

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ A
ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ



TERÉNNÍ STANOVENÍ NASYCENÉ
HYDRAULICKÉ VODIVOSTI PÍŠČITÉ REGOZEMĚ
V DRUHÉM ROCE PO POLNÍ APLIKACI BIOUHLU
A HNOJE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

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

Autor práce: Michal Zelinka

2024

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Michal Zelinka

Vodní hospodářství

Název práce

Terénní stanovení nasycené hydraulické vodivosti písčité regozemě v druhém roce po polní aplikaci biouhlu a hnoje

Název anglicky

Filed-saturated hydraulic conductivity of sandy Regosol during the second year after field application of biochar and manure

Cíle práce

Hlavním cílem je vyhodnotit vliv směsi hnoje s biouhlem a čistého hnoje na hydraulickou vodivost při terénním nasycení regozemě v blízkosti řeky Výrovky. Dílčím cílem je provést terénní měření s využitím Guelphského permeometru v mělkých vrtech v druhém roce po polní aplikaci.

Metodika

Na základě rešerše charakterizovat klíčovou hydraulickou vlastnost půdy – nasycenou hydraulickou vodivost (dále K_s). V rešerši dále popsat způsoby měření a vyhodnocování K_s různými metodami. Dále na základě literatury vyhodnotit vliv organických přídatků (zejména biouhlu, hnoje a jejich směsí) na hydraulickou vodivost půdy.

V praktické části provést terénní měření K_s pomocí Guelphského permeometru. Měření provést v ornici v mělkých vrtech na místech aplikace organických přídatků (čistý hnůj, biouhel a hnůj v poměru 1:10, biouhel a hnůj v poměru 1:1) a kontrolní půdě bez ošetření. Z důvodu heterogenity půdy provést na každém ošetření alespoň 4 měření K_s v dostatečné vzdálenosti, aby se měření neovlivňovala. Měření provést ve dvou kampaních v různém roční období, aby byly zachyceny sezónní změny K_s . Vyhodnotit vliv přídatků na K_s a diskutovat důvody případných rozdílů.

Doporučený rozsah práce

35 stran

Klíčová slova

biochar, hnůj, organické půdní přídatky, hydraulické vlastnosti půdy, písčité půdy v Polabí

Doporučené zdroje informací

- Edeh, I.G., Mašek, O., Buss, W., 2020. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties – new insights and future research challenges. *Sci. Total Environ.* 714, 136857.
- Jačka, L., Trakal, L., Ouředníček, P., Pohořelý, M., Šípek, V., 2018. Biochar presence in soil significantly decreased saturated hydraulic conductivity due to swelling. *Soil and Tillage Research* 184, 181-185.
- Lim, T., Spokas, K., Feyereisen, G., Novak, J., 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere* 142, 136 – 144.
- Seyedsadr, S., Šípek, V., Jačka, L., Sněhota, M., Beesley, L., Pohořelý, M., Kovář, M., Trakal, L., 2022. Biochar considerably increases the easily available water and nutrient content in low-organic soils amended with compost and manure. *Chemosphere* 293, 133586.
- Wei, B., Peng, Y., Lin, L., Zhang, D., Ma, L., Jiang, L., Li, Y., He, T., Wang, Z., 2023. Drivers of biochar-mediated improvement of soil water retention capacity based on soil texture: a meta-analysis. *Geoderma* 437, 11659.

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 1. 2. 2024

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 2. 2024

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 05. 03. 2024

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma

Terénní stanovení nasycené hydraulické vodivosti písčité regozemě v druhém roce po polní aplikaci biouhlu a hnoje

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/a, 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/a, 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 dne

.....

Autor práce - Michal Zelinka

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto formou poděkoval vedoucímu práce Ing. Lukáši Jačkovi, Ph.D. za jeho vstřícný přístup, cenné rady a věcné připomínky během celé doby mého zpracovávání této bakalářské práce.

Děkuji také svým rodičům za důvěru a psychickou i finanční podporu v průběhu celého studia na této škole.

Děkuji moc!

ABSTRAKT

V písčítých půdách je kvůli jejich vysoké propustnosti a slabě vyvinuté struktuře obtížné zadržovat vodu. Vysoká propustnost těchto půd, která funkčně souvisí s vysokou hodnotou nasycené hydraulické vodivosti (K_s), způsobuje vysychání rychlým tokem srážkové vody a na ni navázaných živin do hlubších vrstev půdy a zkracuje dobu kontaktu kořenů rostlin se srážkovou vodou. Tato práce se zabývá využitelností aplikace směsi biouhlu a hnoje pro účely snížení nepříznivě vysoké hodnoty K_s u písčité regozemě v Polabí. Experimentální měření K_s bylo prováděno na zemědělském pozemku v těsné blízkosti obce Zvěřinek, nacházející se ve Středočeském kraji. Na tomto pozemku byly vyčleněny čtyři plochy a na třech z nich bylo aplikováno 40 tun/ha organických přídavek. Na těchto plochách byla v terénu měřena K_s ve dvou kampaních (duben 2023 a srpen 2023) za pomoci dvou Guelphských permeametrů. Plochy nesly označení podle způsobů ošetření půdy: BM10 je plocha s ošetřením směsí biouhlu a hnoje v poměru 1:10, BM50 byla ošetřena směsí biouhlu a hnoje v poměru 1:1, M byla ošetřena pouze hnojem, C je kontrola bez jakéhokoliv ošetření. Naměřené hodnoty K_s vykazovaly pouze nevýznamné rozdíly v průměrech mezi jednotlivými ošetřeními, i celkově mezi dvěma kampaněmi. Vyšší rozptyl a rozsah hodnot K_s byl zaznamenán na plochách s aplikací biouhlu, nejvyšší koeficient variace (176 %) byl pozorován na ošetření BM10 v srpnu 2023. Mírně vyšší průměrné hodnoty byly u většiny ošetření zaznamenány v srpnové oproti dubnové kampani. Celkově ošetření organickými přídávky nevykázala zlepšení, tedy snížení, hodnoty K_s . Hlavním důvodem je zřejmě malé množství aplikované směsi, velké rozměry částic biouhlu a jeho nerovnoměrná aplikace. Důvodem může být i přirozeně vysoká heterogenita testované půdy v blízkosti řeky. Práce ukazuje, že dosažení zlepšení hodnot K_s plošnou aplikací v reálných terénních podmínkách je složitější v porovnání s aplikací v idealizovaných laboratorních podmínkách.

Klíčová slova: organický přídavek, pyrolýza, biochar, vysychavá propustná půda, terénní aplikace

ABSTRACT

In sandy soils, it is difficult to retain water due to their high permeability and poorly developed structure. The high permeability of these soils, which is functionally related to the high value of the saturated hydraulic conductivity (K_s), causes the rapid flow of rainwater and the nutrients bound to it to dry out in deeper soil layers and shortens the contact time of plant roots with rainwater. This work deals with the applicability of the application of a mixture of biochar and manure for the purpose of reducing the unfavorably high value of K_s in the sandy regozem in Polabí area. The experimental measurement of K_s was carried out on an agricultural plot in close proximity to the village of Zvěřinek, located in the Central Bohemian region. Four areas were set aside on this plot and 40 tons/ha of organic additives were applied to three of them. In these areas, K_s was measured in the field in two campaigns (April 2023 and August 2023) using two Guelph permeameters. The areas were labeled according to the soil treatment methods: BM10 is an area treated with a mixture of biochar and manure in a ratio of 1:10, BM50 was treated with a mixture of biochar and manure in a ratio of 1:1, M was treated only with manure, C is a control without any treatment. The measured values of K_s showed only insignificant differences in the averages between individual treatments, as well as overall between the two campaigns. A higher variance and range of K_s values was recorded in plots with biochar application, the highest coefficient of variation (176%) was observed for the BM10 treatment in August 2023. Slightly higher average values were recorded for most treatments in the August campaign compared to the April campaign. Overall, the treatment with organic additives did not show an improvement, i.e. a reduction, of K_s values. The main reason is apparently the small amount of the applied mixture, the large size of the biochar particles and its uneven application. The reason may also be the naturally high heterogeneity of the tested soil near the river. The work shows that achieving improvement in K_s values by surface application in real field conditions is more difficult compared to application in idealized laboratory conditions.

Keywords: organic additive, pyrolysis, biochar, drying permeable soil, field application

Obsah

1. ÚVOD	9
2. CÍL PRÁCE.....	11
3. REŠERŠE.....	12
3.1. Půda a půdní voda.....	12
3.1.1. Třífázové složení půdy.....	13
3.1.2. Pórovitost půdy	13
3.1.3. Vlhkost půdy	15
3.1.4. Saturace půdy.....	15
3.1.5. Provdzdušněnost půdy	16
3.1.6. Struktura a zrnitostní složení půdy	16
3.2. Darcyho zákon	18
3.3. Nasycená hydraulická vodivost	19
3.4. Biouhel.....	22
3.5. Vliv přidané organické hmoty	23
4. CHARAKTERISTIKA ÚZEMÍ.....	27
4.1. Geologie.....	29
4.2. BPEJ, Klima, Pedologie	29
5. METODIKA.....	32
5.1. Plán vzorkování půdy	32
5.2. Terénní měření nasycené hydraulické vodivosti.....	33
5.3. Vyhodnocení dat	34
5.4. Statistická analýza dat	36
6. VÝSLEDKY	38
6.1. Nasycená hydraulická vodivost (K_s).....	38
6.2. Aktuální půdní vlhkost při měření K_s	41
6.3. Objemová hmotnost.....	42
7. DIZKUZE.....	43
7.1. Efekty organických přísadků na nasycenou hydraulickou vodivost v rámci jednotlivých kampaní	43
7.2. Sezónní efekty vegetačního pokryvu na nasycenou hydraulickou vodivost	45
7.3. Půdní vlhkost a její efekt na hodnoty K_s	50
8. ZÁVĚR.....	52
9. ZDROJE.....	54

1. ÚVOD

Každým rokem dochází k nárůstu lidské populace, v některých oblastech i k nárůstu životní úrovně, tudíž je obecně v našem zájmu produkovat celkově více potravin, než tomu bylo dříve. V Evropě, ale i na jiných kontinentech však dochází k problému s nedostatkem ploch, které jsou nebo by mohly být využity pro potřeby zemědělství. Problémem není pouze plocha jako taková, ale zejména její půdní kvality, které bývají v mnoha případech velmi špatné. Na takovýchto plochách – polích je pak úrodnost znatelně nižší než na plochách obhospodařovaných šetrnějšími způsoby a způsoby zohledňujícími mnohá nebezpečí pro půdu, např. půdní eroze. Půdní eroze je děj, při kterém dochází k postupnému, až úplnému, odstraňování kvalitní půdy, vhodné pro zemědělství, z polí účinkem deště či větru. Také je dobré zmínit, že nynější klimatické změny ochranu půd značně ztěžují. Jako příklad mohu uvést kombinaci sucha a krátkých intenzivních dešťů, která silně podporuje půdní erozi.

Mnoho půd, včetně těch zemědělsky obhospodařovaných, se potýká s nedostatkem vody dostupné pro rostliny. Tato voda kromě vláhy také poskytuje živiny, které jsou pro kvalitní růst důležité. Nedostatek vody může v takovémto případě způsobit malou úrodnost plodin, a to i díky škodlivému dopadu na organické hmoty v půdě. Tedy může dojít k ohrožení potravinové bezpečnosti (Al-Kaisi, 2017; Lei et al., 2020). Ochrana organické hmoty v půdě napomáhá biologické, fyzikální i chemické odolnosti půd vůči suchu (Magdoff a Weil, 2004). S problémem nedostatečného zadržování vody ve svrchních půdních vrstvách se potýkají nejvíce půdy písčitého charakteru, kde dochází k rychlému prostupu vody do hlubších půdních vrstev. Například taková písčitá regozem, na které byl proveden experiment v této práci, má pro zemědělskou činnost nepříznivě vysokou nasycenou hydraulickou vodivost. Tedy dochází zde k tomu, že voda a živiny v ní obsažené, se rychle infiltrují do hlubších půdních vrstev, ze kterých rostliny nejsou schopny tuto vodu a živiny získat. Půda může být při intenzivních deštích promývána. Vhodný je stav, kdy vlaha vody i živiny ve vodě obsažené jsou snadno dostupné pro rostliny a napomáhají jejich rychlému a kvalitnímu růstu.

Snížení rychlosti nasycené hydraulické vodivosti, případně i vytvoření podmínek, díky kterým by půda byla schopna vodu zadržet, by teoreticky mohlo být dosaženo bobtnáním a změnou

kvality půdních pórů. Biouhel s hnojem by provázal jednotlivé půdní částice a částečně vyplnil půdní póry, které by tím následně byly zmenšeny, což by napomáhalo k zadržování vody.

Tato teorie byla potvrzena 14denním experimentem v laboratorních podmínkách, kdy došlo k intenzivnímu bobtnání, při kterém došlo ke snížení objemové hmotnosti zeminy, navýšení celkové kapacity zadržetí vody a výraznému snížení nasycené hydraulické vodivosti. (Jačka a kol., 2018 - A). Výše zmíněný experiment byl však experimentem laboratorním. U biouhlu a hnoje, aplikovaného v terénních podmínkách se předpokládá, že účinnost této směsi se může lišit od laboratorního experimentu z důvodu heterogenity půdy, nerovnoměrné aplikace směsi a větších rozměrů nerozemletých částic směsi.

Využití hnoje jako příměsi k samotnému biouhlu je pro velkoplošnou zemědělskou polní aplikaci výhodné zejména z ekonomických důvodů. Tato směs má však podobné výsledky jako aplikace biouhlu samotného. Otázkou je, jaký konkrétní efekt na nasycenou hydraulickou vodivost bude mít terénní aplikace směsi biouhlu a hnoje v terénních podmínkách. Překládaná bakalářská práce by měla pomoci odpovědět na tuto otázku.

2. CÍL PRÁCE

Hlavním cílem této práce je stanovení efektu aplikace biouhlu s hnojem a samotného hnoje na nasycenou hydraulickou vodivost na zemědělsky obhospodařovaném pozemku s písčitou regozemí v Polabí.

Ke stanovení efektu na nasycenou hydraulickou vodivost byl použit v mělkých vrtech, o hloubce 15 až 25 cm, Guelphský permeometr. Experimenty byly provedeny v druhém roce po terénní aplikaci organických přídatků.

Hypotéza: Aplikace směsi biouhlu s hnojem na plochy zemědělského pozemku zapříčiní snížení nasycené hydraulické vodivosti. Čím větší množství biouhlu je aplikováno, tím výraznější rozdíl v nasycené hydraulické vodivosti (snížení) vzhledem ke kontrole bude zaznamenán.

3. REŠERŠE

3.1. Půda a půdní voda

Půda a voda patří mezi nejdůležitější přírodní zdroje na Zemi. Jejich ochranu a vhodné hospodaření s nimi bychom tedy neměli brát na lehkou váhu a měli bychom se této problematice aktivně věnovat. Mezi důležité schopnosti půdy v hydrologickém cyklu patří schopnost půdy vodu infiltrovat. Infiltrovaná voda pak dotuje zásobu podzemní vody. Podzemní voda může následně vystoupit na povrch, například formou pramene, a dotovat vodu povrchovou. V ideálním případě se část srážkové či povrchové vody zadrží ve svrchních půdních vrstvách a je dostupná pro faunu a floru. Půdní voda je nejdůležitějším transportním médiem v půdním prostředí. Látky, které se ve vodě nachází jsou hlavním výživovým zdrojem pro rostliny (Jačka a Pavlásek, 2014-A).

Půdní voda se nachází v půdě v pásmu, v němž se spolu s vodou vyskytuje i vzduch (nenасыcené pásmo). Půdní vodu z hlediska trvání rozlišujeme na trvalé a přechodné druhy. Příklady trvalé půdní vody jsou: vodní pára, adsorbční voda a kapilární voda. Vodní pára se nachází v půdních pórech a vzniká vypařováním z tekuté vody, při zvýšení teploty. Adsorbční voda je za pomoci fyzikálních sil poutána ke stěnám půdních částic (může vznikat z vodní páry, i z vody infiltrované). Kapilární voda vyplňuje dlouhé a úzké póry, výskyt převážně u jemnozrnných půd, v blízkosti hladiny podzemní vody (HPV). Hladina podzemní vody tuto kapilární vodu podepírá a v případě, že dojde ke snížení hladiny podzemní vody, může dojít k jevu, kdy je tato kapilární voda zavěšená (bez podpory HPV zespodu). Mezi přechodné druhy se řadí vsakující voda a půdní led. Vsakující voda je voda, která se za pomoci gravitační síly vsakuje do půdy a následně doplňuje vodu kapilární. Půdní led se tvoří při teplotách mrazu jako jinovatka na půdním povrchu, ale i jako zamrzající adsorbční či kapilární vody (Zeměpisec.cz, 2024).

Pohyb vody a její případné zadržení v půdě se liší zejména podle půdních fyzikálních a hydrofyzikálních vlastností. Vybranými fyzikálními a hydrofyzikálními vlastnostmi půd jsou: objemová hmotnost, pórovitost, vlhkost, saturace, provzdušněnost, zrnitostní složení, struktura. Klíčovou vlastností ovlivňující proudění vody v půdě je hydraulická vodivost (Jačka a Pavlásek, 2014-A). Vzhledem k zaměření práce bude nasycené hydraulické vodivosti (K_s) věnována vlastní kapitola.

3.1.1. Třífázové složení půdy

Půda se obvykle skládá z pevných, kapalných a plynných látek. Půdu tedy můžeme označit za třífázový systém, kde tato skupenství jsou na sebe vzájemně vázána. Při pozorování vzorku půdy můžeme vidět pevné částičky a jednotlivé mezery mezi nimi, které nazýváme póry. Tyto póry mohou být vyplněné jak plynem (vzduchem), tak kapalinou (půdní vodou). Zastoupení plynu a kapaliny v půdě může být velmi proměnné hlavně v závislosti na aktuálním stavu půdy. Půdu podle jejího vzniku dělíme na půdy organogenní a půdy anorganogenní (minerální). Oproti pevným anorganogenním složkám půdy jsou pevné organogenní složky půdy více proměnné ve svém zastoupení, i ve svém vlastním složení. U organických složek dochází k postupnému rozkladu, oproti trvalým anorganogenním složkám. Proto je potřeba organické látky půdě dodávat. Přirozeně se organické látky do půdy dostávají v podobě těl odumřelých organismů. Organické látky mají vliv na vlastnosti půd a jejich strukturu (Kutílek, 1978).

Půdní vzduch zastupuje plynnou fázi půdy. Je významný zejména pro biologické a chemické procesy, které se v půdě odehrávají. Mezi hlavní půdní plyny patří: Oxid uhličitý, Kyslík, Dusík. Oxid uhličitý v půdním vzduchu tvoří průměrně 0,3% (při nedostatečné aeraci až 5%). Jeho obsah se zvyšuje například v důsledku rozkladu organických látek půdními organismy nebo třeba dýcháním kořeny rostlin. Kyslík se v půdním vzduchu vyskytuje v rozmezí 10 až 20%. Mezi jeho hlavní využití patří: dýchání půdních organismů, oxidace organických a minerálních látek (Richter, 2004).

