

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**  
**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



**Vliv druhu rekultivační dřeviny na proudění vody v půdě  
na výsypkách**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.  
Konzultant: Mgr. Alena Walmsley, Ph.D.  
Bakalant: Lenka Linzmayerová

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Lenka Linzmayerová

Vodní hospodářství

Název práce

**Vliv druhu rekultivační dřeviny na proudění vody v půdě na výsypkách**

Název anglicky

**The effect of tree species on water flow in soils at reclaimed post-mining dumps**

---

### Cíle práce

Vizualizovat preferenční proudění v rekultivovaných půdách vznikajících pod vybranými rekultivačními dřevinami pomocí barevného stopovače.

Pro tyto půdy stanovit nasycenou hydraulickou vodivost a související půdní vlastnosti (např. struktura, nadložní humus, objemová hmotnost).

Vyhodnotit rozdíly mezi výše uvedenými půdními charakteristikami pro vybrané rekultivační dřeviny.

### Metodika

Na vybraných lokalitách rekultivovaných výsypek s různými způsoby lesnické rekultivace (různé dřeviny) provést infiltrační testy s barevným stopovačem (brilliant blue). Provést kopané sondy pro charakteristiku půdního profilu. Dále provést odběr půdních vzorků pro laboratorní stanovení nasycené hydraulické vodivosti, objemové hmotnosti a dalších půdních vlastností. Provést terénní měření nasycené hydraulické vodivosti v mělkých a hlubších vrstvách půdního profilu pomocí Guelphského permeamtru. Statisticky vyhodnotit rozdíly ve výše zmíněných půdních charakteristikách.

### Doporučený rozsah práce

40 stran

### Klíčová slova

hydrologie výsypek, infiltrace, vizualizace preferenční proudění, brilliant blue, lesnická rekultivace

---

### Doporučené zdroje informací

- 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, 645–652.
- Cejpek, J., Kuráž, V., Vindušková, O., Frouz, J., 2017. Water regime of reclaimed and unreclaimed post-mining sites. *Ecohydrology*, 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., 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, 87-95.
- Jonáš, F., 1975. Určení způsobu rekultivace a tvorba nových půd na výsypkách v severočeském hnědouhelném revíru. 1. vyd., Praha: Výzkumný ústav meliorací.
- 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, 266-272.
- Sander, T., Gerke, H.H., 2009. Modelling field-data of preferential flow in paddy soil induced by earthworm burrows. *Journal of Contaminant Hydrology* 104, 126–136.
- 

### Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FŽP

### Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

### Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

### Konzultant

Mgr. Alena Walmsley, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2019

**doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 4. 3. 2019

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 02. 04. 2019

### Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Lukáše Jačky, Ph.D. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Praze 24. dubna 2019

.....

Lenka Linzmayerová

### Poděkování:

Mé poděkování patří především Ing. Lukáši Jačkovi, Ph.D. za trpělivost, ochotu a odborné vedení při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat Mgr. Aleně Walmsley, Ph.D. za spolupráci při získávání údajů pro výzkumnou část této práce a Ing. Věře Linzmayerové za korekturu textu.

## ABSTRAKT

Využití vhodných dřevin může významně přispět k úspěšné rekultivaci výsypek. Pohyb a retence vody má klíčový význam pro půdní organismy, rostliny, vývoj půdy a celého ekosystému na výsypkách. Bakalářská práce se proto zabývá vlivem druhu rekultivační dřeviny na proudění vody v půdě na výsypkách. Průzkum byl proveden na Velké podkrušnohorské výsypce v oblasti Sokolovské pánve. Byly zkoumány 3 lokality v malé vzájemné vzdálenosti s různými dominantními dřevinami – olší lepkavou *Alnus glutinosa*, dubem letním *Quercus robur* a smrkem ztepilým *Picea abies*. Na každé z lokalit byla provedena kopaná polosonda pro popis půdního profilu a jeden infiltrační experiment s barevným stopovačem za účelem vizualizace preferenčního proudění. Dále bylo v terénu využito Guelphského permeometru pro stanovení nasycené hydraulické vodivosti ( $K_s$ ). Na lokalitách byly také odebrány neporušené půdní vzorky ( $100\text{ cm}^3$ ), přičemž vzorkování bylo prováděno zvlášť pro spodní a vrchní vrstvu půdy. Neporušené půdní vzorky byly odebrány pro laboratorní stanovení objemové hmotnosti.

Na jednotlivých lokalitách byly pozorovány výrazné rozdíly v horní části půdního profilu. U olše byl přítomen mocný humusový horizont (14 cm i více) obsahující agregáty, u dubu byl humusový horizont mocný pouze okolo 5 cm a agregáty neobsahoval, u smrku téměř chyběl. Nad humusovým horizontem u smrku se nacházel mocný fermentační mykogenní horizont (9 cm) a horizont opadanky. Pozorované rozdíly ovlivnily však barevného stopovače,  $K_s$  a hodnoty objemové hmotnosti. Největší podíl preferenčního proudění byl zaznamenán na lokalitě s olší (90 cm hloubka, nejrychlejší však, velké množství kořenů, žízálich chodeb a makropórů mezi agregáty), nejmenší u smrku (60 cm hloubka, nejpomalejší infiltrace stopovače, zadržetí vody u povrchu mykogenním horizontem). Nejvyšší průměrné hodnoty  $K_s$  pro vrchní vrstvu půdy byly naměřeny na lokalitě s olší ( $6,92\text{E-}05\text{ m/s}$ ) převážně z důvodu velkého množství makropórů mezi agregáty, nejnižší u smrku ( $1,95\text{E-}05\text{ m/s}$ ) zejména z důvodu přítomnosti plst'ovitého mykogenního horizontu a u dubu  $3,87\text{E-}05\text{ m/s}$ . Rozdíly v  $K_s$  pro vrchní vrstvu půdy byly na rozdíl od spodní vrstvy statisticky významné. Průměrné hodnoty objemové hmotnosti byly nejvyšší u lokality s dubem ( $0,87\text{ g/cm}^3$ ) a prakticky stejné u olše ( $0,73\text{ g/cm}^3$ ) a smrku ( $0,71\text{ g/cm}^3$ ).

Získané poznatky potvrdily podstatný vliv druhu rekultivační dřeviny na vývoj a hydraulické vlastnosti vrchní vrstvy půdního profilu a na preferenční proudění v půdním profilu. Z hlediska vlivu na infiltrační schopnosti a distribuci vody v půdním profilu lze za nejvhodnější rekultivační přípravnou dřevinu ze zkoumaných druhů považovat olši.

### KLÍČOVÁ SLOVA:

hydrologie výsypek, infiltrace, vizualizace preferenčního proudění, brilliant blue, lesnická rekultivace

## ABSTRACT

The use of suitable woody plants can significantly contribute to successful reclamation of dumps. Water movement and retention is of key importance for soil organisms, plants, soil development and the entire ecosystem on dumps. The bachelor thesis deals with the influence of reclamation tree species on the flow of water in the soil on the dumps. The survey was carried out on the Velká Podkrušnohorská výsypka in the area of the Sokolov Basin. Three sites with different dominant wood species were investigated – common alder *Alnus glutinosa*, common oak *Quercus robur* and Norway spruce *Picea abies*. At each site, soil profile was described on a wall of an excavated pit and a dye tracer infiltration experiment was performed for visualization of preferential flow. Furthermore, Guelph Permeameter was used in the field to determine the saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ), and undisturbed soil samples ( $100\text{ cm}^3$ ) were taken at each site. The sampling was performed equally within the site and separately for the subsoil and topsoil layer. The undisturbed soil samples were collected for laboratory determination of bulk density.

Significant differences at the top of the soil profile were observed at individual sites. A strong humus horizon (14 cm or more) containing aggregates was present in the alder, the humus horizon was only about 5 cm thick on the site with oak tree and did not contain the aggregates. Above thin humus horizon at the spruce, there was a mighty fermentation mycogenic horizon (9 cm) and a tree litter horizon. Observed differences affected infiltration of brilliant blue,  $K_s$  and bulk density values. The highest proportion of preferential flow was recorded on the site with alder (90 cm depth, fastest infiltration, large number of roots, earthworms and macropores among aggregates), the smallest in spruce (60 cm depth, the slowest tracer infiltration, water retention at the surface mycogenic horizon). The highest mean values of  $K_s$  for the topsoil layer were measured on the site with alder ( $6.92\text{E-}05\text{ m/s}$ ) mainly due to the large number of macropores between the aggregates, the lowest on the site with spruce ( $1.95\text{E-}05\text{ m/s}$ ) especially due to the presence of a felted mycogenic horizon and on the site with oak  $3.87\text{E-}05\text{ m/s}$ . Differences in  $K_s$  in the topsoil were statistically significant, unlike the subsoil. Mean bulk density values were highest for the locality with oak ( $0.87\text{ g/cm}^3$ ) and practically the same values were measured for alder ( $0.73\text{ g/cm}^3$ ) and for spruce ( $0.71\text{ g/cm}^3$ ).

The obtained findings confirmed the significant influence of reclamation tree species on the development and hydraulic properties of the topsoil and on the preferential flow in the soil profile. Alder may be considered the most suitable reclamation preliminary tree species from the studied species.

## KEY WORDS:

hydrology of spoil heaps, infiltration, visualization of preferential flow, brilliant blue, forest reclamation

# OBSAH

1. ÚVOD.....	1
2. CÍLE PRÁCE.....	2
3. LITERÁRNÍ REŠERŠE .....	3
3.1 Výsypky a rekultivace.....	3
3.1.1 Výsypka.....	3
3.1.2 Rekultivace .....	3
3.2 Popis vybraných fyzikálních vlastností půdy.....	4
3.2.1 Nasycená hydraulická vodivost (Ks).....	4
3.2.2 Objemová hmotnost .....	7
3.2.3 Pórovitost.....	7
3.2.4 Vlhkost půdy .....	8
3.2.5 Struktura .....	8
3.3 Preferenční proudění v půdě .....	9
3.4 Vliv volby rekultivační dřeviny na hydraulické a související vlastnosti půdy.....	10
3.4.1 Vliv druhu rekultivační dřeviny na preferenční proudění .....	11
3.4.2 Vliv druhu rekultivační dřeviny na hospodaření s vodou .....	11
3.4.3 Vliv druhu rekultivační dřeviny na kvalitu opadanky a obsah uhlíku a dusíku v půdě .....	12
3.4.4 Vliv druhu rekultivační dřeviny na výskyt edafonu.....	13
3.4.5 Vliv půdní fauny na pórovitost, infiltraci a preferenční proudění..	14
3.4.6 Vliv půdní fauny na půdní agregáty a hospodaření s vodou .....	14
3.4.7 Vliv půdní fauny na vývoj půdního profilu.....	15
4. CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ.....	16
4.1 Zeměpisné, geologické a pedologické poměry .....	17
4.2 Klimatické poměry.....	19
4.3 Vegetační poměry .....	19
4.4 Výskyt edafonu na jednotlivých lokalitách.....	20
5. METODIKA .....	21
5.1 Plán vzorkování.....	21
5.1.1 Předmět a čas měření.....	21
5.1.2 Místo měření, výběr lokalit a důvody tohoto výběru .....	21
5.1.3 Počty vzorků a místo jejich odběru .....	21
5.2 Měření Ks Guelphským permeametrem .....	22



5.2.1	Postup měření .....	22
5.2.2	Vyhodnocení měření Ks Guelphským permeametrem .....	22
5.4	Měření preferenčního proudění.....	23
5.5	Kopané polosondy.....	24
5.6	Odběr neporušených půdních vzorků.....	24
5.6.1	Postup odběru .....	25
5.7	Statistické řešení.....	25
6.	VÝSLEDKY .....	26
6.1	Výsledné hodnoty Ks měřené Guelphským permeametrem.....	26
6.2	Vsak barevného stopovače .....	27
6.2.1	Proudění na lokalitě s olší .....	28
6.2.2	Proudění na lokalitě s dubem .....	30
6.2.3	Proudění na lokalitě se smrkem.....	32
6.3	Objemová hmotnost .....	34
7.	DISKUZE .....	35
8.	ZÁVĚR .....	38
9.	PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY A DALŠÍCH ZDROJŮ .....	39
10.	PŘÍLOHY .....	43

# 1. ÚVOD

Povrchová těžba hnědého uhlí významně narušuje fungování ekosystému. Během těžby je velké množství nepotřebného materiálu překrývajícího uhelné sloje vytěženo a uloženo na výsypkách (Kuráž et al., 2012). Zde tento materiál narušuje estetické hodnoty a ekologické funkce krajiny (Cejpek et al., 2017) a vykazuje vzhledem k hloubce původního uložení jiné fyzikální, chemické i biologické vlastnosti než půda přirozeně se vyvíjející na povrchu (Frouz et al., 2001; Šourková et al., 2005). Povrch výsypek je charakteristický nízkou biologickou aktivitou, dále vysokou mírou zhutnění, nízkou schopností zadržovat vodu, extrémními hodnotami pH a nedostatkem živin (Sendlein et al., 1983; Frouz et al., 2001; Johnson, 2003; Moffat et Bending, 2006). Některé z vyjmenovaných vlastností mohou způsobovat zpomalení růstu rostlin na výsypkách (Bradshaw, 1997). Půdní rekultivace je tedy předpokladem pro obnovu fungujícího ekosystému na výsypkách, přičemž tato rekultivace se musí týkat mimo jiné vodního režimu půd a souvisejících hydrologických vlastností těchto půd. Vývoj půdy po vzniku výsypky je určen klimatickými a vegetačními podmínkami oblasti a na vegetaci vázaným edafonem (Mermoud et Xu, 2006; Li et Shao, 2006; Frouz et al., 2013). Sazení různých druhů rekultivačních dřevin výrazně ovlivňuje vlastnosti a vývoj půdy (Frouz et al., 2009).

Většina studií provedených na Velké podkrušnohorské výsypce se zaměřuje na rozdíly půdních vlastností mezi rekultivovanými a nerekulitovanými lokalitami (Cejpek et al., 2017), případně porovnávají věkově rozdílné lokality se stejným vegetačním pokryvem (Kuráž et al., 2012). Studie zabývající se vlastnostmi půdy v závislosti na druhu stromu se orientují zejména na chemické a biologické vlastnosti půd (Frouz et al., 2013). Na proudění vody v půdě nebo hydrologické vlastnosti půdy v závislosti na druhu použité dřeviny se soustředí pouze malé množství studií, i proto není tato problematika dostatečně objasněna.

Na výsypce se půdy vyvíjí na stejném nebo velmi podobném substrátu pod vlivem rostlin a s nimi souvisejících půdních organismů. To představuje jedinečnou příležitost studovat vztah druhu dřeviny, vývoje půdy a půdní hydrologie. Množství, dostupnost a pohyblivost půdní vody jsou klíčové faktory ovlivňující průběh rekultivace.

V teoretické části jsou v kapitole 3. Literární rešerše definovány a popsány základní pojmy a vybrané fyzikální vlastnosti půdy související s problematikou proudění v půdě na výsypkách: výsypka, rekultivace, nasycená hydraulická vodivost, objemová hmotnost, pórovitost, vlhkost, struktura a preferenční proudění. Dále je v této kapitole popsán vliv volby rekultivační dřeviny na některé výše zmíněné charakteristiky včetně vlivu na půdní organismy, které mají také značný vliv na půdní vlastnosti. Vliv edafonu na některé vlastnosti půd je popsán ve třech posledních podkapitolách literární rešerše. V kapitole 4. Charakteristika zájmového území je popsána Velká podkrušnohorská výsypka a zájmové lokality z hlediska zeměpisných, geologických a pedologických podmínek, dále klimatické poměry oblasti a vegetační poměry zájmových lokalit. Ve zkratce je také popsán výskyt edafonu na jednotlivých lokalitách. Kapitola 5. Metodika je věnována metodice provedených měření a následného zpracování získaných dat. V kapitolách 6. Výsledky a 7. Diskuze jsou získaná data zhodnocena a diskutována s jinými výzkumy provedenými na Velké podkrušnohorské výsypce.

## 2. CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem této práce je stanovit hydraulické parametry nově vznikajících půd pod vybranými rekultivačními dřevinami na Velké podkrušnohorské výsypce a vyhodnotit vliv použité rekultivační dřeviny na hydrologické vlastnosti těchto půd.

Dílčími cíli práce jsou:

- 1) Stanovit vliv rekultivační dřeviny (olše, dub, smrk) na preferenční proudění v rekultivované půdě pomocí barevného stopovače brilliant blue.
- 2) Stanovit vliv použité dřeviny na nasycenou hydraulickou vodivost této půdy a související půdní vlastnosti (např. struktura, nadložní humus, mocnost půdních horizontů půdního profilu apod.).
- 3) Vyhodnotit rozdíly mezi charakteristikami půd vznikajícími pod jednotlivými dřevinami.

## 3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

### 3.1 Výsypky a rekultivace

#### 3.1.1 Výsypka

Výsypka neboli odval představuje jeden z doprovodných jevů povrchové těžby nerostných surovin. Jedná se o násyp horninového odpadu lomu nebo dolu (Petránek et al, 2016). Vlastnosti tohoto odpadu, rozvoj vegetace, reliéf, charakter klimatu a vodní režim ovlivňují půdotvorný proces na výsypkách (Štýs, 1981), při kterém dochází k mnoho zvláštnostem. Tyto zvláštnosti se mohou následně projevit na dalším vývoji půdy a ovlivnit tak produktivitu humózního horizontu (Jonáš, 1975).

#### 3.1.2 Rekultivace

Pojmem rekultivace lze označit aktivní obnovení půdního fondu v oblastech narušených nebo úplně zničených člověkem (Štýs et Helešicová, 1992), jako je např. povrchová těžba nerostných surovin, průmyslová výroba apod. Obnova musí být provedena tak, aby nově vzniklá krajina fungovala komplexně a vykazovala stabilitu, tzn. aby nedocházelo k sesuvům půdy apod. Za nejvíce stabilizující prostředek v krajině je považován strom. Plní funkce hygienické, asanační, klimatické, rekreační (Špiřík, 1994) a především funkci půdoochrannou. Stromy půdu zpevňují, udržují půdní vlhkost a chrání tak postižené oblasti před erozí a vytvářejí přirozenou zásobárnu vody (Štýs et Helešicová, 1992).

