

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIROMENTÁLNÍHO
MODELOVÁNÍ



STANOVENÍ VYBRANÝCH HYDRO-FYZIKÁLNÍCH
CHARAKTERISTIK PROBLEMATICKÉ PÍŠČITÉ PŮDY
V BLÍZKOSTI OBCE ZVĚŘÍNEK

Diplomová práce

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

Konzultant: Ing. Martin Kovář

Diplomant: Bc. Lucie Poláková

Praha 2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Lucie Poláková

Krajinné inženýrství
Krajinné inženýrství

Název práce

Stanovení vybraných hydro-fyzikálních charakteristik problematické písčité půdy v blízkosti obce Zvěřínek v Polabí

Název anglicky

Determination of hydro-physical characteristics of problematic sandy soil near the village Zvěřínek in Polabí

Cíle práce

Stanovit nasycenou hydraulickou vodivost (dále K_s), retenční schopnost půdy a související základní hydropedologické charakteristiky písčité zemědělsky využívané půdy, která je náchylná k vysychání.

Metodika

V rešeršní části stručně definovat základní hydro-fyzikální vlastnosti půdy a způsoby jejich stanovení. Na základě dostupné literatury dále zpracovat problematiku půdního sucha v ČR v kontextu klimatické změny (výskyt půdního sucha, možnosti zmírnění dopadů atd.).

Na vybraných lokalitách zemědělské půdy v okolí obce Zvěřínek provést hydropedologický průzkum půd. Konkrétně změřit K_s terénní i laboratorní metodou. Dále odebrat neporušené vzorky pro laboratorní stanovení K_s , retenční křivky, objemové hmotnosti a zastoupení pórů dle velikosti. Dále na těchto lokalitách odebrat porušené vzorky a provést zrnitostní rozbor.

Statisticky vyhodnotit naměřené hydrofyzikální vlastnosti. Porovnat tyto vlastnosti mezi lokalitami a vymezenými půdními vrstvami.

Doporučený rozsah práce

55

Klíčová slova

Půdní hydrologie, Retence písčité půdy, Guelphský a laboratorní permeametr, Hydraulické vlastnosti půdy

Doporučené zdroje informací

- Hillel, D., 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press, San Diego, USA, 771 p.
- Kutílek, M., Nielsen, D.R., 1994. Soil hydrology. Catena Verlag, Cremlingen – Destedt, Germany.
- Rezaei, M., Seuntjens, P., Shahidi, R., Joris, I., Boëne, W., Al-Barri, B., Cornelis, W., 2016. The relevance of in-situ and laboratory characterization of sandy soil hydraulic properties for soil water simulations. J. Hydrol. 534, 251–265.
- Schwen, A., Zimmermann, M., Bodner, G., 2014. Vertical variations of soil hydraulic properties within two soil profiles and its relevance for soil water simulations. J. Hydrol., 516, 169–181.
- 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 182, 104119.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Konzultant

Ing. Martin Kovář

Elektronicky schváleno dne 2. 3. 2020

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 4. 3. 2020

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 25. 03. 2020

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci na téma: Stanovení vybraných hydro-fyzikálních charakteristik problematické písčité půdy v blízkosti obce Zvěřínek vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila, a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

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

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

V Praze dne 29.6.2020

.....

Bc. Lucie Poláková

Poděkování:

Ráda bych touto cestou poděkovala v první řadě Ing. Lukášovi Jačkovi, Ph.D., za cenné rady a připomínky, odborné vedení, za vstřícné jednání a trpělivost při zpracování diplomové práce.

Dále bych chtěla poděkovat Ing. Martinovi Kovářovi za hodnotné rady při řešení laboratorních měření a při postupu zpracování jejich výsledků.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá stanovením hydro-fyzikálních vlastností problematické písčité půdy náchylné k vysychání. V zájmovém území u obce Zvěřínek bylo na různých místech provedeno šest měření nasycené hydraulické vodivosti (K_s) pomocí Guelphského permeometru a zároveň zde byly na dvou odlišných lokalitách vykopány půdní sondy, ze kterých byly dále odebrány porušené a neporušené vzorky ze svrchního (ornice) a spodního horizontu (podorničí). Současně byly za účelem popisu půdního profilu provedeny dvě vpichové sondy. Vzorky byly odebrány za účelem následujících laboratorních měření.

V laboratorních podmínkách byla změřena na laboratorním permeometru nasycená hydraulická vodivost K_s , v pískovém tanku byly vzorky měřeny za různých podtlaků od plného nasycení do pF 2, a dále v písko-kaolinovém tanku do hodnoty podtlaku pF 2,7. Z takto naměřených hodnot byla stanovena retenční čára. Z hodnot váhy z odebraných a následně vysušených vzorků byly stanoveny objemové vlhkosti a objemové hmotnosti. Dále bylo hustoměrnou metodou stanoveno zrnitostní složení odebraných vzorků půdy.

Naměřená data byla statisticky vyhodnocena v prostředí RStudio (pro program R) a současně zde byly vytvořeny krabicové grafy, znázorňující porovnání výsledků vrchních vrstev a dále spodních vrstev z obou sond.

Blízké lokality vykazovaly rozdíly v K_s i v objemové hmotnosti v podorničí, což ukazuje na vysokou lokální heterogenitu sledované půdy. Celkově, obě lokality vykazovaly nepříznivé hydro-fyzikální charakteristiky v ornici i podorničí. Vysoké hodnoty objemové hmotnosti (od $1,56 \text{ g/cm}^3$ až po $1,73 \text{ g/cm}^3$) indikují nepříznivý strukturální stav půdy. Půda má nízkou pórovitost (zastoupení pórů od 31 % do 38 %), vykazuje nízkou polní vodní kapacitu (od 7 % po 16 %) a vysoké hodnoty K_s (od $1,22 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $9,34 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nezávisle na metodě). Z těchto uvedených půdních vlastností vyplývá, že se jedná o půdu špatně hospodařící s vodou a ohroženou vysycháním a promýváním půdního profilu. Špatný půdní stav lze zlepšit například pomocí přidání vhodné formy kvalitní organické hmoty (např. hnůj, biochar, kompost).

Klíčová slova: půdní hydrologie, retence písčité půdy, Guelphský a laboratorní permeometr, hydraulické vlastnosti půdy, hydropedologický průzkum

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the determination of hydro-physical properties of problematic sandy soils which is prone to desiccation. In the area of interest near the village of Zvěřinec, saturated hydraulic conductivity (K_s) was measured at various locations using the Guelph permeameter. Soil profiles were excavated at two different sites. Undisturbed and disturbed samples were collected from the upper (topsoil) and lower (subsoil) horizons in the walls of excavated profiles. Soil profiles were also described using the two boreholes (made using a gouge auger). The soil samples were taken for the purpose of laboratory measurements.

In laboratory conditions, the saturated hydraulic conductivity (K_s) was measured with a laboratory permeameter. Water retention was measured in a sand box and sand-kaolin box. Volumetric soil water content and bulk densities were determined by oven drying method. The particle size distribution was determined by using hydrometer method.

The measured data were statistically evaluated by the box plots, which were created in the RStudio environment (for the R program). Data from each soil layer and site were compared.

Nearby sites showed differences in K_s and in bulk density in the subsoil, which showed high local heterogeneity of the examined soil. In general, both sites showed poor hydrophysical properties. The values of high bulk density (from 1,65 g/cm³ to 1,89 g/cm³), low porosity (from 30,6 % to 37,66 %), low field capacity (from 7,07 % to 16,03 %) and high K_s values (from $1,22 \cdot 10^{-5}$ m.s⁻¹ to $9,34 \cdot 10^{-5}$ m.s⁻¹) shows poor structure of the soil. According to these soil properties, this soil is drought-prone and exhibits poor water retention. The bad soil condition can be improved by application of suitable form of organic matter (e.g. manure, biochar, compost).

Keywords: soil hydrology, sandy soil retention, Guelph and laboratory permeameter, hydraulic properties of soil, hydro pedological survey

Obsah

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Úvod..... | 1 |
| 2. | Cíle práce | 3 |
| 3. | Literární rešerše | 4 |
| 3.1 | Význam retence vody v krajině..... | 4 |
| 3.2 | Základní hydrofyzikální charakteristiky půdy a související vlastnosti 4 | |
| 3.2.1 | Retenční kapacita půd..... | 5 |
| 3.2.2 | Infiltrace | 6 |
| 3.2.3 | Proudění vody v půdním prostředí | 7 |
| 3.2.4 | Darcyho zákon | 7 |
| 3.2.5 | Meze platnosti Darcyho zákona | 8 |
| 3.2.6 | Nasyčená hydraulická vodivost (K_s)..... | 9 |
| 3.2.7 | Stanovení nasycené hydraulické vodivosti (K_s) | 9 |
| 3.2.8 | Retenční křivka půdní vlhkosti | 11 |
| 3.2.9 | Stanovení půdní vlhkosti..... | 11 |
| 3.2.10 | Zrnitost, půdní druhy..... | 12 |
| 3.3 | Retence vody v zemědělsky využívaných plochách | 13 |
| 3.3.1 | Problematika hospodaření s vodou..... | 15 |
| 3.3.2 | Zvýšení schopnosti retence vody na zemědělských pozemcích | 16 |
| 3.3.3 | Zvýšení půdní úrodnosti | 17 |
| 4. | Charakteristika zájmového území | 20 |
| 4.1 | Geologické poměry | 20 |
| 4.2 | Klimatické poměry..... | 21 |
| 4.3 | Hydrologické poměry | 22 |
| 5. | Metodika..... | 23 |
| 5.1 | Odebrání vzorů pro laboratorní rozbor | 23 |
| 5.2 | Terénní měření nasycené hydraulické vodivosti (K_s) | 25 |
| 5.2.1 | Vyhodnocení měření nasycené hydraulické vodivosti Guelphským permeametrem | 26 |
| 5.3 | Stanovení bodů retenční čáry a objemové vlhkosti..... | 27 |
| 5.4 | Měření nasycené hydraulické vodivosti v laboratorních podmínkách | |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.5 | Stanovení zrnitosti..... | 31 |
| 5.5.1 | Korekce hmotnosti..... | 31 |
| 5.5.2 | Příprava vzorku pro měření zrnitostního rozboru..... | 31 |
| 5.5.3 | Měření hustoměrnou metodou..... | 33 |
| 5.6 | Statistické vyhodnocení..... | 34 |
| 6. | Výsledky..... | 36 |
| 6.1 | Charakteristika půdního profilu na základě kopaných a vpichových sond | 36 |
| 6.2 | Zrnitostní rozbor..... | 37 |
| 6.3 | Výsledky vybraných hydro-fyzikálních vlastností půd..... | 40 |
| 6.3.1 | Objemová hmotnost a vlhkost při odběru..... | 40 |
| 6.3.2 | Nasyčená hydraulická vodivost..... | 42 |
| 6.3.3 | Retenční čáry, hydrolimity a pórovitost..... | 44 |
| 7 | Diskuze..... | 49 |
| 8 | Závěr..... | 52 |
| 9 | Přehled použité literatury..... | 54 |
| 10 | Seznam obrázků..... | 60 |
| 11 | Seznam tabulek..... | 62 |

1. Úvod

Půda je všeobecně popisována jako nejsvrchnější vrstva zemské kůry. Je považována za vyčerpateľnou složku, která vzniká v důsledku zvětrávání horninových materiálů nebo hromadění minerálních látek transportovaných větrem, vodou nebo ledem. Charakteristickým rysem půdy je to, že je do tohoto zvětralého minerálního materiálu přidán organický materiál, který dává půdě její charakteristické vlastnosti (Nortcliff a kol., 2006). Půda je neobnovitelným přírodním zdrojem, který má vedle produkční funkce, jakou je například výrobní prostředek zemědělství a lesní výroby, i funkci neopominutelné složky biosféry. Půdní prostředí se uplatňuje při transportních a transformačních procesech látkového koloběhu, chrání bilanci a čistotu vod a mnohé další (Mašát, 1995).

Mezi hydro-fyzikální vlastnosti, které jsou dnes velmi významné zvláště v souvislosti s klimatickými změnami patří například infiltrace, která popisuje proces vsaku vody do půdy. Dalšími podstatnými vlastnostmi jsou nasycená hydraulická vodivost (K_s) a objemová hmotnost. Objemovou hmotnost je možné si představit jako množství vody, kterou je půdní prostředí schopno zadržet v pórech za daných vnějších podmínek. Na tyto vlastnosti půd má vliv velké množství faktorů, mezi které se řadí půdní typ, zrnitost, množství organické hmoty a další. Pro vysokou schopnost půd infiltrace a retence je důležité udržovat dobrou půdní strukturu a zásoby organické hmoty v ní. Není žádoucí, aby docházelo k degradaci půd, zejména k jejímu utužení, které by výrazně ovlivnilo obě tyto půdní vlastnosti a následně docházelo ke zvýšení povrchového odtoku a unášení potřebné organické hmoty (Vopravil a kol., 2010).

Současný svět si v hospodaření s půdní vodou zatím nevedl příliš dobře. Za posledních sto let byl naměřen až trojnásobný pokles retenční schopnosti půdy, a to zejména v důsledku nevhodného způsobu hospodaření. Neschopnost krajiny zadržovat vodu je příčinou toho, že se některá území ČR stávají až polopouští (Havel, 2009).

V zemědělství vedou důsledky klimatických změn k výrazně nižším výnosům zemědělských plodin (Hlavinka a kol., 2009). Růst těchto plodin závisí kromě jiného i na vlhkostních poměrech půdy. Nadbytek a nedostatek vody v půdě zhoršuje podmínky pro pěstování plodin. Zlepšení vodních poměrů v půdě je ale zásadní nejen pro zemědělství, ale i pro adaptaci na měnící se klima a zmírnění následků sucha a povodní. Zlepšení hospodaření půdy s vodou je tedy důležité pro celou společnost. Při dobrém hospodaření dokáže zemědělská a lesní půda na území České republiky

utvořit zásobník vody s obrovskou kapacitou, která přesahuje rozsah všech povrchových vodních nádrží. Proto by měla být půdě z vodohospodářského hlediska věnována odpovídající pozornost (Kutílek, 1978).

Dlouhodobá předpověď nepříznivých klimatických podmínek nutí k přehodnocení dosavadních postupů k půdě v nejrůznějších směrech (Elhotová, 2016). Bez ohledu na výsledky politických a odborných debat o příčinách nastupující klimatické změny, musí podnikatelé v rostlinné výrobě hledat nové postupy, které omezí riziko dopadu nepříznivých faktorů na budoucí výnosy a kvalitu produkce (Haberle a kol., 2008).

Jednou z možností zlepšení půdních vlastností je aplikace kvalitní organické hmoty (např. hnůj, biochar, kompost a zejména jejich kombinace) do zemědělské půdy. Biochar je modifikovaný organický materiál získaný anaerobním rozkladem organické hmoty (Uchimiya a kol., 2011). Aplikace kvalitní organické hmoty obecně zlepšuje hospodaření půdy s vodou a zvyšuje retenci vody v období sucha (Kutílek, 1978).

2. Cíle práce

Hlavními cíli této diplomové práce je stanovit vybrané hydro-fyzikální vlastnosti zemědělsky využívané půdy náchylné k vysychání ve zkoumané oblasti u obce Zvěřínek.

Mezi dílčí cíle patří:

- Stanovit nasycené hydraulické vodivosti (dále K_s) pomocí Guelphského permeometru v terénních podmínkách.
- Odebrat půdní vzorky z odlišných lokalit a horizontů.
- Stanovit nasycené hydraulické vodivosti K_s pomocí laboratorního permeometru.
- Stanovit základní hydro-pedologické charakteristiky půdy, mezi které patří objemová vlhkost, objemová hmotnost, zrnitost a pórovitost.
- Provést statistické vyhodnocení.
- Určit retenční schopnosti zkoumané půdy.

Navazujícím cílem je na základě naměřených hodnot hydro-fyzikálních vlastností posoudit hospodaření této půdy s vodou a odolnost vůči vysychání.

3. Literární rešerše

3.1 Význam retence vody v krajině

Jednou z hlavních funkcí krajiny je její schopnost zadržování určitého množství vody. Tato vlastnost je označována jako retenční schopnost krajiny. Přesněji lze definovat jako zadržení vody v půdě, na vegetaci, v objektech povodí, poldrech a vodních nádržích (Petříček, Cudlín, 2003).

Význam retence vody spočívá především v tom, že se voda v krajině udrží i mimo srážkové období, ať už pro potřeby člověka nebo pro transpiraci rostlin. V České republice je tento význam klíčový. Až na několik výjimek sem nepřitéká žádný vodní tok, takže jsou srážky prakticky jediným vodním zdrojem. Proto je velice důležité, aby se v krajině zadrželo co nejvíce vody. Zadržení vody v krajině napomáhá nejen před suchem, ale také snižuje rizika povodní, jelikož pak voda odtéká z krajiny pomaleji. Tím se sníží maxima povodňových průtoků i rozsah budoucích zaplavených oblastí (Štěřba, 2008).

Kromě zmírnění následků povodní a sucha má zvýšená retence vody v krajině i další pozitiva. Mezi ně patří například zlepšení místního mikroklima a snížení teplotních extrémů (díky vysoké měrné kapacitě vody). Krajina s vyšší retencí vody bývá rozmanitější, což zlepšuje biodiverzitu. Mnohé mokřadní rostliny nebo vodní ptactvo je dokonce vázané na vodní toky a plochy v krajině (Štěřba, 2008).

3.2 Základní hydrofyzikální charakteristiky půdy a související vlastnosti

V retenční schopnosti krajiny hraje půda klíčovou roli. Pokud nezahrneme intercepci a následné odpaření vody z povrchu vegetace, přichází půda do styku s většinou spadlé srážkové vody. Ať už voda dále odteče povrchovým odtokem nebo projde půdním profilem. To znamená, že jakákoliv změna vlastnosti půdy může výrazně ovlivnit množství vody zadržené v krajině.

Obecně je půda složena z půdního vzduchu a vody, které tvoří plynnou a kapalnou složku půdy, a z drobných anorganických (např. jílu, písek, ...) a organických (humus, odumřelé organismy, ...) částic, které tvoří pevnou složku půdy. Strukturu, která obsahuje kapalnou a plynnou fázi, označujeme jako půdní póry. Definujeme je jako tu část objemu půdy, která není vyplněna pevným materiálem. Póry nabývají různých velikostí, tvarů a původů - od nerozeznatelných mezer mezi půdními částicemi až po makroskopické trhliny nebo prostory po vyhnílych kořenech. Podíl těchto pórů na

celkovém objemu půdy se nazývá pórovitost. Ta je vyjádřena v procentech a u většiny půd se pohybuje mezi 30 a 70 %. U rašelinných půd se může blížit až k 90 % (Nimmo, 2004).

Kromě pórovitosti je v půdním prostředí zkoumána i další veličina, čímž je saturace. Je to podíl objemu pórů, který je zcela zaplněn vodou. Lze vyjádřit i jako podíl procentuálního objemového zastoupení vody v půdě a celkového prostoru tvořeného póry. Obě veličiny jsou klíčové pro retenci vody v půdě. To znamená, že čím je půda poréznější, tím více vody je schopná zadržet. Saturace pak ukazuje, z jaké části je retenční prostor využit. To hraje důležitou roli při utužování půd zemědělskou technikou, které vede ke snížení pórovitosti půdy, a tedy i ke snížení celkové retenční schopnosti (Tuller, Or, 2004).

Půdní struktura je natolik jemná, že v ní voda není schopna vytvářet souvislou hladinu, ale je zde držena přitažlivými silami. Mezi tyto síly patří síla kapilární, která popisuje pohyb vody proti gravitační síle v tenkých pórech, a síla adsorpční, díky které přilne voda k povrchu a vytvoří tenké filmy kolem půdních částic a agregátů. Adsorpce se uplatňuje převážně v jílovitých půdách, které mají kvůli jemnějším částicím mnohem větší plochu povrchu na daný objem půdy, zatímco kapilární síly převažují především v půdách písčitých. Záleží ale i na tvaru půdních pórů. Zatímco u pórů s polygonovým průřezem má voda tendenci zůstat v rozích, u pórů s kruhovým průřezem je možné, že voda za stejných podmínek zcela oteče (Tuller, Or, 2004).

Výsledkem adsorpčních a kapilárních sil je veličina, která se označuje jako matriční potenciál. Tento potenciál do jisté míry udává, jak se voda zadržená v půdě bude chovat. Pokud je matriční potenciál nižší, než je požadovaná úroveň, značí to suchou půdu, ze které rostliny nedokážou získat vodu. Při optimálním stavu matričního potenciálu je voda v půdě stále zadržena a je dostupná pro rostliny, zatímco při vysokém potenciálu již půda nedokáže vodu zadržet a dochází k jejímu pohybu a následnému promývání půdy (Bajtes, 1996).

