

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv vybraných rekultivačních dřevin na hydrofyzikální
vlastnosti půdy na Velké podkrušnohorské výsypce**

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

Diplomant: Bc. Karolína Doušová

2021 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Karolína Doušová

Krajinné inženýrství
Voda v krajině

Název práce

Vliv vybraných rekultivačních dřevin na hydrofyzikální vlastnosti půdy na Velké podkrušnohorské výsypce

Název anglicky

Influence of selected tree species on hydrophysical properties of soil at reclaimed Velká podkrušnohorská spoil heap

Cíle práce

- 1) V půdách vzniklých pod třemi rozdílnými rekultivačními dřevinami (lípa, borovice a modřín) stanovit nasycenou hydraulickou vodivost a další související hydrofyzikální půdní vlastnosti (vlhkost při odběru, objemovou hmotnost, pórovitost a retenční čáru).
- 2) Porovnat výše uvedené půdní charakteristiky pro vybrané rekultivační dřeviny a vyhodnotit vliv použitých rekultivačních dřevin na proudění a retenci vody v nově vznikajících půdách.

Metodika

Na půdách vzniklých lesnickou rekultivací (s využitím monokultury lípy, borovice a modřínu) provést kopané sondy pro stanovení mocnosti vrchní organické vrstvy půdy. Dále provést terénní měření hydraulické vodivosti ve vrchní a spodní vrstvě půdy pomocí Guelphského permeamtru. Provést odběr půdních vzorků pro laboratorní stanovení vlhkosti při odběru, objemové hmotnosti, pórovitosti a retenční čáry. Statisticky porovnat rozdíly ve výše zmíněných půdních vlastnostech a vyhodnotit vliv zvolených rekultivačních dřevin.

Doporučený rozsah práce

55 stran

Klíčová slova

lesnická rekultivace, infiltrace, hydraulické vlastnosti půdy, půdní hydrologie

Doporučené zdroje informací

Cejpek, J., Kuráž, V., Vindušková, O., Frouz, J., 2018. Water regime of reclaimed and unreclaimed post-mining sites. *Ecohydrology* 11, e1911.

Frouz, J., Kuráž, V., 2014. Soil fauna and soil physical properties. In Frouz J. (Ed.), *Soil biota and ecosystem development in post mining sites*. Boca Raton: CRC press, pp. 265–278.

Frouz, J., Livečková, M., Albrechtová, J., Chroňáková, A., Cajthamí, T., Piží, V., Háněl, L., Starý, J., Baldrian, P., Lhotáková, Z., Šimáčková, H., Cepáková, Š., 2013. Is the effect of trees on soil properties mediated by soil fauna? A case study from post-mining sites. *Forest Ecology and Management* 309, 87-95.

Luo, Z., Niu, J., Zhang, L., Chen, X., Zhang, W., Xie, B., Zhu, Z, Wu, S, Li, X., 2019. Roots-enhanced preferential flows in deciduous and coniferous forest soils revealed by dual-tracer experiments. *J. Environ. Qual.* 48, 136–146.

Walmsley, A., Vachová, P., Hlava, J., 2019. Tree species identity governs the soil macrofauna community composition and soil development at reclaimed post-mining sites on calcium-rich clays. *Eur. J. For. Res.* 138, 685 753–761.

Předběžný termín obhajoby

2020/21 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 2. 3. 2021

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2021

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 07. 03. 2021

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Vliv vybraných rekultivačních dřevin na hydrofyzikální vlastnosti půdy na Velké podkrušnohorské výsypce 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 diplomovou 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 diplomové 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 30.3.2021

.....
Doušová Karolína

Poděkování

Ráda bych na tomto místě poděkovala všem, kteří mi byli během celé doby zpracování diplomové práce jakýmkoli způsobem nápomocni. Zejména bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Lukášovi Jačkovi, Ph.D. za ochotu, trpělivost, užitečné rady a připomínky při zpracování této práce. Dále bych ráda poděkovala Ing. Martinovi Kovářovi za pomoc při měření v terénu i v laboratoři a též za pomoc při zpracování naměřených výsledků.

Abstrakt

Pro úspěšnou obnovu ekosystému na lokalitách po těžbě je zásadní obnova půdy. Při správné volbě rekultivační dřeviny dokáže půda například zadržet více vody v krajině a akumulovat ji, což je důležité zejména v období bez srážek. Tato diplomová práce zkoumá účinky rekultivačních dřevin na hydrofyzikální a související vlastnosti půdy (nasycenou hydraulickou vodivost, objemovou hmotnost, vlhkost při odběru, pórovitost, retenční čáru, mocnost organicko/humusového horizontu).

Výzkum byl proveden na post-těžebních lokalitách vyvíjejících se pod monokulturami tří druhů stromů (borovicí černou *Pinus nigra*, lípou malolistou *Tilia cordata* a modřínem opadavým *Larix decidua*) na Velké podkrušnohorské výsypce. Na každé lokalitě byla pro popis půdního profilu vykopána půdní sonda. Dále byl pro laboratorní měření proveden odběr neporušených půdních vzorků do Kopeckého válečků (100 cm³) nebo kompaktních kusů jílových plátů do polyetylenových sáčků (PE). Vzorkování bylo prováděno zvláště pro vzorky z vrchní (cca 5 – 10 cm) a spodní vrstvy půdy (cca 30 – 34 cm). Pro stanovení klíčového hydraulického parametru půdy, nasycené hydraulické vodivosti (K_s), byl v terénu využit Guelphský permeametr. Retenční čáry byly měřeny v pískovém tanku a následně v přetlakových nádobách.

Nejvyšší hodnoty parametru K_s byly naměřeny u modřínu ve vrchní vrstvě půdy (1,23E-04 m.s⁻¹) a u lípy ve spodní vrstvě půdy (9,05E-05 m.s⁻¹). U modřínu byl také ve vrchní vrstvě naměřen mírně vyšší obsah makropórů (> 300 μ m) a mírně nižší objemová hmotnost než u borovice, což může souviset s vyššími hodnotami K_s v porovnání s borovicí. Naměřené hydrofyzikální vlastnosti byly u lípy ve vrchní vrstvě půdy téměř vždy vyšší (mimo K_s) než u zbylých dvou dřevin. Nejsilnější mocnost organického/humusové horizontu byla zjištěna u modřínu (13,5 cm) a nejnižší u borovice (7,0 cm). Tloušťka tohoto horizontu je nejspíše dána druhem a rozložitelností opadu a poměrem C:N.

Z naměřených dat nelze konkrétně určit druh dřeviny, který by měl na půdu zásadní vliv. Výsledky pouze naznačují, že z hlediska hydraulických vlastností nově vznikající půdy může být pro rekultivaci jílovité výsypky příznivější modřín než borovice. Vliv lípy je nutné podrobněji otestovat z důvodu rozdílných počátečních vlhkostních podmínek v půdě.

Klíčová slova: výsypka, lesnická rekultivace, půdní profil, hydrofyzikální vlastnosti půdy, hydropedologický průzkum

Abstract

Soil recovery is essential for successful restoration of the whole ecosystem. When using more appropriate reclamation trees, the developing soil infiltrate and accumulate more water in the landscape. This is especially important in the period without precipitation. This diploma thesis investigates the influence of reclamation trees on the hydrophysical and related soil properties (saturated hydraulic conductivity, bulk density, moisture, porosity, retention curve, thickness of the organic/humus horizon).

This research was performed at post-mining sites in Velká podkrušnohorská spoil heap where the three different tree monocultures were planted (pine *Pinus nigra*, lime *Tilia cordata* a larch *Larix decidua*). For each site, the soil profile was excavated and described on the wall of the pit. Further, intact soil samples were collected into the Kopecky rings (100 cm³). Compact hard blocks of clay were collected into polyethylene bags (PE). The sampling was performed separately for samples from upper soil layer (approx. 5 - 10 cm) and from the lower soil layer (approx. 30 – 34 cm). For estimation of key soil hydraulic parameter - saturated hydraulic conductivity (K_s), Guelph Permeameter was used. Retention curves were measured in standard sand box and pressure plate apparatus.

The highest mean value of K_s was observed for larch in upper soil layer (1,23E-04 m.s⁻¹) and for lime in lower soil layer (9,05E-05 m.s⁻¹). For soil under larch there were also measured slightly higher amount of macropores in upper soil layer (> 300µm) and slightly smaller bulk density than for soil under pine. This could be related to higher values of K_s for larch when compared to the soil under pine. Hydrophysical properties for lime were measured always slightly higher (except K_s) than the other two trees. The highest values of organic/humus horizon were determined for larch (13,5 cm) and the lowest for pine (7,0 cm). The value of this horizon is mostly given by the quantity and quality of the tree litter.

According to measured data, we are not able to clearly state, which kind of tree is better for soil hydraulic properties recovery. The results suggest that the larch may be better than pine for recovery of soil hydrological properties. The influence of the lime is necessary to remeasure, because of the different initial soil moisture conditions.

Keywords: spoil heap, forest reclamation, soil profile, hydrophysical properties of soil, hydrogeological survey

Obsah

1. Úvod	1
2. Cíle práce	3
3. Literární rešerše	4
3.1. Půda	4
3.2. Půdní voda	5
3.3. Diagnostické horizonty půdního profilu	6
3.3.1. Anhydrogenní horizonty nadložního humusu	7
3.3.2. Formy nadložního humusu	8
3.4. Výsyvky	9
3.5. Rekultivace	10
3.6. Sukcese na výsypkách	14
3.7. Popis vybraných fyzikálních vlastností půdy	15
3.7.1. Nasycená hydraulická vodivost	15
3.7.2. Retenční čára půdní vlhkosti	18
3.7.3. Objemová hmotnost	22
3.7.4. Půdní pórovitost	23
3.7.5. Vlhkost půdy	25
3.7.6. Struktura půdy	26
3.8. Preferenční proudění v půdě	27
3.9. Efekt rekultivačních dřevin na hydrologické vlastnosti půdy	28
3.9.1. Vliv rekultivačních dřevin na preferenční proudění a infiltraci	29
3.9.2. Vliv rekultivačních dřevin na retenci a vlhkostní režim půdy	30
3.9.3. Vliv rekultivačních dřevin na přítomnost pedofauny	31
3.9.4. Vliv pedofauny na půdní vlastnosti	32
4. Charakteristika zájmového území	36
4.1. Zeměpisné, geologické a pedologické poměry	37
4.2. Klimatické poměry	39
4.3. Vegetační poměry	39

5. Metodika	41
5.1. Plán vzorkování	41
5.1.1. Předmět a čas měření.....	41
5.1.2. Místo měření, výběr lokalit a důvody tohoto výběru.....	41
5.1.3. Počty vzorků, místo a omezení jejich odběru	41
5.2. Měření K_s Guelphským permeametrem	42
5.2.1. Postup měření.....	42
5.2.2. Vyhodnocení měření Guelphským permeametrem	44
5.3. Odběr neporušených půdních vzorků	44
5.3.1. Postup odběru vzorků do Kopeckého válečku.....	45
5.3.2. Postup odběru a zpracování vzorků odebraných do PE sáčků.....	46
5.4. Měření bodů retenční čáry.....	46
5.4.1. Postup měření.....	47
5.5. Statistická analýza.....	49
6. Výsledky	50
6.1. Nasycená hydraulická vodivost.....	50
6.2. Objemová hmotnost	52
6.3. Objemová vlhkost při odběru	54
6.4. Pórovitost	55
6.5. Retenční čáry a ekvivalentní velikosti pórů	57
6.6. Půdní profil	59
7. Diskuse	60
8. Závěr	64
9. Přehled literatury a použitých zdrojů	66
10. Přílohy	81

1. Úvod

V České republice se nejrozsáhlejší ložiska hnědého uhlí nacházejí v oblasti podkrušnohorských hnědouhelných pánví (Severočeské a Sokolovské). Krajina je zde narušena rozsáhlými hnědouhelnými povrchovými lomy a krajinnými novotvory tzv. výsypkami, které vznikají hromaděním odpadního skrývkového materiálu (Broumová et al., 2007; Walmsley et al., 2019). Půda na výsypkách vykazuje vzhledem k hloubce původního uložení odlišné biologické, chemické i fyzikální vlastnosti než půda vznikající přirozeně na povrchu (Frouz et al, 2001; Šourková et al., 2005). Povrch výsypek je typický nízkou schopností zadržovat vodu, vysokou mírou zhutnění, extrémními hodnotami pH, téměř žádnou či nízkou biologickou aktivitou a nedostatkem živin (Sandlein et al., 1983; Frouz et al, 2001; Johnson, 2003; Moffat, Bending, 2006; Walmsley et al., 2019). Některé z výše zmíněných vlastností výsypek mohou být příčinou zpomalení růstu a vývoje rostlin (Bradshaw, 1997). Pro znovuoobnovení ekosystému a ekosystémových funkcí v post-těžební krajině je nutná obnova půd. Obzvláště důležitá je tvorba horních vrstev půdy, zejména organominerálních horizontů. Vegetační kryt je základním zdrojem organické hmoty pro vrchní vrstvu půdy a může tedy zásadně ovlivňovat výskyt půdní bioty, která organickou hmotu přeměňuje a vpravuje do půdy (Tajovský, 1992; Pižl, 1992; Scheu, Schulz, 1996; Frouz, 1997). Rekultivace půd se musí týkat mimo jiné i vodního režimu a souvisejících hydrologických vlastností půd. Na rekultivovaných plochách je vývoj půd dán klimatickými a vegetačními podmínkami lokality a rovněž vegetací a na ní vázanou půdní faunou (Mermoud, Xu, 2006; Li, Shao, 2006; Frouz et al., 2013).

V současné době se velmi mnoho studií provedených na Velké podkrušnohorské výsypce zaměřuje na hygienicko-chemické vlastnosti půd a sedimentů, na hodnocení chemického stavu půd (Abukamov, Gagarina, 2006), na zjišťování rozdílů půdních vlastností mezi rekultivovanými a nereakultivovanými lokalitami (Cejpek et al., 2017), popřípadě porovnávají lokality s rozdílnou věkovou skladbou dřevin ale stejným vegetačním krytem (Kuráž et al., 2012).

Efektu různých rekultivačních dřevin na hydrofyzikální vlastnosti půdy se příliš mnoho pozornosti nevěnuje. Již je známo, že nově vznikající půda se může zásadně lišit v závislosti na použitém druhu rekultivační dřeviny. Vliv volby dřevin na hydraulické vlastnosti, které jsou klíčové pro hydrologické procesy v půdě ale není dostatečně prozkoumán, a proto se tato práce touto problematikou zabývá.

Struktura práce je rozdělena na několik částí. První teoretická, rešeršní část, popisuje vybrané základní pojmy a hydrofyzikální vlastnosti půdy, které souvisejí s tématem práce. Dále je v této části práce kapitola popisující problematiku preferenčního proudění v půdě a kapitola popisující vliv rekultivačních dřevin na hydrologické vlastnosti půdy, která se mimo jiné zabývá i popisem vlivu dřevin na existenci pedofauny v půdě a jejího následného vlivu na půdní vlastnosti. Druhá část práce se zabývá popisem zájmového území tzn. Velké podkrušnohorské výsypky. Třetí část, metodika, je zaměřena na popis odběru vzorků, provedených měření a následného zpracování získaných dat. Další část práce obsahuje kapitulu výsledky, ve které jsou naměřené hodnoty vyhodnoceny a interpretovány. V kapitole diskuse jsou získaná data porovnávána a diskutována s jinými výzkumy zabývající se obdobnou problematikou. V poslední kapitole závěr jsou zejména shrnuty dosažené výsledky práce a též jsou zde uvedena možná pokračování výzkumu.

2. Cíle práce

Hlavním cílem této práce je stanovit hydraulické parametry nově vznikajících půd pod zvolenými rozdílnými rekultivačními dřevinami (borovicí černou *Pinus nigra*, lípou malolistou *Tilia cordata* a modřínem opadavým *Larix decidua*) na Velké podkrušnohorské výsypce a vyhodnotit účinek použité rekultivační dřeviny na hydrologické vlastnosti těchto půd.

Díličními cíli práce jsou:

1. Provést kopané sondy pro stanovení mocnosti nadložního humusu rekultivované lesní půdy.
2. Stanovit vliv použité dřeviny na nasycenou hydraulickou vodivost a související hydrofyzikální půdní vlastnosti (objemovou hmotnost, vlhkost při odběru, pórovitost a retenční čáru) ve vrchní a spodní vrstvě půdy.
3. Výše uvedené půdní charakteristiky porovnat a vyhodnotit rozdíly mezi charakteristikami půd, které vznikají pod jednotlivými druhy vybraných rekultivačních dřevin.

3. Literární rešerše

3.1. Půda

Půdu lze popsat jako třífázový systém, který se skládá z pevné části, půdní vody a půdního vzduchu (Weil, Brady, 2016). Půda je ovlivňována okolním prostředím. Pokud tedy budeme zkoumat pouze část půdy bez kontextu s podmínkami jejího vzniku, tak přestává být půda půdou, ale stává se pouhou zeminou (Tomášek, 2007).

Definice půdy se liší od priority pozorovatele, také se zásadně vyvinula a koncepčně posunula v čase. Jeden z nejdůležitějších geologických pohledů na půdu podal geolog V.V.Dokučajev (1846-1903). Ten půdu považoval za „samostatný přírodně-historický útvar, který vzniká a vyvíjí se zákonitým procesem, jenž probíhá působením několika půdotvorných činitelů“ (Tomášek, 2007; Bičík et al., 2009; Rejšek, Vácha, 2018).

Půda vzniká na rozhraní atmosféry, biosféry, hydrosféry a litosféry. Děje se tak díky chemickým, fyzikálním a biologickým interakcím, ústících do specifické vertikální stavby a morfologie, která je dána minerálními sloučeninami, organickými látkami, vzduchem a vodou. Půda je jedinečným přírodním terestrickým útvarem se svým metabolismem. Ten je dán její biotou probíhající v produktech zvětrávání půdotvorného substrátu a dekompozicí odumřelé organické hmoty. Tenká část svrchní litosféry, která je oživena je označována jako pedosféra (Rejšek, Vácha, 2018).

Půdní úrodnost lze považovat za jednu z nejdůležitějších vlastností půdy. Je komplexním ukazatelem, který odráží jak fyzikální, fyzikálně - chemické a chemické vlastnosti půdy, tak i její vlastnosti biologické a biochemické. Úrodná půda by měla mít schopnost poskytovat rostlinám životní podmínky, které uspokojí jejich požadavky na živiny, vodu a půdní vzduch po celé jejich vegetační období a zajistí tak jejich úrodu (Jandák et al., 2010; Rejšek, Vácha, 2018). V dnešní době se ale dostávají do popředí i jiné vlastnosti půdy, a to zejména funkce hydrologická. Půda zadržuje vodu, čímž se stává jejím důležitým zásobníkem. Při změně klimatu, a čím dál častějšímu suchu, je tak tato funkce půdy velice důležitá. Opomenout ale nelze ani funkci krajinnotvornou, stabilizační a hygienickou (Tomášek, 2007).

3.2. Půdní voda

Půdní voda a její pohyb je jedním z nejdůležitějších činitelů, které určují půdotvorné procesy a transport látek. Půdní voda je veškerá voda vyskytující se v půdě v kapalném, pevném i plynném skupenství (kromě krystalické vody vázané v minerálech) (Smolíková, 1988; Pavlásek, Jačka, 2014).

Voda v kapalném skupenství má pro půdu největší význam, jelikož díky jejímu působení na půdní dynamiku probíhá celá řada biologických, fyzikálních i chemických pochodů. Většina půdní vody kapalného skupenství pochází z atmosférických srážek. Obsah vody v půdě je ovlivněn vlastnostmi substrátu, svažitostí terénu, reliéfem povrchu, množstvím a složením vegetace a působením člověka (Smolíková, 1988).

Půdní roztok je voda vyskytující se v pórech, které obsahují minerální a organické sloučeniny (Šimek, 2003). Voda, která se objevuje na povrchu půdních částic a je nepohyblivá a pevně svázaná, se nazývá voda hydrokopická. Z půdního vzduchu ji absorbují půdní částice. Množství vodních par, které je půda schopna zadržet při svém 100 % nasycení se označuje maximální hydrokopičností neboli číslem hygroskopicity (Šarapatka, 2014). Hlavními působícími silami, které působí mezi pevnou a kapalnou fází jsou síly adsorpční, kapilární a gravitační. Adsorpční síly jsou na povrchu a v blízké vzdálenosti od povrchu – adsorpční voda. Se vzdáleností od povrchu se tedy adsorpční síly snižují a na povrchu pevné fáze se vytváří polymikulární (vícevrstevná) adsorpční obálka. Čím blíže je voda k pevné fázi, tím pevněji je k pevné fázi poutána. Kapilární (meniskové síly) jsou zásadní pro poutání dostupné pohyblivé vody. Uplatňují se zejména v malých pórech (ekvivalentní průměr cca 1 μ až 1 mm). V půdě však nevzlíná voda pouze z hladiny podzemní vody (podepřená kapilární voda), ale vyskytuje se zde i tzv. zavěšená kapilární voda, která je nad hladinou podzemní vody. Voda v půdě tak díky ní může být držena i při povrchu. Gravitační síla působí vždy, a pokud působí dominantně, nazývá se tato voda volná či gravitační. Uplatňuje se zejména ve velkých pórech (ekvivalentní průměr nad 1 mm) (Kutílek et al., 2000; Pavlásek, Jačka, 2014). Gravitační voda při atmosférické srážce rychle odtéká z půdního profilu a dochází k odnosu živin a jiných nerozpuštěných a rozpuštěných látek, které jsou důležité pro rostliny (Pokorná, Zábranská, 2007).

Objem zadržované vody v půdě je obrovský a z hlediska objemu značně převyšuje množství vody ve všech vodních nádržích v ČR. Půda je zásobník vody, který v období sucha dokáže přijímat a akumulovat vodu při extrémních deštích a ovlivňuje tak velikost povodí. Bez přítomnosti vody ustává v půdě život. Voda je též transportní medium, jelikož pohyb živin a kontaminantů je vázán převážně na pohyb vody. Půdní voda je též nepostradatelná pro rostliny, zemědělskou výrobu a zároveň na ní navázanou živočišnou výrobu (Ács et al., 2008; Pavlásek, Jačka, 2014).

3.3. Diagnostické horizonty půdního profilu

Půdní profil se postupně vytváří z matečné horniny mechanickým, chemickým a biologickým zvětráváním či jejich kombinacemi. Chemické a biochemické výměny a translokace jejich produktů v půdním průřezu se vyznačují řadou zevně viditelných a snadno rozpoznatelných znaků. Jedním z těchto důležitých znaků je stratigrafie půdního profilu, která je dána počtem, mocností a utvářením půdních horizontů. U jednotlivých horizontů rozpoznáváme vždy mocnost, zrnitost, barvu, skladbu, soudržnost, obsah humusu a kongrecí, přičemž lze určit například i reakce půdy (pH) nebo obsah uhličitánů (Smolíková, 1988).

Taxonomický klasifikační systém půd České republiky dělí horizonty na (Němeček et al., 2008):

- Organické horizonty – O, T

Obsahují více než 20–30 % organických látek (hm.). Rozlišují se anhydrogenní horizonty nadložního humusu lesních půd (podstatné pro tuto práci, a proto jsou více rozebrány v kap. 3.3.1), hydrogenní horizonty nadložního humusu a rašelinné horizonty.

- Organominerální povrchové horizonty (epipedony) - A

Povrchové minerální horizonty s biogenní, případně antropickou akumulací humifikovaných organických látek menších než 20–30 % (hm). Specifické humusové látky tvoří vazby s minerálními koloidy, množství nerozložených organických látek je obvykle menší než 5 %.

- Podpovrchové horizonty – B, E, G

Nacházejí se pod zónou biogenní akumulace organických látek. Pokud obsahují zvýšený obsah organických látek jde o iluviované organické látky z nadložních horizontů.

- Přechodné horizonty

Zahrnují přechody mezi horizonty a odděleně existující partie horizontů.

- Fosilní a pohřbené horizonty – f

3.3.1 Anhydrogenní horizonty nadložního humusu

Na nezamokřených, propustných půdách se vyvíjí anhydrogenní horizonty, které se souhrnně označují O. V rámci tohoto horizontu se může vyvinout horizont opadanky L, horizont drti F a horizont měli H (Vavříček, Kučera, 2014).

Horizont opadanky je vytvářen relativně čerstvým rostlinným opadem bez známek patrného rozkladu, takže jeho původ je rozeznatelný. Rozlišovat lze horizont nové opadanky (Ln) a horizont změněné opadanky (Lv). Ln je tvořen čerstvým organickým materiálem (např. listím, jehličím, kůrou, větvičkami) nahromaděným obvykle v období kratším než 1 rok. Lv je tvořen starším opadem, ve kterém jsou již patrné známky rozkladu (biologické aktivity) (Vokoun et al., 2002; Vavříček, Kučera, 2014).

Horizont drti (fermentační) tvoří částečně rozložitelné organické zbytky, jejichž původ lze však pokaždé rozeznat. V F horizontu rozeznatelné zbytky převládají nad humifikovaným materiálem, jehož původ určit nelze, a který je zastoupen z 10-70 %. Lze rozlišovat mykogenní horizont drti (Fm), zoogenní horizont drti (Fz) a amfigenní horizont drti (Fa). V horizontu Fm převládá aktivita hub, v horizontu Fz dominuje půdní fauna. Amfigenní horizont Fa tvoří přechod mezi horizontem Fz a Fm (Vokoun et al., 2002; Vavříček, Kučera, 2014).

Pod fermentačním horizontem se vytváří humusový (humifikační) horizont H neboli měl. Má charakter vzhledově nediferencovaného amorfního tmavého materiálu, tvořeného produkty humifikace (tj. vlastními humusovými látkami). Materiál je obvykle ostře oddělen od povrchu minerální půdy. Rozeznává se humusový horizont měli (Hh), v němž zcela převládají hnědočerně až černě zbarvené amorfní částice. Zoogenní horizont měli (Hz), jenž je typický velkým množstvím drobných výměšků půdní fauny. A reziduální horizont měli (Hr), v němž převládají jemné amorfní částice a ve kterém jsou přítomny rozpoznatelné rostlinné zbytky (Vokoun et al., 2002; Vavříček, Kučera, 2014; Rejšek, Vácha, 2018).

3.3.2 Formy nadložního humusu

Specifičnost lesních půd je v přítomnosti humusu, což je jeden z nejdůležitějších faktorů, který podmiňuje jejich fyzikální, chemické a biochemické vlastnosti. Humusová forma je popisována podílem a mocností jednotlivých vrstev humusového profilu. Je definována rychlostí rozkladných procesů organické hmoty v závislosti na klimatických faktorech, skladbě nadzemní vegetace, vlhkosti půdy, množství půdních organismů, vlastnostech půdotvorného substrátu a přítomností antropických vlivů. Jednotlivé horizonty humusového profilu jsou tedy rozhodujícím charakterem, jenž je potřebný pro určení formy nadložního humusu (Vašíček et al., 2007; Vavříček, Kučera, 2014; Anonym, 2016).

Rozlišujeme tři základní humusové formy:

1. Mor

Tvoří se obvykle v humidních podmínkách, při nízkých průměrných ročních teplotách, na minerálně chudých půdách. Vznik je podmíněn silným hromaděním organických zbytků na půdním povrchu, pod rostlinnými společenstvy s vysokým poměrem C:N v jejich opadu, kdy se odehrávají notně omezené procesy mineralizace i humifikace organických zbytků (Frouz, 2018). Rozklad organické hmoty zajišťují zejména půdní houby (mikromycety) a plísně (Němeček et al., 2008; Vavříček, Kučera, 2014).