3.1.2. Pórovitost půdy

Pórovitost:

Pórovitost je určena poměrem objemu všech půdních pórů k celkovému objemu půdního vzorku. Pórovitost bude dosahovat nejvyšších hodnot v porovnání s ostatními zde uvedenými typy pórovitostí. Pórovitost půdy se pohybuje v rozmezí hodnot od 0,3 (písčité půdy) až do 0,9 (organogenní půdy) (Jačka a Pavlásek, 2014-A) a lze vypočítat rovnicí (1)

$$P = \frac{V_p}{V_s} = \frac{V_a + V_w}{V_a + V_w + V_m} \quad (1),$$

Kde P je pórovitost, V_p - objem všech pórů, V_s - celkový objem vzorku, V_a - objem vzduchu (plynů), V_w - objem kapaliny, V_m - objem pevných složek.

Aktivní pórovitost:

Veškeré póry v půdě v mnoha případech nejsou mezi sebou propojeny. Voda z těchto pórů je těmito uzavřenými póry zadržena a není jí umožněno pohybu v půdě. Dalším vlivem, který vodu v zemině zadržuje jsou kapilární síly. Aktivní pórovitost je vlastnost, která s těmito vlivy počítá. Aktivní pórovitost se určuje jakožto poměr objemu vody vyteklého z nasyceného půdního vzorku vlivem gravitační síly a celkového (původního) objemu půdního vzorku. Aktivní pórovitost se počítá podle rovnice (2).

$$Pa = \frac{V_{wg}}{V_s} \quad (2),$$

Kde Pa je aktivní pórovitost, V_{wg} – objem kapaliny vyteklé vlivem gravitace ze vzorku, V_s – celkový objem vzorku.

Efektivní pórovitost:

Jak bylo již zmíněno (Aktivní pórovitost) existují stavy a vlivy, které zadržují vodu v půdě a zabraňují jejímu pohybu. Efektivní pórovitost se zabývá póry v nasyceném půdním vzorku, ve kterých dochází k proudění vody. Efektivní pórovitost se určuje poměrem objemu pórů v nasyceném půdním vzorku, kde dochází k proudění půdní vody a objemu celého vzorku. Efektivní pórovitost se počítá podle rovnice (3).

$$Pe = \frac{V_{we}}{V_s} \quad (3),$$

Kde Pe je efektivní pórovitost, V_{we} – objem kapaliny v nasyceném půdním vzorku, který se dostává při proudění do pohybu, V_s – celkový objem vzorku.

Drenážní pórovitost:

Drenážní pórovitost je definována jako objem vody, který vyteče z jednotkové plochy půdního prostředí při poklesu hladiny podzemní vody o jeden metr.

Hodnota drenážní pórovitosti je ovlivňována blízko ležící hladinou podzemní vody. Tato hladina ovlivňuje tlak v půdních pórech. Tento tlak v části pórů může zamezit odtoku vody (Jačka a Pavlásek, 2014-A).

3.1.3. Vlhkost půdy

Vlhkost půdy určuje množství vody v půdě. Vlhkost můžeme určovat buďto hmotnostní nebo objemovou.

Vlhkost hmotnostní je určována poměrem hmotnosti půdní vody ve vzorku a hmotností vysušeného vzorku půdy. Výpočet se provádí dle rovnice (4).

$$w = \frac{mw}{mm} \quad (4),$$

Kde w je hmotnostní vlhkost, mw – hmotnost vody, mm – hmotnost pevné složky (= vysušená půda).

Vlhkost objemová je určována poměrem objemu půdní vody ve vzorku a objemu celého vzorku, včetně půdní vody. Pro výpočet se použije rovnice (5) (Kutílek a kol., 2004).

$$\theta = \frac{Vw}{Vs} \quad (5),$$

Kde θ je objemová vlhkost, Vw – objem kapaliny, Vs – celkový objem vzorku.

3.1.4. Saturace půdy

Výpočet saturace půdy se používá pro posouzení zaplněnosti půdních pórů půdní vodou.

Pro posouzení nasycenosti nestačí pouze určení objemové vlhkosti, jelikož může vycházet její hodnota stejná u dvou výrazně odlišných vzorků půdy, které budou mít ale kvůli své struktuře rozdílné hodnoty nasycení. Výpočet se provádí dle rovnice (6). Hodnoty saturace půdy se pohybují v rozmezí 0, kdy je půda zcela vysušená, a hodnoty 1, kdy je půda plně nasycená a kdy je hodnota objemové vlhkosti rovna hodnotě pórovitosti (Němeček a kol., 1990).

$$S = \frac{Vw}{Va + Vw} = \frac{\theta}{P} \quad (6),$$

Kde S je saturace půdy, Vw – objem kapaliny, Va – objem vzduchu (plynů), θ – objemová vlhkost, P – pórovitost.

3.1.5. Provzdušněnost půdy

Provzdušněností půdy určuje obsah vzduchu v půdě. Výskyt vzduchu v půdě je důležitý zejména pro organismy žijící v půdě, chemické půdní procesy a aerobní rozklad organických látek, který je důležitý pro tvorbu humusu. Provzdušněnost půdy může být určena jako poměr objemu vzduchu ve vzorku a objemu celého vzorku (včetně prostoru pórů). Dále může být určena jako rozdíl pórovitosti a objemovou vlhkostí půdy. Dále může být určena jako rozdíl pórovitosti a objemovou vlhkostí půdy, jak je znázorněno rovnicí (7). Hodnoty provzdušněnosti půdy se pohybují v rozmezí od 0, kdy je půda plně nasycena vodou, a až do maximální hodnoty, která je rovna pórovitosti zcela vysušené půdy (Kutílek a kol., 2004).

$$A_s = \frac{V_a}{V_s} = P - \theta \quad (7),$$

Kde A_s je provzdušněnost, V_a – objem vzduchu (plynů), V_s – celkový objem vzorku, P – pórovitost, θ – objemová vlhkost.

3.1.6. Struktura a zrnitostní složení půdy

Půdní strukturou se označuje souhrnně prostorové uspořádání agregátů v půdě (Kutílek, 1978). Minerální částičky v půdě jsou výsledkem zvětrávání matečného substrátu. Tyto částičky v půdě z pravidla můžeme najít ve formě agregátů – shluků. Agregáty jsou ve vodě stabilní (Kutílek, 1978). Tvar a velikost těchto jednotlivých částiček mají velký vliv na jednotlivé vlastnosti půd. Jestliže chceme zjistit charakteristiky jednotlivých částiček, musíme nejprve agregáty rozložit, tedy oddělit jednotlivé částičky od sebe. Tento proces oddělení se nazývá dispergace. Tímto procesem dojde k uvolnění tmelů, které částičky spojují k sobě do formy agregátů. Po rozpojení agregátů již můžeme charakterizovat zrnitostní složení půdy pomocí různých klasifikací, které nám definují hranice jednotlivých frakcí. Pomocí těchto klasifikací určujeme půdní druh neboli texturu. V České republice používáme klasifikaci uvedenou v Taxonomickém klasifikačním systému půd České republiky (Němeček a kol., 1990).

Pro zjištění poměru výskytu částiček – zrn různých rozměrů ve vzorku používáme prosévací metodu (prosévání zrn skrze síta). Z prosévací metody vyplyne četnost výskytu jednotlivých velikostí – druhů zrn. Tyto druhy spadají pod dvě kategorie, a to Jemnozerní a Skelet, které dělí

hodnota rozměru zrna 2 mm (dále tab.1.). Schopnost poutat vodu v minerálech obsahujících pouze frakce zrn vyšších jak 2 mm je výrazně nižší, než u frakcí menších. Částičky větších rozměrů obvykle obsahují vyšší podíl původních hornin a minerálů. Oproti tomu částičky menších rozměrů obsahují převážně minerály, které vznikly chemickým zvětráváním (tzv. sekundární minerály).

NÁZVY ZRNITOSTNÍCH FRAKČÍ A JEJICH VELIKOSTI DLE PLATNÉ KLASIFIKACE V ČR:

Velikost zrna (mm)	Název zrnitostní frakce
JEMNOZEM	
< 0,002	jíl
0,002 – 0,05	prach
0,05 – 2,0	písek
SKELET	
2 – 4	hrubý písek
4 – 30	štěrk
30 – 300	kamení
> 300	balvany

Tabulka 1. (upraveno z: Jačka a Pavlásek, 2014-A)

3.2. Darcyho zákon

Za pomoci experimentů na pískových filtrech byl Darcyho zákon objeven a prezentován v roce 1856 francouzským inženýrem Henrym Darcym. Tento zákon říká, že průtok daným profilem je přímo úměrný gradientu hydraulické výšky (rovnice (8)), a také, že průtok na jednotku plochy je přímo úměrný hydraulickému gradientu (rovnice (9))(Lanzendörfer, 2019).

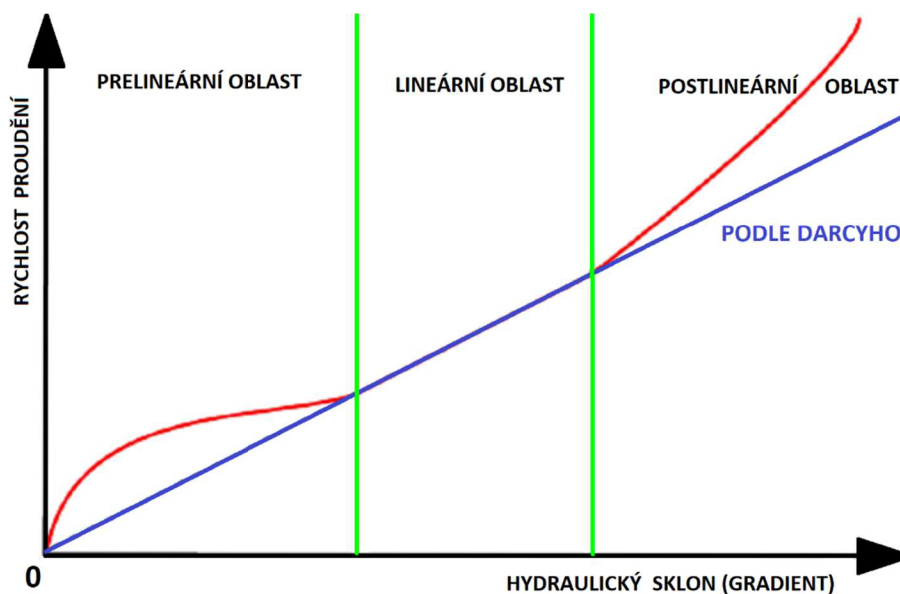
$$Q = K * A * \frac{\Delta h}{L} \quad (8),$$

Kde Q je průtok [L^3/T], K – hydraulická vodivost [L/T], A – plocha profilu [L^2], Δh - rozdíl hydraulických výšek [L], L – výška sloupce naplněného zeminou [L]. ($[L]$ – jednotka délky, $[T]$ – jednotka času).

$$\frac{Q}{A} = K * \frac{\Delta h}{L} \quad (9),$$

Kde Q je průtok [L^3/T], K – hydraulická vodivost [L/T], A – plocha profilu [L^2], Δh - rozdíl hydraulických výšek [L], L – výška sloupce naplněného zeminou [L]. ($[L]$ – jednotka délky, $[T]$ – jednotka času).

Platnost lineární závislosti Darcyho zákona je limitována zespoda i ze shora (obrázek 1.). Dolní limit platnosti (prelineární oblast) se obvykle neuvažuje (Kutílek, 1978). Horní limit se uvažuje před nástupem proudění turbulentního, kde Reynoldsovo číslo (Re) převyší kritickou hodnotu (přibližně 1 až 10) (Lanzendörfer, 2019).

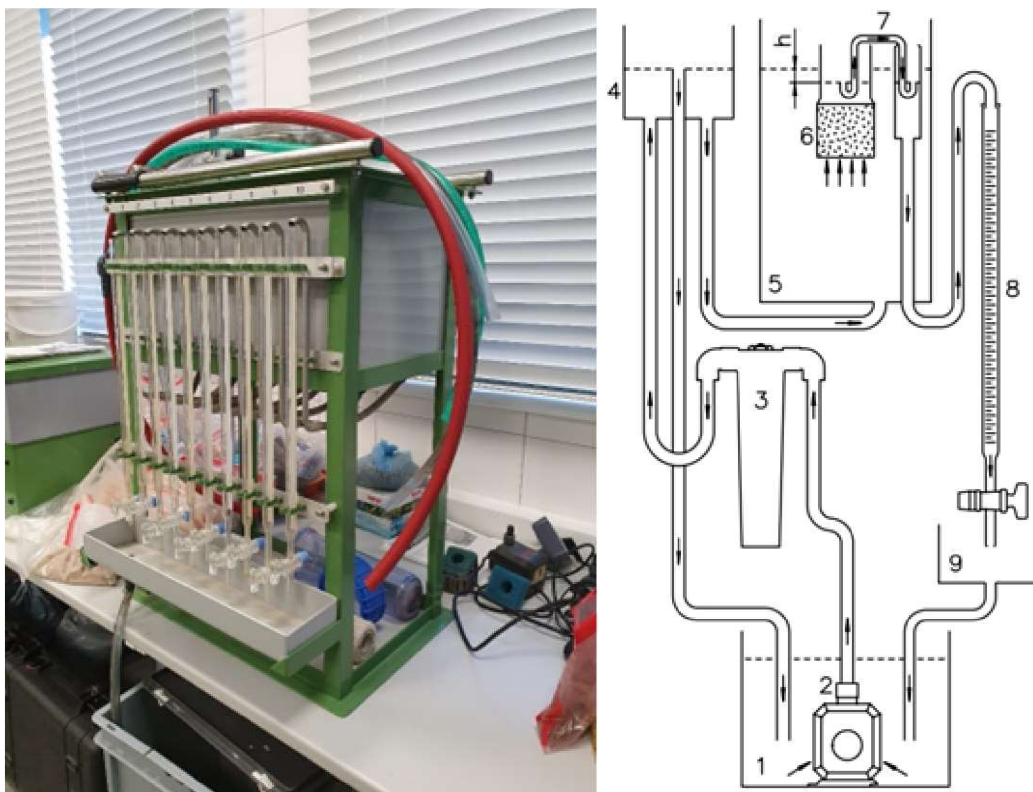


Obrázek 1.: Režimy proudění v závislosti na rychlosti a hydraulickém sklonu (gradientu) proudění (Ibragimov, 2016 - upraveno).

3.3. Nasycená hydraulická vodivost

Nasycená hydraulická vodivost popisuje pohyb vody v půdním porézním prostředí (infiltraci a distribuci vody), u kterého se předpokládá, že je již nasyceno vodou. Je klíčovým parametrem pro modelování pohybu vody a látek v ní rozpuštěných, návrhy systémů odvodnění a závlah. Jednotkou nasycené hydraulické vodivosti je m/s. Velikost (rychlost proudění) nasycené hydraulické vodivosti se odvíjí jak od vlastností kapaliny, tak i od vlastností půdního prostředí (Jačka a Pavlásek, 2014-A).

Metody měření obecně dělíme na metody přímé a nepřímé. Metody nepřímé, kdy nedochází k přímému měření, ale pouze k výpočtu, jsou pouze přibližným odhadem reálných hodnot. Metody přímé jsou již reálnými měřeními, jejichž data jsou následně zpracovávána. Přímé metody dělíme na metody laboratorní (měření v laboratorních podmínkách) a metody terénní (měření v terénu). Mezi laboratorní metody patří například měření na laboratorním permeamtru s konstantním spádem (obrázek 2.).



Obrázek 2.: Laboratorní permeametr v laboratoři FŽP ČZU (vlevo, foto: autor) a schéma permeamtru (vpravo, upraveno z Eijkelkamp, 2022).

Popis schématu: 1. zásobní nádrž, 2. oběhové čerpadlo, 3. filtr, 4. nastavitelný regulátor hladiny, 5. plastová nádoba (homí nádrž), 6. půdní vzorek, 7. plastový násoska, 8. byreta, 9. záchytná nádržka.

Mezi nejznámější terénní metody patří Jednosondová metoda (odčerpávací), měření infiltrace výtopou (válcová/dvouválcová), měření pomocí Guelphského permeamtru. Výzkum v této práci byl prováděn za pomoci (metody) Guelphského permeamtru (obrázek 3.), podrobněji je popsán níže. Výsledné hodnoty jednotlivých metod bývávají často odlišné. Neexistuje žádné standardní porovnání mezi metodami pro měření nasycené hydraulické vodivosti (McKenzie a Cresswell, 2008). Nevýhodou u terénních (někdy nazývaných "polních") metod je neúplná saturace půdy a možný výskyt v pórech zachyceného vzduchu. Tento vzduch může mít za následek snížení hodnot nasycené hydraulické vodivosti (Fodor a kol., 2011). Nevýhodou u laboratorních metod, kdy je experiment prováděn na půdních vzorcích, které se nachází ve vzorkovacích kovových válečcích, je zamezení některých preferenčních cest stěnami válečku a zhutnění vzorku, způsobené v čase odběru vzorku (porušení systému pórů) (Reynolds, 2008-B). To může mít za následek takřka plné nasycení pórů vodou, které by naopak zvýšilo měřené hodnoty nasycené hydraulické vodivosti, v porovnání s terénními metodami (Kanwar a kol., 1989).



Obrázek 3.: Guelphský permeametr na lokalitě Zvěřinec a ošetření s hnojem při dubnové kampani (fotografie pořízena autorem práce, 21.4.2023).

Hodnota nasycené hydraulické vodivosti na malém vzorkovacím objemu (cm^3) může být rozdílná od hodnoty měření na výrazně větším vzorkovacím objemu (dm^3 či m^3) (Hillel, 2003), jelikož v místě měření se mohou vyskytovat preferenční cesty, které jsou schopny i násobně navýšit hydraulickou vodivost. Čím vyšší je objem vzorku, tím menší by měl být vliv heterogenity půdy na hodnotu nasycené hydraulické vodivosti (Dorsey a kol., 1990). Tyto preferenční cesty mohly být vytvořeny kořeny rostlin či živočichy, kteří se v půdě vyskytují. Jestliže je měření vzorků prováděno v laboratorních podmínkách, kdy je odebraný vzorek zeminy částečně uzavřen v kovovém válečku, mohou být mnohé preferenční cesty přerušeny stěnami válečku, čímž může dojít k ovlivnění měření. Nasycená hydraulická vodivost je hydraulická vodivost v půdě, která je plně nasycena vodou. Měření s Guelphským permeametry probíhalo v terénu, kde se předpokládalo tzv. plné nasycení, však půda zde vodou zcela nasycena není. Na základě výsledků různých autorů se odhaduje, že hydraulická vodivost měřená v terénu odpovídá zhruba 0,8 reálné nasycené hydraulické vodivosti (K_s), které může být dosaženo například v laboratorních podmínkách (Jačka a Pavlásek, 2014-B). Jedním z důvodů nižších hodnot může být vliv uzavřeného vzduchu v pórech při sycení (Jačka a kol., 2014).

Nasycená hydraulická vodivost, měřená Guelphskými permeametry, je v této práci označena jako K_s , s tím že se nejedná o plně nasycenou hydraulickou vodivost, ale hodnotu dosaženou při maximálním nasycení v polních podmínkách.

Existují dva způsoby měření nasycené hydraulické vodivosti z ustálené infiltrační rychlosti (i_{cg}) ve vrtu při použití Guelphského permeametry. Nasycená hydraulická vodivost může být měřena s jedním či více konstantními spády. Měření nasycené hydraulické vodivosti pomocí více konstantních spádů je přesnější, ale převážně jen u půd homogenního charakteru. U půd heterogenních se používá metodika s jedním konstantním spádem, jelikož použití více konstantních spádů by zde mohlo způsobit výsledek s nereálnými zápornými hodnotami (Jačka a Pavlásek, 2014-A).

