

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE



FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ
A ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ**

OBOR OCHRANA PŘÍRODY

VLIV LESNÍKÉ MECHANIZACE NA INFILTRAČNÍ CHARAKTERISTIKY LESNÍ PŮDY NA VYBRANÉM ÚZEMÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

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

Diplomant: Radim Redl

PRAHA, 2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Radim Redl

Ochrana přírody

Název práce

Vliv lesnické mechanizace na infiltrační charakteristiky lesní půdy na vybraném území

Název anglicky

The influence of forestry machinery on infiltration characteristics of the specific forest soil

Cíle práce

Cílem práce je na specifické lesní půdě porovnat vybrané infiltrační charakteristiky na místech s výrazným zhutněním pojezdem lesnickou technikou s místy bez patrného zhutnění.

Metodika

Stručně definovat infiltraci, infiltrační parametry a jejich význam na základě současné literatury. Stručně provést rešerši metod měření infiltrace a podrobněji popsat teorii, výhody a nevýhody použité jednoválcové metody. Zpracovat rešerši současného stavu poznání vlivu zhutnění lesních půd pojezdem lesnické mechanizace na infiltrační charakteristiky a související fyzikální vlastnosti (objemová hmotnost a další).

Provést opakovaná měření infiltrace jednoválcovou metodou s kladnou výškou výtopy na půdě zhutněné a bez zhutnění. Statisticky vyhodnotit data a určit vliv zhutnění na objemovou hmotnost, vlhkost při odběru a vybrané infiltrační parametry.

Doporučený rozsah práce

50 stran textu

Klíčová slova

lesní půdy, válcová infiltrace, vliv zhutnění, snížení vsakovací schopnosti

Doporučené zdroje informací

- Fodor, N., Sándor, R., Orfanus, T., Lichner, L., Rajkai, K., 2011. Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity. *Geoderma*, 165, 60-68.
- Cheng, Q., Chen, X., Chen, X., Zhang, Z., Ling, M., 2011. Water infiltration underneath single-ring permeameters and hydraulic conductivity determination. *J. Hydrol.* 398, 135–143.
- Jačka, L., Pavlásek, J., Pech, P., Kuráž, V., 2016. Assessment of evaluation methods using infiltration data measured in heterogeneous mountain soils. *Geoderma*, 276, 74-83.
- Kutílek, M., Nielsen, D.R., 1994. *Soil hydrology*. Catena Verlag, Cremlingen – Destedt, Germany.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 4. 12. 2016

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 12. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 27. 12. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lukáše Jačky, Ph.D., a že jsem uvedl všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne 1. 4. 2017

.....
Radim Redl

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Lukáši Jačkovi, Ph.D. za odborný dohled, cenné rady a trpělivost při zpracování této diplomové práce.

Mé poděkování patří také panu Ing. Zdeňku Karáskovi, který mi umožnil výzkum na půdě Školního lesního podniku v Kostelci nad Černými lesy, a současně bych rád poděkoval panu Martinu Soukupovi za jeho ochotu a pomoc při výzkumu.

V Praze dne 1. 4. 2017

.....

Radim Redl

Abstrakt

Lesní porosty představují podstatnou část životního prostředí a kromě jiných funkcionalit jsou také důležitým zdrojem vody. Hospodaření v lesích během posledních let zaznamenává zvýšený nárůst mechanizačních prací, které jsou spojovány s procesem degradace půdy zhutněním. Zhutnění půdy se odráží na snížených infiltračních schopnostech půdy a vzniku převlhčení.

Tato práce se zabývá vlivem zhutnění způsobeného lesnickou technikou na infiltrační charakteristiky lesní půdy na lokalitě univerzitního pozemku u obce Jevany. V rámci výzkumu bylo v průběhu dvou jednodenních kampaní v srpnu 2016 provedeno celkem 18 terénních měření infiltrací, z nichž polovina měření byla provedena na půdách mechanicky zhutněných a zbylá měření proběhla na půdě bez viditelných známek zhutnění. Měření infiltrací bylo prováděno jednoválcovou metodou s kladnou tlakovou výškou.

Současně probíhal také u jednotlivých infiltračních experimentů odběr neporušených půdních vzorků pro stanovení objemové hmotnosti a vlhkosti při odběru.

Kumulativní infiltrace dosažená v 1. minutě byla na zhutněné půdě 8 krát menší při první kampani a 13 krát menší při druhé kampani, než na půdě nezhutněné. Vlhkost při odběru měla na nezhutněné půdě v průměru hodnotu 17,5 % a na zhutněné půdě byla tato hodnota výrazně vyšší. Objemová hmotnost byla na zhutněné půdě více jak 1,6 krát vyšší, než na půdě nezhutněné.

Ze zjištěných údajů vyplývá přímá vazba mechanického hutnění a omezování procesu infiltrace.

Zmírnění důsledků zhutnění spočívá - v minimalizování počtu přejezdu mechanismů po půdním povrchu, v pojezdu stroje během příhodných klimatických podmínek (zmrzlá půda, počasí bez deště), nebo v technickém provedení stroje (konstrukce podvozku s více nápravami, použití kolopásů a širokoplášťových nízkotlakých pneumatik). Půdní povrch, který je poškozený pojezdem stroje lze vhodným způsobem rekultivovat a zajistit tak retenci a následnou infiltraci srážkové vody.

Klíčová slova:

lesní půdy, válcová infiltrace, vliv zhutnění, snížení vsakovací schopnosti, lesnická mechanizace

Abstract

The woodlands represent an important part of our environment and They are also relevant sources of water. The forest management during last years is in a process of increase of using mechanization works, which are connected with a process of soil degradation by concretion. The concretion of soil is reflected on decrease of infiltration capacity of soil.

This diploma thesis focusses on the influence of the concretion caused by the forestry mechanics on the infiltration characteristics of forestry soil in the area of Jevany municipality. Eighteen field measurements of infiltration were made in August 2016 for purpose of the research. A half of them was made on mechanically compacted soil and the rest of them were made on soil with no evidence of concretion. Measuring was made by a single-ring infiltrometer with a positive pressure head.

A sampling of the intact soil for purpose of determination of density and humidity was made in the same time.

The cumulative infiltration which was reached in the 1st minute was eight times smaller in the case of compacted soil in the stage of the first campaign and thirteen times smaller in the stage of the second campaign in the comparison with non-compacted soil. The level of humidity was 17,5 % in the case of compacted soil. The percentage expression of humidity on non-compacted soil was smaller. The density was 1,6 times more on compacted soil than in the case of non-compacted soil. There is a direct link between mechanical compaction and a limiting the infiltration process.

The instruments for mitigating of consequences of compaction process are: the minimizing of a number of crossing over the soil surface, using the forestry techniques in the hospitable conditions of the weather, a proprior technical design of the machines. The soil surface, which is damaged by agricultural machines can be recultivated and the retention and infiltration of rainwater can be provided.

Key words:

woodland, single-ring infiltrometer, influence of the concretion, reduction of the absorbing capacity, forestry machinery

Obsah

1. Úvod	10
2. Cíle práce	12
3. Literární rešerše	13
3.1 Význam půdní vody	13
3.2 Infiltrace.....	16
3.2.1 Infiltrační rychlost a kumulativní infiltrace.....	18
3.2.2 Měřicí metody infiltrace.....	19
3.2.3 Faktory ovlivňující infiltraci.....	24
3.3 Vybrané fyzikální vlastnosti půdy	29
3.3.1 Pórovitost	29
3.3.2 Objemová vlhkost.....	30
3.3.3 Objemová hmotnost	31
3.4 Degradace lesních půd vlivem těžební mechanizace.....	31
3.4.1 Vliv pojezdu těžebních mechanismů na půdní vlastnosti	32
3.4.2 Vliv pojezdu těžebních mechanismů na oběh půdní vody.....	35
3.4.3 Odvodnění půd umělými svahy.....	35
3.4.4 Měřicí technika	37
3.4.5 Konkrétní případová studie.....	38
4. Materiál a metody	41
4.1 Zájmová lokalita.....	41
4.1.1 Geografické umístění.....	41
4.1.2 Geologické poměry lokality	43
4.1.3 Pedologické poměry lokality	44
4.1.4 Klimatické poměry lokality	44
4.1.5 Hydrologické poměry lokality	46
4.2 Měření infiltrace a souvisejících půdních vlastností	47
4.2.1 Pomůcky a příslušenství.....	48
4.2.2 Přípravné práce	49
4.2.3 Odběr půdních vzorků	50
4.2.4 Postup při měření	52
4.3 Zpracování a analýza dat	54
4.3.1 Kumulativní infiltrace a infiltrační rychlost	54
4.3.2 Vyhodnocení půdních vzorků.....	54
5. Výsledky měření	55
5.1 Terénní měření 4. 8. 2016	55
5.2 Terénní měření 22. 8. 2016	58
5.3 Celkové shrnutí naměřených dat	62

6.	Diskuse.....	68
6.1	Terénní měření.....	68
6.2	Preventivní a nápravná opatření.....	70
6.2.1	Preventivní opatření.....	70
6.2.2	Nápravná (technická) opatření.....	73
7.	Závěr.....	76
8.	Přehled literatury a použitých zdrojů.....	78
9.	Přehled použitých zkratk a symbolů.....	82
10.	Přehled tabulek a obrázků.....	83
11.	Přílohy – fotodokumentace.....	85

1. Úvod

Člověk odnepaměti využívá půdu pro uspokojování svých potřeb. Půda plní v životě člověka klíčovou funkci a je rovněž nezbytná pro jeho život na této planetě. Rozvoj společnosti má za následek narůstající potřebu využívat půdu intenzivněji a ve větším rozsahu, než tomu bylo v minulosti. To s sebou přineslo do tohoto vztahu větší míru nerovnováhy. Význam půdy a vody je pro lidstvo zásadní a správné nakládání s těmito neobnovitelnými zdroji je v současnosti v popředí zájmu odborné veřejnosti.

Voda představuje významnou součást půdy. S vodou jsou spojeny procesy, které napříč půdou probíhají. Půda, která postrádá vodu, je bez života pro rostliny i pro organismy v ní obsažené. Uvnitř půdní struktury se nachází porézní systém, do kterého se voda infiltruje z dešťových srážek nebo při tání sněhové pokrývky. Pokud však dojde ke zhutnění povrchu půdy je objem pórů zmenšen a část pórů je uzavřena. Následkem těchto změn porézního systému se zhoršuje schopnost půdy přijímat, vést a zadržovat vodu. Voda, která se pomalu infiltruje, vytváří na povrchu půdy plochy zalité vodou. Ve vrchních vrstvách půdního profilu vzniká převlhčení.

Ke zhutnění půdy dochází v důsledku pojezdu těžké zemědělské či lesnické techniky po povrchu půdy. Míra zhutnění závisí na nejrůznějších okolnostech, jako je samotná hmotnost vozidla, počet pojezdů ve stopě, a v neposlední řadě také aktuální klimatická situace v dané lokalitě. Za nevhodné klimatické situace dochází k silné erozi, kterou vystihují obrázky č. 39 a č. 40 v příloze fotodokumentace. Zhutnění půdy snižuje pórovitost, omezuje infiltrační schopnosti, snižuje propustnost vzduchu a živin směrem ke kořenům stromů a rostlin. Zhutněné půdy se vyznačují zvýšenými hodnotami objemové hmotnosti a objemové vlhkosti oproti půdám nezhutněným. (Cambi & kol. 2015).

V průběhu dešťů nebo tání sněhové pokrývky je srážková voda prostřednictvím utužených povrchů z důvodů snížené infiltrační schopnosti půdy poměrně rychle odváděná z výše položených oblastí do údolí (obrázky č. 40, č. 41, č. 42 viz příloha fotodokumentace). V níže položených oblastech voda působí škody na majetku a ohrožuje lidské životy. Voda s sebou také transportuje částice půdy a působí vodní erozí. Zhutněním postižené půdy ztrácejí retenční schopnost a nedochází tak během dešťů k infiltraci vody do půdy. Následně během letních měsíců voda lesům schází (jsou více ohrožené suchem).

V rámci výzkumu, který byl uskutečněn v srpnu 2016 na lokalitě univerzitního lesního pozemku nedaleko obce Jevany, byly provedeny infiltrace jednoválcovou metodou na zhutněném a nezhutněném povrchu. Měřením infiltrací předcházet odběr půdních vzorků na určení aktuálních hodnot objemové vlhkosti a objemové hmotnosti jednotlivých vzorků půd. Záměrem práce, která se opírá o již dříve provedené výzkumy v problematice zhutnění je poskytnout konkrétní a ucelené informace o vlivu těžební mechanizace na půdní vlastnosti a na infiltraci. Problematika zhutnění je v současné literatuře věnována převážně zhutnění zemědělských půd, z tohoto důvodu se práce snaží opomíjenou problematiku zhutnění lesních půd doplnit. V části práce je také uveden soubor opatření, které zlepšují infiltraci na zhutněných půdách a jsou zde uvedeny možnosti, jak zhutnění v lesních podmínkách předcházet.

Práce je strukturována následovně. První část práce obsahuje úvod do problematiky a pomyslné rozdělení literární rešerše na dva úhly pohledu. Nejprve jsou čtenáři vysvětleny zákonitosti oběhu vody a její infiltrace do půdního prostředí. Dále se text zaměřuje na pochopení a provázanosti složitého vztahu půdy a vody. První část práce uzavírají negativní důsledky způsobené lesnickou mechanizací. V druhé části práce je podrobně popsána zájmová lokalita, ve které proběhly infiltrační experimenty na mechanicky zhutněných a nezhutněných půdách. V této části je kromě vyhodnocených infiltračních měření proveden souhrn vybraných preventivních a nápravných opatření předcházejících nebo zlepšujících problematiku zhutnění.

2. Cíle práce

Cílem práce je na lesní půdě univerzitního pozemku u obce Jevany porovnat infiltrační schopnosti a související půdní vlastnosti (objemová hmotnost a vlhkost při odběru) změřené na místech s výrazným zhutněním pojezdem lesnickou technikou s místy bez patrného zhutnění.

