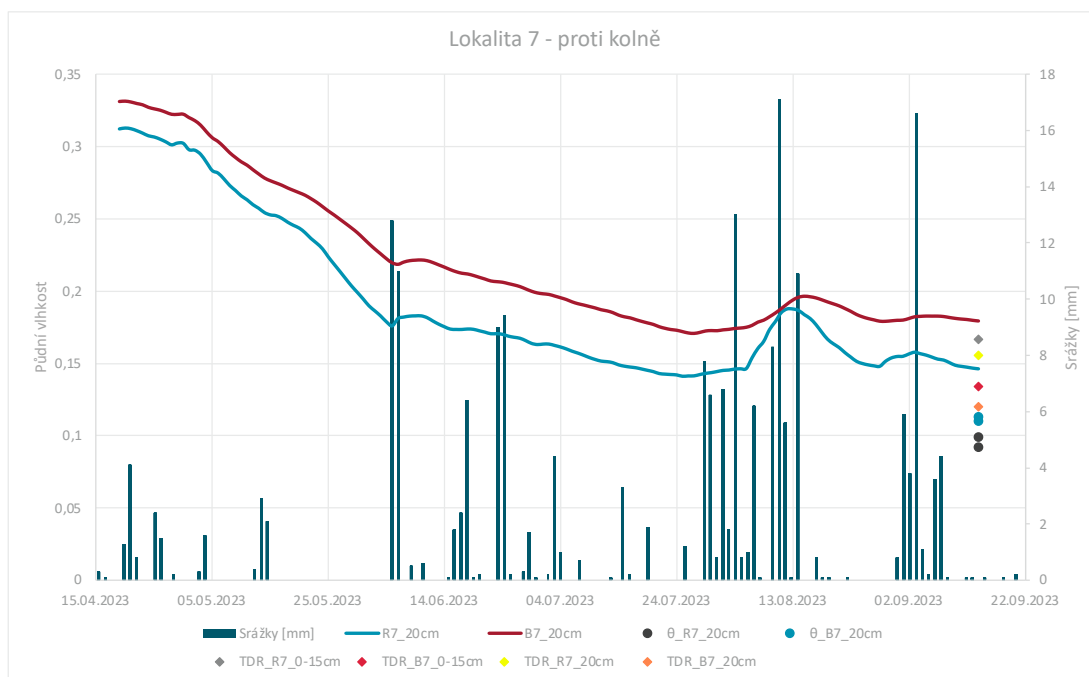
Obrázek 24: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 8 v 60 cm

Na obrázku 24 byla naměřená vlhkost na regulované části R8 po celou dobu měření vyšší než na části bez regulací B8. Maximální rozdíly mezi vlhkostmi na R8 a B8 dosahovaly až 8 %. Průběh a pokles naměřených vlhkostí byl po celou dobu velmi pozvolný. Objemové vlhkosti z Kopeckého válečků odebraných dne 14.09.2023 se oproti vlhkostem naměřených pomocí senzorů liší o méně jak 3 %.

6.1.2. Porovnání objemové vlhkosti a metody TDR

Objemové vlhkosti vypočtené pomocí Kopeckého válečků odebraných dne 14.09.2023 byly pro kontrolu porovnány s vlhkostmi naměřenými s využitím metody TDR provedenou ve stejný den. Měření pomocí TDR bylo provedeno na lokalitě 7 v hloubkách 0 až 15 cm pod povrchem a v hloubce 20 cm pod povrchem. Na lokalitě 8 bylo měřeno pouze v hloubkách 0 až 15 cm pod povrchem. Výsledky byly vyneseny do grafu spolu s vlhkostmi naměřenými prostřednictvím senzorů TMS-4.

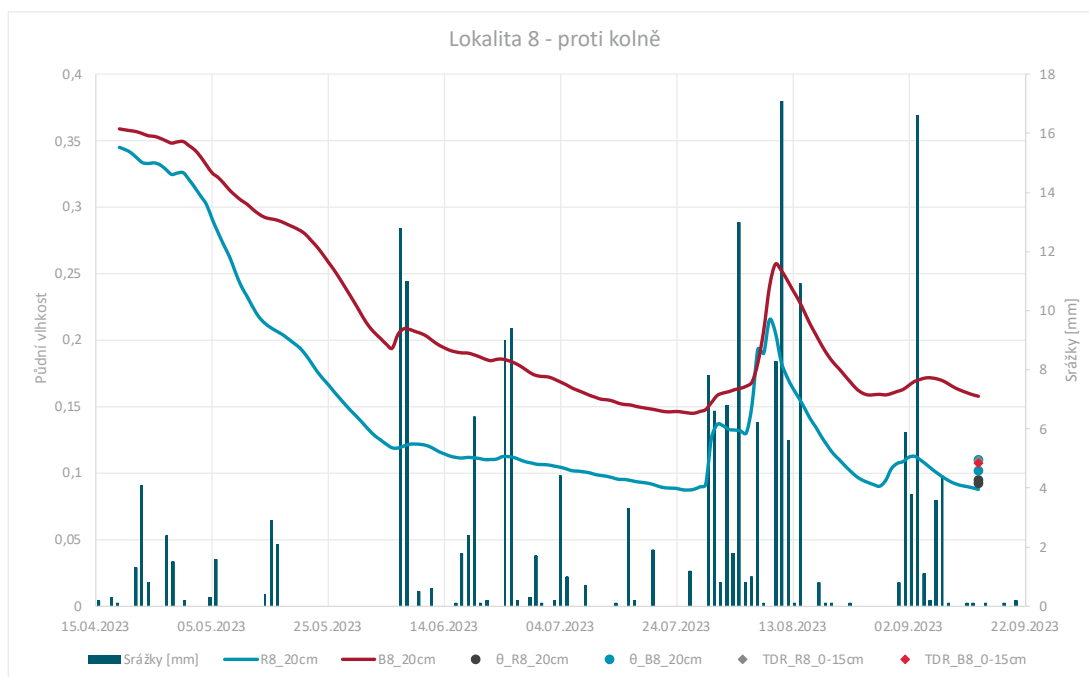
Obrázek 25 znázorňuje porovnání objemových vlhkostí a naměřených vlhkostí pomocí metody TDR v hloubkách 0 až 15 cm a 20 cm pod povrchem.



Obrázek 25: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4, objemových vlhkostí z odebraných válečků a naměřených vlhkostí pomocí metody TDR na lokalitě 7 v hloubkách 0 až 15 cm a 20 cm pod povrchem

Na obrázku 25 byly porovnány objemové vlhkosti z odebraných válečků a vlhkosti stanovené pomocí metody TDR. Touto metodou byly v obou hloubkách naměřeny vyšší vlhkosti na regulované části R7. Naproti tomu z objemových vlhkostí určené z válečků vychází vlhkosti vyšší na neregulované části B7. Tento výsledek potvrzují i vlhkosti změřené pomocí senzorů TMS-4.