3.2.1 Retenční kapacita půd

Vodní režim půd se skládá z několika fází. Jendou z nich je akumulární fáze, která nastává v případě, kdy je voda zadržována v půdních pórech a téměř neodtéká do podloží. Množství vody kolísá dle toho, zda převažuje srážková voda nebo dochází k evapotranspiraci. V případě, že převažují srážky, zvyšuje se množství vody až do okamžiku, kdy dojde k plnému nasycení a nastane perkolační fáze. Během této fáze není voda, která přitéká, v půdě téměř zadržována a prochází

dále do podloží. To se děje až do doby, kdy hodnota nasycení klesne pod určitou úroveň (Tesař a kol., 2001).

Z toho vyplývá, že množství vody, které je půda schopna zadržet, závisí na tom, ve které fázi vodního režimu se půda nachází. V akumulační fázi dokáže půda výrazně zeslabit či zastavit odtok srážkové vody, a naopak pokud se půda již na začátku srážkové události nachází v perkolační fázi či těsně před ní, voda zde není zadržována téměř vůbec a odtéká do podloží. V extrémním případě může půda odtok dokonce zesílit tím, že z ní odteče i ta voda, která v ní byla akumulována již před srážkou. Tento jev se ale odehrává převážně v malých povodích, která jsou poměrně homogenní a kde se půda nachází ve stejné fázi na většině území. Ve větších různorodějších povodích je to nepravděpodobné (Tesař a kol., 2001).

Množství vody nacházející se v půdě ve chvíli, kdy začíná perkolační fáze, nazýváme retenční kapacitou půdy. Kapacita se liší podle struktury a druhu půdy a nemalou roli zde hraje i mocnost půdy v dané lokalitě. Často záleží i na intenzitě srážek v porovnání s infiltrační kapacitou půdy.

Velmi důležité je také množství organické hmoty v půdě. Například v histosolech, což jsou půdy velmi bohaté na organické látky, je uváděna retenční kapacita až 480 mm (Batjes, 1996). Je to dáno především tím, že rozkládající se organická hmota v sobě dokáže vázat velké množství vody. Například se uvádí, že 2 kg humusu na sebe dokáže navázat až 3 litry vody. Naopak u čistě minerální půdy je to jen 0,5 litru (Úlehla, 1947).

3.2.2 Infiltrace

Nezáleží pouze na tom, kolik vody je půda schopna pojmout, ale i na rychlosti, kterou je voda vstřebávána do půdního prostředí. Pokud je srážka natolik intenzivní, že se voda nestihne infiltrovat do půdy, může dojít k tzv. hortonovskému odtoku. Je to stav, kdy voda stéká po povrchu půdy a dále se hromadí v povrchových depresích, případně po jejich naplnění vyteče a stéká dál. Tento jev se projevuje především ve vlhkých oblastech, kde je půda nasycena vlivem vysoké hladiny podzemní vody, takže nedochází k vsaku. Hortonovský odtok ale může nastat i v případě přívalového deště na narušených půdách, kde intenzita deště překračuje infiltrační kapacitu půdy. Tento případ nastává především v oblastech s intenzivním zemědělstvím (Langhammer, 2007).

Infiltrační schopnost půdy však závisí i na mnoha dalších podmínkách a vlastnostech půdního pokryvu, zejména na půdním typu. Například písčité půdy jsou obecně propustné, porézní a lehké, což u nich způsobuje velkou infiltrační schopnost, ale také

vcelku malou retenční kapacitu, protože voda proteče do podloží bez většího zdržení. Jílovité půdy, které jsou naopak utužené, mohou mít naproti tomu větší kapacitu, nicméně mívají sníženou schopnost infiltrace vody, zejména pokud dojde k utužení povrchové vrstvy (Daňhelka, 2007). Retenční kapacitu taktéž snižuje skeletovitost půdy, jelikož větší kameny zmenšují podíl jemné půdy a tím i celkovou poréznost. Pro infiltrační rychlost může být problematická krusta, která je vytvářena na povrchu degradované půdy, zejména po vydatných deštích a následném suchém období (Mu a kol., 2015).

3.2.3 Proudění vody v půdním prostředí

Půda, jakožto porézní prostředí umožňuje proudění vody v těchto pórech. Půdní voda odpovídá objemům pórů a je limitovaná prostorem, ve kterém se pohybuje (Kutílek a kol., 2000).

Proudění vody v půdě zapříčiňuje spád celkového potenciálu. Jedná se o rozdíl celkových potenciálních energií, které jsou přepočteny na jednotku vody. Ve všech půdách jsou hlavními hnacími silami pro pohyb vody gravitační a tlakový potenciál (Pavlásek, Jačka, 2014).

V případě, že jsou všechny póry v půdě plně nasyceny vodou, proudění se nazývá nasycené. Za těchto okolností jsou vyplněny nejmenší póry i část nespojitých pórů, ve kterých voda neproudí. Některé póry uzavírají vzduch a velká část pórů, které jsou zcela uzavřeny, jsou i při tomto typu proudění pro vodu sále nepřístupny. V přírodě se jen výjimečně setkáme se situací, kdy dojde k zaplnění všech efektivních pórů. Pokud je půda nasycena vodou jen z části, nazýváme proudění nenasycené. V tomto případě je objemová hmotnost menší než efektivní pórovitost (Pokorná, Zábranská, 2007). V Efektivních pórech se nachází záporný tlakový potenciál a narozdíl od nasycené zóny se zde mohou póry plnit a prázdnit (Pavlásek, Jačka, 2014).

3.2.4 Darcyho zákon

V roce 1856 byly francouzským inženýrem Henrym Darcym publikovány závěry jeho pokusů, které se týkaly proudění vody ve sloupci naplněném pískem. Pokusy byly prováděny za účelem zamezit znečištění vody ve městě Dijon. Základní zákon pro proudění vody byl nečekaně objeven během Darcyho experimentů s filtrací vody přes sloupec písku (Pavlásek, Jačka, 2014).

Průtok vody Q porézním prostředím je přímo úměrný rozdílu tlakových výšek ΔH na vstupu a na výstupu ze zařízení, hydraulické vodivosti K_s , průřezové ploše vzorku S a nepřímo úměrné výšce zeminy L (Šrámek, Kuchovský, 2003).

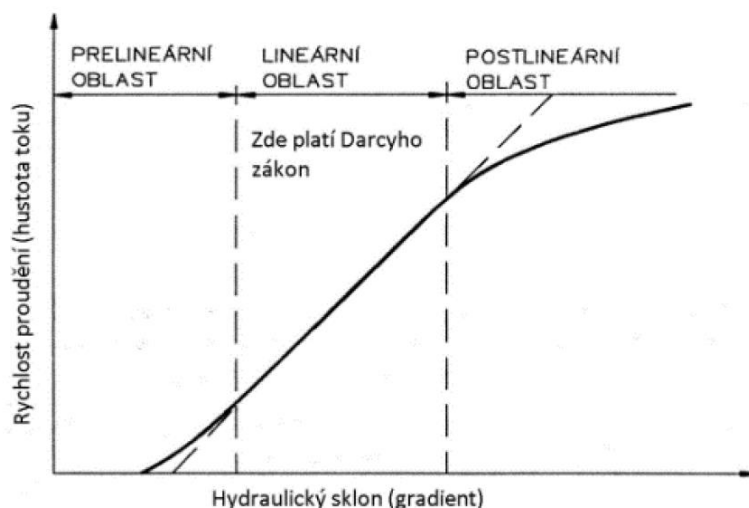
Při ustáleném nasyceném proudění platí:

$$Q = K_s \cdot S \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (1)$$

Kde Q [$L^3 \cdot T^{-1}$] označuje objemový průtok kapaliny, K_s [$L \cdot T^{-1}$] značí hydraulickou vodivost, S [L^2] vyjadřuje průřezovou plochu vzorku, L [L] je výška sloupce zeminy a ΔH pak značí rozdíl hydraulických výšek ($H_1 - H_2$) (Pavlásek, Jačka, 2014).

3.2.5 Meze platnosti Darcyho zákona

Darcyho zákon vyjadřuje lineární závislost mezi hydraulickým sklonem a rychlostí proudění neboli hustotou toku. Lineární závislost ale neplatí pro všechny možné hodnoty hydraulického sklonu. Darcyho zákon je platný pouze pro lineární oblast (Pavlásek, Jačka, 2014).



Obr. č. 1: Meze platnosti Darcyho zákona, Pavlásek, Jačka, 2014

Obrázek popisuje skutečnost, kdy dochází při průsaku vody velmi jemnozrnným materiálem (například jílovitým a prachovitým materiálem) ke zpomalování až zastavení pohybu vody. Tento režim se nazývá prelineární. Neplatí

zde Darcyho zákon, neboť vztah mezi hydraulickým gradientem a rychlostí proudění není lineární. Darcyho zákon neplatí ani pro postlineární oblast, která se vyskytuje při proudění velmi hrubozrnným materiálem, kde převažují setrvačné síly nad viskózními a snižuje se přírůstek proudění v závislosti na hydraulickém gradientu. Pro odlišení prelineární, lineární a postlineární oblasti proudění se uplatňuje Reynoldsovo číslo Re (Valentová, 2007).

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot d}{\mu} \quad (2)$$

Kde je μ dynamická viskozita, v je rychlost proudění kapaliny, ρ je hustota kapaliny a d je efektivní průměr zrna nebo efektivní průměr póru (Pavlásek, Jačka, 2014).

3.2.6 Nasycená hydraulická vodivost (K_s)

Jednou z nejdůležitějších hydraulických vlastností je nasycená hydraulická vodivost. Jde o klíčovou veličinu v oblastech hydrogeologie a hydropedologie. Tato veličina charakterizuje proudění kapaliny v porézním prostředí (Bátková a kol., 2013).

Půdní hydraulická vodivost se rozděluje na nasycenou a nenasycenou. Její hodnota se může měnit v závislosti na velikosti pórů. Nenasycená hydraulická vodivost je schopna se rychle měnit kvůli vlhkosti, která je v čase proměnná (Strudley a kol., 2008). Hodnota hydraulické vodivosti je tedy závislá na vlastnostech proudění kapaliny i na vlastnostech porézního prostředí. Mezi fyzikální vlastnosti kapaliny, které určí hodnotu nasycené hydraulické vodivosti, se řadí dynamická viskozita a hustota kapaliny. Dále jsou zde vlastnosti, které určují propustnost zeminy. Mezi ně patří zejména velikost a tvar pórů, zrnitostní složení, měrný povrch, pórovitost a tortuozita, což je zakřivení pórů (Pavlásek, Jačka, 2014).

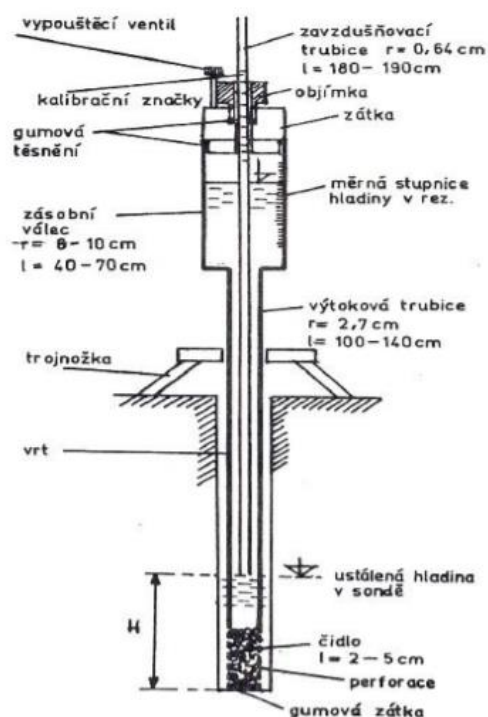
3.2.7 Stanovení nasycené hydraulické vodivosti (K_s)

V oblasti zemědělství se hodnota nasycené hydraulické vodivosti uvádí jako klíčový parametr při navrhování zavlažovacích a drenážních systémů nebo při stanovení míry infiltrace (Aimrun a kol., 2004).

Je možné rozdělit metody stanovení nasycené hydraulické vodivosti na přímé a nepřímé. Mezi přímé metody patří laboratorní a terénní měření. V nepřímých metodách odvozujeme hodnotu nasycené hydraulické vodivosti pomocí půdních vlastností, jako jsou obsah humusu, textura půdy, struktura půdy a objemová

hmotnost. Je možno tvrdit, že nepřímé metody slouží pouze jako přibližný odhad (Kutílek a kol., 2000.)

V terénu je možné měřit nasycenou hydraulickou vodivost pomocí Guelphského permeometru. Díky tomuto zařízení jsme schopni měřit i ve větších hloubkách, až do cca 8 m. Hloubku, ve které je možno měřit, však ovlivňuje soudržnost půdy. V půdách, které jsou špatně soudržné, není možné vyvrtat stabilní sondu a hloubka měření se tak zmenšuje na 1 m. Před samotným měřením je vyvrtána válcová sonda o průměru 4-10 cm. Do této sondy je vsunut permeametr. Pomocí trubky, která přivádí vzduch, je v sondě nastavena konstantní hladina vody. Pomocí přístroje pak měříme infiltrační rychlost (Matula a kol., 1989).



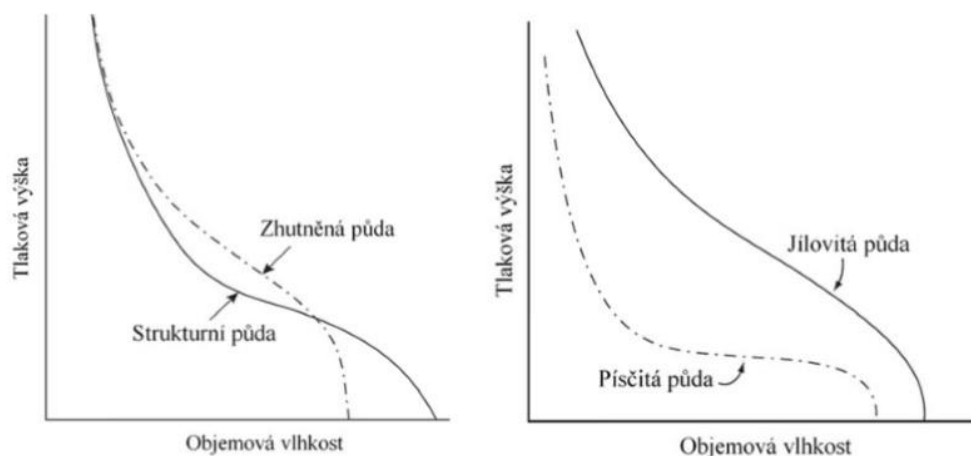
Obr. č. 2: Popis Guelphského permeometru, zdroj: Matula. 1989

Při stanovení K_s v laboratorních podmínkách jsou nezbytné neporušené půdní vzorky, které byly předem odebrány při terénním průzkumu do kovových válečků. Tyto válečky mývají obyčejně kalibrovaný objem 100 cm^3 . Plné válečky s neporušeným vzorkem se umísťují do laboratorního permeometru (Kutílek a kol., 200). Pro měření hydraulické vodivosti se používá konstantní nebo proměnný spád. Záleží na propustnosti vzorku. Proměnným spádem se měří málo propustné vzorky, které většinou obsahují vysoký podíl jílu. Konstantním spádem pak středně až vysoce propustné vzorky (Pavlásek, Jačka, 2014).

3.2.8 Retenční křivka půdní vlhkosti

Na retenční křivce půdní vlhkosti je graficky zobrazen vztah mezi objemovou vlhkostí půdy a vlhkočním potenciálem neboli sacím tlakem půdy. Tvar retenční křivky je závislý na objemové hmotnosti, struktuře, mineralogickém složení, obsahu humusu v půdě a na zrnitostním složení (Kutílek a kol., 2000). Pro jednotlivé vzorky je možná retenční křivku laboratorně změřit nebo odhadnout pomocí pedotransferových funkcí. Všechny faktory jsou ale velmi proměnné, takže odhad může být velmi nejistý. Tyto rovnice pracují se salinitou, množstvím částic písku a organické hmoty a s texturou půdy (Saxton, Rawls, 2006).

Tvar retenční křivky velmi ovlivňuje struktura půdy. Čím více je půda sypká a písčítá, tím je pak tvar křivky strmější. Naopak pokles strmosti zajišťuje větší obsah jílu, který způsobuje vyšší retenční schopnost (Hillel, 1998). Na následujícím obrázku jsou znázorněny závislosti rozdílných půd na tlakové výšce a objemové vlhkosti.



Obr. č. 3: Retenční křivky pro půdy s různou strukturou, zdroj: Hillel, 1998

3.2.9 Stanovení půdní vlhkosti

Metody měření půdní vlhkosti se dělí do různých kategorií. Mohou se členit na metody laboratorní a metody terénní, metody destruktivní a nedestruktivní (podle odběru půdního vzorku) avšak nejčastěji se používá dělení na měření přímé a nepřímé. Přímé měření stanovuje přesný obsah kapaliny v půdě a měření nepřímé zkoumá jiné fyzikální veličiny, které jsou na vlhkosti závislé, a které jsou následně převedeny na půdní vlhkost (Kutílek a kol., 2000).

Mezi metody přímé můžeme řadit například metodu gravimetrickou (navážkovou). Tato metoda se používá při kalibraci metod jiných a umožňuje vyjádřit

objemovou a hmotnostní vlhkost půdy (Reynolds, 1970). Tato metoda tkví v odebrání části půdního profilu za pomoci speciálního kovového válečku. Dochází zde k vyčíslení veškeré vázané vody v půdním profilu, proto je tato metoda spolehlivá pro jednorázová měření (Kutílek a kol., 2000). Kovový váleček se zatluče do země, následně se opatrně odejme, aby nedošlo k porušení vzorku. Vzorek se dále zváží a postupně vysouší, dokud se jeho hmotnost neustálí (Muñoz-Carpena, 2015). Teplota vysoušení se liší podle vlastností půdy a množství obsahovaného humusu. U jílových půd se zpravidla využívá vyšších teplot (i 160 °C) (Kutílek a kol., 2000). Pomocí této metody je možno na základě vážení vzorku vcelku přesně stanovovat objemovou hmotnost vyschlé půdy a získat i hodnotu pórovitosti. Hodnotu pórovitosti lze získat i pomocí stanovení velikosti reprezentativního elementárního objemu (REV), neboli objemu, kde vzorek i přes zvětšování objemu půdy nemění svou pórovitost (Bear, 1975). Tato metoda má tu nevýhodu, že musí být odběr proveden několikrát. V každé lokalitě se musí odebrat více válečků pro jedno měření. Vzorek musí být taktéž odebrán na nesešlapaném nebo nijak jinak utuženém místě (Bátková a kol., 2013).

Odhad množství vody v půdě na základě měření jiné veličiny, která je dále podle kalibrovaného vztahu převedena na objemovou vlhkost, patří k metodám nepřímým. Nepřímé metody mohou být dále rozděleny podle závislosti na měřeném množství na metody objemové a tenzometrické. Metody objemové stanovují objemovou vlhkost půdy a metody tenzometrické jsou závislé na sacím tlaku půdy (vodním potenciálu). Obě metody se pomocí retenční křivky převádí na objemovou vlhkost (Muñoz-Carpena, 2015).

3.2.10 Zrnitost, půdní druhy

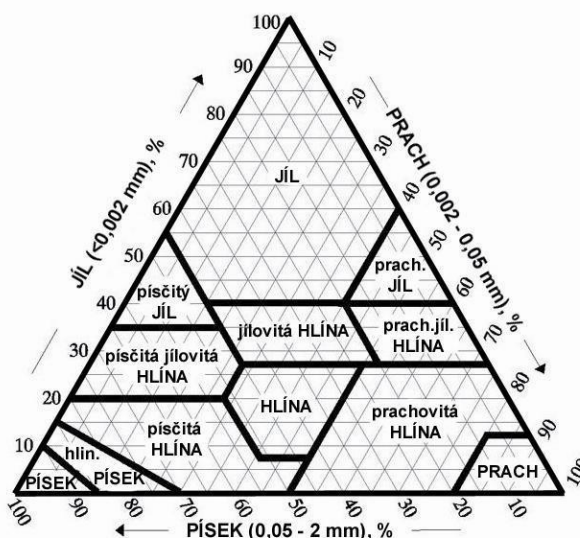
Půdní částice mají rozmanité velikosti, od mikroskopických částic jílu až po velké kusy hornin. Primární a sekundární minerály tvoří anorganickou složku půdy, ke které se vztahuje zrnitost. Kvantitativní poměr částic o různých velikostech pak zrnitost určuje (Tindall, 1999).