Dalším cílem je uvést konkrétní návrhy opatření, která zabraňují nebo zmírňují důsledky zhutnění lesnickou mechanizací na infiltrační schopnosti půdy.

3. Literární řešerše

3.1 Význam půdní vody

Hovoříme-li o půdní vodě, máme na mysli veškerou vodu, která je v daný okamžik (dlouhodobě nebo krátce) vázána v půdním prostředí. Do půdy se voda infiltruje ze srážek nebo průsakem z profilu vodotečí. Půdní prostředí je tvořeno řadou pórů, v níž je částečně nebo plně obsažena voda, která za běžných podmínek netvoří spojitou hladinu. (Šarapatka, 1996).

Půdní voda ovlivňuje celou řadu pochodů (tepelný režim půdy, objemové změny půdy, a jiné), má také své místo v procesu utváření půdy. V tomto směru je voda nepostradatelná především pro život půdních organismů, které pomáhají utvářet půdu. Její význam je zásadní také pro zemědělskou pěstební činnost. Rostliny svými kořeny ze zvodněných částí půdy přijímají vláhu.

Pro potřebnou funkci vody v půdním horizontu je důležité, aby prostředím cirkulovala. Nejen, že voda obsažena uvnitř pórů rozvádí živiny, ale také se stává podstatnou součástí koloběhu vody na Zemi. Voda v podzemí nashromážděna pomáhá vyrovnávat vláhu, která je prostřednictvím srážek nestejně rozdělena. V případě, že dojde k utužení povrchu půdy, má tekoucí srážková voda omezené možnosti vstoupit do podzemních vod.

Kategorie půdní vody

Na půdní vodu nepůsobí jen síla tíže zemského povrchu, ale i jiné síly rozdílné povahy. Za předpokladu, že bude půdní voda vyplňovat všechny póry v půdě, tak na ni budou tyto síly působit. Konkrétně se jedná o adsorpční síly, kapilární síly a tíhové síly.

Kategorie půdní vody se rozlišují podle převládajícího působení těchto sil.

Adsorpční půdní voda – Vyschlá zemina má schopnost z vlhkého vzdušného prostředí přijímat vodu ve formě vodních par. Pohlčováním těchto par dochází k nárůstu hmotnosti zeminy do okamžiku, dokud nedosáhne vlhkost zeminy stejné úrovně, jako je vzdušná vlhkost.

V tomto cyklu jsou molekuly vody prostřednictvím adsorpčních a osmotických sil poutány k povrchu tuhé fáze půdy. Adsorpční síly se vzrůstající vzdáleností od povrchu půdy ztrácejí na své intenzitě. Adsorpční voda se v půdním prostředí nachází téměř za všech podmínek (pokud není půda zcela vysušená), tedy pokud je v prostředí zajištěn alespoň minimální stupeň vlhkosti. V opačném případě, je-li půdní prostředí plně nasyceno vodou, je i za těchto okolností

přítomnost adsorpční vody v půdě prokázána, i když v minimálním procentuálním zastoupení. V půdním horizontu se adsorpční voda v kapalně formě v zásadě nepohybuje. (Kutílek, 1966).

Kapilární půdní voda – Molekuly vody, na které přestávají působit adsorpční síly, mají stále vyšší vliv síly kapilární. Odstupem od povrchu půdy, směrem do nižších struktur, dochází k poklesu adsorpčních sil. Oproti tomu kapilární síly se vzrůstající vzdáleností od povrchu půdy sílí. Kapilární procesy jsou závislé především na tvaru půdních pórů a smáčivostí tuhé fáze půdy (Kutílek, 1966) → čím vyšší je vlhkost půdy, tím silnější tyto síly jsou.

Gravitační půdní voda – Za předpokladu, že v půdním prostředí dochází k nárůstu vlhkosti (současně i ke zvyšování obsahu kapilární vody), vede tento stav k uplatnění preferencí síly tíže a k potlačení sil kapilárních. Působení síly gravitace na molekuly vody závisí zejména na vlastnostech půdního prostředí (kvalita a velikost pórů).

Kutílek (1966) uvádí, že za předpokladu spojitých pórů v půdě se gravitační voda kromě nekapilárních pórů objevuje rovněž také v malém množství v pórech semikapilárních¹. Tentýž autor rozděluje gravitační půdní vodu podle formy jejího proudění v půdě. Gravitační voda, která se v půdě rychle pohybuje, se nazývá *prosakující gravitační voda*. *Podepřenou gravitační vodou* se rozumí voda, jejíž postup je blokován nepropustnými vrstvami půdy.

Jednotlivé kategorie půdní vody netvoří mezi sebou ostré hranice. K přechodu mezi nimi dochází v konkrétním intervalu, kterého vlhkost dosáhne. Místo přechodu vlhkosti se označuje pojmem **půdní hydrolimit** (PH), který je zároveň ukazatelem vodního režimu, jenž v půdě probíhá. PH jsou v zásadě rozděleny na základní hydrolimity a aplikované hydrolimity. Pomocí aplikovaných půdních hydrolimitů dokážeme snáze popsat vodní režim probíhající v půdě, nežli využitím pouze základních hydrolimitů. Právě základní hydrolimity se pokusem hůře určují. Podle Horáčka & kol. (1994) v dosahu základních hydrolimitů rozmístíme aplikované hydrolimity. V Tab. č. 1 jsou uvedeny vybrané hydrolimity s příslušnými rozmezími vlhkosti.

¹ Semikapilárními póry se označuje oblast přechodu mezi kapilárními a nekapilárními póry.

Základními hydrolimity jsou:

Adsorpční vodní kapacita (AVK) – Prostředí mezi adsorpční a kapilární vodou. Udává takové množství vody, jež je ještě půda prostřednictvím adsorpčních sil schopna udržet. Konkrétní hodnota AVK není stále vypracována, nachází se přibližně v intervalu čísel pF (logaritmus tlakové výšky) 4,8 – 5,2. (Kutílek, 1966).

Lentokapilární bod (LB) – Lentokapilární bod leží na rozhraní mezi lehce a těžce pohyblivou kapilární vodou. Hodnota pF se nachází v intervalu 3,1 – 3,5. V LB bodě dochází ke snížení pohyblivosti kapilární vody v půdě.

Retenční vodní kapacita (RVK) – Udává vlhkost půdy, která se nachází na hranici mezi kapilární a gravitační vodou. Vyjadřuje maximální množství vody, které může půda absorbovat. Hodnota pF se nachází v intervalu 2 – 2,8.

K aplikovaným hydrolimitům patří: polní vodní kapacita, plná vodní kapacita, maximální kapilární kapacita, bod snížené dostupnosti, bod vadnutí a další.

Monomolekulární adsorpční kapacita (MAK) – Jedná se o vodu obsaženou v monomolekulární vrstvě půdy.

Číslo hygroskopicity (ČH) - Tento ukazatel vyjadřuje největší možnou míru hygroskopické vody obsažené půdou. Mitscherlich nejprve definoval tento hydrolimit, jako vlhkost, při níž se neuvolňuje smáčecí teplo. (Kutílek, 1966).

Podle hodnot, kterých dosahuje číslo hygroskopicity se stanovuje velikost specifického povrchu, hydrofilnost a hlavně bod vadnutí. (Kutílek, 1966).

Bod vadnutí (BD) – Zlomový okamžik poklesu vlhkosti půdy na hranici únosnosti, kdy přestávají být rostliny dostatečně zásobeny vodou, a jehož následkem dochází k chřadnutí rostlin. Průběh vadnutí rostlin se pohybuje po široké škále intervalu vlhkosti půdy. Z tohoto důvodu se za mezní limit označuje spodní hranice tohoto intervalu. (Kutílek, 1966).

Polní vodní kapacita (PK) – Jak uvádí Kutílek (1966), zjišťuje se polní vodní kapacita experimentálně, kdy se zaplaví konkrétní plocha nadbytečným množstvím vody. Jakmile voda zasákne do půdy, provede se měření na půdní vlhkost. Měření půdní vlhkosti probíhá opakovaně (v jednodenních intervalech) do doby, kdy se přestává vlhkost významněji měnit. V tomto okamžiku dosahuje vlhkost úrovně PK. Během pokusu se dbá na to, aby se co nejvíce zabránilo vzniku výparu, a také infiltrace vody ze srážek.

Plná vodní kapacita (PVK) – Neboli maximální vodní kapacita, která udává takovou hodnotu vlhkosti, kdy v půdě dochází k zaplnění veškerých pórů a dutin vodou. Dá se říci, že je tato hodnota rovna pórovitosti. (Kutílek, 1966).

Maximální kapilární kapacita (MKP) – Definuje se, jako maximální možné naplnění půdních pórů a dutin vodou. Tato laboratorní metoda (podle Nováka) se často používá místo obtížněji stanovitelných měření polní kapacity.

Hydrolimit	Rozmezí vlhkosti [% hmotnost]
Monomolekulární adsorpční kapacita	0,3 - 3
Adsorpční vodní kapacita	1 - 15
Číslo hygroskopicity	1 - 20
Bod vadnutí	2 - 30
Polní vodní kapacita	10 - 40
Plná vodní kapacita	25 - 60

Tab. č. 1 - vybrané hydrolimity a jim odpovídající rozmezí vlhkosti minerálních půd. (Kutílek, 1966, upraveno autorem).

Potenciál půdní vody

Celkový potenciál půdní vody (neboli totální) je dán souhrnem všech potenciálů, které působí na půdní vodu. Vyjadřuje se, jako vykonané množství práce, které zajistí transport z rovinné volné hladiny čisté vody do určitého místa půdy. (Kutílek, 1966). Klíčový je v tomto procesu **vlhkostní potenciál**. Vzniká vzájemným působením kapilárních sil a působením přitažlivosti částic půdy a vody. Ostatní neméně důležité potenciály půdní vody jsou: **gravitační p.**, **osmotický p.**, **zátěžový p.** a **pneumatický p.**

3.2 Infiltrace

Pojmem infiltrace lze označit zejména přírodní proces, kdy srážková voda dopadající na povrch půdy, začíná přirozeně zasakovat do spodních vrstev půdy. Jiná definice podle Hortona (1933) jednoznačně definuje infiltraci, jako fyzikální proces zahrnující vsakování vody do půdy. Jak ve své definici uvádí Riedl (1973), infiltrace je proces při kterém srážková voda (nebo jakákoliv jinak přivedená voda) zasakuje z povrchu půdy do jejích nižších vrstev.

Znalostí infiltrace lze objasnit hydrologický režim půd, jehož pomocí určíme vyhovující dřevinnou skladbu, která podporuje retenci vody v půdě a postupně vodu uvolňuje. Vhodná dřevinná skladba zároveň zabraňuje negativnímu působení vodní eroze a snižuje ohrožení povodněmi. (Mašíček & kol. 2011).

Jak z výše uvedeného vyplývá, plní infiltrace důležitou část v hydrologickém koloběhu vody v krajině (viz níže rovnice hydrologické bilance) – ovlivnění vodního režimu v půdě, zásoby vody v půdě a množství vody ve vodotečích.

Rovnice hydrologické bilance **$P = ET + PO + I$**

Kde jednotlivé členy rovnice znamenají:

P atmosférické srážky; **ET** evaporace + transpirace; **I** infiltrace

Přímé určení infiltrace je prakticky nemožné.

Infiltrace přirozená

O přirozenou infiltraci se jedná v případě, kdy dochází k samovolnému vsakování tekoucí vody do půdy, srážkové vody, nebo vody z tající sněhové pokrývky. K přirozenému vsakování vody dochází také v případě tzv. břehové infiltrace, kdy je voda zasakována břehy i dnem moří, řek a rybníků.

Přirozená infiltrace je přímo závislá na klimatických oblastech (množství srážek) a je pro tyto oblasti různá. V průměru dosahuje:

- mezi 30 až 50 % srážek v mírném pásu;
- mezi 10 až 20 % srážek v středním pásu;
- mezi 0 až 2 % srážek v tropickém podnebí

(Bouwer, 2002)

Infiltrace umělá

V případě umělé infiltrace se jedná o zacílené vsakování vody, především za vodárenskými účely pro úpravu pitné vody. (Ambrožová, 2007).

Princip umělé infiltrace spočívá v čerpání surové vody z povrchového zdroje. Ve většině případů se jedná o řeku, nebo vodní nádrž. Voda je přiváděna na pískové rychlofiltry (na kterých jsou zachyceny hrubší nečistoty) a dále putuje do kapacitních žlabů. V těchto žlabech voda zůstává zachycena do doby, kdy postupně skrz pískové podloží vsakuje. Ze vzdušné strany od žlabů jsou vyvrtané odběrné studny, jimiž se přefiltrovaná voda pod velkým tlakem odčerpává. Takto přefiltrovaná voda má již velice podobné parametry, jako voda pitná, ale přece jen ještě musí projít procesem hygienizace. (Vodárna Káraný, 2016).

3.2.1 Infiltrační rychlost a kumulativní infiltrace

Infiltrační rychlost spolu s kumulativní infiltrací tvoří základní infiltrační charakteristiku.