Obrázek 26 ukazuje porovnání objemových vlhkostí a naměřených vlhkostí pomocí metody TDR v hloubce 20 cm pod povrchem.



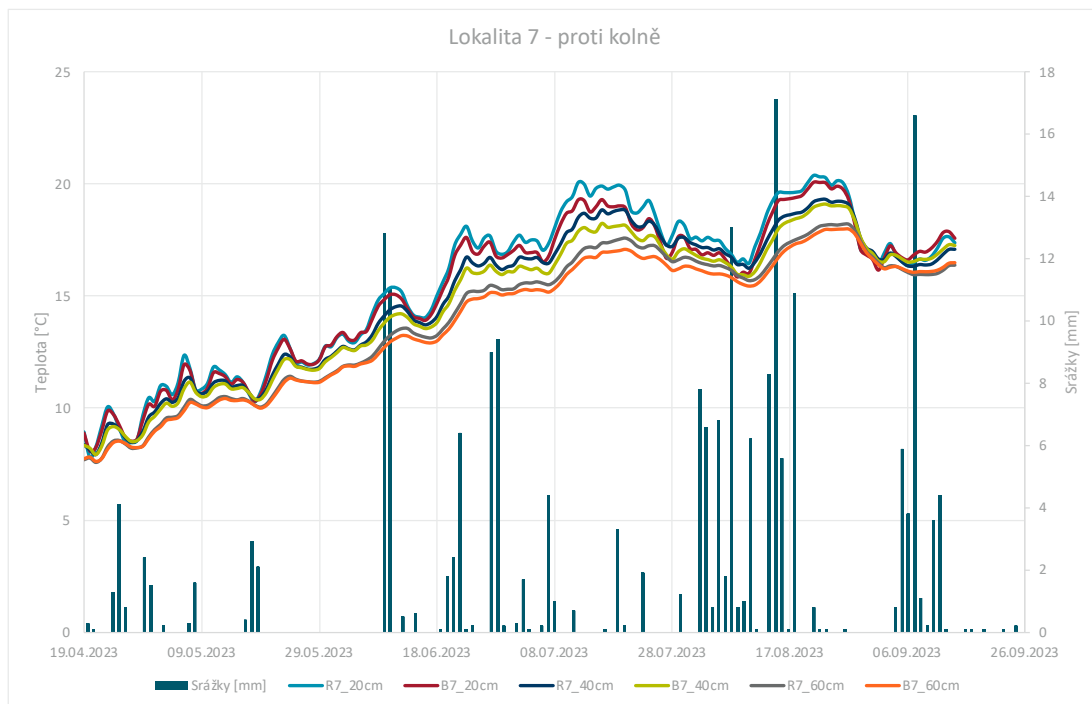
Obrázek 26: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4, objemových vlhkostí z odebraných válečků a naměřených vlhkostí pomocí metody TDR na lokalitě 8 v hloubce 20 cm pod povrchem

Na obrázku 26 byly porovnány objemové vlhkosti z odebraných válečků a vlhkosti stanovené pomocí metody TDR. Na obou částech (R8 i B8) byl s TDR naměřen téměř totožný výsledek, který odpovídá objemovým vlhkostem stanoveným z válečků s odchylkou menší než 1,5 %. Při porovnání s vlhkostí naměřenou senzorem TMS-4 na neregulované části B8, byla objemová vlhkost i vlhkost naměřená metodou TDR nižší. Pro regulovanou část R8 naměřené vlhkosti odpovídají.

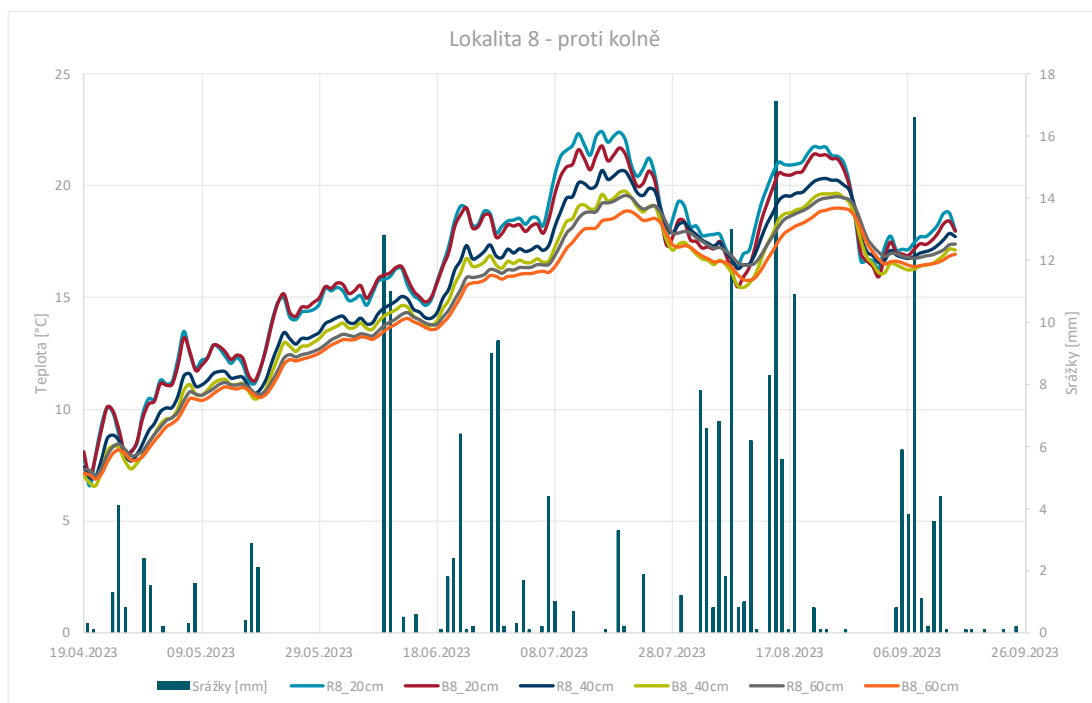
6.2. Porovnání teplot půdy

Dále byla pomocí senzorů TOMST TMS-4 také měřena teplota a to na stejných místech jako vlhkost, tedy na lokalitě 7 a 8 v regulovaných i neregulovaných částech (R7, B7 a R8, B8) a to ve všech hloubkách (20, 40 a 60cm). Nejvyšší teploty byly naměřeny v nejmenších hloubkách, tedy 20 cm a naopak nejnižší teploty se vyskytovaly v největších hloubkách (60 cm). Během velkých veder v období července a srpna byly vyšší teploty naměřeny na lokalitě 8 (obrázek 28), kde teploty v maximech byly o více jak 2 °C vyšší oproti lokalitě 7 (obrázek 27). V období června a srpna lze sledovat výraznější pokles teplot na obou lokalitách (7 i 8) a to v důsledku úhrnu většího množství srážek. Také byl pozorován zajímavý jev, kdy naměřené teploty byly vždy vyšší na regulovaných částech oproti částem neregulovaným o to ve všech hloubkách. Během největších veder rozdíl činil až 0,8 °C. Podrobné

porovnání teplot na obou lokalitách je zobrazeno v následujících grafech (lokalita 7 obrázek 27 a lokalita 8 obrázek 28).