Rekultivaci lze definovat různými způsoby, existuje mnoho definic tohoto pojmu, do této práce byly vybrány následující definice:

„Rekultivace je uvedení postiženého území do takového stavu, aby zde mohl fungovat soběstačný ekosystém.“ (Jonáš, 1975)

„Rekultivace je antroporegulačním faktorem v dynamickém procesu vývoje přírody s funkcí převážně kladných zpětných vazeb, kterými je usměrňován vývoj struktury a funkcí devastovaných částí krajiny, a to urychlením tvorby ekologicky stabilizujících prvků; současně dochází k plánovité tvorbě biologicky i sociálně vhodných poměrů ve prospěch přírody i člověka.“ (Štýs, 1981, s. 23)

Rekultivace má dvě hlavní fáze. V první, technické fázi, je upraven reliéf tak, aby byla zajištěna např. stabilita svahů, ochrana půdy před erozí a další (Sklenička, 2003). Při technické fázi dochází ke zmírnění sklonu svahů a snižování terénní diversity (terénní deprese jsou vyplňovány a elevace likvidovány), což vede ke snížení počtu stanovišť vhodných pro pionýrské byliny, dřeviny, houby, ptáky a prostor pro zadržování vody v krajině (Gremlica et al., 2011). Úprava je prováděna s ohledem na správné odvodnění území a v případě potřeby se instalují přeložky inženýrských sítí (Sklenička, 2003). Cílem následující, biologické fáze, je dokončení procesu zahlazení následků těžby zakládáním kultur, pokud se jedná o rekultivaci zemědělskou nebo lesnickou (Štýs, 1990; Sklenička, 2003). Na svazích se sklonem nad 20° je nutné zalesnění, nad 30° pak je nutné provést půdoochrannou výsadbu stromů. Na svazích o sklonitosti 8° až 20° je prováděno zatravnění. Rekultivací takto upravená území jsou dále využívána jako louky a pastviny. Na území se sklonem do 8° mohou být zakládány

pole, vinice a ovocné sady. Nedodržení maximální sklonitosti svahu pro jednotlivá rekultivační opatření by mohlo vést k nepřipustným ztrátám půdy na těchto územích (Štýs et al., 1981).

Výsledkem rekultivací může být krajina zemědělsky využívaná, vznikají zejména orná půda, louky, pastviny, vinice a další, v takovém případě se jedná o rekultivaci zemědělskou. Dalším druhem rekultivace je rekultivace lesnická, při které se vysazují různé druhy dřevin (viz dále). Při vodohospodářských neboli hydrických rekultivacích jsou zaplavovány zbytkové jámy nebo velké deprese, které jsou následně využívány k rekreaci a dalším účelům. Dále jsou budovány příkopy, drény a retenční nádrže z důvodu regulace odtoku a zachycení erozních smyvů. Posledním druhem rekultivací jsou rekultivace ostatní, přičemž při nich vznikají plochy zeleně s estetickou a rekreační funkcí (Gremlica et al., 2011), např. parky, městská zeleň, obory a další. Tímto druhem rekultivace lze také začlenit do krajiny sportovní a rekreační plochy jako je autokrosová a motokrosová dráha, střelnice a jiné (Štýs, 1981).

Lesnická rekultivace má dvě fáze. V první jsou upraveny plochy a zakládány sazenice, přičemž tento proces trvá přibližně 1 až 3 roky. Ve druhé fázi dlouhé 6 až 8 let dochází k pěstební péči o vysazené stromy – zejména hnojení kultur, okopávání, ochraně proti zvěři a dalším. Při lesnických rekultivacích často vznikají monokulturní celky s důrazem na ekonomický přínos na úkor ekologických a environmentálních funkcí nově vznikajících lesů. Na takových plochách jsou hustě sázeny zejména borovice lesní *Pinus sylvestris*. Alternativou – ale také monokulturně sázenou – jsou původní dřeviny jako je např. dub letní (*Quercus robur*), dub zimní *Quercus petraea*, habr obecný *Carpinus betulus*, javor klen *Acer pseudoplatanus*, javor mléč *Acer platanoides*, lípa malolistá *Tilia cordata*, modřín opadavý *Larix decidua*, olše lepkavá *Alnus glutinosa*, smrk ztepilý *Picea abies* a další. Často jsou sázeny i stromy nepůvodní, zejména borovice černá *Pinus nigra*, dub červený *Quercus rubra*, javor jasanolistý *Acer negundo* a další, a dokonce agresivní invazivní druh trnovník akát *Robinia pseudoacacia* (Gremlica et al., 2011). Druhy používané při rekultivacích na území Sokolovské pánve jsou např. olše lepkavá *Alnus glutinosa*, olše šedá *Alnus incana* a další (Cejpek et al., 2013). Tyto druhy splňují požadavky na některé ekologické atributy, jako jsou např. tolerance dřeviny ke klimatickým extrémům a dobrá růstová kapacita (Kupka et Dimitrovský, 2011) a používají se jako tzv. přípravné dřeviny (Dimitrovský, 1976). Jsou odolné vůči nepříznivým fyzikálním a hydrologickým vlastnostem půd. Tyto vlastnosti půdy se během růstu přípravných dřevin zlepšují a umožňují tak podsadbu méně odolných dřevin a vznik trvale úrodných půd (Dimitrovský, 1976).

## 3.2 Popis vybraných fyzikálních vlastností půdy

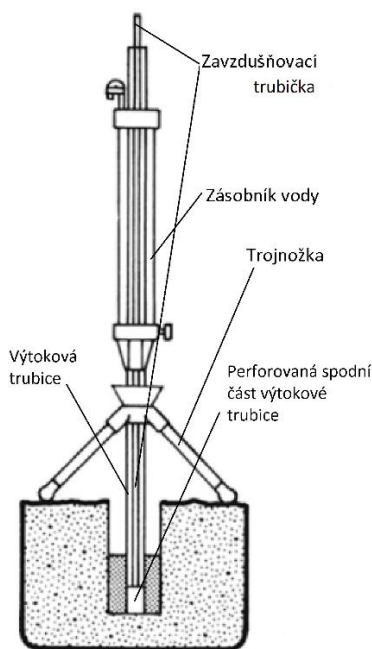
### 3.2.1 Nasycená hydraulická vodivost ( $K_s$ )

Nasycená hydraulická vodivost je makroskopická rychlost proudění při jednotkovém hydraulickém gradientu. Její jednotky jsou  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a vyjadřuje schopnost půdy vést kapalinu, v některých případech má anizotropní charakter. Tato vlastnost je závislá na uspořádání a tvaru půdních částic. Nasycená hydraulická vodivost je zásadní pro modelování pohybu vody a v ní rozpuštěných látek, a proto slouží jako podklad při návrhu hydromelioračních opatření, sypaných hrází (Pavlásek et Jačka, 2014a),

opatření pro ochranu životního prostředí (zejména podzemních vod před znečištěním) a dalších aplikací (Bátřková et al., 2013). Hodnotu  $K_s$  ovlivňuje pórovitost, objemová hmotnost půdy, její struktura, obsah organické hmoty v půdě a preferenční cesty v půdě (Pavlásek et Jačka, 2014a).

Metody stanovení nasycené hydraulické vodivosti lze dělit na přímé a nepřímé. Přímé metody mohou probíhat v terénu nebo v laboratoři.  $K_s$  se v terénu měří pomocí infiltračního válce, Guelphského permeometru nebo tenzního infiltrometru. Taková měření probíhají nad hladinou podzemní vody. Dalšími terénními metodami jsou jednosondová a piezometrická, přičemž tyto se provádí pod hladinou podzemní vody. V laboratoři lze měřit nasycenou hydraulickou vodivost laboratorním permeametrům dvěma způsoby – s konstantním spádem nebo s proměnným spádem. Při nepřímých metodách je využíváno pedo-transferových funkcí,  $K_s$  se určuje ze snáže stanovitelných půdních vlastností, jako je např. objemová hmotnost, textura a jiné. Výběr vhodné metody je klíčový pro získání reprezentativních dat. Metody se liší velikostí objemu vzorku, vlastnostmi proudění vody při měření (především směr), požadavky na množství vody, obtížností manipulace s přístrojem a jinými parametry (Pavlásek et Jačka, 2014a). Například malé vzorkovací objemy při měření laboratorním permeametrům mohou způsobovat nereprezentativnost naměřených hodnot u heterogenních půd (Kutílek et al., 2004). Volba metody probíhá na základě finančních a časových možností, požadované přesnosti měření a dostupnosti lokality a vody (Pavlásek et Jačka, 2014a).

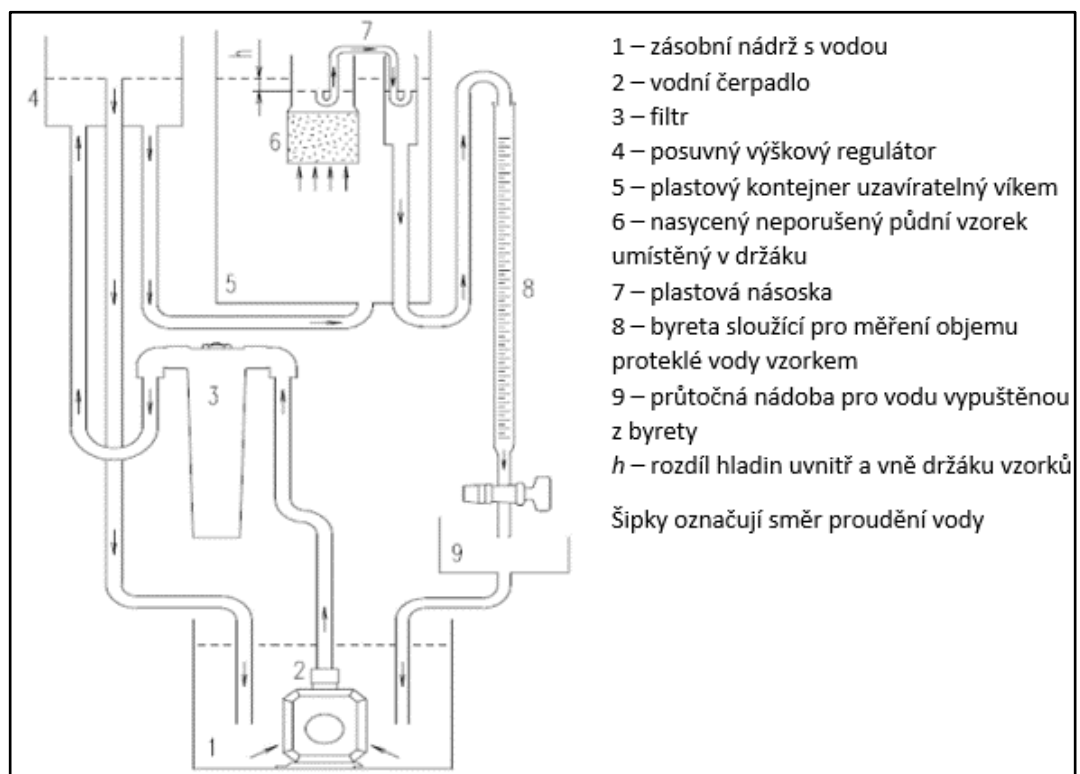
Guelphský permeometr se využívá pro měření infiltrace ve vrtu, přičemž funguje na principu Mariottovy láhve (Kutílek et al., 2004). Hlavními komponentami tohoto přístroje jsou zásobník vody a výtoková trubice, konkrétně její perforovaná výtoková část, která se umísťuje nad dno vrtu. Schéma Guelphského permeometru je zobrazeno na obrázku č. 1. Podrobný popis je uveden v manuálu od výrobce Eijkelkamp (©2011).



Obr. 1: Schéma Guelphského permeometru s popisem jednotlivých částí a jedna z možností umístění přístroje ve vrtu (upraveno ze skript Pavlásek et Jačka (2014a))

Hlavními výhodami měření  $K_s$  Guelphským permeametrem jsou nízká spotřeba vody při měření, jednoduché zacházení s přístrojem a jeho snadná obsluha a časová nenáročnost oproti ostatním metodám (Reynolds et Elrick, 1984). Nevýhodou při tomto způsobu měření je riziko podhodnocení získaných hodnot vlivem ztuhnutí stěn a dna vrtu u jemnozrnných půd (Jačka et al., 2014). U hrubozrnných půd hrozí poškození a zhroucení vrtu a neschopnost provedení měření v terénu (Reynolds et Lewis, 2012). Výše uvedené problémy lze odstranit, způsoby eliminace uvádí Bagarello (1997).

Měření  $K_s$  laboratorním permeametrem je prováděno na sycených neporušených půdních vzorcích o velikosti 4 až 20 cm (Pavlásek et Jačka, 2014a). Podrobný popis, postup a metodiku měření uvádí v manuálu Eijkelkamp (©2013). Zjednodušené schéma laboratorního permeamtru je znázorněno na obrázku č. 2.



Obr. 2: Schéma laboratorního permeamtru s popisem jednotlivých částí (upraveno ze skript Pavlásek et Jačka (2014a))

Hlavní výhody použití této metody stanovení  $K_s$  jsou následující: určení  $K_s$  přímo dle základní rovnice Darcyho zákona, odstranění vzduchových pórů postupným sycením a možnost stanovení a kontroly okrajových podmínek při měření, např. teploty, směru proudění, velikosti hydraulického gradientu. Důležitou nevýhodou při tomto způsobu měření je možnost získání nereprezentativních hodnot z důvodu malého objemu vzorku, který není v kontaktu s okolní půdou. Dále může být daný směr proudění při měření nevhodný pro některé typy půd, zejména strukturní s bočním prouděním (Pavlásek et Jačka, 2014a). Poslední významnou nevýhodou je přítomnost makropórů, které mohou vzniknout při odběru vzorku nebo jsou přirozenou součástí tohoto fragmentu půdy. Makropóry se vyskytují ve vzorku podél stěny válce či ve formě žízálič chodeb a v dalších formách. Pokud tyto makropóry jsou orientovány ve směru toku při měření, pak lze získat výrazně vyšší hodnoty  $K_s$  (Kanwar et al., 1990).

### 3.2.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost, někdy označována jako hustota vysušené půdy, je hmotnost objemové jednotky vysušené půdy v přirozeném uložení (Pokorná et Zabranská, 2008). Její zjištění lze provést vážením neporušeného vysušeného vzorku odebraného do válečku známého objemu a vzorec pro výpočet lze zapsat následovně:

$$\rho_S = \frac{m_M}{V_S}, \quad (3.1)$$

kde  $\rho_S$  je objemová hustota,  $m_M$  je hmotnost pevné fáze a  $V_S$  je celkový objem vzorku (objem válečku). Hmotnost obsaženého vzduchu ve vzorku je při výpočtu zanedbáván (Pavlásek et Jačka, 2014a).

### 3.2.3 Pórovitost

Pórovitost je definována jako poměr objemu půdních pórů ku celkovému objemu půdy. Pokud uvažujeme o půdě jako o třífázovém systému, lze pórovitost spočítat dle vzorce:

$$P = \frac{V_A + V_W}{V_A + V_W + V_M} = \frac{V_P}{V_S}, \quad (3.2)$$

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

Stanovení pórovitosti se ale neprovádí na základě objemů jednotlivých půdních fází, nýbrž nepřímou se stanovuje buď z hodnot hustoty půdy a zdánlivé hustoty půdních částic, nebo pomocí čísla pórovitosti. To, jakým způsobem se bude stanovení provádět, záleží na objemových změnách půdy v závislosti na vlhkosti. Pokud je půda objemově stálá, lze pro určení pórovitosti použít následující vzorec:

$$P = \frac{\rho_M - \rho_S}{\rho_M}, \quad (3.3)$$

kde  $\rho_M$  je zdánlivá hustota půdních částic a  $\rho_S$  je hustota půdního vzorku. V případě, že půda vykazuje výrazné objemové změny se změnami vlhkosti, pak se před stanovením pórovitosti stanovuje číslo pórovitosti ze vzorce:

$$e = \frac{\rho_M - \rho_S}{\rho_S}, \quad (3.4)$$

kde  $e$  je číslo pórovitosti (Pavlásek et Jačka, 2014a).

Hodnota pórovitosti se pak určí z převodního vztahu:

$$P = \frac{e}{1 + e}. \quad (3.5)$$

Hodnota pórovitosti roste s mírou agregace a zvyšujícím se obsahem organické hmoty v půdě a zároveň ve většině případů klesá s hloubkou z důvodu zvyšujícího se tlaku nadložních vrstev. Podléhá sezónním změnám podmíněným aktivitou půdních organismů, změnami teplot během roku, změnami v rychlosti růstu rostlin atd. Hodnoty pórovitosti se mění i v kratších časových intervalech, tyto změny jsou způsobeny proměnlivostí vlhkosti závislé na srážkách a změnami teploty během dne. Pórovitost významně ovlivňuje další fyzikální vlastnosti půdy, konkrétně hustotu, a procesy v ní probíhající, zejména jejich intenzitu. Hustota půdy klesá se zvyšující se hodnotou pórovitosti a naopak. Z procesů lze jmenovat např. transport vody a látek, difúzi plynů a



jiné. Jejich intenzita je ovlivněna charakterem a mírou spojitosti půdních pórů, přičemž póry mají různé rozměry a tvary a jsou většinou spojitě (Pavlásek et Jačka, 2014a).

### 3.2.4 Vlhkost půdy

Půdní vlhkost vyjadřuje množství vody v půdě a lze ji vyjádřit dvěma způsoby, a to jako vlhkost hmotnostní, nebo objemovou (Kutílek et al., 1993). Hmotnostní vlhkost je poměr hmotnosti kapalné fáze ku hmotnosti pevné fáze:

$$w = \frac{m_W}{m_M}, \quad (3.6)$$

kde  $w$  představuje hmotnostní vlhkost,  $m_W$  hmotnost vody a  $m_M$  hmotnost pevné fáze půdního vzorku (Pavlásek et Jačka, 2014a).