Infiltrační rychlost

Množství vody, které do půdy vsákne za jednotku času, se nazývá intenzita infiltrace, nebo též rychlost infiltrace. (Kutílek, 1966). Jak se autor zmiňuje, často se infiltrační rychlost vyjadřuje v jednotkách $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ či $1 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Obecný vztah pro výpočet $v = dQ / F dt$

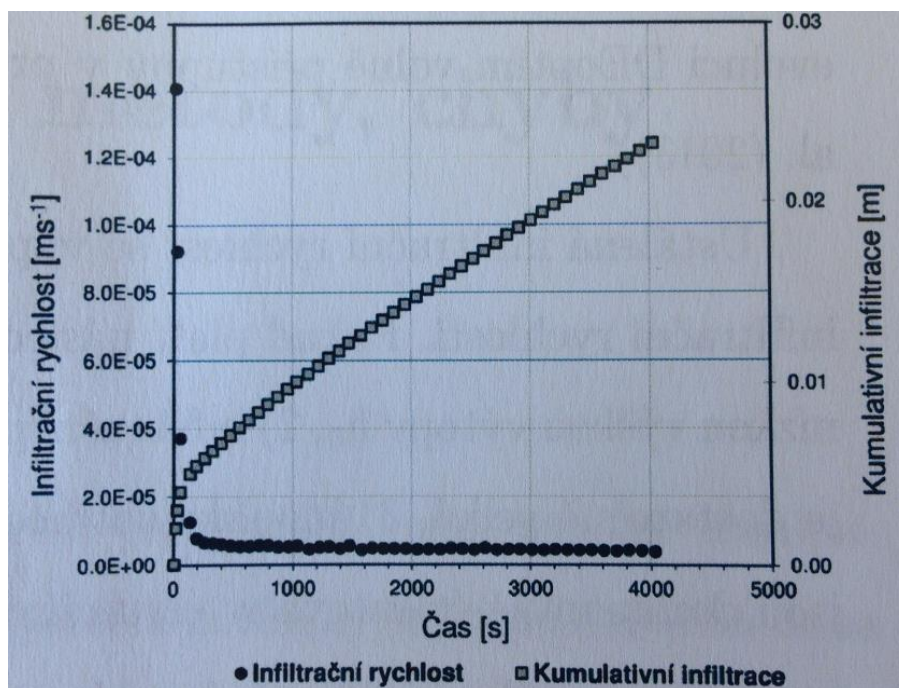
Kde: **Q** objem infiltrované vody [m^3] **F** infiltrační plocha [m^2] **t** čas [s]

Infiltrační rychlost je závislá na počáteční půdní vlhkosti. Na provlhčených půdách se rychlost vsaku s časem snižuje. (Kutílek, 1966). Pórovitost, půdní textura a obsah organické hmoty ovlivňují rychlost infiltrace.

Kumulativní infiltrace

Kumulativní infiltrace představuje celkové množství infiltrované vody za určitou dobu, tedy od počátku měření do jeho ukončení. Zobrazené průběhy měření na Obr. č. 1 ukazují, že dochází k ustálení infiltrační rychlosti na téměř neměnnou hodnotu, přičemž infiltrované kumulativní množství s časem lineárně narůstá.

Obecný vztah pro výpočet $i = Q / F [m]$



Obr. č. 1 - průběhy kumulativní infiltrace a infiltrační rychlosti v závislosti na čase. (Pavlásek & Jačka, 2014).

3.2.2 Měřicí metody infiltrace

Infiltrace se dá popsat různými měřicími metodami. Jednotlivé metody se mezi sebou liší, např. měří různé velikosti objemu, mají rozdílný tvar proudnic, liší se zacházení s měřicím přístrojem a jiná je i obtížnost měření. (Jačka & Pavlásek, 2014). Samotnému výběru měřicí metody je potřeba věnovat pozornost, aby byla vybrána metoda, která konkrétnímu případu nejvíce vyhovuje. Ve výběru měřicí metody by se měly odrážet aspekty, např. přesnost pokusu a jeho časová náročnost, použití výsledných dat, vzdálenost ke zdroji vody a jiné. V případě užití neodpovídající metody patřící pro jinou lokalitu má za následek zkreslení dat. (Císlarová, 1989).

Často používanými metodami v terénních měřeních jsou:

- jednoválcové a dvouválcové infiltrometry s různými průměry válců;
- podtlakové tenzní infiltrometry;
- zařízení simulující srážku (simulátor deště)

Měření infiltrace vsakovacími válci

Mezi obvyklé měřicí metody infiltrace patří válcové infiltrometry. Pro zjištění rychlosti a množství zasáknuté vody do půdy mohou být využity jednoválcové, nebo dvouválcové infiltrometry. Tyto měřicí metody se od sebe navzájem liší pouze v použití vnějšího válce u dvouválcové metody. Do vzniklého mezikruží mezi dvěma válci se taktéž nalije voda, která má pouze zajistit svislost proudnic vsakované vody ve vnitřním válci. (Pavlásek & Jačka, 2014).

Podle některých autorů je vhodné použití dvouválcové metody oproti jednoválcové metodě. Metoda dvou válců se k měření používá častěji, nežli metoda jednoho válce. (Kovaříček & kol. 2007). Avšak jak dodává Císlarová (1989), není za všech okolností žádoucí použití právě dvou soustředěných válců. Při použití dvouválcové metody může v průběhu pokusu dojít k nežádoucímu ovlivnění proudnic zasakující vody z jednoho a druhého válce. Proudnic z vnitřního válce mohou při zasakování být stlačeny proudnicemi z vnějšího válce, což vede k poklesu rychlosti infiltrace. (Pavlásek & Jačka, 2014).

V zásadě je princip měření u obou metod podobný. Z tohoto důvodu je v následujícím textu uveden popis dvouválcové metody a jednoválcová metoda je popsána zvlášť v praktické části této práce.

Dvouválcový infiltrometr

Jedná se o výtopovou metodu s kladnou tlakovou výškou, při které je sledována rychlost a také množství infiltrované vody přes povrch půdy. Aby bylo měření provedeno co nejpřesněji, je potřeba klást důraz zejména na plošné rozestavění a počet budoucích stanovišť, kde bude infiltrování prováděno (stanoviště nesmějí být v těsné blízkosti, aby se vzájemně neovlivňovaly). Povrch půdy, do něhož bude válec zapuštěn, by neměl být viditelně porušený. Rovněž by se měla obsluha vyvarovat umístění infiltračního válce v půdách s možnou terénní depresí (aby nedošlo ke zkreslení výsledku měření).

Infiltrační válec bude na vhodném místě zapraven do neporušeného povrchu půdy do hloubky několika centimetrů (min. 10 cm). Nejprve obsluha zapustí vnitřní válec a poté válec vnější. K zapuštění válců do půdy se obvykle využije litinového kříže a palice s kovovými kuličkami. Zapuštění válců lze také šetrně provést speciálním zařízením za pomoci hydraulického zvedáku (který se o toto zařízení zapře) a na požadovanou hloubku válec zatlačí do půdy. Po zatlačení válce obsluha zkontroluje utěsnění půdy okolo válce, aby se během pokusu neztrácela voda, a případně provede dotěsnění zeminou. Válce by měly být vůči sobě v ose soustředné poloze.

Jak je výše uvedeno, prostřední válec slouží k samotnému měření, kdežto do vnějšího válce se pouze nalévá voda pro dosažení požadovaného směru proudnic vnitřního válce. Na vnitřní válec je připevněno ve vodorovné poloze zařízení, pomocí kterého bude samotné měření prováděno. Ve své podstatě se jedná o kovový hřebínek s měřicí škálou po milimetrech odstupňovaných hrotů.

Postup při měření:

- k dispozici jsou nádoby se známým objemem vody;
- obsluha z nádoby nalévá do válce vodu k vybranému hrotu umístěného na měřicím zařízení;
- dosáhnutím referenčního hrotu začne obsluha měřit čas;
- v počátečních měření se voda rychleji vsakuje – zaznamenávají jsou pouze čísla hrotů a čas, kdy došlo odtržení hladiny vody od těchto hrotů;
- v okamžiku, kdy voda začíná pomaleji vsakovat – vybere si obsluha konkrétní hrot, u kterého měří čas a dolévá menší množství vody až do ustálení času mezi jednotlivými dolitími

Měření infiltrace pomocí vsakovacích válců je v praxi poměrně náročné. Obsluha by měla být odborně proškolená a měla by se skládat ze dvou

až tří pracovníků. Aby bylo měření co nejpřesnější a chyba lidského faktoru minimalizována, lze nahradit klasickou metodu (odečítáním z hrotů) speciálním přídatným zařízením, které je vybaveno snímáním úrovně vodní hladiny a záznamem příslušného času.

Měření infiltrace Guelphským permeametrem

Jedná se o zařízení k měření infiltrace, tzv. závrtný infiltrometr, který principiálně slouží k měření hydraulické vodivosti K_s v podmínkách nenasyčeného půdního prostředí. Přístroj svým technickým provedením vychází z funkčnosti „Mariottovy láhve“, a v předem vyvrtaném vrtu je jeho pomocí dosaženo konstantní výšky hladiny. (Pavlásek & Jačka, 2014). Stejní autoři také zmiňují, že teoretická maximální hloubka měření může být až 8 metrů, ale ve skutečnosti je tato hloubka dána délkou výtokové trubice, a je proto mnohem menší. Reálná hloubka měření je tak pouze 1 až 2 metry a odvíjí se také od soudržnosti půdy (s menší soudržností půdy klesá hloubka vytvoření vrtu).

Tělo přístroje tvoří především zásobní válec opatřený měrnou stupnicí hladiny, zavzdušňovací trubice, výtoková trubice a vypouštěcí ventil. Z funkčního hlediska jsou důležité otvory ve spodní části válce, kde je umístěno čidlo. Detailní popis Guelphského permeometru popisuje také Kutílek & kol. (2000).

Postup při instalaci a měření:

- vytvoření vrtu v půdě (s opatrností vrtání do požadované hloubky, lépe i po částech, aby ve vrtu nedošlo vlivem zhutnění k deformacím a ucpáním pórů);
- plnění probíhá mimo vrt (přístroj je umístěn do vrtu, až když je naplněn vodou);
- při plnění musí být otevřené odzdušňovací ventily (aby vzduch z válce přirozeně odcházel);
- při manipulaci s přístrojem dbá obsluha na to, aby nedocházelo ke zbytečnému kontaktu zařízení se stěnami vrtu, přístroj se nepokládá na úplné dno vrtu;
- permeometr se spouští otevřením zavzdušňovacího ventilu;
- během měření obsluha zapisuje čas měření a ze stupnice zaznamenává úroveň hladiny vody v permeometru;
- měření obsluha ukončí v okamžiku, kdy dochází k ustálení rychlosti klesající hladiny vody v permeometru

Podrobný postup i vyhodnocení naměřených hodnot popisuje Pavlásek & Jačka (2014) v manuálu - Manuál pro terénní cvičení.

Mezi hlavní výhody této metody měření infiltrace patří:

- klesá riziko poškození půdy během experimentu;
- nižší nároky na počet osob (měření a manipulaci zvládne jedna osoba);
- na provedení pokusu je spotřebováno poměrně málo vody, mezi 2 – 2,5 l;
- doba trvání pokusu se pohybuje mezi 0,5 – 1 h

Měření infiltrace simulátorem deště

Simulátory deště, neboli zadešťovací zařízení jsou v podstatě přístroje, kterými lze dosáhnout simulací umělého deště v požadované intenzitě. Tyto zařízení jsou zkonstruované jednak pro simulování srážek přímo v terénu, anebo pro ověření účinku deště v laboratorních podmínkách.

Většina moderních zařízení dnes již umí regulovat intenzitu srážek, aby měřené hodnoty vycházely z praktických situací v přirozeném prostředí. Praktickou výhodou těchto zařízení (na rozdíl od jiných způsobů měření infiltrace) je nejen okamžité měření infiltrace vody do půdy, ale i pozorování účinku dešťových kapek na povrch půdy. Účinky dopadajících kapek různé intenzity mají na povrch půdy vliv. Zásadní v tomto procesu je jednak velikost a rychlost (kinetická energie) dopadajícího deště, ale i typ pokryvu povrchu půdy. Infiltrace vychází ze zvolené intenzity deště a ze zachyceného odtoku po povrchu půdy. Přednostní použití simulátoru deště je ověřit pro danou lokalitu účinky deště na vznik vodní eroze. Výsledky experimentu poslouží k vytvoření vhodných agrotechnických opatření. Půdoochranná opatření mají zajistit dostatečnou ochranu půdy před vlivy vodní eroze (především v deštivých obdobích) a podporují proces vsakování vody do půdy. (Naše Voda, 2017).

Polní simulátor deště

Pro měření infiltrace a účinků vodní eroze na půdu, za stávajících podmínek (půdní, hydrologické, klimatické) se využívá zařízení, které se instaluje přímo v terénu. Především pro účely faktoru erodovatelnosti půdy vodní erozí na zhutněném povrchu se v laboratorních podmínkách problematicky zjišťují. Z průběhu infiltrace lze zjistit tzv. hydraulická vodivost, ke které dochází v okamžiku vsakování dešťových srážek povrchem půdy do jejich hlubších vrstev. Hydraulická vodivost lze měřit v laboratorních podmínkách (odběr vzorků půdy), nebo se měření provedou přímo v terénu. Tento způsob měření se více využívá především pro lepší přesnost. (VÚZT, 2017).

Ke zjištění infiltrační rychlosti lze využít výše uvedené měřící metody, např. metodu vsakovacích válců, neboť měření je rychlejší a jednodušší. V případě

polních podmínek, kdy je k dispozici dostatečná měřicí plocha, se využívá právě přenosného simulátoru deště. Průběh měření i příprava jsou náročnější, ale jedná se o přesnější metodu.

Simulátor deště je složen z rámu, na kterém jsou zavěšeny vodovodní rozvody, vybaven je postřikovacím zařízením. Simulátor je závislý na externím zdroji vody, ke kterému se připojuje (nádrž). Povrch půdy, na kterou probíhá simulace deště je viditelně ohraničen mantinely. Přebytečná voda, která se neinfiltroje do půdy je spodní částí zařízení odvedena a zachycena v odměrné nádobě. Zachyceno je i množství splavenin.

Polních simulátoru deště je velké množství typů. Malá zařízení, která skrápějí plochu do velikosti 1 m^2 , konkrétně se jedná o zařízení typu Mc QUEENA, skrápějící plochu 283 cm^2 , nebo zařízení KAMPHORSTA skrápějící plochu 625 cm^2 . (VÚZT, 2017). Velká postřikovací zařízení, která jsou určena pro několikanásobně větší plochy (desítky m^2 až 100 m^2) jsou po stavební stránce obtížněji realizovatelné. U takto velkých simulátorů deště dochází k větší nerovnoměrnosti umělých srážek na měřené lokalitě.