Obrázek 27: Porovnání naměřených teplot v závislosti na srážkách na lokalitě 7 v hloubkách 20, 40 a 60 cm



Obrázek 28: Porovnání naměřených teplot v závislosti na srážkách na lokalitě 8 v hloubkách 20, 40 a 60 cm

6.3. Porovnání objemové hmotnosti, objemové vlhkosti a pórovitosti půdy

Z odebraných Kopeckého válečků byla stanovena objemová hmotnost, objemová vlhkost a pórovitost půdy. Válečky byly odebrány ve dvou různých obdobích na lokalitách 7 a 8 v regulovaných i neregulovaných částech. První odběr proběhl dne 17.04.2023 a to z hloubek 20, 40 a 60 cm (tabulka 3). Druhý odběr byl proveden dne 14.09.2023 a to pro hloubky 20 a 40 cm (tabulka 4). Při prvním odběru vzorků (dne 17.04.2023) byla naměřena obecně vyšší objemová hmotnost a objemová vlhkost než při druhém měření (dne 14.09.2023). Výsledky jsou vyneseny v tabulkách níže.

Tabulka 3 ukazuje naměřené výsledky z odběru půdy ze dne 17.04.2023 v hloubkách 20, 40 a 60 cm. Na lokalitě 7 byly mezi regulovanou R7 a neregulovanou částí B7 naměřené hodnoty objemové hmotnosti, objemové vlhkosti a pórovitosti ve všech hloubkách velmi vyrovnané. Na lokalitě 8 byly rozdíly mezi regulovanou stranou R8 a stranou bez regulace B8 větší. Objemová vlhkost se ve 20 cm na R8 oproti B8 lišila o 14 %, ve 40 cm rozdíl činil 24 % a v 60 cm byl rozdíl 23 %. Objemové vlhkosti se maximálně lišily o 4 % a to ve 20 cm. Pórovitost se pak mezi R8 a B8 ve 20 cm lišila o 5 %, v hloubce 40 a 60 cm byl pak shodný rozdíl 9 %.

Hloubka odběru [cm]	Objemová hmotnost ps		Objemová vlhkost θ		Pórovitost P	
	Lokalita R7	Lokalita B7	Lokalita R7	Lokalita B7	Lokalita R7	Lokalita B7
20	1,59	1,54	0,32	0,31	0,40	0,42
40	1,71	1,71	0,27	0,27	0,35	0,35
60	1,84	1,83	0,25	0,28	0,31	0,31
	Lokalita R8	Lokalita B8	Lokalita R8	Lokalita B8	Lokalita R8	Lokalita B8
20	1,50	1,36	0,33	0,29	0,44	0,49
40	1,73	1,49	0,31	0,28	0,35	0,44
60	1,74	1,51	0,31	0,31	0,34	0,43

Tabulka 3: Porovnání objemové hmotnosti, objemové vlhkosti a pórovitosti na jednotlivých lokalitách v hloubkách 20, 40 a 60 cm ze dne 17.04.2023

Tabulka 4 znázorňuje získané hodnoty z odebraných Kopeckého válečků dne 14.09.2023 v hloubkách 20 a 40 cm. Na lokalitě 7 byly ve 40 cm pozorovány větší rozdíly mezi regulovanou částí R7 a neregulovanou částí B7 a to 10 %. Objemové vlhkosti byly na lokalitě 7 téměř shodné. U pórovitosti byl pak maximální rozdíl 4 % a to na lokalitě 7 v hloubce 40 cm. Na lokalitě 8 byly naměřené rozdíly mezi regulovanou stranou R8 a neregulovanou stranou B8 výraznější. Rozdíl mezi objemovými

vlhkostmi ve 20 cm byl 15 %, ve 40 cm pak 9 %. U objemových vlhkostí byl maximální rozdíl 3 % a to ve 20 cm. Maximální rozdíl mezi pórovitostmi byl 5 % a to ve 20 cm.

Hloubka odběru [cm]	Objemová hmotnost ps		Objemová vlhkost θ		Pórovitost P	
	Lokalita R7	Lokalita B7	Lokalita R7	Lokalita B7	Lokalita R7	Lokalita B7
20	1,44	1,40	0,10	0,11	0,46	0,47
40	1,61	1,51	0,10	0,10	0,39	0,43
	Lokalita R8	Lokalita B8	Lokalita R8	Lokalita B8	Lokalita R8	Lokalita B8
20	1,44	1,29	0,09	0,11	0,46	0,51
40	1,52	1,43	0,13	0,11	0,43	0,46

Tabulka 4: Porovnání objemové hmotnosti, objemové vlhkosti a pórovitosti na jednotlivých lokalitách v hloubkách 20 a 40 cm ze dne 14.09.2023

6.4. Porovnání zrnitosti půdy

Zrnitost byla stanovena z porušených půdních vzorků odebraných dne 17.04.2023 na lokalitách 7 a 8 na regulované i neregulované části v hloubkách 20, 40 a 60 cm.

Tabulka 5 znázorňuje rozdíly mezi frakcemi jílu, prachu a písku na lokalitách 7 a 8 v závislosti na jednotlivých hloubkách. Naměřené hodnoty byly poměrně vyrovnané a rozdíly mezi regulovanými a neregulovanými částmi v odpovídající hloubkách byly minimální až na následující odchylky. Na lokalitě 7 v hloubce 60 cm se podíl jílu mezi regulovanou R7 a neregulovanou částí B7 lišil o 12,7 %. Rozdíl prachu mezi R7 a B7 v 60 cm činil 23,8 %. Rozdíl mezi podílem písku na R7 a B7 v 60 cm byl dokonce 36,5 % ve prospěch regulované části R7. Na lokalitě 8 v hloubce 40 cm se podíl jílu mezi regulovanou R8 a neregulovanou částí B8 lišil o 10 %. Rozdíl prachu mezi R8 a B8 byl v hloubce 20 cm 5,1 % a v hloubce 40 cm pak 8,7 %. Rozdíl mezi podílem písku na R8 a B8 byl v hloubce 20 cm 5,8 %.

Ze zrnitosti vyplývá, že se na obou lokalitách (7 a 8) nachází prachovitá hlína, s výjimkou regulované části R7 v hloubce 60 cm, kde je podle výsledků zrnitosti písčité hlína.