Zrnitost půdního prostředí je závislá především na mineralogickém složení mateřské horniny. Pokud půda obsahuje těžce nebo naopak snadno zvětratelné horniny, bude buď hrubozrnná a písčítá nebo jemnozrnná a jílovitá. Částice, které jsou menší než 2 mm, tvoří jemnozem. Jednotlivé kategorie zrnitosti jsou písek, prach a jíl. Jílové částečky jsou nejmenší a zaujímají velkou povrchovou plochu. Také jsou méně propustné a na rozdíl od půd písčitých jsou pomaleji promývány a vyluhovány. Prach tvoří střední částice, které mají velikosti v rozmezí 0,002- 0,05 mm a při výskytu v půdách pomáhají zabezpečit stabilní poměr vody a vzduchu. Písek tvoří částice o

velikosti v rozmezí 0,05- 2 mm. Písčité částice jsou tvořeny úlomky živců, křemene a silikátových hornin. Tyto složky mezi sebou mají hrubé póry a způsobují, že půda s vysokým obsahem písku nemá velkou sorpční schopnost, je velmi dobře propustná, minerální látky se z ní rychle vymývají a bez přísunu vody brzy vysychá. Půdní zrnitost je velmi důležitá pro proudění vody a minerálních látek v půdě (Šarapatka, 2014).

Půdní druh se určuje pomocí jednotlivých zrnitostních frakcí. Pro rozdělení takových frakcí neexistuje žádné univerzální schéma. Různé klasifikace rozdělují půdní částice podle velikosti často používají stejné názvy pro rozdílné velikostní frakce. USDA (standardizované Ministerstvem zemědělství USA) člení odlišně od klasifikace ISSS (Mezinárodní organizace pro výzkum půd) i od MIT (Massachusetts Institute of Technology), ASTM (American Society for Testing Materials) a od různých hodnocení používaných jinými mezinárodními instituty (Hillel, 1998).

Druhy půd, rozdělené podle poměru obsahu jednotlivých frakcí, jsou znázorněny na trojúhelníkovém diagramu. Tento diagram je zakládán na klasifikaci USDA, kde jsou částice rozděleny podle velikosti na: jíl <0,002, prach je v rozmezí 0,002- 0,05 mm a písek 0,05- 2,0 mm (Tindall, 1999).



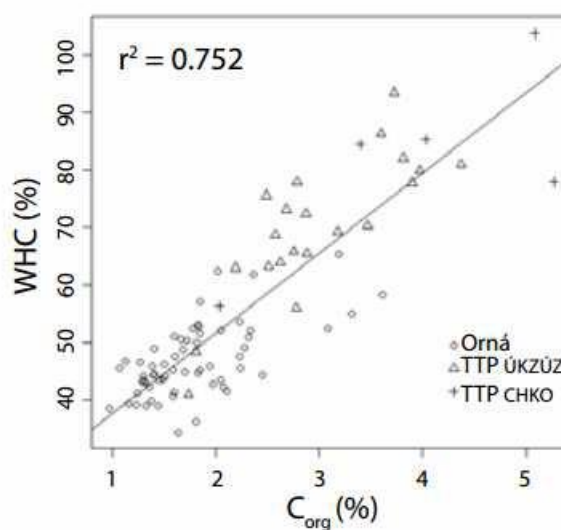
Obr. č. 4: Trojúhelníkový diagram, zdroj: Hillel, 1998

3.3 Retence vody v zemědělsky využívaných plochách

Zemědělské plochy zauímají více než polovinu území České republiky, proto lze tvrdit, že má zemědělské hospodaření velice významný vliv na retenci vody v krajině. Například v porovnání s lesními plochami mají zemědělské plochy menší intercepci a nachází se v nich z pravidla méně organického uhlíku.

V našich podmínkách rozlišujeme dva základní typy zemědělských ploch. Prvním z nich jsou orné půdy, které mají část roku odkrytý svůj půdní povrch a vlivem hospodaření a především orby, zde v povrchové části chybí horizontální zvrstvení půdních profilů. Vlastnosti těchto půd se mohou lišit podle druhu pěstovaných kultur. Druhým typem jsou trvalé travní porosty. Jsou to plochy, kde je povrch neustále pokryt vegetací. Tato vegetace je udržována pastvou či sečením a nejsou zde narušovány půdní profily. Kromě předchozích dvou základních typů můžeme zemědělské plochy dále rozlišovat na zahrady, plantáže, vinice, sady apod. V těchto případech retenční schopnosti vody závisí více na obsahu organické hmoty a poréznosti půdy a podle způsobu hospodaření se mohou blížit k travním porostům nebo k orné půdě.

Orba se na první pohled může zdát jako pozitivní jev v rámci retenční schopnosti vody v krajině, jelikož zvyšuje poréznost půdy a tím navyšuje i její celkovou retenční kapacitu. Orba ale přispívá k vyšší mineralizaci humusu (Carvajal a kol., 2006), což směřuje k faktu, že se v orných půdách nachází přibližně o 50 % méně organického uhlíku než v lesích (Šantrůčková a kol., 2014). Organický uhlík je klíčovým faktorem pro infiltraci a retenci vody v půdě. Závislost mezi množstvím zadržené vody na obsahu organického uhlíku je dobře vidět v grafu na Obr. č. 1.



Obr. č. 5: Závislost mezi množstvím zadržené vody na obsahu organického uhlíku, Šantrůčková a kol., 2014

Z tohoto grafu je s přibývajícím podílem uhlíku zcela zřetelný nárůst retenční schopnosti vody. Můžeme z něj vyčíst i fakt, že orné půdy obsahují uhlíku méně než travní porosty.

Mimo tendence snižování obsahu uhlíku v půdě má orba vliv i na strukturu půdy. Uvádí se, že bezorebné hospodaření a s ním spojené zanechávání zbytků

organické hmoty na půdním povrchu snižuje vodní erozi, která je způsobena kinetickou energií dopadajících kapek a následné porušení půdního povrchu. Organická hmota naopak zlepšuje strukturu půdy a přispívá k lepší infiltraci (Carvajal a kol., 2006). Dalším významným problémem, který se týká orby, je utužení půdy a jejích vrstev. Tento problém je spjat především s používáním těžké mechaniky, která snižuje poréznost a zhoršuje infiltraci i vsak do hlubších vrstev (Šarpatka a kol., 2002).

Velmi významným faktorem ohrožujícím zemědělskou půdu jsou vyšší teplotní extrémy. Povrch holé půdy, obzvláště pokud je písčité, může v letním období dosahovat až 50 °C, kdežto půdy s travním porostem dosahují maximálně kolem 40 °C (Rožnovský, 2014).

V neposlední řadě zde hraje velkou roli eroze, jak větrná, tak především ta vodní, a to zejména ve svažitéch terénech. Půda je ohrožena i při menších srážkách, protože iniciace celkového odtoku začíná mnohem dříve (Mu a kol., 2015). Z orné půdy je pak odnášena organická hmota a jemné částice, tudíž právě ty části půdy, které zadržují nejvíce vody. Tyto splaveniny z vyšších míst, kde jsou často vyšší srážkové úhmy a retenční schopnost je tam daleko více potřeba, putují do nížin (Šantrůčková a kol., 2014). Spolu s erozí větrnou, která je charakteristická pro rozlehlá pole, kde vítr nabírá vysoké rychlosti, způsobují degradaci půdy. Tato degradace svou rychlostí značně převyšuje přirozenou tvorbu půdy, která činní 1 cm půdy za stovky let (Šarpatka a kol., 2002). Tímto způsobem se často obnažují nižší půdní horizonty, které nejsou schopny zadržet tolik vody, jako například ty humusové. Tato situace vyvolá větší povrchový odtok a tím zhoršuje hydrologické extrémy, jako jsou sucho a povodně (Holý, 1978).

3.3.1 Problematika hospodaření s vodou

Za posledních 20 let se sucho stalo největším nebezpečím pro zemědělce pěstující plodiny v nížinných oblastech České republiky. V krajních případech může dopad sucha zapříčinit vážný defekt vegetace a ztráty výnosů. Moravská nížina a Polabí jsou jedny z nejvýznamnějších pěstebních oblastí v České republice pro tržní zeleninové plodiny. Tyto oblasti jsou také často postihovány suchem, a proto zažívají zvýšenou větrnou erozi a požadují vysokou úroveň zavlažování. Tento přístup může vést až k přírůstku solí v povrchové vrstvě tamního půdního prostředí. Zvyšující se frekvence teplých a suchých událostí v nížinných oblastech v České republice směřuje ke snížení výnosů a jejich větší variabilitě u zeleninových plodin (Potop, 2010).

Půdní pokryv v nížinách je obvykle tvořen půdním typem jako je fluvisol nebo gleysol. Tato území jsou charakteristická svými odlišnými hydraulickými vlastnostmi, tedy mají vyšší hodnoty hydraulické vodivosti ve srovnání s výše umístěnými oblastmi (Šípek a kol., 2019).

3.3.2 Zvýšení schopnosti retence vody na zemědělských pozemcích

Zvyšování zadržování vody v zemědělské krajině se provádí prostřednictvím vhodných opatření. Tato opatření mohou být současně i protierozní nebo protipovodňová, a takováto opatření se pak provádí jako společná opatření v rámci komplexních pozemkových úprav. Opatření se mohou také dělit na organizační, technická a agrotechnická. Je vhodné, aby se vzájemně doplňovaly a respektovaly základní potřeby a možnosti zemědělské výroby v nových podmínkách (Janeček a kol., 2012).

Organizačním opatřením je myšleno především optimální rozmístění plodin dle jejich ochranného vlivu vůči půdě a funkční a prostorové uspořádání pozemků. Navrhuje se co neoptimálnější možný tvar pozemku, jeho ideální umístění v terénu a zvolení vhodného směru orby a budoucí výsadby. Do této kategorie patří například protierozní rozmístování plodiny, kde se jedná o sloučení sklonitosti daného terénu s druhem pěstované plodiny. To znamená, že rostliny, které mají nízkou protierozní schopnost (okopaniny, kukuřice), by se měly pěstovat na pozemcích s mírnou sklonitostí. Naopak rostliny s vyšší protierozní schopností je možné pěstovat na pozemcích se svažitéjším terénem. Dalším důležitým opatřením je pásové střídání plodin. Toto opatření se využívá v případě, že v rámci jednoho územního celku nelze uspořádat plodiny tak, aby vyhovovaly protieroznímu rozmístění. V principu se jedná o střídání pásu plodin, které mají nízkou protierozní schopnost, s pásem plodin, které mají vyšší protierozní schopnost. Následující opatření vymezuje pozemky, které slouží k pěstování jednotlivých kultur a nazývá se delimitace kultur. Účelem tohoto opatření je členění půdního fondu na ornou půdu, zahrady, louky a pastviny, sady, vinice a chmelnice. Jde o omezení pěstování nevhodných plodin na sklonitých pozemcích s nedostatečnou ochranou půdy (Janeček a kol., 2012). Avšak důležitý je i tvar a velikost pozemku. Ideální podobou zemědělského pozemku je obdélník s poměrem stran 1:2 až 1:3. Velikost je pak závislá na sklonu svahu. Pozemek, který má sklon terénu do 10 %, by měl být ideálně velký 30 až 50 ha. Při sklonu pozemku

10 až 15 % by velikost neměla přesáhnout 25 ha a pozemek se sklonitostí nad 20 % by neměl být větší než 12 ha (Novotný, 2014).

Agrotechnická opatření se využívají nejen ke zlepšení vsakovací schopnosti půdy, ale i ke zvýšení protierozní odolnosti půdy a k vytvoření ochrany půdního povrchu v rizikovém období s výskytem přívalových srážek, kdy některé plodiny svým vzrůstem zatím nedostatečně kryjí půdu. Do této skupiny se řadí opatření, jakým je zejména příprava a zpracování půdy, výsev nové plodiny do plodiny krycí, ponechání strniště a posklizňových zbytků na povrchu půdy, mulčování, hrázkování nebo případné důlkování. Půda bez vegetačního pokryvu podléhá erozi nejvíce. Agrotechnická opatření zkracují čas, kdy se půda nachází bez vegetačního pokryvu, na minimum (Janeček, 2012).

Technická opatření začleňují nové prvky do terénu. Tyto prvky se vyhotovují především ze dřeva, kameniva, kovu a případně i betonu. Tento druh opatření slouží k vyrovnání příčných nerovností a ke snížení podélného sklonu, k ochraně před vodou, která může přitékat z pozemků nad zemědělskou plochou, slouží i k neškodnému odvádění povrchových vod, k retardaci povrchového odtoku a k zachycování smývané zeminy. Chrání intavilián obcí a komunikace před škodami způsobenými povrchovým odtokem. Mezi tato opatření se řadí: ochranné hrázky, ochranné nádrže, zatravněné údolnice, příkopy, průlehy, polní cesty s protierozní funkcí, ale i terénní urovnávání, terasy, vsakovací a sedimentační pásy a mnohé další (Janeček a kol., 2012).

Důležitou podmínkou pro zadržení vody ze srážkové události na orné půdě je struktura dané půdy spolu s dostatečným množstvím organických látek, které slouží jako zdroj energie pro půdní edafon a její biologickou aktivitu. Organismy v půdě tvoří ideální poměr velikostí pórů pro pěstované plodiny a tím zvyšují úrodnost půdy. Vylepšení půdní struktury tím, že se zpracovávají organické látky, má trvalý charakter, ale dlouhodobý a pozitivní vliv na infiltraci vody do půdy je zajištěno až víceletou pravidelnou aplikací (Vopravil, 2010).

Důležitou roli tedy hraje živočišná produkce a s ní související osevní postupy. Pokud by se navýšil stav skotu, došlo by k významnému zvýšení dodávky organické hmoty do půdy. Tento stav by měl velmi pozitivní vliv na retenční schopnost půdy a její protierozní vlastnosti (Šarpatka, 2014).

3.3.3 Zvýšení půdní úrodnosti

Rostliny čerpají živiny z půdních zásob. K dodání těchto živin, tedy k zúrodnování půd, slouží hnojení (Šimon, 1994). Adekvátní obsah živin v zemědělské

půdě lze zaopatřit a zachovat přiměřeným a pravidelným hnojením a tím dosáhnout dobré úrodnosti. Hnojiva mohou mít organický i průmyslový původ. Výživa však musí být vyvážená, jinak může způsobit nerovnováhu či snížení důležitých látek (Vaněk, 2002). Hnojiva organického typu přivádějí do půdy užitečné mikroorganismy nebo organickou hmotu, ze které se vytváří humus. Také do půdy dodávají růstové látky a početné množství živin. Organická hnojiva jsou klíčovým faktorem pro půdní úrodnost a jsou těžko nahraditelná (Kalina, 2014). Mezi základní organická hnojiva využívaná v zemědělství, zajišťující dobrou úrodnost půdy, patří například chlévský hnůj, močůvka, sláma a kejda. Pokud jsou tyto zdroje nedostatečné, je třeba využít alternativních hnojiv (Richter, Hlušek, 1996).

Jedním z alternativních organických půdních doplňků je Biochar. Biochar je druhem černého uhlí, vyráběným z uhlíkatého materiálu za působení tepla nebo chemikálií (Lehmann, 2007). Černé uhlí se může v půdě nacházet po sopečné aktivitě, lesních požárech nebo důsledkem antropogenní činnosti (Spokas a kol., 2012). Biochar se od černého uhlí liší tím, že je vytvořen s úmyslem být používán jako půdní meliorant (Barrow, 2012). Konkrétněji, biochar je pevný materiál, který se získává z termochemické přeměny biomasy v prostředí s omezeným obsahem kyslíku neboli karbonizací (Camps, Tomlison, 2015). Jeho základní složkou je chemicky stabilní uhlík, který nepodléhá oxidaci a nerozkládá se (Káňa, 2019). Jinými slovy, biochar je materiál, který se produkuje tepelným rozkladem organických materiálů v prostředí s omezeným množstvím kyslíku a při relativně nízkých teplotách, menších než 700°C. Jeho výroba výrazně připomíná produkci živočišného uhlí. Na rozdíl od živočišného uhlí je biochar vyráběn s úmyslem aplikace do půd, kde slouží jako prostředek ke zlepšení úrodnosti, produktivity a k zachycení oxidu uhličitého (Lehmann, Stephen, 2009).

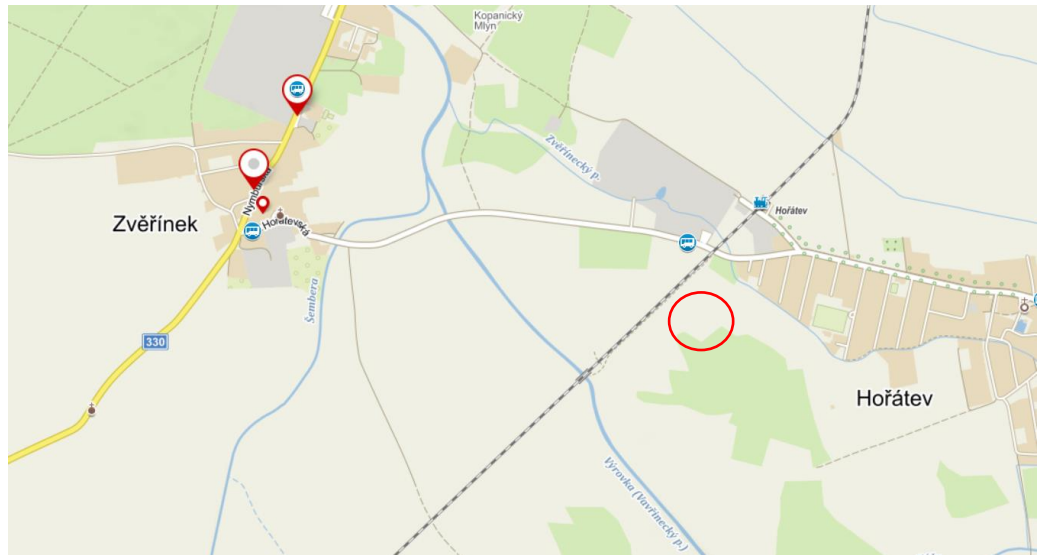
Aplikací biocharu do půdy se značně zkvalitňuje půda, protože uhlík váže živiny a důležité látky, jakými jsou například fosfor, dusík, draslík a mnohé další, které se z půdy za přirozených podmínek nevyplavují. Biochar má také vysokou schopnost zadržovat vodu v půdě, což je ovlivněno vysokou hodnotou kationtové výměnné kapacity, s jejíž pomocí váže v půdě i vodu (Káňa, 2019).

Biochar má často zásadité nebo neutrální pH. Kyselé půdy mývají většinou nižší pH a tím redukuje dostupnost živin a kationtovou výměnnou kapacitu. Mnoho experimentů již dokázalo, že přidáním biocharu do půdy se zvýší pH. Což vede k nezvratně pozitivnímu účinku na růst rostlin (Verheijen a kol., 2010).

Jediným rozdílem mezi dřevěným uhlím a biocharem tkví v jejich použití. Dřevěné uhlí, jak ho známe, se využívá především jako topivo pro grily nebo k vytápění. V pohledu čistě fyzikálně-chemickém je biochar a dřevěné uhlí v podstatě shodným materiálem (Verheijen a kol., 2010).

4. Charakteristika zájmového území

Terénní měření a odběr půdních vzorků pro další laboratorní měření probíhaly dne 6.6.2019 na zemědělském pozemku v okolí obce Zvěřínek, která se nachází ve Středočeském kraji, v bývalém okrese Nymburk, jihozápadně od stejnojmenného města Nymburk. Konkrétní poloha pozemku je vyznačena na obrázku č. 6.



Obr. č. 6: Vyznačení zájmové lokality, (upraveno z: www.mapy.cz, 2020)

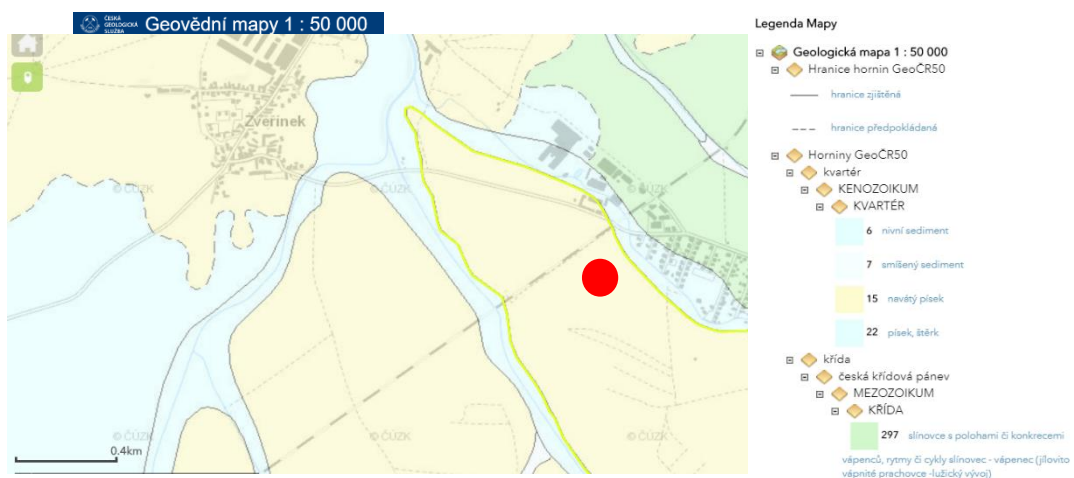
4.1 Geologické poměry

Obec se nachází v geomorfologické oblasti Středočeská tabule, v jejím geomorfologickém celku Středolabská tabule, podcelku Nymburská kotlina, v okrsku Sadská rovina (viz obr. č 7). Jedná se o oblast s úrodnou zemědělskou krajinou.