Objemová vlhkost půdy je poměr objemu vody k celkovému objemu vzorku:

$$\theta = \frac{V_W}{V_S}, \quad (3.7)$$

kde  $\theta$  je objemová vlhkost půdy,  $V_W$  objem vody ve vzorku a  $V_S$  celkový objem vzorku (Kutílek et al., 1993).

### 3.2.5 Struktura

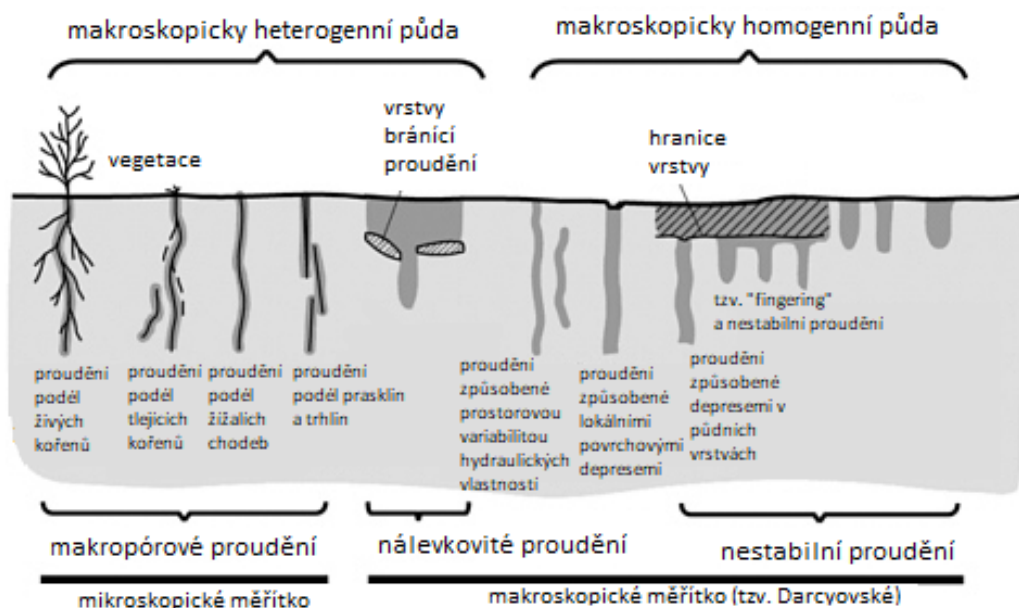
Půdní strukturou lze popsat úroveň koagulace půdních koloidů. Koagulace je proces, při kterém vznikají ve vodě stabilní půdní agregáty, které lze dle velikosti dělit na mikroagregáty (menší než 0,25 mm) a makroagregáty (větší než 0,25 mm). Agregáty jsou shluky půdních částic o různé zrnitosti, na jejich složení se mimo tyto částice podílejí také amorfnní látky, jako např. amorfnní gely sesquioxidů, organické látky, minerální látky rozpuštěné v půdním roztoku apod. Samotný vznik agregátů může probíhat již v půdotvorném substrátu nebo při zvětrávání matečné horniny, přičemž podmínkou je přítomnost již zmiňovaných koloidů, což jsou půdní částice o malé zrnitosti a velké ploše povrchu vyznačující se elektrickým nábojem, který zapříčiňuje vzájemné poutání těchto částic. Nejpevnější vazby vznikají u jílových minerálů, např. u montmorillonitu. Přítomné amorfnní látky pokrývající povrch půdních částic a vyplňující prostor mezi nimi způsobují poutání nejmenší zrnitostní frakce s půdními částicemi o větší zrnitosti, které již nevykazují koloidní vlastnosti. Ke zpevnění agregátů dochází při krystalizaci amorfnních látek způsobené změnami vlhkosti v půdním prostředí. Ke stabilizaci a zvětšování agregátů přispívají i organické látky vzniklé humifikací mající velký specifický povrch a většinou polární charakter, tedy podobné vlastnosti jako půdní koloidy samotné. S koloidy vytváří pevnou vazbu a svou schopností polymerace způsobují vznik větších a odolnějších útvarů. Další zvětšování mikroagregátů, a tedy vznik makroagregátů a jejich vzájemné uspořádání, je ovlivněno procesy probíhajícími v půdě, jako jsou např. objemové změny vyvolané kolísáním teplot a vlhkosti, prorůstání kořenů, aktivita půdních organismů, zejména žížal a další. Kořenový systém ovlivňuje agregáty mechanicky, jelikož je od sebe separuje a poté stlačuje k sobě z důvodu objemového růstu kořenů a chemicky, protože látky vylučované při růstu působí podobně jako organické látky zmíněné výše, tzn. že obalují jednotlivé částice nebo mikroagregáty a způsobují tak vznik makroagregátů. Odumřelé části kořenů jsou zdrojem další organické hmoty. Veškerá organická hmota v půdě podléhá humifikaci, která přechází v mineralizaci a následně jsou tyto látky z půdy odbourány, což působí rozpad již vzniklých agregátů. Pro vznik a přetrvání strukturální půdy (půda s vysokým

obsahem stabilních makroagregátů) je tedy nutné do půdy organickou hmotu neustále dodávat. Kromě nedostatku organické hmoty v půdě je dalším nepříznivým faktorem pro vznik agregátů redukční prostředí. V trvale zamokřených půdách nebo v půdách s vyšší mírou zhutnění vznikají dokonce místo agregátů na první pohled podobné tzv. pseudoagregáty, což jsou ve vodě nestabilní částice. Jejich nestabilita je způsobena nízkou krystalizací amorfních látek, nízkou polymerací organických látek atd. Půdy vznikající v nepříznivých podmínkách bez obsahu agregátů nebo s obsahem pseudoagregátů nesou název nestrukturní půdy. Půdy, u nichž převládají nestrukturní částčky a mají nízké zastoupení makroagregátů lze nazvat jako půdy se slabě vyvinutou strukturou (Kutílek et al., 1993; Pavlásek et Jačka, 2014a).

Struktura ovlivňuje další vlastnosti půdy, jako je např. objemová hmotnost, pórovitost, změny v obsahu vody apod. Objemová hmotnost se se zvyšující se mírou agregace snižuje, roste tedy objem pórů, hlavně těch o větším průměru. Zvyšuje se i provzdušněnost půdy, která urychluje vertikální zvyšování teploty a tím zlepšuje podmínky pro život zoedafonu, růst rostlin, humifikaci a další chemické procesy. S provzdušněností související dynamiku vlhkosti lze porovnat u strukturních a nestrukturních půd na základě intenzity infiltrace. Ta nabývá u strukturních půd vyšších hodnot a s časem se snižuje pomaleji než u nestrukturních půd. Strukturní půda je tak schopná pojmout větší množství vody a klesá riziko vzniku povrchového odtoku a vodní eroze. Zároveň s nižším množstvím kapilárních pórů je nižší i hodnota výparu a půda je tedy schopna lepšího hospodaření s vodou, kterou mohou rostliny lépe využít (Pavlásek et Jačka, 2014a).

### 3.3 Preferenční proudění v půdě

Nerovnoměrné proudění vody v půdě, které má za následek nepravidelné zvlhčení půdy, a tedy zvýšení rychlosti proudění na určitých místech v rámci půdního profilu, je označováno jako preferenční proudění. Makropórové proudění lze pozorovat podél kořenů, chodeb vytvořených půdní makrofaunou nebo trhlin. Dalším typem preferenčního proudění je proudění nestabilní, které může vzniknout v makroskopicky homogenní hrubozrnné půdě např. vrstvením různých zrnitostních frakcí. Posledním typem preferenčního proudění je proudění nálevkovité, které vzniká bočním přesměrováním proudění méně propustnými vrstvami. Všechny jmenované typy preferenčního proudění jsou vyobrazeny na obrázku č. 3. Prostory, kde probíhá preferenční proudění, se nazývají preferenční cesty. Důvody vzniku preferenčních cest jsou různé, často působí několik mechanismů podporujících vznik preferenčního proudění současně, a tedy tvary preferenčních cest a formy preferenčního proudění jsou značně pestré (National Research Council, ©2001).



Obr. 3: Schéma preferenčního proudění v půdním profilu (upraveno z National Research Council (©2001))

Tvar, stavba a vnitřní pórovitost makropórů určují režim makropórového proudění. Do makropóru voda infiltruje buď jeho stěnami, nebo na povrchu půdy v případě, že se na povrchu půdy nachází otvor do makropóru (jedná se např. o chodby po anektických žízalách apod.). Infiltrace vody do makropóru je limitována hloubkou a hydraulickou vodivostí makropóru a většinou proudí vertikálně směrem dolů, protože velký význam v proudění vody půdou má gravitace. Proudění vody v půdě ovlivňují také tření a vnitřní síly, např. tlakový gradient a kapilární síly. Kapilární síly se s průměrem póru snižují, od průměru póru 0,3 cm jsou téměř nulové a rychlost proudění v takovém póru vzrůstá (Sander et Gerke, 2009).

Celkové množství vody vsáklé do preferenční cesty je funkcí hloubky této preferenční cesty a nasycené hydraulické vodivosti. Významnou roli hraje především zmíněná hydraulická vodivost, která je v pozitivní korelaci s infiltrační vodivostí do makropórů. Hydraulickou vodivostí je regulován preferenční tok makropóry. Pokud je hydraulická vodivost nízká, proudění se zpomalí, nebo ustane a obnoví se až po zvýšení hydraulické vodivosti. Preferenční proudění má vliv na evaporaci, odtok a množství vody dostupné pro rostliny. Z tohoto důvodu je nutné jej zkoumat, obzvláště na heterogenních slabě vyvinutých půdách (Sander et Gerke, 2009).

### 3.4 Vliv volby rekultivační dřeviny na hydraulické a související vlastnosti půdy

Dřeviny ovlivňují hydrofyzikální vlastnosti půdy přímo svým kořenovým systémem a produkcí opadanky a nepřímo vytvářením vhodných podmínek pro život edafonu a rostlin v lesním podrostu, které svou aktivitou také mění vlastnosti půdy (Frouz et al., 2005; Mudrák et al., 2010; Frouz et al., 2013; Frouz et Kuráž, 2014). Kořeny při prorůstání působí mechanicky, kdy oddělují a stlačují agregáty od sebe a k sobě, mění tak uspořádání částic v půdě a podporují vznik preferenčních cest v jejich nejbližším okolí (National Research Council, ©2001; Pavlásek et Jačka, 2014a). Kořenový systém ovlivňuje půdu i chemicky, protože při růstu vylučuje organické látky

ovlivňující nejen strukturu půdy, ale i další vlastnosti půdy (Pavlásek et Jačka, 2014a). Podobným způsobem působí na půdní vlastnosti i kořeny rostlin v podrostu. Intenzita změny půdních vlastností a její forma je dána hustotou, hloubkou a tvarem kořenového systému, kvalitou opadanky, na kterou je vázané druhové zastoupení edafonu a jeho hustota a mnoha dalšími faktory (Cejpek et al., 2013; Frouz et al., 2013; Zhang et al., 2015). V následujících kapitolách jsou shrnuty poznatky z několika studií zabývajících se různými vlastnostmi půdy a ekosystému do jisté míry ovlivňujícími proudění vody v půdě, či samotným prouděním v závislosti na druhu dřeviny.

### 3.4.1 Vliv druhu rekultivační dřeviny na preferenční proudění

Rostliny ovlivňují preferenční proudění vody v půdě přímo kořenovým systémem. Makropóry potřebné pro vznik preferenčního makropórového proudění se vytvářejí podél rostoucích kořenů nebo po odumření a rozložení kořenů rostlin (National Research Council, ©2001). Tvar takto vzniklých preferenčních cest je závislý na množství vody dostupném pro rostliny, přičemž při nedostatku vláhy mají kořeny tendenci prorůstat hlouběji do půdy (Kuráž et al., 2012) a vzniklé preferenční cesty tedy mají také větší hloubku. Hustota kořenových preferenčních cest je závislá na pokryvnosti dřevinné i bylinné vegetace (Zhang et al., 2015).

Druh rekultivační dřeviny ovlivňuje druhové zastoupení bylin a jejich pokryvnost (Mudrák et al., 2010). Vliv druhu rekultivační dřeviny na preferenční proudění je tedy zprostředkován bylinnou vegetací, která se na lokalitě vyskytuje. Druhové zastoupení a hustota bylinné vegetace v závislosti na druhu rekultivační dřeviny na Velké podkrušnohorské výsypce jsou popsány v kapitole 4.3 Vegetační poměry.

Dalším zprostředkovatelem vlivu druhu rekultivační dřeviny na preferenční proudění je půdní fauna, která se svou aktivitou významně podílí na vzniku preferenčního proudění (Frouz et Kuráž, 2014). Výskyt půdní fauny v závislosti na druhu stromu je popsán v kapitole 3.4.4 Vliv druhu rekultivační dřeviny na výskyt edafonu. Vliv půdní fauny na preferenční proudění je pak vysvětlen v kapitole 3.4.5 Vliv půdní fauny na pórovitost, infiltraci a preferenční proudění.

### 3.4.2 Vliv druhu rekultivační dřeviny na hospodaření s vodou

Vliv rekultivační dřeviny na hospodaření půdy s vodou je částečně zprostředkován půdní faunou. Ke zvýšení schopnosti půdy zadržovat vodu dostupnou pro rostliny dochází při vysoké aktivitě žížal a půdní fauny živící se opadankou (více viz kapitola 3.4.6 Vliv půdní fauny na půdní agregáty a hospodaření s vodou). Výskyt a velikost populací půdní fauny se liší na lokalitách s různými dřevinami z důvodu rozdílné kvality a množství opadanky jednotlivých dřevin (viz kapitola 3.4.4 Vliv druhu rekultivační dřeviny na výskyt edafonu). Schopnost půdy zadržovat vodu je tedy také rozdílná, ačkoliv tyto rozdíly nejsou v mnoha případech statisticky významné (Cejpek et al., 2013). Rychle rostoucí druhy stromů, jako je např. olše lepkavá *Alnus glutinosa* či olše šedá *Alnus incana* mají vysoký obsah vody v listech, a to pravděpodobně vede k intenzivní produkci půdy vhodné k zadržování většího množství vody, aby byla pokryta větší spotřeba vody oproti pomaleji rostoucím druhům stromů (Cejpek et al., 2017). Největší nedostatek půdní vláhy zaznamenal Cejpek et al. (2013) u lokality s dubem letním *Quercus robur* v porovnání s lokalitami s převahou borovice

pokroucené *Pinus contorta*, smrku Omorika *Picea omorica* a smrku pichlavého *Picea pungens*, olše lepkavé *Alnus glutinosa* a olše šedé *Alnus incana*, což může být vysvětleno malými populacemi žízal, menším obsahem jílu způsobeným nižší mírou uvolňování jílových částic do půdy a pomalým vývojem půdy na této lokalitě. O největším nedostatku vody dostupné pro rostliny u dubu svědčí i největší počet dní, kdy se vlhkost pohybovala pod hranicí bodu vadnutí (Cejpek et al., 2013). K větším nedostatkům dochází v zimě, v době vegetačního klidu (Cejpek et al., 2017).

Se schopností půdy zadržovat vodu souvisí i sezónní fluktuace vlhkosti půdy. Fluktuace vlhkosti na všech jmenovaných lokalitách měla podobný trend, přičemž nejvyšších hodnot dosahovala vlhkost v říjnu, listopadu, prosinci a březnu, nejnižších v červnu, červenci a srpnu. Nejnižší výkyvy vlhkosti byly zaznamenány u půdy s olší, vysoké výkyvy vlhkosti naopak u dubu a borovice (Cejpek et al., 2013). Výkyvy ve vlhkosti nejsou závislé na srážkách (Cejpek et al., 2017), ale zčásti na druhu vegetačního krytu. Schopnost půdy zachovat stabilní vlhkostní podmínky během celého roku je totiž větší na lokalitách se vstupem kvalitní opadanky do půdy a velkými populacemi půdní fauny vázanými na kvalitu opadanky (Cejpek et al., 2013)

Obsah půdní vláhy v půdě byl nejvyšší u lokality s olší. Vysoký obsah půdní vláhy byl doprovázený vysokou hodnotou polní vodní kapacity, což je spojeno s intenzivním vývojem půdy. Na lokalitě s olší je půdní vývoj zdokonalený vstupem kvalitní opadanky s nízkým C/N poměrem a souvisejícím zvýšením aktivity půdní fauny (Cejpek et al., 2013, Cejpek et al., 2017). Půdní vývoj je na lokalitě s olší také zdokonalován hustou vrstvou bylinné vegetace (Cejpek et al., 2013).

Ztráty vody z ekosystému ve formě podpovrchového odtoku jsou dle Cejka et al. (2017) silně korelovány se srážkami, přičemž větších hodnot dosahují v zimě. Další významnou složkou ztrát vody je evapotranspirace, která naopak hraje velkou roli v letních měsících. Cejpek et al. (2017) nepozoroval téměř žádný vliv druhu vegetace na evapotranspiraci ani množství podpovrchového odtoku.

Schopnost půdy zachovat stabilní vlhkostní podmínky během celého roku je větší na lokalitách se vstupem kvalitní opadanky do půdy, velkými populacemi půdní fauny vázanými na kvalitu opadanky a intenzitou zvětrávání (Cejpek et al., 2013).

### 3.4.3 Vliv druhu rekultivační dřeviny na kvalitu opadanky a obsah uhlíku a dusíku v půdě

Na obsah uhlíku a dusíku v půdě má významný vliv opadanka. Její kvalita se s druhem stromu mění a množství a podíl těchto dvou prvků v půdě je tedy proměnlivý. Při porovnání lokalit s převahou borovice pokroucené *Pinus contorta*, smrku omorika *Picea omorica* a smrku pichlavého *Picea pungens*, dubu letního *Quercus robur*, olše lepkavé *Alnus glutinosa* a olše šedé *Alnus incana*, lípou malolistou *Tilia cordata* a lokalitou s modřínem opadavým *Larix decidua* Frouz et al. (2013) nezjistil téměř žádné rozdíly v obsahu uhlíku přítomného v opadance jednotlivých dřevin. Avšak značné rozdíly byly nalezeny v obsahu dusíku. Obsah dusíku byl vyšší v opadance produkované opadavými stromy, v porovnání se stálezelenými. Nejvyšší hodnoty obsahu dusíku byly naměřeny u olše a lípy, nejnižší u smrku. Kvalitu opadanky lze určit z poměru C/N. Ten byl významně vyšší u stálezelených stromů (zejména

u smrku) oproti stromům opadavým (olše a lípa). Nejkvalitnější opadanku z porovnávaných dřevin má tedy olše následovaná lípou, naopak nejméně kvalitní opadanku má smrk (Frouz et al., 2013).