Chudé podloží s nedostatkem bází a jílu vede k zesilování horizontu moru. Obvykle se mor nachází pod bory a pod smrkovými a borovými monokulturami, a to i v nižších polohách. Omezená je i činnost zooedafonu, kdy se obvykle vyskytují jen roztoči a chvostokoci (Němeček et al., 2008).

Zpomalený rozklad organické hmoty se projevuje výrazným rozčleněním organického horizontu na zřetelně oddělené tři horizonty: L, F, H (kap. 3.3.1.). Typický mor je formován mocným horizontem opadanky L a mocným horizontem drti F. Horizont H je obvykle menší tloušťky než horizonty L, F. V horizontu opadanky L se někdy hromadí víceletý opad (Vavříček, Kučera, 2014; Rejšek, Vácha, 2018).

2. Mul

Humusová forma mul je nejvhodnější formou hromadění organické hmoty na půdním povrchu. Vzniká za velmi příznivých podmínek pro rozklad

a transformaci organických zbytků. A to zejména v mírném a teplém klimatu, pod listnatými či smíšenými porosty s bohatým keřovým a bylinným patrem (Němeček et al., 2008) a nízkém poměru C:N (Frouz, 2018). Půda musí být dobře zásobena živinami, s mírným vodním režimem a provzdušeností (Vokoun et al., 2002; Vavříček, Kučera, 2014).

Velmi rychlý rozklad organické hmoty, zde mimo bakterií a aktinomycet, zapříčiňuje zoofauna, zejména žížaly. Vlivem většího počtu zoofauny může v určitém ročním období vystupovat humózní horizont A až na povrch. Ve vrchní části humózního horizontu A se vlivem výměšků půdních živočichů může tvořit nápadná krupnatá až drobovitá struktura (Němeček et al., 2008; Vavříček, Kučera, 2014).

3. Moder

Moder tvoří přechod mezi morem a mulem. Obvykle se vyskytuje na lesních stanovištích za příznivějších podmínek. Horizont moderu je obvykle dobře vyvinutý. Tvořen je zčásti rozloženými rostlinnými zbytky, které mají nesoudržnou až kyprou strukturu. Značně se při rozkladu organické hmoty uplatňují houby, aktinomycety a půdní fauna (kromě žížal) (Vokoun et al., 2002; Němeček et al., 2008; Vavříček, Kučera, 2014).

V této humusové formě od sebe nelze jednoznačně oddělit horizonty opadu a drtě tak jako tomu bylo u moru. Zřetelná není ani hranice mezi horizontem měli H a minerálními částicemi (A-horizont) (Vokoun et al., 2002; Němeček et al., 2008; Vavříček, Kučera, 2014).

3.4. Výsypky

Výsypky jsou recentní útvary, které vznikají jako jeden z doprovodných jevů povrchové těžby nerostných surovin (Petránek et al., 2016). Jedná se o uložení horninového odpadu lomu či dolu (Šímová, 2004; Petránek et al., 2016). V krajině představují extrémní stanoviště s neproduktivním, nestabilním systémem s počínajícím stádiem vývoje. Je zde minimum organické hmoty, chybí biota, pedosféra je zdegradovaná a zničená (Vráblíková et al., 2009). Podle místa uložení se výsypky rozlišují na vnější a vnitřní. Vnitřní výsypka je objekt sypaných zemin a hornin umístěný uvnitř vytěžené části lomu, zatímco vnější výsypka je situována mimo těžební prostor lomu (Volný, 1985; Vráblíková et al., 2009).

Půdotvorný proces na výsypkách je ovlivňován mnoha faktory. Záleží na vlastnostech odpadu, rozvoji vegetace a reliéfu, charakteru klimatu a vodního režimu (Štýs et al., 1981). Tyto faktory se mohou projevit na vývoji půdy a produktivitě humózního horizontu (Jonáš, 1975). Humusová vrstva radikálně mění podmínky pro růst kořenů rostlin, ovlivňuje schopnost půdy zadržovat vodu a živiny a též mění životní podmínky pro ostatní půdní organismy (Li, Shao, 2006; Frouz, 2008; Salmon et al., 2008).

3.5. Rekultivace

Pojmem rekultivace lze popsat obnovení půdního fondu v oblastech narušených či úplně zničených člověkem (Štýs, Helešicová, 1992). Postižené území tedy chceme uvést do takového stavu, aby zde mohl fungovat autarkní ekosystém (Jonáš, 1975; Richards et al., 1993).

Principy rekultivace je možné rozdělit do úseků:

1. Přípravná fáze

Tato fáze je uskutečňována již během období přípravy a realizace těžby a má za cíl vyřešit právní vztahy, střety zájmů či posoudit vliv na životní prostředí. V podstatě jde hlavně o průzkumné, koncepční a projektové aktivity, které slouží jako podklad pro následující fázi rekultivačního cyklu (Šímová, 2004; Kvítek, 2006).

2. Důlně-technická fáze

Tato fáze má za úkol vytvořit vhodné podmínky pro zdařilé řešení rekultivací dalších fází. Úrodné, lehce zúrodnitelné a melioračně hodnotné nadložní substráty se selektivně odkládí. Výsypky se při jejich stavbě tvarují tak, aby byly co nejlépe přizpůsobeny určitému druhu rekultivace a optimálnímu využívání území (Šímová, 2004).

3. Bio-technická fáze

Biotechnická fáze je rozdělena na dvě skupiny opatření:

a) Opatření technické povahy

Jde především o úpravu terénu, kdy se zmírní sklony svahů a sníží terénní odlišnosti (terénní deprese se vyplní, elevace zlikvidují), tak aby se dbalo na správné odvodnění území (Šímová, 2004; Gremlica et al., 2011). V případě nezbytnosti se instalují přeložky inženýrských sítí (Sklenička, 2003). V podstatě se

provádí hydromeliorační, hydrotechnické a stabilizační úpravy. Dále dochází k navezení úrodných, potenciálně úrodných a melioračně hodnotných zemin. Do této etapy se zahrnuje i výstavba komunikací, kterými je rekultivované území opět zpřístupněno (Šímová, 2004; Kvítek, 2006).

b) Opatření biologické povahy

Opatření biologické povahy má za cíl dokončit proces zahlazování následků těžby. V případě rekultivace zemědělské jde o soubor účelových agrotechnických opatření, respektive o zakládání specializovaných kultur. U lesnické rekultivace se jedná o soubor lesnických prací, které jsou spojené se zakládáním kultur na zdevastované půdě (Štýs, 1990; Sklenička, 2003; Šímová, 2004; Kvítek, 2006).

4. Post-rekultivační fáze

Tato fáze pečování nastává v období po ukončení vlastní rekultivace a po zařazení rekultivovaných ploch do běžného obhospodařování. Rozhoduje o dlouhodobosti provedených opatření. Pozemky jsou odevzdány vlastníkovi či nástupní organizaci (Kvítek, 2006).

Rozlišujeme čtyři druhy finálního využití rekultivovaného území:

▪ Zemědělská rekultivace

Pro tuto rekultivaci je důležitá vhodně provedená technická rekultivace, zejména vhodná úprava náhorních rovin výsypek (max. 5 % sklon náhorní roviny) a vhodných půdotvorných substrátech, které zaručí příznivý vývoj půdy (Jonáš, Peroutková, 1997).

Zemědělská rekultivace zahrnuje zejména volbu osevního postupu, volbu rekultivačně vhodných plodin, organické a minerální hnojení a ochranu kultur (Jonáš, 1975). Pro tzv. zaktivování půdy je potřeba před výsevem kulturních plodin obvykle vysadit meliorační rostliny (např. hořčici bílou *Sinapis alba* či tolici vojtěšku *Medicago sativa*), které díky svým nízkým růstovým nárokům a skromné kořenové hmotě oživují nadzemními orgány rekultivované zeminy (Jůva et al., Praha).

Některé druhy biologické rekultivace je možné realizovat přímo bez navážky ornice, a to na relativně úrodných cyprisových jílech, které se nacházejí právě v sokolovském revíru. Tento rekultivační cyklus je zpravidla delší kvůli pomalejší aktivaci půdy a trvá přibližně 8 let, zatímco při použití ornice je agrocycklus přibližně o tři roky kratší (Frouz et al., 2007c).

- Lesnická rekultivace

Lesní porosty mají v našich zeměpisných podmínkách velmi pozitivní účinek na vlastní zalesněnou plochu i na své okolí. Les plní výborně několik funkcí, a to například funkci hygienickou, protierozní, stabilizační, klimatickou či rekreační. Na rozdíl od zemědělské rekultivace není potřeba taková kvalita stanoviště (Podhájský, Smolík, 1986). Lesy půdu zpevňují a udržují v ní vláhu, čímž přispívají k tvorbě přirozené zásobárny vody (Štýs, Helešicová, 1992). V období růstu stromů může docházet k problémům se zalesněním a nedostatečnou regulací eroze půdy a tím ke vzniku sedimentace. Tento problém obvykle trvá do té doby, než se dostatečně rozvine průměr koruny stromů a organická hmota se usadí (přibližně 5-10 let). Poté usazená organická hmota dopomáhá k ochraně půdy od erozních účinků dešťových kapek a tekoucí vody (Lyle, 1987).

Lesnickou rekultivaci lze rozdělit na dvě fáze. V první fázi, která trvá cca 1-3 roky se tvoří mechanická a chemická příprava půdy a na upravené plochy se zakládají sazenice (Gremlica et al., 2011). Důležitým faktorem, který má vliv na úspěch rekultivace, je příprava seťového lůžka, které se mění dle semen, klimatu půdy, času setby a přístupného vybavení (Lyle, 1987). V druhé fázi, trvající 6-8 let probíhá pěstební péče o vysazené stromy. Kultury je třeba hnojit, okopávat a chránit proti zvěři (Gremlica et al., 2011).

Častokrát při lesnických rekultivacích vznikají monokulturní celky. Tyto lesy jsou budovány s důrazem na ekonomický přínos. Ekologické a enviromentální funkce nově vznikajících lesů jsou víceméně opomíjeny. Zejména jsou tyto plochy osázeny borovicí lesní (*Pinus sylvestris*). Jinou variantou sadby mohou být původní ale i nepůvodní dřeviny, které jsou ale také osázeny jako monokultury. Příkladem původních dřevin je dub letní a zimní (*Quercus robur* a *petraea*), lípa malolistá (*Tilia cordata*), habr obecný (*Carpinus betulus*), modřín opadavý (*Larix decidua*), javor klen (*Acer pseudoplatanus*), smrk ztepilý (*Picea abies*), olše lepkavá (*Alnus glutinosa*) a nepůvodních borovice černá (*Pinus nigra*), javor jasanolistý (*Acer negundo*) a další (Gremlica et al., 2011).

V sokolovském revíru se pro osazení používají 2-3leté prostokořenné sazenice. Z listnatých stromů je to nejčastěji olše šedá (*Alnus incana*), javor klen (*Acer pseudoplatanus*) či jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior*) a z jehličnatých borovice lesní (*Pinus sylvestris*), smrk ztepilý (*Picea abies*) a modřín evropský (*Larix decidua*) (Frouz et al., 2007c). Druhy, které jsou zde vysazovány, musí splňovat

požadavky na některé ekologické atributy a to např. toleranci dřeviny ke klimatickým extrémům, dobrou růstovou kapacitu, odolnost vůči nepříznivým fyzikálním a hydrogeologickým vlastnostem půd a další (Dimitrovský, 1976; Kupka, Dimitrovský, 2011).

- Vodohospodářská rekultivace

Neboli hydrická rekultivace je založena na zatopení zbytkové jámy či velké deprese. Takto mohou vznikat rozsáhlejší jezera, která mohou být zdrojem užitkové ale i pitné vody. Tyto vodní plochy lze dělit na plochy s manipulačním rádem a bez něj a dále na plochy průtočné a neprůtočné. U větších vodních ploch, bez ohledu na jejich využití, vznikají problémy s asanací jejich svahů, které podléhají abrazi způsobenou energií vlnobití. Strmé svahy jsou podemílány nejvíce, a proto je třeba úhel sklonu svahů vhodně přizpůsobovat a vhodným způsobem asanovat. Nejčastěji se svahy asanují zalesněním, či ozeleněním s použitím vhodných travin a keřů, které jsou však stále v přímém kontaktu s vodou (Jonáš, Peroutková, 1997).

Menší vodní plochy se vytvářejí nebo vznikají spontánně a slouží zejména pro navrácení vodních ekosystémů do krajiny (Frouz et al., 2007c). Vytvořené vodní plochy, ať už malé či velké, mají vliv na základní hodnoty klimatických a mikroklimatických prvků nad hladinou a jejím okolím (Štýs et al., 1981). Pro zadržení erozních smyvů a regulace odtoku jsou budovány retenční nádrže, příkopy a drény (Gremlica et al., 2011).

- Ostatní rekultivace

Specifické jsou tyto rekultivace zejména svým funkčním využitím. Mají za úkol obnovu funkčních prvků v krajině, obnovu krajinného rázu a podporu vzniku biodiverzity v blízkosti obcí a měst. Vznikají plochy zeleně s rekreační a estetickou funkcí (např. parky) (Leitgeb, 2010; Gremlica et al., 2011), výzkumné plochy či autodromy.

Rekultivace je proces dlouhodobý, který se mění v čase a vyvíjí se se změnou technologického postupu těžby nerostných surovin, ale i s vývojem nových vědecko-výzkumných poznatků v oboru rekultivací. Cílem rekultivace je vytvořit krajinu, která bude znovu plně sloužit prvoproducti zemědělské, vodohospodářské, lesnické ale i rekreační. Rekultivační opatření musí brát ohled

nejen na produkční zájmy, ale i na ekologické a mimoprodukční funkce krajiny (Špiřík, 1994).

3.6. Sukcese na výsypkách

Ekologická sukcese je proces, který vede k dlouhodobým samovolně nevratným změnám ve struktuře společenstev a ekosystému. Dochází k výměně druhů nebo celých společenstev (Prach, 1996). Lze ji také definovat jako nesezonní, směřovaný a spojitý proces kolonizace a zániku populací jednotlivých druhů v konkrétním místě (Begon et al., 1997).

Ke spontánní sukcesi na výsypkách dochází přirozeně. Avšak, pokud je v půdě málo organické hmoty, je spontánní sukcese pomalejší, ve srovnání s půdou, kde je organické hmoty dostatek. Při spontánní sukcesi jsou semena dispergována z ostatních ekosystémů. Ze začátku vyrůstají obvykle pionýrské dřeviny, které svými kořeny působí na půdu. Kořeny při svém prorůstání působí tlakem na půdu, tím se vytvářejí póry nebo naopak vznikají shluky půdních částic (Frouz et al., 2005). V další fázi se pak začínají uchyťovat semena i vyšších dominantních dřevin jako je například bříza bělokorá (*Betula pendula*), vrba jíva (*Salix caprea*) a topol osika (*Populus tremula*) (Nyssen et al., 2010).

S přibývajícím vegetací se postupně zvyšuje aktivita kořenů a přibývá i množství opadu ze stromů, což vede k rozvoji půdní fauny a mikroflóry. Činností žížal, které ze začátku žijí v opadu, vzniká humusová vrstva. Tím se výrazně mění podmínky pro růst kořenů rostlin i schopnost v půdě zadržovat vodu a živiny. To, jak se bude půda vyvíjet záleží velmi na druhu stromu a vlastnostech opadu (C:N poměr, obsah různých chemických látek, rozložitelnost atd.) (Salmon et al., 2008; Frouz et al., 2008).

Nejen v sokolovském revíru vykazují spontánní zarostlé části výsypek vyšší biodiverzitu než výsypky lesnicky rekultivované. Výjimkou jsou pouze některé skupiny půdních bezobratlých, které potřebují větší přísun listového opadu (Frouz et al., 2008). Výsypky jsou pro řadu organismů velice atraktivní. Důvodů, proč se zde některé ohrožené a chráněné druhy vyskytují, je několik. Může se jednat o druhy, které jsou specializované na inerciální stadia sukcese nebo druhy, které se objevují na různých specifických stanovištích, jako například xerothermní louky či slaniska (Frouz et al., 2007c).

3.7. Popis vybraných fyzikálních vlastností půdy

3.7.1 Nasyčená hydraulická vodivost

Nasyčená hydraulická vodivost (K_s) je definována Darcyho rovnicí. V základních jednotkách SI má rozměr $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Jačka, Pavlásek, 2014). Popisuje, jak porézní proudění umožňuje proudění kapaliny (Pokorná, Záborská, 2007). Její velikost závisí na charakteru prostředí (zakřivení, objemu, velikosti pórů) stejně jako na vlastnostech proudící kapaliny (na teplotě, chemickém složení). V izotropním prostředí lze K_s definovat jako makroskopickou rychlost proudění při jednotkovém hydraulickém gradientu. V některých případech se může K_s lišit v závislosti na směru proudění a může tak mít anizotropní charakter (např. proudění vody v sedimentech s orientací delší strany sedimentujících částic horizontálně). Mnohdy je termín nasycená hydraulická vodivost chybně zaměňován s termíny propustnost, filtrační koeficient či Darcyho koeficient (Jačka, Pavlásek, 2014).

Nasyčená hydraulická vodivost lze vyjádřit vztahem:

$$K_s = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu}, \quad (1)$$

kde K_s je nasycená hydraulická vodivost, k je propustnost půdy, ρ je hustota kapaliny, μ je viskozita kapaliny, g je gravitační zrychlení (Valentová, 1994). Hodnota K_s je tedy určena jak vlastnostmi porézního prostředí (půdních pórů popsaných propustností), tak vlastnostmi kapaliny (Kutílek, Nielsen, 1994).

Znalost K_s je zásadní pro modelování pohybu vody a transportních procesů rozpuštěných látek v půdě. Nasyčená hydraulická vodivost je také důležitým podkladem při návrhu odvodnění, závlah, sypaných hrází vodních děl a mnoha dalších inženýrských staveb (Jačka, Pavlásek, 2014).

Metody stanovení nasycené hydraulické vodivosti lze rozdělit na metody přímé a nepřímé. Metody přímé (měření na základě Darcyho pokusu) můžeme dále dělit na metody laboratorní a terénní (Kutílek et al., 2000). Terénní měření však nevychází přímo z Darcyho rovnice, ale obsahuje různá zjednodušení a aproximace (Elrick et al., 1987).

Pro stanovení K_s v laboratoři se používají neporušené půdní vzorky obvykle o velikosti 4-20 cm. Vzorky jsou měřené v laboratorních permeametrech či podobných aparaturách s proměnným nebo konstantním spádem. Nevýhodami

těchto měření jsou například velikosti vzorků (Kutílek, et al., 2000), možné vyplavování suspendovaných materiálů (Reynolds et al., 2002) či přítomnost preferenčních cest (např. podél stěny válečku či v díře po žížale) (Jačka, Pavlásek, 2014). Tyto a jiné nevýhody mohou vést ke zkreslování výsledků.

Terénní metody lze dělit na metody nad hladinou a pod hladinou podzemní vody (Jačka, Pavlásek, 2014). Pokud není v profilu přítomná hladina podzemní vody, lze hodnotu K_s určit např. infiltračním pokusem, Guelphským permeametrem (viz níže) (Pokorná, Zábranská, 2007) nebo válcovým infiltrometrem (Jačka, Pavlásek, 2014). Při měření K_s , kdy je hladina podzemní vody v měřeném půdním profilu, lze využít jednosondové či piezometrické metody (Kutílek, Nielsen, 1994). V hydrogeologii se využívá většinou metoda čerpacího pokusu (Pokorná, Zábranská, 2007).

Nasycená hydraulická vodivost patří mezi půdní vlastnosti, které jsou obtížně měřitelné, a proto se její hodnoty do výpočtů odhadují často nepřímou metodou. Tedy metodou, kdy se pro půdy nejprve změří snadněji zjiřitelná charakteristika (např. zrnitost, objemová hmotnost atd.) a teprve poté, se v databázi dříve naměřených půdních vlastností najde nejbližší hodnota K_s . Tyto metody, které se často označují jako pedotransferové funkce však slouží pouze jako přibližný odhad. Lepší výsledky odhadu jsou dosahovány u texturálně lehkých půd. Víceméně nepoužitelné jsou tyto metody pro půdy středně těžké a těžké. Obzvláště pokud jde o půdy v našich podmínkách, kdy jsou zvrstvené a mají heterogenní půdní profil (Kutílek et al., 2000). Pro přibližné odhady K_s pro různé druhy zeminy (různou zrnitost půdy) lze použít databázi dříve naměřených půdních charakteristik, které jsou uvedeny v Tab.1. Nevýhodou této databáze je zejména absence údajů týkající se vegetačního pokryvu, množství organické hmoty a půdní struktury (Jačka, Pavlásek, 2014).

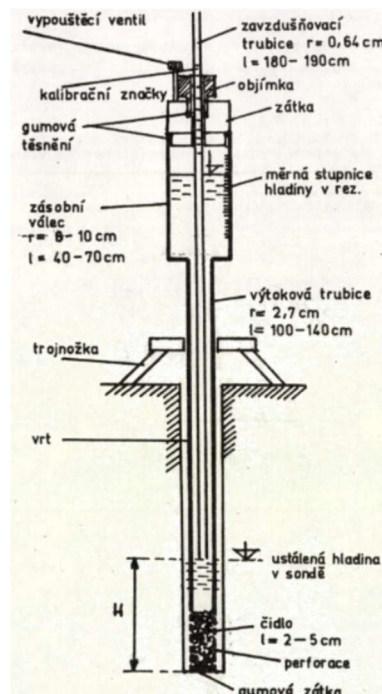
Tab. 1 Orientační hodnoty nasycené hydraulické vodivosti (převzato z Valentová, 1994).

Druh zeminy	Hodnota K_s [$m \cdot s^{-1}$]
Jíl	$<1 \cdot 10^{-8}$
Písčítá hlína	$<1 \cdot 10^{-6}$
Hlinitý písek ulehlý	$(1-5) \cdot 10^{-6}$
Písek s příměsí jílu	$(1-2) \cdot 10^{-6}$
Hlinitý a jemný písek	$(1-5) \cdot 10^{-5}$
Hrubozrnný písek	$(1-5) \cdot 10^{-4}$
Štěrkopísek	$(2-10) \cdot 10^{-4}$
Štěrka	$(1-5) \cdot 10^{-3}$

Výběr vhodné metody je zásadní pro získání reprezentativních dat, jelikož každá metoda má své výhody i nevýhody. Výběr vhodné metody probíhá na základě finančních a časových možností, dostupnosti lokality a vody a též požadované přesnosti měření (Jačka et al., 2014).

Pro měření infiltrace ve vrtu se využívá Guelphský permeametr (Kutílek et al., 2000). Funguje na principu Mariottovy láhve ¹ (Reynolds, Elrick, 1984), měří tedy infiltraci dnem a stěnami vrtu (Jačka, Pavlásek, 2014). Funkčnost permeamtru je ověřena pro vrty o průměru 4-10 cm a hloubce sondy do 1 m. Měří se ve vrtané nepažené sondě o daném poloměru za nepřítomnosti hladiny podzemní vody. Zajišťuje se konstantní tlaková výška a sleduje se ustálená hodnota průtoku (Matula et al., 1989).

Vnitřní trubice zajišťuje přívod vzduchu a jejím posunem v těsnícím kroužku se nastavuje velikost přetlaku. Vnější trubice slouží k přítoku vody do sondy. Tato trubice má rozšířenou horní část, která slouží jako zásobník vody a spodní část, která je perforovaná a umísťuje se na dno vrtu (Matula et al., 1989). Schéma Guelphského permeamtru je zobrazeno na Obr.1. Podrobný popis je uveden v manuálu od výrobce (Eijkelkamp, 2011).



Obr. 1 Schéma Guelphského permeamtru (převzato z Matula, et. al. 1989).

¹ Marriotova láhev zaručuje vytékání kapaliny z lahve pod stálým přetlakem (Jačka, Pavlásek, 2014).

Mezi hlavní výhody měření nasycené hydraulické vodivosti Guelphským permeametrem, na rozdíl od ostatních metod patří časová nenáročnost, snadné zacházení s přístrojem, možnost obsluhy pouze jednou osobou a malé množství vody potřebné k měření (Reynolds, Elrick, 1984). Další výhodou je například i možnost využití permeamtru k měření K_s na pomalu propustných půdách (Elrick et al., 1987).

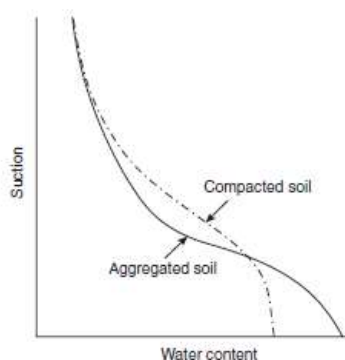
Nevýhodami tohoto způsobu měření je například riziko možného podhodnocení získaných dat vlivem zhutnění půdy a zanesení pórů stěn vrtu a dně vrtu při vrtání jemnými částicemi. Dalším možným problémem je propad permeamtru do dna vrtu a změna tvaru vrtu během měření (Bagarello, 1997). Pokud se navíc jedná o nesoudržný materiál (např. hrubozrnné písky) může dojít k úplnému zborcení či porušení vrtu a tím k nemožnosti provést měření v terénu (Reynolds, Lewis, 2012).

(Bagarello, 1997) zjistil, že při použití vložky drátěného síta do vrtu a ostré kovové tyče lze eliminovat výše popsané problémy. Došel však k závěru, že výsledné hodnoty měření nasycené hydraulické vodivosti při využití vložky drátěného síta a ostré kovové tyče nejsou natolik odlišné od výsledků bez jejich využití. Nicméně jejich využití je vhodné například pokud chceme vylepšit reprezentativnost odhadů (střední hodnoty a rozptylu).

3.7.2 Retenční čára půdní vlhkosti

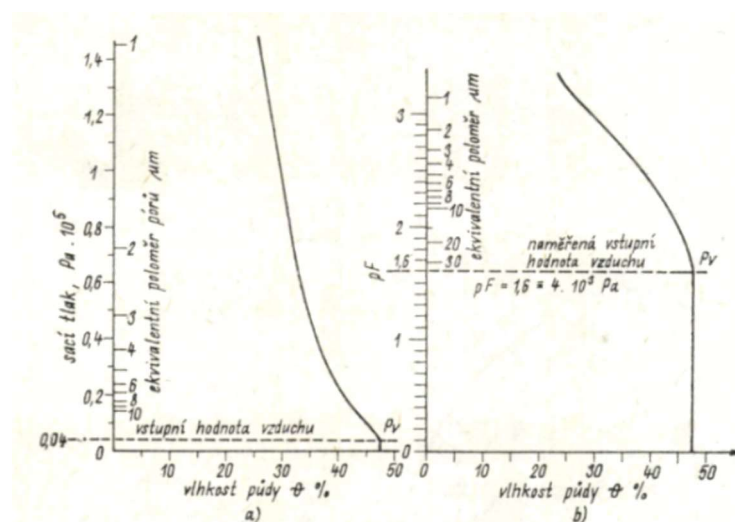
Mezi kapalnou a plynou fází působí přitažlivé síly, které mají za schopnost zadržovat vodu v půdě navzdory gravitaci, výparu či čerpaní vody kořeny rostlin. Výsledkem působení těchto sil je retence vody (Anderson et al., 1996).