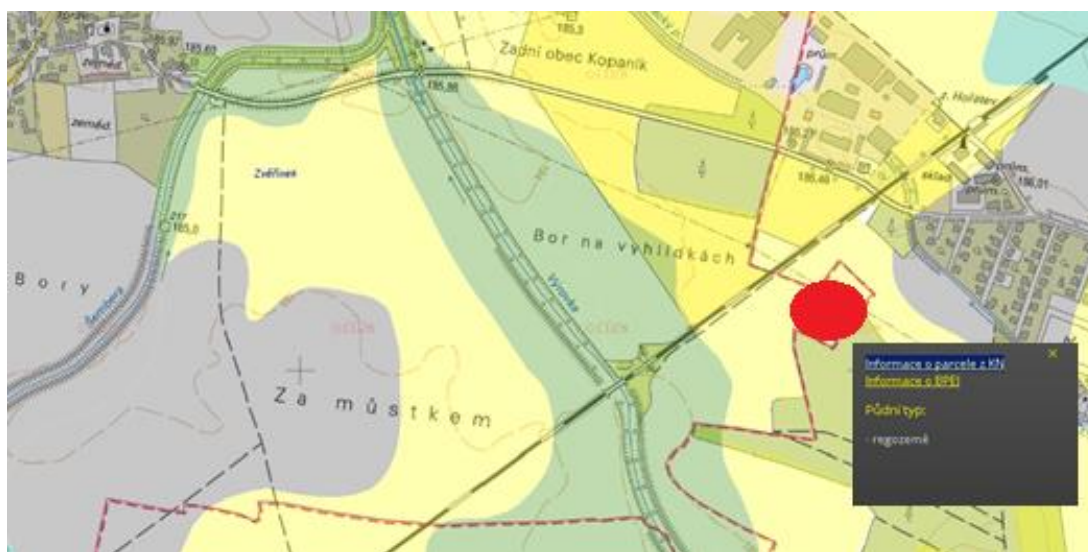
Obr. č. 7: Geomorfologické členění lokality s vyznačením zkoumaného území (upraveno z: <https://geoportal.cuzk.cz/>, 2020)

Z obrázku č. 8 je patrné, že se oblast nachází na území tvořené navátými písčými, vzniklé v období Kvartéru.



Obr. č. 8: Geologická mapa s vyznačením zkoumané oblasti (upraveno z: <https://geoportal.cuzk.cz/>, 2020)

Na obrázku č. 9 je viditelné, že se na zkoumané lokalitě nachází půdní typ: regozem.



Obr. č. 9: Určení půdního typu (upraveno z: <https://geoportal.cuzk.cz/>, 2020)

4.2 Klimatické poměry

Území obce Zvěřinec se řadí do klimatické oblasti teplé (s označením podoblasti T2). Takováto oblast se charakterizuje mírnou a suchou zimou a kratším slunečním svitem (Quitt, 1971). Základní klimatické charakteristiky této oblasti jsou následující:

- Průměrná roční teplota vzduchu: 8 - 9 °C
- Průměrná teplota ve vegetačním období: 14-15 °C
- Průměrný počet letních dnů s teplotou nad 25 °C: 50 dní
- Počet ledových dnů s max. teplotou -0,1 °C: 30 dní
- Počet ledových dnů s min. teplotou -0,1 °C: 100 dní

(Obec Zvěřínek, 2007).

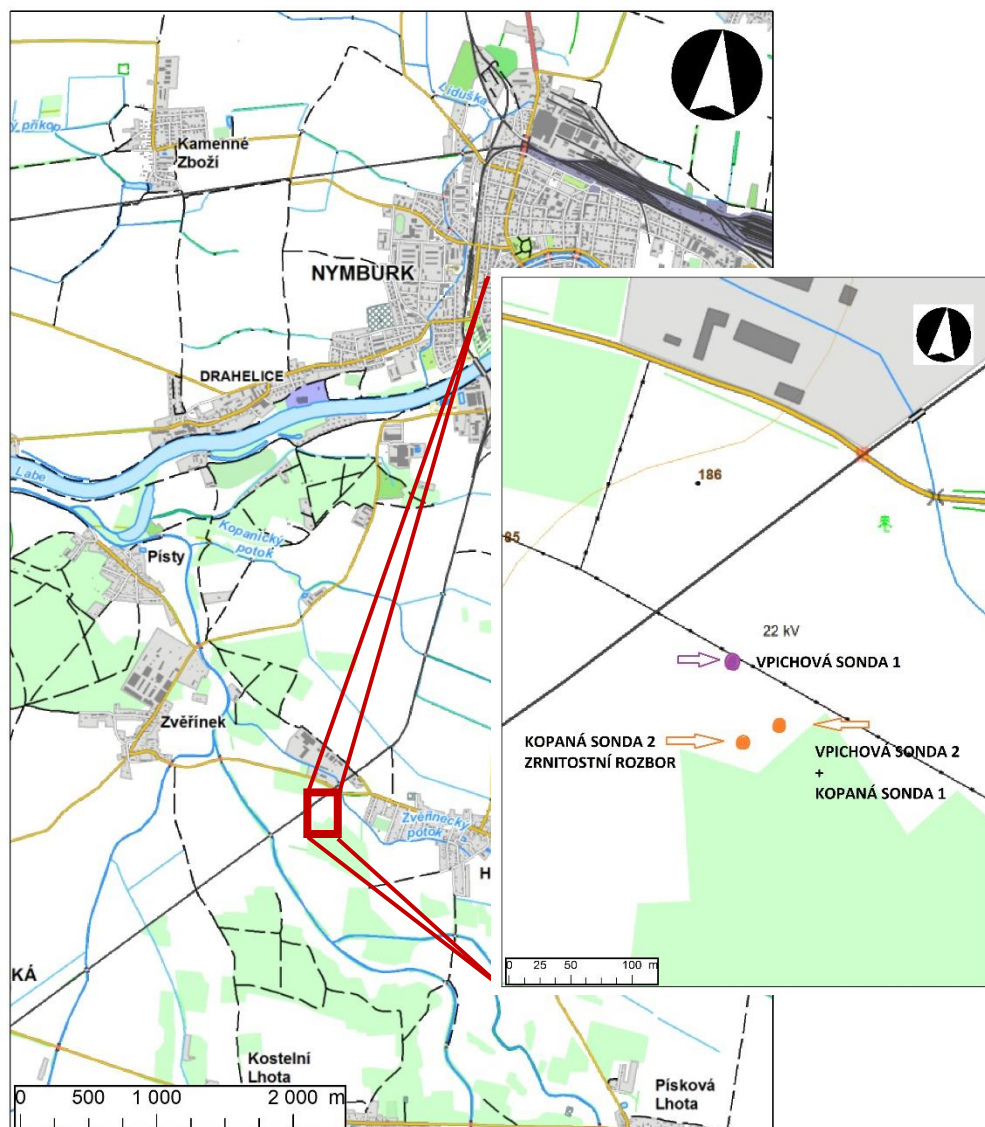
4.3 Hydrologické poměry

Území obce Zvěřínek spadá pod povodí Labe. Název stanice hlásného profilu Nymburk udává, že roční průtok této řeky činí $Q = 55,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Obcí protékají malé vodní toky, jakými jsou Výrovka, Zvěřínecký potok a Šembera. Nebezpečí záplav i povodní v této oblasti je velmi nízké. Průměrné roční srážky činí 550-600 mm a průměrné srážky ve vegetačním období jsou 350 mm (Obec Zvěřínek, 2007).

5. Metodika

5.1 Odebrání vzorů pro laboratorní rozbor

V zájmovém území byly vybrány dvě lokality pro vpichové sondy a dvě lokality pro sondy kopané. Přesnější poloha rozmístění sond je vyobrazena na obr. č. 10.



Obr. č. 10: Detail vyznačení půdních sond na topografickém podkladu, zdroj: ArcGIS

Umístění pro vpichové sondy bylo vybráno podle velikosti vzrůstu hořčice seté (*Sinapis alba*), jejíž vzrůst byl v rámci lokality velmi různorodý. Tento jev je vyobrazen na obrázcích 11a-zde je vyobrazen chtěný vzrůst hořčice seté, a 11b-poukazuje na malý vzrůst hořčice seté a holá místa mezi jednotlivými rostlinami. Sondy sloužily ke stanovení mocnosti půdních horizontů a k odebrání vzorků pro další měření.



Obr. č.11a, 11b: Ukázka heterogenního vzrůstu hořčice seté (*Sinapis alba*) na vybrané lokalitě, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 6.6.2019

Vpichové sondy byly odebrány sondýrkou, což je 1 metr dlouhá kovová trubice z poloviny otevřená a s pomocnými madly na jejím vrcholu. Sondýrky byly navrtány a natlučeny do země a po vytažení v nich uvnitř trubice uvízl úzký válec zeminy s vyznačenými půdními horizonty (viz obr. č. 12).



Obr. č. 12: Vpichová sonda č.1 (nahore) a vpichová sonda č. 2 (dole), zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 6.6.2019

Obě kopané sondy byly vyhloubeny za pomoci lopat do hloubky cca 80 cm a šířky přibližně 50 cm (viz obr. č. 13a). Ze sond byly následovně odebrány porušené i neporušené vzorky z různých půdních horizontů.

Pro odebrání vzorků byly využity Kopeckého válečky o objemu 100 cm³. Jednotlivé válečky byly položeny ostrou hranou na povrch půdy, na kterém nebyly viditelné vady (pro odběr neporušených vzorků), jako například praskliny nebo kameny. Poté byly válečky opatrně zatlučeny do půdy až po jejich vrchní okraj. Půda

kolem hrany válečku a jeho stran byla šetrně odstraněna a válečky byly ze země vyjmuty pedologickým nožem (viz obr. č. 13b). Poté se vyjmuté vzorky ještě opatrně upravovaly seřezáváním přebytečné půdy až do té doby, než byl půdní vzorek zarovnan do roviny rovnoběžné s okraji válečků. Následně byly válečky uzavírány víčkem, označeny příslušným kódem, zváženy a uloženy do speciální bedýnky (viz obr. č. 13c). Tímto způsobem bylo z první sondy odebráno 9 vzorků ze svrchního horizontu (označeno Ap 1) a 10 vzorků z horizontu spodního (označeno Cg 1). Z kopané půdní sondy číslo 2 byly odebrány 4 vzorky z vrchního i spodního horizontu (Ap 2 a Cg 2). Ze sondy číslo 2 pak byly odebrány porušené vzorky, které byly uloženy do igelitových vaků. Vzorky byly následně převezeny do laboratoře Katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování FŽP ČZU v Praze, kde byla na odebraných vzorcích provedena laboratorní část měření.



Obr. č. 13a, 13b, 13c: Dokumentace procesu odebrání neporušených půdních vzorků, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 6.6.2019

5.2 Terénní měření nasycené hydraulické vodivosti (K_s)

V oblasti mezi kopanou sondou 1 a kopanou sondou 2 bylo dne 6. 6. 2019 provedeno šest měření nasycené hydraulické vodivosti. Měření probíhalo za pomoci Guelphského permeometru (GP) s konstantním spádem. Opakování měření sloužilo k zachycení prostorové variability. Provedené experimenty byly označeny čísly GP1 až GP6.

Za pomoci speciálního vrtáku byly do země šetrně (aby nedošlo ke zhutnění půdy) vyhloubeny vrty o různých hloubkách: GP1= 15 cm, GP2= 13 cm, GP3= 15 cm, GP4= 48 cm, GP5= 54 cm a GP6=51 cm. Experimenty GP1-3 reprezentují orniční vrstvu a experimenty GP4-6 podomičí.

Poloměr vrtu (r_g) byl u všech vrtů přibližně 3 cm. Dále byla zvolena výška hladiny (výtopy) ve vrtech, kterou měla všechna měření stejnou, a to 5 cm. Po vyvrtání

vrtnu speciálním Edelmanovým vrtákem do písčité půdy od firmy Eijkelkamp byl přístroj v dolní části uzavřen a naplněn vodou. Dalším krokem bylo permeametr opatrně umístit do vrtnu, kde se nesměl dotýkat stěn, aby nedošlo ke změně rozměrů vrtnu nebo ke zhutnění půdy (viz obr. č 14). Pro stabilizaci přístroje byla použita trojnožka, která pak nesla celou váhu přístroje. Při měření byl zaznamenáván pokles v zásobníku přístroje za čas. Na tento zápis byl použit speciální formulář, ve kterém se taktéž nachází ke každému měření údaj o čísle měření, datu, času počátku a konce měření, metodě měření, průměru a hloubce vrtů a o výšce hladiny ve vrtech. Dále jsou ve formuláři uvedeny informace o lokalitě měření, kdo měřil, popis místa měření s nákresem, jaké bylo v dané situaci počasí a jaký se zde nacházel vegetační pokryv. Získaná data byla dále vyhodnocena v aplikaci Excel.



Obr.č. 14: instalace Guelphského permeametru v terénu, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 6.6.2019

5.2.1 Vyhodnocení měření nasycené hydraulické vodivosti Guelphským permeametrem

Pro výpočet nasycené hydraulické vodivosti K_s byl použit program Microsoft Excel z řady Microsoft Office. Hodnoty K_s byly počítány z naměřených hodnot rychlosti poklesu hladiny v zásobníku Guelphského permeametru (značeno i_g) a byl použit následující vzorec (Reynolds, 2008):

$$K_s = \frac{C_w i_{cg} A_g}{2\pi h_g^2 + C_w \pi r_g^2 + 2\pi h_g / sn'} \quad (5.1)$$

Kde C_w značí bezrozměrný tvarový součinitel vrtu, i_{cg} značí ustálenou rychlost poklesu hladiny v zásobníku, A_g je vnitřní plocha zásobníku permeamtru, h_g označuje výšku výtopy ve vrtu, r_g je poloměr vrtu a sn značí sorpční číslo, které je rovno $0,12 \text{ cm}^{-1}$.

Hodnoty i_{cg} byly vypočítány jako průměr posledních tří ustálených hodnot rychlosti poklesu hladiny (i_g).

Bezrozměrný tvarový součinitel vrtu C_w byl počítán podle vzorce (Zhang a kol., 1998):

$$C_w = \left(\frac{\frac{h_g}{r_g}}{22.074 + 0.093 \frac{h_g}{r_g}} \right) \exp 0.754 \quad (5.2)$$

5.3 Stanovení bodů retenční čáry a objemové vlhkosti

Měření probíhalo v laboratoři KVHEM, a to ve dnech 11.6.2019-1.7.2019 v pískovém tanku a ve dnech 1.7.2019-3.10.2019 v kaolínovém tanku.

Ze vzorků přivezených z terénu bylo sejmuto víčko z tupé strany Kopeckého válečku a váleček byl pečlivě očištěn. Na stranu bez víčka byla nasazena předem přichystaná hydrofilní gáza, která byla připevněna gumičkou (viditelné na obrázku č. 15a). Po připevnění mohlo být z válečku odebráno i druhé víčko. Obě víčka byla zvážena na laboratorní váze s přesností $0,01\text{g}$. Poté byla nádoba pískového tanku naplněna demineralizovanou vodou, písek byl prosycen a byla nastavena hladina 1cm výšky vody nad pískem. Pískový tank je vyobrazen na obr. č. 15b. Nyní mohly být válečky vloženy do pískového tanku. Válečky byly rozmístěny tak, aby byly rovnoměrně promíchány svrchní i spodní horizonty z obou sond. Jejich pozice byly následovně zakresleny do náčrtu. Po vložení válečků do tanku bylo nutné válečky lehce přitlačit, aby byl celý jejich povrch v kontaktu s pískovým podkladem. Následovalo nastavení pískového tanku na $pF 0$ (tato hodnota odpovídá nulovému podtlaku neboli plnému nasycení vzorků vodou). Vzorky byly postupně nasyceny opakovaným doléváním vody v průběhu dvou dnů až do úrovně těsně pod okraj válečků (viz obr. č. 15c).



Obr. č. 15a, 15b, 15c: Příprava vzorků k měření bodů retenční křivky, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 11.6.2019 a 14.6.2019

Po třech dnech, tedy 14.6.2019, byly nasycené vzorky jednotlivě vyjmuty, nechaly se krátce odkapat (cca 5 sekund), byly položeny na sklíčko o známé hmotnosti a následovalo jejich zvážení. Po zvážení byla jejich hmotnost zapsána do připraveného formuláře a byly vráceny zpět na své pozice do pískového tanku. Pískový tank se nastavil na hodnotu pF 1, která se rovná 0,1 m podtlaku neboli 0,1 m vodního sloupce. Postup vážení byl opakován ve dnech 17.6.2019, kdy byl pískový tank nastaven na pF 1,5 (odpovídá přibližně 0,32 m vodního sloupce), 19.6.2019 byla nastavena hodnota pF 1,8 (podtlak roven přibližně 0,63 m vodního sloupce) a 25.6.2019 hodnota vzrostla na pF 2 (podtlak roven 1 metru vodního sloupce). Hodnota pF 2 je rovna polní vodní kapacitě.

Dne 1.7.2019 byly vzorky přemístěny do písko-kaolínového tanku. Zde byly vzorky rozmístěny stejně jako v tanku pískovém. Jejich rozložení tedy odpovídalo původnímu náčrtu. Na písko-kaolínovém tanku byla nastavena hodnota pF 2,3 (odpovídá výšce vodního sloupce 2 m) a byl opakován obdobný proces, jako u pískového tanku. Další vážení proběhlo dne 2.9.2019, kdy už byla hodnota pF zvýšena na 2,7 (odpovídá výšce vodního sloupce 5 m). Dne 3.10.2019 proběhlo poslední vážení vzorků.

V programu Excel byla vypočítána pro každý výše uvedený měřený podtlak objemová vlhkost ze vzorce:

$$\theta = V_w/V_s \quad (5.3)$$

kde θ je objemová vlhkost [cm^3/cm^3]. V_w v jednotkách cm^3 odpovídá (v tomto případě se zanedbatelnou chybou) hmotnosti vody ve vzorku v gramech a V_s je objem válečku (100 cm^3). Aby bylo možné stanovit hmotnost vody ve vzorku, bylo nutné

vzorky nejprve vysušit v sušárně. Sušeno bylo na 60 °C po dobu tří dní. Hmotnost vody ve vzorku při daném podtlaku byla vypočtena z rozdílu hmotností odpovídajícímu danému podtlaku vysušeného vzorku.

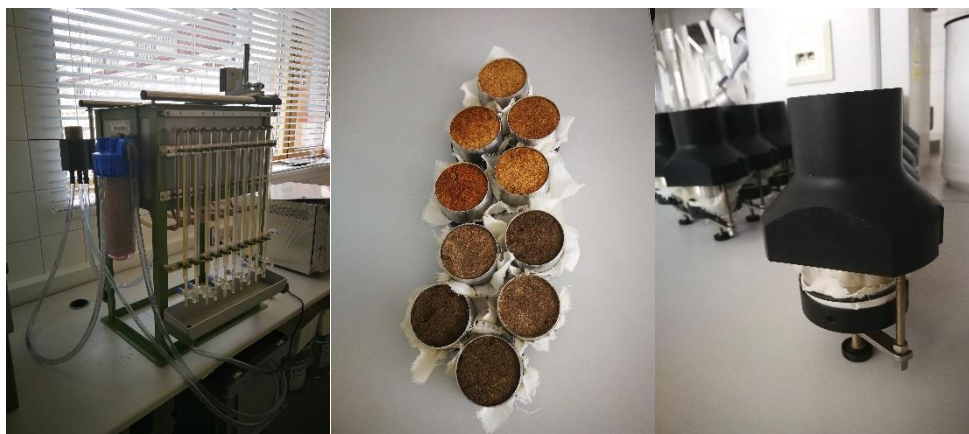
Z hodnot θ odpovídajících zvoleným podtlakům byly vypočteny body retenční čáry.

5.4 Měření nasycené hydraulické vodivosti v laboratorních podmínkách

Nasycená hydraulická vodivost se měřila dne 2.7.2019 v laboratoři pomocí laboratorního permeamtru metodou konstantního spádu (viz obr. 16a). Měřeno bylo celkem 20 vzorků, skládajících se z kombinací Ag1, Ag2, Cg1 a Cg2. Měření jednotlivých vzorků bylo opakováno dvakrát. Vzorky byly 24 hodin před samotným měřením postupně syceny v kontejneru permeamtru.

Nejprve byl připraven laboratorní permeametr. K samotnému měření byla použita demineralizovaná voda, která byla nalita do vrchní nádrže permeamtru, kam byly později vloženy vzorky, a do zásobníku vody

Plně nasycené vzorky měly již z předchozího měření přes okraj gázu připevněnou pomocí gumového kroužku. Na některých vzorcích se utvořili malé mezery nebo trhlinky mezi půdním vzorkem a okrajem válečku. Tyto nedostatky byly vyplněny silikonem. Vzorky se musely dostatečně očistit, aby se předešlo nežádoucímu proudění mezi válečkem a držákem. Ostrá hrana válečku byla poté vložena do speciálního držáku. Následovalo utažení držáku šroubem, který byl dotáhnut tak, aby vzorek upevnil. Takto nachystané vzorky byly vloženy do permeamtru a jejich pozice společně s číslem vzorku se zapsaly do připravených formulářů.