Zásoba uhlíku v půdě se významně liší při porovnání lokalit s různou dominantní dřevinou na Velké podkrušnohorské výsypce. Největší zásoba uhlíku je na lokalitách s dominantní dřevinou olše a lípou, naopak nejnižší u lokalit s převahou smrku nebo borovice. Relativně nízkých hodnot dosahuje zásoba uhlíku také u dubu. Zásoba uhlíku v půdě je pozitivně korelována s hloubkou humusového horizontu a podílem žízálech chodeb ve vrchní vrstvě půdy. Při výraznější aktivitě žížal podporované nízkým C/N poměrem v opadance tedy dochází ke zvětšování zásoby uhlíku v půdě, zvýšení mocnosti humusového horizontu a urychlení vývoje půdy. K těmto procesům dochází zejména u olše. Naopak u lokalit, kde je aktivita žížal malá (dub), je malá i zásoba uhlíku v půdě, málo mocný humusový horizont a vývoj půdního profilu není intenzivní (Frouz et al., 2013).

#### 3.4.4 Vliv druhu rekultivační dřeviny na výskyt edafonu

Výskyt edafonu je ovlivněn kvalitou opadanky rekultivační dřeviny a zásobou uhlíku v půdě. Kvalita opadanky má vliv na hojnost žížal na jednotlivých lokalitách. Čím kvalitnější opadanka je (čím nižší je poměr C/N), tím jsou většinou hojnější i populace žížal. Hustota žížal se významně liší mezi jednotlivými lokalitami (viz kapitola 4.4 Výskyt edafonu na jednotlivých lokalitách). Nejvyšší hustotu žížal pozoroval Frouz et al. (2013) u olše lepkavé *Alnus glutinosa* a olše šedé *Alnus incana*, nízké u dubu letního *Quercus robur*, smrku omorika *Picea omorica* a smrku pichlavého *Picea pungens*. Stromy produkující opadanku s nižším C/N poměrem dále podporují zvětšování populací pancířníků. Jedná se zejména o olši lepkavou *Alnus glutinosa* a lípu malolistou *Tilia cordata*. Naopak stromy produkující opadanku s vysokým C/N poměrem – zejména druhy z rodu smrk – podporují populace chvostoskoků a zvyšují biomasu bakterií a hub v půdě. Houby (F) jsou podporovány vysokým C/N poměrem v opadance více než bakterie (B), což má za následek vysoký F/B poměr v těchto půdách (Frouz et al., 2013).

Množství mikrobiální biomasy a míra mikrobiální respirace jsou ovlivněny zásobou uhlíku v půdě, zejména ve vrchní vrstvě půdního profilu. Zatímco s rostoucí zásobou uhlíku v půdě mikrobiální biomasa roste, mikrobiální respirace se snižuje. Vysoké hodnoty mikrobiální biomasy a nízké hodnoty mikrobiální respirace byly naměřeny u olše a lípy, naopak nízké hodnoty mikrobiální biomasy a vysoké hodnoty mikrobiální respirace u smrku. Zvýšená hodnota mikrobiální biomasy je spojena s vysokým obsahem uhlíku v půdě, dále tenkým horizontem drti a vysokou hustotou žízálech chodeb (Frouz et al., 2013).

Přítomnost populací edafonu a jejich druhové zastoupení je důležitým faktorem zprostředkujícím efekt druhu stromu na půdu. Populace edafonu ovlivňují hydrofyzikální vlastnosti půdy a vývoj půdního profilu (více viz následující kapitoly) (Frouz et al., 2013).

### 3.4.5 Vliv půdní fauny na pórovitost, infiltraci a preferenční proudění

Pórovitost půdy se zvyšuje se zvyšující se aktivitou půdní fauny, tento jev je značný hlavně v přítomnosti žížal. Čím hojnější jsou populace žížal, tím je vyšší i hodnota pórovitosti. Cejpek et al. (2013) zjistil nejvyšší hodnotu pórovitosti právě u olše (přibližně 67 % objemových), kde byla zaznamenána nejvyšší hustota žížal ze všech zájmových lokalit. Půdní fauna vytváří v půdě řadu biopórů, nejvíce se na pórovitosti podílí již zmíněné žížaly a mravenci. Biopóry vznikají také v přítomnosti pavouků, brouků, rovnokřídlých a dalších zástupců půdní fauny. Biopóry vzniklé za přítomnosti půdní fauny se řadí mezi makropóry. Liší se tvarem, velikostí a stavbou. Většina zástupců členovců se během své aktivity hrabe v půdě pomocí nohou nebo mandibul a vykopaná hlína je buď použita na zpevnění stropu nebo vyplnění nepoužívaných děr. Žížaly při vrtání tlačí materiál ke straně, tím ho zhutňují a vzniká méně propustná vrstva v okolí chodby (Frouz et Kuráž, 2014), tzv. drilosféra (Sander et Gerke, 2009), která je zevnitř pokrytá slizem. Na rozdíl od členovců žížaly zpracovávají půdu také trávící soustavou a ve formě vývržků je materiál uložen uvnitř nebo vně půdního profilu (Frouz et Kuráž, 2014). Tvar makropórů vzniklý aktivitou žížal je závislý na druhu žížal. Zatímco endogenní žížaly se intenzivně vrtají ve vrchní vrstvě půdy a jen některé jejich chodby jsou otevřené na povrch půdy, chodby anektických žížal jsou otevřené na povrchu a prostupují hlouběji do půdy. Epigeické žížaly formují několik permanentních chodeb (Schon et al., 2017).

Biopóry mají tendenci zvyšovat infiltraci vody do půdy (Frouz et Kuráž, 2014). Zvýšení rychlosti proudění v oblasti makropóru vede ke vzniku preferenčního proudění, konkrétně makropórového. Makropóry ve formě žížalích chodeb zvyšují preferenční proudění v půdě zejména v období sucha (Schon et al., 2017). Vysoce kontrastní hydraulické vlastnosti drilosféry pravděpodobně způsobují obtok podél žížalích chodeb (Sander et Gerke, 2009).

### 3.4.6 Vliv půdní fauny na půdní agregáty a hospodaření s vodou

Půdní bezobratlí podporují vznik ve vodě stabilních agregátů, což vede k lepší schopnosti půdy zadržovat vodu a snížení odtoku. Mezi agregáty totiž vznikají větší póry a v rámci agregátu vzniká velké množství pórů, zejména kapilárních. Kapacita půdy k zadržování vody je zvyšována transformací organické hmoty půdní faunou. Organická hmota je přeměněna na holo-organické nebo organo-minerální agregáty (Frouz et Kuráž, 2014).

Holo-organické agregáty vznikají během aktivity půdní fauny živící se opadankou. Opadanka je těmito organismy strávena a vyloučena ve formě fekálních pelet, které několikanásobně zvyšují polní vodní kapacitu. Přeměnou opadanky totiž dochází k rozpadu pokožky listu a buněčných stěn, které původně obklopovaly kapilární póry uvnitř listu a ke zpřístupnění pórů okolnímu prostředí a zvýšení polní vodní kapacity půdy. Holo-organické agregáty mohou v některých půdách dosahovat mocnosti několika centimetrů (Frouz et Kuráž, 2014).

Žížaly podporují vznik organo-minerálních agregátů, které také významně přispívají k vyšší schopnosti půdy zadržovat vodu, hodnotě polní vodní kapacity a bodu vadnutí. Nárůst bodu vadnutí je mírnější než polní vodní kapacity, proto žížaly zlepšují

schopnost půdy zadržovat vodu dostupnou pro rostliny. V případě hojných populací žížal dochází k výraznému zvýšení produkce ve vodě stabilních agregátů a zlepšení schopnosti půdy zadržovat vodu, což napomáhá stimulaci růstu rostlin v období sucha. Ke zvýšení schopnosti půdy zadržovat vodu dochází při zvýšené aktivitě žížal zejména v minerálním horizontu (Frouz et al., 2005). Značná aktivita žížal dále způsobuje vznik velkého množství chodeb, které mají tendenci zůstat otevřené. To podporuje transport vody a vzduchu v půdě a vede k rychlejšímu poklesu vlhkosti po srážkové události (Frouz et Kuráž, 2014; Schon et al., 2017).

Bioturbance způsobená půdní faunou, zejména žížalami, podporuje akumulaci organické hmoty v půdě. Akumulace organické hmoty má za následek zlepšení schopnosti půdy zadržovat vodu. U lokality s olší byla zaznamenána nejvyšší polní vodní kapacita, což je způsobeno produkcí kvalitní opadanky s nízkým C/N poměrem (viz kapitola 3.4.3 Vliv druhu rekultivační dřeviny na kvalitu opadanky a obsah uhlíku a dusíku v půdě), která následně podléhá intenzivní bioturbanci půdní faunou. Nízké hodnoty polní vodní kapacity vykazovaly lokality s jehličnatými druhy stromů, kde bioturbance půdní faunou nebyla intenzivní (Frouz et Kuráž, 2014).

#### 3.4.7 Vliv půdní fauny na vývoj půdního profilu

Vyšší hustota půdní fauny, zejména žížal, podpořená produkcí opadanky s nižším C/N poměrem zapříčiňuje zvýšení bioturbance. Vyšší míra bioturbance má za následek přemístění organické hmoty z opadanky a fermentační vrstvy do minerálního horizontu půdního profilu. Organická hmota je v minerálním horizontu smíšená s půdními agregáty, které snižují míru rozkladu organické hmoty a zabraňují její mineralizaci. O nižší dekompozici svědčí nízká mikrobiální respirace a vyšší mikrobiální biomasa, velký podíl půdní mikroflóry zůstává tedy neaktivní. K takovým jevům dochází v rámci Velké podkrušnohorské výsypky např. na lokalitách s olší lepkavou *Alnus glutinosa* a olší šedou *Alnus incana* a lokalitách s převahou lípy malolisté *Tilia cordata* (Frouz et al., 2013).

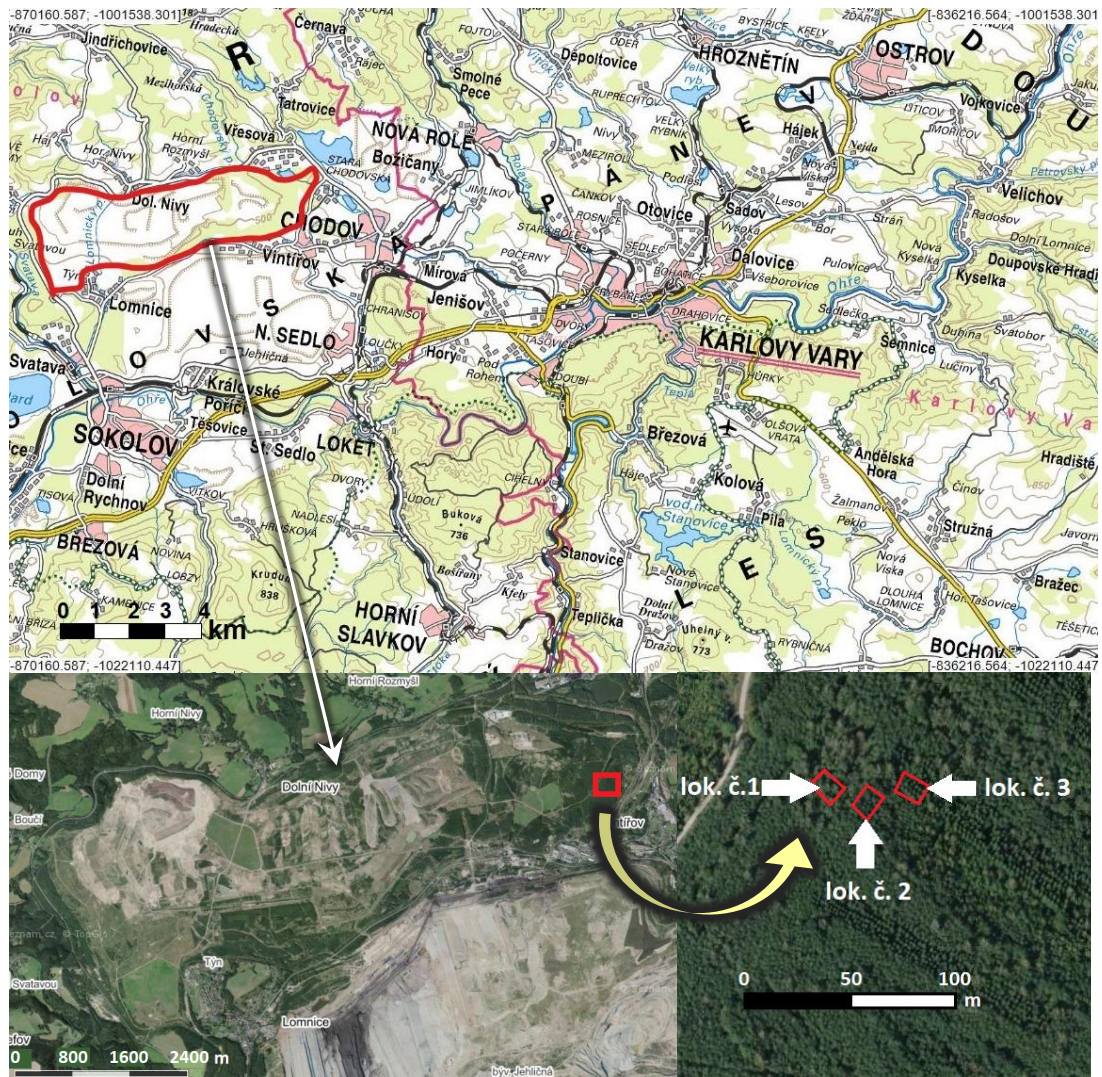
Naopak v případě, že populace žížal není velká a není tedy velká ani bioturbance, opadanka má sklon zůstat na povrchu půdy a organická hmota vstupuje do půdy v menší míře buď jako rozpuštěná organická hmota, nebo ve formě malých částic, které zůstávají mezi půdními agregáty. Následně může docházet ke snazší dekompozici a mineralizaci organické hmoty z důvodu zvýšené aktivity mikrobů. Půdní profil s těmito popsányými vlastnostmi vykazují lokality s převahou smrku Omorika *Picea omorica* a smrku pichlavého *Picea pungens* (Frouz et al., 2013).

Potenciálně existuje hustota žížal a dalších organismů, při které nelze pozorovat popsané příznivé vlivy na půdní vlastnosti. Např. při hustotě žížal 50 jedinců/m<sup>2</sup> půdy nebyl pozorován účinek přítomnosti žížal na včlenění uhlíku do půdy, rozdíly byly pozorovány až při hustotě 200 jedinců na m<sup>2</sup> (Schon et al., 2017).



## 4. CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

Studie byla provedena na Velké Podkrušnohorské výsypce (50°14'21" severní šířky a 12°39'24" východní délky), která se nachází v Sokolovské pánvi a s šířkou přibližně 2,5 km a délkou 10 km (Frouz et al., 2013) má rozlohu okolo 1957 ha (Cejpek et al., 2017), což z ní činí největší výsypku ČR. Umístění výsypky je vyobrazeno na obrázku č. 4. V rámci snahy o obnovení krajiny jsou zde realizovány dlouhodobé projekty lesnických a zemědělských rekultivací a prováděn vědecký výzkum několika institucemi.



Obr. 4: Umístění výsypky (nahore), umístění zájmových lokalit na výsypce (vlevo dole) a jejich přesná poloha (vpravo dole). Pozn.: Zkratka lok. č. 1 označuje lokalitu s dominantním druhem olše lepkavá *Alnus glutinosa*, lok. č. 2 s dubem letním *Quercus robur* a lok. č. 3 se smrkem ztepilým *Picea abies* (upraveno z: ČÚZK, ©2019; Mapy.cz, ©2019a; Mapy.cz, ©2019b).

## 4.1 Zeměpisné, geologické a pedologické poměry

Sokolovská pánev leží v jihozápadní části podkrušnohorské příkopové propadliny, která je součástí krušnohorského bloku Českého masivu. Pánev na jihozápadě sousedí s Chebskou pávní a ze severovýchodu se Severočeskou pávní, dále je pánev vymezena krušnohorským zlomem na severu a ohareckým na jihu. Vznikla ve starších třetihorách saxonskými tektonickými pohyby, při kterých byl porušen původní zarovnaný reliéf a v nově vzniklých vodních plochách se ukládaly třetihorní sedimenty. Terciární sedimentace měla 3 etapy, při kterých vzniklo několik souvrství, konkrétně nejstarší starosedelské, souvrství sloje Josef, vulkanogenní, slojové souvrství tvořeno slojí Anežka a Antonín a nejmladší cyprisové souvrství. Posledně jmenované je nejmočnější, v blízkosti lomu Družba dosahuje mocnosti až 200 m (Dimitrovský, 2001).