Laboratorní simulátor deště

Simulování srážek je za určitých okolností v terénu problematické a k určení požadovaných hodnot je prostředí laboratoře výhodnější. Především se jedná o dosažení požadovaných půdních vlastností.

Proces simulace deště je automatizován a je řízen počítačem, stejně tak i získávání měřených dat. Postřik půdy probíhá vždy pomocí skupiny trysek (např. 4 trysky), které jsou paralelně umístěny vedle sebe na jednotlivých částech. Tyto části kmitají do stran a rovnoměrně skrápí půdu, která je umístěna pod nimi ve speciálních kontejnerech. Kontejner s odebranou zeminou se pro potřeby měření může naklonit. Ve spodní části nádoby jsou umístěny otvory, které slouží pro odvod vody. Aby nedocházelo k odnosu půdy, jsou otvory překryty filtrem, který tomu zabrání. Pod samotnou vrstvu půdy se ještě umísťuje několika centimetrová vrstva písku. Přebytečná voda, která se při pokusu neinfiltroje do půdy, je postranním sběrným kanálkem z roštu odvedena. (<http://destovy.simulator.sweb.cz>, 2017).

Měření infiltrace tlakovým infiltrometrem

Tlakovým infiltrometrem tzv. Mariottova typu, který sestrojili Matula & Kozáková (1997), lze měřit kumulativní infiltraci a nasycenou hydraulickou vodivost v půdním horizontu. Jak autoři popisují funkci svého infiltrometru, není

přístroj závislý na připojení k žádnému zdroji elektrické energie a jeho funkcionality je tak pouze záležitostí mechaniky a hydrauliky.

Postup při instalaci a měření:

- do předem připravené půdy obsluha nainstaluje kovový infiltrační válec, na který poté upevní samotný infiltrometr;
- zásobní nádobu infiltrometru naplní vodou na požadovanou úroveň;
- experiment začíná v okamžiku otevření výtoku – v tento okamžik začne obsluha měřit čas (zároveň pozoruje stoupání vodní hladiny uvnitř válce);
- jakmile dosáhneme hladina konstantní úrovně, obsluha zaznamenává čas a provede odečet poklesu hladiny z infiltrometru po konkrétní dobu trvání

Měření infiltrace postřikováním

Simulace dešťové srážky a následná infiltrace lze provést téměř bez jakýchkoliv složitých zařízení. Ve své podstatě k provedení pokusu postačí zahradní hadice s rozstřikovací koncovkou. Důležité je, aby k úspěšnému provedení experimentu byla zajištěna dostatečná zásoba vody pro simulaci dešťové srážky o konkrétní intenzitě.

Celý proces infiltrace, včetně přípravy pokusného políčka a simulace deště postřikováním je zdokumentovaný na instruktážním videu pana Štefana Vaľa, který se problematikou infiltrací zabývá.

Touto metodou se určí infiltrované množství vody, jako rozdílu množství vody, které bylo na postřik potřeba a zachyceného množství vody, které při experimentu nevsáklo do půdy.

3.2.3 Faktory ovlivňující infiltraci

Průběh infiltračního procesu, kdy dochází k vsakování vody do půdy, je podmiňován spolupůsobením nejrůznějších faktorů, které ovlivňují, jak infiltrované množství vody, tak i infiltrační rychlost. V následujícím textu je uveden přehled těch nejpodstatnějších vlivů, které se při svém spolupůsobení podílejí na infiltračních procesech. K níže uvedeným vlivům je potřeba vzít v úvahu fyzikální vlastnosti půdy, které jsou rozebrány v následující podkapitole.

Zhutnění půdy

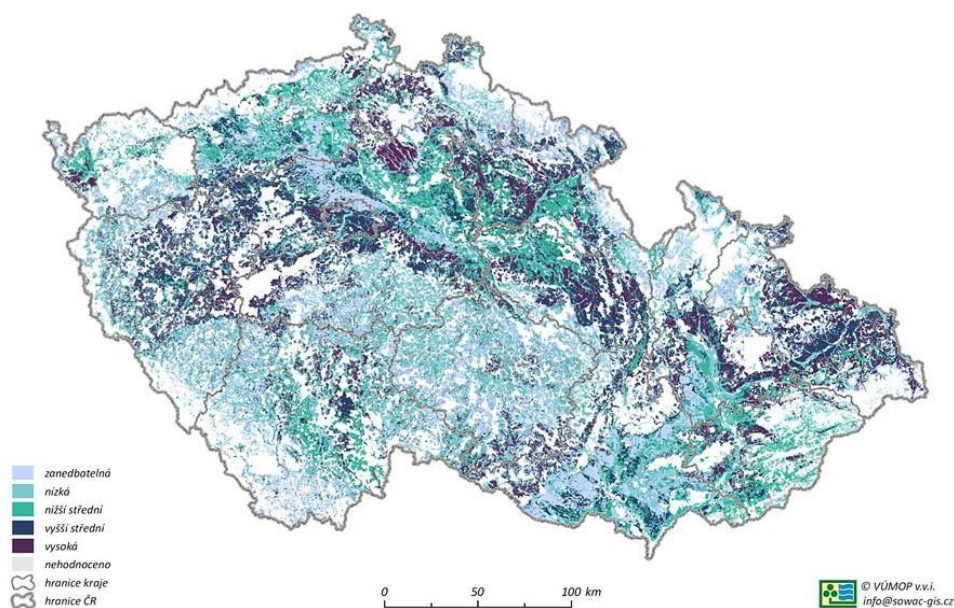
K degradačnímu procesu zhutnění půdy obvykle dochází při pojezdech těžké zemědělské nebo lesnické mechanizace. Obdobným způsobem může zhutnění půdy způsobovat nepřiměřené množství zemědělských zvířat na lokalitě.

U půdy, která podléhá zhutnění, neboli také mechanickému utužení (pedokompakce) dochází k negativním změnám v jejich fyzikálních vlastnostech. Jak se zmiňuje Javůrek & Vach (2008), u takto poškozených půd vzrůstá objemová hmotnost a zároveň klesá v půdě pórovitost, což může vést až k destruktivním účinkům na půdní agregáty. Zmíněná pórovitost klesá především u nekapilárních pórů. Destruktivní účinky zhutnění půdních pórů se odrážejí také na schopnosti (propustnosti) prostředí vést půdní vodu a půdní vzduch. Negativně je ovlivněn také teplotní režim půdy. (CENIA, 2017).

Na povrchu půdy se utváří málo propustná vrstva, která vodu ze srážek nevpustí do hlubších vrstev půdy a zabraňuje tak infiltracím. V tomto důsledku je vyvolán povrchový odtok, který s sebou transportuje půdní částice a způsobuje tak proces eroze půdy. Následkem vodní eroze je ztráta nejurodnějších vrstev půdy, jejich usazování a eutrofizace vodních toků.

Utužené a málo propustné půdní prostředí zamezuje pohybu půdní vody, půdního vzduchu a omezuje tak existenci mezoedafonu a mikroedafonu. Tyto půdní mikroorganismy tvoří důležitou součást „zdravé“ půdy, podílejí se na významných půdotvorných procesech. Podle Javůrka & Vacha (2008) se především jedná o humifikaci, dále o oxidaci železa, amoniaku, manganu, síry, o rozklady dusičnanů a síranu. Omezenou aktivitou půdních organismů také vzrůstá acidifikace půdy a snižuje se kvalita humusu.

Potenciální zranitelnost spodních vrstev utužením



Obr. č. 2 - **potencionální zranitelnost vnitřních vrstev půd utužením.** (VÚMOP, 2017).

Náprava a prevence vedoucí k odstranění, nebo alespoň ke zmírnění zhutnění spočívá ve využívání vhodných agrotechnických opatření. Na zemědělské půdě se jedná o opatření, kdy se provádí výsev vhodných regeneračních plodin a zvyšuje se podíl půdní organické hmoty zapravované do půdy. Opatření, která je možno v praxi uplatnit na zemědělské i na lesní půdě spočívá v minimalizaci počtu přejezdů po lokalitě. Lze též minimalizovat přejezdy za nevhodných klimatických podmínek (vlhké a deštivé počasí). V případě lesnické mechanizace se může využívat zařízení sdružující více pracovních operací, nebo stroje, které jsou k provozu v lesních podmínkách přizpůsobené (nízko tlaké pneumatiky, kolopásky, vícenápravové stroje). Nápravy a prevence lze dosáhnout ve spolupráci se zemědělskou poradenskou službou (např. vytvoření akčního programu pro řešení problematiky zhutnění), vytvoření dotačního programu Ministerstvem zemědělství v rámci odstranění zhutnění půd, provést měření a zmapování současných zhutněných ploch, vypracování plánů omezení zhutnění. Jako účinné řešení se jeví zakotvení do legislativy vhodných pracovních postupů vedoucích k omezení míry zhutnění. Obr. č. 2 znázorňuje rozložení potencionální zranitelnosti půd v České republice.

Půdní organismy

Půdní organismy, půdní edafon, nebo také půdní biota, která v půdě žije trvale nebo dočasně tvoří nedílnou součást procesů, které v půdním prostředí probíhají, a zároveň ovlivňují infiltraci vody do půdy. Půdní biota se podílí na proměnách organické hmoty, ale i na biologickém zvětrávání minerálních částí. Z hlediska utváření půdních agregátů plní půdní organismy v tomto procesu klíčovou a nezastupitelnou roli. Půdní edafon také ovlivňuje zastoupení živin v půdě a je jedinečným indikátorem biologického samočištění půdy. (Hůla & kol. 2010). Existence edafonu v půdě je závislá především na půdních vlastnostech (chemické a fyzikální vlastnosti).

Organismy se podle velikosti svého těla rozdělují na 3 základní kategorie. Nejmenší organismy (mikroorganismy) se nazývají mikroedafon. Jsou to především bakterie (základní složka edafonu). Následuje skupina zahrnující živočichy např. žížaly, stonožky, háďátka a další, která se nazývá mezoedafon. Tyto organismy se vyskytují ve svrchních vrstvách půdy, kterou svými pohyby rozrušují, nakypřují a umožňují tak snazší přístup vody a vzduchu do půdy. Poslední skupinu tvoří zástupci makroedafonu. Jedná se o největší živočichy, jejichž životním prostředím je půda. Do skupiny makroedafonu patří krtek, hraboš, a další. Stejně jako skupina

organismů mezoedafonu, přispívají také živočichové makroedafonu k rozrušování struktury půdy.

I přes to, že půdní biota pokrývá poměrně malou část půdní organické hmoty, tak je z hlediska kvality půdy významná. Velkou měrou umožňuje a ovlivňuje infiltrační procesy.

Půdní pokryv

Půdní pokryv zásadně ovlivňuje infiltrační schopnosti dané lokality. Rozdílnou měrou dokáže zadržet a infiltrovat vodu ze srážek lesní hrabanka ve srovnání se zemědělskou půdou, na níž je pěstována širokořádková plodina. Nejen že půdní pokryv rozdílně ovlivňuje průběh infiltrace, ale i každý typ půdního pokryvu jinak reaguje a chrání povrch půdy před erozí (zejména vodní, větrná eroze).

Největší okamžitou akumulační schopnost má neporušená vrstva lesní půdy. Hrabankou je tvořena nejsvrchnější část půdy. Další vrstva je tvořena horizontem s velkým zastoupením humusových částic. Tyto dvě půdní vrstvy představují velký infiltrační potenciál lesních půd. Následující vrstvy, v níž jsou kořeny stromů, keřů a rostlin jsou bohaté na tzv. makropóry, které pomohly vytvořit kořeny rostlin a stromů, jenž později odumřely. Lesní půda je dále bohatá na velké množství gravitačních pórů (oproti půdám zemědělským), kdy povrchová voda je jejich prostřednictvím (působením gravitace) odvedená do podzemních vod.

V pomyslném žebříčku následují lesní půdy, co do infiltračních schopností půdy pokryté nízkou vegetací – trvalé travní porosty. Nejhůře dokáží vodu infiltrovat zemědělské půdy, které bývají obvykle mechanicky utužené. Na těchto půdách se pěstují úzkořádkové a širokořádkové plodiny, které nevytvářejí dostatečný zápoj a půdu před deštěm způsobující erozi nedostatečně chrání. Velkou hrozbu představují přívalové deště o intenzitě nad 20 mm srážek, kdy půda není takto velké množství již schopna absorbovat a je vyvolán povrchový odtok s následnou vodní erozí.

Nepoškozená lesní půda dokáže v mnoha případech odvrátit povodňovou situaci a to především díky skvělým retenčním a infiltračním schopnostem. Švihla & kol. (2006) potvrdili, že retenční kapacita, které lesní půdy dosahují v procesu akumulace a postupného uvolňování srážkových vod je podstatná. Podle výsledků analýzy povodňových vln je retenční dynamická kapacita lesních půd schopna transformovat 69 a 89 % objemu odtékajícího vod, a to při 22 a 21% obsazení úplné retenční kapacity těchto půd.

Evapotranspirace

Evapotranspirací se označuje celkový výpar vodní páry z určitého území. Principiálně se jedná o proces přeměny kapalné anebo pevné fáze vody ve vodní páru. Tento proces se skládá z evaporace a transpirace. Evaporací se rozumí fyzikální děj, kdy je do atmosféry uvolňována voda ve formě vodní páry z povrchu půdy (bez působení rostlin), anebo uvolňování vodních par z volného povrchu vodních ploch. Za transpiraci se označuje proces, kdy k výparu vody dochází z vegetace. Jednotkami ve který se evapotranspirace měří, jsou [mm] a představují úroveň vody, která se volně odpařila do atmosféry.

Autoři Vavříček a Kučera (2014), uvádějí pro lesní porosty charakteristické průměrné hodnoty evaporace pohybující se v rozmezí 0 – 1, 5 mm * den⁻¹ v období jara a podzimu, v období léta dosahuje výpar vyšších hodnot - až 7 mm * den⁻¹ (výpar z plochy o velikosti 1ha činí 70 000l. Intenzivnější transpiraci vyvolávají nejrůznější faktory, jedná se např. o silný sluneční svit na povrch rostliny, limitující množství zásob vody v půdě a silná rychlost větru. (Vavříček & Kučera, 2014). Případný pokles evapotranspirace v České republice o hodnotu 1mm/1 den by představovalo velké oteplení povrchu území přibližně 6 000 GWh. (Vavříček & Kučera, 2014).