Retenční čára půdní vlhkosti určuje schopnost půdy zadržovat vodu. Je to graficky zobrazený vztah mezi vlhkostí půdy a vlhkostním potenciálem (sacím tlakem, popřípadě tlakovou výškou). Průběh retenční čáry je závislý na obsahu humusu, objemové hmotnosti, mineralogickém a zrnitostním složení, výměnných kationtech a též na struktuře (Pokorná, Záborská, 2007). Struktura půdy značně ovlivňuje tvar (průběh) retenční křivky. Pokud je půda sypká a písčitá, je křivka strmější. V případě půdy s větším obsahem jílu je křivka pozvolnější. Vliv struktury půdy na tvar retenční čáry v závislosti na druhu půdy je znázorněn na Obr. 2 (Hillel, 1998). Retenční čáru je možné laboratorně změřit nebo odhadnout pomocí pedotrasferových funkcí. Avšak z důvodu velkého množství parametrů, na kterých je křivka závislá, může být odhad nepřesný (Saxton, Rawls, 2006).



Obr. 2 Vliv struktury půdy na zadržování vody v půdě (převzato z Hillel, 1998).

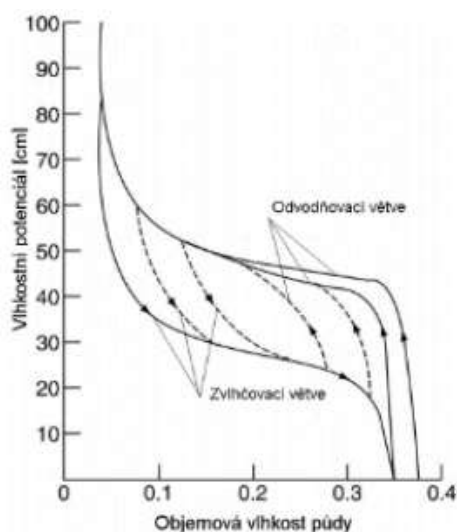
V případě větších rozsahu vlhkostních potenciálů zobrazujeme graf v semilogaritmickém měřítku. V měřítku logaritmickém se obvykle vlhkostní potenciál vynáší jako hodnoty pF. Při malém rozsahu sacího tlaku (např. 0–200 cm tlakové výšky) je vhodnější použít graf v lineárním měřítku. Pokud bude rozsah sacího tlaku větší (0 - 10^5 Pa a více) bude lepší použít zobrazení semilogaritmické. Retenční čára je proto často označována jako pF čára (Kutílek et al., 2000). Na Obr. 3 je vidět zobrazení křivky v měřítku lineárním a semilogaritmickém.



Obr. 3 Retenční čára půdní vlhkosti, a) v lineárním měřítku, b) semilogaritmickém měřítku jako pF křivka (převzato z Kutílek, et al., 2000).

Vlhkostní potenciál nabývá odlišných hodnot v závislosti na historii plnění a prázdnění pórů (Kutílek, 1978). Tento jev se označuje jako hystereze retenční čáry a způsobuje ho několik činitelů. Jsou to zejména proměnlivost průřezu pórů, rozdílné hodnoty smáčecího úhlu zvlhčeného a suchého povrchu a vzduch uzavřený ve „slepých“ v pórech. Postupným zvlhčováním, respektive zvyšováním vlhkostního potenciálu (snižováním sacího tlaku) tedy nezískáme stejnou čáru jako

při postupném vysoušení nasycené půdy, tedy postupným snižováním vlhkovního potenciálu (zvyšováním sacího tlaku) (Pokorná, Zábranská, 2007). Na Obr. 4 je vidět hystereze retenční čáry písku.



Obr. 4 Hystereze retenční čáry písku (převzato z Jačka, Pavlásek, 2014).

Pro určení retenční čáry půdní vlhkosti se používá mnoho laboratorních a terénních metod, viz Tab.2.

Tab.2 Metody stanovení retenční křivky (převzato z Stoklásková, 2012).

Stanovení retenční křivky půdní vlhkosti	
Laboratorní metody	Terénní měření
Podtlakové přístroje: - Pískový tank	Čidla na měření vlhkosti: - TDR senzory
Přetlakové přístroje	- neuronové a kapacitní sondy
Kombinace přetlaku a podtlaku: - Tempská cela	Čidla na měření tlakové výšky: - Tenzometr s rtuťovým manometrem

Pro laboratorní stanovení retenční čáry půdní vlhkosti se využívají podtlakové a přetlakové přístroje nebo jejich kombinace. Do podtlakových přístrojů lze například zařadit pískový či jílový tank. Tento přístroj se skládá z kontejneru, který je vyplněn dvěma vrstvami písku (popřípadě jílu a písku) a na jehož dně je otvor, který je spojen hadičkou s nádobou na vodu (Kodešová, et al., 2015). Pískový tank slouží zejména ke stanovení odvodňovací větve a měří v rozsahu 0 až -100 cm tlakové výšky (písko-kaolínový tank až do - 500 cm) (Hnatajková, 2016).

Do přetlakových přístrojů řadíme přetlakový aparát. Tento přístroj se skládá z tlakové nádoby, kompresoru, manometru, polopropustné keramické membrány, regulátoru tlaku, byrety a hadičky. Nádoba je spojena s kompresorem a pomocí regulátoru tlaku a manometru je nastavován přetlak vzduchu. Membrána, která je umístěna uvnitř přetlakové nádoby je spojena s hadičkou a byretou. Celý prostor mezi nasycenou membránou a hladinou vody v byretě je vyplněn vodou (FAPPZ, ©2015). Stejně jako u podtlakových přístrojů, tak i u přetlakových přístrojů lze body retenční čáry zjistit z objemové hmotnosti a příslušných hodnot tlaků (Čermák, 2012). Přetlakové přístroje umožňují měřit od 0 do 15 barů (přibližně -15 000 cm tlakové výšky) v závislosti na použité keramické membráně (Hnatajková, 2016).

Pokud je potřeba stanovit retenční křivku v celém rozsahu vlhkosti, používá se obvykle kombinace pískového tanku a přetlakového aparátu nebo se využije univerzální přístroj Tempská cela, která funguje na podtlak i přetlak. Důležitou součástí Tempské cely je keramická destička, která je nasycená. Prostor mezi destičkou a hladinou vody v byretě je zcela vyplněn vodou. Polohou byrety pod úrovní destičky nebo pomocí zdroje přetlaku vzduchu je nastavována tlaková výška vody. Body retenčních čar jsou dány objemovými vlhkostmi půdních vzorků zjištěných bilancí přitekého/odtekého objemu vody do/z byrety a odpovídajícími tlakovými výškami, které jsou dány hodnotou podtlaku vody či přetlaku vzduchu (Kodešová, 2005).

Test kapilárního vztlínání je další metodou stanovení bodů retenčních křivek. Tento test má, ale značná omezení. Vzorky půdy jsou porušené, tudíž je tato metoda vhodná pouze pro písčité nestrukturní materiály (Kodešová, 2005).

Pro stanovení retenčních čar půdních vlhkostí v terénu lze využít přístroje, které mají v daných hloubkách umístěna čidla na měření vlhkosti (TDR senzory, kapacitní sonda, neutronová sonda apod.) a čidla na měření tlakové výšky (tenzometry).

Tenzometr umožňuje měřit tlaky pod hodnoty 1 atm (přibližně 1 bar). Většina půd je zaměřena na udržení nízkých sacích podmínek, které jsou pro růst rostlin nejvhodnější. Z tohoto důvodu jsou tenzometry k měření tlakové výšky dostačující (Hillel, 2004).

3.7.3 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost (ρ_d), je hmotnost objemové jednotky vysušené půdy v přirozeném uložení (Pokorná, Zábranská, 2007). Občas je označována též jako hustota vysušené půdy. Určuje se jako podíl hmotnosti vysušené zeminy a jejího původního objemu v rostlém stavu, tj. objemová hmotnost redukována. Nebo jako podíl hmotnosti zeminy a jejího objemu stanovených v okamžiku odběru vzorku, tj. objemová hmotnost neredukovaná. Tato neredukovaná objemová hmotnost je v závislosti na okamžité vlhkosti půdy proměnná. Proto je vhodné stanovovat redukovanou objemovou hmotnost (vztaženou na sušinu), poněvadž popisuje stálé vlastnosti půdy (Kameníčková, 2013).

Z neporušeného půdního vzorku odebraného do kovového válečku známého objemu (obvykle Kopeckého váleček o objemu 100 cm³) lze zjišťovat objemovou redukovanou hmotnost (dále již jen objemovou hmotnost) (Pokorná, Zábranská, 2007). V případě např. skeletovité půdy, kdy nelze odebrat neporušený vzorek do válečku, je možné odebrat vzorek z původně zarovnaného povrchu. Vzniklou prohlubeň pak zaplnit stejnozrnným pískem o známe objemové hmotnosti a pomocí toho následně zjistit objem vzorku. Po odběru se ze vzorku odstraní voda (vysušením) a zváží se. Hmotnost takto upraveného půdního vzorku je rovna hmotnosti pevného podílu v půdním vzorku (hmotnost vzduchu ve vzorku je zanedbatelná (Pavlásek, Jačka, 2014). Vzorce pro výpočet lze popsat následovně:

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

kde ρ_s je objemová hustota, m_M je hmotnost pevné fáze a V_s je celkový objem půdního vzorku (Pavlásek, Jačka, 2014).

Objemová hmotnost dosahuje hodnot ve velmi širokém rozmezí (Pokorná, Zábranská, 2007). U anorganogenních půd se obvykle hodnoty pohybují v rozmezí do 1200 kg.m⁻³ pro jílovité půdy a do 1800 kg.m⁻³ pro písčité půdy s nízkým obsahem organických látek. Zvýšený obsah organických látek snižuje objemovou hmotnost půdy. Objemová hmotnost vysušené půdy může v případě organogenních půd dosáhnout hodnot až 200 kg.m⁻³ u rašelin s minimálním obsahem minerálních látek (Pavlásek, Jačka, 2014).

Proměnlivost objemové hmotnosti je značná. Mění se s ulehlostí půdy, aktivitou organismů, charakterem, rozvojem vegetace a jejího kořenového systému dále také s vlhkostí a následnými objemovými změnami půd, změnou teplot kolem bodu mrazu apod. (Pavlásek, Jačka, 2014). Z důvodu těchto proměnlivých parametrů není možné charakterizovat větší územní celek jedinou hodnotou objemové hmotnosti, neměřenou v čase a prostoru (Pokorná, Zábranská, 2007). Je tedy nutné ji stanovit pro každé jednotlivé stavy půdy, roční období, fáze vývoje vegetace atd.. Měla by také být stanovena při každém měření hydrofyzikálních vlastností půd (Pavlásek, Jačka, 2014).

3.7.4 Půdní pórovitost

Pórovitost půdy (též označována jako celková pórovitost), je základní charakteristikou kvantity pórů z hlediska jejich objemu. Udává poměr objemu půdních pórů k objemu půdy. Pórovitost v třífázovém systému lze zjednodušeně definovat jako poměr součtu objemů kapalné a plynné fáze půdního vzorku ku součtu objemů kapalné, pevné a plynné fáze v půdním vzorku:

$$\frac{V_W + V_A}{V_W + V_A + V_M} = \frac{V_P}{V_S} = P, \quad (3)$$

kde P je pórovitost, V_W je objem kapalné fáze, V_A je objem plynné fáze, V_M je objem pevné fáze, V_P je objem půdních pórů a V_S celkový objem vzorku (Pavlásek, Jačka, 2014).

Pro popis pohybu půdní vody, půdního vzduchu, migraci látek a dalších procesů probíhajících v půdě je zásadní celkový objem, velikost, tvar a umístění pórů včetně jejich prostorové variability (Pokorná, Zábranská, 2007). Půdní póry mají rozličné tvary i rozměry. Často jsou vzájemně propojené – spojitě. Pro jejich popis se používá zjednodušení, které vychází z předpokladu, že póry jsou válcového tvaru a lze je tedy popsat ekvivalentním průměrem či poloměrem. Pórovitost tedy nepřímo popisuje, jakou část zabírají pevné půdní částičky v půdním vzorku (Pavlásek, Jačka, 2014).

Pórovitost obvykle nestanovujeme na základě poměru objemů jednotlivých fází, ale určujeme ji na základě hodnoty hustoty půdy a zdánlivé hustoty půdních částiček či pomocí čísla pórovitosti (Pokorná, Zábranská, 2007). Výběr způsobu výpočtu závisí na objemových změnách půdy v podmíněnosti na vlhkosti.

Pro objemově stálou půdu lze vycházet z následujícího vzorce:

$$\frac{\rho_M - \rho_s}{\rho_M} = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_M} = P, \quad (4)$$

kde ρ_M je zdánlivá hustota půdních částic a ρ_s je hustota půdního vzorku. Pokud jsou u půdy výrazné objemové změny v závislosti na vlhkosti je nutné před samotným výpočtem pórovitosti ještě stanovit tzv. číslo pórovitosti, které lze vypočítat například ze vzorce:

$$e = \frac{\rho_M - \rho_s}{\rho_s}, \quad (5)$$

kde e je číslo pórovitosti. Z převodního vztahu (6) pak lze již snadno stanovit hodnotu pórovitosti (Pavlásek, Jačka, 2014).

$$P = \frac{e}{1 + e} \quad \text{či} \quad e = \frac{P}{1 - P} \quad (6)$$

Z fyzikálních vlastností půdy ovlivňuje hustotu půdy právě pórovitost (což je zřejmé z rovnice (4)). Pórovitost nemá konstantní hodnotu. Je závislá na sezónních i krátkodobých změnách. Změny sezónní jsou podmíněny aktivitou organismů, intenzitou růstu rostlin či změnou teploty. Krátkodobé změny nejvíce ovlivňuje změna vlhkosti půdy a následné smršťování či bobtnání půdy v závislosti na srážkách, rozptylu denních teplot, činnosti člověka apod. (Pavlásek, Jačka, 2014). Nižší stupeň agregace a tlak nadloží zapříčiňuje obecně nižší hodnoty pórovitosti v hlubších horizontech. Se vzrůstajícím obsahem organické hmoty, která se většinou nachází ve vrchních částech půdního horizontu a kvalitou struktury naopak dochází ke vzrůstající pórovitosti. S hloubkou se vliv zrnitosti na pórovitost zmenšuje (Němeček et al., 1990; Pavlásek, Jačka, 2014). Celková pórovitost půdy vykazuje široký rozsah (Tab.3). U glejových horizontů může klesnout hodnota pórovitosti i pod 30 %. U organogenních půd (např. rašeliny) hodnota pórovitosti často překročí i 90 %.

Tab. 3 Rozdělení půdních pórů podle velikosti a jejich typický objem a celková pórovitost v lehké, střední a těžké minerální půdě (převzato z Rowell, 1994).

Druh pórů	Velikost (μm)	Lehká půda (% obj.)	Střední půda (% obj.)	Těžká půda (% obj.)
makropóry	nad 50	20-30	10-15	5-15
zásobní mikropóry	0,2-50	5-15	20-25	15-20
reziduální mikropóry	pod 0,2	5-10	15-20	25-35
pórovitost	—	35-45	45-55	50-70

3.7.5 Vlhkost půdy

Vlhkost půdy neboli půdní vlhkost značí množství vody v půdě. Pokud je množství vody vztažené k jednotkové hmotnosti, pak je tato vlhkost označována jako vlhkost hmotnostní. Pokud je však vztažena k jednotkovému objemu, pak se označuje jako vlhkost objemová (Kutílek, 1984).

Hmotnostní vlhkost w lze spočítat ze vzorce:

$$w = \frac{m_w}{m_M}, \quad (7)$$

kde m_w je hmotnost vody a m_M je hmotnost pevné fáze půdního vzorku. Hmotnost m_M se určuje z hmotnosti vysušeného půdního vzorku. Sušení vzorku probíhá při zvýšené teplotě, kdy je třeba odstranit pouze vodu nikoli části organické hmoty či minerálů, které tvoří půdní hmotu. U hmotnostní vlhkosti se nemění hmotnost pevné fáze půdního vzorku (Pavlásek, Jačka, 2014).

Objemová vlhkost θ půdy lze spočítat ze vzorce:

$$\theta = \frac{V_w}{V_s}, \quad (8)$$

kde V_w je objem vody ve vzorku a V_s je celkový objem vzorku. Množství vody v půdě vyjádřené hmotnostní vlhkostí je z fyzikálního pohledu přesnější, avšak pokud je třeba vypočítat celkové množství vody v pórovitém materiálu či je třeba určit stupeň zaplnění pórů, dává se přednost vlhkosti objemové. U objemové hmotnosti je třeba brát na zřetel objemovou nestálost zemin (smršťování či bobtnání), jelikož je mimo jiné závislá i na samotné vlhkosti. K vyjádření obsahu vody v půdním vzorku se pro tento případ využívá čísla vlhkosti (poměr objemu vody ku objemu pevné fáze v půdním vzorku). Maximální hodnota čísla vlhkosti se rovná hodnotě čísla pórovitosti, popř. maximální hodnota objemové vlhkosti půdy se rovná pórovitosti půdy (Pavlásek, Jačka, 2014; Kutílek et al., 2000).

Voda, jenž je obsažená v půdních pórech není pokaždé stejně dostupná nebo pohyblivá. Dostupnost vody pro rostliny a pohyblivost vody v půdním prostředí záleží na mnoha parametrech. Ovlivněná je například vlastnostmi půdních částic a jejich povrchu (velikost povrchu půdních útvarů, náboj povrchu apod.), charakterem půdních pórů (tvar, průměr, zakřivení apod.) i vlastnostmi samotné půdní vody (teploty apod.). Proto nelze říct, že je vlhkost půdy přímým ukazatelem

dostupnosti a pohyblivost vody. Je pouze vyjádřením celkového obsahu vody v půdním vzorku (Pavlásek, Jačka, 2014).

Proměnlivost množství vody v půdě závisí, kromě samotných vlastností půdy, také na klimatických, hydrologických a pedologických faktorech, na typu vegetace a jejích vlastností na stanovišti (druhové složení, věk, stav kořenového systému) (Pavlásek, Jačka, 2014). Rostliny nezaznamenávají vlhkosti v půdě, ale spíše reagují na tlak. Ten udržuje vlhkost v částicích půdy, což značí množství dostupné vláhy potřebné pro rostlinu. Rostlina obtížněji získává vodu z půdy, pokud je půda sušší (rostoucí tlak). V různých půdách a za různých tlaků bude tedy různé množství dosažitelné vláhy (Cejpek, 2011).

3.7.6 Struktura půdy

Pojem půdní struktura souhrnně označuje prostorové uspořádání půdních částic, které se v přírodě vyskytují jen výjimečně jako navzájem oddělené celky. Obvykle se půdní částice nacházejí ve shlucích (částičky různých zrnitostních kategorií) - agregátech. Půdní agregáty lze dle velikosti rozdělit na mikroagregáty (agregáty menší než 0,25 mm) a makroagregáty (agregáty větší než 0,25 mm) (Pokorná, Zábranská, 2007; Pavlásek, Jačka, 2014).

Vznik shluků může probíhat již v půdotvorném substrátu či při zvětrávání matečné horniny za podmínky přítomnosti koloidů. Koloidy jsou půdní částice s malou zrnitostí, ale s velkou plochou povrchu. Vyznačují se elektrickým nábojem, díky němuž dochází k poutání těchto částic. Amorfní látky, které pokrývají povrch půdních částic a vyplňují prostor mezi nimi způsobují to, že dochází k poutání frakce nejmenší zrnitosti s větší frakcí, která však už nevykazuje koloidní vlastnosti (Pavlásek, Jačka, 2014).

Mikroagregáty jsou velice důležité pro vznik půdní struktury. Pokud dojde k jejich rozrušení dojde i ke ztrátě půdní struktury. Mikroagregáty jsou tvořeny zejména zkoagulovanými půdními koloidy, útvary vzniklým spojením prachových a jílových částiček, mnohdy za přispění gelů a hrubými půdními částičkami. Důležité jsou i organické látky, které vznikají při procesu humifikace. Humusové látky vážou více minerálních částic do jednoho celku a spojují tak mikroagregáty do makroagregátů. Organické látky jsou v půdě nestabilní. Aby tak byla půdní struktura kvalitní, musí docházet k jejich doplňování. Pokud se v půdě vyskytují organické látky v různém stupni humifikace, tvoří dobré podmínky pro agregaci půdních částiček. Makroagregaci ovlivňují, kromě již výše zmíněného, objemové

změny, působení mrazu, kořenový systém, mechanické obdělávání a půdní fauna. Nejpevnější vazby vznikají u jílových minerálů (např. montmorillonitu), a naopak u půd, které tvoří převážně větší částičky (např. štěrk, písek) dochází k tvorbě půdní struktury zcela ojediněle (Pavlásek, Jačka, 2014; Kutílek, 1978).

Stabilita půdních agregátů je významnou půdní vlastností ovlivňující její udržitelnost a rostlinou produkci. Agregáty u strukturních půd jsou snadno oddělitelné, velmi pevné, stabilní a mají lepší poměr mezi póry kapilárními a nekapilárními (lepší difúze plynů). U strukturní půdy dochází ke zvýšení infiltrace vody do půdy, poklesu rizika vzniku povrchového odtoku a vodní eroze a ke zlepšení hospodaření s vodou. U nestrukturních půd dochází často k rozdrobení hmoty do větších či menších útvarů tzv. pseudoagregátů. Pseudoagregáty jsou snadno rozpustné ve vodě a tvoří kašovitou půdní hmotu. Po vyschnutí půdy tak dojde k vytvoření tzv. půdní krusty, která omezí infiltraci vody do půdy, a naopak dojde ke zvýšení povrchového odtoku (Kutílek, 1978; Legout et al., 2005).

Struktura má vliv i na další vlastnosti půdy, např. pórovitost, objemovou hmotnost apod.. Pokud roste v půdě objem zejména větších pórů a zvyšuje se míra agregace pak i objemová hmotnost se zvyšuje. Dochází ke zvýšení provzdušenosti půdy, která má za efekt urychlení zvyšování teploty ve svislém směru. To vede ke zlepšení podmínek pro život zoedafonu, růstu rostlin a další chemických procesů (Pavlásek, Jačka, 2014).

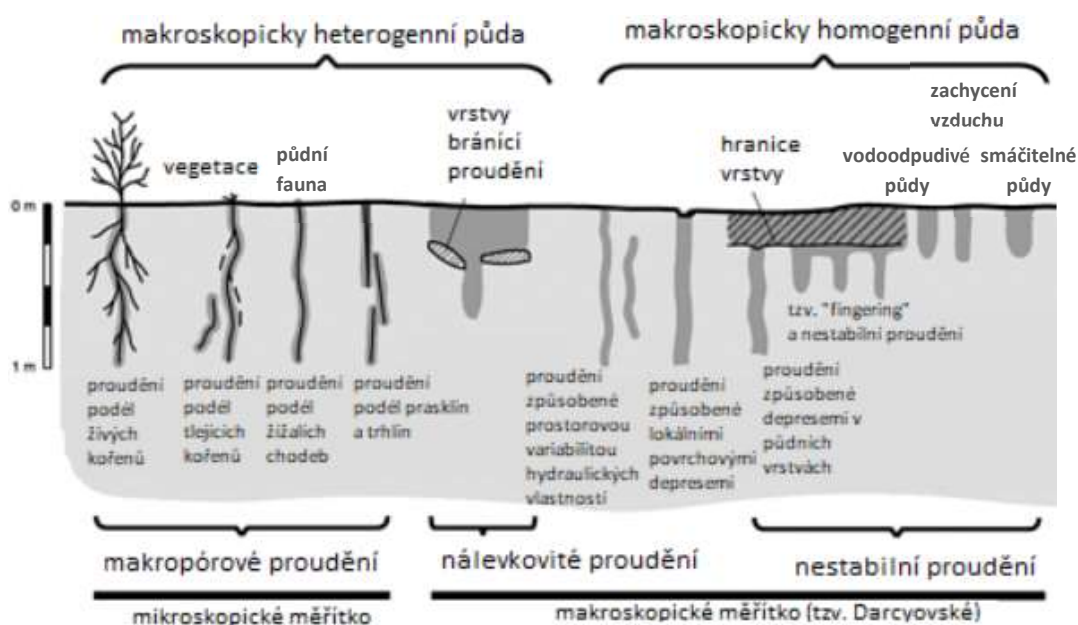
3.8. Preferenční proudění v půdě

Preferenční tok je transport vody a rozpuštěných látek skrz dominující pórové cesty (preferenční cesty) v půdě (Bundt et al., 2001). Při nerovnoměrném proudění vody v půdě dochází ke zvýšení rychlosti proudění na určitých místech v půdním profilu – tedy k preferenčnímu proudění (National Research Council, ©2001).

Rozlišujeme tři druhy preferenčního proudění (Obr.5). Prvním typem je makropórové proudění, což je proudění přes póry, které se od ostatních pórů odlišují svou velikostí (větší než ostatní póry), větší kontinuitou nebo jinými atributy, které by mohly vést ke zlepšení proudění. Nastává obvykle podél kořenů či chodeb vytvořených půdní makrofaunou nebo ho lze pozorovat u trhlin. Druhým typem je proudění nálevkovité (odkloněné či soustředěné). Tok je ovlivněn vlastnostmi prostředí, které brání průtoku, a tak se tok koncentruje v sousedních zónách, které jsou vysoce navlhčené a vodivé. Posledním typem je proudění nestabilní, které může vzniknout v makroskopicky stejnorodé hrubozrnné půdě například při

vrstvení frakcí různých zrnitostí (National Research Council, ©2001; Nimmo, 2009).

Preferenční tok makropóry, stejně tak jako jakékoli jiné proudění vody v půdě, je určováno rozdílem energetických stavů vody v půdě a jejich hydraulickou vodivostí (nasyčenou příp. nenasycenou). Dle (Alaoui et al., 2011) makropóry za specifických půdních podmínek transportují většinu vody a rozpuštěných látek. Například (Alaoui, Helbling, 2006) uvádějí, že při odhadovaném objemu makropórů 0,23 – 2 % z celkového objemu půdy transportují makropóry gravitačně přibližně 74 – 100 % celkové vody. Preferenční proudění ovlivňuje odtok a množství vody dostupné pro rostliny a evaporaci. Z těchto důvodů je důležité se o preferenční proudění dále zajímat, zejména pak na heterogenních slabě vyvinutých půdách (Sander, Gerke, 2009).



Obr. 5 Schéma preferenčního proudění v půdním profilu (upraveno z Hendrickx, Flury, 2001).

3.9. Efekt rekultivačních dřevin na hydrologické vlastnosti půdy

V lesních ekosystémech jsou dřeviny velice důležité, jelikož mají vliv na mnoho ekosystémových funkcí (van der Putten et al., 2013). Mohou modifikovat mikroklima a hydrologické procesy, které ovlivňují vodní bilanci (transpiraci, tvorbu odtoku, infiltraci, doplňování podzemní vody, výměnu vody, preferenční a laterální podpovrchové proudění v blízkosti povrchu – důležité zejména na svahu) (Charbonnier et al., 2013; Bargués Tobella et al., 2014; Benegas et al., 2014).