Nasycená hydraulická vodivost je ovlivňována půdní vlhkostí. Čím vyšší půdní vlhkost je, tím dochází ke snižování hodnot nasycené hydraulické vodivosti (Zhou a kol. (2008), Zeinalzadeh a kol. (2011)). Neméně důležitým faktorem ovlivňujícím nasycenou hydraulickou vodivost je biologická aktivita, která má za následek zvýšení výskytu větších pórů (Azevedo et al., 1998).

3.4. Biouhel

Biouhel je materiál vytvořený z organických materiálů (jako jsou například dřeviny, rostlinný odpad apod.), které prošly procesem úpravy nazývaným pyrolýza. Proces pyrolýzy zahrnuje zejména tyto chemické reakce: dehydratace, devolatilizace, depolymerizace, izomerizace, aromatizace a zuhelnatění (Khan a kol., 2023). Pyrolýza je teplený rozklad látky za omezené přítomnosti kyslíku, která má za následek materiál vyznačující se vysokou porézností, která je dosažena zlepšeným procesem karbonizace (Brynda a kol., 2020). Biouhel je složen z uhlíku, který částečně obsahuje i popel (Naveed a kol., 2024). Biouhel, který je produkován z odpadní biomasy při nižších teplotách pyrolýzy, je obvykle hydrofobní kvůli alifatickým povrchovým skupinám (Das a Sarmah, 2015; Gray a kol., 2014). Proto se biouhel obvykle vyrábí při teplotách vyšších jak 400 °C. Dochází tak k maximalizaci schopnosti biouhlu vstřebávat vodu (Das a Sarmah, 2015). Obvykle se biouhel vyznačuje nižší objemovou hmotností a vyšší porozitou v porovnání s půdou. Tato porozita je tvořena zejména mikropóry, případně i mezopóry (do 50 nm), které omezují pohyb vody a tím tedy snižují nasycenou hydraulickou vodivost (Jačka a kol., 2018 - A). Čím vyšší je teplota pyrolýzy, tím se zvyšuje obsah uhlíku v biouhlu, a ztrácejí se vlhké složky, což má za následek navýšení specifické povrchové plochy biouhlu a jeho stability (Burrell a kol., 2016).

Biouhel také vyniká v adsorpci živin (fosfor, dusík), těžkých kovů (olovo, rtuť, kadmium, chrom, arsen) a organických kontaminantů (huminová kyselina, tetracyklin), čímž významně zlepšuje kvalitu vody a podporuje obnovu vodních zdrojů (Jellali a kol., 2021). Obava z emisí skleníkových plynů a jejich negativního dopadu na změnu klimatu je v dnešní době (minimálně v Evropě) jedním z těch nejprobíranějších témat společnosti. Zachycování emisí CO₂ hraje klíčovou roli při zmírňování skleníkového efektu, které by mělo napomoci ke zpomalení klimatických změn. Biouhel je vysoce porézní materiál s velkou specifickou povrchovou plochou, která je ideální pro adsorpci CO₂ (Fang a kol., 2023). Je třeba dodat, že adsorpční kapacita biouhlu CO₂ se může ve vlhkém prostředí zmenšit a to z důvodu, že biouhel na sebe váže vodu. Biouhel, který by byl vyroben takovým způsobem, aby měl hydrofobní a nepolární vlastnosti, by tak mohl zvýšit svou kapacitu pro adsorpci CO₂ (Sarwar a kol., 2021).

Biouhel podporuje tvorbu stabilních agregátů, což zlepšuje půdní strukturu. To má za následek zlepšení infiltračních schopností půd (infiltrace vody a živin), pronikání kořenů do půdy a provzdušnění půdy (Bo a kol., 2023). Dobře strukturovaná půda je zásadní pro podporu zdravého růstu rostlin. Zvláště v místech s omezenou dostupností vody dokáže biouhel

efektivně umožnit rostlinám přístup k vodě (Park a kol., 2023). Ve znečištěných půdách je biouhel schopen snižovat úroveň kontaminantů, zlepšovat kvalitu půdy a snižovat tak riziko poškození životního prostředí (Yang a kol., 2023). Cena biouhlu se odvíjí od použitého organického materiálu, a mohla by se pohybovat v rozmezí cen 222 až 584 USD za 1 tunu biouhlu (Shackley a kol., 2011) (v CZK ke dni 27.2.2024: zaokr. 5180,- až 13630,-).

3.5. Vliv přidané organické hmoty

Pěstování plodin na písčítých půdách je často ovlivněno nevhodnými hydrofyzikálními parametry těchto půd. Mezi nejdůležitější parametry patří nasycená hydraulická vodivost, dostupnost vody pro rostliny, polní vodní kapacita a bod vadnutí. Dostupnost vody pro rostliny, polní kapacita a bod vadnutí, jsou parametry důležité pro regulaci biologických a chemických procesů v půdě, růst plodin, produktivitu a plánování zavlažování (Huntington, 2010; Sparling a West, 1989).

Vhodnou aplikací směsí biouhlu a hnoje by se měli vodní poměry v půdě zlepšit. Biouhel by tedy měl být významným krokem ke zvyšování odolnosti zemědělských půd vůči suchu, se kterým se v dnešní době setkáváme a v budoucích letech či celých dekádách nejspíše nadále setkávat budeme. Podle Jačka a kol. (2018–A) mezi hlavní parametry biouhlu, tak aby zadržel co nejvíce vody v půdě, patří: vysoká porozita, vysoká specifická povrchová plocha, malé částice, vysoký obsah uhlíku.

Biouhel zvyšuje celkovou pórovitost půdy, propojení pórovitého prostoru a počet pórů (Quin a kol., 2014; Zhao a kol., 2017). To má přímý vliv na skladování a pohyblivost půdní vody, zvýšený počet pórů (zejména mezopórů) a celková pórovitost půdy vedou ke zvýšení retence půdní vody. Přidání jemných částic biouhlu do částic půdy vyplní velké pórovité prostory, což vede ke snížení velikosti pórů a zvýšení retence vody a snížení hodnoty nasycené hydraulické vodivosti zejména u písčítých půd (Lim et al, 2016; Jačka et al., 2018). Kromě pórovitých prostor mezi částicemi biouhlu a částicemi půdy také přispívají k retenci vody i vnitřní póry biouhlu (Hyväluoma et al., 2018).

Velikost póru určuje, zda bude voda k dispozici pro příjem rostlinami (Major a kol., 2009). Rozsah distribuce velikosti pórů biouhlu je velmi široký, od nanometrové až po mikrometrové rozsahy (Brewer et al., 2014). Póry v mikrometrovém rozsahu jsou ty, které jsou relevantní pro

udržení dostupné vody pro rostliny (Kameyama et al., 2019). Mnoho studií tvrdí, že aplikace biouhlu zvyšuje retenci vody v půdě, zejména v písčitých půdách (Basso a kol., 2013; Mollinedo a kol., 2015; Vítková a kol., 2017), což je obecně připisováno vysoce porézní struktuře biouhlu. Například u experimentu Jačka a kol. (2018–A) bylo zjištěno, že kapacita zadržené vody v půdě se nejvíce zvýšila u hlinité nivní půdy při vysokých dávkách biouhlu. Naopak některé studie ukázaly, že biouhel údajně nemá žádný, nebo jen minimální, vliv na retenci vody (Rabbi a kol. 2021). Hardie a kol. (2014) uvedli, že 30 měsíců po aplikování biouhlu do písčité hlíny nebyla zpozorována žádná výrazná změna v obsahu vody v půdě při různých hodnotách potenciálu půdní vody. Rozdíly ve výsledcích různých studií by však mohly být zapříčeny rozdíly v experimentálních podmínkách (terénní / laboratorní měření), struktuře půdy, aplikační dávce, způsobu provedení aplikace a typu biouhlu (Ifeoma a kol., 2020). Podle Tammeorg a kol. (2014) mezi hlavní nevýhodu terénního experimentu patří nerovnoměrná distribuce biouhlu po experimentální ploše. Mezi hlavní nevýhody experimentu prováděném v laboratoři pak patří absence interakce vzorku s okolní půdou a omezení bobtnání vzorku do stran, jelikož se vzorek nachází v kovovém válečku. U dlouhodobých terénních experimentů může být vliv aplikace biouhlu na hydraulické vlastnosti půdy maskován aktivitou bioty (Jeffery et al., 2015). Na účinnost aplikace biouhlu a na hydraulické vlastnosti má též silný vliv zhutnění půdy (Zhang a kol., 2006). Beilei a kol., 2023 tvrdí, že schopnost biouhlu zadržet vodu v hrubozrnných půdách výrazně klesá s časem, a to hlavně po době delší jak jeden rok od aplikace.

Liu a kol. (2017) a Obia a kol. (2016) hlásili pokles dostupné vodní kapacity s klesající velikostí částic biouhlu (s nejmenší velikostí menší než 0,25 mm). Důvodem tohoto jevu byl označen proces strouhání, kterým byly zmenšovány rozměry částic biouhlu, a který měl za následek snížení vnitřní porozity jeho částic. To by mohlo znamenat, že zohlednění velikosti částic biouhlu samo o sobě nestačí, ale způsob mletí použitý k jejich zmenšení a výsledná hustota jsou rovněž důležité.

Dle Ifeoma a kol., 2020, kdy bylo celkem z 57 studií vyhodnocována ideální aplikační dávka biouhlu, bylo zjištěno že toto množství se pohybuje mezi 30 až 70 t/ha. Vyšší dávky již nevykazovaly výrazné navýšení účinnosti biouhlu. Měření probíhala na půdách s různými parametry a vlastnostmi. Nutné je ale podotknout, že u většiny studií byly použity hrubozrnné půdy (39 datových sad, oproti 18 datovým sadám jemnozrnných půd). Některé studie vychází z polních (terénních) měření a některé z laboratorních měření (laboratoře, skleníky apod.). U obou typů experimentů, jak polních, tak laboratorních, došlo k výraznému navýšení vody

dostupné pro rostliny v porovnání s půdou bez aplikace biouhlu. To samé se dá říci o polní kapacitě a bodu vadnutí. U laboratorních experimentů byly naměřené hodnoty dostupné vodní kapacity průměrně o 9,8 % vyšší, než u experimentů prováděných v terénu. U polní kapacity došlo též k naměření vyšších hodnot, a to v průměru o 3,4 %.

Novější a rozsáhlejší Beilei a kol., 2023 vychází ze 120 studií, celkem 939 experimentů, z nichž 530 bylo provedeno na hrubozrnných půdách. Výsledky této metaanalýzy jsou podobné, již zmíněné, metaanalýze z roku 2020. Polní kapacita se zde zvýšila o 23,8 % (MA2020: 23,9 %), voda dostupná pro rostliny o 25,6 % (MA2020: 32,9 %) a bod vadnutí o 19,9 % (MA2020: 22,2 %). U jemnozrnných došlo k výrazně menším navýšením hodnot dostupné vodní kapacity (o 9,1 %), polní kapacity (o 3,5 %), bodu vadnutí (o 0,4 %) (data z Ifeoma a kol., 2020). Podle (Suliman a kol., 2017) nemá biouhel na dostupnost vody pro rostliny u jemnozrnných půd žádný vliv.

Nasyčená hydraulická vodivost byla podle Ifeoma a kol., 2020 aplikací biouhlu nejvíce snížena na hrubozrnných půdách s obsahem písku nad 50 %. Největší naměřené snížení nasycené hydraulické vodivosti bylo o 64,6 %. V hrubozrnných půdách aplikace biouhlu v množství pod 30 t/ha nevykazovala žádný vliv na nasycenou hydraulickou vodivost. U hrubozrnných půd by tedy dávkování biouhlu mělo být vyšší než 30 t/ha. U jemnozrnných půd se prokázalo množství do 30 t/ha jako plně dostačující. U půd s vyšším obsahem jílu, aplikace biouhlu naopak navyšovala hodnoty nasycené hydraulické vodivosti. U jemnozrnných půd (jílové půdy) byl zaznamenán nárůst hodnoty nasycené hydraulické vodivosti o 28 % a u půd středně zrnitých (hlinité půdy) o 36 %. Obecně se dá říci, že zmíněné efekty přidavku biouhlu jsou příznivé, protože pro jemnozrnné málo propustné půdy bývá zvýšení nasycené hydraulické vodivosti výhodné a pro velmi propustné hrubozrnné půdy bývá výhodné naopak její snížení (Ifeoma a kol., 2020). Podle Lim a kol. (2016) a Barnes a kol. (2014) se také nasycená hydraulická vodivost po aplikaci biouhlu zvyšuje u půd písčitých a u půd s vysokým obsahem jílu naopak dochází k jejímu snížení. Klesání hodnot nasycené hydraulické vodivosti (podle Jačka a kol., 2018-A) může nastat v případě, kdy dojde k zablokováním průtoku vody aktivními póry v půdě za pomoci biouhlových částic (Barnes a kol., 2014; Lim a kol., 2016), postupným ucpáváním pórů půdy pohybujícími se částicemi biouhlu (Wang a kol., 2013; Barnes a kol., 2014), snížením objemu účinných pórů sorbovanou vodou (Uzoma a kol., 2011; Jeffery a kol., 2015), zvýšením počtu mikropórů (<1 μm), které váží vodu silnými kapilárními nebo adsorpčními silami (Hillel, 1998; Hardie a kol., 2014; Lim a kol., 2016).

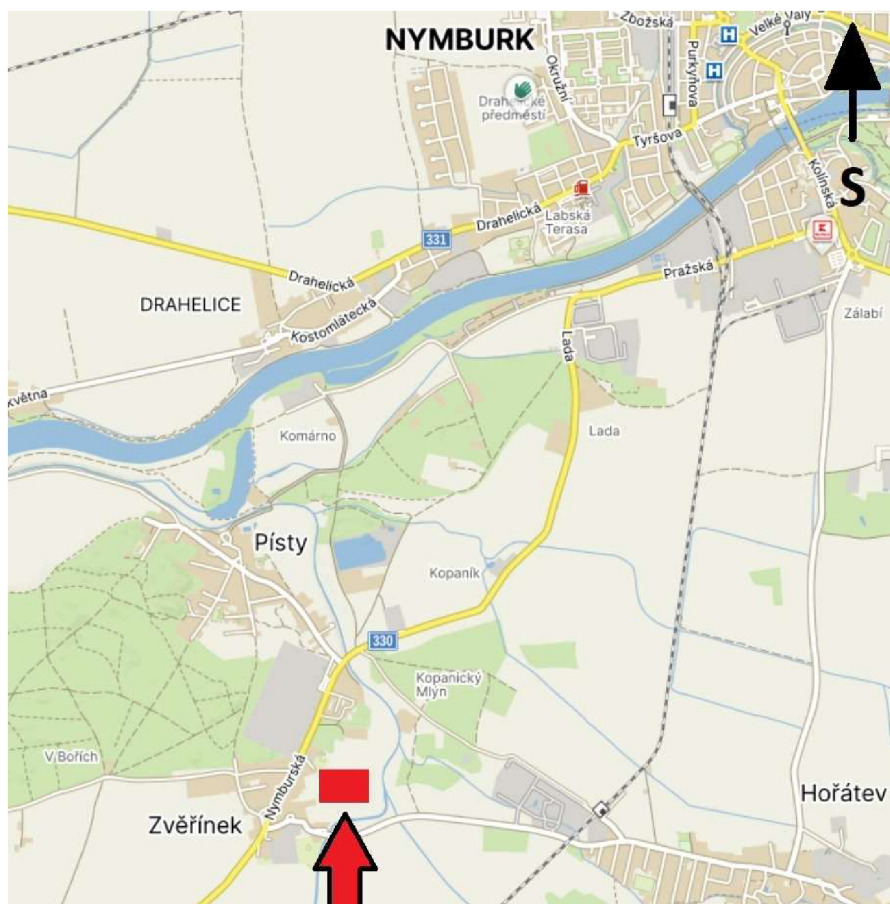
Rostoucí povrchová plocha biouhlu má za následek jeho zvyšující se schopnost zadržovat vodu (Freeman a kol., 1995). Částice biouhlu, jejichž povrchová plocha byla větší jak 300 m²/g, zapříčinily nárůst hodnot dostupné vodní kapacity o 70 % a polní kapacity o 52 % ve srovnání s půdou bez ošetření. Částice biouhlu, které měly povrchovou plochu menší jak 20 m²/g, měli naměřené hodnoty dostupné vodní kapacity o 33,3 % nižší. Pro hodnocení vlivu biouhlu na nasycenou hydraulickou vodivost nebyly dostupné dostatečné údaje. Data nebyla konzistentní – hodnoty nebyly spojeny s rozdíly v objemové hustotě půdy (Ifeoma a kol., 2020). Výsledky Beilei a kol. (2023) ukázaly, že u hrubozrnných půd klesla nasycená hydraulická vodivost o -30,5 %, u půd středně zrnitých stoupla o 28,7 % a u půd jemnozrnných stoupla o 77,3 %.

Jaký má vliv výběr suroviny (dřevěné zbytky / zbytky plodin), ze které se za pomoci pyrolýzy vyrobí biouhel, zatím není zcela jasné. Výraznější účinek biouhlu získaného z dřevěných zbytků na nasycenou hydraulickou vodivost ve srovnání s biouhlem ze zbytků plodin by mohl být výsledkem jeho větší povrchové plochy a porozity, což zvyšuje jeho schopnost ovlivňovat funkce vody v půdě (Wang et al., 2013). Bylo zjištěno, že biouhel z dřevěných zbytků má větší pórovitost než u zbytků plodin (Punnoose a Anitha, 2015). To je způsobeno rozdíly ve struktuře, tvaru, velikosti a složení buněk dané biomasy. Kinney a kol. (2012) hlásili vyšší polní kapacitu u písčité půdy při použití biouhlu z jabloně než při použití listů magnolie. Obě suroviny byly pyrolyzované při stejné teplotě (400 °C), stejným postupem. Jiné individuální studie (Burrell a kol., 2016) a metaanalýza provedená Omondí a kol. (2016) hlásily významný nárůst dostupné vodní kapacity při použití biouhlu z pozůstatků plodin oproti dřevěnému biouhlu. V Ifeoma a kol., 2020 tento výsledek nebyl potvrzen. Tyto nekonzistence ukazují na to, že pouze typ biomasy nemusí být dostatečný k určení účinnosti biouhlu při zlepšování vlastností půdní vody. I mezi podobnými typy biomasy lze získat různé účinky biouhlu (Suliman et al., 2017). Žádné z podmínek pyrolýzy, včetně teploty, neměly vliv na účinek biouhlu na všechny zkoumané vlastnosti půdy (Ifeoma a kol., 2020). Podle (Guo a kol., 2020) má aplikace biouhlu pozitivní následky v oblasti kompostování. Aplikovaný biouhel prý zkracuje dobu zrání kompostu a napomáhá zabránit vyplavování živin a hnoje. Podle Lehmann a Joseph (2012) jsou však biouhly ochuzeny o některé živiny, ve srovnání s hnojem či komposty. Aplikace biouhlu ve směsi například s hnoji je tedy pro půdu výživnější než aplikace samotného biouhlu. Hnůj či kompost obsahuje huminy, díky kterým se zvyšuje mikrobiologická aktivita a zlepšuje se struktura půdy (Medina a kol., 2010). Směs také dokáže zadržovat půdní vlhkost (Seyedsadr a kol., 2022) a absorbovat kovy (Teodoro M. a kol., 2020). Další výhodou směsi biouhlu s hnoji

či komposty je také cena provedení aplikace, jelikož výroba biouhlu (kap. 3.4.) je značně finančně náročnější v porovnání s hnojem nebo kompostem.