Hloubka odběru [cm]	Jíl %		Prach %		Písek %	
	< 0,002 mm		0,002 mm - 0,05 mm		0,05 mm - 2 mm	
	Lokalita R7	Lokalita B7	Lokalita R7	Lokalita B7	Lokalita R7	Lokalita B7
20	15,6	15,8	56,1	54,3	28,3	29,9
40	15,8	17,5	51,5	51,1	32,7	31,4
60	16,9	29,6	35,9	59,7	47,2	10,7
	Lokalita R8	Lokalita B8	Lokalita R8	Lokalita B8	Lokalita R8	Lokalita B8
20	14,8	14,1	65,1	60,0	20,1	25,9
40	26,2	16,2	50,3	59,0	23,5	24,8
60	29,9	25,3	51,4	54,1	18,7	20,5

Tabulka 5: Porovnání zrnitostí na lokalitách 7 a 8 v hloubkách 20, 40 a 60 cm stanovených z porušených půdních vzorků odebraných dne 17.04.2023

7. Diskuse

Ačkoli má kvalitní regulovaná drenáž v zemědělství velký význam, tak na její účinnost má vliv mnoho proměnných. Je tedy obtížné dosáhnout přesné shody s níže zmiňovanými studii. Jedním z hlavních úkolů regulované drenáže je zvýšení hladiny podzemní vody a snížení objemu odtoké vody a živin, což zvyšuje půdní vlhkost (Skaggs a kol., 2010; Youssef a kol., 2018; Helmers a kol., 2022). Regulovaná drenáž ovlivňuje zvolenou regulací úroveň hladiny výšky vody v půdním profilu, snižuje odtok a šetří tak vodu během suchého vegetačního období. Naproti tomu neregulovaná drenáž odvádí přebytečnou vodu do drenážní trubky v dané hloubce, kdykoliv dojde ke zvýšení hladiny podzemní vody (Nash a kol., 2015).

Regulované drenáže, provedené na různých místech a v různých hloubkách, nepotvrdily vždy vyšší objem zadržené vody oproti neregulovaným drenážím. Studie zabývající se vlivem regulovaných a neregulovaných drenáží v USA s dopadem na výnos kukuřice zjistila, že regulovaná drenáž měla významný pozitivní efekt během suchých vegetačních období. To se projevilo zmírněním stresu rostlin způsobené suchem v kořenové zóně, zadržením většího objemu vody v půdě a zvýšením výnosů kukuřice. Zatímco ve vlhkých obdobích se výnosy kukuřice snížily kvůli zvýšení vlhkostního stresu (převlhčení) v kořenové zóně. Zároveň tato studie zjistila, že efekt neregulovaných drenáží v jednotlivých vegetačních obdobích byl opačný. V suchých obdobích byl kořenový stres rostlin větší, kvůli nižšímu zadrženému objemu vody, než v místě regulovaných drenáží. A naopak, ve vlhkých obdobích byl kořenový stres rostlin nižší než u regulovaných drenáží. (Youssef a kol., 2022). Naměřené výsledky vlhkostí v suché a teplé vegetační sezóně 2023 na regulovaných drenážích na Amálii v různých hloubkách však potvrdily vyšší vlhkost oproti neregulovaným drenážím pouze částečně. Důvodů může být více, například proměnlivost počasí, úhrn srážek, teplota, půdní typ, sklonitost terénu, typ drenážního systému a jeho nastavení (Delbecq a kol., 2012; Ghane a kol., 2012; Jaynes, 2012; Poole a kol., 2013).

Regulovaná drenáž zvyšuje hladinu podzemní vody a tím způsobuje zadržení většího objemu vody v půdním profilu. Youssef a kol. (2022) však uvádí, že zvýšení akumulace vody v půdě pomocí regulovaných drenáží je pouze malé a poskytne kukuřici dostatečné množství vody jenom na několik dní, nikoliv týdnů. Naproti tomu výsledky měření na Amálii na lokalitě 8 v hloubkách 40 a 60 cm ukázaly vyšší vlhkost po většinu měřeného období (od poloviny května do poloviny září 2023). Jedním

z důvodů může být, že zde byla pěstována vojtěška, která má jiné potřeby vody než kukuřice.

Naměřené výsledky vlhkosti na Amálii na regulované části v obou lokalitách (7 a 8), v hloubce 20 cm, byly téměř po celou dobu monitorování nižší (až o 8 %) oproti neregulované části. Tento pozorovaný jev může být vysvětlen stažením kapilární vody regulovanou drenáží do nižších hloubek. Studie R.W. Gillham (1984) zjistila, že mělká hladina podzemní vody velmi výrazně reaguje na srážky. Následující efekt možná způsobuje nižší vlhkost na regulovaných drenážích (7 a 8) v hloubce 20 cm pod povrchem. Pokud v napjaté zóně nasycení kapilární voda dosáhne až k povrchu terénu, pak stačí jen malé množství srážek, které způsobí okamžité zvýšení hladiny podzemní vody. Regulované drenáže, oproti neregulovaným, se snaží udržovat zvýšenou hladinu podzemních vod. I menší množství spadlých srážek pak může rychle zvednout hladinu vody těsně k povrchu, kde se spojí s kapilárně zavěšenou vodou. Celá zóna se tak prosytí a následně regulovaná drenáž (při rychlém snížení hladiny podzemní vody po odeznění srážkové epizody) stáhne vodu od povrchu do nižších hloubek včetně kapilární vody.

Nejvyšší naměřená vlhkost na Amálii byla na lokalitě 8 na regulované drenáži v hloubce 40 cm a to na počátku měřeného období. Objem vody v této hloubce byl větší na regulované oproti neregulované drenáži a to od poloviny května až do konce měření. Tyto výsledky se shodují se studií provedenou ve středních Čechách (Duffková a kol., 2022), která ukazuje nejvyšší nárůst objemu vody v půdě, u regulované drenáže v hloubce 40 cm. Zvýšený objem vody na regulované drenáži, oproti neregulované, trval po celou dobu studie.

V hloubce 60 cm na lokalitě 8 na Amálii se projevil výrazný efekt regulované drenáže a to vyšší vlhkostí (až 8 %) po celou dobu měření, oproti neregulované drenáži. Tento nárůst půdní vlhkosti na regulované drenáži v hloubce 60 cm ukazuje i studie Duffková a kol. (2022), kde regulovaná drenáž zvýšila půdní vlhkost, což mělo pozitivní dopad na výnos ječmene.