Obr. č.16a, 16b, 16c: vyobrazení laboratorního permeamtru, první várky vzorků a upevnění vzorků do držáku, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 1.7.2019

Do držáků se umísťovaly násosky, které byly již před vložením naplněny vodou, aby se zamezilo výskytu vzduchových bublin uvnitř. Násosky se do držáků umístili tak, aby byl jeden jejich konec uvnitř držáku a druhý konec vně (viz. obr. č. 17). Takto umístěné násosky při měření odvádějí prosakující vodu skrz vzorek. Před samotným měřením byla změřena teplota vody. Dále byla změřena výška hladiny v držáku a v jeho těsné blízkosti pro stanovení hydraulického gradientu.

Před začátkem měření byly uzavřeny kohoutky byret, do kterých stékala voda, která prošla skrz daný vzorek. Když vodní sloupec v byretě dosáhl hodnoty 0 mm, spustily se stopky a do formuláře se zapsal čas počátku měření. Čas na stopkách byl zastaven až po naplnění byrety do předem stanoveného objemu. Po zapsání času konce měření byl kohoutek byrety otevřen a voda se nechala volně protékat. Stejným postupem byly vzorky měřeny podruhé. Po skončení měření a vyjmutí vzorků z permeamtru se nádrž zakryla deskou, aby nedošlo k nechtěnému výparu vody.



Obr.č. 17: Vzorky vložené do laboratorního permeamtru těsně před začátkem měření, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 1.7.2019

Naměřená data byla vyhodnocena v programu Excel. Byl použit vzorec upraveného Darcyho zákona pro měřený proteklý objem za časovou jednotku:

$$K_s = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot \Delta h} \quad (5.4)$$

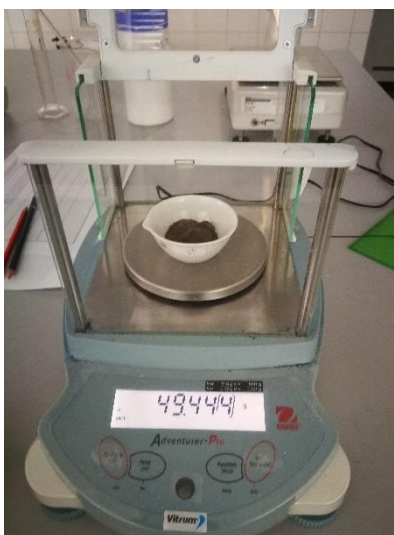
kde V [cm^3] odpovídá objemu vody, který protekl vzorkem, L [cm] je délka měřeného vzorku, A [cm^2] je plocha příčného řezu válečku, t [s] je doba, za kterou natekl objem vody V a Δh [cm] je rozdíl hladin uvnitř držáků vzorků a mimo ně (Eijkelkamp, 2013).

5.5 Stanovení zrnitosti

Zrnitostní složení bylo stanoveno za pomoci hustoměrné metody. Tato metoda funguje na principu usazování půdních částic v suspenzi. Pevné částice se ve vodě usazují a tím klesá hodnota suspenze. Předmětem laboratorního experimentu bylo tedy měření hustoty suspenze za stanovený čas (24,5 h.). Měření bylo provedeno čtyřikrát, a to vždy dvakrát ze svrchní a dvakrát ze spodní vrstvy z kopané sondy č. 2. Každé jedno měření a jeho předchozí příprava trvalo dohromady 3 dny. Zrnitostní rozboru byly prováděny v těchto dnech: pro svrchní horizont 2.9.-4.9.2019 a 14.-16.10.2019 a pro spodní horizont 17.-19.9.2019 a poslední měření zrnitosti spodního horizontu (trvalo 4 dny) 11.11.-14.11.2019.

5.5.1 Korekce hmotnosti

Do váženky o známé a do formuláře zapsané hodnotě hmotnosti bylo naváženo cca 20 g půdního vzorku (viz obr. č. 18). Vzorek byl poté na přibližně 24 hodin uložen do sušičky, ve které dosahovala teplota přesně 60^o C. Po cca 24 hodinách byl vzorek ve váženke znovu zvážen na laboratorní váze a z rozdílů byla určena hmotnost vzorku půdy po vysušení, respektive byl stanoven obsah vody ve vzorku. Celková navážka pak byla snížena o hmotnost vody. Vždy byl zapsán čas počátku i konce vysoušení.

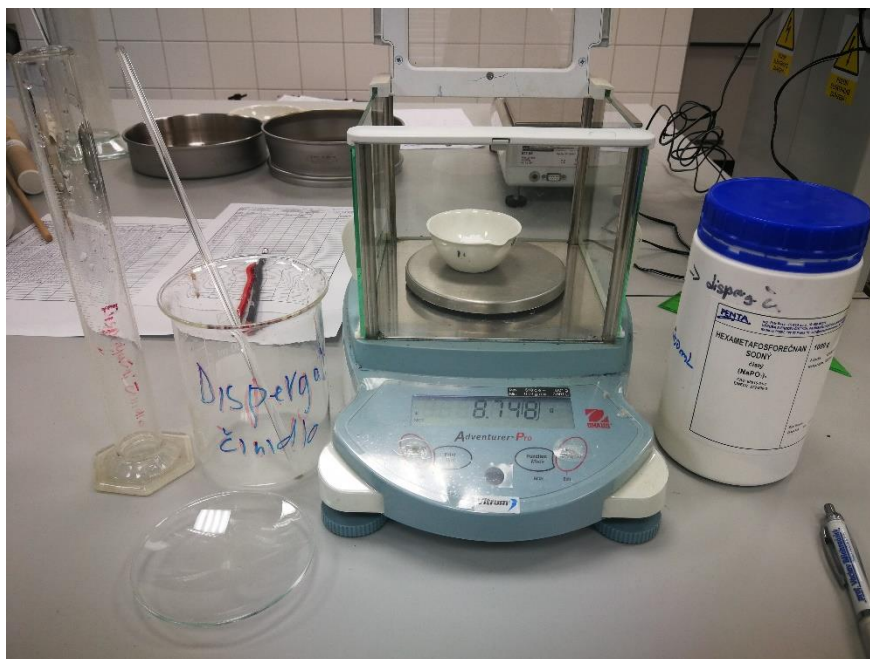


Obr. č. 18: Laboratorní váha měří hmotnost váženky se vzorkem zkoumané zeminy, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 2.9.2019

5.5.2 Příprava vzorku pro měření zrnitostního rozboru

Protože k samotnému měření byla potřeba jemnozem, bylo zapotřebí zbavit vzorek půdy přebytečného hrubozrného materiálu-skeletu. K tomuto účelu

posloužilo síto s oky o velikosti 2 mm, mísa a pomocný "prst" ze zbytku PVC hadice nebo kartáček na prosetí veškeré jemné zeminy. Síto i mísa, do které padala prosetá jemnozem, byly předem zváženy a hodnoty jejich hmotností byly zapsány do formuláře. Poté byla změřena hmotnost jak mísy s prosetou jemnozemi, se kterou bude probíhat další měření, tak i síta se zbylým skeletem. Tento údaj byl také zapsán do formuláře a nyní bylo možné spočítat hmotnost zeminy pod sítím a zeminy zachycené v sítu. Navážená jemnozem byla přemístěna do kádinky s ryskou o objemu 600 ml. K navážce bylo přidáno dispergační činidlo, což je směs hexametafosfátu sodného (NaPO_3) a uhlíčitanu sodného (Na_2CO_3) o koncentraci 35,7 g: 7,94 g rozpuštěných a doplněných na 1 dm^3 . Dispergační činidlo má stejný počet cm^3 jako měla navážka gramů. Dále byla kádinka doplněna destilovanou vodou do objemu 200 ml. Takto připravený vzorek v kádince byl přikryt hodinovým sklem a nechal se odležet na minimálně 20-24 hodin.



Obr.č. 19: laboratorní aparatura pro přípravu vzorku na měření hustotěnou metodou, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 2.9.2019

Po uplynutí této doby byla kádinka přemístěna nad laboratorní elektrický vaříč (viz obr. č. 20a). Vaříč byl zapnut a vzorek se přivedl k varu. Za stálého míchání skleněnou tyčinkou a doplňování destilované vody na 200 ml byl vzorek vařen po dobu minimálně jedné hodiny. Během vaření bylo třeba zamezit připečení zeminy ke kádince. Po uplynutí dané doby byl vzorek odejmut z vařiče a vložen do kádě naplněné vodou pokojové teploty, za účelem rychlejšího ochlazení vzorku. Když vzorek vychladl na teplotu podobnou teplotě pokojové, byl vzorek znovu přesíván za

pomocí gumového „prstu“ a nádoby se stříčkou, která byla naplněna destilovanou vodou, přes síto s oky o velikosti 0,25 mm (viz. obr. č. 20b). Síto i mísa pod ním byly před prosetím zváženy a tato hodnota byla zapsána do formuláře. Zrna, která zůstala na povrchu síta byla i se sítem přemístěna do sušičky. Sušička byla nastavena na 60°C a vzorky v ní byly uloženy minimálně po dobu 24 hodin. Do formuláře byl zapsán čas počátku i konce vysoušení a hmotnosti v obou časech.



Obr. č. 20a, 20b: Aparatura pro vaření vzorku a následné přesívání větších částic, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 18.9.2019

Zbytek vzorku, který propadl sítem do mísy, byl spolu s destilovanou vodou za pomoci trychtýře přelit do odměrného válce o objemu 1 000 ml. Obsah ve válci měl být roven právě 1 000 ml, proto byl vzorek doplněn o další destilovanou vodu, díky které dosahoval chtěné rysky.

5.5.3 Měření hustoměrnou metodou

Před samotným začátkem měření byl do odměrného válce vložen teploměr a odečetla se z něj aktuální teplota suspenze, která byla následně zapsána do formuláře. Dále byl vzorek za pomoci míchadla ve válci rozmíchán. V momentě vyjmutí (cca po 60 vteřinách) byla na stopkách zapnuta časomíra a do válce byl vložen hustoměr, který se však nesměl dotýkat stěn válce, aby nebyly výsledky ovlivněny (viz. obr. č. 21b). Po uplynutí 30 sekund se z rysky na hustoměru odečetla hodnota hustoty, která byla zapsána do formuláře. Další odečítání z rysky se opakovalo po 1, 2, 3, 4 a 5 minutách. Následně byl hustoměr vyjmut, opláchnut a znovu vnořen do válce v čase 15 minut, kdy byla znovu změřena i teplota vzorku.

Tento postup se opakoval v následujících 45, 120, 150, 300 a přibližně 1440 minutách.

Naměřené hodnoty byly dále dosazeny do Stokesova vzorce pro nepřímou sedimentaci :

$$v = \frac{2}{9} \frac{g r^2 (\rho_z - \rho_0)}{\eta} \quad (5.5)$$

kde v = sedimentační rychlost [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$] , g = tíhové zrychlení [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$], ρ_z = hustota částic [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$], ρ_0 = hustota disperzního prostředí [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$], η = viskozita [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$], r = poloměr částice [cm] (Kameníčková, 2010). Z výsledků byla vytvořena čára zrnitosti a za pomoci trojúhelníkového diagramu (viz obr.č.4) byl určen půdní druh.



Obr. č. 21a, 21b: Příprava soupravy pro měření zrnitosti hustoměrou metodou a ryska hustoměru ve skleněném válci, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 13.11.2019

5.6 Statistické vyhodnocení

Statistické vyhodnocení a grafické znázornění bylo prováděno v programu RStudio, které využívá programovací jazyk R. Pro statistickou analýzu byly vybrány výsledky z měření v pískovém tanku pro pF 0 a pF 2, výsledné hodnoty objemové hmotnosti a výsledky laboratorního měření nasycené hydraulické vodivosti K_s . Porovnávány byly vždy vrchní vrstvy z kopané sondy 1 a 2 se spodními vrstvami z těchto sond. Grafické znázornění pomocí box plotů pak vykazuje maximální a minimální hodnoty, medián a směrodatné odchylky.

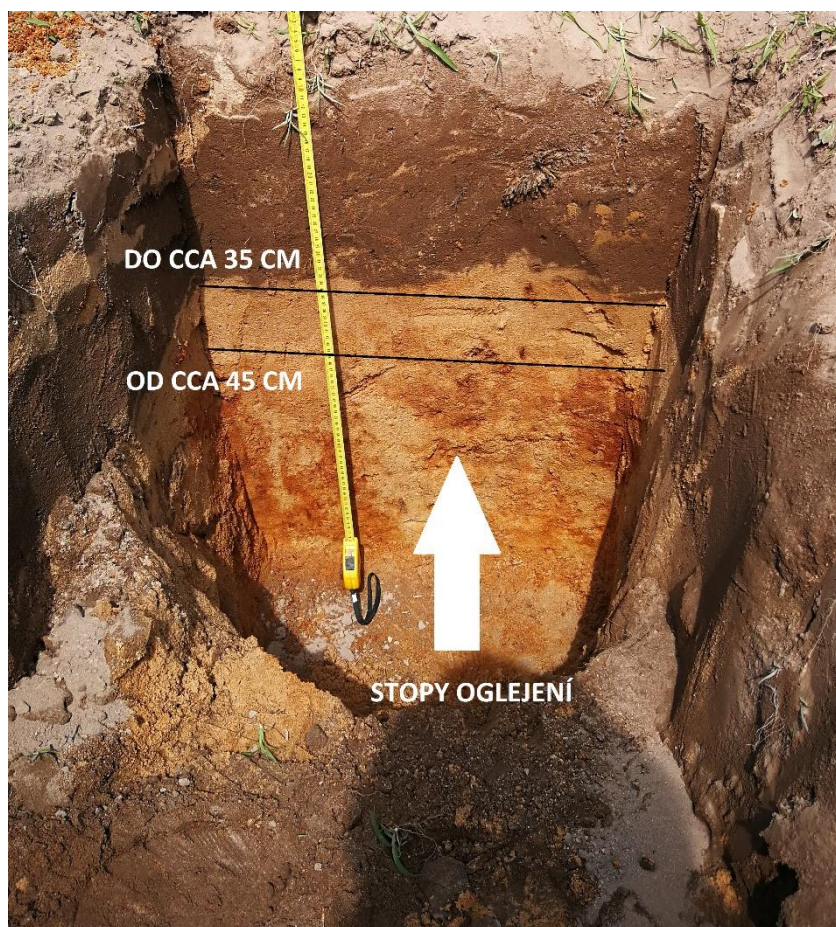
Data byla zpracována v rámci párového t-testu, který porovnává subjekty, které byly pořízeny dvěma měřeními. Tyto hodnoty představují páry a při testování zastupují pokusnou i kontrolní skupinu porovnávaných dat. Test vypočítá rozdíl výsledných naměřených hodnot u porovnávaných veličin. Je zde testována hypotéza, zda je rozdíl středních hodnot (průměrů) párových měření nulový neboli zda jsou si střední hodnoty rovny (Povolná, 2016).

Vypočtená hodnota *p-hodnota t-testu* byla hodnocena na hladině významnosti $\alpha=0,05$. Pokud tedy byla výsledná hodnota t-testu *p* větší než hodnota $0,05$, pak byl výsledek statisticky nevýznamný (rozdíl v průměrných hodnotách není statisticky významný, skutečný rozdíl v průměrech je nulový). Ale naopak pokud byla *p-hodnota* menší než $0,05$, pak už byl rozdíl v průměrech považován za statisticky významný.

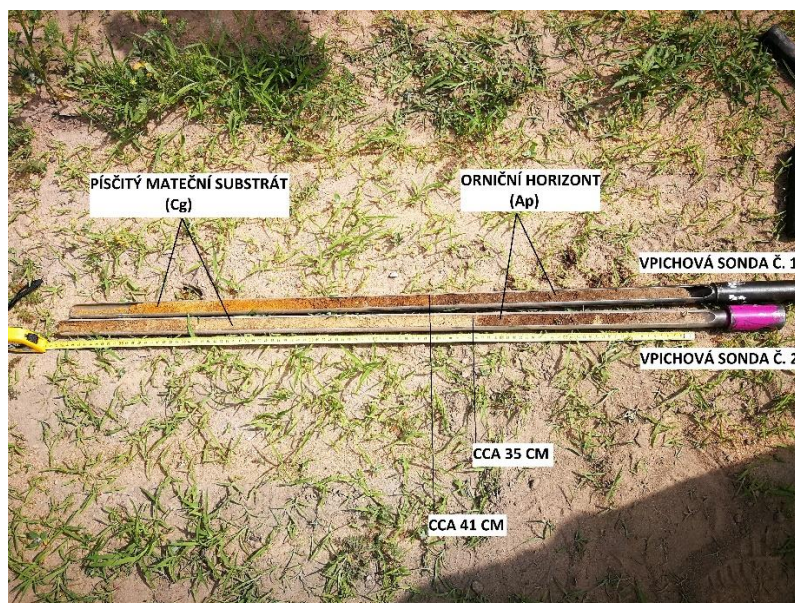
6. Výsledky

6.1 Charakteristika půdního profilu na základě kopaných a vpichových sond

Kopané a vpichové sondy umožnily vymezení půdních horizontů a stanovení jejich mocností na základě vizuálního posouzení. Tyto informace spolu s výsledky laboratorních měření umožnily klasifikaci půdního typu. Půda byla klasifikována jako regozem oglejená. U kopaných sond vykazuje omiční vrstva (horizont Ap) mocnost cca 35 cm. Zbylou část profilu představuje písčité mateční substrát, na kterém můžeme díky obr. č. 22 vidět, že se v hloubce kolem 45 cm nacházejí stopy oglejení (narezlé skvrny a výrazně světlá místa-mramorování), proto je označení horizontu C doplněno malým písmenem g. Na obrázku č. 23 jsou znázorněny vpichové sondy 1 a 2. Obě mají ve vrchních vrstvách menší vrstvu omičního horizontu (sonda č. 1 od cca 41 cm a sonda č. 2 od cca 35 cm) a zbytek spodních vrstev tvoří taktéž písčité mateční substrát se stopami oglejení.



Obr. č. 22: Půdní profil kopané sondy č. 1, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 6.6.2019



Obr. č. 23: Rozdílné půdní horizonty ve vpichových sondách, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 6.6.2019

6.2 Zrnitostní rozbor

Tabulka č. 1 znázorňuje výsledné hodnoty z měření zrnitosti. Zrnitostní rozbor probíhal za použití hustoměrné metody (viz. kapitola 5.5). Výsledkem tohoto měření jsou hmotnostní procenta zrnitostních frakcí, jejich průměr a směrodatná odchylka a následné zařazení půdního druhu podle USDA. Tyto údaje jsou vyobrazeny v následující tabulce.