Ti též autoři provedli srovnání mladých horských smrkových porostů a mladých bukových porostů z pohledu evapotranspiračního výdeje během vegetačního období. Smrkové lesy během vegetačního období uvolňovaly 234 mm vody a bukové lesy během stejného období uvolňovaly 220 mm vody.

U jehličnaté horských lesů se v rámci celoroční hydričké bilance dokáží nápadněji projevit (oproti lesům listnatým) především silnější schopnosti evapotranspirace a intercepce². Tyto jevy hlavně během zimy a začátkem brzkého jara zpomalují rychlost tání sněhu a snižují tak povrchový odtok. (Vavříček & Kučera, 2014).

Vliv podnebí

Na klimatických poměrech závisí teplota a vlhkost půdního prostředí, které ovlivňují půdotvorné procesy. Pro tyto procesy je nezbytnou součástí voda a to jak její množství, ale i její směr proudění.

V klimaticky vlhkém podnebí dochází spolu při infiltraci vody z povrchu půdy k zasakování nejrůznějších látek, které mohou být v nerozpustné nebo rozpustné

² voda ulpívá na rostlině a nedopadá na povrch půdy

formě. Látky, které se ve vodě nedovedou rozpustit, se v půdním horizontu ukládají, zatímco rozpustné látky vstupují do podzemních vod. (Kutílek & kol. 2000).

Naopak v podnebí, které je suché a vyprahlé, tj. podnebí, kde vlivem vysokých teplot je výpar a infiltrace vody vyšší, než srážkový úhrn dochází ke vzlínání rozpuštěných látek, např. solí. V těchto oblastech jsou půdy trvale zasoleny. (Kutílek & kol. 2000).

3.3 Vybrané fyzikální vlastnosti půdy

3.3.1 Pórovitost

Celkový podíl všech volných míst, které jsou mezi pevnými částicemi, se definuje, jako pórovitost půdy. Pórovitost dále vyjadřuje velikost, tvar a objem pórů. Pórovitost spolu s půdní strukturou patří mezi důležité vlivy na prostorové uspořádání půdy.

Na vzniku pórů se podílí celá řada faktorů, kdy působením teplotních výkyvů, činností půdních živočichů nebo kořenů rostlin dochází k destrukci matečné horniny a k následnému utváření pórů. V půdním horizontu se nacházejí také makropóry, které byly vytvořeny půdními živočichy nebo vznikly po odumřelých kořenech rostlin.

Podle působení druhu síly na vodu v pórech rozlišujeme následující:

Kapilární póry – Jedná se o nejmenší póry, v nichž pohyb vody neovlivňují gravitační síly. I přes minimální přístupnost vody v těchto pórech je jejich významem vázána celá řada fyzikálních a chemických procesů. Kapilární póry se vyskytují především v jílovitých půdách.

Semikapilární póry – Tyto póry jsou střední velikosti a vznikají působením kořenů rostlin. Voda obsažená v těchto pórech je ovlivňována také gravitačním působením. V případě pórů malé velikosti je sací tlak vyšší, nežli u větších pórů a voda v nich obsažená je poutána větší silou. (Vavříček & Kučera, 2014).

Nekapilární póry – Sací tlak v nekapilárních pórech přestává na vodu působit a tak pohyb vody závisí pouze na gravitačních silách. Pokud pravidelně nedochází k přísunu vody do těchto pórů, tak se za velice krátkou dobu póry vyprázdní.

Makropóry – Představují velké póry vytvořené půdním edafonem nebo vzniklé působením kořenů rostlin. Jedná se o nekapilární póry, které jsou významné především z hlediska tzv. vzdušného režimu půdy. (Vavříček & Kučera, 2014).

Kapilární póry jsou z hlediska vsakování nevhodné a nedokáží při jejich velkém počtu v půdě zajistit infiltraci vody. Semikapilární a nekapilární póry umožňují lépe vytvořit podmínky pro pronikání vody půdním prostředím. (Kameníčková, 2006). V Tab. č. 2 a Tab. č. 3 jsou uvedeny kategorizace pórovitostí pro lesní půdy.

Podíl pórů [%]	Klasifikace pórovitosti
25 - 30	Velmi slabá
30 - 35	Slabá
35 - 45	Mírná
45 - 55	Střední
55 - 70	Silná
> 70	Velmi silná

Tab. č. 2 - klasifikace pórovitosti u lesních půd.

(Vavříček & Kučera, upraveno autorem, 2017).

Ilustrativní hodnoty pórovitosti půdy.	
lesní půdy	35 - 55 %
povrchový humus	60 - 70 %
rašeliny	90 %
glej (spodní vrstvy)	30 %

Tab. č. 3 - ilustrativní hodnoty pórovitosti u lesních půd.

(Vavříček a Kučera, upraveno autorem, 2017).

3.3.2 Objemová vlhkost

Důležitým ukazatelem, pomocí kterého se dá indikovat (vedle výpočtu pórovitosti) míra nasycení půdních pórů vodou, se nazývá objemová vlhkost půdy. Její aktuální velikost závisí na typu půdy, množství a velikosti pórů, a do jakého rozsahu jsou tyto póry vodou zaplněny. Objemová vlhkost je závislá také na aktuální klimatické situaci v konkrétní oblasti měření, hloubce odběru vzorků, atd.

Nejběžnější metodou určení aktuální objemové vlhkosti půdy se provádí graviometrickou metodou, kdy se odebraný a neporušený vzorek půdního horizontu, co nejdříve zváží. Následně probíhá proces sušení vzorku v automatické sušičce po několik hodin, až do úplného zbavení půdní vlhkosti. Rozdílem hodnot odebrané vlhké zeminy a zeminy po vysušení zjišťujeme zastoupení vody v odebraném vzorku půdy. Zastoupení vody v půdě můžeme vyjádřit procentuálně. Jak se zmiňuje Kutílek (1966), mohlo by při této metodě měření dojít např. právě při sušení vzorků ke spalování organických částí a tedy ke zkreslení výsledku měření.

Objemová vlhkost $V_o [\%] = O_v/O_p \cdot 100$

Kde:

O_v obsah vody ve vzorku (rozdíl hodnot hmotnosti vzorku před vysušením a po vysušení)

O_p objem neporušeného vzorku [cm^3]

3.3.3 Objemová hmotnost

Objemovou hmotností se rozumí hmotnost půdy v přirozeném stavu v jednotkách [$\text{g} \cdot \text{cm}^3$]. Objemová hmotnost (oproti měrné hmotnosti) v sobě zahrnuje porézní prostředí, které je současně naplněno vodou a vzduchem → proto dosahuje nižších hodnot ve srovnání s měrnou hmotností. (Vavříček & Kučera, 2014). Zejména půdní strukturou, složením půdy a pórovitostí je ovlivňována objemová hmotnost.

Jak bylo výše uvedeno, objemová hmotnost v sobě zahrnuje aktuální přirozenou vlhkost půdy, která nabývá kolísavých hodnot. Z tohoto důvodu je časté použití objemové hmotnosti redukované, která stejně jako objemová hmotnost vyjadřuje půdu v přirozeném stavu, avšak zbavené kapalné fáze. Zbavení půdního vzorku vlhkosti probíhá při teplotě 105°C , kdy je půdní vzorek zbaven nekystalické vody, tj. vody, která není součástí struktury minerálů. (Vavříček & Kučera, 2014).

K odběru půdních vzorků v přirozeném stavu se využívá fyzikálních válečků o objemu 100 cm^3 .

Objemová hmotnost, Objemová hmotnost redukovaná

$\rho[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}] = \text{hmotnost vzorku po vysušení} / \text{objem válečku}$

V následující podkapitole (Vliv pojezdu těžebních mechanismů na půdní vlastnosti) jsou uvedeny v tabulce č. 4 limitní hodnoty objemové hmotnosti redukované a pórovitosti, při kterých dochází k poškození půdy mechanizací. Dále jsou v tabulce č. 5 uvedeny limitní hodnoty objemové vlhkosti, při nichž dochází k omezení růstu rostlin.

3.4 Degradace lesních půd vlivem těžební mechanizace

Rozvoj lesnické těžební techniky může působit nejen pozitivním vlivem v odvětví lesního hospodářství, ale za určitých podmínek může představovat hrozbu či poškození lesního ekosystému.

Velký pokrok v lesnickém odvětví přineslo postupné zavádění nových technologií těžby dříví, tzv. harvesterové technologie. Do této doby byly v lesích k těžebním činnostem využívány zařízení, které se pohybovaly jen po zpevněných

lesních cestách a nezasahovaly tak výrazněji mimo ně. Se zavedením harvesterové technologie byly v mnoha ohledech ušetřeny náklady a pracovní síly. Tato technologie dovede sdružovat operace, kdy zařízení dokáží na místě provést pokácení, odvětvění a nařezání kmene stromu. Tlaky, které stroj svým pojezdem na povrch půdy působí, poškozují půdu do stran i do hloubky a mají rozdílný výsledný vliv na poškození půdy. S opakovanými pojezdy stroje po půdním povrchu navíc narůstá i míra zhutnění. I přestože byly podniknuty snahy zmírnit poškození, které provoz mechanizace v porostu působí, zejména rozložením nápravového tlaku - využití pásů, širší pneumatiky, nízkotlaké pneumatiky atd. (Hildebrand & kol. 2000) stále je provoz těchto strojů příčinou především utužování půdy. Jedná se o různou míru poškození půdy podle jejího druhu (písečné půdy obvykle nedosahují takové míry zhutnění, jako těžké jílovité půdy). Také s ohledem na terénní nerovnosti dochází k rozdílným poškozením půdy. Pohyb za nepříhodných klimatických podmínek má jiný dopad na poškození půdy, nežli pojezd za příznivého počasí. Rozhodujícím faktorem při poškozování půdy pojezdem je vlhkost a zrnitost půdního horizontu.

Skoupý & kol. (2011) se zmiňuje o existenci studie Ecwood Partnership (2000), která se zabývá působením přibližovacích technologií a klasifikuje lesní půdy do čtyř kategorií podle únosnosti.

Klasifikace únosnosti půd podle Ecwood Partnership (2000):

- pevné půdy (do tlaku 80 kPa);
- půdy průměrně únosné (60 – 80 kPa);
- měkké půdy (40 – 60 kPa);
- velmi měkké půdy (40 kPa, poškození i lidskou chůzí)

Jak je výše uvedeno, degradaci půdy utužením podléhají především těžké jílovité půdy. Výrazné poškození, které lze ve výsledku přičítat zhutnění je omezená schopnost infiltrace dešťových srážek do poškozené půdy, které následně vyvolá povrchový odtok erodující povrch půdy.

3.4.1 Vliv pojezdu těžebních mechanismů na půdní vlastnosti

Autoři Vavříček & Kučera (2014) se zmiňují, že lesní půdy oproti půdám zemědělským dokáží lépe odolávat účinkům pojezdu mechanizace způsobující zhutnění půdy. Je to dáno zejména vysokým obsahem organické hromady, která povrch půdy kryje a chrání. I přesto však dochází k výraznému zhutnění a tvorbě viditelných rýh a kolejí.

Autor instruktážních videozáznamů Štefan Vaľo, který se zabývá vlivem lesnické techniky na zhutnění půd, udává, že traktor dokáže během jednoho dne při soustředování vytěžených stromů zhutnit až 3 km lesní půdy o šířce cca 3,5 m (plocha 1 ha). (Štefan Vaľo, 2017).

Legislativa zabývající se problematikou ochrany a rekultivací půdy v oblastech, kde probíhala těžba dřeva, jsou Lesní zákon a Zákon o ochraně přírody a krajiny.

V lesnickém provozu jsou často učiněna neuvážená rozhodnutí, kdy je zařízení používáno na práci v nevhodném terénu za nevhodných klimatických podmínek. Takové to jednání se odráží ve velkém poškozování lesních půd, kdy zhutněná půda v koleji dosahuje až 30 cm hloubky. (Vavříček & Kučera, 2014). Na těžších bezskeletových a hlinitých půdách dochází vlivem pojezdu ke snižování pórovitosti a naopak ke zvyšování objemové hmotnosti. Na svazích a půdách, které tvoří skelet, jsou způsobeny rýhy, které rozrušují povrch půdy. Tab. č. 4 uvádí kritické mezní hodnoty z pohledu klasifikace negativního působení těžební mechanizace na půdní vlastnosti.

Půdní druh (textura)	jíl, jílovitá	jílovito-hlinitá	hlinitá	písčito-hlinitá	hlinito-písčitá	písčitá
objemová hmotnost redukována [g*cm ⁻³]	> 1,35	> 1,40	> 1,45	> 1,55	> 1,60	> 1,70
pórovitost [% v/v]	< 48	< 47	< 45	< 42	< 40	< 38

Tab. č. 4 - stanovené limitní hodnoty poškození půd lesnickou mechanizací podle Šimona & Lhotského (2000).

Do jaké míry ovlivňuje mechanizovaná těžba půdní vlastnosti, závisí na tlaku, jakým stroj na půdu působí, dále na aktuální hmotnostní vlhkosti a obsaženém množství vody v půdním horizontu.

Na příkladu pojezdu stroje, který na půdu působí tlakem 0,15 MPa je zasaženo půdní prostředí do hloubky 0,35 – 0,40 m. (Neruda & kol. 2008). Za předpokladu je-li půdní prostředí poddajnější a více vlhčí, dochází tlakem stroje k ovlivnění půdy do větších hloubek. Podle Nerudy & kol. (2008) je 10 cm hloubka v půdě vyjeté koleje ještě na hranici únosnosti.