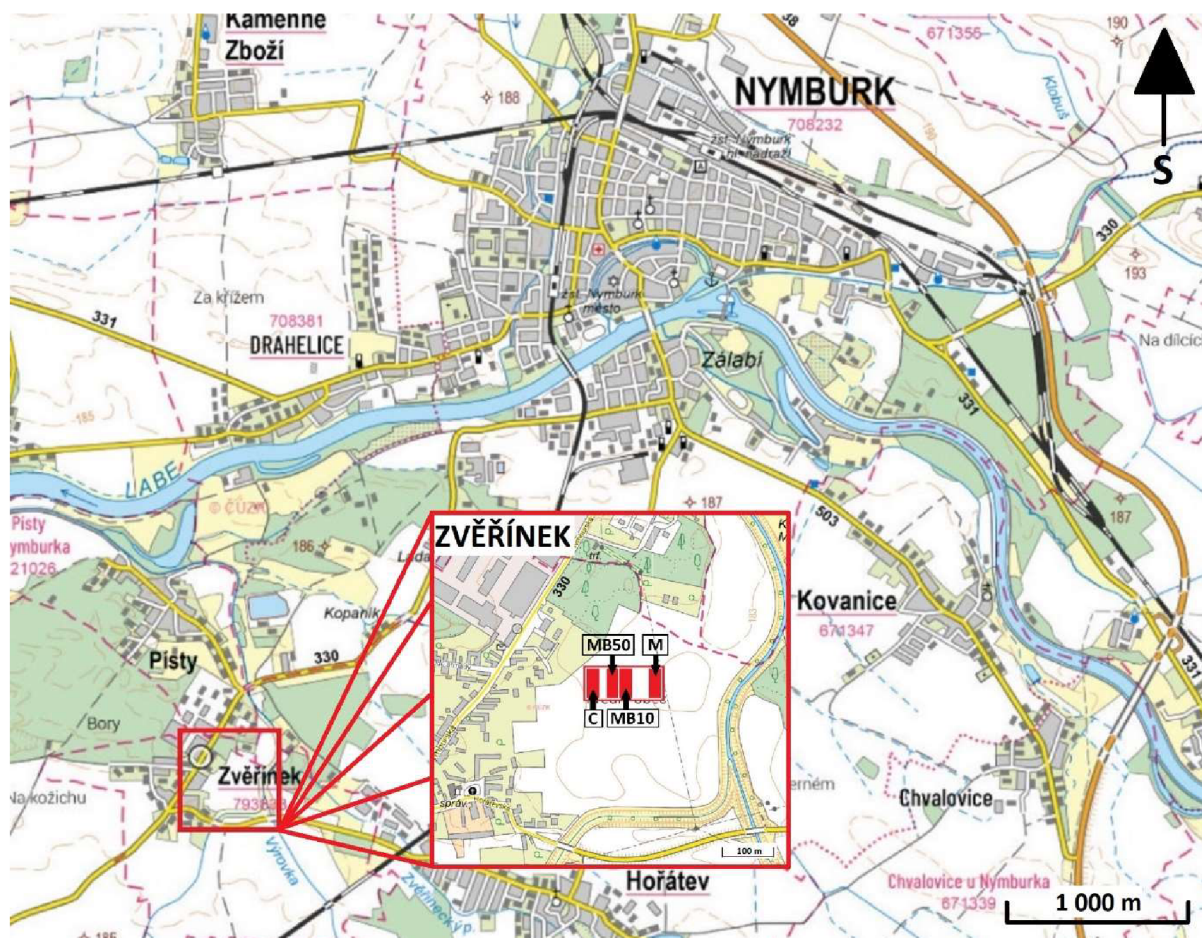
4. CHARAKTERISTIKA ÚZEMÍ

Zájmové území se nachází ve Středočeském kraji, směrem na jihozápad 3 km od města Nymburk, v těsné blízkosti obce Zvěřínek (obrázek 4).



Obrázek 4.: Poloha zájmového území v katastrálním území obce Zvěřínek zakreslená červeným obdélníkem (zdroj mapového podkladu: mapy.cz, 2024).

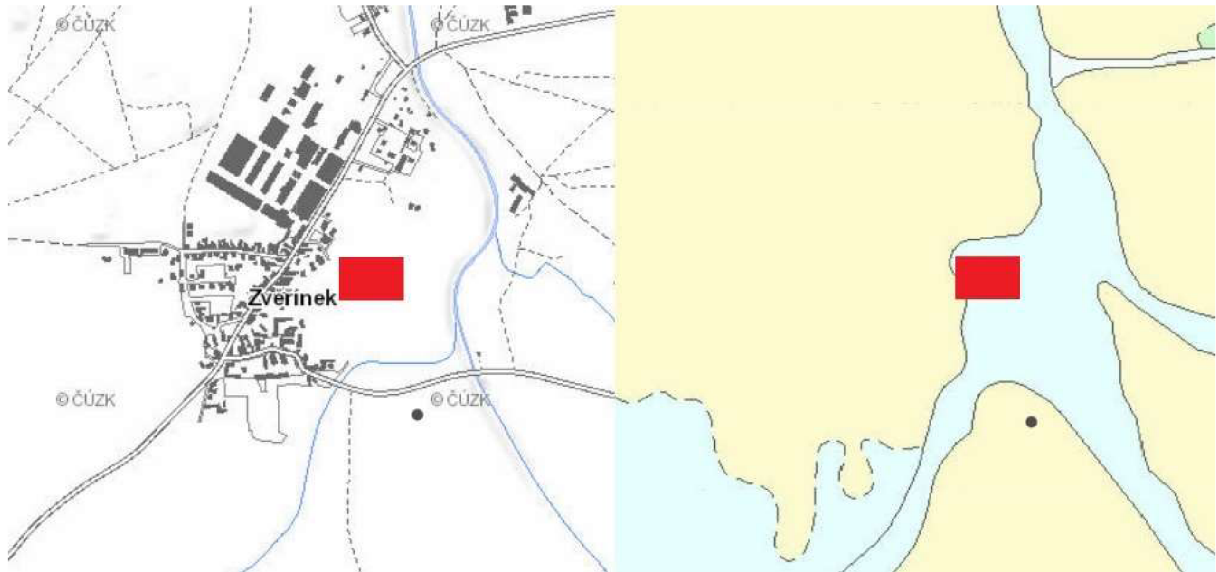
Lokalita, na které bylo měření prováděno se nachází v blízkosti malého vodního toku Šembera, který protéká podél jejího jižního okraje, a následně se vlévá do řeky Výrovka, který protéká podél východního strany pozemku (tok k severu). Lokalita je podrobněji znázorněna na obrázku 5.



Obrázek 5.: Lokalita (zdroj mapového podkladu: ČÚZK, 2024).

4.1. Geologie

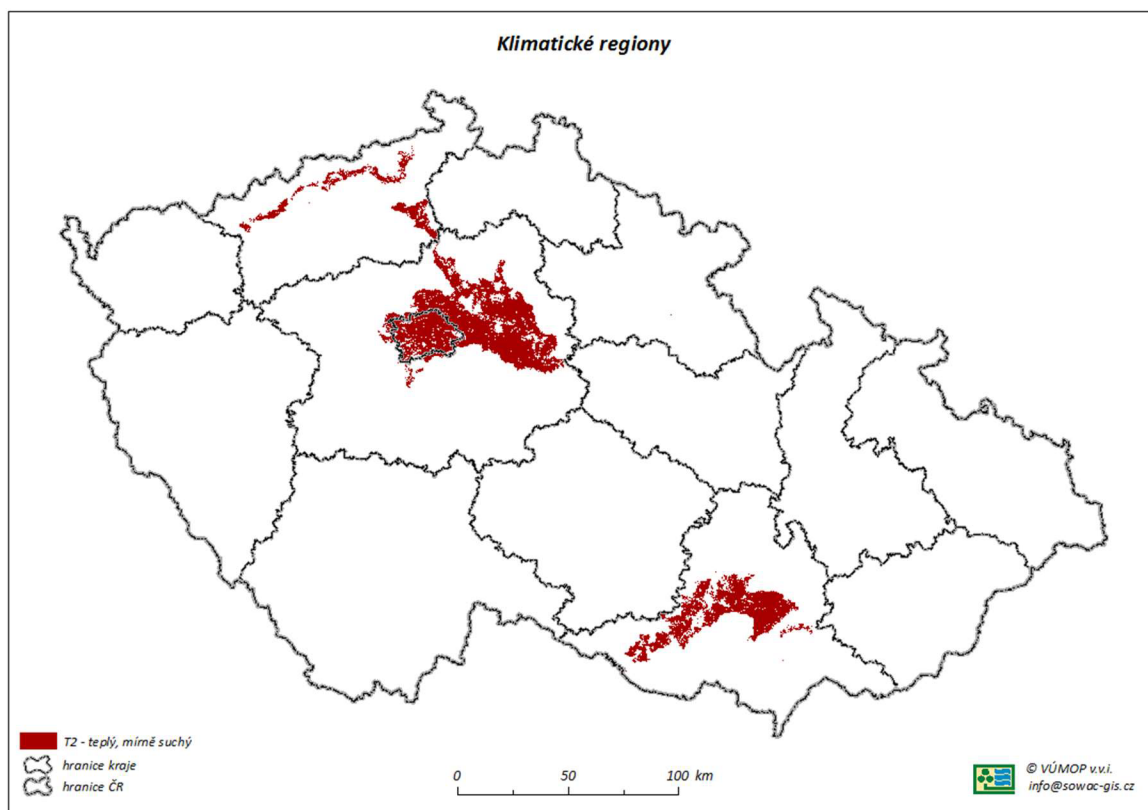
Zájmové území se nachází v geomorfologické oblasti Středočeská tabule, v Kutnohorskosvratecké oblasti. Půda zájmového území je tvořena nivním sedimentem z období Kvartéru. Tento nivní sediment zde může být tvořen fluviálními hlinitými písky až písčítými štěrky. Půdy v okolí jsou tvořeny převážně navátými písky, též z období Kvartéru. Zájmové území je na obrázku č.6 vyznačeno červeným obdélníkem. Modré plochy zde značí nivní sediment, plochy žluté značí naváté písky.



Obrázek 6.: Poloha pozemku – červený obdélník: zájmové území, modrá barva: nivní sediment, žlutá barva: naváté písky (orientováno k severu) (Geovědní mapy 1 : 25 000, upraveno).

4.2. BPEJ, Klima, Pedologie

Podle kategorizace půd pomocí kódu BPEJ (bonitované půdně-ekologické jednotky) se pozemek, přesněji řečeno experimentální plocha, nachází na typu půdy s kódovým označením 2.21.10 (obrázek 8.). Území se nachází ve 2. klimatickém regionu (BPEJ kód – číslo na 1. pozici) (obrázek 7.). Jedná se o region teplý, mírně suchý. Průměrná roční teplota v regionu je 8 až 9 °C a průměrný úhrn srážek je 500 až 600 mm za rok (eKatalog BPEJ, 2022).



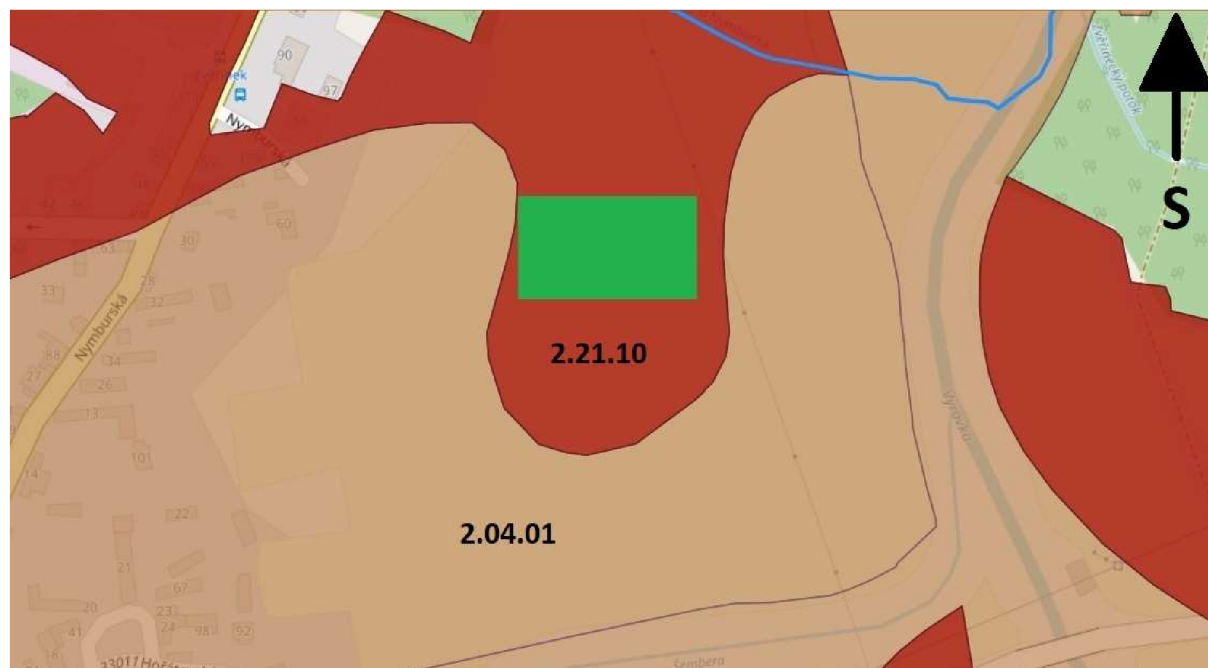
Obrázek 7.: 2. klimatický region dle kategorizace BPEJ na území ČR (eKatalog BPEJ, 2022).

Regozem je zde hlavní půdní představitel, což odpovídá dvojčíslí 21, které v BPEJ kódu zaujímá 2. a 3. pozici. Na další pozici v kódu BPEJ, který reprezentuje tuto plochu, se nachází číslo 1. Toto číslo vyjadřuje sklonitost a expozici. Sklonitost by se měla pohybovat v rozmezí 3 až 7° se všesměrnou expozicí (orientace ke světovým stranám). Tento údaj však nereprezentuje experimentální plochu a její blízké okolí. Experimentální plocha se nachází v rovině ($< 3^\circ$). Posledním číslem kódu BPEJ je 0, které zastupuje půdy hluboké. Hloubka takovýchto půd je více jak 60 cm a obsah skeletu se u těchto půd udává do 10 % . Hydropedologické charakteristiky území (podle eKatalog BPEJ, 2022) jsou znázorněny v tabulce 2.

HYDROPEDOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY PRO MÍSTNÍ REGOZEM:

CHARAKTERISTIKA	HODNOTY	KATEGORIE
Infiltrace a propustnost	od 0.2 mm/min	vysoká
Retenční vodní kapacita	do 100 l/m ²	nízká
Využitelná vodní kapacita	do 79 l/m ²	nízká

Tabulka 2. (eKatalog BPEJ, 2022)

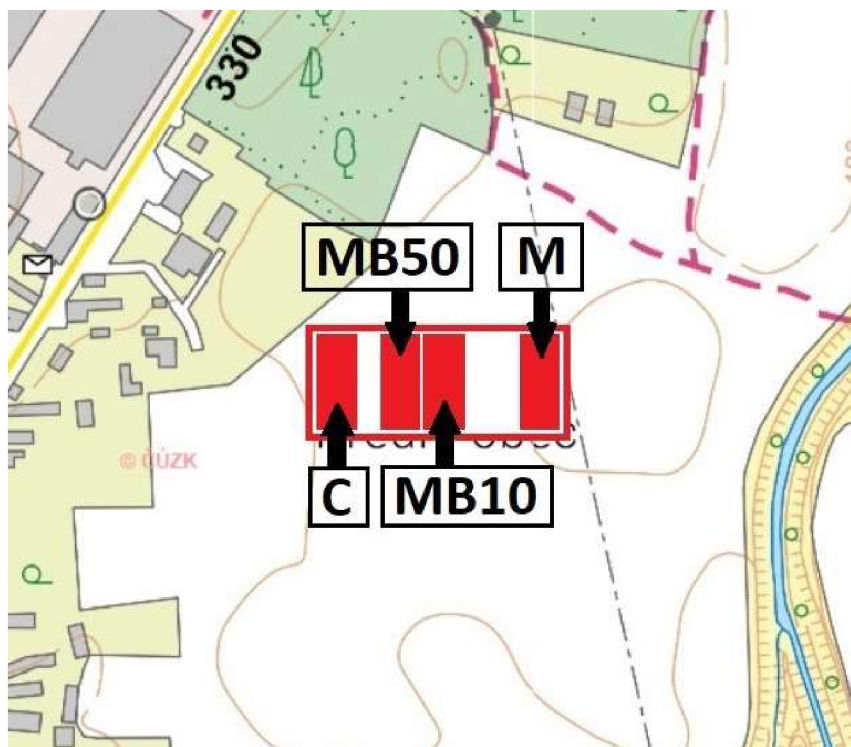


Obrázek 8.: Poloha pozemku v mapě BPEJ (zdroj mapového podkladu: eKatalog BPEJ, 2022).

5. METODIKA

5.1. Plán vzorkování půdy

Měření Guelphskými permeametry (GP) na lokalitě Zvěřínek probíhalo na čtyřech vytyčených polních plochách (obrázek 9.) s rozdílným ošetřením půdy, ve dvou sezónách, a to v dubnu a srpnu roku 2023 (přesněji 21. dubna a 4. srpna). Tyto plochy byly označeny zkratkami C, MB50, MB10, M. Plocha C je plocha bez přidání jakýchkoliv hnojivých látek a bez biouhlu, MB10 obsahuje přídavek hnoje a biouhlu v poměru 1:10., MB50 obsahuje přídavek hnoje a biouhlu v poměru 1:1 a plocha M obsahuje pouze přídavek hnoje.



Obrázek 9.: Lokalita – experimentální plochy (orientace k severu) (zdroj mapového podkladu: ČÚZK, 2024).

Při každé kampani byla na každé ploše provedena čtyři měření ve vzdálenosti minimálně 1,5 m od sebe, za účelem získání opakování z jednotlivých ošetření pro statistické analýzy a definování extrémních hodnot. Celkem bylo tedy v každé kampani provedeno 16 GP experimentů pro stanvení K_s . Čtyři opakování byla zvolena z důvodu časové náročnosti měření, více opakování by bylo teoreticky vhodnější ale nebylo je prakticky možné uskutečnit z časových důvodů. Na každé ploše byla provedena dvě měření Guelphským permeametrem typu A a dvě typu B (viz. kapitola 5.2.).

Tato měření s GP byla provedena i v roce 2022 opět ve dvou kampaních (v dubnu a srpnu) v rámci probíhajícího projektu NAZV QK1910056 na FŽP - ČZU (Dlouhodobý test aplikace biocharu vyrobeného z odpadní biomasy do zemědělské půdy za účelem řešení problematiky sucha v intenzivně zemědělsky využívaných oblastech České republiky). V této práci budou použita pro srovnání a diskuzi také data z těchto kampaní.