Dřeviny svým kořenovým systémem a produkcí opadanky přímo ovlivňují hydrofyzikální vlastnosti půdy a nepřímo se podílejí na vytváření vhodných podmínek pro život půdních organismů a rostlin v lesním podrostu (Frouz et al., 2005; Mudrák et al., 2010; Frouz et al., 2013; Frouz, Kuráž, 2014). Kořeny mají podíl na vzniku preferenčních cest v půdě v jejich blízkém okolí. Při prorůstání půdou kořeny oddělují a stlačují shluky zrn od sebe a k sobě čímž mění uspořádání částic v půdě (National Research Council, ©2001; Pavlásek, Jačka, 2014). Kořenový systém má vliv i na chemii půdy, poněvadž při svém růstu vylučuje organické látky, které ovlivňují nejen strukturu půdy ale i další půdní vlastnosti (Pavlásek, Jačka, 2014). To, s jakou rychlostí se budou půdní vlastnosti měnit, je dáno hloubkou, tvarem a hustotou kořenového systému, kvalitou opadanky a mnoha dalšími činiteli. Na kvalitu opadanky má vliv i druhové zastoupení a množství půdních organismů (Cejpek et al., 2013; Frouz et al., 2013; Zhang et al., 2015).

3.9.1 Vliv rekultivačních dřevin na preferenční proudění a infiltraci

Infiltrace vody do půdy je obecně ovlivněna způsobem hospodaření, vegetačním krytím, aktivitou půdní fauny a zhutněním půdy strojním provozem a hospodářskými zvířaty (Wang et al., 2004; Castellano, Valone, 2007; Alaoui et al., 2011; Bargués Tobella et al., 2014).

Pro zahájení preferenčního toku není potřeba aby byl půdní profil zcela nasycen. Stačí aby se povrchová vrstva půdy přiblížila k téměř nasyceným podmínkám (Jarvis, 2007). V preferenčním toku hrají klíčovou roli makropóry. Ty jsou tvořeny především chodbami a prostory mezi exkrementy žířal (termín drilosféra) a kanály podél kořenů. Dále praskáním a smršťováním půdy, chemickým zvětráváním či cyklem zmrazování a rozmrazování. Obvykle mají velkou velikost pórů (např. > 1 mm (Kutílek, Nielsen, 1994) a kontinuitu, která umožňuje vodě a živinám přednostní transport (Beven, Germann, 1982; Sheng et al., 2014; Liu, Lennartz, 2015).

Podél živých, ale i odumřelých a rozložených kořenů rostlin vznikají preferenční cesty proudění (National Research Council, ©2001). Kořenové systémy s většími vertikálními kořeny a tenčími bočními kořeny by mohly zvýšit vertikální tok vody. Zatímco kořenové systémy s relativně velkými a mělkými kořeny, dobře spojené se stonky rostlin, by mohly usnadnit boční podpovrchový tok (Archer et al., 2002; Devitt, Smith, 2002; Leung et al., 2015). Pokud má rostlina nedostatek vláhy,

kořeny obvykle prorůstají do větší hloubky a preferenční cesty též sahají hlouběji (Kuráš et al., 2012). Hustota kořenových preferenčních cest je ovlivněná množstvím dřevinné i bylinné vegetace (Zhang et al., 2015).

V lesních půdách je za primární preferenční proudění považované proudění kořenovými kanály (Elçi, Molz, 2009; Laine-Kaulio et al., 2015; Zhang et al., 2016). V lese je velká rozmanitost vegetačních druhů, včetně keřů, jehličnatých stromů atd. (Jia et al., 2017). Každý druh je unikátní svým kořenovým systémem, a proto je velmi málo informací o tom, jaký vliv mají druhy stromů na preferenční toky v lesních půdách. Některé jehličnaté stromy (např. borovice, jedle) mají dobře vyvinuté hlubší kořeny v hloubce půdy 40-60 cm, zatímco většina listnatých stromů (např. osika) a některé z jehličnatých stromů (např. smrk, modřín) mají dobře vyvinuté kořeny v mělkých půdách (0-25 cm) (Bauhus, Messier, 1999; Jia et al., 2017). Z toho je patrné, že nezáleží vždy na konkrétním druhu stromu, ale spíše na jeho stanovišti a dalších podmínkách (Jia et al., 2017). Jelikož každý druh stromů, má odlišný kořenový systém lze očekávat, že odlišné budou i vlhkostní podmínky, které mohou podstatně ovlivnit preferenční proudění v lesní půdě (Jarvis, 2007; Merdun et al., 2006; Hardie et al., 2011). Preferenční tok může mít vliv na erozi a sesuvy půdy a též by mohl ovlivnit zdroje podzemních vod v lesních ekosystémech (Zehe et al., 2010; Beven, Germann, 2013; Keesstra et al., 2016). Nejen z těchto důvodů je důležité popsat vztahy mezi kořenovým systémem rostlin, preferenčním tokem a transportem živin v lesních půdách.

3.9.2 Vliv rekultivačních dřevin na retenci a vlhkostní režim půdy

Schopnost půdy akumulovat vodu je částečně způsobena půdní faunou. Při vysoké aktivitě půdních organismů, zejména žížal, živicích se opadankou dochází ke zvýšené schopnosti půdy zadržovat vodu dostupnou pro rostliny (kap. 3.9.3.). Vzhledem k rozdílnému množství a kvalitě opadanky jednotlivých dřevin je schopnost půdy zadržovat vodu též rozdílná, avšak rozdíly nejsou v mnoha případech statisticky signifikantní (Cejpek et al., 2013).

(Cejpek et al., 2017) ve svém výzkumu srovnával vodní režim, kmenový tok, zásobu půdní vody a meteorologické parametry na 2 rekultivovaných a 2 nerekulitovaných post-těžebních lokalitách blízko Sokolova. Všechny místa byla stará 25-35 let, pokryta dřevinami a vyvinuta na stejném nadloží. Zachycení vody vegetací představovalo přibližně jednu třetinu srážek na rekultivovaných i nerekulitovaných lokalitách, kmenový tok se též významně neodlišoval. Bez

ohledu na srážky, se množství půdní vody v půdním profilu na lokalitách neměnilo. Množství zadržené vody však bylo na rekultivovaných plochách výrazně vyšší. Výsledky naznačují, že za příznivých podmínek spontánního vývoje v nerektivovaných lokalitách může být množství půdní vody shodné s lokalitou rekultivovanou. Nevýhodou nerektivovaných lokalit je zejména rychlost vývoje půdního profilu, který je z hlediska s lokalitami rekultivovanými pomalejší. Nicméně po 30 letech už je fungování ekosystému srovnatelné s lokalitami rekultivovanými.

Se schopností půdy akumulovat vodu souvisí i sezónní kolísání vlhkosti půdy. Půdní vlhkost pod lesním porostem se na zkušební lokalitě v povodí řeky Rur ve Wüstabachu, v Německu zabýval ve své studii (Rosenbaum et al., 2012). Měření probíhalo v hloubkách 5, 20 a 50 cm během jednoho roku. Nejstabilnější podmínky byly naměřeny v hloubce 50 cm pod zemským povrchem, a naopak k největším výkyvům docházelo ve vrchní vrstvě půdy (5 cm). V srpnu a v září došlo k větším srážkovým událostem, a i přesto nedošlo k významnějším výkyvům vlhkosti v nižších vrstvách půdy. To je nejspíše způsobeno vyšším příjmem vody kořeny a zvýšenou evaporací. Ve studii dospěli k závěru, že stav půdní vlhkosti, kromě vlastností půdy, topografie a podzemní vody, ovlivňuje též intenzita srážek a vegetace.

Vyšší ztráty vody z ekosystému jsou v letních měsících zapříčiněny evapotranspirací. V zimě dochází ke ztrátám vody především ve formě podpovrchového odtoku, který souvisí s množstvím srážek (Cejpek et al., 2017). Pokud do půdy vstupuje kvalitní opadanka a nachází se v ní početné populace půdní fauny, které jsou vázané na kvalitu opadanky, tak se schopnost půdy zachovat si během celého roku stabilní vlhkostní podmínky zvětšuje (Cejpek et al., 2013). Vliv druhu rostlinného pokryvu na čerpání půdní vody je dle (Tindall, 1999) zásadní. Spotřeba vody rostlinou je ovlivněna zejména délkou a tvarem kořenů, mírou evapotranspirace, délkou vegetační sezóny, velikostí a managementu nadzemní části rostliny, ploše listů (jehlic) a mnoha dalších činitelích.

3.9.3 Vliv rekultivačních dřevin na přítomnost pedofauny

Kvalita opadanky rekultivačních dřevin a zásoba živin v půdě ovlivňuje výskyt edafonu. Množství žížal na jednotlivých lokalitách je dáno kvalitou opadanky. Přičemž platí, že čím je opadanka kvalitnější, tím je obvykle hojnější populace žížal. (Walmsley et al., 2019) testovali účinek půdních vlastností a druhů stromů na složení a početnost společenstva žížal na výsypkách, které byly osázeny pěti

různými druhy stromů. Nejvyšší výskyt žížal i obecně makrofauny a biomasy byl na lokalitě s olší, přičemž počet půdní makrofauny pozitivně koreloval s celkovým obsahem dusíku v půdě. Složení společenstva žížal bylo podobné u olše a dubu. V případě výsadby stromů se snadno rozložitelnou opadankou může dojít k urychlení vývoje půdy podporou velkých populací půdní fauny, obzvláště žížal. Jelikož žížaly se zásadním způsobem podílejí na tvorbě humusu. Autoři však dospěli k závěru, že pro vytvoření produktivních a různorodých lesních ekosystémů na výsypkách je lepší smíchání několika druhů dřevin s různou kvalitou opadanky, jelikož v případě využití pouze jednoho druhu lze zapříčinit rozšíření nežádoucích druhů, jako například třtiny křovištní (*Calamagrostis epigejos*).

(Frouz et al., 2013) zjišťoval jaký účinek mají různé dřeviny na vlastnosti půdy na výsypkách. Zkoumané lokality byly zalesněny jedním z šesti druhů stromů (smrk, borovice, modřín, lípa, dub, olše) nebo byly ponechány přirozené sukcesí (s dominující dřevinou vrby). Zastoupení žížal se mezi lesními lokalitami významně lišila. Nejvyšší byla na lokalitě s olší a nejnižší na lokalitě ponechané spontánní sukcesí. Hojnost hlístic se mezi lokalitami výrazněji nelišila. Výskyt pancířníků byl nejvyšší na lokalitě s olší a nejnižší na lokalitě se smrkem. Dřeviny produkující opadanku s nižším C:N dále přispívají ke zvětšování populací pancířníků (olše, lípa). Hojnost chvostoskoků byla nejvyšší na smrkové a nejnižší na modřínové lokalitě. Stromy produkující opadanku spíše s vyšším poměrem C:N (např. smrk) podporují populaci chvostoskoků a zvyšují tím biomasu bakterií (B) a hub (H) v půdě (vysoký poměr C:N vede k vysokému poměru H:B v těchto půdách). Výsledky celkově naznačují, že vliv druhů dřevin na vývoj půdy je podstatně zprostředkován aktivitou půdní fauny a zejména bioturbancí žížal.

3.9.4 Vliv pedofauny na půdní vlastnosti

Půdní bezobratlí živočichové, mohou podporovat vznik půdních agregátů, které jsou stabilní ve vodě (Scullion, Malik, 2000; Jegou et al., 2001; Marashi, Scullion, 2003). Agregáty určují strukturu půdy a dopomáhají ke vzniku větších půdních pórů mezi agregáty. Také umožňují zvýšení množství kapilárních pórů uvnitř půdních agregátů. To může vést ke zvýšení schopnosti půdy zadržovat vodu, ke snížení odtoku a zmírnění eroze. Efekt půdní fauny na půdní vlastnosti nemusí být vždy pozitivní. Například mravenci hromadí nekonsolidovanou půdu na povrchu půdy a ta pak snadněji podléhá erozi (Cerdà, Jurgensen, 2008). Obvykle při transformaci organické hmoty půdní faunou dojde ke zvýšení kapacity půdy a ke zvýšení

objemu zadržené vody v půdě. Organická hmota je přeměněna na holorganické nebo organominerální agregáty (Frouz, Kuráž, 2014).

Holoorganické agregáty vznikají během činností půdní fauny, která se živí opadankou. Tyto organismy opadanku stráví a vyloučí ve formě fekálních pelet. Při přeměně opadanky dochází ke zpřístupnění pórů okolnímu prostředí a tím i k několikanásobnému zvýšení polní vodní kapacity. V některých půdách mohou holoorganické agregáty vytvářet vrstvy o tloušťce několika centimetrů (Frouz et al., 2001; Frouz et al., 2007a).

Členové půdní fauny, zejména žížaly, mohou napomáhat také ke vzniku organominerálních agregátů, které mohou přispívat ke zvýšení hodnoty polní vodní kapacity, bodu vadnutí a též ke schopnosti půdy zadržovat vodu (Frouz et al., 2007b). Zvýšení polní vodní kapacity je však vyšší než zvýšení bodu vadnutí, což znamená, že půdní fauna zvýšila schopnost půdy zadržovat vodu, která by byla eventuelně dostupná pro rostliny (Frouz et al., 2007a). Pokud je v půdě četná populace žížal, dochází k výrazně vyšší produkci agregátů stabilních ve vodě a ke zlepšení schopnosti půdy zadržovat vodu, což vede ke stimulaci růstu rostlin v období sucha. Ke zvýšení schopnosti půdy zadržovat vodu dochází obzvláště při zvýšené aktivitě žížal v minerálním horizontu (Frouz et al., 2005). Pokud aktivita žížal neustupuje, dochází ke vzniku velkého množství chodeb. Chodby zůstávají obvykle otevřené, což napomáhá transportu vody a vzduchu v půdě a rychlejšímu poklesu vlhkosti po srážkové události (Frouz, Kuráž, 2014; Schon et al., 2017).

Bioturbance způsobené půdní faunou, především žížalami, vedou k akumulaci organické hmoty v půdě, která svým zvýšeným množstvím vede ke zvýšení schopnosti půdy zadržovat vodu (Frouz et al., 2009b). Nejvyšší polní vodní kapacita byla dle výzkumu (Frouz, Kuráž, 2014) zaznamenána u lokality s olší. To bylo nejspíše zapříčiněno produkcí kvalitní opadanky s nízkým poměrem C:N, která podlehla intenzivní bioturbanci půdní faunou. Nízká polní vodní kapacita byla zaznamenána u lokalit s jehličnatými druhy stromů, kde byla aktivita půdní fauny velmi omezená.

Vznik a vývoj humusové vrstvy a půdních vlastností (kyselost půdy) ovlivňuje významně druh opadu. V organominerálním horizontu mají pozitivní vliv na akumulaci uhlíku především dřeviny s tvrdým dřevem např. javor, jasan, lípa a jilm. V organominerálních horizontech se pod těmito dřevinami vyskytuje více uhlíku než pod jehličnany (Vesterdal et al., 2013). Sekvestrací uhlíku na bývalých

těžebních lokalitách s různými dřevinami se zabýval ve své studii (Frouz et al., 2009a). Porovnával množství uhlíku v organominerálním horizontu (do 20 cm) a v horizontu nadložního humusu v různých lesních porostech. Nejvyšší množství uhlíku v organominerálním horizontu vykazovaly lokality s olší a lípou. V humusovém horizontu dominovala s největším množstvím uhlíku lokalita se smrkem. Vyšší hodnoty uhlíku v horizontu nadložního humusu měly i všechny ostatní jehličnany (modřín, borovice). V organominerálním horizontu však jehličnany měly přesně opačný vývoj (vykazovaly skoro nejnižší obsah uhlíku). Vyšší hodnoty sekvestrovaného uhlíku v nadložním humusu u jehličnatých dřevin potvrdili i (Podrázský, Remeš, 2010; Kupka et al., 2013). Vyšší obsah dusíku v opadance zjistil (Frouz et al., 2013) v porovnání se stálezelenými stromy u opadavých stromů. Nejnižší hodnota dusíku byla naměřena u smrku, nejvyšší u olše a lípy. Z porovnávaných dřevin má tedy nejméně kvalitní opadanku smrk a nejkvalitnější olše a lípa.

Opad rozkládají mikroorganismy, aby získaly živiny, uhlík a energii k růstu a rozmnožování. V čerstvém opadu bývá uhlíku hodně, zato živin je v něm celkem málo (McClaugherty, 2001). Rychlost dekompozice odpadu je variabilní a závisí především na kvalitě opadu (např. poměru C:N, rozložitelnosti), klimatických faktorech (srážkách, evapotranspiraci, teplotě), typu vegetace a geografických faktorech. Obvykle dochází ke spolupůsobení jednotlivých vlastností (Zhang et al., 2008). Poměr C:N je zpravidla v rostlinném opadu okolo 8:1 až 60:1. Čím starší rostlina je, tím roste i poměr C:N (Weil, Brady, 2016). V případě, že rozkládaná hmota má nízký poměr dusíku oproti uhlíku, tak mikroorganismy začnou brát anorganický dusík z okolního prostředí (např. z půdního roztoku). To se většinou podepíše na snížení celkové zásoby rozpustného dusíku v půdě a zejména na stavu rostlin (Janssen, 1996; Weil, Brady, 2016).

Množství uhlíku v půdě vzájemně souvisí s hloubkou humusového horizontu a podílem žízálich chodeb ve vrchní vrstvě půdy. Pakliže bude aktivita žízáli výraznější a poměr C:N v opadance nízký, bude docházet ke zvětšování zásoby uhlíku v půdě, zvětšení tloušťky humusového horizontu a též k uspíšení vývoje půdy (Frouz et al., 2013; Weil, Brady, 2016).

Tvorba humusového horizontu a zásoba uhlíku v horní vrstvě půdy se jeví jako důležitý faktor, který určuje mnoho dalších půdních faktorů. A proto (Frouz et al., 2013) zkoumal vztah mezi tloušťkou humusového horizontu a obsahu uhlíku v horní vrstvě půdy oproti kvalitě opadu (který je indikován např. poměrem C:N)

a bioturbancí (indikováno např. hustotou půdní fauny, zejména žížal). A zjistil, že dochází k negativní korelaci mezi poměrem C:N opadanky a hustotou žížal. Pokud se však hodnotí vliv poměru C:N opadanky a vliv žížal na mocnost humusového horizontu a zásobu uhlíku v humusovém horizontu, tak dochází k částečné korelaci, avšak zdá se, že účinek žížal je nezávislý na účinku C:N.

Mnoho dalších studií zjišťovalo účinek půdní fauny na dekompozici opadu v lesních půdách. Tyto studie ukázaly, že aktivita půdní fauny zvyšuje odstraňování opadu z půdního povrchu (Setälä et al., 1996; Aubert et al., 2010). Avšak (Frouz, 2002; Frouz et al., 2005) při zkoumání osudu této organické hmoty zjistil, že velká část organické hmoty nebyla mineralizována, ale byla pouze uložena v půdě.

Přesunutí organické hmoty z opadanky a fermentační vrstvy do minerální vrstvy půdního profilu je důsledkem zvýšené bioturbance. V minerální vrstvě se organická hmota mísí s půdními agregáty, což vede ke snížení míry rozkladu organické hmoty a k zabránění její mineralizace. Vyšší mikrobiální biomasa a nízká mikrobiální respirace je důsledkem nižší dekompozice. Velká část půdní mikrobiální zůstává neaktivní. Na Velké podkrušnohorské výsypce dochází k takovým jevům např. na lokalitách s převahou olše a lípy (Frouz et al., 2013).

Vliv lesních dřevin na stav humusové vrstvy v nižších nadmořských výškách zjišťovali (Podrázský, Remeš, 2010). Porovnávali situaci v porostech lípy, smrku a ve smíšeném listnatém porostu (jasan, dub, habr). V částech jehličnatých porostů byla zaznamenána tendence akumulace nadložního humusu a zpomalený obrát organické hmoty. Množství nadložního humusu bylo u lokality se smrkem téměř desetkrát vyšší než na lokalitě s lípou. Rychlejší mineralizace organické hmoty, rychlejší koloběh živin a intenzivní absorpce byly dokumentovány v porostech lípy. Smíšený porost vykazoval půdní vlastnosti, které lze považovat za nejpříznivější. Dospěli tak k názoru, že pro lesnickou praxi je nejvhodnější pěstování smíšených lesních porostů s místně odpovídajícími druhy.

4. Charakteristika zájmového území

Zájmová lokalita Velká Podkrušnohorská výsypka se nachází v těžebním okrese Sokolov v severozápadních Čechách. Z jihu je ohraničena silnicí z Lomnice do Vintířova, ze severu silnicí z Boučí přes Dolní Nivy do Vřesové, ze západu silnicí Lomnice do Boučí a z východu dlužní železnicí z Vřesové do Vintířova. Umístění výsypky a zájmových lokalit je vyobrazeno na Obr.6.



Obr. 6 Umístění výsypky (nahore), umístění zájmových lokalit na výsypce (vlevo dole) a jejich přesná poloha (vpravo dole) (upraveno z ČÚZK, ©2020; Mapy.cz, ©2020).

První zmínka o těžbě uhlí v Sokolovské pánvi je z roku 1760. Skutečný rozvoj moderní průmyslové těžby uhlí však nastal až v roce 1871, kdy byla dokončena výstavba železničních drah v daném regionu. Po druhé světové válce bylo v regionu provozováno 39 hlubinných dolů a 15 malolomů. Hlubinné doly byly postupně uzavírány, a proto se začala rozvíjet těžba povrchová a později velkolomová. Vrcholu dosáhla těžba v roce 1983, kdy bylo vytěženo v regionu více než 22,6 mil. tun hnědého uhlí (Rothbauer et al., 2003). Výsypka vznikla sloučením několika menších výsypkových útvarů v 60. letech 20 století (Frouz et al., 2015) za účelem vytvoření vnější výsypky hnědouhelného lomu Jiří. Osady Týn (Thein), Lipnice (Littmitz), Lvov (Löwenhof) a Chalupy na Pastvišti (Huthäuser) pod výsypkou zanikly (Anonym, 2014). Od roku 1960 bylo na výsypku uloženo přibližně

800 mil. m³ nadložních zemin (Brom et al., 2012). Výsypka je 2-2,5 km široká, 8,5 km dlouhá a rozkládá se na ploše přibližně 1957 ha (Broumová et al., 2007). Tyto parametry z ní činí jednu z největších výsypek v České republice (Brom et al., 2012). Hornická činnost (ukládání nadložních zemin) na celé ploše výsypky byla ukončena roce v 2003 (Broumová et al., 2007).

4.1. Zeměpisné, geologické a pedologické poměry

Sokolovská hnědouhelná pánev se rozkládá v propadlině při řece Ohře, ohraničené Krušnými horami, Doupovskými vrchy a Slavkovským lesem (Jiskra, 1993). Na jihozápadě Sokolovská pánev sousedí s pánví Chebskou a ze severovýchodu s pánví Severočeskou. Z jižní strany je Sokolovská pánev omezena ohareckým zlomem a ze severu rozvětveným krušnohorským zlomem (Rothbauer et al., 2003). Je to terestrická terciérní pánev s vrásově zlomovou stavbou. Z morfologického hlediska ji lze popsat jako oboustranně tektonicky ohraničený, stupňovitý, příčně asymetrický příkop. Pánev má délku 36 km, šířku 9 km a rozlohu 312 km² (Pešek et al., 2010).

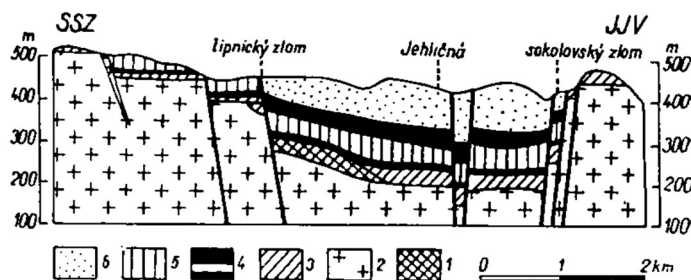
Sokolovská pánev vznikla ve starších třetihorách saxonskými tektonickými pohyby, které byly odezvou varisky konsolidovaného Českého masivu na alpsko-karpatské horotvorné pohyby. Během těchto pohybů došlo ke zmlazení Českého masivu, k obnově a vzniku nových zlomových linií. Porušením zarovnaného reliéfu vznikly na území dnešní Sokolovské pánve rozsáhlé vodní plochy, ve kterých se následně ukládaly třetihorní sedimenty (Rothbauer et al., 2003). Podloží Sokolovské pánve tvoří krušnohorské krystalinikum a karlovarská žula. Na nich je uloženo starosedelské souvrství (slepence, pískovce, kaolinické štěrkopísky) oligocenního stáří. Produktivní souvrství obsahovaly hlavní uhelné zásoby pánve ve slojích Josef, Anežka a Antonín (Valášek, Chytka, 2009). Geologický profil Sokolovskou pánví je zobrazen na Obr. 7.

Slojové pásmo Josef je výsledkem dlouhodobého působení eroze a denudace na starosedelských vrstvách. Tato uhlonosná sedimentace byla potlačována vulkanickou činností a postupně tak přecházela do následujícího vulkanodetrického souvrství. Sloj Josef obsahuje zpravidla více škodlivin (síra, arsen) než ostatní sloje (Jiskra, 1993). Hlavní slojové souvrství, lokálně rozdělené na sloj Anežka a Antonín je místy přerušeno vyvinutou meziložní slojí (Dvořák, Růžička, 1966). Slojové pásmo Anežka bylo nejjakostnější a z tohoto důvodu i nejžádanější, a proto je dnes již většina vyrubána. Slojové pásmo Antonín má

mocnost 20–32 m s hojnými propláskty, které slouj znečišťují. Nadloží uhelné slaje Antonín je tvořeno cyprisovými jíly (Jiskra, 1993).

Cyprisové souvrství je téměř celé tvořeno slabě karbonátickými bitumenními jílovci se střídajícími se světlejšími a tmavšími laminami o průměrné mocnosti cca 0,2 mm. Toto střídání bylo pravděpodobně způsobeno střídáním vlhčích a sušších ročních období (Pešek et al., 2010). Mineralogické a chemické složení v profilu cypřišovým souvrstvím kolísá v závislosti na postupné denudaci kaolinických zvětralin, ochlazování klimatu a dočasných návratech vulkanismu. Z těchto důvodů v jílové složce převládá na bázi souvrství kaolinit, postupně se přidávají illit a sericit, které ve vyšších vrstvách nakonec převládají. V této vrchní části se také v proměnlivém množství vyskytuje montmorillonit a místy i nontronit a chlorit (Kváček, et al., 1987; Kříbek et al., 1998). Obsah organického uhlíku v sedimentech se obvykle pohybuje v rozmezí 1,8 až 6,8 %, v některých případech dosahuje až 18 %. Tzv. cyprisové břidlice jsou světle hnědé, lístkovitě odlučné, tuhé, kožovité, často obsahují schránky skořepatců rodu *Cypris*, shluky rybích šupin a kosti, křemenné gastrolity a konkrerce pyritu a pyrhotinu. Organická hmota v souvrství je převážně způsobena řasou *Botryococcus*, exiny navátých pylových zrn a oblaněným planktonem (Kváček, et al., 1987).

Půdní vlastnosti výsypek se mění vlivem dolování a nasypávání. Dochází k přesunu spodních vrstev půdy na povrch, poruše klasických půdních horizontů, změnám v zrnitostním složení atd.. V iniciálních stádiích se proto půda výsypek od okolního půdního prostředí liší (Štýs, 1990). Počet druhů rostlin a sukcesi ovlivňuje pH substrátu. Na Velké podkrušnohorské výsypce se pH pohybuje mezi 8-9, což znamená, že skrývka je mírně zásaditá (Frouz et al., 2008). Průměrný obsah celkového fosforu je 881 mg.kg⁻¹ půdy v čerstvě uložené skrývce. Obsah fosilních organických látek je 2-2,1 % z objemu půdy. V čerstvě uložené skrývce však žádné nové organické látky nejsou (Frouz et al, 2001).