Do jaké míry bude strojem půda ovlivněna, závisí také na tzv. technologických vlastnostech půdy, zejména pak na půdní elasticitě a plasticitě. (Skoupý & kol. 2011). Půdy, které se vyznačují značnou půdní elasticitou, mají (oproti půdám jejíž povrchový horizont dosahuje vysoké plasticity) po pohybu stroje snahu přiblížit

se původnímu stupni půdních vlastností (fyzikální, hydrofyzikální, půdně mechanické).

Lhotský (2000) uvádí, že při prvním pojezdu stroje po nezhutněném povrchu půdy se z velké části projeví plastická, neboli trvalá zhutnění a s dalšími přibývajícími pojezdy dochází k elastickým projevům (zátěž stroje má vliv na již změněné půdní vlastnosti). Na elasticitu půdy ve svrchních vrstvách působí kořenový systém, jako ochrana, která dokáže zmenšovat tlak stroje při prvních přejetích. (Ulrich & kol. 2003). Opakované poškozování půdní struktury vede k nenávratnému rozpadu její struktury bez možnosti obnovy. (Kutílek & kol. 2000).

V níže uvedené Tab. č. 5 jsou podle autorů Arshada a Coena (1992) uvedeny kritické mezní hodnoty objemové hmotnosti půdy ve chvíli kdy dochází k omezování růstu kořenů.

Půdní druh (textura)	Minimální hodnota objemové hmotnosti pro omezení růstu kořenů [g*cm⁻³]
písčitá, hlinitopísčitá	1,8
velmi jemné písky a hlinité písky	1,77
písčitohlinitá	1,75
hlinitá, hlinitojílovitopísčitá	1,7
jílovitohlinitá	1,65
jílovitopísčitá	1,6
prachovitá, prachovitohlinitá	1,55
prachovitojílovitohlinitá	1,5
prachovitojílovitá	1,45
jíl	1,4

Tab. č. 5 - klasifikace kritických hodnot objemové hmotnosti u jednotlivých druhů půd z hlediska omezování růstových projevů rostlin. (Arshad & Coen, 1992, upraveno autorem 2017).

Shrnutí poškozujících dopadů lesnické přibližovací techniky podle Lhotského (2000):

- omezení procesů látkových výměn → omezení energie pro rostlinstvo;
- snížení sanitární obrany půdy vůči škodlivinám;
- rostliny vlivem okyselení půdy špatně přijímají živiny;
- utužená půda snižuje své infiltrační schopnosti → nebezpečí eroze;
- u těžkých půd představuje zhutnění nebezpečí poškození rostlin během růstu;

- na lehčích půdách dochází vlivem poškození k mineralizaci a tvorbě dusičnanů, které mohou pronikat do podzemních vod, nebo jsou ve velkém množství přijímány rostlinami

3.4.2 Vliv pojezdu těžebních mechanismů na oběh půdní vody

Voda se v půdním horizontu pohybuje póry nejrůznějších velikostí. Dojde-li vodou ve vnitřním prostředí půdy k propojení jednotlivých pórů, nastává tzv. nasycené proudění. Jak se však zmiňuje Skoupý & kol. (2011) není tento jev pro lesnictví příliš významný.

Na významu (oproti nasycenému proudění) získává tzv. ustálené proudění (v čase konstantní vlhkost a rychlost proudění). Pro samotné měření vlivu přibližovacích mechanismů na pohyb půdní vody se však vychází z nasyceného stacionárního proudění, kdy jsou všechny póry v ideálním případě zaplněny vodou a nepředpokládají se žádné prázdné póry ani jiná volná místa.

Jak se Skoupý & kol. (2011) zmiňují, jsou problematiky zhutnění a pohybu vody v půdě často rozdílně hodnoceny, jak v literatuře, tak i odbornou veřejností. Hodnocení lze provést přímými měřeními hloubky stopy po stroji, vizuálním pohledem, nebo využitím tlakových sond. Neruda (2008) k vytvoření hodnocení účinků zhutnění vycházel z výsledků dynamické penetrační zkoušky. (Herrick & Jones, 2002).

Účinky zhutnění podle Nerudy (2008)

- vlivem půdní elasticity nedochází s prvním pojezdem mechanizace k maximálnímu zhutnění půdních vrstev;
- položením klestu do míst, kudy se bude mechanismus pohybovat, dojde ke snížení tlaků na půdu a následného zhutnění;
- pojezd mechanismu vyvolal u proschlých lesních půd vyšší tlak, který zároveň při pojezdu půdními nerovnostmi dosahoval nejvyšších hodnot

3.4.3 Odvodnění půd umělými svahy

Výstavba odvozních a soustředovacích komunikací ve sklonově náročných lesních podmínkách si vyžaduje náročné terénní úpravy svahu nad těmito cestami. Nejprve dojde k odstranění části svahu, vybudování zářezu pro vlastní těleso komunikace. Mezi takto uměle vytvořeným svahem (obvykle dosahuje sklonově náročnějších parametrů, než svah původní) a vzniklou cestou je obvykle vybudován sběrný příkop, který je na vhodných místech sveden pod komunikací a zaústěn

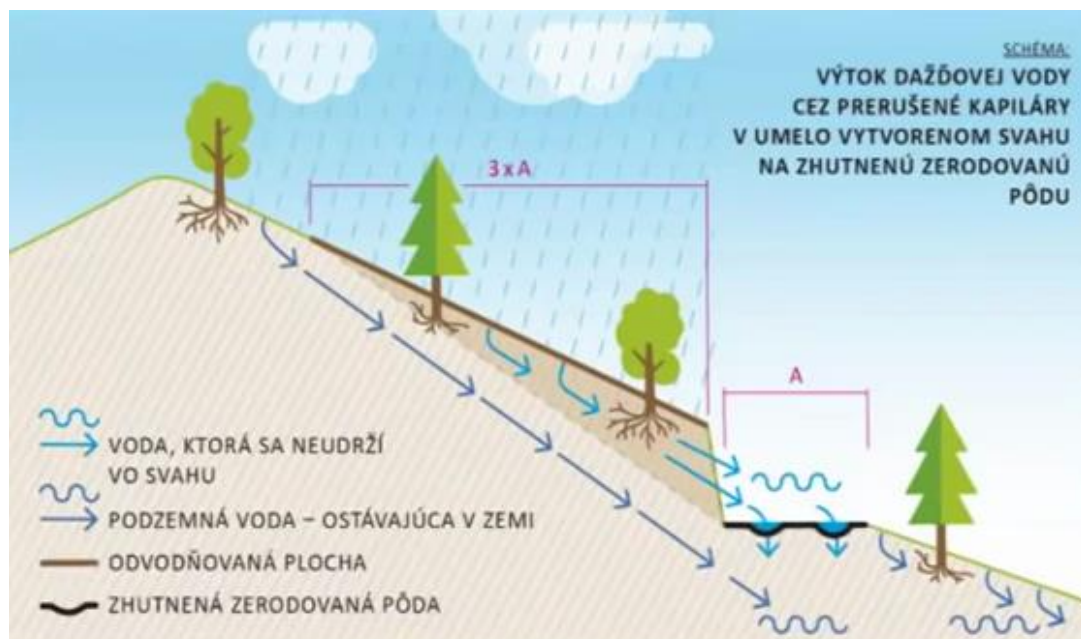
do vodoteče nebo volně odveden do porostu. Hlavním účelem sběrného příkopu je odvádění srážek, aby jejich vlivem nedošlo k poškození komunikace.

Problematika uměle vytvořených svahů obecně vychází z poškození kapilárního systému, kdy vlivem odtěžení částí svahu dojde k přetržení soustavy pórů v půdním horizontu. Na místo zásobování spodních vod a pramenů se narušený systém pórů podílí na ztrátách půdní vody povrchovým odtokem. Voda z narušených pórů během období, kdy jsou dostatečně zásobeny, odtéká do příkopu pod nimi s následným povrchovým odtokem. V období dešťů nebo v případě tání většího množství sněhové pokrývky působí velké množství vody erozivní činnost.

Umělé vytvořené svahy, shrnutí:

- nevhodnou úpravou sklonových parametrů svahu dojde k přerušení pórů v půdě na svahu, které se podílejí na zásobování spodních vod, pramenů a kořenů rostlin;
- množství vody, které přes přerušené póry v uměle vytvořeném svahu z půdy vyteče, závisí na výšce uměle vytvořeného svahu, na sklonu svahu a na složení půdy (Štefan Vaľo, 2017);
- na místo infiltrací je voda z lokality zrychleně odváděná povrchovým odtokem;
- velké množství povrchových vod, které je z hor během krátké doby odvedeno, přispívá k povodňovým stavům potoků a řek v údolích;
- horské oblasti nedokáží zadržet vodu, kterou následně v horkých měsících nemají možnost do nížin uvolňovat

Na následujícím Obr. č. 3 je znázorněný proces odvodňování půdního horizontu v případě uměle vytvořeného svahu. Autor této hypotézy Štefan Vaľo připouští, že v lesích je odvodňovaná půda nad svahem v průměru trojnásobek šířky zhutněné půdy pod svahem.



Obr. č. 3 - schématické znázornění odvodňovacího procesu vlivem uměle vytvořeného svahu. (Štefan Vaľo, 2017).

3.4.4 Měřicí technika

Penetrometr

Penetrometr je zařízení určené k měření míry zhutnění. Široké použití přístroje k měření zhutněných půd je v odvětvích - lesnictví, zemědělství anebo ve stavebnickém průmyslu. Penetrometr pracuje na základě pronikání kovového hrotu půdními vrstvami, kdy každá část horizontu klade jiný odpor a při zarážení tak dochází k zaznamenávání jednotlivých částí podloží.

Dynamický penetrometr

Jedná se o zařízení, kdy jeho pohyblivá část dynamickým účinkem předává kinetickou energii (o předem dané síle) do pevné, statické části přístroje (soutyčí s hrotem), která následně ve vertikálním směru proniká do hloubek v půdním horizontu. Při zarážení statické části penetrometru jsou zaznamenávány počty úderů, které byly učiněny pro dosažení konkrétní hloubky. Závěrem jsou z průběhu zkoušek získány výsledky, které lze použít pro kvalitativní stanovení půdního profilu nebo pro porovnání s dalšími provedenými zkouškami. Výsledky mohou posloužit pro určení vlastností zemin zejména pak deformačních a pevnostních vlastností. Technologie je vhodná zejména před zahájením stavebních prací, jejíž součástí je průzkum podloží. Při provádění této zkoušky nelze odebrat vzorky.

Podle technické normy ČSN EN ISO 22476-2, která definuje požadavky na provádění průzkumů, a zkoušek podloží jsou rozeznávány následující metody:

- DPL – lehká dynamická penetrace;
- DPM – střední dynamická penetrace;
- DPH – těžká dynamická penetrace;
- DPSH – velmi těžká dynamická penetrace

Lehký dynamický penetrometr

Měřicí zařízení je pro svoje rozměry a váhu (cca 71 kg) vhodné pro terénní práce v náročnějším lesním porostu. Maximální hloubka, které tento typ penetrometru dokáže dosáhnout, se pohybuje v rozmezí 8 – 12 m.

Pohon lehkého přenosného penetrometru může být s ohledem na jeho provedení manuální, hydraulický nebo automatický. Zaznamenávání naměřených údajů se může podle provedení penetrometru lišit na ruční, laserovým paprskem nebo ultrazvukem.

3.4.5 Konkrétní případová studie

V rámci projektu Ministerstva zemědělství ČR (MZe) a Národní agentury pro zemědělský výzkum (NAZV) byla zpracována monografie, jejíž součástí byly praktické studie. Výzkum zabývající se zhutněním lesních půd způsobených pojezdem lesnických strojů probíhal v říjnu 2007 na předem zvolených pozemcích Školního lesního podniku Masarykův les Křtiny Mendelovy univerzity. Součástí měření bylo také stanovení dopadu zhutnění na půdní nasycenou hydraulickou vodivost.

Vytipovány byly tři lokality, které v prvních fázích podstoupily měřením penetrometrem a Guelphským permeametrem. Následně se lokality podrobily pojezdům lesnické techniky, kdy každý stroj s ohledem na svou konstrukci a jízdní vlastnosti působil na pojížděnou půdu jinými vlivy. Konkrétně jednotlivé lokality pojížděly stroje: Zetor 7245 Horal Systém (univerzální kolový traktor – UKT), PONSE ERGO 16 (harvestor) a GREMO 950 (forwarder). Odběry půdních vzorků, měření penetrometrem a permeametrem probíhaly: před přejetím stroje ve stopě, po přejetí stroje stopou a poslední měření proběhly v časovém odstupu 6 měsíců – tj. v říjnu 2008. Kromě měření hodnot dosažených na zhutněném povrchu probíhaly tzv. kontrolní měření na nezhutněném povrchu, které měly za úkol monitorovat sezónní dynamiku předmětných veličin.

Výsledná data jsou uvedena na následujících obrázcích. Obr. č. 4 (lokality Babice nad Svitavou – pojezd UKT) obsahuje jednotlivá období, ve kterých

probíhala měření (měření před pojezdem, měření v době po pojezdu, měření v časovém odstupu půl roku po pojezdu, kontrolní měření). K jednotlivým obdobím měření se vztahují příslušné sledované veličiny. Jak je z obrázku č. 4 patrné, byly hodnoty stanoveny i pro různé typy půdních horizontů, které se v lokalitě nacházely, přičemž nejvýraznějších změn doznal Ah svrchní horizont, jehož mocnost dosahuje přibližně 0,1 m do hloubky. Z tohoto obrázku (Ah půdní horizont) je evidentní nárůst hodnot objemové hmotnosti z původních 0, 94 g/cm³ před pojezdem na novou hodnotu 1, 62 g/cm³, která se v období po půl roce zvýšila na hodnotu 1, 96 g/cm³. Měření v tomto horizontu dále zaznamenalo pokles hodnot pórovitosti a provzdušněnosti, což negativně ovlivňuje infiltrační schopnosti půdy. Půdní horizonty El a Bt jsou zhutněním ovlivněny zanedbatelně.