Celkově tedy bylo provedeno na lokalitě Zvěřinek 64 bodových měření nasycené hydraulické vodivosti Guelphskými permeametry za rok 2022 a 2023 (64 = 2 sezónní kampaně x 2 roky x 4 plochy x 4 opakování). S Guelphským permeametrem bylo měřeno v mělkých vrtech hloubkou cca 16 nebo cca 21 cm (podrobně viz. níže). V rámci probíhajícího projektu a souběžně zpracovávané bakalářské práce byly ve střední hloubce 7 cm odebrány neporušené vzorky o objemu 100 cm³. Z každé kampaně a ošetřené plochy bylo pak vybráno 7 reprezentativních vzorků pro stanovení objemové hmotnosti suché zeminy a aktuální objemové vlhkosti půdy standardní gravimetrickou metodou. Tyto hodnoty pak byly použity souběžně s hodnotami Ks.

5.2. Terénní měření nasycené hydraulické vodivosti

K měření nasycené hydraulické vodivosti (Ks) byly použity dva Guelphské permeametry s konstantním spádem. Měření je kombinací vertikálního a horizontálního směru proudění, tokem stěnami i dnem vrtu (Jačka a Pavlásek, 2014-B). První menší model GP-A (Model 2800 K1 GP kit, Soilmoisture, USA) a druhý větší model GP-B (vyrobený na ČVUT v Praze). Novějším permeametrem je GP-A. Výhodou tohoto permeometru je zejména to, že umožňuje měřit s nižší výškou výtopy. Použití dvou Guelphských permeametrů (GP) zkrátilo celkovou dobu měření v obou sezónách.

Prvním krokem měření bylo vytvoření vrtů za pomoci vrtáků. Průměry vrtů (vrtáků) byly 5,5 cm pro GP-A a 7 cm pro druhý (starší) GP-B. Hloubka vrtů se pohybovala ve stejných rozmezích, a to u GP-A v průměru 16 cm a pro GP-B v průměru 21 cm. Dalším krokem bylo naplnění nádrže GP vodou a navržení hladiny výtopy vrtů. Výtopa byla pro každé měření volena jako konstantní, měření bylo prováděno metodikou s jedním konstantním spádem (Jačka a Pavlásek, 2014-B).

Hladina výtopy musí být nižší než hloubka daného vrtu, aby nedocházelo k přelití hrany vrtu. U GP-B byla hladina výtopy zvolena 15 cm, u GP-A obvykle na 10 cm (výjimečně 5 či 13 cm).

Následně bylo možné GP vložit do vrtu tak, aby nedocházelo k hutnění stěn a dna vrtů. K zamezení významného kontaktu GP s vrtem pomáhala trojnožka, která nesla váhu celého přístroje. Dále byla vždy provedena kontrola uzavření otvorů a ventilů pro plnění GP vodou v horní části nádrže. Bez uzavření těchto otvorů a ventilů by následně došlo k rychlému úniku vody z nádrže a znehodnocení daného vrtu. Po těchto úkonech mohlo dojít k samotnému měření. Měření bylo zahájeno posunutím kovového tělíska s ryskou na hodnotu navržené hladiny výtopy a spuštěním stopek. Následně došlo k výtopě vrtu na přibližně na zvolenou konstantní úroveň.

Výstupní data tohoto měření byla tvořena hladinou vody v nádrži a časem, který k dané hladině náležel. Tato data byla zapisována do formuláře určeného pro tato měření. V každém tomto formuláři bylo též za potřeby zaznamenat i informace o daném vrtu, zejména průměr vrtu, hloubka vrtu, výška hladiny výtopy ve vrtu. Záznam poklesu hladiny ve vrtu a příslušných časů probíhal do přibližného ustálení rychlosti poklesu hladiny ve vrtu.

5.3. Vyhodnocení dat

Vyhodnocení naměřených dat bylo provedeno pomocí tabulkového programu Microsoft Excel od americké společnosti Microsoft. Pro výpočet nasycené hydraulické vodivosti s konstantním spádem u jednotlivých měření byl použit vzorec dle Reynoldse (Reynolds, 2008-A), rovnice (10):

$$K_s = \frac{C_w * i_{cg} * A_g}{2 * \Pi * h g^2 + C_w * \Pi * r g^2 + \frac{2 * \Pi * h g}{s_n}} \quad (10),$$

Kde K_s je Nayscená hydraulická vodivost, C_w – bezrozměrný tvarový parametr vrtu, i_{cg} – ustálená rychlost poklesu hladiny v zásobníku permeamtru, A_g – vnitřní průřezová plocha zásobníku permeamtru, h_g – výška vody ve vrtu, r_g – poloměr vrtu, s_n – sorpční číslo.

Výpočet bezrozměrného tvarového parametru vrtu (C_w) (Zhang a kol., 1998), rovnice (11):

$$C_w = \left(\frac{\frac{hg}{rg}}{2,074 + 0,093 * \frac{hg}{rg}} \right)^{0,754} \quad (11)$$

Kde hg je výška vody ve vrtu, rg – poloměr vrtu.

Ustálená rychlost poklesu hladiny v zásobníku permeamtru (i_{cg}) byla vždy vyhodnocena jako průměr tří vybraných hodnot rychlosti poklesu hladiny (i_g) z ustálené části měření, kdy již bylo předpokládáno, že je půda nasycena do maximální úrovně v polních podmínkách.

Sorpční číslo (s_n) udává vliv sorpční schopnosti půdy na tvar a směr infiltrace vody ve vrtu. Při metodě s jedním konstantním spádem se určuje na základě kvalifikovaného odhadu zrnitosti a půdní struktury na základě tabulky 3.

ODHADY SORPČNÍHO ČÍSLA:

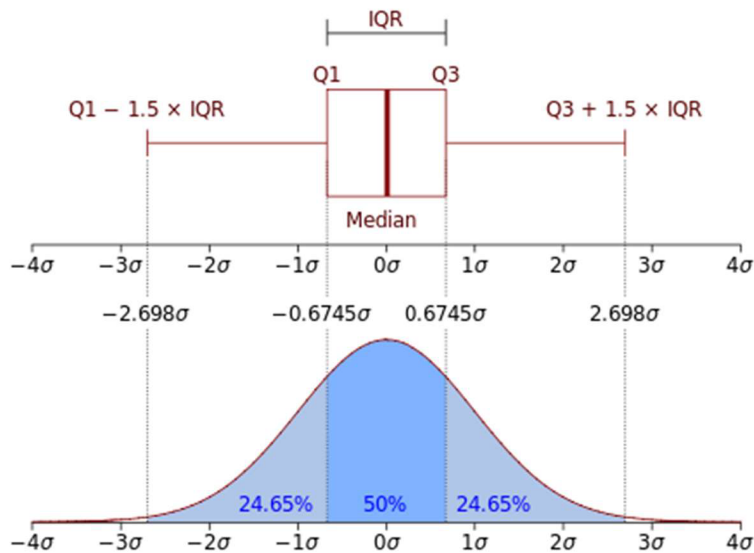
TEXTURNĚ-STRUKTURNÍ KATEGORIE	ODHAD SORPČNÍHO ČÍSLA (cm^{-1})
Zhutněné nestrukturní jílové nebo prachové materiály	0,01
Nestrukturní jílové a prachové půdy a jemnozrné písky	0,04
Většina strukturních a střednězrných materiálů jako strukturní jíly a hlíny, písek střední zrnitosti	0,12
Štěrk, hrubozrný písek a vysoce strukturní půdy s velkými a početnými makropóry	0,36

Tabulka 3. (převzato: Jačka a Pavlásek, 2014-B)

Sorpční číslo (s_n) vycházející z texturně-strukturní kategorie půdy bylo pro toto místo (pro všechny výpočty) určeno na hodnotu $0,12 \text{ cm}^{-1}$.

5.4. Statistická analýza dat

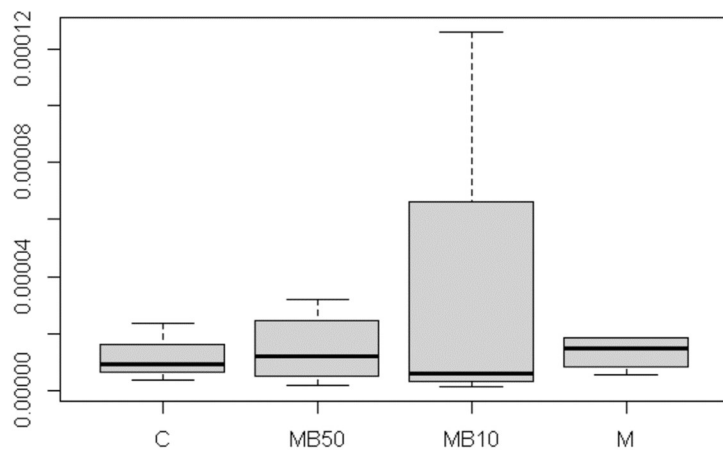
Pro znázornění výsledků měření byl přednostně vybrán graf typu boxplot (krabicový graf) (příklad viz obrázek 10.). Výhodou boxplotu je zejména vyobrazení hodnot, které umožňuje graficky porovnávat naměřené hodnoty, a to zejména rozptyl, rozsah (celkově i mezikvartilově = IQR) a medián naměřených hodnot.



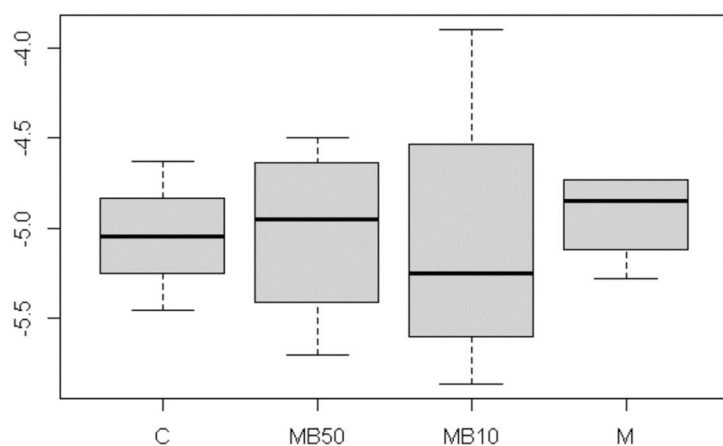
Obrázek 10.: Boxplot a normální rozdělení (Statistics by Jim, 2024).

Dalšími statistickými charakteristikami, které byly pro porovnání hodnot mezi jednotlivými ošetřeními či sezónami použity je aritmetický průměr, variační koeficient (směrodatná odchylka dělená aritmetickým průměrem) a rozsah hodnot. U jednotlivých skupin (či souborů) hodnot, a to ať už u skupiny hodnot z měření na jedné ploše nebo ze všech hodnot měřených v jednu sezónu, byl proveden test normality (Shapiro a Wilk, 1965).

Tři z šestnácti (4 kampaně \times 4 ošetření půdy) výsledků testu normality se nacházeli pod hraniční hodnotou 0,05. Proto byly hodnoty zlogaritmovány. Po této úpravě již měřená data bylo možné aproximovat normálním rozdělením. Výhodou provedení této akce bylo také zlepšení čitelnosti (uspořádání) samotných boxplotů. Boxploty jsou tak lépe porovnatelné mezi sebou. Rozdíl je znázorněn: obrázek 11. – příklad: graf vycházející z reálných hodnot měření, obrázek 12. – příklad: graf v logaritmickém měřítku.



Obrázek 11.: příklad: graf vycházející z reálných hodnot měření.



Obrázek 12.: příklad: graf v logaritmickém měřítku.

Všechny soubory hodnot, jak ty před logaritmickou úpravou, tak ty po logaritmické úpravě, byly podrobeny jednofaktorové analýze rozptylu (ANOVA). Tato analýza porovnávala průměrnou hodnotu měření nasycené hydraulické vodivosti na půdě mezi ošetřeními (C, MB50, MB10, M) Všechny statistické testy byly provedeny na hladině významnosti 0,05.

6. VÝSLEDKY

6.1. Nasycená hydraulická vodivost (K_s)

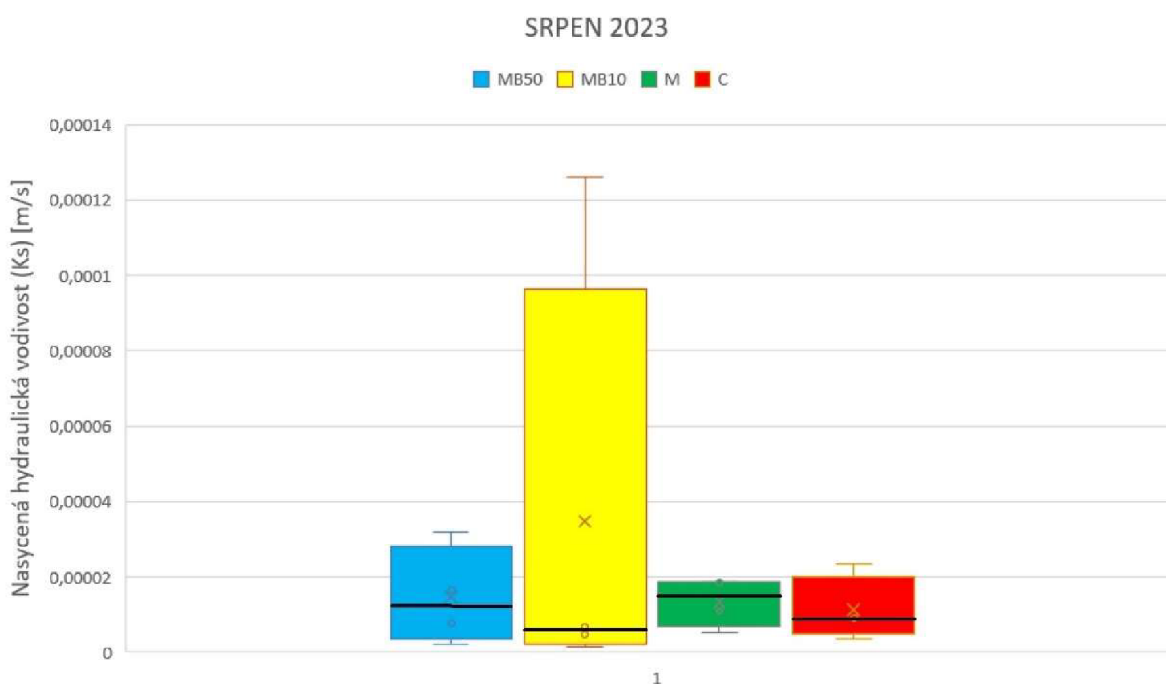
U kampaně měření nasycené hydraulické vodivosti z dubna roku 2023 se ukázalo, že jednotlivá ošetření půdy (MB50, MB10, M, C) nevykazují statisticky významné rozdíly v průměrných hodnotách dle ANOVA. Graficky jsou výsledky zobrazeny na obrázku 13. U kampaně měření nasycené hydraulické vodivosti ze srpna a roku 2023 se ukázalo, že jednotlivá ošetření půdy (MB50, MB10, M, C) opět nevykazují statisticky významné rozdíly v průměrných hodnotách dle ANOVA. Graficky jsou výsledky zobrazeny na obrázku 14. Rozptyly hodnot měření jednotlivých ošetření půdy, zejména aplikace biouhlu a hnoje v poměru 1:1 a 1:10, jsou již však výrazně odlišné od půdy bez ošetření. Důvodem tohoto jevu by mohlo být nerovnoměrné aplikování částic směsi biouhlu s hnojem a následný výskyt měření s extrémními hodnotami. Měření na plochách, kde byl aplikován samotný hnůj, nevykazuje zásadní změnu rozptylu naměřených hodnot.

V podstatě zde nedošlo k výrazným změnám nasycené hydraulické vodivosti. Pouze v několika případech došlo k výskytu extrémních hodnot. Jelikož byl proveden malý počet měření (každý jednotlivý datový soubor z ošetření a kampaně obsahoval pouze 4 opakování), tyto extrémní hodnoty byly schopny zapříčinit zvýšení rozptylu a posun mediánů v boxplotech (krabicových grafech), a to zejména u ošetřených ploch MB50 a MB10 v boxplotu DUBEN 2023 a MB10 v boxplotu SRPEN 2023 (viz. obrázek 13 a 14). Maximální rozdíly v hodnotách nasycené hydraulické vodivosti se pohybují v řádu několika jednotek setin milimetru za sekundu. Nejedná se tedy o nikterak významné rozdíly oproti půdě bez ošetření.

Výsledek vlivu aplikace biouhlu a hnoje (v poměrech 1:1 a 1:10) a hnoje samotného na nasycenou hydraulickou vodivost je v tomto experimentu dle ANOVA nevýznamný. Aplikované látky neměly na nasycenou hydraulickou vodivost zásadní vliv.

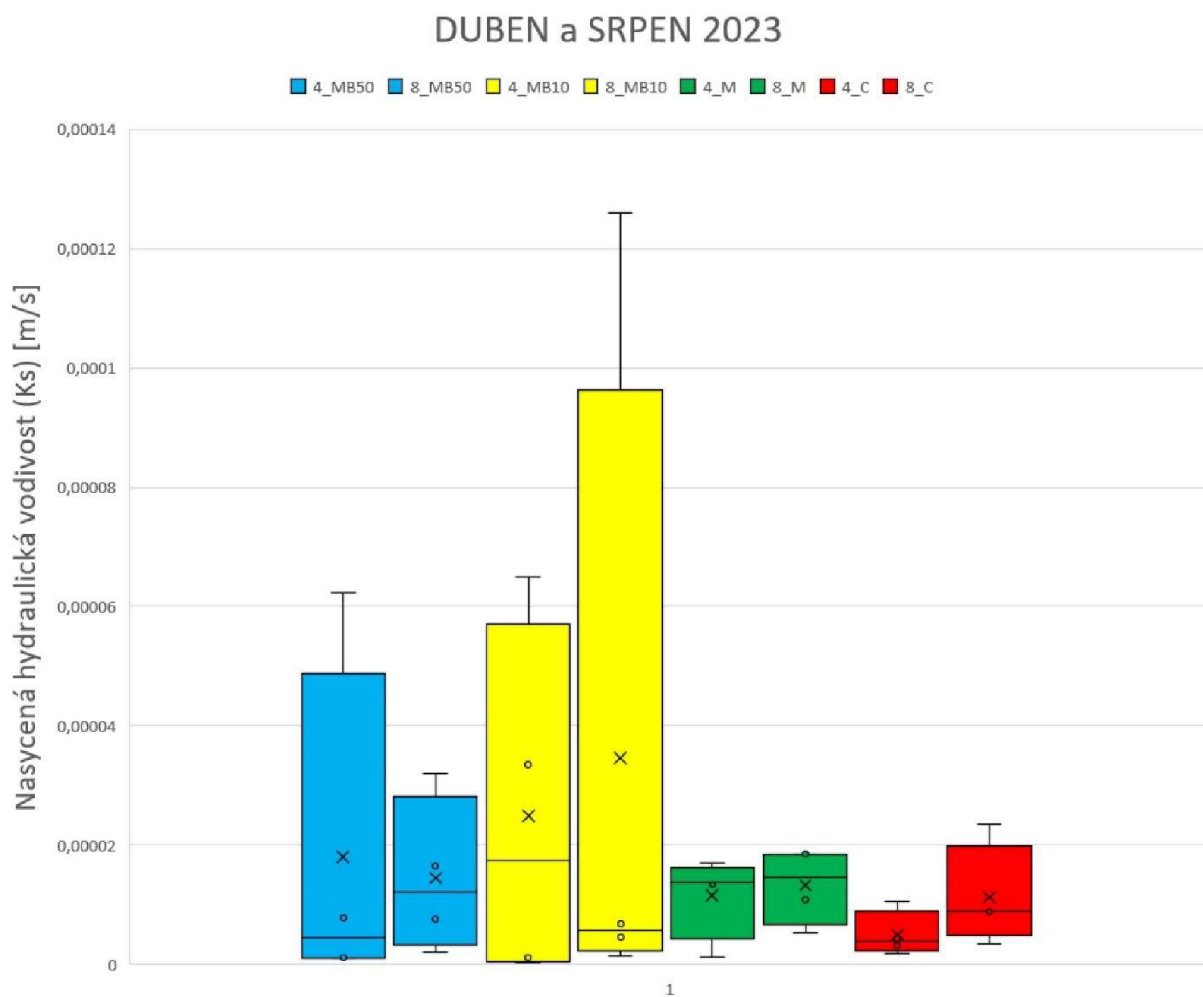


Obrázek 13.: graf naměřených hodnot nasycené hydraulické vodivosti – duben 2023, MB50 – směs hnoje a biouhlu v poměru 1:1 (modrá barva), MB10 - směs hnoje a biouhlu v poměru 1:10 (žlutá barva), M – hnůj (zelená barva), C – bez ošetření. Křížek – průměr, vodorovná čára – medián.