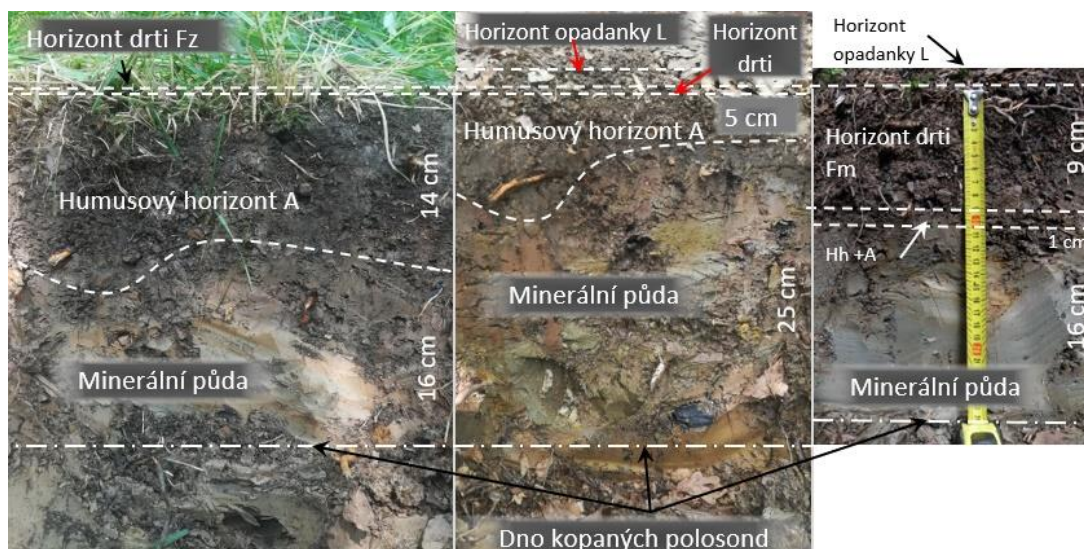
Cyprisové souvrství je převážně tvořeno bitumenními jílovcí, místy slabě karbonátickými. Chemické a mineralogické složení v profiluje různorodé, závisí na procesech, kterým bylo souvrství během vývoje vystaveno, např. kolísání teplot, cyklická vulkanická aktivita a podobně. Díky tomu na bázi souvrství převládá v jílové složce hornin kaolinit, výše se vyskytuje také sericit a illit, které ještě výše převládají a ve vrchní části souvrství se ve variabilním množství vyskytuje také montmorillonit. Obsah organického uhlíku se převážně pohybuje mezi hodnotami 1,8 % a 6,8 %, v některých případech nabývá hodnot až 18 %. Za přítomnost organické hmoty jsou zodpovědné převážně řasy *Botryococcus*, pylová zrna a plankton. Konkrétně se jedná o tenké vrstvy v bitumenních jílovcích, které mají za následek lístkovitou odlučnost těchto tzv. „cyprisových břidlic“ (viz Obr. 5). Mají hnědé zbarvení, jsou tuhé, kožovité a obsahují schránky drobného vodního korýše ostrakoda *Cypris augusta* ve formě zkamenělin, podle kterého je souvrství pojmenováno (Jonáš, 1975; Richards et al., 1993; Dimitrovský, 2001).



Obr. 5: Lístkovitá odlučnost „cyprisových břidlic“

Ve 20. století bylo původní přirozené uložení narušeno činností člověka při dobývání zmíněných uhelných slojí a doprovodných surovin – kaolinu, štěrkopísku a dalších (Dimitrovský, 2001). Nepotřebný materiál byl následně převezen na výsypky nebo v případě jeho toxicity uložen odděleně. Povrch výsypek byl v dalších letech rekultivován, nebo ponechán samovolné sukcesi (Kuráž et al., 2012).

Půda Velké podkrušnohorské výsypky je tvořena převážně materiálem z cypri-sového souvrství (Frouz et al., 2005). Půdní profily jednotlivých zájmových území jsou zobrazeny na následujícím obrázku.



Obr. 6: Půdní profily na jednotlivých zájmových územích a vymezení jednotlivých horizontů – olše lepkavá (vlevo), dub letní (uprostřed), smrk ztepilý (vpravo)

Půdní profil u olše je charakteristický mocným humusovým horizontem A dosahujícím tloušťky okolo 14 cm. Nad tímto horizontem leží přibližně 2 mm tenký zogenní horizont drti Fz (Mudrák et al., 2010; Němeček et al., 2011). Struktura horizontu A je krupnatá až drobtovitá (viz Obr. 7). Mezi humusovým horizontem A a minerální půdou je téměř rovnoměrný přechod, místy jsou přítomny zátoky organické hmoty do minerální půdy. Z hlediska formy nadložního humusu se jedná o mul (Němeček et al., 2011).



Obr. 7: Půdní agregáty v horizontu A v profilu u olše lepkavé *Alnus glutinosa*

Půdní profil u dubu je charakteristický proměnlivou tloušťkou humusového horizontu A, který dosahuje mocnosti pouze okolo 5 cm, místy více. Nad humusovým

horizontem se nachází přibližně 2 mm tenký horizont drti a na povrchu leží horizont opadanky L o proměnlivé mocnosti (0 – 2 cm) (Mudrák et al., 2010). U dubu nelze formu nadložního humusu jasně určit, jedná se o nejslabší mocnost nadložního humusu mezi zájmovými územími.

Půdní profil u smrku vykazuje vlastnosti moru, pro nějž je typický plst'ovitý vrstevnatý mykogenní horizont drti Fm (viz Obr. 25), v tomto případě o mocnosti přibližně 9 cm. Nad ním leží horizont opadanky o mocnosti okolo 2 cm. Pod fermentační vrstvou se nachází tenký humusový horizont měli Hh (Němeček et al., 2011), níže humózní horizont A. Celkem mají tyto dva horizonty mocnost okolo 1 cm (Mudrák et al., 2010). Nejspodnější vrstvou profilu je minerální půda. Přechod mezi horizonty je plynulý.

## 4.2 Klimatické poměry

Zájmové plochy se nachází na území klimatické podoblasti MT4, což je mírně teplá a mírně vlhká podoblast s ročním průměrem srážek 600 mm až 750 mm. Srážkový úhrn se ve vegetačním období pohybuje od 350 mm do 450 mm, v zimním pak okolo 250 mm až 300 mm. Průměrný počet zatažených dní je přibližně 40 až 50, jasných pak 150 až 160 (Quitt, 1971). Průměrná roční teplota je přibližně 6,8 °C (Cejpek et al., 2017), přičemž v lednu nabývá hodnot -2 °C až -3 °C, v dubnu 6 °C až 7 °C, v červenci od 16 °C do 17 °C a v říjnu od 6 °C do 7 °C. Počet dní, kdy teplota dosahuje, nebo překračuje hodnotu 25 °C je v průměrném roce 20 až 30. Naopak počet ledových dní se pohybuje okolo 40 až 50 za rok. Další charakteristikou podoblasti je dle Quitta počet dní, kdy teplota dosahuje alespoň 10 °C, což znamená v případě podoblasti MT4 140 až 160 dní za rok (Quitt, 1971). Na zájmových lokalitách před měřením nedošlo ke srážkové události nejméně po dobu jednoho měsíce.

## 4.3 Vegetační poměry

Velká podkrušnohorská výsypka byla během 2. poloviny 20. století osázena mozaikou lesních stanovišť. Mezi zde vysázené druhy patří např. z jehličnatých smrk ztepilý *Picea abies*, smrk omorika *Picea omorica*, smrk pichlavý *Picea pungens*, borovice pokroucená *Pinus concorta* a z listnatých olše lepkavá *Alnus glutinosa*, olše šedá *Alnus incana*, dub letní *Quercus robur*, lípa malolistá *Tilia cordata* a další. Některé oblasti výsypky byly ponechány bez vegetačního krytu, aby zde došlo ke spontánnímu znovuzalesnění. Na takových stanovištích dnes převládají listnaté druhy vrba jíva *Salix caprea* a bříza bělokora *Betula pendula*. Na každém z těchto stanovišť je dominantní jeden nebo více druhů stromů. Na dalších lokalitách došlo k osetí travinami nebo byl proveden jiný typ rekultivace (Kuráž et al., 2012; Cejpek et al., 2013).

Na vymezených zájmových plochách je dominantní rostlinou olše lepkavá *Alnus glutinosa*, dub letní *Quercus robur*, nebo smrk ztepilý *Picea abies*. U stanoviště s převahou olše Mudrák et al. (2010) stanovil přibližně 10 druhů rostlin v lesním podrostu, z nichž největší podíl na pokryvnosti měla třtina křovištní *Calamagrostis epigejos* a to přibližně z 80 %. Z dalších druhů lze jmenovat zhruba ze 6 % zastoupený pýr plazivý *Elytrigia repens* a kopřivu dvoudomou *Urtica dioica*. Dalšími již méně zastoupenými druhy byly např. pcháč rolní *Cirsium arvense* nebo ostružiník maliník *Rubus idaeus*. Pokryvnost na této lokalitě byla 100 % (viz Obr. 8). Na lokalitách s převahou dubu a smrku nebyla pozorována téměř žádná bylinná vegetace (viz Obr. 9).



Obr. 8: Vegetační kryt lokality s převahou olše lepkavé *Alnus glutinosa*



Obr. 9: Vegetační kryt lokality s převahou dubu letního *Quercus robur* (vlevo) a smrku ztepilého *Picea abies* (vpravo)

#### 4.4 Výskyt edafonu na jednotlivých lokalitách

Frouz et al. (2013) zjistil významné rozdíly v hustotě žížal na jednotlivých lokalitách, nejvyšší hodnota byla zjištěna u olše (téměř 300 jedinců/m<sup>2</sup>), nejnižší u plochy s převahou smrku (méně než 50 jedinců/m<sup>2</sup>), u dubu hustota žížal mírně přesahovala 50 jedinců/m<sup>2</sup>. Dále byla zjištěna nejvyšší hustota chvostoskoků (8,8E04 jedinců/m<sup>2</sup>) a nejnižší hustota pancířníků (15,5E04 jedinců/m<sup>2</sup>) u smrku při porovnání zájmových lokalit. Naopak nejvyšší hustota pancířníků (80,5E04 jedinců/m<sup>2</sup>) byla stanovena na lokalitě s olší, kde významnou roli hrálo také výrazně největší množství mikrobiální biomasy ze všech tří lokalit (Frouz et al., 2013).

## 5. METODIKA

### 5.1 Plán vzorkování

Data objemové vlhkosti při odběru zmíněná v kapitole 7. Diskuze byla poskytnuta v rámci týmové práce na projektu NAZV "Optimalizace managementu obnovy lesních porostů na stanovištích dotčených povrchovou těžbou" pod vedením Mgr. Aleny Walmsley, Ph.D.

#### 5.1.1 Předmět a čas měření

Ve dnech 4. a 5. 6 2018 bylo provedeno terénní měření nasycené hydraulické vodivosti ( $K_s$ ), odběr neporušených půdních vzorků pro laboratorní měření objemové hmotnosti. První den kampaně byly také provedeny kopané polosondy a infiltrace roztoku barevného stopovače (briliant blue FCF) do půdy. Následující den přibližně po 24 hodinách byl půdní profil v místě infiltrace stopovače postupně odkopán (pomocí horizontálních a vertikálních řezů, viz metodika níže) a obarvená místa proměřena, popsána a vyfocena za účelem kvantifikace a kvalifikace preferenčního proudění.

Následná laboratorní měření neporušených vzorků 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 vybrány tři kontrastní lokality z hlediska vegetačního pokryvu (dominantní dřeviny). Tyto tři zvolené lokality se nacházejí v těsné blízkosti a jediným důležitým odlišným faktorem pro tvorbu půdního profilu byla právě volba použité dřeviny pro umělou lesnickou rekultivaci (olše lepkavá *Alnus glutinosa*, dub letní *Quercus robur*, nebo smrk ztepilý *Picea abies*). Lokalita č. 1 je v současnosti porostlá monokulturou olše lepkavé, lokalita č. 2 dubu letního a lokalita č. 3 smrku ztepilého. Označení lokalit je na obrázku č. 4. Rozměry lokalit jsou přibližně 15 m krát 10 m.

#### 5.1.3 Počty vzorků a místo jejich odběru

Na lokalitách s převahou olše a smrku bylo odebráno 10 neporušených vzorků, na lokalitě s převahou dubu 9 neporušených vzorků ve vrchní části půdy (střední hloubka odběru přibližně 6 cm, objem válečku 100 cm<sup>3</sup>, výška válečku 4 cm). Ve vrchní části půdy bylo u smrku vzorkováno pod opadankou a vrchní částí fermentační vrstvy, u olše pod travním drnem a u dubu pod opadankou. Na každé lokalitě byla provedena jedna kopaná polosonda o hloubce přibližně 35 cm a jeden infiltrační experiment s barevným stopovačem. Na každé lokalitě byla také provedena terénní měření  $K_s$  s Guelphským permeametrem (GP) - 3 ve vrchní vrstvě a 4 ve spodní vrstvě. Ve vrchní vrstvě bylo vzorkováno s hloubkou vrtu 10 cm až 14 cm a s výškou výtopy okolo 5,5 cm a ve spodní vrstvě s hloubkou vrtu 23 cm až 28 cm a se stejnou výškou výtopy opět okolo 5,5 cm.

Pozn.: Výška výtopy ve vrtu byla vždy minimálně 4 cm pod povrchem terénu – výtopy výše není prakticky možná vzhledem k nerovnostem terénu, opadance, travnímu drnu a fermentační vrstvě – všechna voda by pak tekla při povrchu u rozhraní

půdy. Bylo tedy provedeno měření nejsvrchnější vrstvy půdy, jakou bylo možné vzhledem k terénním podmínkám měřit.

Při výběru místa odběru neporušených vzorků, místa terénního měření  $K_s$ , místa infiltrace barevného stopovače a kopaných polosond byla snaha o jejich rovnoměrné rozmístění v rámci každé lokality.

## 5.2 Měření $K_s$ Guelphským permeametrem

Pro terénní měření nasycené hydraulické vodivosti byl použit Guelphský permeametr (Eijkelkamp, 2011) a speciální ostré vrtáky pro tvorbu vrtů. Celé měření bylo prováděno dle zmíněného manuálu tak, aby byly eliminovány nejčastější chyby, které mohou nastat.

### 5.2.1 Postup měření

V terénu byly podstoupeny tyto kroky:

1. Byl sestaven Guelphský permeametr dle výše zmíněného manuálu.
2. Pro navrtání vrtů byl použit speciální vrták. Vrtání probíhalo pomalu a opatrně tak, aby nedošlo ke zhutnění stěn vrtu a tím ke snížení hodnot  $K_s$  (Jačka et al., 2014).
3. Byla změřena hloubka a průměr vrtu, hodnoty hloubky se pohybovaly od 10 do 28 cm a průměry vrtů nabývaly hodnoty 5,5 nebo 6 cm.
4. Guelphský permeametr byl umístěn do vrtu tak, aby jeho váha byla přenesena pouze do trojnožky, nikoli na dno vrtu. Vytažením zavzdušňovací trubičky do požadované výšky (dle předem určené výšky výtopy) bylo zahájeno samotné měření. Výška výtopy byla udržována na hodnotě 5, 5,5 nebo 6 cm. U vrchní vrstvy půdy bylo důvodem zajištění měření pouze v dané vrstvě, nikoliv ve vrstvě nad ní a u hlubších vrtů byla tato výška výtopy volena tak, aby byly naměřené hodnoty navzájem srovnatelné.
5. Pokles hladiny ( $H_{pv}$ ) za časovou jednotku ( $t$ ) byl průběžně zaznamenáván do zápisníku.

Získaná data byla vyhodnocena pomocí aplikace Excel (podrobně v následující kapitole).

### 5.2.2 Vyhodnocení měření $K_s$ Guelphským permeametrem

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

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

kde  $C_w$  je tvarový parametr vrtu,  $i_{cg}$  ustálená rychlost poklesu hladiny vody v zásobníku permeamtru,  $A_g$  vnitřní průřezová plocha zásobníku permeamtru ( $35,22 \text{ cm}^2$ ),  $h_g$  výška vody ve vrtu,  $r_g$  poloměr vrtu a  $sn$  je sorbční číslo.

Sorbční číslo je odhadováno na základě zrnitostně-strukturní kategorie půdy, na které měření probíhá. Jelikož se jedná o převážně strukturní jíly, byla tato hodnota odhadnuta na  $0,12 \text{ cm}^{-1}$  (Pavlásek et Jačka, 2014b).

Po odhadu hodnoty sorbčního čísla byl určen vzorec pro výpočet parametru  $C_w$  platný pro  $sn \geq 0,09 \text{ cm}^{-1}$  (Zhang et al., 1998):

$$C_w = \left( \frac{\frac{h_g}{r_g}}{2,074 + 0,093 \frac{h_g}{r_g}} \right)^{0,754} \quad (5.2)$$

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).

## 5.4 Měření preferenčního proudění

S pomocí infiltračního válce byla provedena infiltrace roztoku brilliant blue FCF. Následně bylo provedeno odkopávání v horizontálních a vertikálních řezech za současného proměřování obarvených míst, jejich popisu a fotografování z důvodu kvantifikace a vizualizace preferenčního proudění na každém ze tří stanovišť.

Byly realizovány následující kroky:

- 1) Rostliny v místě zatlučení válce byly ostříhány.
- 2) Infiltrační válec byl zatlučen dostatečně mělce, aby se neomezilo horizontální roztékání stopovače v půdě, ale dostatečně hluboko tak, aby stopovač neproudil po povrchu půdy. Hloubka zatlučení tak činila přibližně 4 cm (viz Obr. 10a).
- 3) Poté byl použit roztok o koncentraci 5 g/l a objemu 24 l. Do půdy byl při postupném dolévání infiltrován tak, aby výtopa byla udržována přibližně konstantní na úrovni 4 cm a aby nedošlo k porušení struktury půdy (viz Obr. 10b).
- 4) Během druhého dne byl odebrán válec a pomocí vojenské lopatky, krumpáče a lopaty byl postupně odkrýván prostor vsaku v horizontálních a vertikálních řezech. Odkrývání probíhalo nejprve vertikálně ve vzdálenosti 80 cm od středu infiltračního válce a hloubce 50 cm (viz Obr. 10c). Tato vzdálenost a hloubka byly voleny proto, aby bylo zajištěno zaznamenání maximální horizontální vzdálenosti i hloubky vsaku barviva. Dále byl postupně prostor vertikálními řezy o šířce 5 až 10 cm odkrýván, dokud nebylo dosaženo středu infiltračního válce. Hloubka se rovnoměrně zvětšovala s přibližováním se k válci, pod válcem bylo dosaženo maximální hloubky 90 cm. Následně byly prováděny řezy horizontální až do hloubky 30 cm (viz Obr. 10d). Veškeré údaje o preferenčních cestách (hloubka, vzdálenost od středu válce, druh preferenční cesty a další) byly zaznamenány do zápisníku a probíhající odkopávání bylo fotograficky dokumentováno.