	Month of the field investigation	Soil horizon	Density (g·cm ⁻³)	Wet bulk density (g·cm ⁻³)	Bulk density (g·cm ⁻³)	Maximum capillary capacity (%)	Porosity (%)	Moisture content by volume (%)	Moisture content by mass (%)	Soil aeration (%)	Minimal air capacity (%)	Relative soil moisture (%)	Relative saturation (%)
Study plot (effect of a travel)	October 07		2.24	0.94	0.74	25.97	67.15	20.07	27.25	47.08	41.18	77.28	29.89
	April 08	Ah	2.55	1.62	1.27	42.54	50.41	35.45	28.02	14.96	7.87	83.33	70.33
	October 08		2.56	1.96	1.59	37.37	37.85	22.74	36.23	1.62	0.48	96.95	95.71
Control plot	October 07		2.24	0.94	0.74	25.97	67.15	20.07	27.25	47.08	41.18	77.28	29.89
	April 08	Ah	2.55	1.54	1.18	40.91	53.59	35.70	30.15	17.89	12.68	87.26	66.62
	October 08		2.55	1.58	1.22	41.86	52.16	29.79	36.36	15.80	10.30	86.86	69.71
Study plot (effect of a travel)	October 07		2.59	1.53	1.30	30.74	49.72	22.24	17.07	27.48	18.98	72.35	44.73
	April 08	El	2.65	1.81	1.49	38.13	43.56	31.49	21.09	12.07	5.43	82.59	72.28
	October 08		2.56	1.83	1.48	38.88	42.10	23.48	34.86	7.24	3.22	89.66	82.81
Control plot	October 07		2.59	1.53	1.30	30.74	49.72	22.24	17.07	27.48	18.98	72.35	44.73
	April 08	El	2.56	1.71	1.35	40.93	47.31	35.91	26.58	11.40	6.38	87.74	75.9
	October 08		2.58	1.82	1.47	38.72	42.81	23.5	34.64	8.17	4.09	89.46	80.92
Study plot (effect of a travel)	October 07		2.79	1.87	1.54	36.74	44.67	32.44	21.05	12.23	7.93	88.30	72.63
	April 08	Bt	2.59	1.88	1.56	35.11	39.92	32.04	20.58	7.88	4.81	91.26	80.26
	October 08		2.54	1.84	1.46	40.06	42.48	26.04	38.01	4.470	2.42	94.88	89.48
Control plot	October 07		2.79	1.87	1.54	36.74	44.67	32.44	21.05	12.23	7.93	88.30	72.63
	April 08	Bt	2.51	1.84	1.49	39.24	40.87	35.29	23.75	5.58	1.63	89.93	86.35
	October 08		2.58	1.92	1.58	36.78	38.64	21.65	34.23	4.41	1.86	93.07	88.58

Obr. č. 4 - změny fyzikálních vlastností, lokalita Babice nad Svitavou - pojezd UKT. (Rejšek & kol. 2011).

Autoři Rejšek & kol. (2011) uvádějí na Obr. č. 5 hodnoty polní nasycené hydraulické vodivosti (v době před pojezdem a v době po pojezdu stroje) pro studijní plochy, na kterých byly realizována měření.

Study plot	Study plot (effect of a travel)			Control plot		
	October 07	April 08	October 08	October 07	April 08	October 08
No. 2 – Babice	1.669	0.034	0.342	0.256	0.642	5.565
No. 3 – Rudice	0.684	0.085	0.684	0.342	8.561	0.171
No. 4 – Rudice	6.849	0.684	1.541	3.082	1.969	4.152

Obr. č. 5 - polní nasycená hydraulická vodivost. (Rejšek & kol. 2011).

Autoři taktéž uvádí, že hodnoty polní nasycené hydraulické vodivosti klesaly na lokalitách č. 3 a č. 4 o jeden řád. Konkrétně klesla hodnota hydraulické vodivosti na lokalitě č. 3 z $0,7 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ na hodnotu $0,09 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. Na lokalitě č. 4 klesla hodnota hydraulické vodivosti z hodnoty $6,9 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ na hodnotu $0,7 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. Na lokalitě č. 2 byl zaznamenán propad z hodnoty $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ až na hodnotu $0,03 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. V bodech, ve kterých probíhalo zhutnění a zároveň měření je podle autorů znatelný výrazný vliv pozměněné struktury půdy na hodnotách nasycené vodivosti. Na lokalitě č. 2 a č. 4 bylo zaznamenáno částečné zlepšení, zatímco hodnoty naměřené hydraulické vodivosti se na lokalitě č. 3 vrátily na původní hodnotu.

V zásadě lze říci, že obě zájmové lokality v Rudici dosahují vyšších hodnot polní nasycené hydraulické vodivosti, což souvisí s nekrasovým půdotvorným substrátem → vodivost těchto půd má snazší tendenci k návratu. (Rejšek & kol. 2011).

Závěrem této studie je prokázání negativních změn (ve všech sledovaných oblastech), způsobených konkrétním strojem na vybrané lokalitě. Podle autorů byly pozorovány v půl roční době tendence k návratu u sledovaných vlastností, oproti tomu parametry jiných veličiny se zhoršovaly. Doporučením této studie bylo kromě jiného pokračovat v této oblasti výzkumu a nalézt společné řešení s odborníky z dotčených oblastí.

4. Materiál a metody

4.1 Zájmová lokalita

Výběru lokality, kde probíhaly experimentální práce, byla věnována značná pozornost. Bylo požadováno území, které splňuje vhodné předpoklady vyplývající ze zadání této práce. Hlavním kritériem bylo vybrat část lesa, ve které v nedávné době docházelo k lesnickým těžebním činnostem prováděných těžkou lesnickou mechanizací. Další požadavky, které se kladly na výběr území, byla sklonitost terénu. Pro stanovený způsob měření infiltrace byl vybrán téměř rovinatý terén s místy mírnými klesáními. Svažité terén je nevhodný pro měření. Při provádění infiltračních pokusů je zapotřebí dostatečné množství vody. Na tomto místě je potřeba podotknout, že pokusná měření probíhala ve zvlášť horkém měsíci srpnu, kdy v lesních vodotečích bylo minimální množství vody. Spoléhat se na dovoz vody z jiných míst by bylo časově i finančně neefektivní. Zájmové území bylo tedy situováno v blízkosti přítoku místní potoka. Aby bylo možno se v lese volně pohybovat a provádět měření, byl zvolen pozemek, který je v majetku České zemědělské univerzity, konkrétně Školního lesního podniku v Kostelci nad Černými lesy. Předností tohoto řešení je poměrně krátká dojezdová vzdálenost na univerzitu do Prahy. Více či méně všechny výše uvedené požadavky lokalita „Jevany“ splňuje. Pohled do zájmové lokality je uvedený na Obr. č. 29 v příloze fotodokumentace.

4.1.1 Geografické umístění

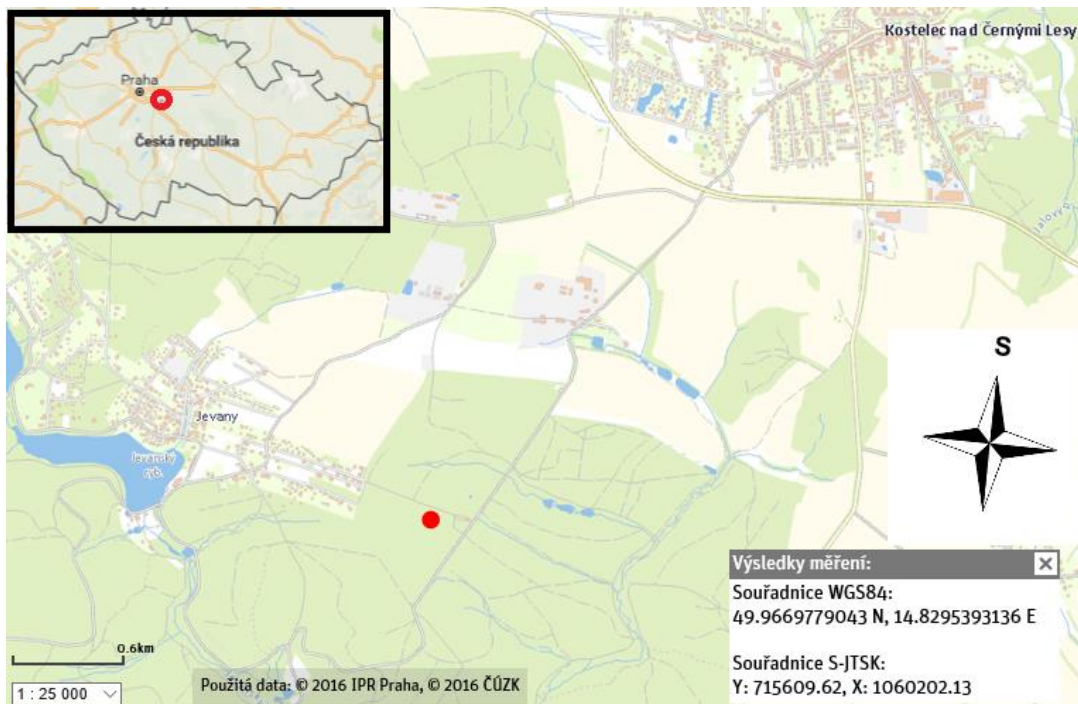
Zájmové území se nachází na východ od Prahy a leží v okrese Praha – východ ve Středočeském kraji. Lokalita měření je situována mezi městem Kostelec nad Č. I. a nedalekou obcí Jevany, se kterou velice úzce sousedí. Katastrálním územím jsou Jevany [659312]. Parcela má celkovou výměru 5 863 m². (ČÚZK, 2017).

Zájmová lokalita leží v nadmořské výšce přibližně 420 m. n. m. Pro upřesnění polohy má obec Jevany udávanou nadmořskou výšku 380 m. n. m., a sousední město Kostelec n. Č. I. leží v nadmořské výšce 391 m. n. m. (<http://www.mapy.cz>, 2017). Obr. č. 6 znázorňuje přesnou souřadnicovou polohu experimentální lokality.

Dle geomorfologického členění České republiky lokalita „Jevany“ leží:

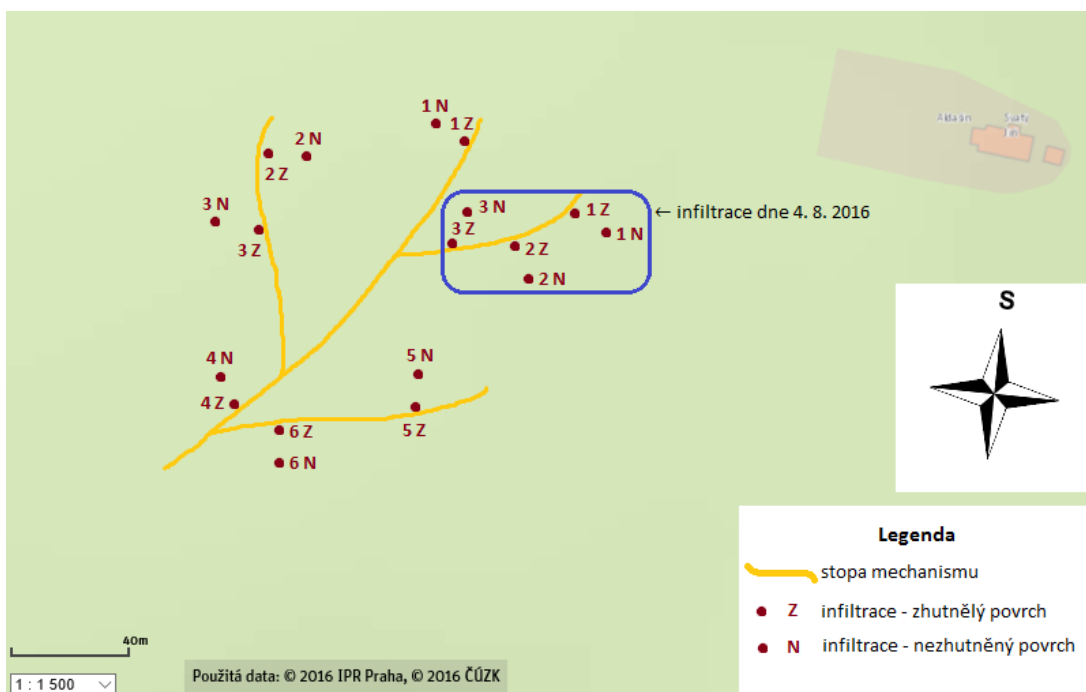
provincie **Česká vysočina** → subprovincie **Česko-moravská** → geomorfologická oblast **Středočeská pahorkatina** → geomorfologický celek **Benešovská pahorkatina** → geomorfologický podcelek **Dobříšská pahorkatina**

Dle biogeografického členění České republiky lokalita „Jevany“ leží:
 provincie **středoevropských listnatých lesů** → **hercynská** podprovincie



Obr. č. 6 - mapový výřez se zobrazenou zájmovou lokalitou.

(IPR, 2016 upraveno autorem).



Obr. č. 7 - rozmístění jednotlivých infiltračních pokusů na lokalitě "Jevany".