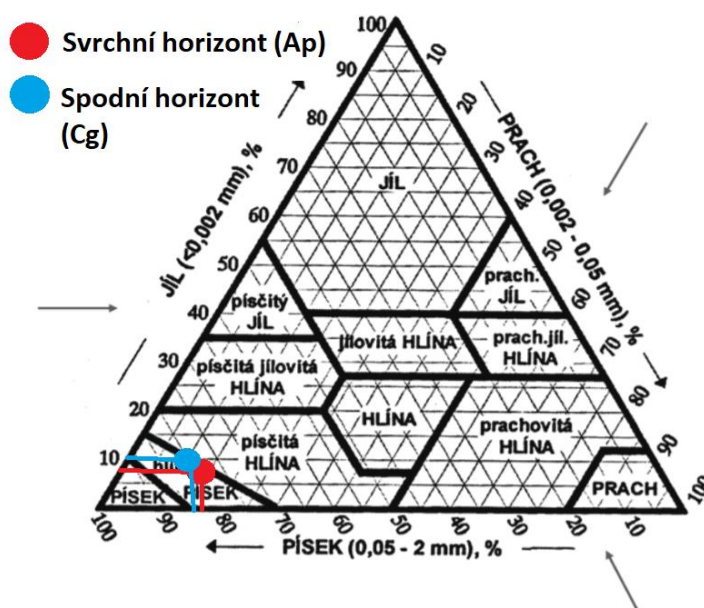
Tab. č. 1: Výsledky zrnitostních rozborů: hmotnostní procenta zrnitostních frakcí, průměr ± směrodatná odchylka, n=2 a klasifikace půdního druhu :

| Místo odběru | Horizont | Jíl (< 2 μm) | Prach (2μm-0,05 mm) | Písek (0,05-2 mm) | Půdní druh dle USDA |
|--------------|----------|--------------|---------------------|-------------------|----------------------------|
| kopaná sonda | Ap | 9,0 ± 2,83 | 5,5 ± 3,56 | 85,5 ± 0,73 | hlinitý písek (loamy sand) |
| č.2 | Cg | 11,0 ± 2,86 | 2,5 ± 0,72 | 86,5 ± 3,52 | hlinitý písek (loamy sand) |

Provedený výzkum zrnitostního rozboru vykázal velmi vysoký podíl frakce písku ve vzorcích odebraných ze zkoumané lokality, což je typické pro půdní typ regozem. Podíl obsahu písčitých zm v horním i spodním horizontu přesahuje 85 % celkového obsahu vzorku. Konkrétněji se nachází ve svrchních horizontech (Ap) 85,5 % písku a ve spodních horizontech (Cg) až 86,5 % písku. Naopak jílového materiálu se ve zkoumané lokalitě nachází poměrně málo a to kolem 10 %. Ve svrchních vrstvách

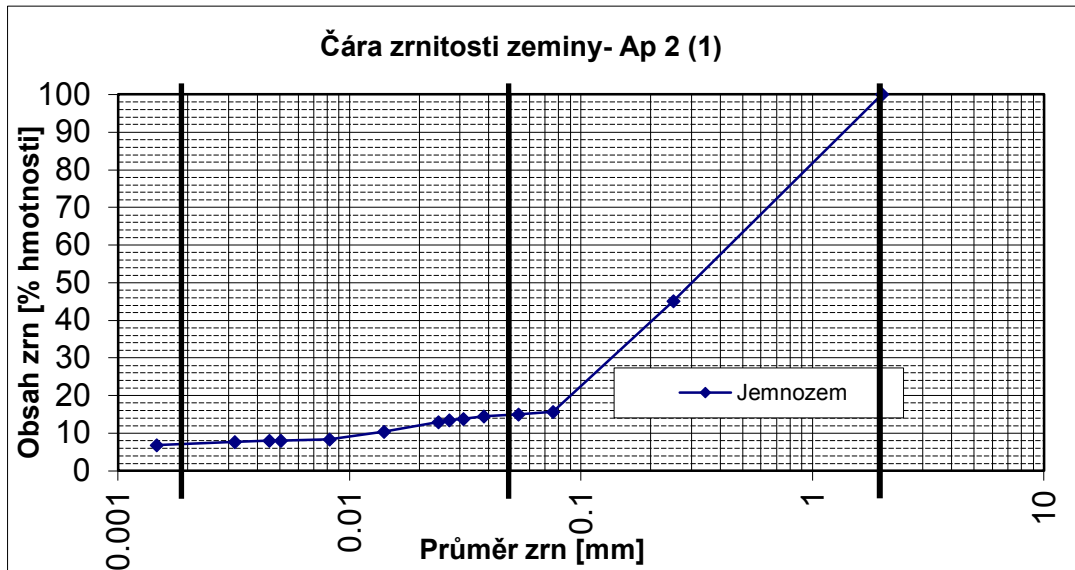
činí podíl jílu pouhých 9 % ze zkoumaného materiálu. Spodní vrstvy, kde je zastoupení jílového materiálu okolo 11 %, obsahují pouze mírně více jílu. Frakce prachových částic je však v tomto půdním druhu zastoupena nejméně (viz tabulka č. 1). Vrchní horizonty vykazují hodnotu zastoupení prachu 5,5 % a spodní horizonty pak jen 2,5 % z obsahu celého vzorku.

Tyto výsledné hodnoty jsou zaneseny v trojúhelníkovém diagramu (obr. č. 24), který vykazuje, že v obou dvou případech (ve svrchním horizontu Ap i spodním horizontu Cg) v kopané sondě 2, je půdní druh klasifikovatelný jako hlinitý písek (loamy sand).

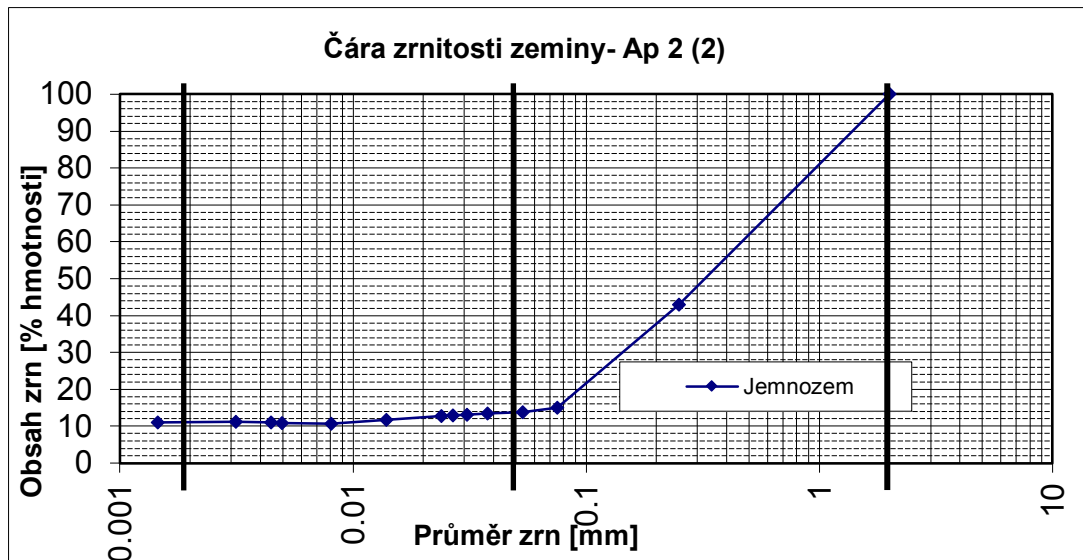


Obr. č. 24: Zanesení výsledných hodnot zrnitostí do trojúhelníkového diagramu, zdroj: Hillel, 1998

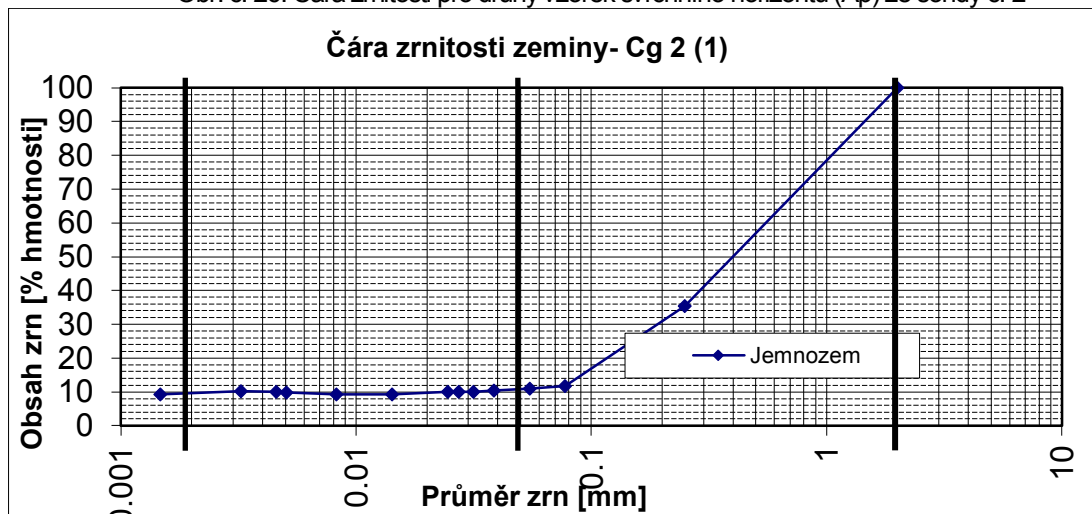
Ze zrnitostního rozboru byly dále vytvořeny grafy čáry zrnitosti, na kterých lze nejlépe vidět procentuální zastoupení jednotlivých zrnitostních kategorií, kde jíl zastupují všechna zrna o velikosti menší než 0,002 mm, prach jsou částice v rozmezí 0,002- 0,05 mm a písek tvoří zrna o velikostech 0,05- 2,0 mm. Je zcela zřejmé, že všechny čtyři následující grafy čar zrnitosti vykazují poměrně vysokou shodu v zastoupení jednotlivých zrnitostních frakcí.



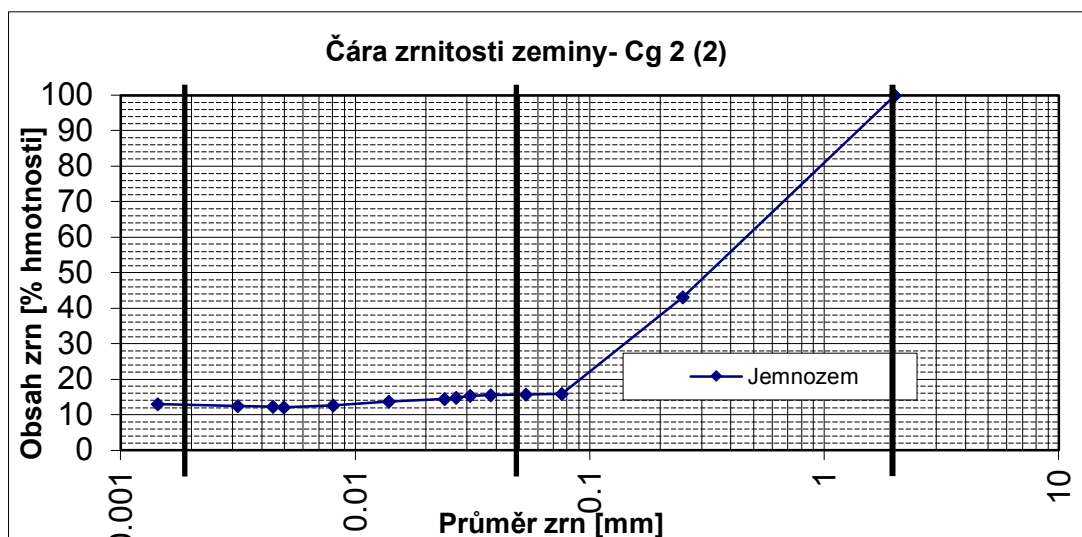
Obr. č. 25: Čára zrnitosti pro první vzorek svrchního horizontu (Ap) ze sondy č. 2



Obr. č. 26: Čára zrnitosti pro druhý vzorek svrchního horizontu (Ap) ze sondy č. 2



Obr. č. 27: Čára zrnitosti pro první vzorek spodního horizontu (Cg) ze sondy č. 2



Obr. č. 28: Čára zrnitosti pro druhý vzorek spodního horizontu (Cg) ze sondy č. 2

6.3 Výsledky vybraných hydro-fyzikálních vlastností půd

6.3.1 Objemová hmotnost a vlhkost při odběru

Hodnoty objemové hmotnosti byly počítány pro vzorky při odběru i po vysušení (viz tab. č. 2). Nejvyšší hodnoty objemové hmotnosti při odběru (před vysušením) dosahují vzorky ze spodního horizontu (Cg) z kopané sondy č. 2, kde průměrná hodnota konkrétně činí 1,891 [g.cm⁻³]. Naopak nejmenší hodnoty při odběru dosahují vzorky ze svrchního horizontu z kopané sondy č. 1. Zde činí průměrná objemová hmotnost 1,647 [g.cm⁻³]. Když tato data porovnáme s daty objemových hmotností po vysušení, zjistíme, že nejvyšší i nejnižší hodnoty jsou u obou skupin ve shodných horizontech i sondách. Tedy nejvyšší hodnoty objemové hmotnosti jsou znovu ve spodním horizontu (Cg) kopané sondy č. 2 a odpovídají hodnotě 1,730 [g.cm⁻³] a nejnižší hodnoty se nachází ve svrchní vrstvě kopané sondy č. 1, kde je výsledným průměrem objemové hmotnosti 1,557 [g.cm⁻³].

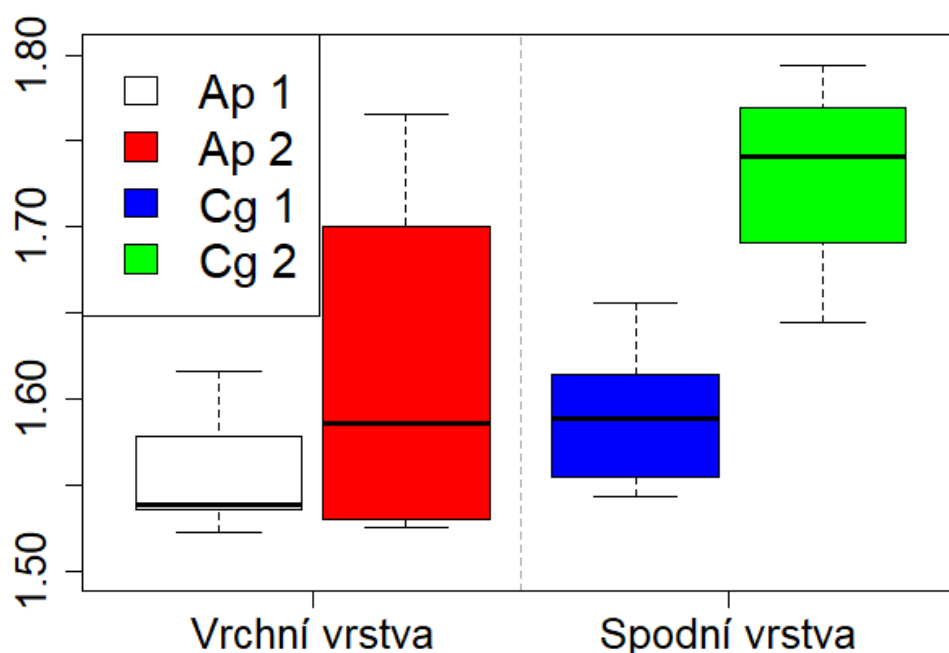
Vyšší hodnoty ve spodním horizontu kopané sondy č. 2 mohou být zapříčiněny například rozdílnou kompakcí (zhuťněním) této půdy. I přes to jsou hodnoty objemové hmotnosti vysušené zeminy ve vrchních horizontech na obou lokalitách vysoké. Tento fakt koresponduje s nevyhovujícím strukturním stavem těchto svrchních (orničních) horizontů a ukazuje tak na značnou míru zhuťnění půdy, které odpovídá celkově nízké pórovitosti.

Hodnoty objemové vlhkosti a objemových hmotností při odběru a po laboratorním vysoušení jsou vyobrazeny v následující tabulce (Tab. č. 2).

Tab. č. 2: Zvolené hydro-fyzikální vlastnosti půdy v horizontech Ap a Cg, jejich průměr a směrodatná odchylka ze 7 opakování:

| Lokalita | Horizont | Objemová hmotnost (odběr) [g.cm-3] | Objemová hmotnost (vysušení) [g.cm-3] | objemová vlhkost (odběr) [-] |
|-------------------|----------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| kopaná sonda č. 1 | Ap | 1,647 ± 0,040 | 1,557 ± 0,033 | 0,090 ± 0,014 |
| | Cg | 1,677 ± 0,043 | 1,590 ± 0,036 | 0,087 ± 0,018 |
| kopaná sonda č. 2 | Ap | 1,709 ± 0,121 | 1,616 ± 0,112 | 0,094 ± 0,010 |
| | Cg | 1,891 ± 0,084 | 1,730 ± 0,062 | 0,161 ± 0,024 |

Rozdíly v objemových hmotnostech byly graficky porovnány pro svrchní a spodní horizonty zvlášť, a to pomocí box plotů (Obr. č. 29), kde jsou znázorněna jejich maxima, minima, medián a směrodatné odchylky:



Obr. č. 29: Box plot objemových hmotností, zdroj: Naměřená data

Z obrázku č. 25 je patrné, že je značný rozdíl objemových hmotností mezi vrstvami spodních horizontů, což nám doložily i výsledky párového t-testu. Následující tabulka (Tab. č. 3) prozrazuje, zda jsou rozdíly ve svrchních i spodních vrstvách a zda jsou tyto rozdíly statisticky významné. Výsledný rozdíl vrchních vrstev nabyli

v párovém t-testu hodnoty $p = 0,376$, která byla porovnána s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. V tomto případě je hodnota vyšší než hraniční hodnota. Proto je rozdíl v těchto vrstvách statisticky nevýznamný. Naopak u spodních vrstev vyšel párový t-test $p = 0,01464$, což je menší než hraniční hodnota α . Tudiž je rozdíl spodních horizontů kopaných sond 1 a 2 statisticky významný.

Tab. č. 3: Porovnání objemových hmotností párovým t-testem:

| | | | |
|--------|------------------|---------------|----------|
| t-test | vrchní horizonty | $p = 0,376$ | $> 0,05$ |
| | spodní horizonty | $p = 0,01464$ | $< 0,05$ |

Objemová vlhkost při odběru dosahuje velmi malých čísel (viz Tab. č. 2). Tento stav odpovídá určenému půdnímu druhu - hlinitému písku a typu zeminy (regozem), a popisuje velmi nízkou schopnost zkoumané půdy zadržovat vodu. Oba horní horizonty z kopaných sond č. 1 a 2 spolu se spodním horizontem kopané sondy č. 1 vykazují téměř stejné hodnoty. Spodní horizont kopané sondy č. 2 se ovšem výrazně liší, hodnota objemové vlhkosti při odběru je přibližně o 5 % vyšší.

6.3.2 Nasycená hydraulická vodivosti

Terénní měření Guephským permeametroem bylo prováděno vždy třikrát pro každý horizont v blízkém okolí kopané sondy č. 1. Tedy tři měření pro vrchní A_p a tři měření pro spodní horizont C_g . Z jednotlivých hloubek vrtu se pro každý horizont vypočítal jejich průměr a následně byly pro jednotlivé horizonty zprůměrovány i výsledné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti K_s , které jsou zapsány v následující tabulce (Tab. č. 4).

Tab. č. 4: Výsledné K_s z Guelphského permeametroem:

| Lokalita | Hloubka vrtu [cm] | K_s [$m \cdot s^{-1}$] |
|--------------------------|-------------------|----------------------------|
| Zvěřínek-vrchní horizont | 14,3 | $2,84E-05 \pm 7,16E-06$ |
| Zvěřínek-spodní horizont | 51,0 | $5,09E-05 \pm 3,25E-05$ |

Z tabulky je zřejmé, že horní (orniční) vrstvy jsou méně propustné než vrstvy spodní. Obě-spodní i vrchní vrstvy obsahují vysoký podíl písku, jak bylo zjištěno v zrnitostním rozboru, ale vrchní obsahují navíc organiku. Proto mají spodní vrstvy hodnoty nasycené hydraulické vodivosti K_s vyšší. To znamená, že jsou to půdy pro vodu vysoce propustné a snadno vysychavé.

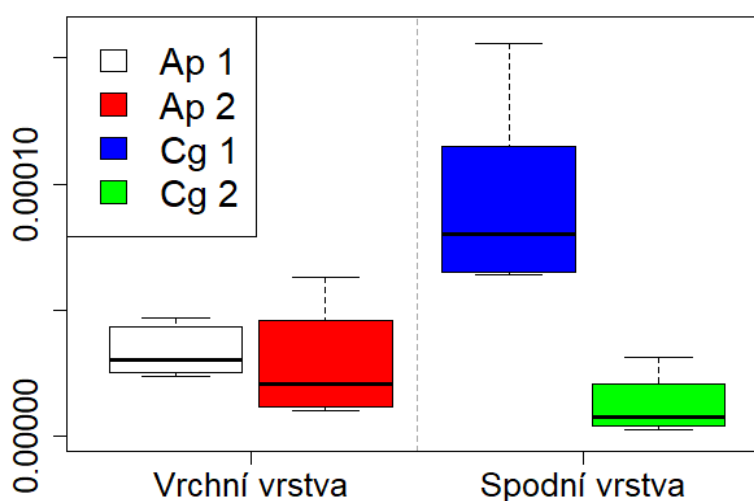
Pro vyhodnocení výsledků z laboratorního měření nasycené hydraulické vodivosti byly vždy zprůměrovány hodnoty K_s pro jednotlivé horizonty zvlášť (tedy Ap1, Ap2, Cg1 a Cg2) a tento postup byl použit jak u měření č. 1, tak u měření č. 2. Výsledkem je následující tabulka (Tab. č. 5).

Tab. č. 5: Výsledné K_s měřené v laboratorních podmínkách:

| | Horizont | měření číslo 1 | měření číslo 2 |
|-------------------|----------|----------------------------|----------------------------|
| | | K_s [$m \cdot s^{-1}$] | K_s [$m \cdot s^{-1}$] |
| kopaná sonda č. 1 | Ap | 3,31E-05 ± 9,97E-06 | 2,88E-05 ± 1,12E-05 |
| | Cg | 9,34E-05 ± 3,65E-05 | 8,95E-05 ± 3,24E-05 |
| kopaná sonda č. 2 | Ap | 2,87E-05 ± 2,43E-05 | 2,50E-05 ± 1,82E-05 |
| | Cg | 1,22E-05 ± 1,29E-05 | 1,19E-05 ± 1,25E-05 |

Výsledky vzorků z kopané sondy č. 1 odpovídají výsledkům z měření K_s Guelphským permeametrem. Tedy orniční vrstva má nižší propustnost než spodní písková vrstva. U kopané sondy č. 2 je tomu ale naopak-spodní vrstva (Cg) má výrazně nižší hodnotu nasycené hydraulické vodivosti, než její vrchní orniční vrstva (Ap). Tento fakt může být zapříčiněn již dříve zmíněným vysokým obsahem jílu v tomto půdním horizontu a tím pádem nižší propustností vody ve zkoumaných vzorcích.