Obr. 7 Geologický profil Sokolovskou pávní

1) krystalinikum; 2) žula karlovarského masívu; 3) starosedelská série; 4) souvrství slaje Josef (dole) a hlavní slojové souvrství (nahore); 5) vulkanicko-detritické souvrství 6) cyprisové souvrství (převzato z Dvořák, Růžička, 1966).

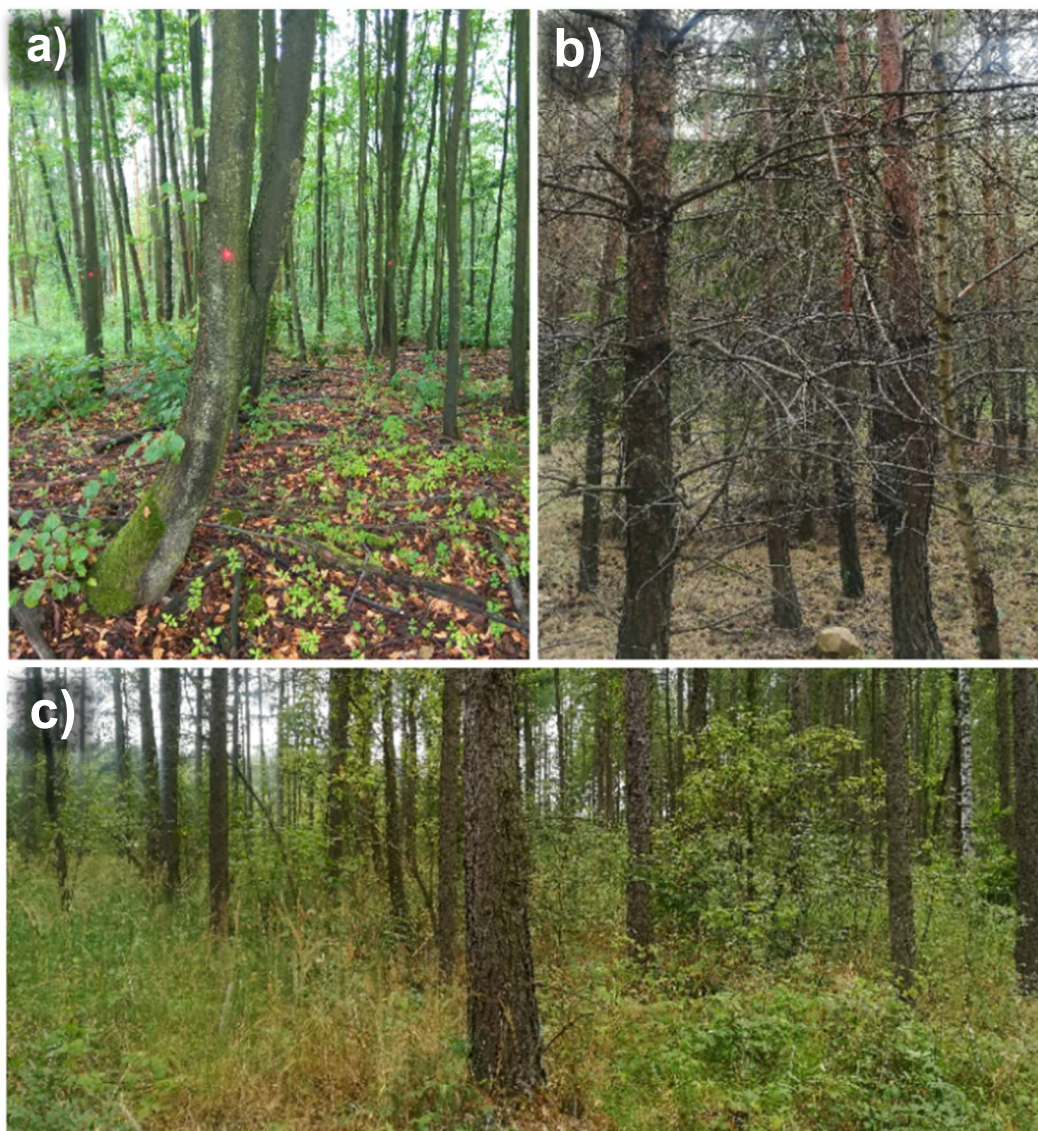
4.2. Klimatické poměry

Zájmové území spadá do klimatické podoblasti MT4, což je mírně teplá a mírně vlhká podoblast. Charakterizuje se mírným, krátkým jarem, mírným, krátkým, suchým až mírně suchým létem, mírným a krátkým podzimem a mírně teplou a suchou zimou. Průměrný roční úhrn srážek se pohybuje okolo 650-850 mm. Srážkový úhrn ve vegetačním období je přibližně 350–450 mm a v zimním období se pohybuje okolo 250-300 mm (Quitt, 1971). Průměrná roční teplota je zhruba 6,8 °C (Cejpek et al., 2017). V lednu dosahuje průměrná teplota -2 až -3 °C, v červenci 16-17 °C, v dubnu a říjnu se pak teplota pohybuje mezi 6 a 7 °C. Tato oblast je pokryta přibližně 60-80 dní sněhovou pokrývkou, 110 až 130 dní je mrazových a ledových dní je mezi 40 a 50. Letních dní je přibližně 20 až 30 a dní, kdy je průměrná teplota 10 °C a více je 140-160. Dalšími charakteristikami podoblasti MT4 jsou počty zatažených (150-160) a jasných dní (40-50) (Quitt, 1971).

4.3. Vegetační poměry

Na lokalitě Velké podkrušnohorské výsypky bylo v rámci plánu rekultivací vysazeno několik lesních stanovišť. Mezi vysazené druhy stromů patří např. z listnatých: lípa malolistá (*Tilia cordata*), olše šedá (*Alnus incana*), olše lepkavá (*Alnus glutinosa*), dub letní (*Quercus robur*) a z jehličnatých: borovice pokroucená (*Pinus concorta*), borovice černá (*Pinus nigra*), modřín opadavý (*Larix decidua*), smrk ztepilý (*Picea abies*), smrk pichlavý (*Picea pungens*) a další (Kuráž et al., 2012; Cejpek et al., 2017). Některé mladší plochy byly ponechány spontánní sukcesi. Na takových stanovištích převládají z počátku především trávy: podběl lékařský (*Tussilago farfara*), ječmen hřívnatý (*Hordeum jubatum*), lipnice smáčknutá (*Poa compressa*) či smetánka lékařská (*Taraxacum ruderalia*). Později jsou plochy pokryty porosty vrby jívy (*Salix caprea*), břízy bělokoré (*Betula pendula*) a topolu osika (*Populus tremula*), avšak lze zde nalézt i kostřavu červenou (*Festuca rubra*) či jitrocel (*Plantago spp*) (Roubíčková, Frouz, 2014). Na každém z těchto stanovišť převládá jeden nebo více druhů stromů. Další lokality byly osety travinami nebo zde byl realizován jiný typ rekultivace (Kuráž et al., 2012).

Na určených zájmových plochách (Obr.8) je dominantní rostlinou borovice černá (*Pinus nigra*), lípa malolistá (*Tilia cordata*) a modřín opadavý (*Larix decidua*).



Obr. 8 a) vegetační kryt lokality s převahou lípy malolisté b) vegetační kryt lokality s převahou borovice černé c) vegetační kryt lokality s převahou modřínu opadavého

5. Metodika

5.1. Plán vzorkování

5.1.1. Předmět a čas měření

Ve dnech 5 - 7. 8. 2019 bylo provedeno terénní měření nasycené hydraulické vodivosti (K_s), odběr neporušených půdních vzorků pro laboratorní měření retenčních čar, stanovení obsahu a ekvivalentní velikosti pórů a odběr neporušených vzorků pro stanovení hydrofyzikálních půdních vlastností (objemové hmotnosti, vlhkosti při odběru a pórovitosti). Dále byly vykopány půdní sondy pro stanovení mocnosti vrchní organické vrstvy půdy.

Laboratorní měření retenčních čar a měření neporušených vzorků odebraných do Kopeckého válečků byla provedena v laboratoři Katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování Fakulty životního prostředí ČZU v Praze.

5.1.2. Místo měření, výběr lokalit a důvody tohoto výběru

Pro měření byly zvoleny tři odlišné lokality z hlediska vegetačního pokryvu (převažující dřeviny) a z hlediska kvality kořenového systému a kvality opadu. První lokalita je v současné době porostlá monokulturou modřínu opadavého (*Larix decidua*), druhá lípou malolistou (*Tilia cordata*) a třetí borovicí černou (*Pinus nigra*). Stáří stromů na lokalitě modřínu byla v době měření přibližně 45 let (výsadba v roce 1974). Stromy borovice a lípy byly vysazeny až o 11 let později, jejich stáří se v době měření odhaduje na 34 let. Přibližný střed zájmové lokality lípy (N 50°14.94475', E 12°42.30062') se nachází vzdušnou čarou asi 1,9 km od přibližného středu zájmové lokality modřínu (N 50°15.01428', E 12°40.66093') a 0,6 km od přibližného středu zájmové lokality borovice (N 50°14.61258', E 12°42.13718'). Rozdílným faktorem pro tvorbu půdního profilu byla právě volba použité dřeviny pro lesnickou rekultivaci. Umístění zájmových lokalit je znázorněno na Obr.8.

5.1.3. Počty vzorků, místo a omezení jejich odběru

Na lokalitě s monokulturou borovice bylo celkem odebráno 12 neporušených vzorků do Kopeckého válečků. Šest vzorků bylo odebráno z vrchní vrstvy půdy (průměrná střední hloubka odběru cca 5,6 cm, objem Kopeckého válečku 100 cm³ a jeho výška 4 cm) a šest vzorků ze spodní vrstvy půdy (průměrná střední hloubka odběru cca 33,7 cm, objem Kopeckého válečku 100 cm³ a jeho výška 4 cm).

Na lokalitě s monokulturou modřínu bylo odebráno z vrchní vrstvy půdy 6 neporušených vzorků do Kopeckého válečku o objemu 100 cm³ (průměrná střední hloubka odběru cca 9,8 cm). Ze spodní vrstvy půdy (střední hloubka odběru cca 30 cm) bylo odebráno 5 kompaktních vzorků do polyetylenových (PE) sáčků.

Na lokalitě s monokulturou lípy bylo odebráno 10 vzorků do PE sáčků. Z vrchní vrstvy půdy bylo odebráno 5 vzorků se střední hloubkou odběrů 5 cm. Ze spodní vrstvy půdy bylo odebráno též 5 vzorků, avšak průměrná střední hloubka odběru byla 30,5 cm.

Půdní vzorky do Kopeckého válečků nebylo možné odebrat ve spodní vrstvě půdy na lokalitě lípy a modřínu z důvodu výskytu velmi pevných a křehkých jílových plátů. Půdní vzorky na lokalitě modřínu (6.8.2019) a borovice (5.8.2019) byly vzorkovány za prakticky stejných srážkových podmínek. Avšak v noci před odběrem vzorků se na poslední lokalitě lípy (7.8.2019) vyskytla intenzivní srážka (srážkový úhrn 20 mm). Vrchní část profilu byla provlhčená (porézní systém byl ovlivněn), a proto se nepodařilo odebrat neporušené vzorky. Z těchto důvodů jsou hodnoty K_s z vrchní vrstvy profilu lípy nejspíše zkresleny a jsou tak obtížně porovnatelné s hodnotami nasycené hydraulické vodivosti pro borovici a modřín. Porovnání souvisejících hydrofyzikálních vlastností vzorků může být zkresleno využitím vzorků, jenž nebyly odebrány do Kopeckého válečků a odběrem vzorků, za odlišných vlhkostních podmínek půdy.

5.2. Měření K_s Guelphským permeametrem

Pro měření nasycené hydraulické vodivosti v terénu byly použity dva Guelphské permeametry (GP) (Obr.9). Měření probíhalo dle manuálu (Eijkelkamp, 2011) tak, abychom minimalizovali vznik případných chyb.

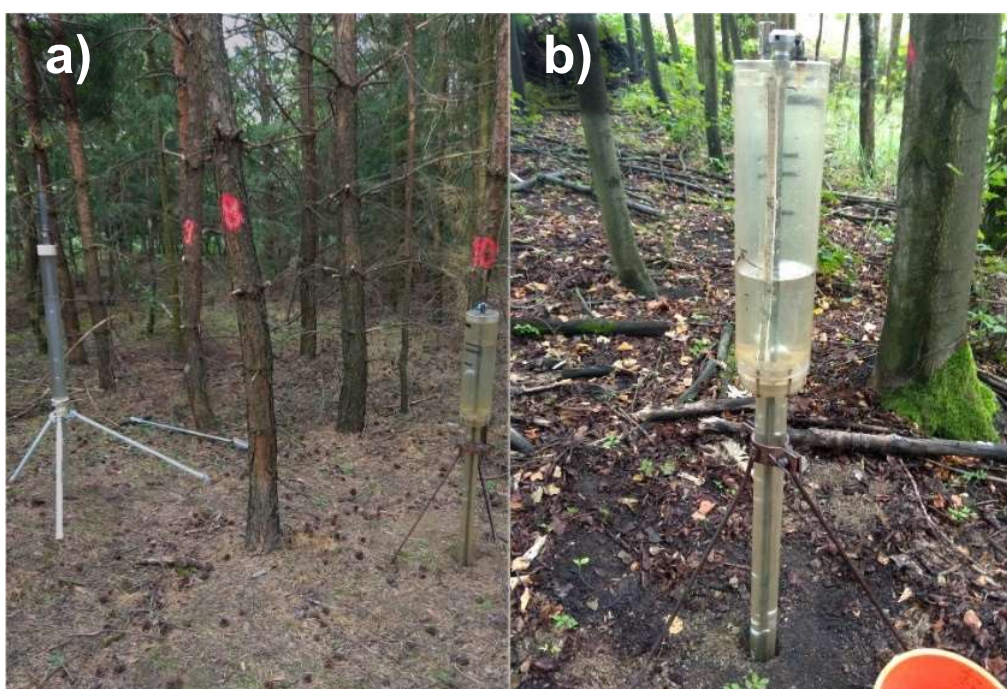
5.2.1. Postup měření

V terénu byly provedeny tyto kroky:

1. Guelphský permeametr byl sestaven dle manuálu (viz výše).
2. Byly navrtány vrty Edelmanovým vrtákem. Vrtání probíhalo pomalu, po malých částech tak, aby nedošlo ke zhutnění stěn vrtu a tím ke snížení hodnot K_s (Reynolds, Lewis, 2012).

3. Změřila se hloubka a průměr vrtů. Hloubky vrtů se pohybovaly od 7 do 45 cm. Průměry vrtů nabývaly hodnot 5; 5,5; 6; 7,5.
4. Guelphský permeametr byl naplněn vodou, umístěn opatrně do kovové trojnožky a následně do vrtu tak, aby jeho váhu nesla trojnožka, a nikoli dno vrtu.
5. Vytažením zavzdušňovací trubičky do požadované výšky (předem určená výška výtopy) bylo započato samotné měření. Výška výtopy byla u hlubokého vrtu 15 cm a u mělkého vrtu se pohybovala v rozmezí 3–5 cm. U mělkých vrtů se hloubka výtopy volila tak, aby bylo zajištěno měření pouze v dané vrstvě půdy, nikoliv nad ní.
6. Pokles hladiny (H_{pv}) za časovou jednotku (t) byl průběžně odečítán pomocí stupnice na stěně zásobníku a zapisován do speciálního formuláře.

Naměřená data byla vyhodnocena v tabulkovém procesoru Excel.



Obr. 9 a) měření K_s Guelphskými permeametry na zájmové lokalitě převahou vegetačního krytu borovice černé a označení umístění vrtů b) měření K_s pomocí GP na zájmové lokalitě převahou vegetačního krytu lípy malolisté

5.2.2. Vyhodnocení měření Guelphským permeametrem

Hodnoty K_s pro jednotlivé vrty byly vypočítány dle následujícího vzorce (Reynolds, 2008) :

$$K_s = \frac{C_w i_{cg} A_g}{2\pi h_g^2 + C_w \pi r_g^2 + 2\pi h_g / sn} \quad (9)$$

kde C_w je tvarový parametr vrtu, i_{cg} ustálená rychlost poklesu hladiny vody v zásobníku permeametru, A_g vnitřní průřezová plocha zásobníku permeametru, h_g výška vody ve vrtu, r_g poloměr vrtu a sn je sorpční číslo.

Vnitřní průřezové plochy zásobníků permeametru (A_g) byly 35,22 cm² (používán pro mělké vrty) a 113,10 cm² (používán pro hluboké vrty). Sorpční číslo bylo určeno na základě odhadu zrnitosti a půdní struktury lokality, na které probíhalo měření. Na lokalitě byly převážně strukturální jíly, a proto bylo dle tabulky (Zhang et al., 1988) zvoleno $sn = 0,12 \text{ cm}^{-1}$. Pro výpočet tvarového parametru C_w (10) byl po stanovení sorpčního čísla určen vzorec platný pro $sn \geq 0,09 \text{ cm}^{-1}$ (Zhang et al., 1988).

$$C_w = \left(\frac{\frac{h_g}{r_g}}{2,074 + 0,093 \frac{h_g}{r_g}} \right)^{0,754} \quad (10)$$

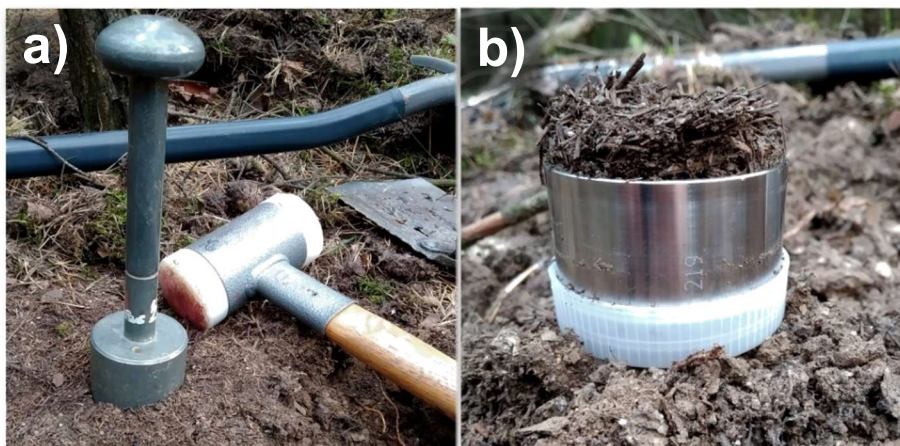
Ustálená rychlost poklesu hladiny vody i_{cg} se počítá jako průměr posledních 3, popř. 2 zdánlivě ustálených hodnot rychlostí poklesu hladiny, aby došlo ke zpřesnění výsledku (Jačka, 2014).

5.3. Odběr neporušených půdních vzorků

Pro stanovení fyzikálních vlastností půdy byly odebrány půdní vzorky v neporušením stavu do tzv. Kopeckého válečků o objemu 100 cm³ (kap. 5.3.1.) Vzorky byly odebírány ve vrchní a spodní vrstvě půdy na lokalitě borovice a ve vrchní vrstvě na lokalitě modřínu. Vzorky z lokality lípy a spodní vrstvy modřínu nebylo možné z důvodu výskytu velmi pevných a křehkých jílových plátů odebrat do Kopeckého válečků, a proto byly odebrány do polyetylenových (PE) sáčků (kap. 5.3.2.)

5.3.1. Postup odběru vzorků do Kopeckého válečku

1. Nad stanovenou hloubkou odběru byla pomocí lopatky odstraněna vrchní vrstva zeminy.
2. Na urovnaný povrch se položil Kopeckého váleček (ostrým břitem dolů) s vhodným nástavcem. Plynule a bez viklání byl vertikálně zatlučen palicí do půdy tak dlouho, až určitá vrstva zeminy přesahovala horní okraj válečku a váleček byl zcela zaplněn půdou (Obr.10a).
3. Váleček byl vyjmut pomocí lopatky z půdního profilu, byl odstraněn nástavec a opatrně odřezána nožem zemina přesahující horní okraj válečku.
4. Po zajištění horní strany válečku víčkem (Obr.10b) se opatrně upravila stejným způsobem i dolní strana válečku a opět se zavíčkovala.
5. Vzorek i s víčky byl zvážen a tyto hodnoty byly zapsány do formuláře včetně označení čísla válečku, střední hloubky odběru, místem a datem odběru.
6. Odebrané vzorky byly uloženy do speciálního boxu a převezeny do laboratoře pro další zpracování.



Obr. 10 a) odběr půdního vzorku b) vyjmutý a částečně zavíčkovaný odebraný půdní vzorek do Kopeckého válečku

5.3.2. Postup odběru a zpracování vzorků odebraných do PE sáčků

1. Vzorek půdy byl odebrán ze zvolené hloubky kopané sondy pomocí polní lopatky a nože.
2. Ihned po odebrání byl vložen do polyetylénového sáčku (PE) a zvážen na přesné laboratorní váze.
3. Na PE sáček byla napsána hmotnost vzorku, datum, místo a hloubka odběru. Tyto údaje se též zaznamenaly do zápisníku.
4. V laboratoři se poté stanovil objem vzorků pomocí odměrného válce, který se naplnil vodou do určité výšky (objemu) a následně se do něj vložil vzorek půdy a odečetla se hladina vody ve válci. Objem vzorku je dán rozdílem objemu vody ve válci se vzorkem a objemu vody ve válci bez vzorku. Naměřené hodnoty byly zapsány do záznamníku.
5. Každý vzorek se po změření jeho objemu přesunul na zváženou laboratorní misku a umístil do sušičky. Sušička byla nastavena na teplotu 60°C a vzorky v ní byly uloženy po dobu minimálně 24 hodin.
6. Po vysušení byly vzorky opět zváženy a hmotnost vzorku, včetně misky, zaznamenána do zápisníku.
7. Z naměřených hodnot bylo možné vypočítat hmotnostní vlhkost (7), objemovou vlhkost při odběru (8) a objemovou hmotnost (2). Pro výpočet pórovitosti by bylo potřeba znát přesnou hodnotu hustoty pevných částic minerálů vyskytujících se v půdě.

5.4. Měření bodů retenční čáry

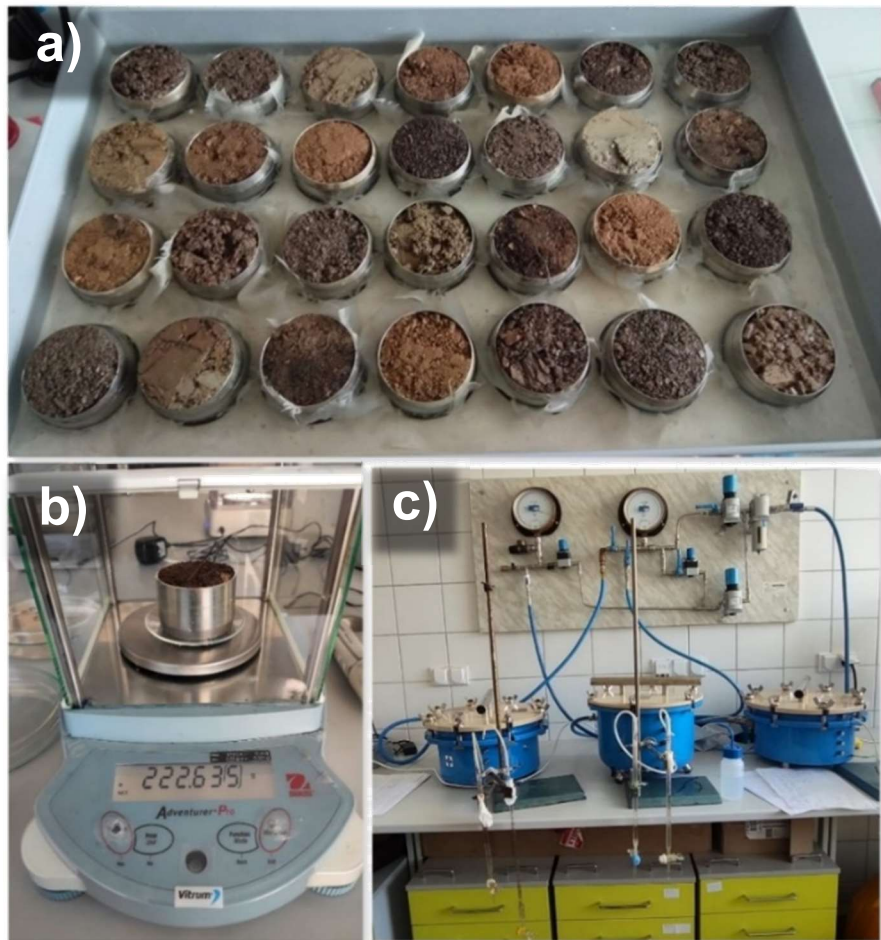
Měření bodů retenční křivky se provádělo na podtlakové a přetlakové aparatuře firmy Eijkelkamp Soil & Water ve dnech 11.9.2019 - 12.8.2020. Měřeny byly odebrané vzorky do Kopeckého válečků: borovice (vrchní + spodní vrstva půdy), modřín (vrchní vrstva půdy). Pro hodnoty vlhkostního potenciálu do 10 kPa (pF 2) se používal pískový tank a do hodnot 1,5 MPa (pF 4,2) se používaly přetlakové aparatury.

Před zahájením samotného měření bylo potřeba vzorky přivezené z terénu připravit. Z tupé strany Kopeckého válečku bylo opatrně sejmuto víčko a váleček byl opatrně očištěn. Na tuto stranu válečku byla nasazena předem připravená

hydrofilní gáza, která byla k válečku připevněna gumičkou. Poté bylo odebráno víčko i z druhé strany válečku a obě víčka byla zvážena na laboratorní váze.

5.4.1. Postup měření

1. Dne 11.9.2019 byly vzorky umístěny do pískového tanku s 0,5 cm hladinou destilované vody, kde se nechaly několik hodin přizpůsobovat. Následně byla do tanku opatrně dolita destilovaná voda tak, aby hladina vody byla 1 cm pod hranou válečku (při neopatrném nalití vody by mohlo dojít k poškození struktury půdy).
2. Před samotným začátkem sycení se každý vzorek jemně přitlačil a pootočil, a to zejména z důvodu zajištění dokonalého kontaktu vzorku s pískovým podkladem.
3. Vzorky v pískovém tanku (Obr. 11a) se nechaly sytit tak dlouho, dokud nebylo dosaženo stavu plného nasycení (16.9.2019 tzn. 5 dní od počátku sycení).
4. Po dosažení stavu plného nasycení (pF 0) byly vzorky zváženy na váze (vzorek + látka + gumička + sklíčko) a naměřené hodnoty byly zapsány do zápisníku. Při nízkých hodnotách pF bylo nutné nechat vzorek přibližně 5-10 sekund okapat (odstranění přebytečné vody).
5. Na pískovém tanku se nastavovaly další hodnoty pF. Vždy, když bylo dosaženo ustáleného stavu při dané hodnotě pF, byly vzorky zváženy (Obr. 11b) a naměřené hodnoty zaznamenány. Hodnoty pF byly zaznamenány ve dnech: pF 1 - 18.9.2019, pF 1,5 - 23.9.2019, pF 1,8 - 27.9.2019, pF 2 - 3.10.2019.
6. Po změření hodnot pF na pískovém tanku byly vzorky přemístěny do přetlakového aparátu (Obr. 11c) na navlhčenou keramickou desku, kde se přitlačily a pootočily. Následně se nádoba uzavřela a utáhla jistíci šrouby. Poté se nastavily hodnoty tlaku, kterou jsme chtěli měřit.
7. Následovalo sledování vzestupu hladiny v byretě a čekání na ukončení drenáže vzorků. Jakmile bylo dosaženo rovnovážného stavu, byl vypuštěn vzduch z nádob. Vzorky byly opět převáženy a hodnoty měření zaznamenány do zápisníku. Hodnoty pF byly zaznamenány ve dnech: pF 3 -12.12.2019, pF 3,47- 5.2.2020, pF 4,18 -12.8.2020.