Obrázek 14. Naměřené hodnoty nasycené hydraulické vodivosti v srpnu 2023. MB50 je směs hnoje a biouhlu v poměru 1:1 (modrá barva), MB10 je směs hnoje a biouhlu v poměru 1:10 (žlutá barva), M je hnůj (zelená barva) a C ke kontrola bez bez ošetření. Křížek – průměr, vodorovná čára – medián.

Při porovnání hodnot z měsíce dubna a srpna z roku 2023 (obrázek 15) je znát, že průměry naměřených hodnot nasycené hydraulické vodivosti jsou velmi podobné. Některé boxploty jsou na první pohled výrazně odlišné, zejména svým rozptylem. Jak již bylo výše zmíněno, tento rozptyl zapříčiňuje výskyt několika extrémních hodnot. Avšak průměrné hodnoty ukazují, že mezi kampaněmi nevyskytují výrazné rozdíly ve středních hodnotách. Hodnoty mediánů s průměrů K_s v srpnové kampani jsou ve 3 ze 4 případů mírně vyšší oproti dubnové kampani.

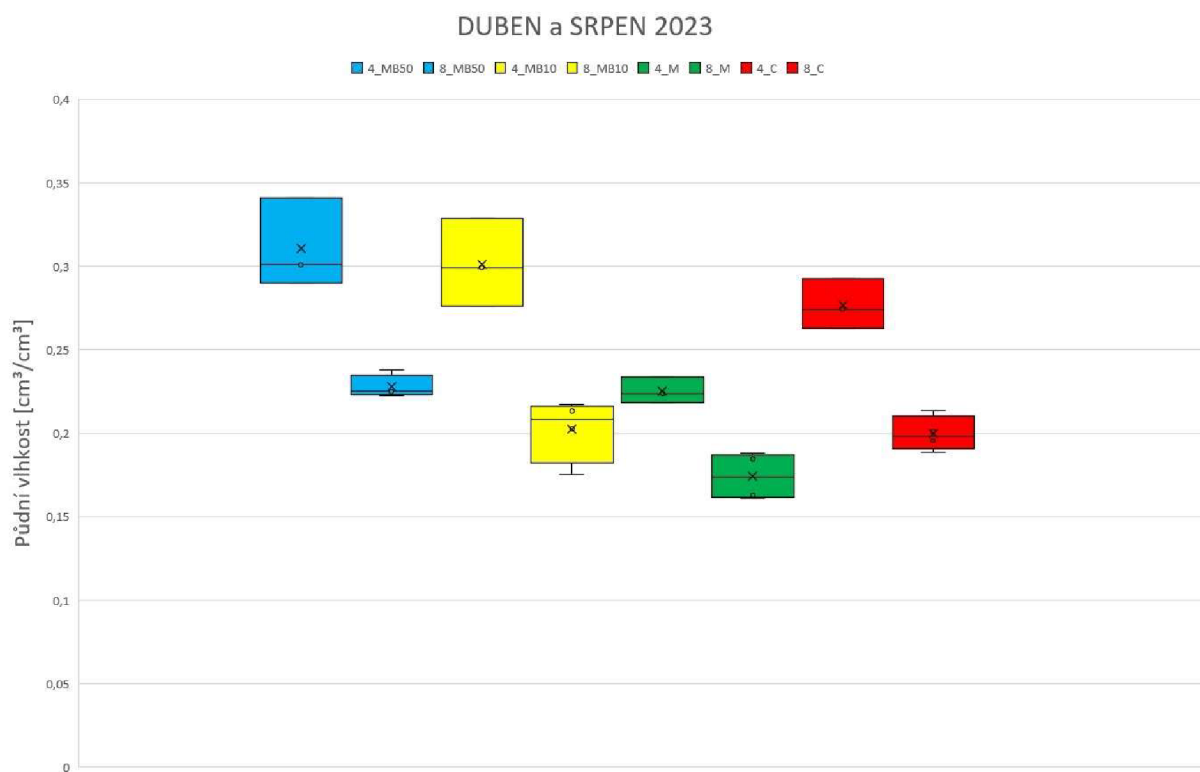


Obrázek 15.: graf naměřených hodnot nasycené hydraulické vodivosti – duben a srpen 2023, duben (4_)(levá strana), srpen (8_)(pravá strana), MB50 – směs hnoje a biouhlu v poměru 1:1 (modrá barva), MB10 - směs hnoje a biouhlu v poměru 1:10 (žlutá barva), M – hnůj (zelená barva), C – bez ošetření. Křížek – průměr, vodorovná čára – medián.

6.2. Aktuální půdní vlhkost při měření Ks

Rozdíly v půdní vlhkosti mezi dubnem a srpnem roku 2023 jsou vysoké.

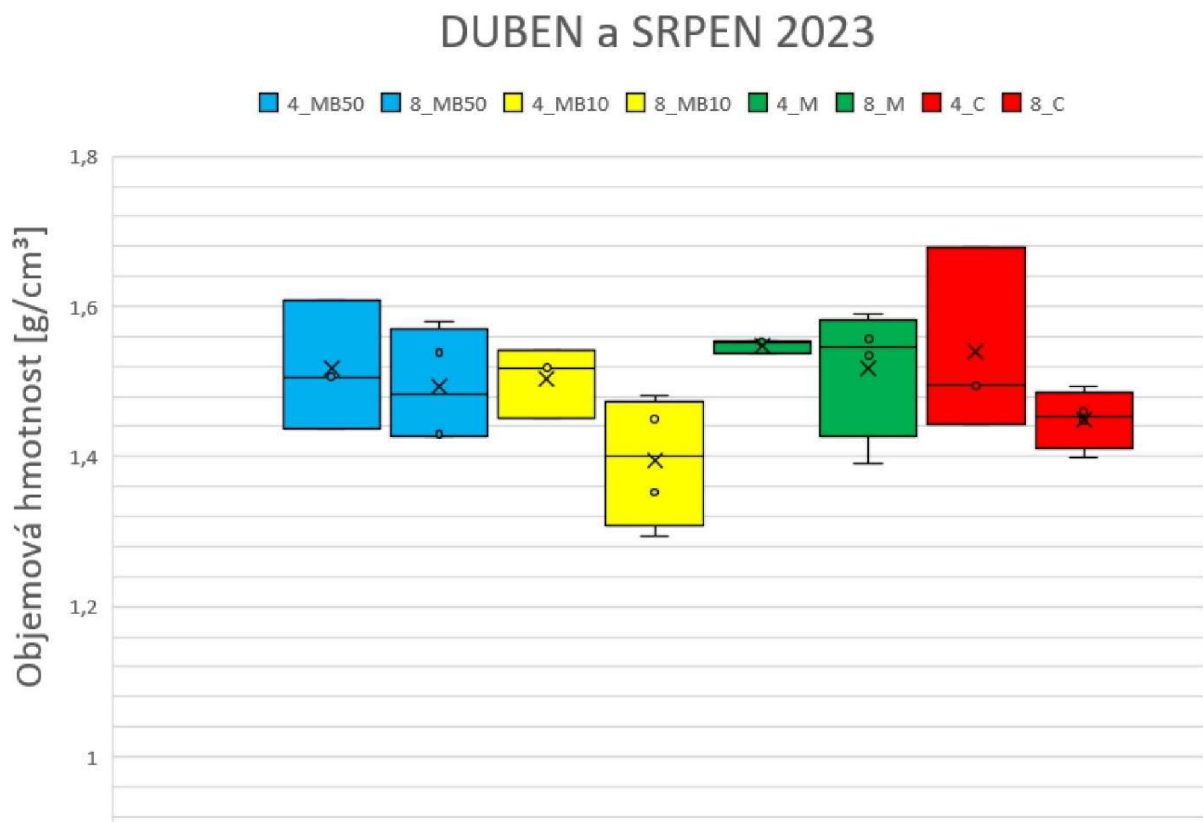
Jestliže porovnáme hodnoty všech stanovišť (obrázek 16.), dojdeme k závěru, že měření zaznamenaná v dubnové sezóně dosahují výrazně vyšších hodnot než měření prováděná v sezóně srpnové. Rozdíly hodnot jsou přibližně 4 až 8 %. Rozptyly hodnot nejsou významně rozdílné, s výjimkou rozptylu hodnot naměřených v dubnu a srpnu roku 2023 na ploše ošetřené hnojem a biouhlem v poměru 1:1 (4_MB50 a 8_MB50). Medián v boxplotu z dubna (4_MB50) se nachází ve spodní části boxplotu, tedy může to znamenat, že výrazně vyšší rozptyl hodnot, oproti srpnu (8_MB50), může být zapříčiněn výskytem extrémních hodnot/y. Rozdíly mezi ošetřeními jsou významné.



Obrázek 16.: graf naměřených hodnot půdní vlhkosti – duben a srpen 2023, duben (4, levá strana), srpen (8, pravá strana), MB50 – směs hnoje a biouhlu v poměru 1:1 (modrá barva), MB10 - směs hnoje a biouhlu v poměru 1:10 (žlutá barva), M – hnůj (zelená barva), C – bez ošetření. Křížek – průměr, vodorovná čára – medián.

6.3. Objemová hmotnost

Jestliže mezi sebou porovnáme hodnoty vyhodnocené v dubnu a srpnu roku 2023 (obrázek 17.), zjistíme že mezi těmito hodnotami a jejich rozsahem není výrazný rozdíl. Srpnová měření mají nižší průměry hodnot než měření dubnová, ale tyto rozdíly jsou minimální. Rozptyly naměřených hodnot jsou si ve většině případů velmi podobné.



Obrázek 17.: graf naměřených hodnot objemové hmotnosti – duben a srpen 2023, duben (4, levá strana), srpen (8, pravá strana), MB50 – směs hnoje a biouhlu v poměru 1:1 (modrá barva), MB10 - směs hnoje a biouhlu v poměru 1:10 (žlutá barva), M – hnůj (zelená barva), C – bez ošetření. Křížek – průměr, vodorovná čára – medián.

7. DIZKUZE

7.1. Efekty organických přísadků na nasycenou hydraulickou vodivost v rámci jednotlivých kampaní

Přímý vliv organických přísadků, jak biouhlu v kombinaci s hnojem, tak hnoje samotného, nebyl terénním měřením K_s , který je součástí této práce, potvrzen. Hlavními předpoklady, proč aplikace organických přísadků nebyla účinná, jsou rozměry částic a způsob aplikace biouhlu. Pro tento experiment byl biouhel (případně s hnojem) aplikován ve formě nerozemletých částic o větších rozměrech (obrázek 18), než jsou rozměry ideální pro vyplnění půdních pórů a následný rozklad tohoto organického přísadku v půdním prostředí. Na důležitost velikosti částic biocharu pro jejich funkci zpomalení toku vody v porézním systému upozorňuje např. Jačka a kol. (2018-A) nebo Lim a kol. (2016).

Pravděpodobně jedinou výhodou aplikace biouhlu ve formě větších částic je lepší odolnost aplikované látky vůči unášecí síle větru. Jelikož se jedná o povrchovou aplikaci, částičky malých, však pro infiltraci do půdních pórů ideálních, rozměrů by nebyly schopny odolávat unášecí síle větru a docházelo by tak k jejich odnosu z míst aplikace. Další nevýhodou je nerovnoměrná aplikace, díky které je účinnost látky omezena pouze na místa (body), kde se částice rozložily, nikoliv na celou požadovanou plochu (obrázek 19). Pro ideální aplikaci rozemletého biouhlu by bylo zapotřebí speciálního zařízení, které by bylo schopno rovnoměrně aplikovat rozemletý biouhel způsobem, který by vylučoval možnou větrnou erozi aplikovaných částiček biouhlu. Terénní aplikace je svým provedením i podmínkami obecně složitější než aplikace prováděná v laboratorních podmínkách. I to má za následek, že laboratorní experimenty obvykle vykazují výrazně příznivější výsledky než aplikace prováděné v terénu.

Půdy nacházející se v oblastech nívných toků bývají převážně heterogenní. Půdní profil se může v různých sobě blízkých místech výrazně lišit. Tento jev bývá způsobován zejména napláváním říčních splavenin v období, kdy dochází či docházelo k rozlívání se vodního toku do nivy (Woessner, 2000). Heterogenní půdy nejsou zcela vhodné pro experimenty s půdními vlastnostmi z důvodu jejich lokální proměnlivosti, která je popsána například v Šípek a kol. (2019).

Plošnou aplikaci ve větších dávkách blížících se laboratorním znesnadňuje cena biouhlu. Pyrolýza, proces, kterým se biouhel vyrábí, je pro výrobu této látky ve větším množství ekonomicky náročná (Campion a kol., 2023).



Obrázek 18.: Ukázka směsi biouhlu s hnojem před fyzikální úpravou (fotografie: Odborná zpráva projektu za rok 2021, kód projektu: QK1910056).



Obrázek 19.: Ukázka nerovnoměrnosti provedené aplikace biouhlu. Biouhel se nachází a rozkládá pouze v několika bodech. (fotografie: Ing. Jačka Lukáš, Ph.D.).

7.2 Sezónní efekty vegetačního pokryvu na nasycenou hydraulickou vodivost

Sezónní efekty vegetačního pokryvu na nasycenou hydraulickou vodivost byly při tomto terénním experimentu významnější než samotné efekty organických přísadků. Ve stejných sezónách v obou letech (duben 2022 / duben 2023 ; srpen 2022 / srpen 2023) byly zaznamenány podstatně rozdílné hodnoty zejména u měsíce srpna. Dubnové hodnoty v obou po sobě jdoucích letech obecně nevykazují výrazné rozdíly. Obecně se dá říci, že nasycená hydraulická vodivost je každý rok v dubnu nižší než v srpnu. Hlavním důvodem tohoto jevu bude pravděpodobně vegetace, která je v srpnu bujnější než v dubnu. Rostliny jsou v srpnu silněji zakořeněné, tedy kořenový systém je mohutnější a dosahuje větších hloubek. Kořenový systém a vzniklé makropory (kanálky kolem kořenů) zvyšují preferenční proudění (Šír a kol., 2003) a tedy i zvyšuje hodnoty nasycené hydraulické vodivosti.

V zimním období se na poli plodiny nevyskytují, případně se zde vyskytují pouze nízké traviny či plevely. V tuto dobu dochází k rozkladu kořenových zbytků plodin v půdě a k sedání si půdních částic, tedy dochází i k přerušení vodních kanálků, které byly vytvořeny kořeny rostlin. Voda se v tuto chvíli pomaleji infiltuje do půdních vrstev. Toto by mohl být důvod, proč jsou hodnoty nasycené hydraulické vodivosti naměřené v dubnu obecně nižší než hodnoty naměřené v srpnu, v produkčním období, kdy je na poli silná vegetace.

V dubnu roku 2022 se na lokalitě vegetační pokryv nenacházel, půda byla zkulturnovaná a zcela holá, připravená k zasetí plodiny (setí plodiny nebylo následně uskutečněno)(obr. 20). Proot mohou být rozdíly tak výrazné. V dubnu roku 2023 byl půdní vegetační pokryv tvořen pouze nízkými travinami, které zde začaly samovolně růst (obr.21).



Obrázek 20.: Stav půdního pokryvu – duben 2022 (foto: Ing. Jačka Lukáš, Ph.D.).



Obrázek 21.: Stav půdního pokryvu – duben 2023 (foto: autor práce).

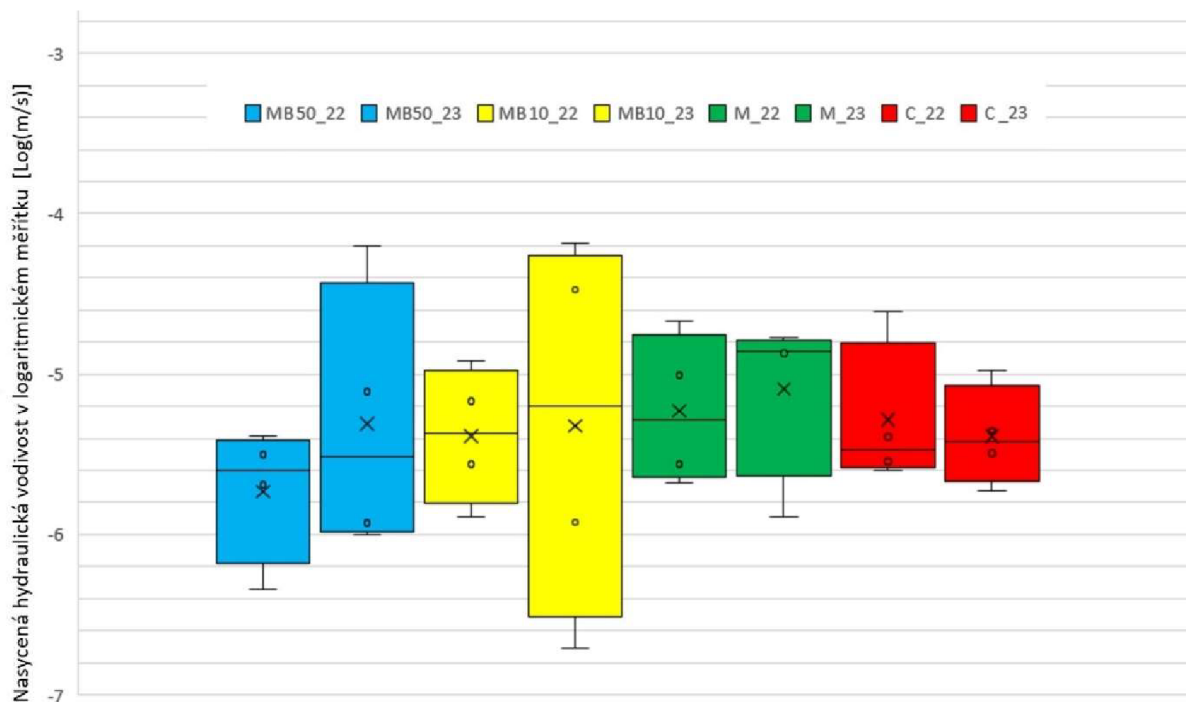
V měsíci srpnu roku 2022 (obrázek 22.) a 2023 (obrázek 23.) byl vegetační pokryv tvořen travinami, ale v roce 2022 i s výskytem mohutných plevelů. Ve všech sezónách byly mezi jednotlivými ošetřeními zaznamenány pouze malé rozdíly hodnot (viz.obr.24).