Porovnání nasycená hydraulické vodivosti K_s měřené v laboratorních podmínkách ve svrchních a spodních horizontech bylo graficky znázorněno pomocí box plotů (Obr. č. 30):



Obr.č.30: Porovnání výsledků K_s měřených v laboratoři z vrchních a spodních vrstev, zdroj: Naměřená data

Obrázek porovnává vrchní horizont z kopané sondy č. 1 spolu s vrchním horizontem kopané sondy číslo 2 z měření č. 1. Stejným způsobem jsou porovnány i spodní vrstvy. Z grafického znázornění lze vyčíst, že nasycené hydraulické vodivosti vrchních vrstev se od sebe moc neliší. Naopak spodní horizonty jsou zcela odlišné.

To samé ukazují i výsledky následně provedeného párového t-testu.

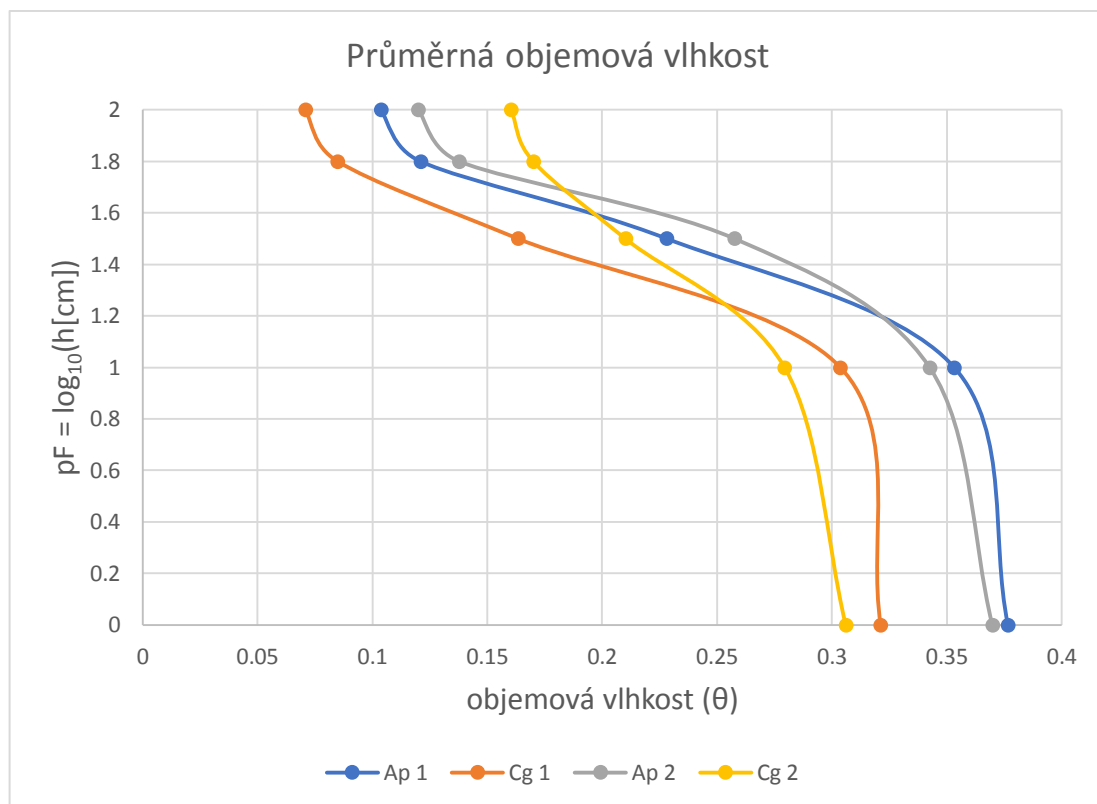
Tab. č. 6: Porovnání výsledků párového t-testu z laboratorního měření Ks č.1:

| | | | |
|-------|------------------|---------------|----------|
| ttest | vrchní horizonty | $p= 0.7461$ | $> 0,05$ |
| | spodní horizonty | $p= 0.001825$ | $< 0,05$ |

kde je srovnání vrchních horizontů menší než mezní hladina významnosti alfa ($\alpha=0,05$), tudíž je rozdíl statisticky nevýznamný. Ovšem u spodního horizontu vykazuje výsledek párového t-testu hodnotu o mnoho nižší, než je mezní hodnota alfa. Výsledný rozdíl v porovnávání spodních horizontů z kopaných sond č. 1 a č. 2 je statisticky významný.

6.3.3 Retenční čáry, hydrolimity a pórovitost

Měřené průběhy retenčních čar jsou vyobrazeny na obrázku č. 31:



Obr. č. 31: Průběh retenčních čar vrchních a spodních horizontů kopaných sond č. 1 a 2

Kde nárůst jednotlivých hraničních hodnot podtlaků pF označuje:

- pF 0 značí výšku vodního sloupce 0 cm, tedy nulovou hodnotu podtlaku
- pF 1 značí výšku vodního sloupce 10 cm
- pF 1,5 značí výšku vodního sloupce 32 cm
- pF 1,8 značí výšku vodního sloupce 63 cm
- pF 2 značí výšku vodního sloupce 100 cm neboli polní vodní kapacitu

Jednotlivé výsledné procentuální obsahy odvodněných pórů jsou pak průměry rozdílů jednotlivých podtlakových změn. Nulový podtlak pF 0, neboli 0 cm vodního sloupce, je hodnota odpovídající plnému nasycení půdy vodou (= odhad celkové pórovitosti). Ap 1, Cg 1, Ap 2 a Cg 2 jako obvykle značí ze které sondy a jejího horizontu byly vzorky odebrány. Označení Ap-vrchní (orniční) horizont, Cg-spodní horizont, dále označení 1 nesou vzorky z kopané sondy č. 1 a označením 2 jsou dány vzorky z kopané sondy č. 2.

Na obr. č. 31 lze vidět, že se vývoj křivek v rozmezí hodnot pF 0 až pF 1 příliš neliší. Nejnižších hodnot nabývají vzorky ze spodního horizontu z kopané sondy č. 2. Naopak nejvyšších hodnot nabývá oblast vrchního horizontu z kopané sondy č. 1.

Zajímavější je pak zbylé rozmezí pF 1 až pF 2, kde jsou rozdíly mezi samotnými křivkami zřetelnější. Patrný je zde rozdíl mezi kopanou sondou č. 1 a kopanou sondou č. 2, kde je procentuální zastoupení objemové vlhkosti v kopané sondě č. 1 značně nižší ve svrchním i spodním horizontu. Nejnižší hodnoty objemové vlhkosti nabývá spodní horizont kopané sondy č. 1 a nejvyšších hodnot nabývá spodní horizont z kopané sondy č. 2. Z průběhu křivky vzorků z kopané sondy č. 2 je zřetelné, že je v průběhu odvodňování nejstrmější.

Následující tabulka názorně ukazuje rozdíly mezi obsahy odvodněných pórů v procentech celkového objemu vzorků půdy (Tab. č. 7).

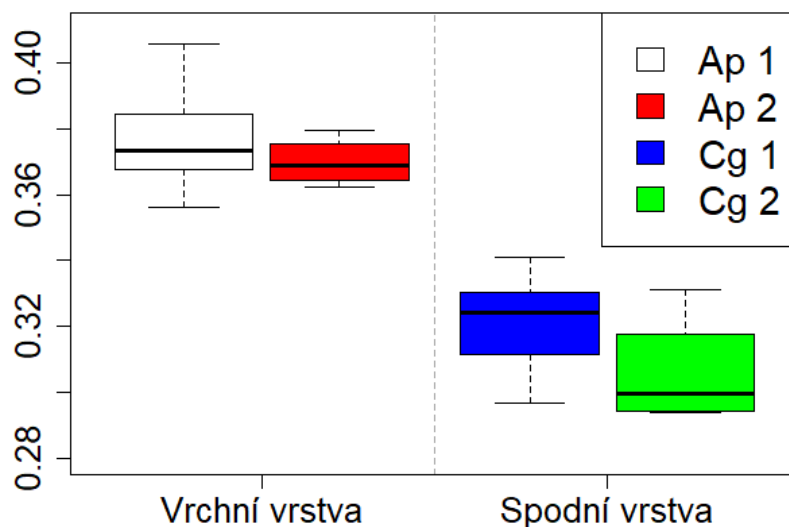
Tab. Č. 7: Obsah odvodněných pórů v jednotlivých sondách a jejich horizontech:

| | | plná vodní kapacita (pF 0) | polní vodní kapacita (pF 2) |
|--|------|---|--|
| Obsah odvodněných pórů [% objemu celého vzorku] | Ap 1 | 37,66 | 10,36 |
| | Cg 1 | 32,12 | 7,07 |
| | Ap 2 | 36,98 | 12 |
| | Cg 2 | 30,6 | 16,03 |

Plná vodní kapacita, tedy hodnota pF 0, značí hodnotu vzorků, které byly plně nasyceny vodou bez přítomnosti podtlaku (0 cm vodního sloupce) a vykazuje odhad celkové pórovitosti zeminy. Polní vodní kapacita, pF 2, je hodnota při podtlaku 100 cm, tedy 100 cm výšky vodního sloupce a zároveň znázorňuje obsah zadržené vody v kapilárních pórech po ztrátě vody gravitační. Hodnoty plné vodní kapacity a hodnoty polní vodní kapacity byly dopočítány z objemových vlhkostí.

Z tabulky č. 7 je zcela zřejmé, že vyšších hodnot procentuálního zastoupení odvodněných pórů nabývají vzorky ve stavu plného nasycení (pF 0). Naopak obsah odvodněných pórů při pF 2 je ve všech zkoumaných horizontech velmi nízký. Jejich rozdíly značí objem vody, který není půdní prostředí schopno zadržet a proteče jím. Celkově menší schopnost zadržovat vodu mají vzorky z lokality č. 1 (Ap 1 a Cg 1), z čehož vrchní horizont této lokality (Ap 1) vykazuje nejnepříznivější hodnoty. Naopak pozitivnější hodnoty lze vyčíst ze spodního horizontu kopané sondy č. 2 (Cg 2), která je ze všech zkoumaných lokalit nejvíce schopna uchovat si větší množství vody v půdním prostředí.

Dále byla mezi sebou graficky i statisticky porovnána data ze svrchních i spodních horizontů ve stavu plného nasycení, tedy pF 0 (viz obr. č. 32 a tab. č. 8):



Obr. č. 32: Grafické porovnání dat z vrchních a spodních horizontů pro pF 0 (maximální hodnota objemové vlhkosti, odhad pórovitosti), zdroj: Naměřená data

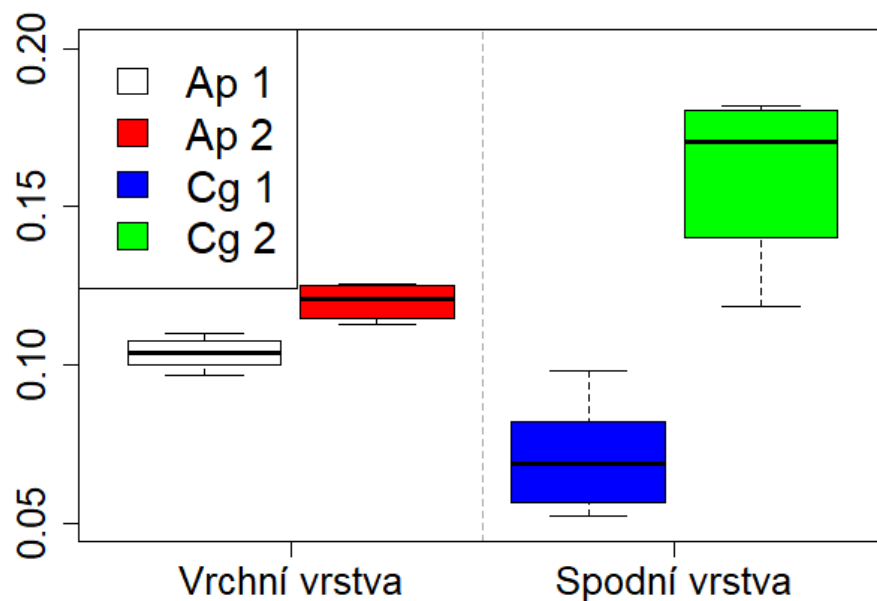
Z obrázku č. 32 je zjevné, že jsou si vrchní vrstvy Ap1 a Ap2 i spodní vrstvy Cg1 a Cg2 velmi podobné. Toto mínění bylo doloženo i následně provedeným párovým t-testem. Výsledné hodnoty p pro svrchní i spodní horizonty jsou uvedeny v následující tabulce (tab. č. 8).

Tab. č. 8: Výsledné hodnoty párového t-testu svrchních a spodních horizontů pro pF0:

| | | | |
|-------|------------------|-------------|--------|
| ttest | vrchní horizonty | $p=$ 0,2916 | > 0,05 |
| | spodní horizonty | $p=$ 0,1832 | > 0,05 |

Obě výsledné hodnoty porovnávání vrchních i spodních horizontů nabývají vyšších hodnot, než je hraniční hodnota hladiny významnosti $\alpha=0,05$. Tudíž lze tvrdit, že rozdíly jak mezi svrchními horizonty, tak mezi spodními horizonty jsou zanedbatelné a statisticky nevýznamné.

Stejným způsobem byla mezi sebou porovnána data ze svrchních i spodních horizontů pro hodnotu podtlaku pF 2, jinak označované jako polní vodní kapacita. Grafické porovnání je znázorněno na obr. č. 33:



Obr. č. 33: Grafické znázornění porovnávání svrchních a spodních horizontů pro pF 2 (odhad polní vodní kapacity), zdroj: Naměřená data

Na obrázku č. 33 lze vidět, že svrchní horizonty nabývají sice rozdílných hodnot, ale tyto hodnoty jsou si vcelku blízké. Spodní horizonty jsou naopak velmi odlišné, ale v rozmezí velmi malé číselné škály. Až párový t-test prozradil, zda jsou tyto rozdíly relevantní (viz tab. č. 9).

Tab. č. 9: Výsledné hodnoty párového t-testu svrchních a spodních horizontů pro pF2:

| | | | |
|-------|------------------|-------------|--------|
| ttest | vrchní horizonty | p= 0,006349 | < 0,05 |
| | spodní horizonty | p= 0,005647 | < 0,05 |

Výsledné hodnoty p párového t-testu nabývají velmi malých hodnot pro svrchní i spodní horizonty. Obě hodnoty jsou nižší, než je hraniční hladina významnosti $\alpha=0,05$. Lze tedy tvrdit, že rozdíly při porovnávání svrchních i spodních horizontů z kopaných sond 1 a 2 jsou statisticky významné.

7 Diskuze

Z výsledků charakteristiky půdního profilu na základě kopaných a vpichových sond je zjevné, že mocnost horizontu svrchní orniční vrstvy je na různých místech odlišná (popis kopané sondy č. 1 lze vidět na obr. č. 22 a vpichové sondy č. 1 a 2 jsou názorně vyobrazeny na obr. č. 23). To může být zapříčiněno nerovnoměrně hlubokou orbou a různým množstvím přídatků hnoje. Další příčinou může být utužení svrchního profilu těžkou zemědělskou mechanikou. Také lze ze zmíněných obrázků vyčíst, že vrchní orniční horizont je poměrně mělký. Tomuto faktu odpovídá popis regozemě od Vopravila a kol. (, 2010), který tvrdí, že půdní profil regozemě tvoří mělký humusový horizont, který ostře přechází v mateční substrát lehčího zrnitostního složení. Na orných půdách odpovídá humusový horizont hloubce orby a obohacení o organické látky získává díky kultivaci, kde je obsah humusu i přes to nekvalitní. Dle (Vopravil a kol., 2010) má regozem poměrně špatné sorpční a nepříznivé fyzikální vlastnosti. To je hlavní důvod, proč je tento půdní typ extrémně propustný a vysychavý, což dokazují terénní a laboratorní měření v této práci (viz výsledné hodnoty K_s - tab. č. 4 a tab. č. 5 a obsah odvodněných pórů – tab. č. 7).

Již při terénním průzkumu bylo v oblasti kopané sondy č. 2 fyzicky obtížnější vykopat půdní sondu. Tomu odpovídají výsledky měření objemových hmotností, kdy nejvyšší hodnoty objemové hmotnosti nabývají vzorky ze spodního horizontu kopané sondy č. 2 (viz tab. č. 2). Vyšší objemová hmotnost může být způsobena vyšším zhutnění (kompakcí) na lokalitě 2. Vysokých hodnot objemových hmotností nicméně nabývají všechny měřené vzorky. Dle Kňákala (2000) kolísá objemová hmotnost zemědělských minerálních půd v rozmezí 0,80 – 1,80 g.cm⁻³. Pro hlinitý písek by měla ornice dosahovat hodnot 1,40 g.cm⁻³ a podorničí 1,52 g.cm⁻³. Avšak ve zkoumané lokalitě hodnoty objemových hmotností přesahují tuto hranici v obou horizontech, což může indikovat vysoké zhutnění půdy.

Naměřené hodnoty nasycené hydraulické vodivosti K_s jak v laboratorních, tak i v terénních podmínkách ukazují na vysoce propustné půdy, a tedy půdy snadno a rychle vysychavé (viz tab. č. 4 a tab. č. 5). Vysoká propustnost půdy a neschopnost zadržovat vodu by mohla být příčinou špatné dostupnosti vody pro rostliny a přispívá k větším problémům v období sucha. Proto byl na zkoumané lokalitě zaveden projekt s názvem Dlouhodobý test aplikace biocharu do zemědělské půdy, který má za účel vylepšit nepříznivé vlastnosti půdy.

Výsledné hodnoty K_s naměřené v laboratorních podmínkách jsou o něco vyšší než hodnoty naměřené v terénu. To odpovídá omezení vlivu uzavřeného vzduchu v pórech při pomalém sycení v laboratoři. Mírně vyšší hodnoty K_s z laboratoře z důvodu eliminace vlivu uzavřeného vzduchu při postupném sycení v laboratorních podmínkách uvádí také Jačka a kol. (2014).

Nižší hodnoty K_s pro spodní vrstvu Cg u kopané sondy č. 2 odpovídají vyšší naměřené objemové hmotnosti (Tab. č. 2) v porovnání s lokalitou kopané sondy č. 1.

Laboratorní zrnitostní rozbor potvrdil vysoké zastoupení písku ve svrchních i spodních vrstvách (viz tab. č. 1). Šantrůčková (2014) potvrzuje, že písčité půdy, obsahují vysoký podíl velkých kapilárních pórů, které se rychle a snadno odvodňují. Tyto půdy snadno a rychle vysychají a jsou velmi chudé na živiny, které se snadno vymývají. Ačkoli je v těchto půdách pohyb i růst půdních organismů usnadněn právě většími póry, trpí velkým kolísáním teploty, vlhkosti a nedostatkem organické hmoty a živin. Tento fakt podporuje i Vopravil a kol. (2010) tvrzením, že se regozem řadí mezi půdy slabě vyvinuté, extrémně propustné a vysychavé a jejím hlavním půdotvorným procesem je slabá humifikace, která probíhá v nejsvrchnějších částech půdního profilu, které jsou výrazně ovlivněné kultivací. Toto tvrzení bylo potvrzeno naším výzkumem, kdy výsledná celková pórovitost naší zkoumané lokality je vždy podstatně vyšší ve svrchních horizontech ovlivněných orbou a pravidelným hnojením než ve spodním písčitém podorničí. Celková pórovitost je na území velmi nízká z důvodu špatné struktury půdy, a navíc ještě může být snížena zhutněním (viz velmi nízké hodnoty pórovitosti v tab. č. 7).

Výsledky hydro-pedologického průzkumu tedy potvrzují vysoké potenciální ohrožení zkoumané půdy zemědělským suchem.

Když se vezmou v potaz naměřené půdní vlastnosti, tak není tato půda pro hospodaření příliš vhodná a nejspíš i z toho důvodu byla při terénním průzkumu nalezena místa ke se pěstované plodině nedařilo. Zhoršená retence vyplývá ze špatných hydro-fyzikálních vlastností půdy. Je pravděpodobné, že s rostoucími následky klimatických změn, bude problém úrodnosti kvůli nedostatku vody z důvodu vysychání této zemědělské půdy stále narůstat.

Již při terénním průzkumu nás místní agronom seznámil s nevyhovujícím stavem půdy. Tomuto stavu by mohly být nápomocné přídavky kvalitní organické hmoty do půdy jakou je například hnůj (kompost, biochar nebo jejich kombinace). Tyto složky mohou zlepšit hospodaření půdy s vodou nebo také snížit vysoké K_s (Jačka a kol., 2018) a zvýšit zásobu využitelné vody pro rostliny (Teodoro a kol., 2020).