Obr. 10: Postup měření preferenčního proudění pomocí vsaku barviva; a = zatloukání infiltračního válce, b = postupné nalévání roztoku stopovače do infiltračního válce, c = vertikální odkopávání, d = horizontální odkopávání

## 5.5 Kopané polosondy

Na každé z lokalit bylo vybráno vhodné místo k vyměření půdorysu kopané sondy. Všechny sondy měly na šířku i délku rozměr 60 cm. V místě budoucí kopané sondy byly nejdříve odstraněny travní drny a jiné nežádoucí rostliny, pokud byly přítomny. Drny byly umístěny na první skládku výkopového materiálu. Následně byly sejmuty jednotlivé horizonty a zemina z každého horizontu byla umístěna na vlastní skládku, aby byl při zasypávání zachován původní sled horizontů a byly tak minimálně narušeny původní vlastnosti půdy. Kopání musí být prováděno tak, aby čelní i obě postranní stěny sondy byly svislé. Hloubka sondy u olše a dubu se pohybovala okolo 30 cm, u smrku byla hluboká přibližně 26 cm. Hloubka byla volena tak, aby bylo možné zachytit všechny půdní horizonty na fotografii (viz Obr. 6). Před, v průběhu i po samotném výkopu byla dodržována zásada nepoškodit porost a půdu nad čelem sondy.

## 5.6 Odběr neporušených půdních vzorků

K odběru neporušených půdních vzorků pro laboratorní měření objemové hmotnosti bylo použito Kopeckého válečku o objemu  $100 \text{ cm}^3$ . K odběru docházelo v hloubce od 5 do 7 cm.

### 5.6.1 Postup odběru

Při samotném odběru byl dodržován tento postup:

- 1) Ocelový nástavec s válečkem byl zatlučen s pomocí palice do půdy tak, aby byl váleček zcela půdou zaplněn a aby nedošlo ke konsolidaci okolní zeminy.
- 2) Vojenskou lopatkou byl poté nástavec s válečkem i včetně okolní zeminy vyrypnut.
- 3) Nástavec byl s válečkem opatrně otočen o 180° kolem horizontální osy a přebytečná zemina odstraněna nožem (viz Obr. 11).
- 4) Váleček byl uzavřen víčkem, vysunut z nástavce, přebytečná zemina byla odstraněna i z druhé strany a váleček uzavřen úplně.
- 5) Zvážení a zapsání hmotnosti včetně místa a hloubky odběru do formuláře.

Odebrané vzorky byly poté uloženy do boxu a převezeny do laboratoře pro další zpracování.



Obr. 11: Odřezávání přebytečné zeminy od neporušeného vzorku

## 5.7 Statistické řešení

Statistické vyhodnocení bylo provedeno v počítačovém programu RStudio v prostředí programovacího jazyka R. U datových souborů byla vypočtena základní popisná statistika (minimum, maximum, rozptyl, koeficient variace, medián, aritmetický průměr a další), dále byly datové soubory testovány na normalitu pomocí Shapiro-Wilk testu, přičemž u všech testovaných byla normalita potvrzena a tyto datové soubory mohly být tedy bez transformace testovány na shodu průměrů pomocí jednofaktorové analýzy rozptylu (ANOVA) a následného Tukey's honest significance test (Tukey HSD test). Pro stanovení významnosti vlivu rekultivační dřeviny (dub, olše, smrk) na jednotlivé půdní charakteristiky ( $K_s$  – terénní měření, objemová hmotnost) byla výše uvedenými testy prověřována následující nulová hypotéza: Skutečný rozdíl v aritmetických průměrech je nulový. Pokud byla přijata nulová hypotéza, znamená to, že vliv rekultivační dřeviny na průměr hodnot zkoumané vlastnosti dané vrstvy půdy je zanedbatelný. Tukey HSD test byl prováděn pouze v případě, že ANOVA zamítla nulovou hypotézu. Test nulové hypotézy byl proveden na hladině významnosti 0,05.

Pro statistickou analýzu průměrů naměřených  $K_s$  Guelpským permeametrem byl kromě vlivu dřeviny na vrchní část půdního profilu testován také vliv dřeviny na spodní vrstvu půdy.

## 6. VÝSLEDKY

### 6.1 Výsledné hodnoty Ks měřené Guelphským permeametrem

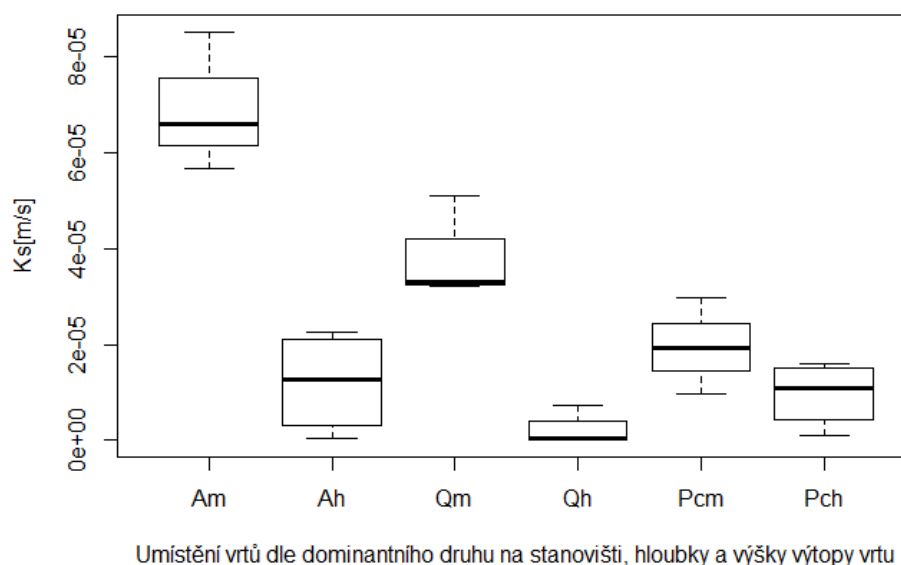
Měřené hodnoty Ks jsou uvedeny v příloze č. 1.

Tab. 1: Popisná statistika hodnot Ks stanovených Guelphským permeametrem [m/s]

Vrt	mělký			hluboký		
Území s převahou druhu	<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Picea abies</i>
Minimum	5,67E-05	3,20E-05	9,55E-06	4,62E-07	8,09E-08	1,07E-06
Maximum	8,51E-05	5,11E-05	2,97E-05	2,27E-05	7,42E-06	1,60E-05
Medián	6,57E-05	3,30E-05	1,92E-05	1,26E-05	4,11E-07	1,09E-05
Průměr	6,92E-05	3,87E-05	1,95E-05	1,21E-05	2,64E-06	9,74E-06
Směrodatná odchylka	1,45E-05	1,08E-05	1,01E-05	1,06E-05	4,15E-06	6,80E-06
Koeficient variace	2,10E-01	2,78E-01	5,17E-01	8,75E-01	1,57E+00	6,98E-01
ANOVA	p = 0,00626			p = 0,33400		

Z tabulky č. 1 je zřejmé, že ve vrchní vrstvě půdy byla nejvyšší průměrná hodnota Ks naměřena u lokality s olší, což je 3,5x větší hodnota než nejnižší průměrná hodnota u lokality se smrkem. Ve spodní vrstvě půdy byla měřena nejvyšší průměrná hodnota Ks také u lokality s olší, nejnižší u dubu. Rozdíly v Ks mezi lokalitami ve spodní vrstvě půdy nebyly výrazné v porovnání s vrchní vrstvou půdy. Největší rozdíly v Ks mezi vrchní a spodní vrstvou půdy byly zjištěny u olše, nejnižší u smrku. U dubu byl také pozorován velký rozdíl v hodnotách Ks mezi vrchní a spodní vrstvou, avšak nebyl tak markantní, jako u olše.

Na následujícím obrázku je popisná statistika graficky znázorněna pomocí boxplotů.



Obr. 12: Grafické znázornění popisné statistiky hodnot Ks měřených Guelphským permeametrem (A = *Alnus glutinosa*, Q = *Quercus robur*, Pc = *Picea abies*; m = mělký vrt, h = hluboký vrt)

ANOVA test odhalil statisticky významné rozdíly v průměrech při porovnání hodnot naměřených u mělkých vrtů, u hlubokých vrtů nikoliv (viz Tab. 1). Pro hodnoty  $K_s$  v mělkých vrtech byl nadále proveden Tukey HSD test, aby byl lokalizován statisticky významný rozdíl v průměrech mezi jednotlivými lokalitami (viz Tab. 2).

Tab. 2: Výsledky Tukey HSD testu pro mělké vrt

	Rozdíl průměrů [m/s]	p hodnota
Qm-Am	-3,05E-05	0,0461
Pcm-Am	-4,97E-05	0,0053
Pcm-Qm	-1,92E-05	0,1991

(A = *Alnus glutinosa*, Q = *Quercus robur*, Pc = *Picea abies*; m = mělký vrt)

Statisticky významný rozdíl byl pomocí Tukey HSD testu u mělkých vrtů zjištěn mezi dubem a olší ( $p = 0,0461$ ) a smrkem a olší ( $p = 0,0053$ ).

## 6.2 Vsak barevného stopovače

Z tabulky č. 3 je patrné, že k nejrychlejší infiltraci barevného stopovače došlo u lokality s převahou olše (přibližně 5 minut), nejdelší doba vsaku byla zaznamenána u smrku (29 minut).

Tab. 3: Doba vsaku roztoku stopovače v minutách pro jednotlivé lokality

Množství roztoku	<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Picea abies</i>
8 litrů	neměřeno	neměřeno	7
16 litrů	neměřeno	8	15
24 litrů	5	17	29

Proměřováním preferenčního proudění bylo zjištěno, že nejhlubšího vsaku dosáhl stopovač u olše (90 cm), nejmělčí vsak byl zaznamenán u smrku, konkrétně 60 cm (viz Tab. 4). Maximální hloubky vsaku bylo dosaženo u dubu a smrku ve středu infiltračního válce, u olše bylo maximální hloubky vsaku dosaženo v horizontální vzdálenosti 30-40 cm od středu infiltračního válce. Nejužšího vsaku bylo dosaženo u smrku (20 cm od okraje válce), nejširšího u dubu (55 cm od okraje válce) (viz Tab. 4). Šířka rozlivu u olše a smrku byla při porovnání různých hloubek relativně rovnoměrná (25 – 30 cm, respektive 15 – 20 cm), u lokality s převahou dubu se šířka rozlivu s hloubkou zvětšovala (viz Tab. 5).

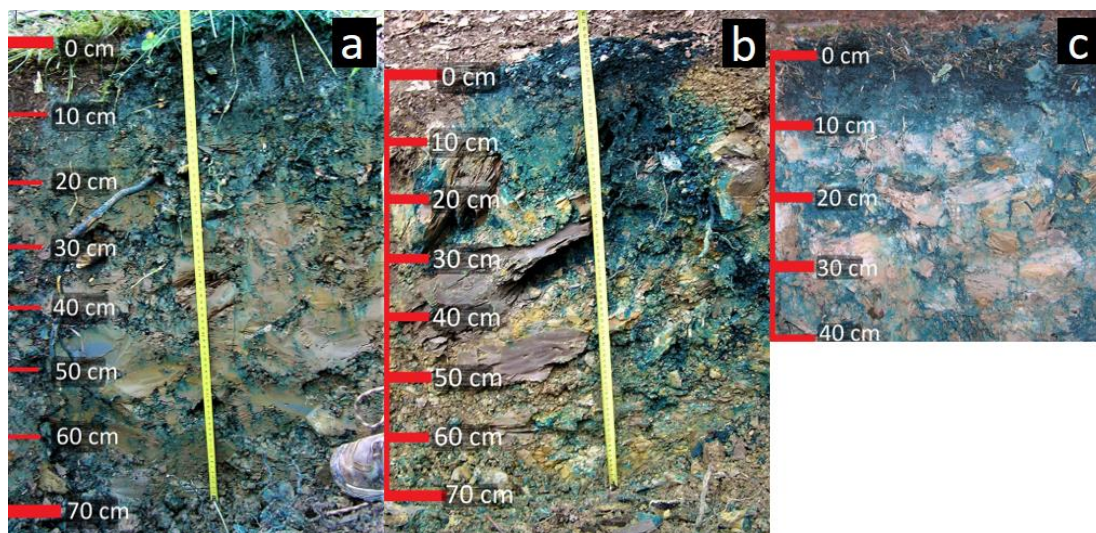
Tab. 4: Maximální hloubka a šířka rozlivu (horizontální vzdálenost od okraje válce)

	<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Picea abies</i>
Max. hloubka [cm]	90	70	60
Max. šířka [cm]	30 (dosažena v hloubce 25 cm)	55 (dosažena v hloubce 32 cm)	20 (dosažena v hloubce 25 cm)

Tab. 5: Maximální šířka rozlivu (horizontální vzdálenost od okraje válce) v různých hloubkách v cm

Hloubka [cm]	<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Picea abies</i>
9	30	5	15
13	25	5	15
25	30	40	20

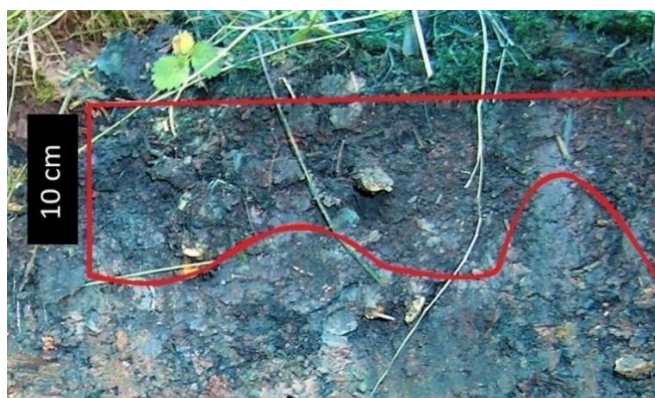
Na obrázku č. 14 jsou vyobrazeny horizontální řezy středem infiltračního válce.



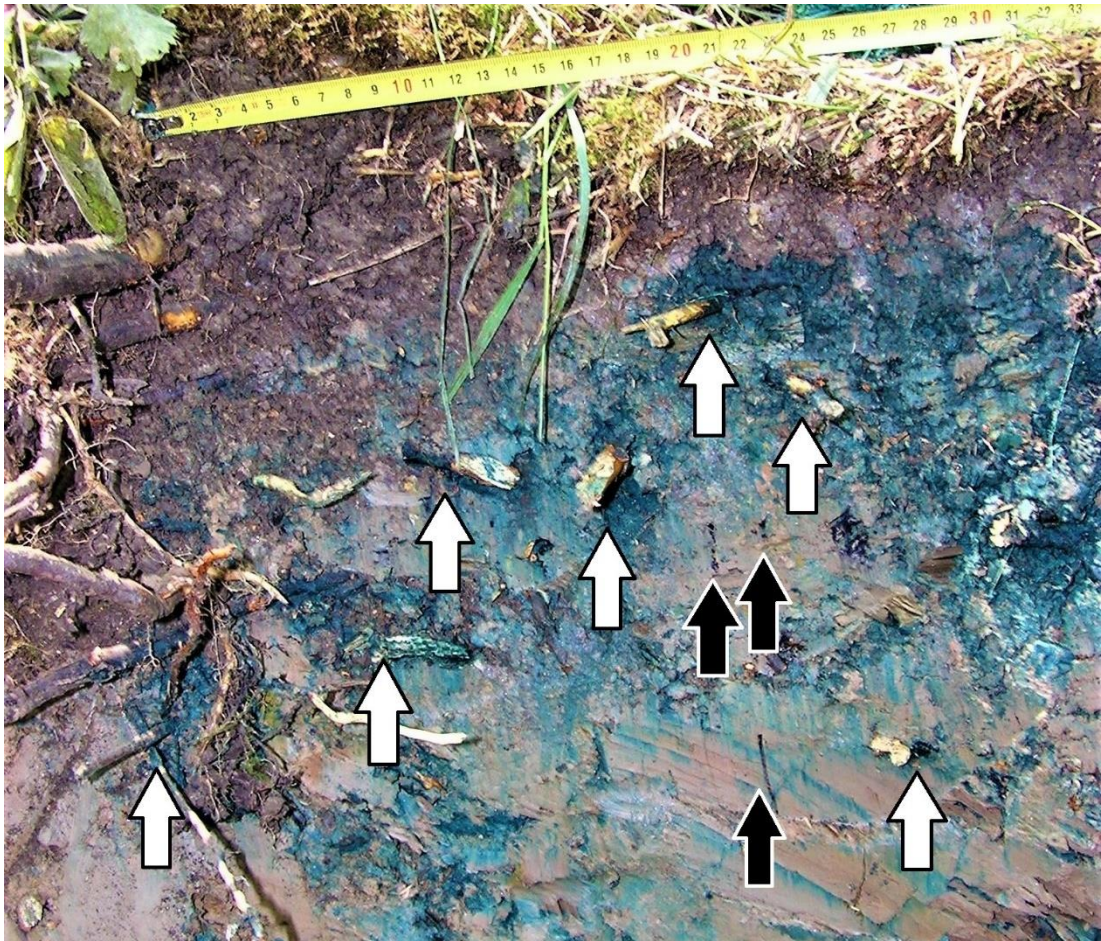
Obr. 14: Vertikální řezy středem infiltračního válce – olše (a), dub (b), smrk (c)

### 6.2.1 Proudění na lokalitě s olší

Vrchní vrstva půdy o kolísavé mocnosti přibližně 10 cm byla intenzivně probarvena stopovačem (viz Obr. 15). V půdním profilu byly pozorovány preferenční cesty ve formě kořenů a žízálních chodeb (viz Obr. 16), jejichž okolí bylo také značně probarveno stopovačem. Aktivita žížal byla potvrzena nálezem několika jedinců žížal (viz Obr. 17).