Obr. 11 a) umístění odebraných půdních vzorků v pískovém tanku b) vážení půdního vzorku po dosažení ustáleného stavu při dané hodnotě pF c) probíhající měření pF na přetlakové aparatuře

5.5. Statistická analýza

Statistické vyhodnocení bylo provedeno v matematickém softwaru R, který je specializovaný na statistiku. Bylo použito grafické uživatelské prostředí RStudio a programovací jazyk R.

U datových souboru byla vypočtena základní popisná statistika (minimum, maximum, medián, průměr, směrodatná odchylka, koeficient variace atd.). Pro snazší porovnání výsledných hodnot bylo provedeno grafické vyobrazení pomocí krabicových grafů (boxplotů). Datové soubory byly otestovány testem normality Shapiro–Wilk. Následně byla data využita pro následující statistické testy.

Data byla testována na shodu průměrů pomocí jedno-faktorové analýzy rozptylu (ANOVA) a poté byl proveden Tukey honest significant difference test (Tukey HSD test). Pro stanovení významnosti vlivu rekultivační dřeviny (lípa, borovice, modřín) na jednotlivé půdní hydrofyzikální vlastnosti (K_s , vlhkost při odběru, objemovou hmotnost, pórovitost) byla ověřována následující nulová hypotéza: V aritmetických průměrech je skutečný rozdíl nulový. Vliv rekultivační dřeviny na průměr hodnot zkoumané charakteristiky dané vrstvy půdy je zanedbatelný, pokud byla přijata nulová hypotéza. Jestliže ANOVA analýza zamítla nulovou hypotézu byl proveden Tukey HSD test. Statistické testy byly provedeny na hladině významnosti 0,05.

Pro jednotlivé druhy dřevin byly nakonec provedeny párové T-testy, které porovnávají odlišnosti výsledků v jedné datové skupině od druhé datové skupiny (vrchní a spodní vrstva půdy).

6. Výsledky

6.1. Nasycená hydraulická vodivost

Pro vyhodnocení nasycené hydraulické vodivosti (K_s) byl použit vzorec (9). Měřené hodnoty K_s jsou uvedeny v příloze 1.

Tab. 4 Popisná statistika hodnot K_s stanovených Guelphským permeametrem.

Dominantní druh na lokalitě	Mělký vrt			Hluboký vrt		
	Lípa	Borovice	Modřín	Lípa	Borovice	Modřín
Minimum	2,23E-06	1,14E-05	2,15E-05	1,27E-05	2,37E-06	3,25E-06
Maximum	9,30E-05	8,50E-05	3,09E-04	1,40E-04	3,38E-05	4,45E-05
Průměr	2,56E-05	4,94E-05	1,23E-04	9,05E-05	1,42E-05	2,61E-05
Medián	9,37E-06	6,89E-05	6,57E-05	9,00E-05	1,02E-05	3,69E-05
Směrodatná odchylka	3,81E-05	3,50E-05	1,24E-04	5,31E-05	1,26E-05	1,90E-05
Koeficient variace	1,49E+00	7,08E-01	1,00E+00	5,87E-01	8,91E-01	7,27E-01
ANOVA	p=1,59E-01			p=7,47E-03		

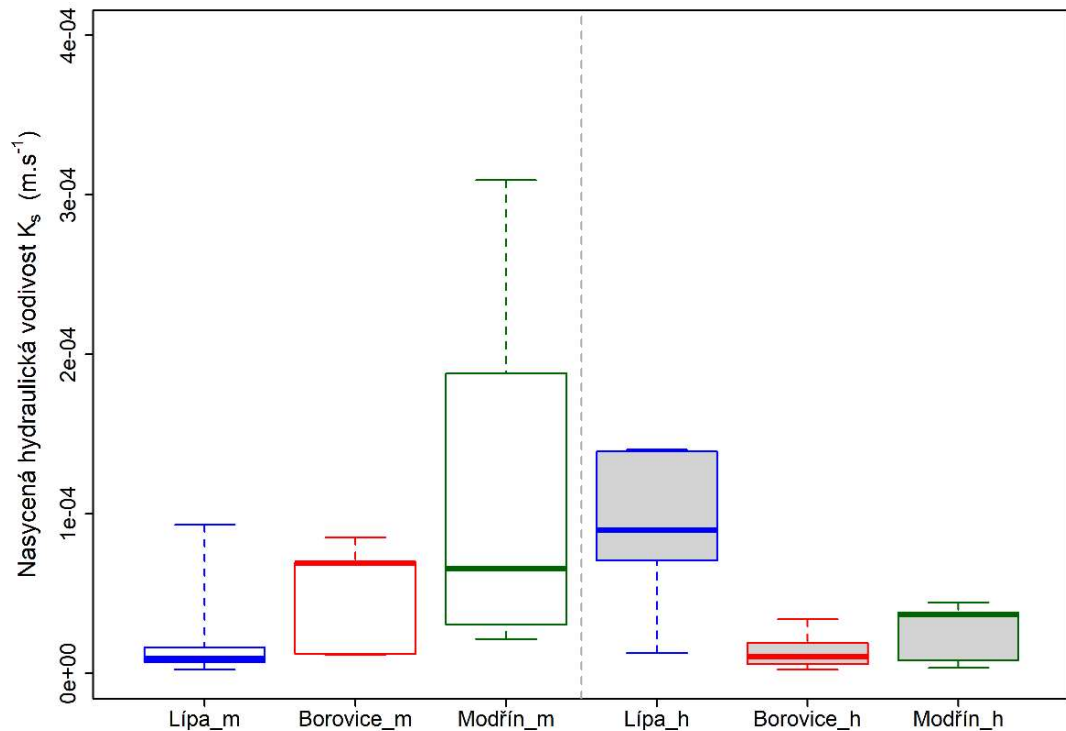
Z Tab.4 je patrné, že mezi vyhodnocovanými dřevinami byly nejvyšší průměrné hodnoty K_s zaznamenány ve vrchní vrstvě půdy u modřínu a nejnižší u lípy. Ve spodní vrstvě půdy byla nejvyšší průměrná hodnota K_s zjištěna u lípy a nejnižší u borovice. Hodnoty K_s lípy ve spodní vrstvě půdy jsou signifikantně vyšší než u ostatních dřevin. Největší variabilita byla naměřena u lípy ve vrchní vrstvě půdy (koeficient variace 1,49). Ve spodní vrstvě půdy dosahuje největší variability borovice. Vybraná popisná statistika znázorněná graficky pomocí boxplotu je na Obr.12.

Statisticky významné rozdíly v průměrných hodnotách nasycené hydraulické vodivosti byly zjištěny testem ANOVA ve spodní vrstvě půdy (hluboký vrt). V mělkém vrtu žádné statisticky významné rozdíly test neodhalil (Tab.4). Pro hodnoty K_s v hlubokých vrtech byl proveden Tukey HSD test pro párové porovnání rozdílů v průměrech mezi jednotlivými zájmovými lokalitami (Tab.5).

Tab. 5 Výsledky Tukey HSD testu pro hluboké vrty (B – Borovice, L – lípa, M - modřín).

Hluboký vrt	rozdíl průměrů [$m \cdot s^{-1}$]	p hodnota
B-L	-7,63E-05	0,0092
M-L	-6,44E-05	0,0253
M-B	1,19E-05	0,8404

U hlubokých vrtů byl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi borovicí a lípou a mezi modřínem a lípou (Tab. 5).



Obr. 12 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) měřené nasycené hydraulické vodivosti ($m \cdot s^{-1}$) na třech různých monokulturách — lípa, borovice, modřín ve vrchní vrstvě (m) a spodní minerální vrstvě (h).

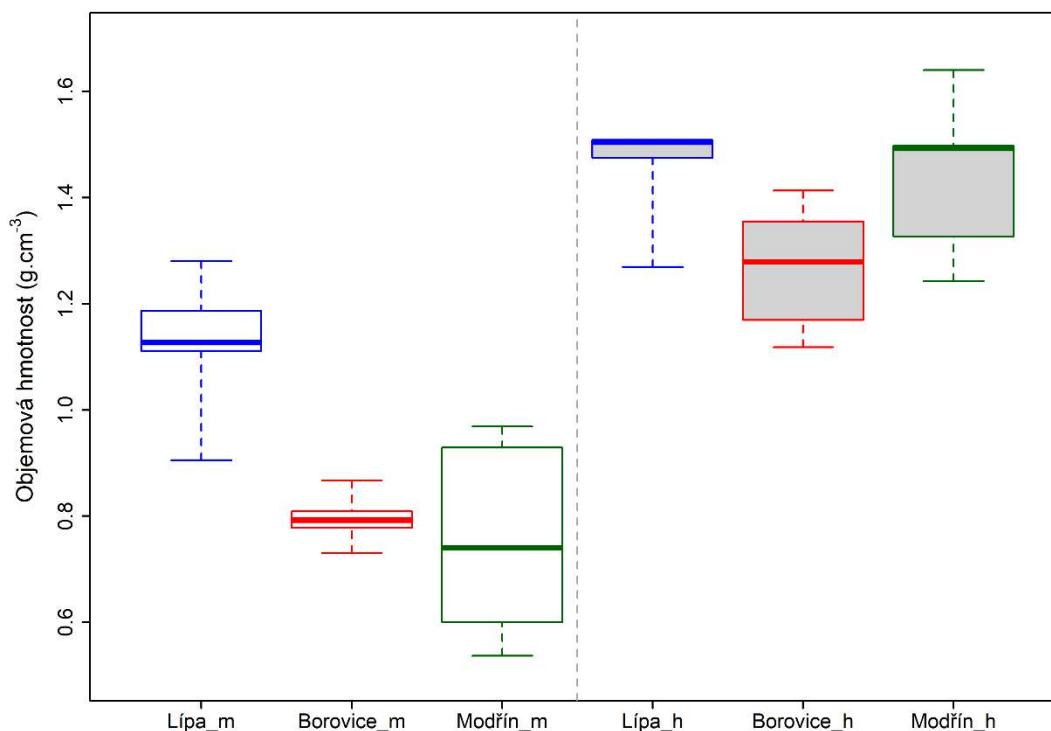
Rozdíly mezi průměry K_s ve vrchní a spodní vrstvě půdy byly pro každou dřevinu zvlášť porovnány T-testy. Provedené T-testy nevykázaly signifikantní rozdíly (p-hodnota pro lípu: 0,06031, pro borovici: 0,0875 a pro modřín: 0,1551). Pro lokalitu s borovicí a modřínem byly naměřeny vyšší průměrné hodnoty pro vrchní vrstvu půdy než pro spodní. Při větším množství provedených opakování měření na jednotlivých lokalitách a vrstvách (aktuálně 5 opakování, viz příloha 1) by výsledky již mohly vycházet významně.

6.2. Objemová hmotnost

Popisná statistika pro objemovou hmotnost je uvedena v Tab. 6 a pro přehlednost znázorněna v boxplotech na Obr.13. Měřené hodnoty objemové hmotnosti jsou v příloze 2.

Tab. 6 Popisná statistika hodnot objemové hmotnosti.

Dominantní druh na lokalitě	Vrchní vrstva			Spodní vrstva		
	Lípa	Borovice	Modřín	Lípa	Borovice	Modřín
Minimum	9,05E-01	7,30E-01	5,37E-01	1,27E+00	1,12E+00	1,24E+00
Maximum	1,28E+00	8,67E-01	9,69E-01	1,51E+00	1,41E+00	1,64E+00
Průměr	1,122113	0,79475	0,752433	1,453181	1,26875	1,440132
Medián	1,13E+00	7,92E-01	7,40E-01	1,50E+00	1,28E+00	1,49E+00
Směrodatná odchylka	1,38E-01	4,50E-02	1,72E-01	1,04E-01	1,12E-01	1,56E-01
Koeficient variace	1,23E-01	5,66E-02	2,29E-01	7,14E-02	8,80E-02	1,09E-01
ANOVA	p=6,53E-04			p=5,00E-02		



Obr. 13 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) objemové hmotnosti ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) na třech různých monokulturách — lípa, borovice, modřín ve vrchní vrstvě (m) a spodní minerální vrstvě (h).

Z Tab. 6 a Obr. 13 je patrné, že nejnižší a nejvyšší hodnota objemové hmotnosti byla naměřena u modřínu. Nejnižší objemová hmotnost byla naměřena na vzorcích z vrchní vrstvy půdy a nejvyšší na vzorcích ze spodní vrstvy půdy. U modřínu, ze vzorků odebraných z vrchní vrstvy půdy, byla zjištěna nejvyšší směrodatná odchylka a koeficient variace. Na vzorcích odebraných ve vrchní vrstvě půdy pod borovicí byla zjištěna nejnižší směrodatná odchylka i koeficient variace. Naměřené průměrné hodnoty objemové hmotnosti ve spodní vrstvě půdy byly pro všechny druhy dřevin (lípa, borovice, modřín) podobné. Ve vrchní vrstvě půdy se od průměrných naměřených hodnot výrazněji oddálily vzorky odebrané na lokalitě s monokulturou lípy. Tento výsledek však není směrodatný, jelikož byly tyto vzorky odebrány za specifických podmínek (viz kap. 5.1.3), ale i přesto je zde uveden pro porovnání s ostatními odebranými vzorky. Objemová hmotnost ve spodní vrstvě půdy byla celkově vyšší než objemová hmotnost naměřená na vzorcích odebraných z vrchní vrstvy půdy. Pro všechny monokultury byly nižší hodnoty objemové hmotnosti zaznamenány ve vrchní vrstvě půdy.

Z Tab.6 je zřejmé, že ANOVA test vyšel statisticky významný pro obě vrstvy půdy, a proto byl proveden Tukey HSD test (Tab. 7). Statisticky významné rozdíly průměrů byly zjištěny při porovnání objemové hmotnosti ve vrchní vrstvě mezi borovicí a lípou a rovněž mezi modřínem a lípou. Ve spodní vrstvě žádné statisticky významné rozdíly zjištěny nebyly.

Tab. 7 Výsledky Tukey HSD testu pro mělké a hluboké vrty (B – Borovice, L – lípa, M - modřín).

	Vrchní vrstva		Spodní vrstva	
	rozdíl průměrů [g.cm ⁻³]	p hodnota	rozdíl průměrů [g.cm ⁻³]	p hodnota
B-L	-3,27E-01	2,51E-03	-1,84E-01	7,22E-02
M-L	-3,70E-01	9,02E-04	-1,30E-02	9,85E-01
M-B	-4,23E-02	8,40E-01	1,71E-01	9,75E-02

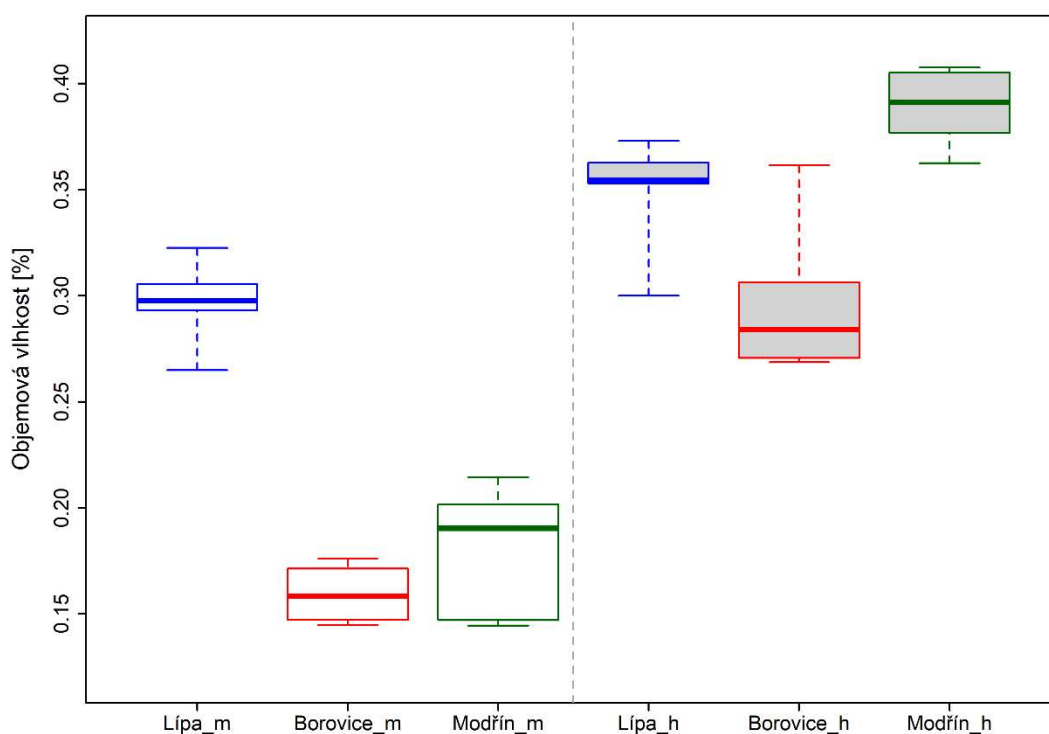
Provedený T-test, který porovnával naměřené hodnoty odebraných vzorků z vrchní a spodní vrstvy půdy jednotlivých dřevin, vyšel pro všechny hodnocené monokultury statisticky významný (hladina významnosti 0,05). Hodnota p pro monokulturu lípy vyšla: 1,25E-02, pro borovici: 8,06E-05 a pro modřín: 2,82E-07.

6.3. Objemová vlhkost při odběru

Popisná statistika pro objemovou vlhkost při odběru je uvedena v Tab. 8 a pro přehlednost znázorněna v boxplotech na Obr.14. Měřené hodnoty objemové hmotnosti jsou v příloze 3.

Tab. 8 Popisná statistika hodnot objemové vlhkosti při odběru.

Dominantní druh na lokalitě	Vrchní vrstva			Spodní vrstva		
	Lípa	Borovice	Modřín	Lípa	Borovice	Modřín
Minimum	2,65E-01	1,45E-01	1,44E-01	3,00E-01	2,69E-01	3,63E-01
Maximum	3,23E-01	1,76E-01	2,15E-01	3,73E-01	3,62E-01	4,08E-01
Průměr	2,97E-01	1,59E-01	1,81E-01	3,49E-01	2,96E-01	3,89E-01
Medián	2,98E-01	1,58E-01	1,90E-01	3,54E-01	2,84E-01	3,91E-01
Směrodatná odchylka	2,11E-02	1,27E-02	2,91E-02	2,83E-02	3,50E-02	1,92E-02
Koeficient variace	7,10E-02	7,96E-02	1,60E-01	8,13E-02	1,18E-01	4,94E-02
ANOVA	p=1,47E-07			p=5,09E-03		



Obr. 14 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) objemové vlhkosti (%) na třech různých monokulturách — lípa, borovice, modřín ve vrchní vrstvě (m) a spodní minerální vrstvě (h).

Z Tab. 8 a Obr.14 je zřejmé, že maximální hodnota vlhkosti při odběru byla naměřena na vzorcích odebraných ze spodní vrstvy půdy u modřínu a minimální hodnota vlhkosti při odběru byla zjištěna též u modřínu, ale ve vrchní vrstvě půdy.

Na vzorcích odebraných ze spodní vrstvy modřínu byla zjištěna i maximální průměrná hodnota objemové vlhkosti při odběru a medián. U borovice, v mělkém vrtu, byla zjištěna nejnižší průměrná hodnota objemové vlhkosti při odběru, medián i směrodatná odchylka. Pro všechny monokultury byly nižší hodnoty objemové vlhkosti při odběru zaznamenány ve vrchní vrstvě půdy.

Statistický test ANOVA (Tab.8) vyšel pro obě vrstvy půdy statisticky významný, a proto byl proveden Tukey HSD test. Statisticky významné rozdíly průměrů byly zjištěny při porovnání objemové vlhkosti při odběru ve vrchní vrstvě mezi borovicí a lípou a též mezi modřínem a lípou. Ve spodní vrstvě byly tyto rozdíly zjištěny mezi borovicí a lípou a rovněž mezi modřínem a borovicí (Tab. 9).

Tab. 9 Výsledky Tukey HSD testu pro mělké a hluboké vrtu (B – Borovice, L – lípa, M - modřín).

	Vrchní vrstva		Spodní vrstva	
	rozdíl průměrů [%]	p hodnota	rozdíl průměrů [%]	p hodnota
B-L	-1,37E-01	2,00E-07	-5,28E-02	2,47E-02
M-L	-1,15E-01	1,60E-06	4,00E-02	1,09E-01
M-B	2,20E-02	2,30E-01	9,28E-02	3,82E-04

T-testy provedené pro každou dřevinu (vrchní + spodní vrstvu půdy) vyšly statisticky signifikantní na hladině významnosti 0,05 (p hodnota lípy: 1,25E-02, borovice: 8,06E-05 a modřínu: 2,82E-07).

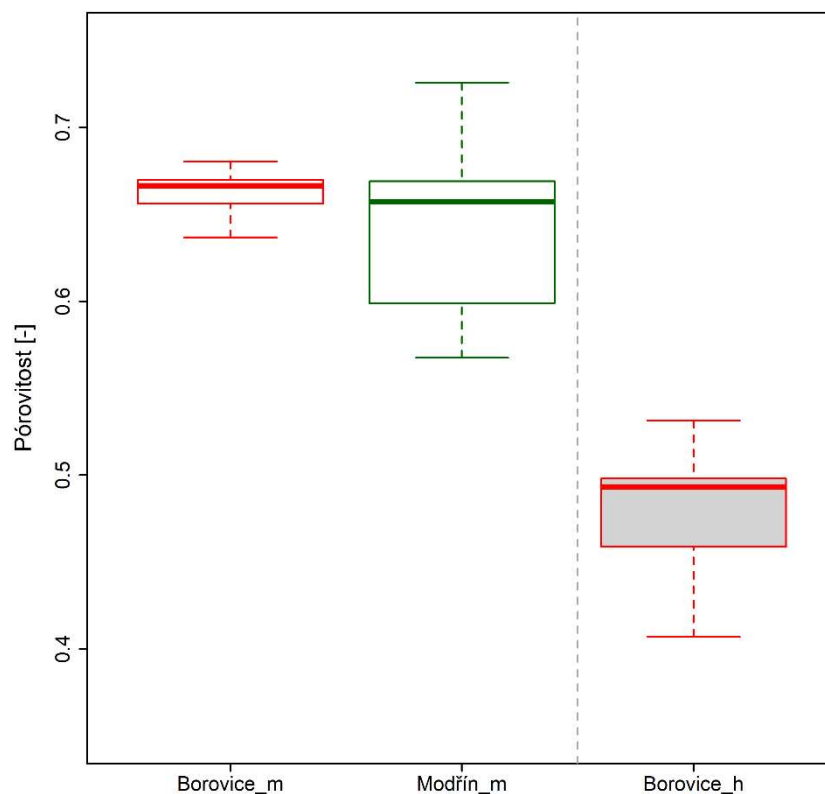
6.4. Pórovitost

Měřené hodnoty pórovitosti jsou uvedeny v příloze 4. Popisná statistika pro pórovitost je uvedena v Tab. 10 a na Obr. 15 je zobrazena pomocí boxplotů. Pórovitost byla měřena pouze pro vzorky odebrané do Kopeckého válečků (borovice z vrchní + spodní vrstvy půdy a modřín z vrchní vrstvy půdy), jelikož pro ostatní vzorky nebylo možné hodnotu pórovitosti přesně stanovit (viz kap. 5.3.2.).

Tab. 10 Popisná statistika hodnot pórovitosti.

Dominantní druh na lokalitě	Vrchní vrstva		Spodní vrstva
	Borovice	Modřín	Borovice
Minimum	6,37E-01	5,68E-01	4,07E-01
Maximum	6,80E-01	7,26E-01	5,31E-01
Průměr	6,63E-01	6,46E-01	4,80E-01
Medián	6,66E-01	6,57E-01	4,93E-01
Směrodatná odchylka	1,49E-02	5,59E-02	4,27E-02
Koeficient variace	2,25E-02	8,66E-02	8,90E-02
ANOVA	p=4,95E-01		-

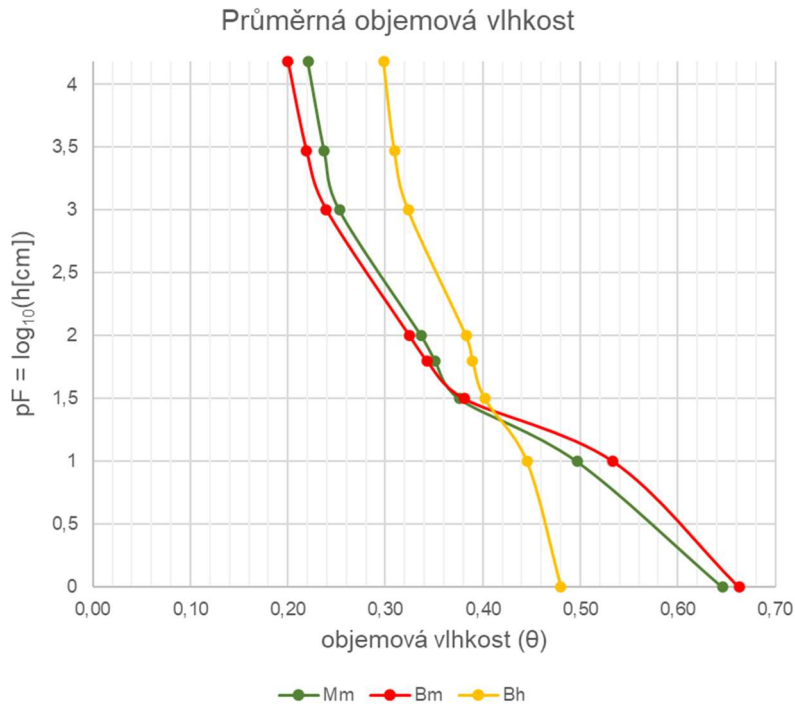
Z grafického zobrazení popisné statistiky (Obr. 15) je na první pohled zřejmé, že vzorek odebraný ze spodní vrstvy půdy má nižší pórovitost než vzorky odebrané ve vrchní části půdy. Nejvyšší průměrné hodnoty pórovitosti byly naměřeny u vzorků borovice odebraných ve vrchní vrstvě půdy a nejnižší průměrné hodnoty pórovitosti byly zjištěny u vzorků borovice ve spodní vrstvě půdy. Z Tab.10 je patrné, že nejnižší směrodatná odchylka a koeficient variace byly naměřeny u borovice ve vrchní vrstvě půdy. Na základě výsledků ANOVA testu pro vrchní vrstvu půdy nemohla být zamítnuta nulová hypotéza, jelikož p hodnota byla větší než zvolená hladina významnosti (0,05). Test tedy vyšel statisticky nevýznamný. Párový T-test pro monokulturu borovice (vrchní + spodní vrstva půdy) vyšel signifikantní (p hodnota borovice: 5,09E-05).



Obr. 15 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) pórovitosti (-) na dvou různých monokulturách — borovice ve vrchní vrstvě (m) a spodní minerální vrstvě (h) a modřín ve vrchní vrstvě (m).