8 Závěr

Diplomová práce se zabývá stanovením hydro-fyzikálních vlastností půdy, které byly měřeny v terénu i v laboratorních podmínkách. V rámci práce bylo provedeno měření nasycené hydraulické vodivosti (K_s) za pomoci Guelphského a laboratorního permeometru, stanovení zrnitosti, pórovitosti a objemové hmotnosti. Pomocí výsledných hodnot zkoumaných veličin byla následně stanovena retenční schopnost této půdy.

Na základě kopaných a vpichových sond spolu s laboratorním měřením byl určen půdní typ: regozem oglejená. Mocnost svrchních orničních vrstev dosahuje hloubek 35 cm a zbylé spodní vrstvy jsou tvořeny písčitým matečným substrátem.

Zrnitostní rozbor byl proveden pouze se vzorky odebranými z kopané sondy č. 2. Tento rozbor vykázal vysoký obsah písku v půdě, který v průměru tvoří 86 % pevné složky půdy. Zbylý podíl pevných částic tvoří prach a jíl, jejichž zastoupení v celkovém objemu vzorku je velmi malé (prach tvoří 4 % a jíl 10 %). Následná klasifikace v trojúhelníkovém diagramu stanovila půdní druh jako hlinitý písek.

Hodnoty objemových hmotností vzorků ze svrchních i spodních horizontů v obou lokalitách jsou velmi vysoké (ve svrchních vrstvách nabývají hodnot od $1,557 \text{ g.cm}^{-3}$ do $1,616 \text{ g.cm}^{-3}$, ve spodních horizontech jsou to pak hodnoty od $1,590 \text{ g.cm}^{-3}$ do $1,730 \text{ g.cm}^{-3}$), přičemž nejvyšších hodnot nabývají vzorky v podorničním horizontu z kopané sondy č. 2. Avšak nezanedbatelné rozdíly objemových hmotností jsou i mezi samotnými lokalitami. Z hlediska objemové hmotnosti lze tedy půdu považovat za nestrukturní, do značné míry ztuhlou a nepříznivou pro zemědělskou činnost.

Měření v terénu na lokalitě 1 (v blízkosti sondy 1) ukázalo velmi vysoké hodnoty K_s (průměrné hodnoty orničního horizontu: $K_s = 2,84 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ a podorničního horizontu: $K_s = 5,09 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$). Vrchní vrstva (ornice) je tedy méně propustná než vrstvy podorniční. To je zřejmě zapříčiněno vyšším obsahem organické hmoty v ornici z důvodu hnojení. Laboratorní výsledky vzorků z kopané sondy č. 1 vykazují velmi podobný trend a mírně vyšší výsledky (průměry z obou měření Ap 1: $K_s = 3,095 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, Cg 1: $K_s = 9,145 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$). U vzorků z kopané sondy č. 2 měřených pouze laboratorním permeometrem je situace opačná - spodní vrstvy propouštějí víc vody, než vrstvy orniční (průměry pro horizont Ap 2: $K_s = 2,685 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ a Cg 2: $K_s = 1,205 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$). Celkově ale všechny naměřené

hodnoty K_s ukazují na velmi propustné půdy náchylné k rychlému vysychání. Zkoumaná půda tedy je schopná zadržet pouze malé množství vody, která půdním profilem rychle protéká a odnáší sebou také živiny, což může způsobit její nízkou úrodnost.

Výsledné hodnoty pórovitosti jsou následující: 37 až 38 % pro ornici a 31 až 32 % pro podorničí. Rozdíl hodnot pF 0 (plné nasycení) a pF 2 (polní vodní kapacita) se pohybují od 14,57 % do 27,30 % a jsou ve všech případech velmi vysoké. Půda tedy obsahuje velké množství gravitačních pórů, které rychle odvádějí vodu ze zkoumaných horizontů. Nízká polní vodní kapacita (pouze 10 až 12 % pro ornici a 7 až 16 % pro podorničí) ukazuje na malé množství kapilárních pórů. Půda si tedy po provlhčení udrží jen velmi malé množství vody po delší dobu. Velmi nízké výsledné hodnoty pórovitosti a s nimi korespondující měření retenčních čar indikují vysychavou půdu s vysokým potenciálem ohrožení zemědělským suchem.

Celkově naměřené výsledky ukazují, že sledovaná půda vykazuje nepříznivé hydro-fyzikální vlastnosti, má nízkou retenční schopnost, snadno vysychá a je tedy vysoce ohrožena případným výskytem zemědělského sucha. Půda tedy vyžaduje zlepšení svých vlastností a je vhodná pro účel testování efektu různých forem organické hmoty (např. hnůj, biochar, kompost a jejich kombinace), které mají potenciál hydro-fyzikální vlastnosti zlepšit.

9 Přehled použité literatury

1. Aimrun W., Amin M. S. M., Eltaib S. M., 2004: Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity. *Geoderma* [online]. 121 (3-4), 197-203, [cit. 2020-02-15]. DOI: 10.1016/j.geoderma.2003.11.010. ISSN 00167061. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706103003598>.
2. Barrow C., 2012: Biochar: Potential for countering land degradation and for improving agriculture. *Applied Geography* 34: 21–28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.09.008>.
3. Batjes N. H., 1996: Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma* 71 (1–2): 31–52
4. Bátková K., Matula S., Miháľková M., 2013: Multimediální učebnice hydrologických terénních měření. 2. vydání. Praha. Česká zemědělská univerzita. ISBN 978-80-213-2254-7.
5. Bear J., 1975: Dynamics of Fluids in Porous Media. *Soil Science*, 120(2), 162–163.
6. Camps, M., Tomlinson, T., 2015: The Use of Biochar in Composting. International Biochar Initiative. P.1-5.
7. Carvajal F., Aguilar M. A., Agüera F., Aguilar F. J., Giráldes J. V., 2006: Maximum depression storage and surface drainage network in uneven agricultural landforms. *Biosystems Engineering – Soil and Water*, 95 (2): 281-293.
8. Daňhelka J., 2007: Operativní hydrologie: Hydrologické modely a nejistota předpovědí. Vydal Český hydrometeorologický ústav v Praze. Vyd. 1., 104 s. ISBN 978-80-86690-48-3
9. Eijkelkamp, 2013: Operating instructions - 09.02 laboratory permeameters. online: <https://www.eijkelkamp.com/download.php?file=f04e24de>, použito: 12.1.2020.
10. Elhotová D., 2016: Půdní a zemědělské sucho: sborník příspěvků z mezinárodní konference, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Kutná Hora, 53 s.
11. Haberle J., Trčková M., Růžek P. 2008. Příčiny nepříznivého působení sucha a dalších abiotických faktorů na příjem a využití živin obilninami a možnosti jeho omezení. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Praha. 28 s. ISBN: 978-80-87011-45-4.

12. HAVEL, P.: EKOLOGIE: Krajina nedokáže zadržet vodu. [online]. 2009 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z : https://neviditelnypes.lidovky.cz/ekonomika/ekologie-krajina-nedokaze-zadrzet-vodu.A090816_112220_p_ekonomika_wag
13. Hillel D., 1998: Environmental Soil Physics, Academic press, San Diego, USA, 771 s.
14. Hlavinka, P., Trnka, M., Semerádová, D., Dubrovský, M., Žalud, Z., Možný, M. 2009. Effect of drought on yield variability of key crops in Czech Republic. Agric For Meteorol 149(3–4):431–442.
15. Holý M., 1978: Protierozní ochrana. Státní nakladatelství technické literatury, Praha
16. 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.
17. 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.
18. Janeček M., Dostál T., Kozlovsky Dufková J., Dumbrovský M., Hůla J., Kadlec V., Konečná J., Kovář P., Krása J., Kubátová E., Kobzová D., Kudrnáčová M., Novotný I., Podhrázská J., Pražan J., Procházková E., Středová H., Toman F., Vopravil J., Vlasák J., 2012: Ochrana zemědělské půdy před erozí. 1.vyd. Praha: ISV nakladatelství, 201 s. ISBN 85866-85-8.
19. Kalina M., 2014: Hnojení v zahradě. Grada, Praha, 114 s.
20. Káňa J., 2019: Biouhel (online) [cit. 2020.03.11], dostupné z :<http://biouhel.cz/>
21. Kameníčková I., 2013: Hydropedologie – návody do cvičení (VHK), VUT FAST v Brně, Brno
22. Kňákal P., 2000: Fyzikální vlastnosti hodnocené na pozorovacích plochách bazálního monitoringu zemědělských půd, zpráva ÚKZÚZ
23. Kutílek, M., 1978 Vodohospodářská pedologie. Druhé vydání, SNTL Bratislava, 296 s. SNTL 04-721-78.
24. Kutílek M., Kuráž V., Císlerová M., 2000: Hydropedologie 10. Skriptum, Fakulta stavební ČVUT, Praha. ISBN 80-010-2237-4.
25. Langhammer J., 2007: Odtokový proces. Katedra fyzické geografie a geoekologie, PŘF UK, Praha. Dostupné online z:

[http://web.natur.cuni.cz/~langhamr/lectures/hydro/pdf/Hydrologie_1_Lan
ghammer_odtok_proces.pdf](http://web.natur.cuni.cz/~langhamr/lectures/hydro/pdf/Hydrologie_1_Lan
ghammer_odtok_proces.pdf)

26. Lehmann J., 2007: Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5(7): 381-387, Dostupné online z : <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1890/1540-9295%282007%295%5B381%3ABITB%5D2.0.CO%3B2>
27. Lenhmann J., Stephen J., 2009: *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. London Earthscan, s.449, ISBN 978-1-84407-658-1
28. Matula S. a kol., 1989: *Hydropedologie-praktikum*. první vydání ed. České vysoké učení technické, Praha
29. MAŠÁT K., 1995: *Půdní fond a jeho ochrana*. In *Ochrana půdního fondu a vodních zdrojů. Prevence škod*. Agrární komora ČR, ISBN 80 – 209 – 0243 – 4, Praha
30. Mu W., Yu F., Li Ch., Xie Y., Tian J., Liu J., Zhao, N., 2015: Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and soil moisture content on different growing stages of spring maize. *Water*, 2015 (7): 2990-3008.
31. Muñoz-Carpena R., 2015: *Field Devices For Monitoring Soil Water Content*. EDIS, University of Florida IFAS Extension, dostupné z : http://edis.ifas.ufl.edu/ae266#FOOTNOTE_2
32. Nortcliff S., Hulpke H., Bannick C., Terytze K., Knoop G., Bredemeier M., Schulte-Bisping H., Auerswald K., Litz N., Mayer R., Stoy A., Alef K., Kerndorff H., Crössmann G., Eikmann T., Franzius V., Grimsky D., Möhlenbruch N., Storm P., Dworshak U., 2006: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: Soil, Definition, Function, and Utilization of Soil*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
33. Novotný I., 2014: *Příručka ochrany proti vodní erozi:2.*, Ministerstvo zemědělství, Praha: ISBN 978-80-87361-33-7.
34. Nimmo. J., 2004: *Porosity and Pore Size Distribution*. In *Encyclopedia of Soils in the Environment 4*. Hillel, D. [ed.] Elsevier, London.
35. Obec Zvěřínek, 2007: *Koncept územního plánu obce Zvěřínek: Vyhodnocení vlivů územního plánu na životní prostředí pro účely posuzování vlivů koncepcí na životní prostředí dle přílohy č. 1 zákona č. 183/2006 Sb., Nymburk, s.: 8-9*
36. Pavlásek J., Jačka L., 2014: *Hydropedologie*. Skriptum, ČZU, Praha.
37. Petříček, V. & Cudlín, P. (2003): *Máme bojovat proti povodním? Život. Prostr.*, 37 (4): 177-179

38. Pokorná D., Zábranská J., 2007: Hydrologie a hydroopedologie. VŠCHT, Praha.
39. Potop V., 2010: Temporal variability of daily climate extremes of temperature and precipitation in the middle Polabí (Elbeland) lowland region. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 41, p. 140-148
40. Povolná K., 2016: Diplomová práce: Zhodnocení dvou diagnostických nástrojů užívaných k diagnostice školní zralosti, Univerzita Karlova v Praze, Pedagogická fakulta, Praha
41. Quitt E., 1971: Klimatické oblasti Československa. *Studia Geographica*, 16. Academia, Praha,
42. Reynolds S. G., 1970: The gravimetric method of soil moisture determination part I: a study of equipment, and methodological problems. *Journal of Hydrology*, 258–273.
43. Reynolds W.D., 2008: 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.
44. Richter R., Hlušek J., 1996: Průmyslová hnojiva, jejich vlastnosti a použití, Institut výchovy a vzdělání Mze, Praha
45. Rožnovský J., 2014: Klimatická změna: dopady na krajinu. Sborník Povodně a sucho: krajina jako základ řešení. Vydal Botanický ústav AVČR. ISBN 978-80-86188-4
46. Saxton K. E., Rawls W. J., 2006: Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.
47. Spokas K., Cantrell K., Novak J., Archer D., Ippolito J., Collins H., Boateng A., 2012: Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality* 41(4): 973. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2011.0069>
48. Strudley M. W., Green T. R., Ascough J. C., 2008: Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research*, 99(1), 4–48.
49. Šantrůčková H., 2014: Základy ekologie půdy, Skriptum, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice, ISBN: 978- 80* 7394- 480-3

50. Šantrůčková H., Malý S., Cienciala E., 2014: Půdní organická hmota a vodní retenční kapacita půd. Sborník Povodně a sucho: krajina jako základ řešení. Botanický ústav AVČR. ISBN 978-80-86188-44-7
51. Šarapatka B., Dlapa P., Bedna Z., 2002: Kvalita a degradace půdy. Olomouc: Univerzita Palackého. ISBN 80-244-0584-9.
52. Šarapatka B., 2014: Pedologie a ochrana půdy, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, ČR, 232 s.
53. Šimon J., 1994: Uplatnění hnojiv při zúrodnování půd a jejich ekologické aspekty, Kultivace a rekultivace půd, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha, str. 55-72
54. 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 182, 104119.
55. Šrámek O., Kuchovský T., 2003: Základy hydrogeologie. Přírodovědecká fakulta Masarykovy Univerzity, Brno. 177 s.
56. Štěrba O., 2008: Říční krajina a její ekosystémy. Univerzita Palackého, Olomouc, ISBN 978-80-244-2203-9.
57. Teodoro M., Trakal L., Gallagher B.N., Simek 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 242, 125255. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125255>.
58. Tesař M., Šír M., Syrovátka O., Pražák J., Lichner L., Kubík F., 2001: Soil water regime in head water regions – observation, assessment and modelling. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 49 (6): 355–375.
59. Tindall J. A., 1999: Unsaturated zone hydrology for scientists and engineers, Prentice Hall, Upper Saddle River, 624 s.
60. Tuller M., Or D., 2004: Retention of water in soil and the soil water characteristic curve. In Encyclopedia of Soils in the Environment 4. Hillel, D. [ed.] Elsevier, London.
61. Uchimiya M., Wartelle L. H., Klasson K. T., Fortier C. A., Lima I. M., 2011: Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. Journal of agricultural and food chemistry 59: 2501-2510.
62. Úlehla V., 1947: Napojme prameny. Praha: Život a práce, 126 s.
63. Valentová, J., 2007: Hydraulika podzemní vody. ČVUT, Praha.

64. Vaněk V., Balík J., Pavlíková D., Tlustoš P., 2002: Výživa a hnojení polních a zahradních plodin, vydání třetí, Redakce odborných časopisů, Praha
65. Verheijen F., Jeffery S., Bastos A. C., van der Velde M., Dafas I., 2010: Biochar Application to Soils. JRC-IES. Luxembourg. P. 166.
66. Vopravil J. a kol., 2010: Půda a její hodnocení v ČR – Díl I. VÚMOP, Praha, 147 s, ISBN 978 -80-87361-05-4.
67. Vopravil J., Khel T., Vrabcová T., Havelková L., Procházková E., Novotný I., Novák P., Fučík P., Duffková R., Jacko K., Tylová J., Hodek T., 2010: Vliv činnosti člověka na krajinu českého venkova s důrazem na vodní režim zadržování vody v krajině, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy v.v.i, Praha 5- Zbraslav
68. 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.

10 Seznam obrázků

Obr. č. 1: Meze platnosti Darcyho zákona, Pavlásek, Jačka, 2014

Obr. č. 2: Popis Guelphského permeometru, zdroj: Matula. 1989

Obr. č. 3: Retenční křivky pro půdy s různou strukturou, zdroj: Hillel, 1998

Obr. č. 4: Trojúhelníkový diagram půdních druhů, zdroj: Hillel, 1998

Obr. č. 5: Závislost mezi množstvím zadržené vody na obsahu organického uhlíku, Šantrůčková a kol., 2014

Obr. č. 6: Vyznačení zájmové lokality, upraveno z: www.mapy.cz (2020)

Obr. č. 7: Geomorgologické členění, upraveno z: <https://geoportal.cuzk.cz/>, 2020

Obr. č. 8: Geologická mapa, upraveno z: <https://geoportal.cuzk.cz/>, 2020

Obr. č. 9: Určení půdního typu, upraveno z: <https://geoportal.cuzk.cz/>, 2020

Obr. č.10: Detail vyznačení půdních sond na topografickém podkladu, zdroj: ArcGIS

Obr. č. 11a, 11b: Ukázka heterogenního vzrůstu hořčice seté (*Sinapis alba*) na vybrané lokalitě, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 6.6.2019

Obr. č. 12: Vpichové sondy 1 a 2, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 6.6.2019

Obr. č. 13a, 13b, 13c: Dokumentace procesu odebírání neporušených půdních vzorků, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 6.6.2019

Obr.č. 14: instalace Guelphského permeometru v terénu, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 6.6.2019

Obr. č.15a, 15b, 15c: vyobrazení laboratorního permeometru, první várky vzorků a upevnění vzorků do držáku, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 1.7.2019

Obr. č. 16: Příprava vzorků k měření bodů retenční křivky, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 11.6.2019 a 14.6.2019

Obr.č. 17: Vzorky vložené do laboratorního permeometru těsně před začátkem měření, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 1.7.2019

Obr. č. 18: Laboratorní váha měří hmotnost váženky se vzorkem zkoumané zeminy, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 2.9.2019

Obr.č. 19: laboratorní aparatura pro přípravu vzorku na měření hustoměrnou metodou, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 2.9.2019

Obr. č. 20a, 20b: Aparatura pro vaření vzorku a následné přesívání větších částic, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 18.9.2019

Obr. č. 21a, 21b: Příprava soupravy pro měření zrnitosti hustoměrnou metodou a rýska hustoměru ve skleněném válci, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 13.11.2019

Obr. č. 22: Mozaika kopané sondy č. 1, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 6.6.2019

Obr. č. 23: Rozdílné půdní horizonty ve vpichových sondách, zdroj: vlastní fotodokumentace ze dne 6.6.2019

Obr. č. 24: Zanesení výsledných hodnot zrnitostí do trojúhelníkového diagramu, zdroj: Hillel, 1998

Obr. č. 25: Čára zrnitosti pro první vzorek svrchního horizontu ze sondy č. 2

Obr. č. 26: Čára zrnitosti pro druhý vzorek svrchního horizontu (Ap) ze sondy č. 2

Obr. č. 27: Čára zrnitosti pro první vzorek spodního horizontu (Cg) ze sondy č. 2

Obr. č. 28: Čára zrnitosti pro druhý vzorek spodního horizontu (Cg) ze sondy č. 2

Obr. č. 29: Box plot objemových hmotností, zdroj: Naměřená data

Obr. č. 30: Porovnání výsledků K_s měřených v laboratoři z vrchních a spodních vrstev, zdroj: Naměřená data

Obr. č. 31: Průběh retenčních čar vrchních a spodních horizontů kopaných sond č. 1 a 2

Obr. č. 32: Grafické porovnání dat z vrchních a spodních horizontů pro pF 0 (maximální hodnota objemové vlhkosti, odhad pórovitosti), zdroj: Naměřená data

Obr. č. 33: Grafické znázornění porovnávání svrchních a spodních horizontů pro pF 2 (odhad polní vodní kapacity), zdroj: Naměřená data

11 Seznam tabulek

Tab.č.1: Výsledky zrnitostních rozborů: hmotnostní procenta zrnitostních frakcí, průměr \pm směrodatná odchylka, $n=3$ a klasifikace půdního druhu

Tab. č. 2: Zvolené hydro-fyzikální vlastnosti půdy v horizontech Ap a Cg, jejich průměr a směrodatná odchylka

Tab. č. 3: Porovnání objemových hmotností párovým t-testem

Tab. č. 4: Výsledné K_s z Guelphského permeamtru

Tab. č. 5: Výsledné K_s měřené v laboratorních podmínkách

Tab. č. 6: Porovnání výsledků párového t-testu z laboratorního měření K_s č.1

Tab. č. 7: Obsah odvodněných pórů v jednotlivých sondách a jejich horizontech

Tab. č. 8: Výsledné hodnoty párového t-testu svrchních a spodních horizontů pro pF 0

Tab. č. 9: Výsledné hodnoty párového t-testu svrchních a spodních horizontů pro pF 2