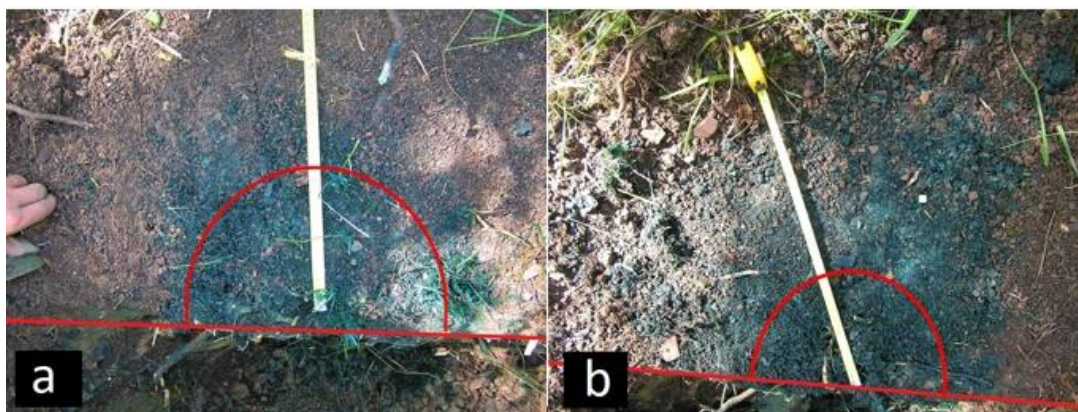
Obr. 15: Intenzivně probarvená vrchní vrstva půdy o proměnlivé mocnosti přibližně 10 cm



Obr. 16: Preferenční cesty podél kořenů (bílá šipka) a ve formě žízálich chodeb (černá šipka). Barvivo bylo v některých případech rozmazáno při zhlazování povrchu půdy.



Obr. 17: Pozorovaná žížala v půdním profilu olše při horizontálním řezání. Místo nálezu se nacházelo v hloubce 26 cm a 15 cm od středu infiltračního válce.

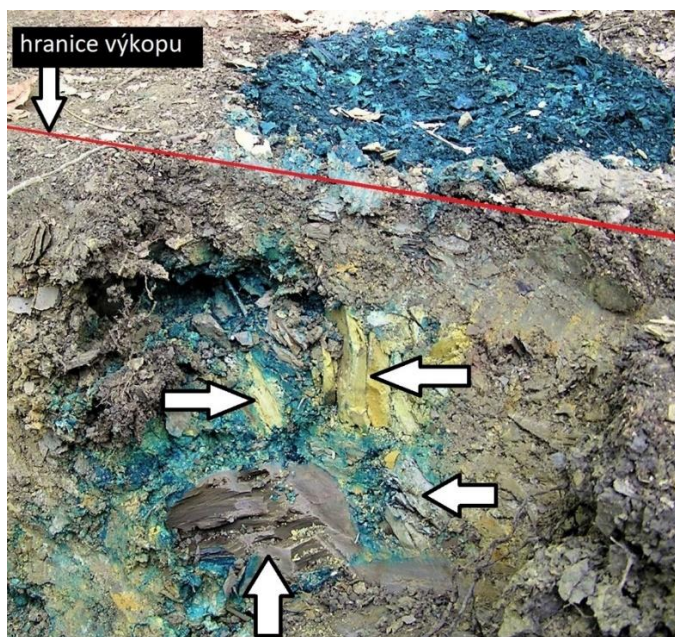


Obr. 18: Horizontální roztékání stopovače v různých hloubkách (a = 3 cm, b = 9 cm) červená úsečka vyznačuje hranu výkopu a půlkružnice umístění infiltračního válce o poloměru 15 cm.

Z obrázku č. 18 vyplývá, že vsak ve vrchní vrstvě půdy byl rovnoměrný a intenzivní z důvodu tmavě modře a rovnoměrně zbarvených agregátů. V hloubce 12 cm již nebyly agregáty přítomné v takové míře, naopak se zde nacházelo značné množství kořenů a žízálních chodeb a došlo k menší rovnoměrnosti vsaku barviva oproti výše uloženým vrstvám. V hloubce 26 cm se nacházely znatelné pozůstatky „cyprisových břidelic“, což způsobilo vyšší míru preferenčního proudění podél těchto útvarů. U povrchu bylo tedy proudění relativně rovnoměrné a s hloubkou se stalo nerovnoměrným jak z důvodu přítomnosti menších fragmentů „břidelic“, tak z důvodu přítomnosti kořenů rostlin a žízálních chodeb.

### 6.2.2 Proudění na lokalitě s dubem

Lokalita s dubem je charakteristická přítomností „cyprisových břidelic“, které dosahují délky i přes 10 cm (viz Obr. 20). „Břidelice“ se nacházejí ve spodní vrstvě půdy, kde brání rovnoměrnému vsakování vody do půdy, jak je vidět na obrázku č. 19 a 23b. Tím vzniká nálevkovité preferenční proudění. Preferenční proudění vzniká také podél kořenů a v menší míře podél žízálních chodeb (viz Obr. 21 a Obr. 22).



Obr. 19: „Cyprisové břidelice“ bránící rovnoměrnému proudění

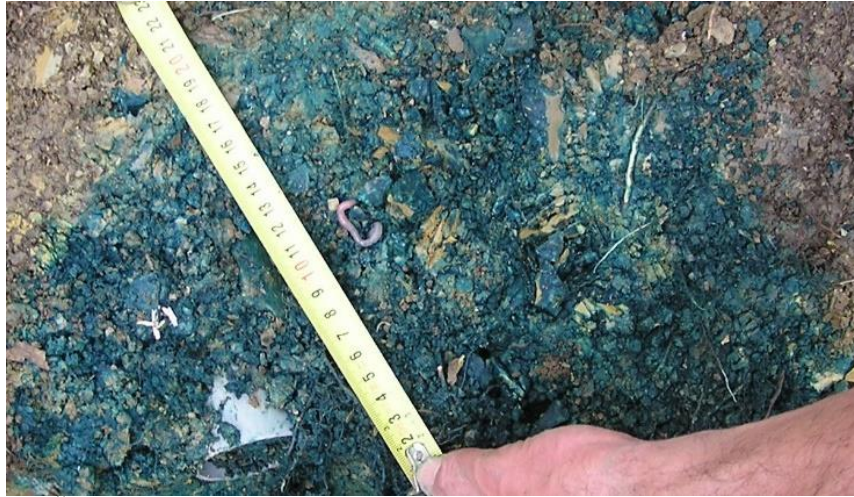


Obr. 20: Velikost „cyprisových břidelic“ na lokalitě s olší v hloubce okolo 16 cm.

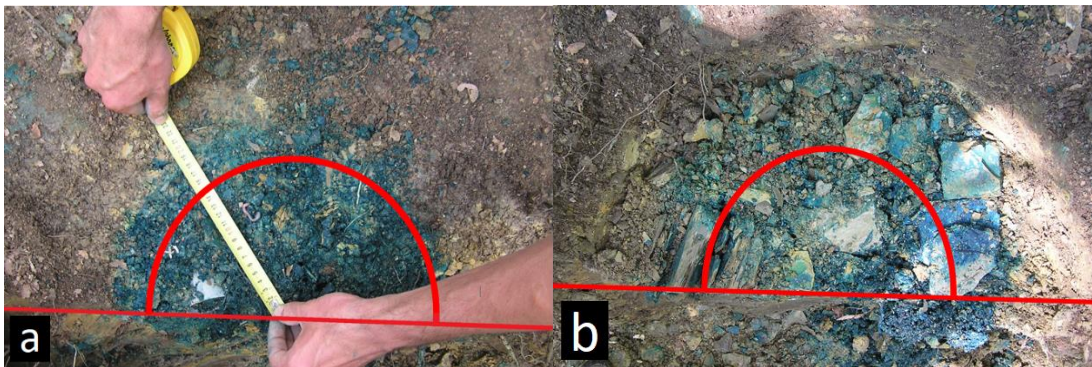


Obr. 21: Preferenční cesty ve formě kořenů a kořínků silně probarvené barevným stopovačem





Obr. 22: Žížala nalezena v hloubce 9 cm a horizontální vzdálenosti 11 cm od středu válce



Obr. 23: Horizontální řezy u dubu v hloubce 9 (a) a 16 (b) cm. Hrana výkopu je označena červenou úsečkou, původní poloha infiltračního válce je označena červenou půlkružnicí.

### 6.2.3 Proudění na lokalitě se smrkem

Pro lokalitu se smrkem je charakteristické silné probarvení vrchní vrstvy půdy prorostlé menšími kořínky (viz Obr. 24 a Obr. 25). Větší kořeny ve větších hloubkách sloužily jako preferenční cesty (Obr. 26). Rovnoměrnému proudění zčásti bránily také částečně rozložené „cyprisové břidlice“, jak je vidět na dolní části obrázku č. 24.



Obr. 24: Silně probarvená vrchní vrstva půdy u smrku



Obr. 25: Mykogenní horizont drti Fm intenzivně probarvený stopovačem a prorostlý kořínky rostlin (smrk)



Obr. 26: Preferenční cesta ve formě kořenů probarvená stopovačem (smrk)

## 6.3 Objemová hmotnost

Naměřené hodnoty objemové hmotnosti jsou uvedeny v příloze č. 2.

Tab. 6: Popisná statistika objemové hmotnosti na jednotlivých lokalitách pro vrchní vrstvu půdy v [g/cm<sup>3</sup>]

Území s převahou druhu	<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Picea abies</i>
Minimum	0,5975	0,7075	0,3063
Maximum	0,8710	1,0100	0,9367
Medián	0,7279	0,8762	0,7448
Průměr	0,7303	0,8735	0,7112
Směrodatná odchylka	0,0871	0,0844	0,1962
ANOVA	p = 0,0297		

Nejnižší hodnoty objemové hmotnosti byly zjištěny u smrku, nejvyšší u dubu. Směrodatná odchylka měla podobnou hodnotu pro lokalitu s olší a dubem, u lokality se smrkem nabyła přibližně dvakrát větší hodnoty. Z tabulky č. 6 je dále patrné, že byly zjištěny statisticky významné rozdíly v průměrech. Proto byl u naměřených hodnot proveden Tukey HSD test, jehož výsledky jsou uvedeny v následující tabulce.

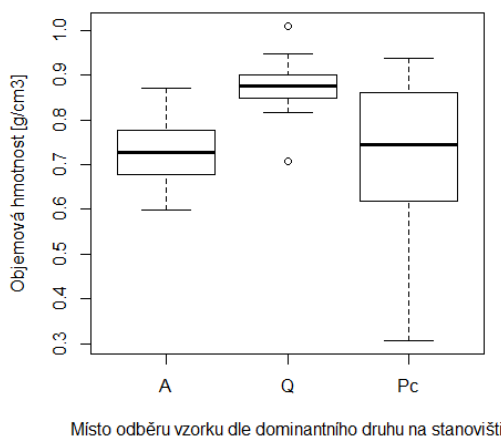
Tab. 7: Výsledky Tukey HSD testu objemové hmotnosti pro vrchní vrstvu půdy

	Rozdíl průměrů	p hodnota
Q-A	0,143	0,0717
Pc-A	-0,019	0,9463
Pc-Q	-0,162	0,0372

(A = *Alnus glutinosa*, Q = *Quercus robur*, Pc = *Picea abies*)

Statisticky významné rozdíly v průměrech ve vrchní vrstvě půdy byly zjištěny pouze při porovnání hodnot objemové hmotnosti mezi dubem a smrkem (0,162 g/cm<sup>3</sup>), naopak hodnoty průměrů při porovnání olše a smrku byly téměř shodné (p = 0,9463).

Pro přehlednost byla popisná statistika hodnot objemové hmotnosti znázorněna v boxplotech na obrázku č. 27.



Obr. 27: Grafické znázornění popisné statistiky hodnot objemové hmotnosti (A = *Alnus glutinosa*, Q = *Quercus robur*, Pc = *Picea abies*)

## 7. DISKUZE

V odborné literatuře je nedostatek studií, které se explicitně zabývají vlivem druhu uměle vysazené rekultivační dřeviny na hydrologické vlastnosti půdy a preferenční proudění, i přesto, že pohyblivost a množství vody v půdě je klíčovým faktorem pro vývoj půdy a ekosystému. Existující studie zaměřené na hydraulické a související vlastnosti půdy se zabývají zejména rozdíly mezi rekultivovanými a nerektivovanými lokalitami (Cejpek et al., 2017), nikoli přímým vlivem druhu dřeviny na stejném substrátu, proto je obtížné tyto výsledky porovnat s dalšími studiemi. I přes tento fakt jsou v některých studiích v rámci výzkumu měřeny hodnoty hydraulické nasycené vodivosti a dalších charakteristik půdy pro jednotlivé druhy dřevin a je tedy možné se částečně odkázat na výsledky z těchto studií (Cejpek et al., 2013; Cejpek et al., 2017).

Výzkum byl prováděn na mladých heterogenních půdách (Cejpek et al., 2013). Heterogenita půdního prostředí je značná, jak je vidět na obrázcích č. 6 a č. 14. I přes tento fakt jsou na jednotlivých lokalitách patrné jasné rozdíly v preferenčním proudění a dalších vlastnostech.

Nejvyšší průměrná hodnota  $K_s$  byla naměřena pro vrchní vrstvu půdy u olše ( $6,92E-05$  m/s), nejnižší u smrku ( $1,95E-05$  m/s). Vysoká hodnota  $K_s$  u olše je pravděpodobně způsobena přítomností agregátů v této vrstvě, které nejspíš vznikly aktivitou velkých populací žížal a dalšího edafonu a specifického kořenového systému. Voda může rychleji a rovnoměrně gravitačně proudit do nižších vrstev půdy prostřednictvím makropórů mezi agregáty, což může být výhodné při extrémních přívalových srážkách, které se díky měnícímu se klimatu vyskytují stále častěji. S měřenými hodnotami  $K_s$  u olše koresponduje i nejvyšší rychlost infiltrace stopovače (24 l infiltrovalo během 5 minut) a probarvení půdy. V prvních přibližně 10 cm hloubky půdy docházelo k rovnoměrnému vsaku podél všech přítomných agregátů, přičemž tyto agregáty byly obarveny tmavým odstínem modré. Tmavě modrá značí vysoký objem proteklé vody. To odpovídá faktu, že po srážkové události dochází k rychlejšímu poklesu vlhkosti v přítomnosti velkého množství žížal (Schon et al., 2017). Nejtmavšího odstínu modré bylo dosaženo u smrku ve vrchní části fermentační vrstvy tvořené částečně rozloženou opadankou a velkým množstvím jemných kořínků. Zde pravděpodobně došlo k akumulaci roztoku barviva a zbrzdění proudění do hlubších vrstev půdy, což mělo za následek výrazně nižší hodnoty  $K_s$  oproti olši (nejdelší doba vsaku barviva – 29 minut – koresponduje s nejnižší průměrnou hodnotou  $K_s$  pro smrk). I proto bylo dosaženo nejmenší hloubky vsaku u smrku (60 cm) a největší hloubky u olše (90 cm). Dalším důvodem k hlubokému vsaku barevného stopovače u olše byl nejvyvinutější půdní profil. Hluboký vsak a nejvýraznější preferenční proudění mohlo být částečně způsobeno vyšší aktivitou žížal vázanou na kvalitu opadanky (Frouz et al., 2013) a velkým množstvím přítomných kořenů a kořínků, které pravděpodobně způsobily odtok vody do hlubších vrstev půdy (National Research Council, ©2001).

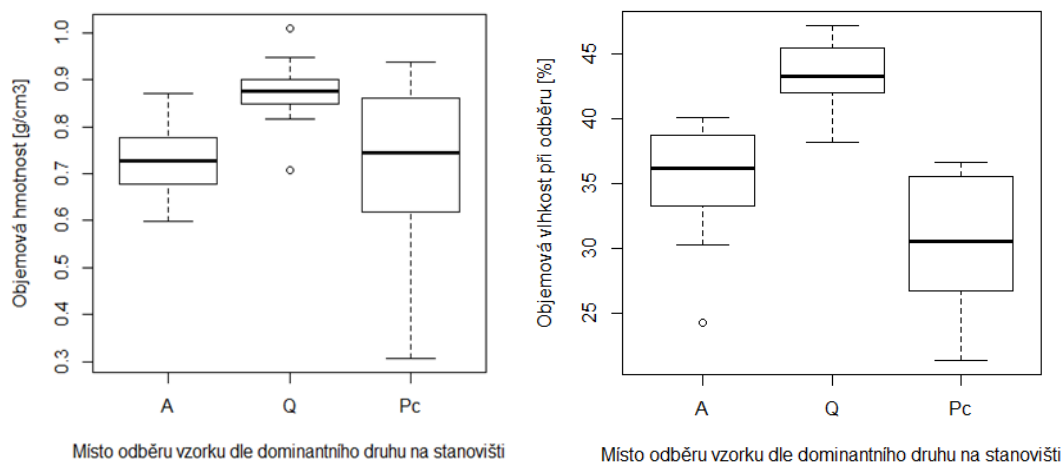
Kořeny se ve větším množství nacházely ve spodní vrstvě i u dubu, u kterého docházelo k nejvýraznějšímu preferenčnímu proudění právě podél kořenů a kořínků, o čemž svědčí jejich tmavě modře zbarvené okolí. Preferenční cesty byly u dubu ve spodní vrstvě půdy tvořeny částečně také prostřednictvím téměř nenarušených „cyprisových břídic“, které bránily rovnoměrnému vsaku a vznikalo tak nálevkovité

preferenční proudění. U olše i smrku byly „cyprisové břídlíce“ již částečně erodovány, což naznačuje i studie Cejпка et al. (2013), která odhalila velké množství uvolněných jílových částic v půdním profilu na lokalitách s olší lepkavou *Alnus glutinosa* a olší šedou *Alnus incana* (27 % objemových) a smrkem omorika *Picea omorica* a smrkem pichlavým *Picea pungens* (31 % objemových), naproti tomu u dubu letního *Quercus robur* bylo naměřeno pouze 16 % objemových jílových částic. U olše a smrku tedy zřejmě nedochází k tak výraznému nálevkovitému preferenčnímu proudění.