6.5. Retenční čáry a ekvivalentní velikosti pórů

Měřené průběhy retenčních čar jsou vyobrazeny na Obr.16. Nulový podtlak pF 0 čili 0 cm vodního sloupce je hodnota odpovídající plnému nasycení půdy vodou (= odhad celkové pórovitosti). Výšku vodního sloupce 100 cm značí pF 2 (plní vodní kapacita).



Obr. 16 Průběh retenčních čar modřínu - mělký vrt (Mm) a borovice – mělký (Bm) a hluboký vrt (Bh).

Z Obr.16 je patrné, že vývoj retenčních křivek pro borovici a modřín ve vrchní vrstvě půdě se příliš neliší. Největší rozdíl mezi nimi je v rozmezí hodnot pF0 až pF1. Při porovnání naměřených hodnot z vrchní a spodní vrstvy půdy borovice je zřejmé, že největších rozdílů nabývaly hodnoty při pF 0. Nejmenší rozdíl mezi měřenými hodnotami borovice byl zjištěn při pF 1,5, kde byl zjištěn i nejmenší rozdíl odebraných vzorků z vrchní vrstvy půdy mezi borovicí a modřínem. Retenční křivka vzorků odebraných z hlubokého vrtu borovice je v průběhu odvodňování nejstrmější.

Obsah odvodněných pórů a odpovídající rozsahy ekvivalentních průměrů pórů pro vrchní a spodní vrstvu borovice a vrchní vrstvu modřínu zobrazuje Tab.11. Mírně vyšší obsah makropórů (>300 μm) byl naměřen u modřínu. Vyšších hodnot procentuálního zastoupení pórů nabývají vzorky ve stavu plného nasycení (pF 0) a téměř polovičních hodnot obsahu odvodněných pórů nabývají vzorky při pF 2.

Tyto rozdíly značí objem vody, které nedokáže půdní prostředí zdržet a voda skrz něj proteče. Polní vodní kapacita je nejmenší u vzorků odebraných ve vrchní vrstvě půdy u borovice.

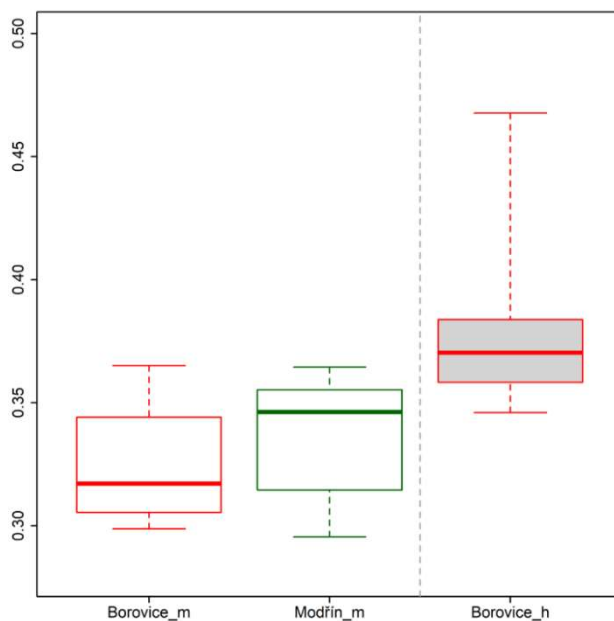
Tab. 11 Obsah odvodněných pórů (průměr pro dřevinu) a odpovídající rozsahy jejich ekvivalentní velikosti.

Nárůst podtlaku [cm]		od 0* do 10	od 10 do 32	od 32 do 100	> 500	od 0* do suché půdy	od 100 do suché půdy	
Odpovídající rozsah ekvivalentní velikosti pórů [µm]		> 300	od 90 do 300	od 30 do 90	< 6	Odhad celkové pórovitosti**		
Obsah odvodněných pórů [% objemu celého vzorku]	Vrchní vrstva	Modřín	14,91	12,09	3,89	33,70	64,59	33,70
		Borovice	12,90	15,30	5,61	32,46	66,27	32,46
	Spodní vrstva	Borovice	3,50	4,32	1,92	38,28	48,02	38,28

*Nulová hodnota odpovídá plnému nasycení vodou

**Póry všech velikostí

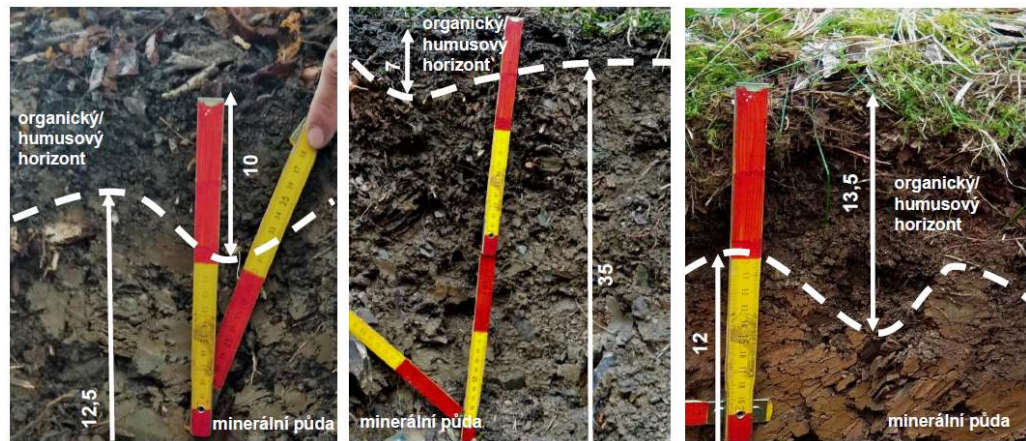
Hodnoty polní vodní kapacity, resp. objemové vlhkosti naměřené při pF 2 jsou graficky zobrazeny na Obr.17. Z něho je zřejmé, že rozptyl hodnot pro vzorky odebrané z vrchní vrstvy půdy borovice i modřínu jsou téměř stejné, avšak jejich medián se liší výrazněji. Provedený T-test na vzorcích odebraných z vrchní vrstvy půdy (borovice + modřín) vyšel statisticky nevýznamný (p hodnota: 0,4256).



Obr. 17 Boxploty (minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum) pro porovnání objemové vlhkosti při pF 2 (polní vodní kapacita) na dvou různých monokulturách — borovice, modřín ve vrchní vrstvě (m) a spodní minerální vrstvě (h).

6.6. Půdní profil

Půdní profily v kopaných sondách ukazují výrazné rozdíly ve vrchní části nově vznikající půdy na Velké podkrušnohorské výsypce mezi vybranými dřevinami (Obr. 18).



Obr. 18 Vrchní část půdního profilu v kopaných sondách nově vznikající půdy, pod monokulturami: a) lípa, b) borovice, c) modřín.

Z vrchních vertikálních řezů profilů v kopaných sondách je zřejmé, že organický/humusový horizont dosahuje u půdního profilu lípy mocnosti přibližně 10 cm. Největší tloušťku organického/humusového horizontu má půdní profil modřínu (cca 13,5 cm). Přechod z organického/humusového horizontu do minerální vrstvy je u vertikálního řezu profilu lípy i modřínu zřetelný, se zvlněným tvarem přechodu. Půdní profil borovice má ze všech vybraných dřevin nejmenší mocnost nově vzniklé půdy - přibližně 7 cm. Mezi organickým/humusovým horizontem borovice není příliš patrný přechod do minerální vrstvy.

7. Diskuse

Nasycená hydraulická vodivost (K_s) je při modelování pohybu vody a transportních procesů rozpuštěných látek půdním profilem klíčovým hydraulickým parametrem půdy (Jačka et al., 2014). Nejvyšší průměrná hodnota K_s byla naměřena pro vrchní vrstvu u půdy modřínu ($1,23E-04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), nejnižší u lípy ($2,56E-05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Vyšší hodnoty nasycené hydraulické vodivosti u lokality modřínu, v porovnání s borovicí, jsou nejspíše zapříčiněny větším množstvím agregátů v této vrstvě (viz obr. 18), které pravděpodobně vznikly vyšším zastoupením žížal a půdního edafonu (Walmsley et al., 2019). Aktivita žížal úzce souvisí s poměrem uhlíku (C) a dusíku (N) v opadance dřevin. Půda pod modřínem vykazuje výrazně nižší C:N než borovice (Frouz et al., 2013). Hodnoty K_s pro vrchní vrstvu u lípy jsou obtížně porovnatelné s hodnotami K_s pro modřín a borovici z důvodu provlhčení (viz 5.1.3) vrchní části profilu (a tím souvisejícími změnami porézního systému) vlivem srážkové události těsně před měřením. Po dešťové srážce může dojít k výraznému podhodnocení hodnot K_s vlivem bobtnání jílu a zamazání stěn při vrtání vrtu pro infiltrační test s Guelphským permeametroem (Bagarello, 1997).

Nejvyšší průměrná hodnota K_s ve spodní vrstvě půdy byla u lípy přibližně 6,5x vyšší než naměřená hodnota u borovice a přibližně 3,5x vyšší než naměřená hodnota u půdy modřínu. Naměřené hodnoty u lípy by již neměly být tak výrazně ovlivněny dešťovou srážkou jako tomu zřejmě bylo u vrchní vrstvy. V povrchových vrstvách půdy je možnost ovlivnění hodnot srážkovou událostí největší, s větší hloubkou se však míra ovlivnění snižuje (Kuráž, 2000).

Vyšší hodnoty nasycené hydraulické vodivosti podmiňují vyšší infiltraci vody do půdy. Teorii, že stromy zvyšují nasycenou hydraulickou vodivost, preferenční proudění a infiltraci podporuje většina studií (Burch et al., 1987; Lorimer, Douglas, 1995; Chandler, Chappell, 2008). Velký vliv na proudění mají kanálky podél kořenů stromů (Luo et al., 2019), které jsou dány charakteristickým kořenovým systémem konkrétního druhu dřevin (Luo et al., 2019). Kanálky podél kořenů tvoří systém makropórů, které mohou významně přispívat k proudění vody v půdě (Jarvis, 2007).

Ve vrchní vrstvě půdy u modřínu byla naměřena mírně nižší objemová hmotnost a mírně vyšší obsah makropórů ($> 300\mu\text{m}$, Tab.11) v porovnání s borovicí. Tyto výsledky zřejmě souvisí i s naměřenými vyššími hodnotami nasycené hydraulické vodivosti v porovnání s vrchní vrstvou půdy borovice. Objemová hmotnost může

být značně snížena aktivitou žížal, které v půdě vytvářejí makropóry (Edwards, Bohlen, 1996). V oblasti makropórů je rychlost proudění vyšší, což vede ke vzniku makropórového proudění (podmnožina preferenčního proudění). Ke zvýšení tohoto proudění dochází nejčastěji v období sucha (Schon et al., 2017). Ke stejným závěrům došli i (Cejpek, 2011; Linzmayerová, 2019), kteří zaznamenali u půdy olše nejnižší objemovou hmotnost a vyšší hodnoty pórovitosti v porovnání s ostatními zkoumanými lokalitami.

Nejvyšší průměrné hodnoty objemové vlhkosti při odběru ve vrchní vrstvě půdy byly zjištěny u lokality lípy (Tab.8). Tato vyšší průměrná hodnota oproti ostatním měřeným dřevinám byla způsobena pravděpodobně srážkovou událostí před samotným měřením na této lokalitě. Borovice a modřín ve vrchní vrstvě půdy vykazovaly nižší, leč velmi podobné hodnoty objemové vlhkosti při odběru, což mohlo být způsobeno přítomností preferenčních cest mezi makropóry. Voda by se tak snadněji mohla dostat do spodní vrstvy půdy, kde by nejspíše docházelo k její akumulaci (viz obr. 14). Na lokalitách s monokulturami borovice a modřínu byly naměřeny ve spodní vrstvě půdy vyšší hodnoty objemové vlhkosti při odběru než v půdě vrchní. Půda modřínu vykazovala výrazně vyšší hodnotu objemové vlhkosti při odběru (cca 40 %) než půda borovice (cca 30 %). Stejný trend, tedy snížení objemové vlhkosti v závislosti na hloubce, zjistil (Cejpek et al., 2013) ve své studii u monokultury olše.

Nejsilnější organicko/humusový horizont byl naměřen u půdy modřínu (13,5 cm), následovaný půdou lípy (10 cm). Vznik a vývoj organicko/humusového horizontu a půdních vlastností významně ovlivňuje druh opadu (Vesterdal et al., 2013). Stromy s mohutnější korunou mohou produkovat více opadu a tím zvýšit koncentraci uhlíku (C) v půdě. Zvýšení koncentrace C vede ke zpomalení rychlosti dekompozice (Sevgi et al., 2011). Vliv rychlosti dekompozice dává do souvislosti s poměrem C:N opadu vstupujícího do půdy (Vesterdal et al., 2013). Ke změně koncentrace uhlíku dochází dle (Sevgi et al., 2011) z důvodu rozdílného množství opadu, kvality uhlíku v opadu a množství uhlíku v kořenech stromů. Modřín dle (Menyailo et al., 2002) má nejlepší schopnost hromadit a zachytit uhlík v půdě. Jeho opad, který každoročně opadá, zapříčiňuje spolu s vyšším poměrem C:N (v porovnání např. s olší, břízou či osikou) pomalejší dekompozici. Mělce kořenící stromy, jako jsou právě některé jehličnany dle (Jandl et al., 2007) akumulují uhlík převážně v horizontu nadložního humusu.

Na Velké podkrušnohorské výsypce (Walmsley et al., 2019) porovnávala pěti různých druhů stromů (olši lepkavou *Alnus glutinosa*, modřín opadavý *Larix decidua*, borovici lesní a pokroucenou *Pinus sylvestris et contorta*, smrk ztepilý *Picea abies*, a dub letní *Quercus robur*) a zjistila, že množství celkového uhlíku v půdě je největší pod modřínem, následovaný olší. V případě množství dusíku (N) je trend opačný. Nejvíce N bylo zjištěno na půdě pod dřevinou olše. Humusový horizont byl u olše nejsilnější (cca 8 cm), následovaný modřínem (cca 7 cm). Velmi podobných závěrů se dobral i (Mudrák et al., 2010), který porovnával podrost v sedmi typech lesních porostů (rekultivovaná lokalita: olše lepkavá *Alnus glutinosa*, modřín opadavý *Larix decidua*, smrk pichlavý a omorika *Picea pungens et omorica*, dub letní *Quercus robur*, lípa malolistá *Tilia cordata* a lokalita spontánně zarostlá: bříza bělokorá *Betula pendula*, vrba jíva *Salix caprea*). Největší množství celkového dusíku v půdě naměřil pod olší. Na rozdíl od (Walmsley et al., 2019) však největší množství celkového uhlíku v půdě zjistil pod lípou, následovanou olší a modřínem. Humusový horizont byl rovněž nejsilnější u půdy olše (cca 9 cm), následovaný půdou lípy (cca 7 cm) a teprve pak půdou modřínu (cca 5 cm). Mocnosti jednotlivých horizontů povrchového humusu jsou však velmi variabilní a nelze pouze na základě této hodnoty činit závěry o humusové formě. Vždy je třeba brát v potaz i složení a biologickou aktivitu jednotlivých horizontů (Vavříček, Kučera, 2014).

Výzkum prováděný na Velké podkrušnohorské výsypce v rámci této diplomové práce má určitá omezení. Vzorky na lokalitě borovice a modřínu byly vzorkovány za prakticky stejných předchozích srážkových podmínek a jsou tudíž dobře porovnatelné. Avšak na lokalitě lípy se vyskytla před měřením intenzivní srážka. Jílové půdy mají svoje specifické vlastnosti např. smršťování a bobtnání, které jsou závislé na časové změně obsahu vody v půdě, což může vést k výraznému ovlivnění hydraulických vlastností půdy. Naměřené hodnoty nasycené hydraulické vodivosti jsou tak platné pouze pro stávající stav půdy. Dalším omezením je odběr půdních vzorků na lokalitě lípy a modřínu ve spodní vrstvě půdy z důvodu výskytu velmi pevných a křehkých jílových plátů (podrobněji viz kap. 5.1.3). Vzorkování probíhalo pouze na třech lokalitách, v jednom časovém kroku a odebíralo se jen několik půdních vzorků. Pro získání reprezentativnějších výsledků by bylo vhodné měření opakovat vícekrát, odebrat větší množství neporušených vzorků s vhodnějším způsobem odběru vzorků a zejména provést odběr a měření na lokalitách za stejných vlhkostních podmínek v půdě. Dále by bylo vhodné provést měření a odběr vzorků na jiných lokalitách se stejnou dominantní dřevinou pro

porovnání výsledků, jelikož měřené vlastnosti jsou v čase proměnlivé. Měření by bylo vhodné provádět po několik let a opakovat i za jiných podmínek, např. v období s větším výskytem srážek nebo v zimě. Takto získaná data by lépe vypovídala o hydrofyzikálních vlastnostech půdy na výsypce.

8. Závěr

Ze získaných dat lze tvrdit, že druh rekultivační dřeviny může mít zásadní vliv na vývoj a vlastnosti půdy. Statisticky významné rozdíly v klíčovém hydraulickém parametru půdy K_s , mezi lokalitami různých dřevin, byly zaznamenány pouze pro spodní vrstvu půdy. Průměrná hodnota K_s lípy ve spodní vrstvě půdy byla výrazně vyšší než průměrná hodnota K_s borovice a modřínu. Oproti tomu ve vrchní vrstvě půdy byla naměřená průměrná hodnota K_s u lípy menší než u borovice a modřínu. Je ale pravděpodobné, že vrchní vrstva půdy u lípy byla ovlivněna zmíněnou srážkovou událostí a nemůžeme vyloučit ani nepříznivý vliv zvlhčení půdy na zvolenou metodu měření nasycené hydraulické vodivosti.

U modřínu byl ve vrchní vrstvě naměřen mírně vyšší obsah makropórů ($> 300\mu\text{m}$) a mírně nižší objemová hmotnost než u borovice, což může souviset s vyššími hodnotami K_s v porovnání s borovicí. Naměřené hydrofyzikální vlastnosti byly u lípy ve vrchní vrstvě půdy téměř vždy vyšší (mimo K_s) než u zbylých dvou dřevin. Lokalita s monokulturou borovice vykazovala ve spodní vrstvě půdy nejnižší hodnoty všech měřených hydrofyzikálních vlastností, které bylo možné navzájem porovnat. Nejsilnější mocnost organického/humusové horizontu byla zjištěna u modřínu (13,5 cm) a nejnižší u borovice (7 cm). Tloušťka tohoto horizontu je nejspíše dána druhem a rozložitelností opadu a poměrem C:N.

Na základě zjištěných výsledků není možné dělat jednoznačné závěry, neboť měření bylo provedeno jen v jednom časovém kroku, s malým počtem opakování, různým způsobem odběru vzorků, za jiných srážkových událostí a pouze na třech lokalitách. Pro získání směřodatnějších výsledků by bylo potřeba opakovat měření vícekrát, odebrat větší množství vzorků stejným způsobem odběru a za stejných klimatických podmínek pro všechny vzorky. Výsledky pouze naznačují, že z hlediska hydraulických vlastností nově vznikající půdy může být pro rekultivaci jílovité výsypky příznivější modřín než borovice. Vliv lípy je nutné podrobněji otestovat.

Klimatické podmínky se v dnešní době velmi rychle mění. Dochází k častějšímu výskytu extrémního počasí, čímž souvisí i změna distribuce vodních srážek a tím spojená rizika s nedostatkem vody. Znalost vlivu dřevin na hydrofyzikální vlastnosti nově vznikající půdy nejenom na výsypkách je zásadní. Při správné volbě rekultivační dřeviny dokáže půda například zadržet více vody v období intenzivních

dešťů a akumulovat ji, což je důležité zejména v delších obdobích bez výskytu srážek.

Možný navazující výzkum by bylo vhodné doplnit o měření preferenčního proudění (např. pomocí toku barevného stopovače brilliant blue FCF), množství pedofauny (zejména žížal) a obsahu uhlíku a dusíku v půdě. Dále by bylo vhodné provést měření u dalších druhů dřevin a věnovat větší pozornost jejich kořenovému systému, jelikož ovlivňuje hydrofyzikální vlastnosti i chemii půdy.

9. Přehled literatury a použitých zdrojů

Abakumov E.V., Gagarina E.I., 2006: Regeneration soil formation on the spoil heaps of quarries on the Russian North-West. Publishing House of Saint Petersburg University, Saint Petersburg, 256 s.

Ács F., Horváth L., Breuer H., 2008: The role of soil in variations of the weather. *Agrokémia és Talajtan* 57. P. 225-238.

Alaoui A., Caduff U., Gerke H.H., Weingartner R., 2011: Preferential Flow Effects on Infiltration and Runoff in Grassland and Forest Soils. *Vadose Zone Journal* 10. P. 367-377.

Alaoui A., Helbling A., 2006: Evaluation of soil compaction using hydrodynamic water content variation: Comparison between compacted and non-compacted soil. *Geoderma* 134. P. 97-108.

Anderson M. G., Walling D. E., Bates P. D., 1996: Floodplain processes. Wiley, Chichester, 668 s.

Archer N. A. L., Quinton J. N., Hess T. M., 2002: Below-ground relationships of soil texture, roots and hydraulic conductivity in two-phase mosaic vegetation in south-east Spain. *Journal Arid Environments* 52. P. 535–553.

Aubert M., Margerie P., Trap J., Bureau F., 2010: Aboveground–belowground relationships in temperate forests: plant litter composes and microbiota orchestrates. *Forest Ecology and Management* 259. P. 563–572.

Bagarello V., 1997: Influence of well preparation on field-saturated hydraulic conductivity measured with the Guelph Permeameter. *Geoderma* 80.P. 169-180.

Benegas L., Ilstedt U., Roupsard O., Jones J., Malmer A., 2014: Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 183. P. 185–196.

Bargués Tobella A., Reese H., Almaw A., Bayala J., Malmer A., Laudon H., Ilstedt U., 2014: The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso. *Water Resources Research* 50. P. 3342–3354.

Bauhus J., Messier C., 1999: Soil exploitation strategies of fine roots in different tree species of the southern boreal forest of eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 29. P. 260–273.

- Begon M., Harper J. L., Townsend C. R., 1997: *Ekologie: Jedinci, populace, společenstva*. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, 949 s.
- Benegas L., Istedt U., Roupsard O., Jones J., Malmer A., 2014: Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 183. P. 185–196.
- Beven K., Germann P.F., 1982: Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research* 18. P. 1311–1325.
- Beven K., Germann P., 2013: Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resources Research* 49. P. 3071-3092.
- Bičík I., Cibulka J., Pošmourný K., Kukul Z., Hauptman I., 2009. *Půda v České republice*. Consult, Praha, 255 s.
- Bradshaw A., 1997: Restoration of Mined Lands – Using Natural Processes. *Ecological Engineering* 8. P. 255-269.
- Brom J., Nedbal V., Procházka J., Pecharová E., 2012: Changes in vegetation cover, moisture properties and surface temperature of a brown coal dump from 1984 to 2009 using satellite data analysis. *Ecological Engineering* 43. P. 45-52.
- Bundt M., Jäggi M., Blaser P., Siegwolf R., Hagedorn F., 2001: Carbon and Nitrogen Dynamics in Preferential Flow Paths and Matrix of a Forest Soil. *Soil Science Society of America Journal* 65. P. 1529-1538.
- Burch G.J., Bath R.K., Moore I.D., Loughlin E.M., 1987: Comparative hydrological behaviour of forested and cleared catchments in south-eastern Australia. *Journal of Hydrology* 90. P. 19-42.
- Castellano M. J., Valone T. J., 2007: Livestock, soil compaction and water infiltration rate: Evaluating a potential desertification recovery mechanism. *Journal of Arid Environments* 71. P. 97-108.
- Cejpek J., 2011: Vodní režim rekultivovaných a nerektivovaných výsypek. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Praha. 76 s. „nepublikováno“. DEP. Univerzita Karlova.
- Cejpek J., Kuráž V., Frouz J., 2013: Hydrological properties of soils in reclaimed and unreclaimed sites after brown-coal mining. *Polish Journal of Environmental Studies* 22. P. 645–652.
- Cejpek J., Kuráž V., Vindušková O., Frouz J., 2017: Water regime of reclaimed and unreclaimed post-mining sites. *Ecohydrology*. P. 1-9.

- Cerdà A., Jurgensen M.F., 2008: The influence of ants on soil and water losses from an orange orchard in eastern Spain. *Journal of Applied Entomology* 132. P. 306–314.
- Devitt D.A., Smith S.D., 2002: Root channel macropores enhance downward movement of water in a Mojave Desert ecosystem. *Journal of Arid Environments* 50. P. 99–108.
- Dimitrovský K., 1976: Rekultivační zeleň a její obnova. *Památky a příroda* 4. S. 225-240.
- Dimitrovský K., 2001: Tvorba nové krajiny na Sokolovsku. Sokolovská uhelná a.s., Sokolov, 191 s.
- Dvořák J., Růžička B., 1966: Geologická minulost země - Úvod do historické geologie a palentologie, SNTL, Praha, 796 s.
- Edwards C. A., Bohlen P. J., 1996: *Biology and ecology of earthworms*. Springer Science & Business Media, London.
- Elçi A., Molz F. J., 2009: Identification of lateral macropore flow in a forested riparian wetland through numerical simulation of a subsurface tracer experiment. *Water Air Soil Pollut* 197. P. 149–164.
- Elrick D., Reynolds W., Baumgartner K., Tan K., Bradshaw K., 1987: In-situ measurements of hydraulic properties of soils using the Guelph permeameter and the Guelph infiltrometer. In: Hallberg G.A., Ochs W. J., Schwab G. O. (eds.): *Proceedings of Third International Workshop on Land Drainage*. Ohio State University, Ohio U.S.A.. P. G13–G23.
- Frouz J., 1997: Changes in communities of soil dwelling dipteran larvae during secondary succession in abandoned fields. *European Journal of Soil Biology* 33. P. 57-65.
- Frouz J., 2002: The effect of soil macrofauna on litter decomposition and soil organic matter accumulation during soil formation in spoil heaps after brown coal mining: A preliminary results. *Ekologia Bratislava* 21. P. 363-369.
- Frouz J., 2008: Výsypky-pohroma nebo šance? *National Geographic Česko*. P.28-34.
- Frouz J., 2018: Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. *Geoderma* 332. P. 161-172.

Frouz J., Keplin B., Pižl V., Tajovský K., Starý J., Lukešová A., Nováková A., Balík V., Háněl L., Materna J., Heinkele T., 2001: Soil biota and upper soil layer development in two contrasting post-mining chronosequences. *Ecological Engineering* 17. P. 275-284.

Frouz J., Elhottová D., Kuráž V., Šourková M., 2005: Effects of soil macrofauna on other soil biota and soil formation in reclaimed and unreclaimed post mining sites: Results of a field microcosm experiment. *Applied Soil Ecology* 33. P. 308-320.

Frouz J., Elhottová D., Pižl V., Tajovský K., Šourková M., Píček T., Malý S., 2007a: The effect of litter quality and soil faunal composition on organic matter dynamics in post-mining soil: a laboratory study. *Applied Soil Ecology* 37. P. 72–80.

Frouz J., Pižl V., Tajovský K., 2007b: The effect of earthworms and other saprophagous macrofauna on soil microstructure in reclaimed and unreclaimed post-mining sites in Central Europe. *European Journal of Soil Biology* 43. P. 184–189.

Frouz J., Popperl J., Prikryl I., Štrudl J., 2007c: Tvorba nové krajiny na Sokolovsku. Sokolovská uhelná, právní nástupce, a.s., Sokolov.