Na lokalitě 7 se v hloubkách 40 a 60 cm efekt regulované drenáže příliš neprojevil. Důvodem může být, že se lokalita nachází ve svahu s průměrným sklonem 5 %. Duffková a kol. (2022) uvádí, že výška hladiny podzemní vody regulované drenáže je ovlivněna sklonem terénu. Podle Soukupa a kol. (2004) by výstavba regulovaných drenáží měla probíhat na rovinném terénu, popřípadě v mírném svahu se sklonem do 2 %. Voda z objektů pro regulaci hladiny může odtékat pouze tehdy, pokud její hladina

dosáhne výšky nastaveného hradítka (podle sklonu terénu) a následně přepadá do odvodňovacích šachet nebo výpustí (Duffková a kol., 2022; Cicek a kol., 2010; Wesström a kol., 2003; Almen a kol., 2021; Helmers a kol., 2022).

Drenážní potrubí se zpravidla umísťuje do drenážního filtru neboli materiálů s vysokou propustností. To zvyšuje účinnost a eliminuje zanášení perforovaných otvorů drenážního potrubí jemnými půdními částicemi (Štefl, 2014; Soukup a kol., 2004). Pro drenážní filtr se používá štěrk nebo štěrkopísek s minimální tloušťkou obsypu 10 cm (Valentová, 2023). Odebrané půdní vzorky na lokalitě 7 v místě regulované drenáže v hloubce 60 cm pravděpodobně ukázaly štěrkopískový obsyp drenáže. Podíl písku byl vyšší o 36,5 % oproti místu neregulované drenáže ve stejné hloubce. V tomto místě jako jediném vyšel i jiný druh půdy a to písčité hlína, na všech ostatních místech byla naměřena prachovitá hlína.

Drenážní obsyp s vysokou propustností společně se sklonem svahu může způsobit neschopnost regulované drenáže udržet zvýšenou hladinu podzemní vody. Ta se stahuje do štěrkopískového obsypu a vlivem sklonu terénu drenážní potrubí obtéká. Tento jev má za následek snížení efektivnosti regulované drenáže na lokalitě 7. Podobný jev popisuje Kulhavý (2011), (u neregulované drenáže) při částečném nebo úplném zaslepení drenážního potrubí, kdy dochází k naplnění potrubí vodou, která neodtéká nebo jen velmi pomalu. Při zvýšení hladiny podzemní vody je vlivem sklonu okolní voda stažena do hydraulicky účinné drenážní rýhy (drenážní potrubí uložené v obsypu) a potrubí tak obtéká.

Půdní vlhkost na Amálii byla monitorována pomocí dvanácti senzorů TMS-4 během první vegetační sezóny 2023 ihned po instalaci, což může být zdrojem nepřesnosti měření. Měření z této sezóny může být ovlivněno samotnými senzory. Rozrušená půda kolem senzorů se postupně usadí, zhutní a lépe se spojí se senzory. Lepší kontakt TMS senzorů s půdou by měl umožnit v dalších letech kvalitnější výsledky.

Naměřená teplotní data potvrdila, že s hloubkou klesá teplota v půdě, ale během teplejších období byl pozorován zajímavý jev, kdy byly teploty na regulovaných částech ve všech hloubkách až o 0,8 °C vyšší oproti částem neregulovaným. Tento jev není zatím objasněný a tak je třeba se na něj zaměřit v dalším výzkumu.

8. Závěr

Klimatické změny způsobují častější období sucha, proto je nutné hledat nástroje pro řešení zlepšení vodního režimu zemědělské půdy. Jedním ze způsobů, jak snížit odtok vody z půdy jsou regulované drenáže, které pomáhají udržovat vyšší vlhkost v zemědělské půdě. Tato bakalářská práce byla zaměřena na porovnání vlhkostního režimu zemědělské půdy mezi regulovanou a neregulovanou drenáží na Amálii v průběhu vegetační sezóny 2023. Vlhkost i teplota půdy byla monitorována v hloubkách 20, 40 a 60 cm pomocí osazených senzorů TOMST TMS-4, což bylo dílčím cílem této práce. Vlhkosti naměřené senzory TMS-4 byly také porovnány pomocí objemových vlhkostí získaných z odebraných Kopeckého válečků v místě osazených senzorů z jednotlivých hloubek a pomocí metody měření TDR. Z odebraných půdních vzorků, byla taktéž stanovena objemová hmotnost, objemová vlhkost, pórovitost a zrnitost půdy. Porovnány byly dvě lokality, lokalita 7 umístěná ve spodní části svahu se sklonem přibližně 5 % a lokalita 8 umístěná ve vrchní části svahu na rovině se sklonem pod 1 %.

Získaná data z hloubky 20 cm na obou monitorovaných lokalitách (7 a 8) shodně ukázala nižší půdní vlhkost na regulovaných drenážích oproti neregulovaným drenážím. V této hloubce byly také naměřeny nejnižší vlhkosti za celé monitorované období. Konkrétně na regulované drenáži na lokalitě 7 byla vlhkost 14,1 % a na lokalitě 8 byla vlhkost 8,7 %. Důvodem pro nižší vlhkost mohlo být uvolnění kapilárně zavěšené vody vlivem kolísání vlhkosti na regulované drenáži.

V hloubce 40 cm na lokalitě 7 se efekt regulované drenáže neprojevil a půdní vlhkost byla téměř shodná s neregulovanou drenáží po většinu měřeného období. Oproti tomu na lokalitě 8 ve stejné hloubce byl pozorován výrazný efekt regulované drenáže. Rozdíl v půdní vlhkosti na regulované části byl až o 9% vyšší oproti neregulované drenáži a to v poslední třetině monitorovaného období. Nejvyšší vlhkost z celého sledovaného vegetačního období, byla naměřena na regulované drenáži na lokalitě 8 v hloubce 40 cm, konkrétně 37,8 % a to na počátku měření v druhé polovině dubna 2023.

V hloubce 60 cm na lokalitě 7 byl efekt regulované drenáže pozorován až přibližně od druhé třetiny monitorovaného období. Nutno dodat, že tento efekt byl slabý, neboť regulovaná drenáž byla maximálně o 1,54 % vyšší oproti neregulované drenáži. Naopak na lokalitě 8 ve stejné hloubce byl efekt regulované drenáže výrazný a to po celou dobu měření. Regulovaná drenáž měla až o 8 % vyšší půdní vlhkost

oproti neregulované drenáži. Lokalita 7 se nachází ve svažitém terénu, což pravděpodobně způsobilo nízkou účinnost regulované drenáže. Oproti tomu se lokalita 8 nachází v téměř rovinném terénu, proto je zřejmě účinnost regulované drenáže v tomto místě výrazně vyšší.

Naměřená data potvrdila, že s hloubkou klesá teplota. Nejnižší teploty byly naměřeny v hloubce 60 cm a to na počátku monitorovaného období 2023. Naopak nejvyšší teploty byly dosaženy v hloubce 20 cm, během července, kde byly teploty v maximech na lokalitě 8 o více jak 2 °C vyšší oproti lokalitě 7. Teplotní data také ukázala, že regulovaná část byla během teplejších období vždy vyšší než neregulovaná část a to až o 0,8 °C. Důvod toho jevu zatím není znám, proto je vhodné se na něj během dalšího výzkumu zaměřit.