Obrázek 22.: Stav půdního pokryvu – srpen 2022 (foto: Ing. Jačka Lukáš, Ph.D.).



Obrázek 23.: Stav půdního pokryvu – srpen 2023 (traviny bez výskytu plevelů) (foto: autor práce).

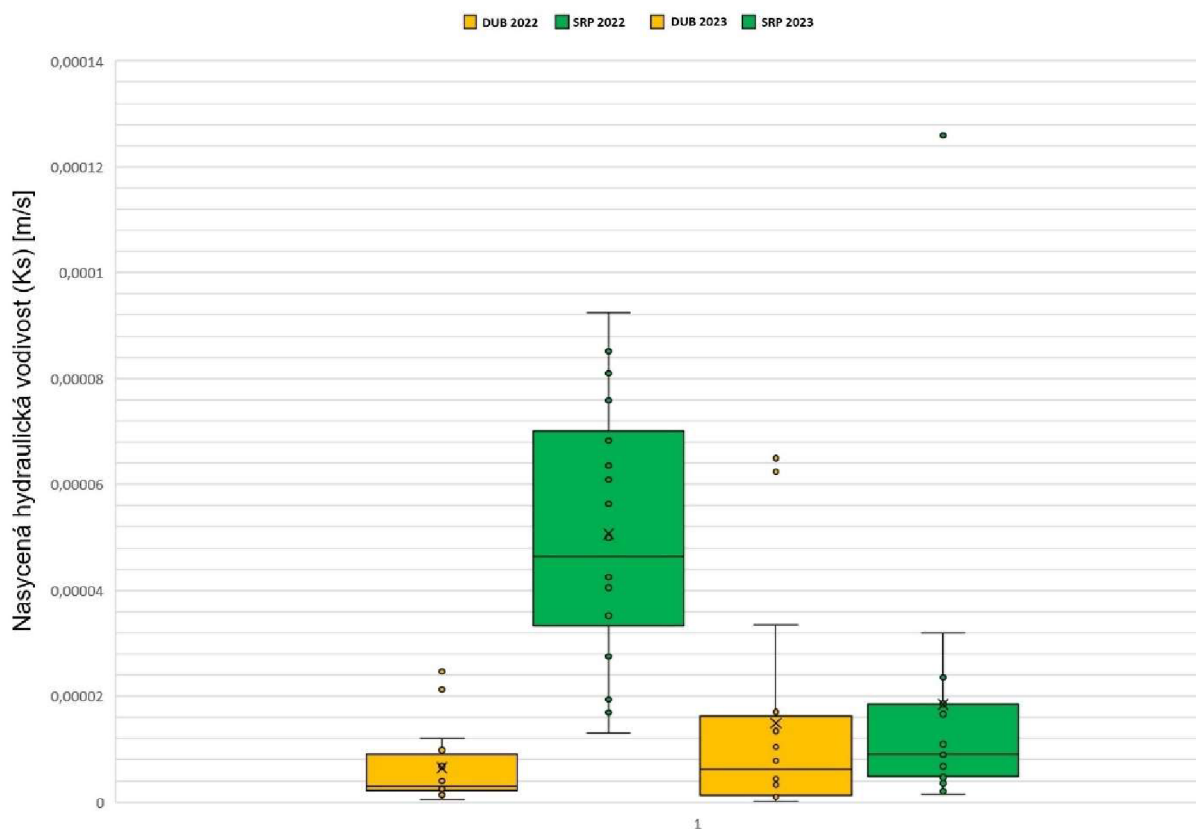


Obrázek 24.: Nasycená hydraulická vodivost v logaritmickeém měřítku [Log(m/s)] – všechny způsoby ošetření – rok 2022 (levá strana) a 2023 (pravá strana), MB50 – biouhel a hnůj v poměru 1:1 (modrá), MB10 – biouhel a hnůj v poměru 1:10 (žlutá), M – hnůj (zelená), C – bez ošetření (červená). Křížek – průměr, vodorovná čára – medián.

Právě velké rozdíly v hodnotách nasycené hydraulické vodivosti v měsíci srpnu roku 2022 a 2023 by mohly být zapříčiněny rozdílným vegetačním pokryvem půdy, kdy v roce 2022 byl pokryv půdy tvořen silnými travinami v kombinaci s pleveli a v srpnu roku 2023 byl pokryv tvořen pouze nižšími travinami se slabším kořenovým systémem, a bez výskytu dodatečných plevelů. Slabší kořenový systém by mohl být důvodem, proč jsou hodnoty ze srpna 2023 výrazně nižší než hodnoty ze srpna 2022, kdy silný kořenový systém lépe napomáhal vedení vody (obr. 25).

Je možné, že mohlo dojít k vysokému rozptylu hodnot K_s z následujících důvodů. U vysokých hodnot K_s , např. srpen 2022, mohlo dojít k měření na nevhodných místech, kde se mohli vyskytovat a/ půdní trhliny, b/ živočišné koridory (biopóry), c/ půdní struktura s vysokou aktivní pórovitostí (např. silný kořenový systém napomáhající vedení vody). U nízkých hodnot mohl být důvod např.: d/ na udusané zemnině (udusaná podorniční vrstva), e/ výskyt kolektorů pod sondou, f/ výskyt půdní struktury s uzavřenými póry. Vysoká variabilita K_s je pozorována často (Jačka a kol., 2018 - B, Šípek a kol., 2019).

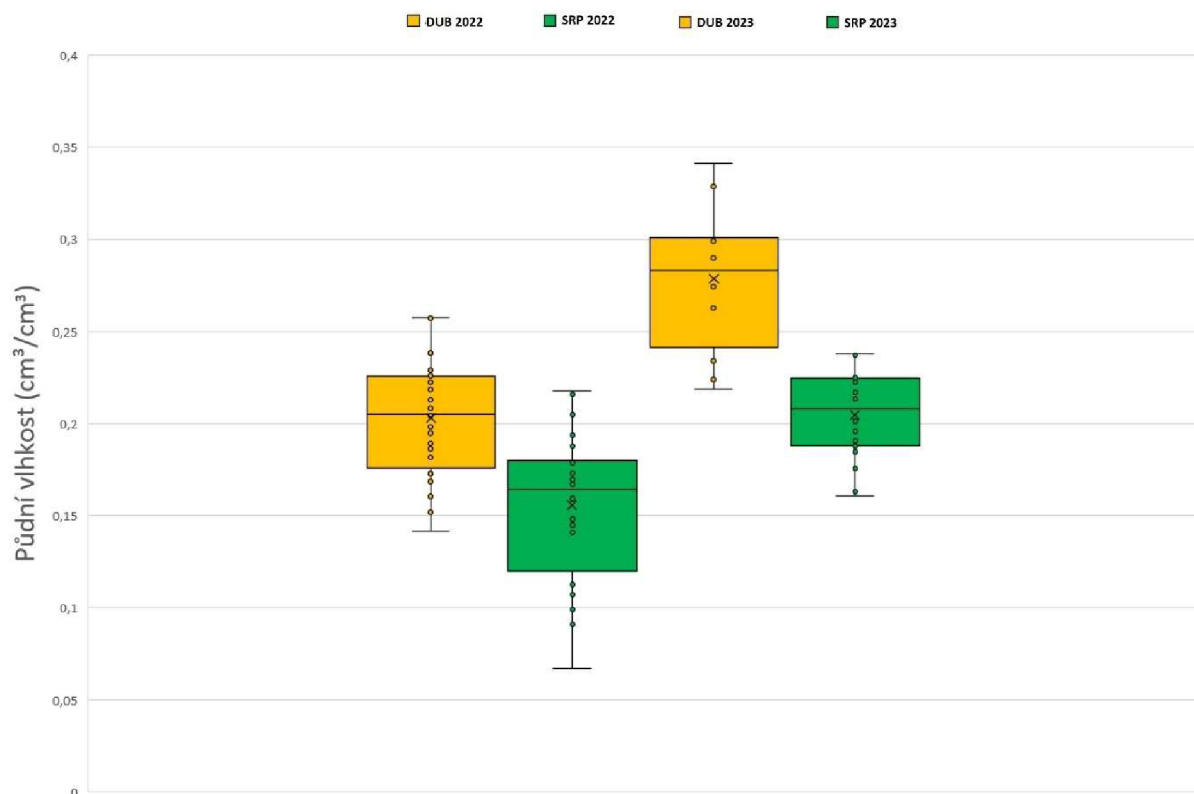
Domnívám se, že nejsilnějším faktorem, díky kterému se hodnoty ze srpna 2022 výrazně odlišují od hodnot ze srpna 2023 (ale i od ostatních sezón), byla mohutnost kořenového systému, která silně ovlivnila měření nasycené hydraulické vodivosti.



Obrázek 25.: Souhm hodnot nasycené hydraulické vodivosti (m/s) pro jednotlivé sezóny (pořadí boxplotů: duben 2022, srpen 2022, duben 2023, srpen 2023). Křížek – průměr, vodorovná čára – medián.

7.3. Půdní vlhkost a její efekt na hodnoty Ks

V obou sezónách (duben, srpen) byla u všech stanovišť v roce 2023 naměřena vyšší půdní vlhkost než v sezónách roku 2022. Jestliže porovnáme hodnoty všech stanovišť (obrázek 26.), dojdeme k závěru, že v obou letech měření zaznamenaná v dubnové sezóně dosahují výrazně vyšších hodnot než měření prováděná v sezóně srpnové.



Obrázek 26.: Souhrn hodnot půdní vlhkosti pro jednotlivé sezóny (cm³/cm³) (pořadí boxplotů: duben 2022, srpen 2022, duben 2023, srpen 2023). Křížek – průměr, vodorovná čára – medián.

Rozdíly v hodnotách půdní vlhkosti mezi jednotlivými ošetřeními jsou významné, což může mít za následek ovlivnění hodnot nasycené hydraulické vodivosti. Jestliže srovnáme obrázek 25 a obrázek 26 zjistíme, že v porovnání měsíců dubna a srpna, u jednotlivých dvou let, vždy v dubnu byla půdní vlhkost (obrázek 26) vyšší než v srpnu a nasycená hydraulická vodivost (obr.25) byla vždy v dubnu nižší než v srpnu, tedy chování těchto dvou parametrů může být mezi sebou provázáno. Tento vztah mezi půdní vlhkostí a nasycenou hydraulickou vodivostí byl v několika publikacích prokázán, např. Zhou a kol. (2008); Zeinalzadeh a kol. (2011) či Bagarello a Provenzano (1996).

Nasycená hydraulická vodivost se v průběhu vegetační sezóny zvyšuje v důsledku zvyšující se efektivní pórovitosti. Největší vliv na tuto skutečnost má biologická aktivita a nízká půdní vlhkost (Bormann a Klaassen, 2008; Zhou a kol., 2008).

Nižší vlhkost může zpříčinit smrštování půdy a trhliny v ní, a také zvětšit kanálky podél kořenů rostlin (Šír a kol., 2003). Při měření Guelphskými permeametry ve vlhčí půdě mohl být vzduch snadněji uzavírán, což mohlo mít za následek snížení nasycené hydraulické vodivosti (Fodor a kol., 2011).

Jedním z hlavních důvodů, proč je půdní vlhkost vždy vyšší v měsíci dubnu, by mohli být nízké teploty, kdy nedochází k výrazné evapotranspiraci, a zároveň má půda vyšší příjem a zásobu vody ze srážek, případně z tajícího sněhu. Oproti tomu v srpnu jsou teploty vyšší, tedy dochází k větším evapotranspiraci. V srpnu je vegetační období pro většinu rostlin, které též přispívají k odběru půdní vody (ve svůj prospěch). Rozdíl–posun hodnot u obou sezón mezi lety 2022 (nižší) a 2023 (vyšší) by mohl být zapříčiněn rozdílným vegetačním pokryvem nebo i množstvím srážek, jelikož došlo k úměrnému navýšení hodnot v roce 2023.

Půdní vlhkost byla vždy v dubnu vyšší než v srpnu. Kvůli této vyšší vlhkosti se zvyšuje pravděpodobnost, že při tvorbě vrtů mohlo dojít k rozmazání, zhutnění či rozmazání současnému zhutnění stěn vrtů. To by v této (dubnové) vlhčí půdě mohlo způsobit snížení hodnot nasycené hydraulické vodivosti (Elrick a kol., 1987; Koppi a Geering, 1986). Tento jev je však pravděpodobnější u zemin s vysokým obsahem jílu, což zcela neplatí pro zeminu, na které byl prováděn tento experiment. I přesto si myslím, že způsob a kvalita provedení vrtu je velmi důležitá. To jistě tvrdí i Campbell a Fritton (1994) či Mohanty a kol. (1994).

8. ZÁVĚR

Tento polní experiment se zabývá vlivem organického přídatku (biouhlu, popřípadě biouhlu a hnoje) na nasycenou hydraulickou vodivost. Experiment byl prováděn na zemědělském pozemku v těsné blízkosti obce Zvěřínec ve Středočeském kraji, východně od hlavního města Prahy. V žádné z kampaní experimentu nedošlo k výrazným rozdílům mezi jednotlivými ošetřeními oproti kontrole bez ošetření. Hlavním důvodem je, že se jednalo o polní aplikaci, kdy je zapotřebí velké množství aplikovaného organického přídatku. Neméně důležitá je úprava (zmenšení) rozměrů částic organického přídatku tak, aby byla aplikace rovnoměrná po celé ploše, a aby tyto částice mohly dobře a rovnoměrně zapracovány do pórů v půdě půdy. Organické přídatky byly pro tento experiment z ekonomických důvodů aplikovány v menším množství (40 t/ha do mocnosti ornice ca 30-35 cm), než by bylo ideálně potřeba. Výroba a polní aplikace tohoto organického přídatku ve větším množství by byla velmi nákladná. Částice přídatku neprošly procesem mletí, který by částice zmenšil. Pro aplikaci rozemletých částic by byl zapotřebí stroj, který by tyto částice dokázal vhodně aplikovat do půdy tak, aby nebyly ohroženy větrem, který by mohl způsobit jejich odnos. Na vývoji takového systému – stroje se pracuje. V tuto chvíli bylo nežádoucí organické přídatky mlít, tím zmenšovat jejich rozměry (a hmotnost), a vystavovat je tak jistému nebezpečí odnosu větrem.

V laboratorních podmínkách, na menší ploše, kde není za potřebí velkého množství organického přídatku, v místě bez výskytu větru, kde může dojít k rovnoměrné aplikaci drobných částic kvalitním promícháním s půdou, se vliv aplikace organického přídatku může výrazně projevit. Nevýhodou pro zjištění objektivních výsledků experimentu může být i lokace pozemku. Pozemek se nachází v blízkosti řeky a v těsné blízkosti malého vodního toku. To může mít za následek vysokou heterogenitu půdy, která bývá způsobována postupnými nánosy splavenin v období povodní. Z hlediska testování efektu organických přídatků spočívá přínos práce v prezentaci výsledků z dlouhodobého terénního experimentu v reálných podmínkách, kterých probíhá menší množství než v idealizovaných laboratorních podmínkách.

Při měření nasycené hydraulické vodivosti se sice neprojevil přímý vliv přidané organické látky, ale byla pozorována závislost nasycené hydraulické vodivosti na aktuálních vlhkostních podmínkách a vegetačním krytu. Nejvyšší naměřené hodnoty nasycené hydraulické vodivosti byly v srpnu roku 2022, kdy byl vegetační kryt tvořen nejmohutnější vegetací s jednoznačně nejrozvinutějším kořenovým systémem, v porovnání s ostatními sezónami měření. Tato sezóna

měla také nejsušší půdu ze všech čtyř sezón. Pro pokračování tohoto výzkumu by bylo vhodné vyvinout stroj, který by byl schopen rozemletý organický přídatek rovnoměrně aplikovat pod půdní povrch tak, aby bylo zamezeno jeho odnosu větrem, a zároveň docházelo k vhodnému vyplnění pórů v půdě. Efekt těchto organických přísad by bylo vhodné sledovat po delší dobu, v rámci několika let.

9. ZDROJE

- Al-Kaisi M., 2017. How drought affects soil health. *Integrated Crop Manag. News* 2480. <https://lib.dr.iastate.edu/cropnews/2480>.
- Azevedo A.S., Kanwar R.S., Horton R., 1998. Effect of cultivation on hydraulic properties of an Iowa soil using tension infiltrometers. *Soil Sci.* 163, 22–28.
- Bagarello V., Provenzano G., 1996. Factors affecting field and laboratory measurement of saturated hydraulic conductivity. *American Society of Agricultural Engineers*. 0001-2351/96/3901-0153.
- Barnes R.T., Gallagher M.E., Masiello C. a, Liu Z., Dugan B., 2014. Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments. *PLoS One* 9 (9), e108340. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108340>.
- Basso A.S., Miguez F.E., Laird D.A., Horton R., Westgate M., 2013. Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. *GCB Bioenergy* 5 (2), 132–143. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12026>.
- Beilei Wei, Yunchang Peng, Longxin Lin, Dongliang Zhang, Li Ma, Ligeng Jiang, Yuze Li, Tieguang He, Ziting Wang, 2023. Drivers of biochar-mediated improvement of soil water retention capacity based on soil texture: A meta-analysis. *Geoderma* 437 (2023) 116591.
- Bo X., Zhang Z., Wang J., Guo S., Li Z., Lin H., Huang Y., Han Z., Kuzyakov Y., Zou J., 2023. Benefits and limitations of biochar for climate-smart agriculture: a review and case study from China. *Biochar* 5:77. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00279-x>.
- Bormann H., Klaassen K., 2008. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils. *Geoderma* 145, 295–302.
- Brewer C.E., Chuang V.J., Masiello C.A., Gonnermann H., Gao X., Dugan B., Driver L.E., Panzacchi P., Zygourakis K., Davies C.A., 2014. New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass Bioenergy* 66, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.059>
- Brynda J., Skoblia S., Pohořelý M., Beňo Z., Soukup K., Jeremiáš M., Moško J., Zach B., Trkal L., Šyc M., 2020. Wood chips gasification in a fixed-bed multi-stage gasifier for decentralized high-efficiency CHP and biochar production.
- Burrell L.D., Zehetner F., Rampazzo N., Wimmer B., Soja G., 2016. Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma* 282, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.019>.
- Campbell C. M., Fritton D.D., 1994. Factors affecting fieldsaturated hydraulic conductivity measured by the borehole permeameter technique. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 58(5): 1354-1357.

Campion L., Bekchanova M., Malina R., Kuppens T., 2023. The costs and benefits of biochar production and use: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623012969> .

ČÚZK, 2024. Geoportál ČÚZK. <https://geoportal.cuzk.cz/> .

Das O., Sarmah A.K., 2015. The love-hate relationship of pyrolysis biochar and water: a perspective. *Sci. Total Environ.* 512–513, 682–685.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.061> .

Dorsey J.D., Ward A.D., Fausey N.R., Bair E.S., 1990. A comparison of four field methods for measuring saturated hydraulic conductivity. *Trans. ASAE* 33 (6), 1925–1931.

Eijkelkamp, 2022/6, Laboratory permeameters. User manual M-0912E.
<https://www.royaleijkelkamp.com/media/bhghn3me/m-0902e-permeameter.pdf> .

eKatalog BPEJ, 2022, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, www.bpej.vumop.cz .