Jílové částice v uvolněné formě na sebe mohou nabalovat organickou hmotu a způsobovat její akumulaci (Cejpek et al., 2013). Organická hmota má obecně nižší hustotu než minerály (Kutílek, 1978), proto lze z hodnot objemové hmotnosti usuzovat, že vysoký obsah organické hmoty a vyšší pórovitost jsou přítomny ve vrchní vrstvě půdy u olše a u smrku, u dubu nikoliv (viz Obr. 28 vlevo). Zatímco u smrku zůstává organická hmota ve formě mocného horizontu opadanky a fermentační vrstvy na povrchu, u olše pravděpodobně dochází vlivem velkého množství žížal a dalšího edafonu k mísení organické a minerální vrstvy půdy a tím pádem ke zkvalitnění organické hmoty. Vyšší množství kvalitní organické hmoty ve spodní vrstvě půdy by mělo mít za následek zlepšení schopnosti půdy zadržovat vodu dostupnou pro rostliny u olše, zejména v hlubších vrstvách půdy. Podobného názoru je i Cejpek et al. (2013) a Frouz et al. (2005).

Průměrné hodnoty  $K_s$  pro spodní vrstvu půdy nejsou statisticky významně rozdílné, což může být způsobeno nedostatečným vlivem vegetace a edafonu na tuto část půdního profilu.

Na následujícím obrázku jsou znázorněny grafy objemové hmotnosti a objemové vlhkosti při odběru, přičemž měření těchto dvou veličin proběhlo na stejných vzorcích a data byla poskytnuta v rámci výzkumu pod vedením Ing. Aleny Walmsley, PhD (více v kapitole 5. Metodika).



Obr. 28: Grafické znázornění popisné statistiky hodnot objemové hmotnosti (vlevo) a objemové vlhkosti při odběru (vpravo) pro vrchní vrstvu půdy (A = *Alnus glutinosa*, Q = *Quercus robur*, Pc = *Picea abies*)

Jak je z obrázku č. 28 patrné, nejvyšší hodnoty objemové hmotnosti i vlhkosti při odběru byly ve vrstvě u povrchu naměřeny u dubu. To je pravděpodobně způsobeno menším obsahem makropórů a silným poutáním vlhkosti přítomnými jíly. Nižší vlhkost u olše může být dále způsobena přítomností preferenčních cest mezi makropóry.

Voda tak může snadněji proudit do hlubších vrstev, kde pravděpodobně dochází k jejímu zadržování, což naznačují výsledky Cejпка et al. (2013), který zjistil u olše obecně vyšší vlhkost ve větších hloubkách oproti vrchní vrstvě půdy. Naopak u smrku zjistil vyšší vlhkost pro vrchní vrstvu půdy při zkoumání celého půdního profilu, což vzhledem k neznalosti předchozích vlhkostních podmínek může korespondovat s názorem, že fermentační vrstva brzdí infiltraci do nižších vrstev, a to za předpokladu, že před měřením provedeným Cejpkem et al. (2013) došlo ke srážkové události. V případě tohoto výzkumu bylo před měřením dlouhé období sucha, což vysvětluje nejnižší měřené hodnoty vlhkosti u smrku dle obr. 28. Po infiltračním pokusu bylo indikováno největší množství zadržené vody ve fermentační vrstvě u smrku což koresponduje s Cejpkem et al. (2013). Největší variability dosahovala objemová hmotnost i vlhkost u smrku, což je pravděpodobně způsobeno značně heterogenním prostředím fermentační vrstvy.

Cejpek et al. (2013) naměřil výrazně nižší hodnoty  $K_s$  ve vrchní vrstvě půdy. U smrku omorika *Picea omorica* a smrku pichlavého *Picea pungens* měla  $K_s$  průměrnou hodnotu  $5,2 \cdot 10^{-7}$  m/s, u olše lepkavé *Alnus glutinosa* a olše šedé *Alnus incana* byla naměřena hodnota  $K_s$   $4,9 \cdot 10^{-7}$  m/s, u dubu letního *Quercus robur*  $3,7 \cdot 10^{-7}$  m/s. Rozdílné hodnoty mohou být dány zaprvé mírně odlišnými druhy oproti výzkumu v rámci bakalářské práce a zadruhé měřené hodnoty mohou být značně ovlivněny dobou měření. Měření bylo provedeno na podzim roku 2009, což představuje dlouhou dobu dalšího vývoje půdy a podzim může znamenat jiné vlhkostní a teplotní podmínky. Měření v rámci této bakalářské práce bylo provedeno po výrazně suchém jaru 2018 a vrchní část půdního profilu byla charakteristická nízkým provlhčením vodou.

Provedení měření v období beze srážek je výhodou, jelikož získané hodnoty  $K_s$  odpovídají podmínkám, ve kterých by měření  $K_s$  s Guelphským permeametroem měla být prováděna. Pokud se s pomocí Guelphského permeametry měří v jílové půdě s vyšším obsahem vody (např. po dešťové srážce), může dojít k výraznému podhodnocení hodnot  $K_s$  vlivem bobtnání jílu a zamazání stěn vrtu (Bagarello, 1997). K tomu mohlo dojít při měření  $K_s$  Cejpkem et al. (2013).

Navíc během studie v rámci bakalářské práce byl kladen důraz na vzorkování vrchní vrstvy půdy a kontrolovány podmínky tak, aby jediný rozdílný faktor mezi lokalitami byla pouze rekultivační dřevina. U ostatních studií nemusel být rozdílný pouze jeden faktor, ale také např. morfologie terénu, jiný půdotvorný substrát daný např. velkou vzájemnou vzdáleností lokalit a další.

Výzkum prováděný na Velké podkrušnohorské výsypce v rámci této bakalářské práce má několik značných omezení. Vzorkování probíhalo pouze na 3 lokalitách a pouze v jednom časovém kroku, v některých případech bylo měření prováděno pouze ve třech opakováních na lokalitu. Proto by pro získání reprezentativnějších výsledků bylo vhodné měření opakovat vícekrát, a pro ověření správnosti výsledků vzorkovat další lokality na výsypce se stejnými dominantními dřevinami. Jelikož měřené charakteristiky jsou v čase proměnlivé, bylo by dále vhodné tato měření opakovat i za jiných podmínek, např. v zimě či v období s větším výskytem srážek, nejlépe po dobu několika let. Získaná data by pak lépe vypovídala o průběhu nasycené hydraulické vodivosti a preferenčním proudění během celého roku.

## 8. ZÁVĚR

Získané poznatky potvrdily důležitý vliv volby druhu rekultivační dřeviny na vývoj půdy, na hydraulické vlastnosti půdy a preferenční proudění v půdním profilu. Z výsledků vyplývá, že nejmenší podíl preferenčního proudění je u smrku, kde bylo dosaženo nejmenší maximální hloubky a šířky a doba vsaku stopovače byla nejdelší ze všech tří měření. Naopak největší podíl preferenčního proudění je u olše, u které došlo k nejrychlejšímu a nejhlubšímu vsaku barevného stopovače. U dubu bylo dosaženo vlivem přítomnosti nejméně rozložených plátů cyprisových jílů a specifického kořenového systému také ke značnému preferenčnímu proudění.

Výzkumem byl dále potvrzen i vliv druhu rekultivační dřeviny na nasycenou hydraulickou vodivost, významný však pouze na vrchní vrstvu půdy. Nejvyšších hodnot dosahovala nasycená hydraulická vodivost ve vrchní vrstvě u olše, a to z důvodu přítomnosti mocného horizontu obsahujícího agregáty s velkým množstvím makropórů, kterými může voda snadno protékat. Naopak nejnižších hodnot nasycené hydraulické vodivosti bylo dosaženo u smrku obsahujícího vrstevnatý mykogenní horizont drti, který způsobuje zbrzdění rychlosti infiltrace do hlubších vrstev půdy. Organická hmota v obou případech přítomná v půdním profilu v různých formách měla rozdílný vliv na nasycenou hydraulickou vodivost.

Olše se dle výsledků jeví jako dobrá přípravná dřevina, protože má z hlediska vývoje humusového horizontu (nejvyvinutější agregáty), preferenčního proudění a hydraulické vodivosti lepší vliv na počáteční vývoj půdy než smrk i dub. Avšak není jasné, jak se budou vyvíjet vlastnosti půdy pod olší v budoucnu, protože se jedná o relativně mladý porost i půdu.

Není také možné udělat jednoznačné závěry, jelikož bylo měření provedeno pouze v jednom časovém kroku a s malým počtem opakování pouze na 3 lokalitách. Bylo by tedy vhodné měření opakovat jak z hlediska počtu měření na lokalitu, tak z hlediska časového i místního (rozšíření výzkumu o další časové kroky v rámci roku a lokality se stejnými rekultivačními dřevinami, případně dalšími druhy rekultivačních dřevin).

Pro lepší pochopení hospodaření půdy s vodou by bylo vhodné výzkum dále rozšířit o měření retenční čáry půdní vlhkosti. Znalost bodů vadnutí a polní vodní kapacity by umožnila stanovit množství vody dostupné pro rostliny a určit druh dřeviny, který způsobuje vznik půdy s vysokou schopností zadržovat vodu a je tedy více vhodný pro rekultivaci. Další možností rozšíření výzkumu je zkoumání vlivu více druhů dřevin.

Další studie s tématem vlivu druhu rekultivační dřeviny na proudění vody v půdě na výsypkách jsou nutností, jelikož vliv jednotlivých druhů na preferenční proudění, nasycenou hydraulickou vodivost a související půdní parametry je nedostatečně prozkoumán. Proto je nezbytné získávat další poznatky na toto téma, které je vzhledem ke klimatickým změnám a zvyšující se extremitě srážek a teplot stále více aktuální.

## 9. PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY A DALŠÍCH ZDROJŮ

- Bagarello, V., 1997. Influence of well preparation on field-saturated hydraulic conductivity measured with the Guelph Permeameter. *Geoderma* 80, 169-180.
- Bátková, K., Matula, S., Miháliková, M., 2013. Multimediální učebnice hydropedologických terénních měření. 2. doplněné vydání (online). Česká verze. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha. Nestránkováno. Dostupné z: <http://hydropedologie.agrobiologie.cz>. ISBN: 978-80-213-2434-3.
- Bradshaw, A., 1997. Restoration of Mined Lands – Using Natural Processes. *Ecological Engineering* 8, 255 – 269.
- 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, 645–652.
- Cejpek, J., Kuráž, V., Vindušková, O., Frouz, J., 2017. Water regime of reclaimed and unreclaimed post-mining sites. *Ecohydrology*, e1911.
- ČÚZK, ©2019. Základní mapy ČR (online) [cit. 2019.04.24], dostupné z <<https://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/#ipsQueue>>.
- Dimitrovský, K., 1976. Rekultivační zeleň a její obnova. *Památky a příroda* 4, 225-240.
- Dimitrovský, K., 2001. Tvorba nové krajiny na Sokolovsku. 1. vyd., Sokolov: Sokolovská uhelná a.s., 191 s.
- Eijkelkamp, ©2011. Operating instructions. 09.07 Guelph permeameter (online) [cit.2019.03.11], dostupné z <<https://www.eijkelkamp.com/download.php?file=b2082939>>.
- Eijkelkamp, ©2013. Operating instructions. 09.02 laboratory-permeameters (online) [cit.2019.03.11], dostupné z <<https://www.eijkelkamp.com/files/media/Gebruiksaanwijzingen/EN/m1-0902elab-permeameters.pdf>>.
- 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., 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, 308-320.
- Frouz, J., van Diggelen, R., Pižl, V., Starý, J., Háněl, L., Tajovský, K., Kalčík, J., 2009. The effect of topsoil removal in restored heathland on soil fauna, topsoil microstructure, and cellulose decomposition: implications for ecosystem restoration. *Biodiversity and Conservation* 18, 3963-3978.
- 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, 275-284.



- 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, 87-95.
- Gremlica, T., Cílek, V., Vrabec, V., Farkač, J., Frouz, J., Godány, J., Lepšová, A., Příkryl, 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.2019.04.24] 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)>.
- Jačka, L., 2014. Odhad vybraných infiltračních parametrů podzolových půd v centrální části NP Šumava, Disertační práce, ČZU v Praze, Praha.
- Jačka, L., Pavlásek, J., Kuráž, V., Pech, P., 2014. A comparison of three measuring methods for estimating the saturated hydraulic conductivity in the shallow subsurface layer of mountain podzols. *Geoderma* 219 – 220, 82 – 88.
- 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, 47-66.
- Jonáš, F., 1975. Určení způsobu rekultivace a tvorba nových půd na výsypkách v severočeském hnědouhelném revíru. 1. vyd., Praha: Výzkumný ústav meliorací.
- Kanwar, R., S., Rizvi, H., A., Ahmed, M., Horton, R., Marley, S., J., 1990. Measurement of field-saturated hydraulic conductivity by using Guelph and Velocity Permeameters. *Transactions of the ASAE* 32(6), 1885 – 1890.
- 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, Issue Special 52 – 56. ISSN 0322-9688.
- 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, 266-272.
- Kutílek, M., 1978. *Vodohospodářská pedologie*. 2. přeprac. vyd., Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 295 s.
- Kutílek, M., Kuráž, V., Císlarová, M., 1993. *Hydropedologie*. ČVUT, Praha.
- Kutílek, M., Kuráž, V., Císlarová, M., 2004: *Hydropedologie 10*. Skriptum ČVUT, Praha.
- 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, 77 – 96.
- Mapy.cz, ©2019a. *Mapy.cz* (online) [cit. 2019.04.24], dostupné z <<https://mapy.cz/letecka?x=12.6810859&y=50.2311032&z=13&l=0>>.

- Mapy.cz, ©2019b. Mapy.cz (online) [cit. 2019.04.24], dostupné z  
<<https://mapy.cz/letecka?x=12.7051024&y=50.2413076&z=17&l=0&q=sokolov>>.
- Mermoud, A., Xu, D., 2006. Comparative analysis of three methods to generate soil hydraulic functions. *Soil and Tillage Research* 87, 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, 75 – 81.
- Mudrak, O., Frouz, J., Velichova, V., 2010. Understory vegetation in reclaimed and unreclaimed post-mining forest stands. *Ecological Engineering* 36, 783-790.
- National Research Council, ©2001. *Conceptual Models of Flow and Transport in the Fractured Vadose Zone*. The National Academies Press, Washington, DC, 392 s. ISBN 978-0-309-07302-8.
- Nemecek, J., Muhlhanslova, M., Macku, J., Vokoun, J., Vavricek, D., Novak, P., 2011. *Taxonomicky klasifikacnı system pud eske republiky*. 2. uprav. vyd., Praha: eskva zemedelskva univerzita. Vyzkumny ustav meliorace a ochrany pudy. 94 s. ISBN 978-80-213-2155-7.
- Pavlovasek, J., Jacka, L., 2014a. *Hydropedologie*. Skriptum ZU.
- Pavlovasek, J., Jacka, L., 2014b. *Guelphsky permeametr*. Manual pro terennı merenı. Fakulta ivotnıho prostredı ZU.
- Petranek, J., Brezina, J., Brızova, E., Chab, J., Loun, J., Zelenka, P., 2016. *Encyklopedie geologie*. eskva geologicka sluzba, Praha. ISBN: 978-80-7075-901-1.
- Pokorna, D., Zabranskva, J., 2008. *Hydrologie a hydropedologie*. VSCHT, Praha.
- Quitt, E., 1971. *Klimatickve oblasti eskoslovenska*. *Studia Geographica*, 16. Academia, Praha, 73 s.
- 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.2019.04.24], dostupne z  
<<https://www.nrc.gov/docs/ML0037/ML003744523.pdf>>.
- Reynolds, W., D., 2008. Saturated hydraulic properties: Well permeameter. In: Carter M., R., Gregorich, E., G. (eds.): *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2. vyd., CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, USA, pp. 1025–1042.
- Reynolds, W., D., Lewis, K., L., 2012. A drive point application of the Guelph Permeameter method for coarse-textured soils. *Geoderma* 187–188, 59–66.
- Richards, I., G., Palmer, J., P., Barratt, P., A., 1993. *The reclamation of former coal mines and steelworks*. 1. vyd., Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V. 717 s. ISBN 0-444-81703-4.
- Sander, T., Gerke, H., H., 2009. Modelling field-data of preferential flow in paddy soil induced by earthworm burrows. *Journal of Contaminant Hydrology* 104, 126–136.
- Sendlein, L., V., A., Yazicigil, H., Carlson, C., L., 1983. *Surface mining environmental monitoring and reclamation handbook*. New York, Elsevier.
- 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, 41-47.
- Sklenička, P., 2003. *Základy krajinného plánování*. Naděžda Skleničková, Praha, 321 s. ISBN 80-903206-1-9.
- 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, 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, pp. 143-155.
- Štýs, S., Helešicová, L., 1992. *Proměny měsíční krajiny*. Bílý slon, Praha, 253 s. ISBN 80-901291-0-2.
- Štýs, S., Kostruch, J., Neuberg, 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., 1990. *Rekultivace území devastovaných těžbou nerostů*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 186 s. ISBN 80-85087-10-3.
- Zhang, Z., F., Groenevelt, P., H, Parkin, G., W., 1998. The well shape factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph permeameter. *Soil & Tillage Research* 49, 219–221.
- Zhang, 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 (1), e-012. eISSN 2171-9845, doi 10.5424.

## 10. PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Měřené hodnoty Ks Guelphským permeametrem

Hodnoty Ks [m/s]					
<i>Alnus glutinosa</i>		<i>Quercus robur</i>		<i>Picea abies</i>	
Mělký vrt	Hluboký vrt	Mělký vrt	Hluboký vrt	Mělký vrt	Hluboký vrt
5,67E-05	2,27E-05	5,11E-05	7,42E-06	2,97E-05	7,67E-06
8,51E-05	5,99E-06	3,20E-05	8,09E-08	1,92E-05	1,60E-05
6,57E-05	4,62E-07	3,30E-05	4,11E-07	9,55E-06	1,42E-05
	1,92E-05				1,07E-06

Příloha č. 2: Měřené hodnoty objemové hmotnosti [g/cm<sup>3</sup>]

Vrchní vrstva půdy		
<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Picea abies</i>
0,8710	0,8476	0,6184
0,7764	0,8762	0,8606
0,7315	1,0100	0,8022
0,5975	0,8946	0,8975
0,6342	0,8161	0,8444
0,6917	0,8602	0,6273
0,8521	0,9476	0,9367
0,7475	0,7075	0,3063
0,7242	0,9013	0,5312
0,6768		0,6875