Vliv regulované drenáže se projevil nejvíce ve větších hloubkách. Zvýšená vlhkost byla převážně pozorována na lokalitě s téměř rovinným terénem. Na lokalitě ve svahu se efekt regulované drenáže příliš neprojevil. Jednou z hlavních příčin může být rozdílný sklon terénu mezi lokalitami. Dalším důvodem snižující účinnost regulované drenáže na lokalitě ve svahu může být výrazně vyšší podíl písku, nacházející se v hloubce 60 cm, což ovlivňuje zadržený objem vody v půdě. Na základě změřených dat můžeme jednoznačně potvrdit pozitivní vliv regulované drenáže pouze v hlubších vrstvách a lokalitě s velmi malým sklonem. V průběhu sledované vegetační sezóny může efektivitu regulovaných drenáží ovlivnit mnoho faktorů, jedním z nich jsou nízké úhrny srážek a tím i nedostatek drenážního odtoku. Mezi další faktory patří například proměnlivost počasí, teplota, půdní typ, druh drenážního systému a jeho nastavení, těsnost drenáží a jejich postupné zanášení.

Efektivita regulovaných drenáží nejvíc závisí na úhrnu srážek a jejich rozložení v průběhu roku (Salo a kol., 2021). Dále záleží na typu drenážního systému, jeho rozmístění v terénu a sklonitosti povrchu. Isomäky a kol. (2024) uvádí, že účinek regulované drenáže se ve svažitéjším terénu snižuje tím více, čím je vzdálenější od šachtice, kde dochází k regulaci hladiny podzemní vody. Tento efekt lze zmírnit hustším osazením šachtic s regulací výšky hladiny podzemní vody, protože jejich vliv na výšku hladiny podzemní vody je menší než v rovinných oblastech (Duffková a kol., 2022). I přes navýšení počtu šachtic hrozí riziko podtékání drenáží ve svahu, v místě štěrkopískového obsypu, ve kterém jsou drenáže uloženy. Dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje efektivitu regulovaných drenáží je jejich řízení v závislosti na množství srážek během vegetační sezóny (Duffková a kol., 2022).

Regulované drenáže mají nepochybně svůj pozitivní význam, ale na druhou stranu nemusí vést vždy ke zlepšení vlhkostního režimu půdy. Přínos práce spočívá v tom, že ukazuje složitost problematiky regulace vodního režimu půdy a možná úskalí v regulaci. Pro optimální vyhodnocení funkce regulované drenáže včetně jejího správného nastavení je nutné pokračovat v monitoringu na Amálii v průběhu více vegetačních sezón a zahrnout do vyhodnocení více lokalit.

9. Přehled literatury a použitých zdrojů

Almen, K.; Jia, X.; DeSutter, T.; Scherer, T.; Lin, M. Impact of Controlled Drainage and Subirrigation on Water Quality in the Red River Valley. *Water* 2021, 13, 308.

Blum, W.E.H. 2011. Soil Functions. In: Glinski J., Horabik J., Lipiec J. (editors). *Encyclopedia of Agrophysics*. Dordrecht: Springer, pp. 747-748.

Cicek, H.; Sunohara, M.; Wilkes, G.; McNairn, H.; Pick, F.; Topp, E.; Lapen, D.R. Using vegetation indices from satellite remote sensing to assess corn and soybean response to controlled tile drainage. *Agric. Water Manag.* 2010, 98, 261–270.

ČÚZK, 2023: Nahlížení do katastru nemovitostí. <https://sgi-nahlizenidokn.cuzk.cz/marushka/default.aspx?themeid=3&MarWindowName=Marushka&MarExtent=-990320%20-1239836%20-346646%20-923033>, cit. 21.05. 2023.

Delbecq, B.A., Brown, J.P., Florax, R.J., Kladivko, E.J., Nistor, A.P., Lowenberg-DeBoer, J.M., 2012. The impact of drainage water management technology on corn yields. *Agron. J.* 104 (4), 1100–1109.

Demek, J. a Mackovčín, P. a kol., 2006: *Zeměpisný lexikon ČR*. Vyd. 2., AOPK ČR, Brno.

Duffková, R., Poláková, L., Lukas, V., & Fučík, P., 2022. The Effect of Controlled Tile Drainage on Growth and Grain Yield of Spring Barley as Detected by UAV Images, Yield Map and Soil Moisture Content. *Remote Sensing*, 14(19), 4959.

Dufková J., 2007. *Krajinné inženýrství*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. 204 stran.

Fausey N.R., Drainage, Surface and Subsurface. In: Hillel D. (editor), *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Elsevier, 2005, Pages 409-413.

Fučík P., Kulhavý Z., Duffková R. 2021. Vracejme vodu polím i na odvodněné půdě. *Vesmír*, ročník 100, č. 5, str. 328-329.

Ghane, E., Fausey, N.R., Shedekar, V.S., Piepho, H.P., Shang, Y., Brown, L.C., 2012. Crop yield evaluation under controlled drainage in Ohio, United States. *J. Soil Water Conserv.* 67, 465–473.

Gillham, R.W., 1984. The capillary fringe and its effect on water-table response, *Journal of Hydrology*, Volume 67, Issues 1–4, Pages 307-324, ISSN 0022-1694.

Helmets, M.J.; Abendroth, L.; Reinhart, B.; Chighladze, G.; Pease, L.; Bowling, L.; Youssef, M.; Ghane, E.; Ahiablame, L.; Brown, L.; a kol., Impact of controlled drainage on subsurface drain flow and nitrate load: A synthesis of studies across the U.S. Midwest and Southeast. *Agric. Water Manag.* 2022, 259, 107265.

Hillel D., 2004: Introduction to environmental soil physics. Academic Press, San Diego, P. 494.

Hillel, D. 2004. Introduction to Environmental Soil Physics. London: Elsevier – Academic Press, 2004.

Isomäki, K., Salla, A., Salo, H., Koivusalo, H., 2024. Hydrological effects of open ditch damming and controlled subsurface drainage in a Nordic agricultural field. *Hydrology Research*, 55(2), 112–127.

Jaynes, DB, 2012. Změny ve výnosu a ztráty dusičnanů při používání drenážní vody vedení v centrální lowě ve Spojených státech. *J. Soil Water Conserv.* 67 (6), 485–494.

Kahuda, D., 2021: Amálie – Hydrogeologický průzkum, monitorovací síť podzemních vod. Závěrečná zpráva, Vodní zdroje a.s., Praha, 47 s.

Kulhavý F., Kulhavý Z., 2008. Navrhování hydromelioračních staveb. Praha: Informační centrum ČKAIT.