Frouz J., Prach K., Pižl V., Háněl L., Starý J., Tajovský K., Materna J., Balík V., Kalčík J., Řehounková K., 2008: Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites. *European journal of soil biology* 44. P. 109-121.

Frouz J., van Diggelen R., Pižl V., Starý J., Háněl L., Tajovský K., Kalčík J., 2009a: The effect of topsoil removal in restored heathland on soil fauna, topsoil microstructure, and cellulose decomposition: implications for ecosystem restoration. *Biodiversity and Conservation* 18. P. 3963-3978.

Frouz J., Pižl V., Cienciala E., Kalčík J., 2009b: Carbon storage in post-mining forest soil, the role of tree biomass and soil bioturbation. *Biogeochemistry*. 94. P. 111-121.

Frouz J., Livečková M., Albrechtová J., Chroňáková A., Cajthaml T., Pižl V., Háněl L., Starý J., Baldrian P., Lhotáková Z., Šimáčková H., Cepáková Š., 2013: Is the effect of trees on soil properties mediated by soil fauna? A case study from post-mining sites. *Forest Ecology and Management* 309. P. 87-95.

Frouz J., Kuráž v., 2014: Soil fauna and soil physical properties. In: Frouz J. (ed.): *Soil biota and ecosystem development in post mining sites*. P. 265-278.

- Frouz J., Dvorščík P., Vávrová A., Doušová O., Kadochová Š., Matějčík L., 2015: Development of canopy cover and woody vegetation biomass on reclaimed and unreclaimed post-mining sites. *Ecological Engineering* 84. P. 233-239.
- Hardie M. A., Cotching W. E., Doyle R. B., Holz G., Lisson S., Mattern K., 2011: Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil. *Journal of Hydrology* 398. P. 191–201.
- Hendrickx J. M. H., Flury M., 2001: Uniform and Preferential Flow Mechanisms in the Vadose Zone. In: Feary D.A.(ed): *Conceptual Models of Flow and Transport in the Fractured Vadose Zone*. The National Academies Press, Washington, DC. P.149-187.
- Hillel D., 1998: *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego, 771 s.
- Hillel D., 2004: *Introduction to environmental soil physics*. Academic Press, San Diego, USA.
- Chandler K. R., Chappell N. A., 2008: Influence of individual oak (*Quercus robur*) trees on saturated hydraulic. *Forest Ecology and Management* 256. P. 1222-1229.
- Charbonnier F., Le Maire G., Dreyer E., Casanoves F., Christina M., Dautzat J., Eitel J.U.H., Vaast P., Vierling L.A., Roupsard O., 2013: Competition for light in heterogeneous canopies: application of MAESTRA to a coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry system. *Agricultural and Forest Meteorology* 181. P. 152-169.
- 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. P. 82 – 88.
- Pavlásek J., Jačka L., 2014: *Infiltrace vody do půdního prostředí*. Skriptum, ČZU, Praha.
- Jandák J., Pokorný E., Prax A., 2010: *Půdoznalství*. Mendelova univerzita v Brně, Brno, 143 s.
- Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R., Hagedorn F., Johnson D. W., Minkinen K., Byrne K. A., 2007: How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137. P. 253–268.
- Janssen B.H., 1996: Nitrogen mineralization in relation to C:N ratio and decomposability of organic materials. *Plant and Soil* 181. P. 39-45.

- Jarvis N. J., 2007: A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling, factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science* 58. P. 523-546.
- Jegou D., Schrader S., Diestel H., Cluzeau D., 2001: Morphological, physical and biochemical characteristics of burrow walls formed by earthworms. *Applied Soil Ecology* 17. P. 165–174.
- Jia G., Liu Z., Chen L., Yu X., 2017: Distinguish water utilization strategies of trees growing on earth-rocky mountainous area with transpiration and water isotopes. *Ecology and Evolution* 7. P. 10640–10651.
- Jiskra J., 1993: Z historie uhelného hornictví na Sokolovsku, Chebsku a Karlovarsku. Repropag, Sokolov, 325 s.
- Johnson D. B., 2003: Chemical and microbiological characteristics of mineral spoils and drainage waters at abandoned coal and metal mines. *Water Air Soil Pollution: Focus* 3. P. 47-66.
- Jonáš F., Peroutková K., 1997: Kultivace a rekultivace. Katedra biotechnických úprav krajiny LF - ZU, Praha, 189 s.
- Jonáš F., 1975: Určení způsobu rekultivace a tvorba nových půd na výsypkách v severočeském hnědouhelném revíru. Výzkumný ústav meliorací, Praha.
- Jůva K, Tlapák V., Pflug J., 1984: Meliorační Kultivace a rekultivace zemědělské půdy. Státní zemědělské nakladatelství. Praha, 302 s.
- Keesstra S., Pereira P., Novara A., Brevik E. C., Azorin-Molina C., Parras-Alcántara L., Jordán A., Cerdà A., 2016: Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards. *Science of The Total Environment* 551-552. P. 357-366.
- Kodešová R., 2005: Modelování v pedologii. Skriptum, ČZU, Praha.
- Kříbek B., Strnad M., Boháček Z., Sýkorová I., Čejka J., Sobalík Z., 1998: Geochemistry of Miocene lacustrine sediments from the Sokolov Coal Basin (Czech Republic). *International Journal of Coal Geology* 37. P. 207-233.
- Kupka I., Dimitrovský K., 2011: Výsledky testování vybraných dřevin pro lesnické rekultivace na Sokolovsku: review. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i. Zprávy lesnického výzkumu 56. P. 52 – 56.
- Kupka I., Podrázský V., Kubeček J., 2013: Soil-forming effect of Douglas fir at lower altitudes. *Journal of Forest Research* 59. P. 345-351.

- Kuráž V., 2000: Soil properties and water regime of reclaimed surface dumps in the North Bohemian brown-coal region - a field study. *Waste Manage* 21. P. 147-151.
- Kuráž V., Frouz J., Kuráž M., Mako A., Shustr V., Cejpek J., Romanov O. V., Abakumov, E. V., 2012: Changes in some physical properties of soils in the chronosequence of selfovergrown dumps of the Sokolov quarry–dump complex. *Eurasian Soil Science* 45. P. 266-272.
- Kutílek, M., 1984: Vlhkost pórovitých materiálů. SNTL, Praha, 211 s.
- Kutílek M., 1978: Vodohospodářská pedologie. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 295 s.
- Kutílek M., Nielsen D.R., 1994: Soil Hydrology. Catena, Cremlingen-Destet.
- Kutílek M., Kuráž V., Císlerová M., 2004: *Hydropedologie 10*. Skriptum ČVUT, Praha.
- Kvaček Z., Konzalová M., Obrhelová N., 1987: Biostratigrafie a prostředí vzniku cyprisových jílovců západočeského terciéru. MS Geologického ústavu Československé akademie věd, Praha.
- Kvítek T., Gergel J., Ondr P., Zámešková, K., 2006: Zemědělské meliorace, Jihočeská univerzita, Zemědělská fakulta, České Budějovice.
- Laine-Kaulio H., Backnäs S., Koivusalo H., Laurén A., 2015: Dye tracer visualization of flow patterns and pathways in glacial sandy till at a boreal forest hillslope. *Geoderma* 259–260. P. 23-34.
- Legout C., Leguédou S., Le Bissonnais Y., 2005: Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements. *European Journal of Soil Science*. P. 225-237.
- Leitgeb J., 2010: Velké rekultivační stavby v příměstské části měst a obcí Sokolovska. *Stavebnictví* 8. S. 22-26.
- Leung A. K., Garg A., Coe J. L., Ng C. W. W., Hau B. C. H., 2015: Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity. *Hydrological Processes* 29. P. 3342-3354.
- Li Y. Y., Shao M. A., 2006: Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Environments* 64. P. 77-96.

- Liu H., Lennartz B., 2015: Visualization of flow pathways in degraded peat soils using titanium dioxide. *Soil Science Society of America Journal* 79. P. 757–765.
- Lorimer M.S., Douglas L.A., 1995: Effect of management practice on properties of a Victorian red brown earth I. Soil physical properties. *Australian Journal of Soil Research* 33. P. 851–857.
- Luo Z., Niu J., Zhang L., Chen X., Zhang W., Xie B., Zhu Z, Wu S, Li X., 2019: Roots- enhanced preferential flows in deciduous and coniferous forest soils revealed by dual-tracer experiments. *Journal of Environmental Quality* 48. P. 136–146.
- Lyle E. S., 1987: *Surface mine reclamation manual*. Elsevier Science, New York, 268 s.
- Marashi A. R. A., Scullion J., 2003: Earthworm casts form stable aggregates in physically degraded soils. *Biology and Fertility Soils* 37. P. 375-380.
- Matula S., Semotán J., Veselá J., 1989: *Hydropedologie - praktikum*. ČVUT, Praha, 144 s.
- McClougherty Ch., 2001: Soils and Decomposition. *Encyclopedia of Life Sciences*. P. 1-8.
- Menyailo O. V., Hungate B. A., Zech W., 2002: Tree species mediated soil chemical changes in a Siberian artificial Tree species and soil chemistry. *Plant and soil* 242. P. 171–182.
- Merdun H., Çınar Ö., Meral R., Apan M., 2006: Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research* 90. P. 108-116.
- Mermoud A., Xu D., 2006: Comparative analysis of three methods to generate soil hydraulic functions. *Soil and Tillage Research* 87. P. 89-100.
- Moffat A. J., Bending N. A. D., 2006: Replacement of soil and soil-forming materials by loose tipping in reclamation to woodland. *Soil Use and Management* 16. P. 75-81.
- Mudrák O., Frouz J., Velichová V., 2010: Understorey vegetation in reclaimed and unreclaimed post-mining forest stands. *Ecological Engineering* 36. P. 783-790.
- National Research Council, © 2001: *Conceptual Models of Flow and Transport in the Fractured Vadose Zone*. National Academy Press, Washington DC, 392 s.

Němeček J., Kutílek M., Smolíková L., 1990: Pedologie a Paleopedologie. Academia, Praha, 546 s.

Němeček J., Muhlhanselová M., Macků J., Vokoun J., Vavříček D., Novák P., 2011: Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. Česká zemědělská univerzita, Praha, 94 s.

Nimmo J. R., 2009: Vadose Water. In: Nimmo J. R. (ed): Encyclopedia of Inland Waters. Academic Press, California. P. 766-777.

Nyssen J., Clymans W., Descheemaeker K., Poesen J., Vandecasteele I., Vanmaercke M., Zenebe A., Van Camp M., Haile M. Haregeweyn, N., 2010: Impact of soil and water conservation measures on catchment hydrological response—a case in north Ethiopia. Hydrological processes 24. P. 1880-1895.

Pavlásek J., Jačka L., 2014: Hydopedologie. Skriptum, ČZU, Praha.

Pešek J., Adámek J., Brzobohatý R., Bubík M., Cicha I., Dašková J., Doláková N., Elznic A., Hladilová Š., Holcová K., Honěk J., Hoňková K., Krásný J., Krejčí O., Kvaček J., Kvaček Z., Macůrek V., Opluštěl S., Radek M., Pálenský P., Rojík P., Skupien P., Spudil J., Sýkorová I., Šikula J., Švábenická L., Teodoridis V., Titl F., Tomanová-Petrová P., Ulrych J., Franců J., Fejfar O., Jurková Z., 2010: Terciární pánve a ložiska hnědého uhlí České republiky. Česká geologická služba, Praha, 438 s.

Petránek J., Březina J., Břízová E., Cháb J., Loun J., Zelenka P., 2016: Encyklopedie geologie. Česká geologická služba, Praha.

Pižl V., 1992: Succession of earthworm populations in abandoned. Soil Biology and Biochemistry 24. P. 1623-1628.

Podhájský M., Smolík D., 1986: Technologické postupy úprav krajiny po těžbě a zpracování rudných a nerudných surovin rekultivacemi 30. Nakladatelství technické literatury, Praha, 284 s.

Podrázský V., Remeš J., 2010: Vliv druhové skladby lesních porostů na stav humusových forem na území ŠLP v Kostelci nad Černými lesy. Zprávy lesnického výzkumu 55. S. 71-77.

Pokorná D., Zabranská J., 2008: Hydrologie a hydopedologie. VŠCHT, Praha.

Prach K., 1996: Úvod do vegetační ekologie. Vysoká škola báňská, Technická univerzita, Ostrava.

Quitt E., 1971: Klimatické oblasti Československa. *Studia Geographica* 16. Academia, Praha, 73 s.

Rejšek K., Vácha R., 2018: *Nauka o půdě*. Agriprint, Olomouc, 530 s.

Reynolds W. D., 2008: Saturated hydraulic properties: Well permeameter. In: Carter M., R., Gregorich E., G. (eds.): *Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, USA. P. 1025–1042.

Reynolds W. D., Elrick D. E., Youngs E.G., Amozegar A., Booltink H. W. G., Bouma J., 2002: Saturated and field-saturated water flow parameters: laboratory methods. In: Dane J., Topp C. (eds): *Methods of Soil Analysis, Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America. P. 802-804.

Reynolds W. D., Lewis K. L., 2012: A drive point application of the Guelph Permeameter method for coarse-textured soils. *Geoderma* 187–188. P. 59–66.

Richards I. G., Palmer J. P., Barratt P. A., 1993: *The reclamation of former coal mines and steelworks*. Elsevier Science Ltd, Amsterdam, 717 s.

Rosenbaum U., Bogena H. R., Herbst M., Huisman J. A., Peterson T. J., Weuthen A., Western A. W., Vereecken H., 2012: Seasonal and event dynamics of spatial soil moisture patterns at the small catchment scale. *Water Resources Research* 48. P. 1–22.

Rothbauer I. M., Svoboda I., Jílek J., Součková E., Šobr M., Hrdlička P., Bedrna J., Beránek K., Wichsová M., 2003: Územní prognóza území dotčeného těžbou hnědého uhlí na Sokolovsku. *Ateliér T-Plán*, Praha, 107 s.

Roubíčková A., Frouz J., 2014: Performance of the earthworm *Apporectodea caliginosa* on unreclaimed spoil heaps at different successional stages. *European Journal of Soil Biology* 65. P. 57-61.

Rowell D. L., 1994: *Soil science – methods and applications*. Longman Scientific and Technical, New York, 350 s.

Salmon S., Artuso N., Frizzera L., Zampedri R., 2008: Relationships between soil fauna communities and humus forms: Response to forest dynamics and solar radiation. *Soil Biology and Biochemistry* 40. P. 1707-1715.

Sander T., Gerke H. H., 2009: Modelling field-data of preferential flow in paddy soil induced by earthworm burrows. *Journal of Contaminant Hydrology* 104. P. 126–136.

- Sendlein L. V. A., Yazicigil H., Carlson C. L., 1983: Surface mining environmental monitoring and reclamation handbook. New York, Elsevier.
- 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. P. 1569–1578.
- Scullion J., Malik A., 2000: Earthworm activity affecting organic matter, aggregation and microbial activity in soils restored after opencast mining for coal. Soil Biology and Biochemistry 32. P. 119–126.
- Setälä H., Marshall V.G., Trofymow J. A., 1996: Soil Biology and Biochemistry 28. P. 1661- 1675.
- Sevgi O., Makineci E., Karaoz, O., 2011: The forest floor and mineral soil carbon pools of six different forest tree species. Ekoloji 81. P. 8–14.
- Sheng F., Liu H., Wang K., Zhang R., Tang Z., 2014: Investigation into preferential flow in natural unsaturated soils with field multiple-tracer infiltration experiments and the active region model. Journal of Hydrology 508. P. 137–146.
- Scheu S., Schulz E., 1996: Secondary succession, soil formation and development of a diverse community of oribatids and saprophagous soil macro-invertebrates. Biodiversity & Conservation 5. P. 235-250.
- Schon N. L., Mackay A. D., Gray R. A., van Koten C., Dodd M. B., 2017: Influence of earthworm abundance and diversity on soil structure and the implications for soil services throughout the season. Journal of Soil Ecology 62. P. 41-47.
- Sklenička P., 2003: Základy krajinného plánování. Naděžda Skleničková, Praha, 321 s.
- Smolíková L., 1988: Pedologie I.. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 129 s.
- Šarapatka B., 2014. Pedologie a ochrana půdy. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 232 s.
- Šimek M., 2003: Základy nauky o půdě - 1. Neživé složky půdy. Jihočeská univerzita, Biologická fakulta, České Budějovice, 131 s.
- Šímová I., 2004: Sukcese zooplanktonu a zoobentosu ve vodních nádržích oblasti Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, České Budějovice. 86 s. (disertační práce). „nepublikováno“. Dep. NUŠL.

- Šourková M., Frouz J., Fettweiss U., Bens O., Huttli R. F., Šantrůčková H., 2005: Soil development and properties of microbial biomass succession in reclaimed post mining sites near Sokolov (Czech Republic) and near Cottbus (Germany). *Geoderma* 129. P. 73-80.
- Špiřík F., 1994: Devastace půd těžbou nerostů a principy jejich rekultivací. In: Lhotský J. (ed.): *Kultivace a rekultivace půd. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy Praha, Praha. S. 143-155.*
- Štýs S., 1990: *Rekultivace území devastovaných těžbou nerostů. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 186 s.*
- Štýs S., Kostruch J., Neuberger Š., Pařízek J., Patejdl C., Smolík D., Špiřík F., Thiele V., Toběrná V., Vesecký J., 1981: *Rekultivace území postižených těžbou nerostných surovin. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 678 s.*
- Štýs S., Helešicová L., 1992: *Proměny měsíční krajiny. Bílý slon, Praha, 253 s.*
- Tajovský K., 1992. Feeding biology of the millipede *Glomeris hexasticha*. *Ber. Nat.-Med. Verein Innsbruck, Innsbruck 10. P. 305-311.*
- Tindall J. A., 1999: *Unsaturated zone hydrology for scientists and engineers, Prentice Hall, Upper Saddle River, 624 s.*
- Tomášek M., 2007: *Půdy České republiky. Česká geologická služba, Praha, 112 s.*
- Valášek V., Chytka L., 2009: *Velká kronika o hnědém uhlí. Minulost, současnost a budoucnost těžby hnědého uhlí v severozápadních Čechách. G2 studio, Plzeň, 379 s.*
- Valentová J., 1994: *Hydraulika podzemní vody. ČVUT, Praha.*
- van der Putten W. H., Bardgett R. D., Bever J. D., Bezemer T. M., Casper B. B., Fukami T., Kardol P., 2013: Plant-Soil Feedbacks: the past, the present and future challenges. *Journal of Ecology* 101. P. 265-276.
- Vašíček J., Bartoš Z., Henzlík V., Jankovská Z., Jansa V., Kraus M., Krchov V., Křístek Š., Macků J., Mansfeld V., Pacourek P., Pařízek M., Řezáč J., Sloup M., Sotorník M., Štěrbá P., Vančura K., Zeman M., 2007: *Národní inventarizace lesů v České republice 2001-2004. ČTK REPRO a.s., Brandýs nad Labem, 224 s.*
- Vesterdal L., Clarke N., Sigurdsson B. D., Gundersen P., 2013: Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? *Forest Ecology and Management* 309. P. 4-18.

Volný S., 1985: Deteriorizace a rekultivace krajiny. Vysoká škola zemědělská, Brno, 187 s.

Vráblíková, J., Šoch, M., Vráblík, P., 2009: Modelové řešení revitalizace průmyslových regionů a území po těžbě uhlí na příkladu Podkrušnohoří. Zpráva o řešení, A418. FŽP UJEP. Ústí nad Labem. 82 s.

Walmsley A., Vachová P., Hlava J., 2019: Tree species identity governs the soil macrofauna community composition and soil development at reclaimed post mining sites on calcium rich clays. *European Journal of Forest Research* 138. P. 753 -761.

Wang J., Wu F. Q., Meng Q. Q.: 2004: Benefits of tillage measures for soil and water conservation. *Bulletin of Soil and Water Conservation* 5:009.

Weil R. R., Brady N. C., 2016: The nature and properties of soils. Pearson Education Limited, Harlow, 1140 s.

Zehe E., Graeff T., Morgner M., Bauer A., Bronstert A., 2010: Plot and field scale soil moisture dynamics and subsurface wetness control on runoff generation in a headwater in the ore mountains. *Hydrology and Earth System Sciences* 14. P. 873–889.

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. P. 219–221.

Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G., 2008: Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. *Journal of Plant Ecology* 1. P. 85–93.

Zhang Y., Niu J., Yu X., Zhu W., Du X., 2015: Effects of fine root length density and root biomass on soil preferential flow in forest ecosystems. *Forest Systems* 24. P. 1-13.

Zhang J., Xu Z., 2016: Dye tracer infiltration technique to investigate macropore flow paths in Maka Mountain, Yunnan Province, China. *Journal of Central South University* 23. P. 2101- 2109.

Internetové zdroje

Anonym, 2014: Velká podkrušnohorská výsypka (online) [cit. 2020.11.6], dostupné z <<https://www.sokolov-vychod.cz/index.php?oid=4098042>>.

Anonym, 2016: Lesní půda (online) [cit. 2020.11.7], dostupné z <<https://www.mezistromy.cz/ekosystem-lesa/lesni-puda/odborny>>.

Broumová H., Novotná K., Šímová I., 2007: Výsypka po těžbě hnědého uhlí – unikátní krajinný novotvar (online) [2020.12.10], dostupné z <<http://docplayer.cz/16579438-Hana-broumova-katerina-novotna-iva-simova-laborator-aplikovane-ekologie-zemedelska-fakulta-jihoceska-univerzita-v-ceskych-budejovicich.html>>.

ČÚZK, ©2020. Základní mapy ČR (online) [cit. 2020.11.24], dostupné z <<https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>>.

Eijkelkamp, ©2011. Operating instructions. 09.07 Guelph permeameter (online) [cit.2020.12.09], dostupné z <<https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/548/download/464000/11-M1-0907eGuelphpermea.pdf>>.

Gremlica T., Cílek V., Vrabec V., Farkač J., Frouz J., Godány J., Lepšová, A., Příklad I., Rambousek P., Sádlo J., Starý J., Straka, J., Volf O., Zavadil V., 2011: Rekultivace a management nepřírodních biotopů v České republice: Závěrečná zpráva za celé období řešení projektu 2007-2011 (online) [cit.2020.11.27] dostupné z <[https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/rekultivace_neprirodnich_biotopu/\\$FILE/OOOPK-Zaverecna_zprava_2007-20150119.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/rekultivace_neprirodnich_biotopu/$FILE/OOOPK-Zaverecna_zprava_2007-20150119.pdf)>.

Mapy.cz, ©2020. Mapy.cz (online) [cit. 2020.11.11], dostupné z <<https://mapy.cz/letecka?x=12.6524976&y=50.2329848&z=13&source=base&i d=2148613>>.

Reynolds W. D., Elrick, D. E., 1984: Measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship using the "Guelph permeameter" (online) [cit.2021.01.14], dostupné z <<https://www.nrc.gov/docs/ML0037/ML003744523.pdf>>.

Vavříček D., Kučera A., 2014: Lesnická pedologie pro posluchače LDF Mendelu v Brně (online) [cit.2020.12.12], dostupné z <https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/skripta/Zaklady_lesnicke_pedologie.p>.

Vokoun, J. Nemeček J. Vavříček D., Macků J., 2002: Příručka pro průzkum lesních půd - Taxonomický klasifikační systém půd ČR (Jan Nemeček a kol.) v lesnické praxi (online) [2020.12.12], dostupné z < http://ldf.mendelu.cz/ugp/wp-content/ugp_files/attachment/prirucka_pro_puzkum_lesnich_pud.pdf >.

Ostatní zdroje

Čermák P., 2012: Vliv půdní struktury na hydraulické vlastnosti půdy. Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Brno. 62 s. (bakalářská práce). „nepublikováno“. DEP. VUT v Brně.

FAPPZ, 2015: Metodika průzkumu hydroopedologických podmínek na území ovlivněném vodní erozí. FAPPZ ČZU, Praha, 40 s.

Hnatajková, E., 2016: Vliv sorbentů na retenční čáru kontaminované nivní půdy. Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, Praha. 59 s. (diplomová práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze.

Jačka L., 2014: Odhad vybraných infiltračních parametrů podzolových půd v centrální části NP Šumava. Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, KVHEM, Praha. 122 s. (disertační práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze.

Kameníčková I., 2013: Návod do cvičení (VHK). Skriptum, VUT, Brno.

Linzmayrová L., 2019: Vliv druhu rekultivační dřeviny na proudění vody v půdě na výsypkách. Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, Praha. 43 s. (bakalářská práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze.

Stoklásková A., 2012: Stanovení hydraulických charakteristik půdy ve vybrané lokalitě. Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Brno. 134 s. (diplomová práce). „nepublikováno“.

10. Přílohy

Příloha 1 Měřené hodnoty nasycené hydraulické vodivosti [$m \cdot s^{-1}$].

Mělký vrt			Hluboký vrt		
Lípa	Borovice	Modřín	Lípa	Borovice	Modřín
9,30E-05	6,97E-05	6,57E-05	1,40E-04	1,02E-05	3,69E-05
1,63E-05	8,50E-05	3,09E-04	1,39E-04	1,91E-05	4,45E-05
9,37E-06	1,14E-05	1,88E-04	9,00E-05	3,38E-05	3,79E-05
2,23E-06	6,89E-05	3,04E-05	1,27E-05	5,47E-06	3,25E-06
6,86E-06	1,21E-05	2,15E-05	7,06E-05	2,37E-06	8,06E-06

Příloha 2 Měřené hodnoty objemové hmotnosti [$g \cdot cm^{-3}$].

Vrchní vrstva			Spodní vrstva		
Lípa	Borovice	Modřín	Lípa	Borovice	Modřín
1,28E+00	8,04E-01	9,29E-01	1,51E+00	1,41E+00	1,50E+00
1,19E+00	8,09E-01	5,37E-01	1,50E+00	1,30E+00	1,64E+00
1,11E+00	7,80E-01	6,00E-01	1,51E+00	1,36E+00	1,33E+00
9,05E-01	7,30E-01	9,69E-01	1,48E+00	1,12E+00	1,49E+00
1,13E+00	8,67E-01	7,44E-01	1,27E+00	1,25E+00	1,24E+00
NA	7,78E-01	7,36E-01	NA	1,17E+00	NA

Příloha 3 Měřené hodnoty objemové vlhkosti při odběru [%].

Vrchní vrstva			Spodní vrstva		
Lípa	Borovice	Modřín	Lípa	Borovice	Modřín
3,23E-01	1,76E-01	2,02E-01	3,63E-01	2,71E-01	3,91E-01
2,98E-01	1,62E-01	1,44E-01	3,73E-01	3,06E-01	4,08E-01
3,06E-01	1,55E-01	1,47E-01	3,54E-01	3,62E-01	3,77E-01
2,65E-01	1,47E-01	2,15E-01	3,53E-01	2,69E-01	4,05E-01
2,93E-01	1,71E-01	1,87E-01	3,00E-01	2,81E-01	3,63E-01
NA	1,45E-01	1,93E-01	NA	2,87E-01	NA

Příloha 4 Měřené hodnoty pórovitosti [-].

Vrchní vrstva		Spodní vrstva
Borovice	Modřín	Borovice
6,70E-01	5,99E-01	4,07E-01
6,37E-01	6,69E-01	4,59E-01
6,80E-01	7,26E-01	5,31E-01
6,67E-01	5,68E-01	4,97E-01
6,56E-01	6,65E-01	4,98E-01
6,66E-01	6,50E-01	4,89E-01