Elrick D. E., Reynolds W.D., Baumgartner N., Tan K.A., Bradshaw K.L., 1987. In situ measurements of hydraulic properties of soils using the Guelph Permeameter and the Guelph Infiltrimeter. In *Proc. Third Int. Workshop on Land Drainage*, Columbus, Ohio.

Fang L., Huang T., Lu H., Wu X-L., Chen Z., Yang H., Wang S., Tang Z., Li Z., Hu B., Wang X., 2023. Biochar-based materials in environmental pollutant elimination, H₂ production and CO₂ capture applications. *Biochar* 5:42. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00237-7> .

Fodor N., Sándor R., Orfanus T., Lichner L., Rajkai K., 2011. Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity. *Geoderma* 165, 60–68.

Freeman J.J., Tomlinson J.B., Sing K.S.W., Theocharis C.R., 1995. Adsorption of nitrogen and water vapour by activated Nomex® chars. *Carbon* N. Y. 33, 795–799.
[https://doi.org/10.1016/0008-6223\(95\)00005-X](https://doi.org/10.1016/0008-6223(95)00005-X) .

Geovědní mapy 1 : 25 000, 2018. mapy.geology.cz

Gray M., Johnson M.G., Dragila M.I., Kleber M., 2014. Water uptake in biochars: the roles of porosity and hydrophobicity. *Biomass Bioenergy* 61, 196–205.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.010> .

Guo Z.Q., Li P., Yang X.M., Wang Z.H., Lu B.B., Chen W.J., Wu Y., Li G.W., Zhao Z. W., Liu G.B., Ritsema C., Geissen V., Xue S., 2022. Soil texture is an important factor determining how microplastics affect soil hydraulic characteristics. *Environ. Int.* 165 (107293)
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107293> .

Hardie M., Clothier B., Bound S., Oliver G., Close D., 2014. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant Soil* 376 (1/2), 347–361.
<https://doi.org/10.1007/s11104-013-1980-x> .

Hillel D., 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego, USA.

Hillel D., 2003. *Introduction to environmental soil physics*.

Huntington T.G., 2010. Climate Warming-Induced Intensification of the Hydrologic Cycle: An Assessment of the Published Record and Potential Impacts on Agriculture Advances in Agronomy. Academic Press, New York.

Hyväluoma J., Kulju S., Hannula M., Wikberg H., Källi A., Rasa K., 2018. Quantitative characterization of pore structure of several biochars with 3D imaging. Environ. Sci. Pollut. Res. 25, 25648–25658. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8823-x>.

Ibragimov A., 2016. Productivity Index for Darcy and pre-/post-Darcy Flow (Analytical Approach). Texas Tech University. https://www.researchgate.net/figure/Deviation-from-linear-Darcy-law_fig1_287948950.

Ifeoma G. Edeh, Ondřej Mašek, Wolfram Buss, 2020. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties – New insights and future research challenges. Science of the Total Environment 714 (2020) 136857.

Jačka L., Pavlásek J., Kuráž V., Pech P., 2014. A comparison of three measuring methods for estimating the saturated hydraulic conductivity in the shallow subsurface layer of mountain podzols. Geoderma, 219–220, 82–88.

Jačka L., Pavlásek J., 2014-A, skripta k předmětu Hydropedologie, Česká zemědělská univerzita v Praze – Fakulta životního prostředí.

Jačka L., Pavlásek J., 2014-B: Guelphský permeometr – Manuál pro terénní cvičení, Česká zemědělská univerzita v Praze – Fakulta životního prostředí.

Jačka L., Trakal L., Ouředníček P., Pohořelý M., Šípek V., 2018 - A. Biochar presence in soil significantly decreased saturated hydraulic conductivity due to swelling. Soil & Tillage Research 184 (2018) 181-185.

Jačka L., Pavlásek J., Kalibová J., Bašta P., Kovář M., Kuráž V., 2018 – B. The layering of a mountain podzol can strongly affect the distribution of infiltrated water in the soil profile. J. Hydrol. Hydromech., 66, 2018, 3, 348–356.

Jeffery S., Meinders M.B.J., Stoof C.R., Bezemer T.M., van de Voorde T.F.J., Mommer L., van Groenigen J.W., 2015. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. Geoderma 251–252, 47–54.

Jellali S., Khiari B., Usman M., Hamdi H., Charabi Y., Jeguirim M., 2021. Sludge-derived biochars: A review on the influence of synthesis conditions on pollutants removal efficiency from wastewaters. Renew Sustain Energy Rev 144:111068. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111068>

Kameyama K., Miyamoto T., Iwata Y., 2019. The preliminary study of water-retention related properties of biochar produced from various. Materials (Basel) 12, 1–13.

Kanwar, R.S., Rizvi, H.A., Ahmed, M., Horton, R., Marley, S.J., 1989. Measurement of fieldsaturated hydraulic conductivity by using Guelph and Velocity Permeameters. Trans. ASAE 32 (6), 1885–1890.

Khan A., Ali I., Naqvi SR., AlMohamadi H., Shahbaz M., Ali AM., Shahzad K., 2023. Assessment of thermokinetic behaviour of tannery sludge in slow pyrolysis process through

- artificial neural network. *Chemosphere* 337:139226. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139226> .
- Kinney T.J.J., Masiello C., Dugan B., Hockaday W.C.C., Dean M.R.R., Zygourakis K., Barnes R.T.T., 2012. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass Bioenergy* 41, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.033>.
- Koppi A. J., Geering H.R., 1986. The preparation of unsmearred soil surfaces and an improved apparatus for infiltration measurements. *J. of Soil Sci.* 37:177-181.
- Kutílek M., 1978: Vodohospodářská pedologie, druhé vydání. SNTL Bratislava.
- Kutílek M., Kuráž V., Císlarová M., 2004: *Hydropedologie 10*. Skriptum ČVUT.
- Lanzendörfer M., 2019. *Základy hydrauliky podzemní vody*. Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití fyziky, Univerzita Karlova. <https://www.natur.cuni.cz/fakulta/studium/czv/programy/zajmove/u3v/u3v02-hydraulika.pdf> .
- Lehmann, J. and Joseph, S. (2012) *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Routledge, London. <https://doi.org/10.4324/9781849770552> .
- Lim T.J., Spokas K.A., Feyereisen G., Novak J.M., 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere* 142, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.069>.
- Liu Z., Dugan B., Masiello C.A., Gonnermann H.M., 2017. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *PLoS One* 12, 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179079>.
- Magdoff F., Weil R., 2004. *Soil Organic Matter Management Strategies* (první vydání). CRC Press.
- Major J., Steiner C., Downie A., Lehmann J., 2009. Biochar effects on nutrient leaching. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, UK, pp. 271–288.
- Mapy.cz, 2024. www.mapy.cz .
- McKenzie N., Cresswell H., 2008. Selecting a method for hydraulic conductivity. In: McKenzie, N., Coughlan, K., Cresswell, H. (Eds.), *Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation*. SBS Publishers & Distributors PVT. Ltd., New Delhi, India, pp. 90–107.
- Medina A., Azcón R., 2010. Effectiveness of the application of arbuscular mycorrhiza fungi and organic amendments to improve soil quality and plant performance under stress conditions. *J. soil sci. Plant nutr.* 10 (3): 354 – 372 (2010). <https://www.scielo.cl/pdf/jsspn/v10n3/art09.pdf> .
- Mohanty, B. P., Kanwar R.S., Everts C.J., 1994. Comparison of saturated hydraulic conductivity measurement methods for a glacial-till soil. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 58(3):672-677.

- Mollinedo J., Schumacher T.E., Chintala R., 2015. Influence of feedstocks and pyrolysis on biochar's capacity to modify soil water retention characteristics. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 114, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.05.006>.
- Naveed M.H., Khan M.N.A., Mukarram M., Naqvi S.R., Abdullah A., Haq Z.U., Ullah H., Mohamadi H.A., 2024. Cellulosic biomass fermentation for biofuel production: review of artificial intelligence approaches. *Renew Sustain Energy Rev* 189:113906. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113906>
- Němeček J., Smolíková L., Kutílek M., 1990: *Pedologie a paleopedologie*. Academia Praha
- Obia A., Mulder J., Martinsen V., Cornelissen G., Børresen T., 2016. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil Tillage Res.* 155, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.002>.
- Odborná zpráva projektu za rok 2021, projekt: Dlouhodobý test aplikace biocharu vyrobeného z odpadní biomasy do zemědělské půdy za účelem řešení problematiky sucha v intenzivně zemědělsky využívaných oblastech České republiky (kód projektu: QK1910056) – Česká zemědělská univerzita v Praze.
- Omondi M.O., Xia X., Nahayo A., Liu X., Korai P.K., Pan G., 2016. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma* 274, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.029>.
- Park J-H., Yun J-J., Kim S-H., Park J-H., Acharya B.S., Cho J-S., Kang S-W., 2023. Biochar improves soil properties and corn productivity under drought conditions in South Korea. *Biochar* 5:66. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00267-1> .
- Punnoose A., Anitha S., 2015. Production and characterisation of biochar from different organic materials. *J. Trop. Agric.* 53 (2), 191–196.
- Quin P.R.R., Cowie A.L., Flavel R.J., Keen B.P., Macdonald L.M., Morris S.G., Singh B.P., Young I.M., Zwieter L., 2014. Oil mallee biochar improves soil structural properties - a study with x-ray micro-CT. *Agric. Ecosyst. Environ.* 191, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.022>.
- Rabbi S.M.F., Minasny B., Salami S.T., McBratney A.B., Youny I.M., 2021. Greater, but not necessarily better: The influence of biochar on soil hydraulic properties. *Eur. J. Soil Sci.* 72, 2033–2048. <https://doi.org/10.1111/ejss.13105>.
- Reynolds W. D., Elrick D. E., Youngs E. G., Amoozegar A., Bootlink H. W. G., and Bouma J., 2002. Saturated and unsaturated water flow parameters. In: Dane J. H., and Topp G. C., eds., “Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods.”. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Reynolds W.D., 2008-A: Saturated hydraulic properties: Laboratory methods, in: Carter M.R., Gregorich E.G. [Eds.], *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2nd ed. CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, USA, pp. 1013-1024.
- Reynolds W.D., 2008-B. Saturated hydraulic properties: laboratory methods, In: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2nd ed. CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, USA, pp. 1013–1024.

Richter R., 2004. Plyná fáze půdy. Mendelova univerzita v Brně, Ústav agrochemie a výživy rostlin.

https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/faze_plyнна.htm .

Seyedsadr S., Šípek V., Jačka L., Sněhota M., Beesley L., Pohořelý M., Kovář M., Trakal L., 2022. Biochar considerably increases the easily available water and nutrient content in low-organic soils amended with compost and manure. *Chemosphere*, Volume 293. 133586.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653522000753> .

Sarwar A., Ali M., Khoja A.H., Nawar A., Waqas A., Liaquat R., Naqvi S.R., Asjid M., 2021. Synthesis and characterization of biomass-derived surface-modified activated carbon for enhanced CO₂ adsorption. *J CO₂ Util* 46:101476. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101476> .

Shackley S., Hammond J., Gaunt J., Ibarrola R., 2011. The feasibility and costs of biochar deployment in the UK. *Carbon Manag.* 2 (3), 335–356. <https://doi.org/10.4155/CMT.11.22> .

Shapiro S.S., Wilk M.B., 1965. Analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52, 591–611.

Sparling G.P., West A.W., 1989. Importance of soil water content when estimating soil microbial C, N and P by the fumigation-extraction methods. *Soil Biol. Biochem.* 21(2), 245–253. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(89)90101-6).

Statistics by Jim, 2024. Box Plot Explained with Examples.

<https://statisticsbyjim.com/graphs/box-plot/> .

Suliman W., Harsh J.B., Abu-Lail N.I., Fortuna A.M., Dallmeyer I., Garcia-Pérez M., 2017. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Sci. Total Environ.* 574, 139–147.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.025>.

Šípek V., Jačka L., Seyedsadr S., Trakal L., 2019. Manifestation of spatial and temporal variability of soil hydraulic properties in the uncultivated Fluvisol and performance of hydrological model. *CATENA*, vol. 182, 104119.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816219302619> .

Šír M., Lichner L., Tesař M., 2003. Hydrologie půdy v malém povodí. Ústav pro hydrodynamiku AVČR.

https://www.ih.cas.cz/files/uploads/4_verejnost/1_verejnost/Hydrologie_pudy_v_malem_povodi.pdf .

Tammeorg P., Simojoki A., Mäkelä P., Stoddard F.L., Alakukku L., Helenius J., 2014. Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand. *Agric. Ecosyst. Environ.* 191, 108–116.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.01.007>.

Teodoro M., Trakal L., Gallagher B.N., Šimek P., Soudek P., Pohořelý M., Beesley L., Jačka L., Kovář M., Seyedsadr S., Mohan D., 2020. Application of co-composted biochar significantly improved plant-growth relevant physical/chemical properties of a metal-contaminated soil. *Chemosphere*, volume 242. 125255.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653519324956?via%3Dihub> .

- Uzoma K.C., Inoue M., Andry H., Zahoor A., Nishihara E., 2011. Influence of biochar application on sandy hydraulic properties and nutrient retention. *J. Food Agric. Environ.* 9, 137–1143.
- Vítková J., Kondrlová E., Rodny M., Surda P., Horák J., 2017. Analysis of soil water content and crop yield after biochar application in field conditions. *Plant Soil Environ.* 63 (12), 569–573. <https://doi.org/10.17221/564/2017-PSE>.
- Wang Y., Hu Y., Zhao X., Wang S., Xing G., 2013. Comparisons of biochar properties from wood material and crop residues at different temperatures and residence times. *Energy Fuels* 27, 5890–5899. <https://doi.org/10.1021/ef400972z>.
- Woessner W.W., 2000. Stream and fluvial plain ground water interactions: rescaling hydrogeologic thought. *Ground Water*. 38 (3), 423–429.
- Yang X., You M., Liu S., Sarkar B., Liu Z., Yan X., 2023. Microbial responses towards biochar application in potentially toxic element (PTE) contaminated soil: a critical review on effects and potential mechanisms. *Biochar* 5:57. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00255-5> .
- Zeměpisec.cz, 2024, Povrchová voda (půdní a podzemní), <https://zemepisec.cz/hydrologie/podpovrchova-voda/> .
- Zhang Z.F., Groenevelt P.H., Parkin G.W., 1998. The well shape factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph permeameter. *Soil & Tillage Research* 49, 219–221.
- Zhang S., Grip H., Lovdahl L., 2006. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. *Soil Till. Res.* 90, 117–125.
- Zhao S.X., Ta N., Wang X.D., 2017. Effect of temperature on the structural and physico-chemical properties of biochar with apple tree branches as feedstock material. *Energies* 10 (9). <https://doi.org/10.3390/en10091293>.
- Zeinalzadeh K., Kashkuli H.A., Naseri A.A., Dadmehr R., 2011. Temporal variation of soil hydraulic parameters under different land uses. *J. Food Agric. Environ.* 9 (2), 693–698.
- Zhou X., Lin H.S., White E.A., 2008. Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes. *Catena*. 73, 180–188.

SEZNAM ROVNIC:

Rovnice 1.: Pórovitost

Rovnice 2.: Aktivní pórovitost

Rovnice 3.: Efektivní pórovitost

Rovnice 4.: Hmotnostní vlhkost

Rovnice 5.: Objemová vlhkost

Rovnice 6.: Saturace půdy

Rovnice 7.: Provzdušněnost půdy

Rovnice 8.: Darcyho zákon

Rovnice 9.: Darcyho zákon

Rovnice 10.: Nasycená hydraulická vodivost (Reynolds, 2008-A)

Rovnice 11.: Bezrozměrný tvarový parametr

SEZNAM TABULEK:

Tabulka 1. Názvy zrnitostních frakcí a jejich velikosti dle platné klasifikace v ČR (upraveno z: Jačka a Pavlásek, 2014-A).

Tabulka 2. Hydropedologické charakteristiky pro místní regozem (eKatalog BPEJ, 2022).

Tabulka 3. Odhady sorpčního čísla (převzato: Jačka a Pavlásek, 2014-B).

SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obrázek 1.: Režimy proudění v závislosti na rychlosti a hydraulickém sklonu (gradientu) proudění (Ibragimov, 2016 - upraveno).

Obrázek 2.: Laboratorní permeametr v laboratoři FŽP ČZU (vlevo, foto: autor) a schéma permeamtru (vpravo, upraveno z Eijkelkamp, 2022).

Obrázek 3.: Guelphský permeametr na lokalitě Zvěříněk a ošetření s hnojem při dubnové kampani (fotografie pořízena autorem práce, 21.4.2023).

Obrázek 4.: Poloha zájmového území v katastrálním území obce Zvěříněk zakreslená červeným obdélníkem (zdroj mapového podkladu: mapy.cz, 2024).

Obrázek 5.: Lokalita (zdroj mapového podkladu: ČÚZK, 2024).

Obrázek 6.: Poloha pozemku – červený obdélník: zájmové území, modrá barva: nivní sediment, žlutá barva: naváté písky (orientováno k severu) (Geovědní mapy 1 : 25 000, upraveno).

Obrázek 7.: 2. klimatický region dle kategorizace BPEJ na území ČR (eKatalog BPEJ, 2022).

Obrázek 8.: Poloha pozemku v mapě BPEJ (zdroj mapového podkladu: eKatalog BPEJ, 2022).

Obrázek 9.: Lokalita – experimentální plochy (orientace k severu) (zdroj mapového podkladu: ČÚZK, 2024).

Obrázek 10.: Boxplot a normální rozdělení (Statistics by Jim, 2024).

Obrázek 11.: příklad: graf vycházející z reálných hodnot měření.

Obrázek 12.: příklad: graf v logaritmickém měřítku.

Obrázek 13.: graf naměřených hodnot nasycené hydraulické vodivosti – duben 2023.

Obrázek 14. Naměřené hodnoty nasycené hydraulické vodivosti v srpnu 2023.

Obrázek 15.: graf naměřených hodnot nasycené hydraulické vodivosti – duben a srpen 2023.

Obrázek 16.: graf naměřených hodnot půdní vlhkosti – duben a srpen 2023.

Obrázek 17.: graf naměřených hodnot objemové hmotnosti – duben a srpen 2023.

Obrázek 18.: Ukázka směsi biouhlu s hnojem před fyzikální úpravou (fotografie: Odborná zpráva projektu za rok 2021, kód projektu: QK1910056).

Obrázek 19.: Ukázka nerovnoměrnosti provedené aplikace biouhlu. Biouhel se nachází a rozkládá pouze v několika bodech. (fotografie: Ing. Jačka Lukáš, Ph.D.).

Obrázek 20.: Stav půdního pokryvu– duben 2022 (foto: Ing. Jačka Lukáš, Ph.D.).

Obrázek 21.: Stav půdního pokryvu – duben 2023 (foto: autor práce).

Obrázek 22.: Stav půdního pokryvu – srpen 2022 (foto: Ing. Jačka Lukáš, Ph.D.).

Obrázek 23.: Stav půdního pokryvu – srpen 2023 (traviny bez výskytu plevelů) (foto: autor práce).

Obrázek 24.: Nasycená hydraulická vodivost v logaritmickém měřítku [Log(m/s)] - 2022 a 2023.

Obrázek 25.: Souhrn hodnot nasycené hydraulické vodivosti (m/s) pro jednotlivé sezóny (pořadí boxplotů: duben 2022, srpen 2022, duben 2023, srpen 2023).

Obrázek 26.: Souhrn hodnot půdní vlhkosti pro jednotlivé sezóny (cm^3/cm^3).