Kulhavý Z., Fučík P., Tlapáková L. 2020. Adaptace hydromeliorací jako součást plánu realizace opatření pro zmírňování dopadů změn klimatu. *Vodní hospodářství*, roč.70, č.11, str.13-17.

Kulhavý Z., Štibinger J., Křovák F.; Kasl M., Pelíšek I. a kol. Opatření k posílení infiltračních procesů v krajině: metodika. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2015.

Kulhavý, Z., 2019. Aktuální problémy zemědělského odvodnění v podmínkách ČR (komentovaný souhrn abstraktů, cílených na tematiku odvodnění zemědělských pozemků). Česká technologická platforma pro zemědělství (ČTPZ).

<https://www.ctpz.cz/vyzkum/aktualni-problemy-zemedelskeho-odvodneni-v-podminkach-cr-komentovany-souhrn-abstraktu-cilenych-na-tematiku-odvodneni-zemedelskych-pozemku-848>, cit. 21.11. 2023.

Kulhavý, Z., Fučík, P., Soukup, M., Čmelík, M., 2011. Pracovní postupy eliminace negativních funkcí odvodňovacích zařízení v krajině pro podporu žadatelů o PBO v prioritních osách 1 a 6. Metodická příručka pro žadatele OPŽP – přílohy. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd, v.v.i., Praha, 80 stran.

Kulhavý, Z., Pelíšek, I., 2017. Podmínky udržitelnosti staveb zemědělského odvodnění. *Vodní hospodářství*, 67(6), 112–127.

Kuráž Y., 2003: Fyzikální vlastnosti půd – definice, metody stanovení a interpretace výsledků. In: Frouz J., Šourková M., Frouzová J. (editoři.), *Fyzikální vlastnosti půdy a jejich interakce s půdními organizmy a kořeny rostlin*, str. 9-18. Ústav půdní biologie AV ČR, České Budějovice, ISBN 80-86525-02-3.

Kutílek M., 1978: *Vodohospodářská pedologie*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 295 s.

Kutílek, M., 2012. *Půda planety Země*. Praha: Nakladatelství Dokořán. 199 stran.

Mze a Hydroprojekt. 2004. TNV 75 4221 – Regulace a retardace odtoku na zemědělských pozemcích odvodněných trubkovou drenáží. Praha: Ministerstvo zemědělství a Hydroprojekt CZ a.s.

Narasimhan T.N., 2009. Hydrological Cycle and Water Budgets. In: Likens G.E. (editor), *Encyclopedia of Inland Waters*. Academic Press, Pages 714-720.

Nash, P., Motavalli, P., Nelson, K., Kremer, R., 2015. Ammonia and nitrous oxide gas loss with subsurface drainage and polymer-coated urea fertilizer in a poorly-drained soil. *J. Soil Water Conserv.* 70, 267–275.

Novák V., Hlaváčiková H., 2016: *Hydrológia pôdy*. Bratislava: VEDA Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied.

Novák, P., Hejduk, T., 2011: Dokumentace ochranných pásem II. stupně – zón diferencované ochrany vodárenské nádrže Klíčava na Klíčavě. A. průvodní zpráva, VÚMOP, Praha, 38 s.

Ondrasek G., Rengel Z., Petosic D., Filipovic V. Chapter 13 – Land and Water Management Strategies for the Improvement of Crop Production. In: Ahmad P., Rasool S. (editors). *Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance*. Academic Press, 2014, Pages 291-313.

Or D., Wraith J.M., Robinson D.A., Jones S.B. 2012. Soil Water Content and Water Potential Relationship. In: Huang P. M., Li Y., Sumner M. E. (editors), *Handbook of Soil Sciences – Properties and Processes*. Second edition. Boca Raton, USA: CRC Press, 2012. Pages from 4-1 to 4-28.

Pavlásek J., Jačka L., 2014: *Hydropedologie*. Skriptum, Česká zemědělská univerzita, Praha, 103 s.

Pavlu, L., 2018. *Základy pedologie a ochrany půdy*. Praha: Česká zemědělská univerzita. ISBN 978-80-213-2952-2.

Poleno Z. a kol. 1994. *Lesnický naučný slovník, Díl 1, A-O*. Praha: Agrospoj.

Poleno Z. a kol., 1995. *Lesnický naučný slovník, Díl 2, P-Ž*. Praha: Agrospoj.

Poole, C.A., Skaggs, R.W., Chescheir, G.M., Youssef, M.A., Crozier, C.R., 2013. Effects of drainage water management on crop yields in North Carolina. *J. Soil Water Conserv.* 68 (6), 429–437.

Pospíšilová L., Vlček V., Hybler V., Hábová M., Jandák J., 2016. *Standardní analytické metody a kritéria hodnocení fyzikálních, agrochemických, biologických a hygienických parametrů půd*. Vydání první. Brno: Mendelova univerzita v Brně. 122 stran.

Quitt, E., 1971: *Klimatické oblasti Československa*. *Studia geographica*, Geografický ústav ČSAV, Brno.

Rejšek K., Vácha R., 2018: *Nauka o půdě*. Olomouc: Agripint.

Rolston D.E., Moldrup P. 2012. Gas Transport in Soils. In: Huang P. M., Li Y., Sumner M. E. (editors). *Handbook of Soil Sciences – Properties and Processes*. Second edition. Boca Raton, USA: CRC Press, 2012. Pages from 8-1 to 8-20.

Salo, H., Salla, A., Koivusalo, H., 2021. Seasonal effects of controlled drainage on field water balance and groundwater levels. *Hydrology Research*, 52(6), 1633–1647.

- Shukla M. K., 2014. Soil Physics: An Introduction. Boca Raton: CRC Press.
- Singh B., Cattle S.R., Field D.J., 2014. Edaphic Soil Science – Introduction to. In: Van Alfen, N.K. (editor), Encyclopedia of Agriculture and Food Systems, Volume 3, Academic Press, Pages 35-58.
- Skaggs, R.W., Youssef, M.A., Gilliam, J.W., Evans, R.O., 2010. Effect of controlled drainage on water and nitrogen balances in drained land. Trans. ASABE 53, 1843–1850.
- Slavík L., 2000. Biotechnické úpravy v krajině. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně.
- Slavík L., Neruda M., 2014. Hospodaření s vodou v krajině. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně.
- Smettem K., 2006. Particle Density. In: Encyclopedia of soil Science, Volume 2. New York: Taylor & Francis. Pages 1243-1244.
- Soukup, M., Kulhavý, Z., Eichler, J., Fremrová, L., Pasler, J., Sokolová, J., 2004.
- Šarapatka, B., 2021. Půda – přehlížené bohatství: publikace pro střední školy i další zájemce o danou problematiku. Olomouc: Univerzita Palackého.
- Šimek M., Elhottová D., Pižl V., 2015. Živá půda. Praha: Středisko společných činností AV ČR.
- Šimek, M. a kol., 2019. Živá půda; díl 2: Ekologie, využívání a degradace půdy. Praha: Academia. 789 stran.
- Štefl, J., 2014. Hodnocení změn funkčnosti drenážních systémů orných půd Vysočiny na základě obrazové analýzy časových řad multispektrálních satelitních snímků. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích – Katedra krajinného managementu, České Budějovice, 99 stran.
- Švehla F., Vaňous M. Pozemkové úpravy. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995.
- Talián, F. a kol., 2017. Klimatické změny a my: Šumavské ozvěny na pozadí novelizace zákona o ochraně přírody a krajiny 2016. Fortuna, Praha, ISBN 978-80-7373-134-2.

Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství (ÚVTIZ), 1992. Naučný slovník zemědělský. Díl 13 W-Ž. Praha: Zemědělské nakladatelství Brázda. 677 stran.

Valentová, J., 2023: Odvodňovací stavby. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství.

https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/předměty/YHYS/ODVODNENI/XHYS_aktualizace.pdf, cit. 18.10. 2023.

Vlotman W., Wong T.H.F. Integration of Drainage, Water Quality and Flood Management in Rural, Urban and Lowland Areas. 2007. Irrigation and Drainage, Volume 56, Issue S1, Pages S101-S177.

Vopravil J., Kulířová P., Kulhavý Z. 2015. Povodně a sucho – krajina jako základ řešení: 3. Voda v zemědělských půdách. Živa, roč. LXIII, č.3, str.116-119.

Wesström, I.; Ekbohm, G.; Linnér, H.; Messing, I. The effects of controlled drainage on subsurface outflow from level agricultural fields. Hydrol. Process. 2003, 17, 1525–1538.

Youssef, M. A., Strock, J. S., Bagheri, E., Reinhart, B. D., Abendroth, L. J., Chighladze, G., Ghane, E., Shedekar, V., Fausey, N. R., Frankenberger, J. R., Helmers, M. J., Jaynes, D. B., Kladvko, E., Negm, L., Nelson, K. A., Pease, L., 2022. Impact of Controlled Drainage on Corn Yield Under Varying Precipitation Patterns: A Synthesis of Studies Across the U.S. Midwest and Southeast. Agricultural Water Management, 275, 107993.

Youssef, M.A., Abdelbaki, A.M., Negm, L.M., Skaggs, R.W., Thorp, K.R., Jaynes, D.B., 2018. DRAINMOD-simulated performance of controlled drainage across the U.S. Midwest. Agric. Water Manag. 197, 54–66.

Zoubková L., 2014. Návod k laboratorním cvičením z pedologie. Ústí nad labem: Univerzita J. E. Purkyně – Fakulta životního prostředí. 76 stran.

10. Seznam obrázků

Obrázek 1: Souvislosti mezi zemskými sférami (Šarapatka, 2021)	12
Obrázek 2: Průměrné objemové složení minerálních půd (Šarapatka, 2021).....	14
Obrázek 3: Schéma tradiční drenáže (Fučík, Kulhavý a Duffková, 2021).....	29
Obrázek 4: Schéma regulační drenáže (Fučík, Kulhavý a Duffková, 2021).....	31
Obrázek 5: Schéma drenáže s regulačním odtokem (Fučík, Kulhavý a Duffková, 2021).....	32
Obrázek 6: Pohled shora na lokalitu Amálie na pole kde probíhala měření.....	33
Obrázek 7: Mapa ukazuje na severu lokalitu 7 s regulovanou (R7) a neregulovanou (B7) stranou a na jihu lokalitu 8 s regulovanou (R8) a neregulovanou (B8) stranou	34
Obrázek 8: Zarovnání neporušeného půdního vzorku nožem	36
Obrázek 9: Rozmělnění porušeného půdního vzorku a jeho prosévání přes síto o velikosti ok 2 mm.....	38
Obrázek 10: Prosévání vzorku mokrou cestou přes síto o velikosti ok 0,25 mm	39
Obrázek 11: Příprava na měření hustot suspenzí v odměrných válcích	40
Obrázek 12: Senzory TOMST TMS-4 v kbelíku se sklenými kuličkami	42
Obrázek 13: Senzory TOMST TMS-4 v kbelíku s demineralizovanou vodou	43
Obrázek 14: Osazené senzory TOMST TMS-4 v půdě v hloubkách 20, 40 a 60 cm	44
Obrázek 15: Vytažené konce kabelů od senzorů TOMST TMS-4 opatřené krycími plastovými čepičkami vytažené na povrch a umístěné v ochranné kovové kleci	45
Obrázek 16: Měření půdní vlhkosti metodou TDR pomocí vlhkostního senzoru TRIME – PICO 64	46

Obrázek 17: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 7 ve všech měřených hloubkách	47
Obrázek 18: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 7 ve 20 cm	48
Obrázek 19: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 7 ve 40 cm	49
Obrázek 20: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 7 v 60 cm..	50
Obrázek 21: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 8 ve všech měřených hloubkách	51
Obrázek 22: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 8 ve 20 cm	52
Obrázek 23: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 8 ve 40 cm	53
Obrázek 24: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4 a objemovou vlhkostí z odebraných válečků v závislosti na srážkách na lokalitě 8 v 60 cm..	54
Obrázek 25: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4, objemových vlhkostí z odebraných válečků a naměřených vlhkostí pomocí metody TDR na lokalitě 7 v hloubkách 0 až 15 cm a 20 cm pod povrchem.....	55
Obrázek 26: Porovnání naměřených vlhkostí mezi senzory TMS-4, objemových vlhkostí z odebraných válečků a naměřených vlhkostí pomocí metody TDR na lokalitě 8 v hloubce 20 cm pod povrchem	56
Obrázek 27: Porovnání naměřených teplot v závislosti na srážkách na lokalitě 7 v hloubkách 20, 40 a 60 cm	57
Obrázek 28: Porovnání naměřených teplot v závislosti na srážkách na lokalitě 8 v hloubkách 20, 40 a 60 cm	57

11. Seznam tabulek

Tabulka 1: Klasifikace půdních pórů (Rejšek a Vácha, 2018).....	19
Tabulka 2: Půdní druhy (Rejšek a Vácha, 2018).....	22
Tabulka 3: Porovnání objemové hmotnosti, objemové vlhkosti a pórovitosti na jednotlivých lokalitách v hloubkách 20, 40 a 60 cm ze dne 17.04.2023.....	58
Tabulka 4: Porovnání objemové hmotnosti, objemové vlhkosti a pórovitosti na jednotlivých lokalitách v hloubkách 20 a 40 cm ze dne 14.09.2023.....	59
Tabulka 5: Porovnání zrnitostí na lokalitách 7 a 8 v hloubkách 20, 40 a 60 cm stanovených z porušených půdních vzorků odebraných dne 17.04.2023	60