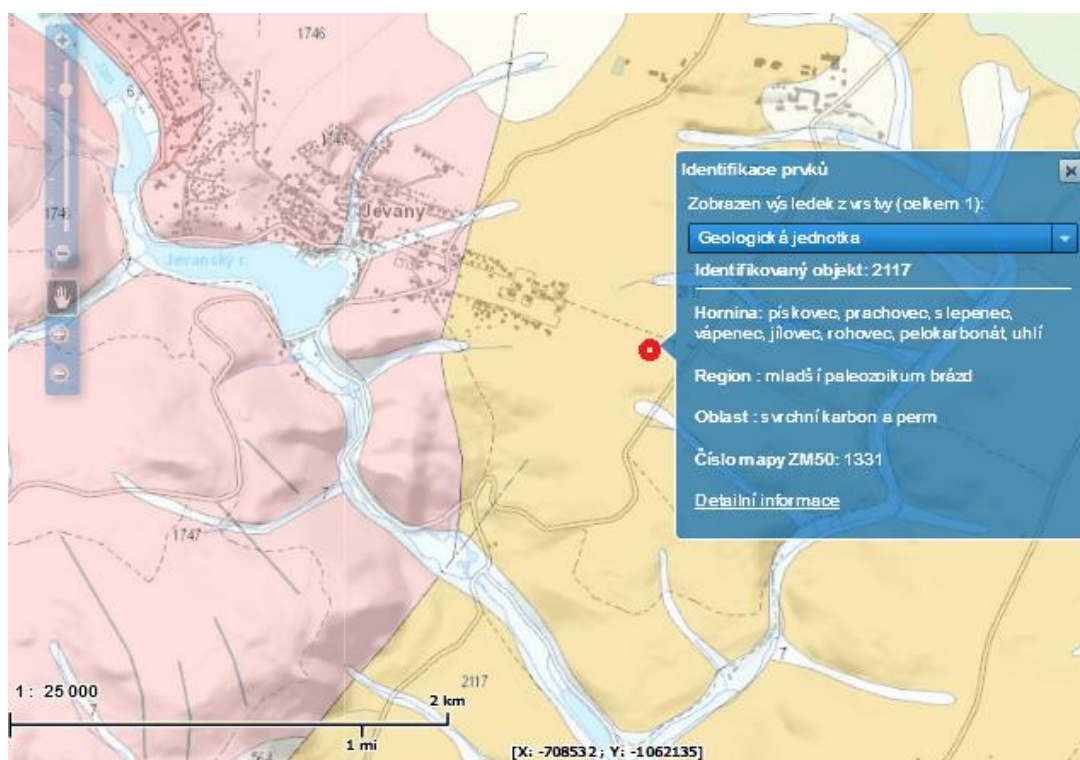
(IPR, 2016 upraveno autorem).

Vysvětlení výše uvedeného obrázku (Obr. č. 7) - místa označená písmeny „Z“ znázorňují zhutnělé plošky a zakreslená místa označená písmeny „N“ představují místa, u kterých nedošlo ke zhutnění povrchu půdy. Žlutá barva vyznačuje stopy v terénu po těžební technice. Na místech uvnitř modrého ohraničení probíhala 1. kampaň infiltrace dne 4. srpna. Místa ležící mimo toto ohraničení označují infiltrace uskutečněné při 2. kampani infiltrace, která proběhla dne 22. srpna.

4.1.2 Geologické poměry lokality

Dle informací zveřejněných na serveru České geologické služby se v této lokalitě nachází typ horniny zpevněný sediment – kaustobiolit³. Horninami jsou zde: pískovec, prachovec, slepenec, vápenec, jílovec, rohovec, pelokarbonát a uhlí. Bližší identifikace prvků je zobrazena na Obr. č. 8, na výřezu z geologické mapy.

Z údajů, které poskytuje geoportál VÚMOP vyplývá, že zranitelnost horninového prostředí je na středně zranitelné úrovni. Vrstva zranitelnosti horninového prostředí vzniká propojením tří vrstev (charakter horninového prostředí, charakter oběhu vod, transmisivita kolektoru).



Obr. č. 8 - výřez lokality "Jevany" z geologické mapy.

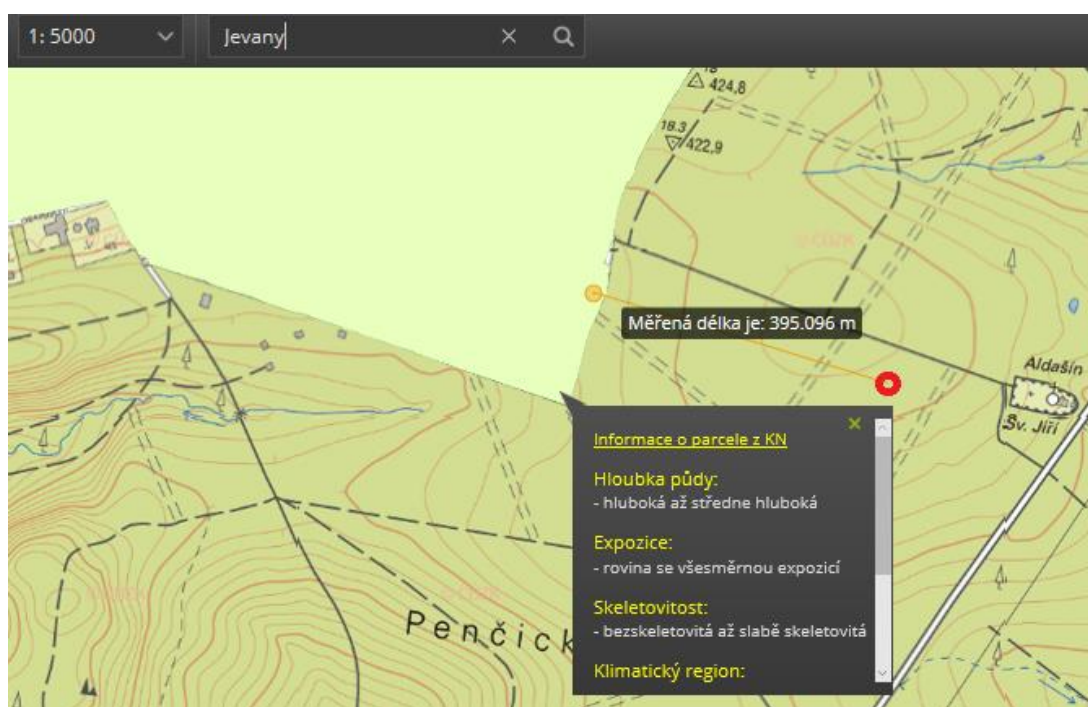
(ČGS, 2017 upraveno autorem).

³ Kaustobiolity jsou sedimenty, které obsahují organické látky. Nejedná se o hlavní složky sedimentů, většinou jen tvoří výplň trhlin a pórů prvotních sedimentů.

4.1.3 Pedologické poměry lokality

Z důvodů, že pro parcelu v zájmové lokalitě není uvedena bonitovaná půdně ekologická jednotka (BPEJ), je BPEJ určena podle nejbližší parcely. Tato parcela je vzdálená přibližně 400 m od zájmové lokality (viz Obr. č. 9).

BPEJ: Expozice – rovina se všesměrnou expozicí; Půdní typ – pseudogleje; Hloubka půdy – hluboká až středně hluboká; Skeletovitost – bezskeletovitá až slabě skeletovitá; Klimatický region – mírně teplý, mírně vlhký; Sklonitost – mírný sklon (3° – 7°); (VÚMOP, 2017).



Obr. č. 9 - výřez z mapového podkladu uvádí nejbližší evidovanou BPEJ. (VÚMOP, 2017 upraveno autorem).

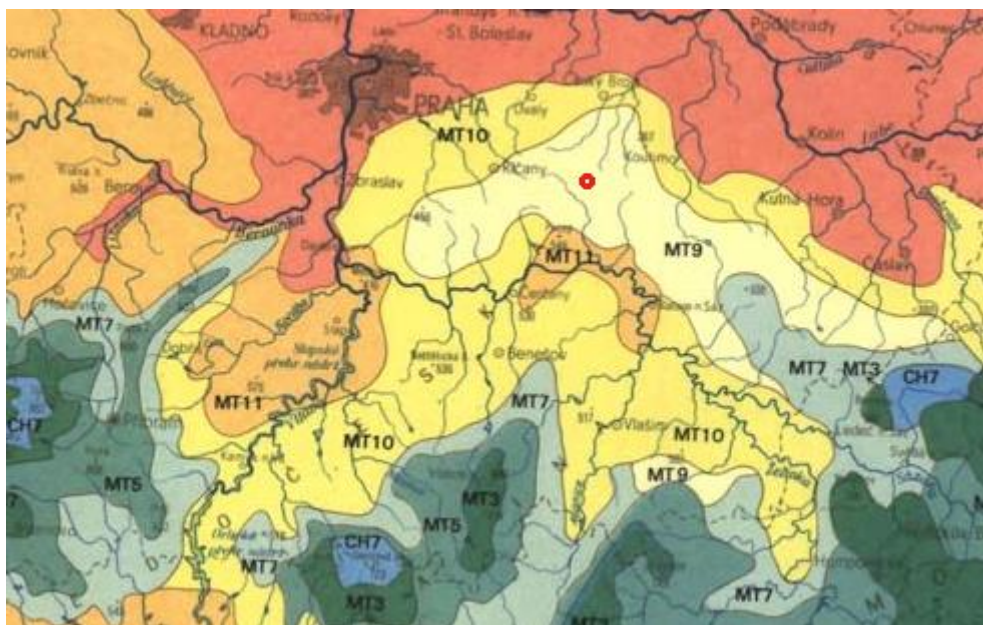
Relativní zranitelnost půd je v zájmové oblasti a v jejím blízkém okolí ohodnocena, jako silně zranitelná. Zranitelnost půd je brána ve vztahu k infiltračním procesům. (VÚMOP, 2017).

4.1.4 Klimatické poměry lokality

Statisticky zpracovaná studie klimatických poměrů v České republice je dle Quitta (1971) zobrazena na mapě Klimatických regionů ČR. Z této mapy je patrné situování zájmové lokality téměř na rozhraní dvou klimatických oblastí. Zájmová oblast náleží do skupiny MT 9 představující mírně teplou a mírně vlhkou klimatickou oblast. Od sousední, velmi blízké oblasti MT 10 se liší nepatrně.

V podstatě se jedná jen o rozdíly v průměrných teplotách, srážkových úhrnech a v počtu dní se sněhovou pokrývkou.

Situaci vystihuje níže uvedený výřez z Klimatické mapy ČR a k ní přiložená klimatická charakteristika oblastí (Obr. č. 11).



Obr. č. 10 - výřez z mapy Klimatických regionů ČR.

(Quitt, 2017 upraveno autorem).

<i>Klimatická charakteristika mírně teplé oblasti</i>	MT9	MT10
Počet letních dní	40 - 50	40 - 50
Počet dní s prům.teplotou 10°C a více	140 - 160	140 - 160
Počet dní s mrazem	110 - 130	110 - 130
Počet ledových dní	30 - 40	30 - 40
Průměrná lednová teplota	-3 - -4	-2 - -3
Průměrná červencová teplota	17 - 18	17 - 18
Průměrná dubnová teplota	6 - 7	7 - 8
Průměrná říjnová teplota	7 - 8	7 - 8
Prům.počet dní se srážkami 1 mm a více	100 - 120	100 - 120
Suma srážek ve vegetačním období	400 - 450	400 - 450
Suma srážek v zimním období	250 - 300	200 - 250
Počet dní se sněhovou pokrývkou	60 - 80	50 - 60
Počet zatažených dní	120 - 150	120 - 150
Počet jasných dní	40 - 50	40 - 50

Obr. č. 11 - klimatická charakteristika mírně teplé oblasti MT 9.

(AOPK, 2017, upraveno autorem).

4.1.5 Hydrologické poměry lokality

V bezprostřední blízkosti lokality, kde měření infiltrací probíhalo, se nenachází žádná větší vodoteč. V širším okolí se situace mění a tato oblast je z hydrologického hlediska na vodu dobře bohatá. V okolí zájmového území se nacházejí bezejmenné vodoteče, které jsou přítoky místních toků. Na severní straně od místa experimentu se nachází bezejmenný přítok vodoteče Bohumilský potok. Z jižní strany jsou minimálně další tři přítoky, které ústí do tohoto toku. Všechny výše jmenované toky, včetně vodoteče Bohumilského potoku jsou ve správě Lesů ČR.

Pod zájmovou oblastí, tj. na jihozápadní straně se nachází dva bezejmenné přítoky ústící do Jevanského potoka. Tyto vodoteče, včetně Jevanského potoka jsou ve správě státního podniku Povodí Vltavy. Vodoteč Bohumilský potok vtéká za obcí Jevany do Jevanského potoka a tvoří tak jeden tok. Jevanský potok se u obce Stříbrná Skalice vlévá do řeky Sázavy. Celá oblast patří pod správu povodí Dolní Vltavy.

Na níže uvedeném výřezu z hydrologické mapy (Obr. č. 12) jsou barevně znázorněny vodoteče. V pravé části se nachází Bohumilský potok a jeho přítoky. Barevné schéma znázorňuje rozdílné správce toků (viz legenda). V levé části je znázorněn Jevanský potok.



Obr. č. 12 - výřez z mapy Vodního hospodářství a ochrany vod.
(HEIS VÚV, 2017 upraveno autorem).

Zranitelnost podzemních vod je v této lokalitě hodnocena, jako středně zranitelná. Syntetická mapa zranitelnosti podzemních vod (SMZPV) je dána propojením tří vrstev (zranitelnost půdy, zranitelnost horninového prostředí, dotace podzemních vod). (VÚMOP, 2017).

4.2 Měření infiltrace a souvisejících půdních vlastností

V zájmové lokalitě (pozemek určený k plnění funkcí lesa - PUPFL), probíhala v předchozích měsících těžba dříví pomocí těžké lesnické vyklizovací techniky, přičemž poslední pojezdy strojů proběhly přibližně 2 měsíce před měřením infiltrace. Samotné infiltrace musely být provedeny před následnou rekultivací povrchu půdy, aby se zabránilo zkreslení výsledků měření.

Vzhledem k časovým možnostem bylo přistoupeno k variantě, kdy bylo měření rozloženo do dvou jednodenních kampaní v měsíci srpnu.

V pořadí první měření proběhlo dne 4. 8. 2016. Tento den bylo provedeno celkem 6 infiltračních pokusů, z tohoto počtu byly 3 měření uskutečněny na mechanicky zhutněné půdě a zbylé 3 pokusy na nezhutněné půdě. Schématické rozložení experimentů přibližuje Obr. č. 7. Pro časovou náročnost (měření infiltrací na zhutněném povrchu půdy) nemohlo být v tento den dosaženo většího počtu experimentů.

Během druhé kampaně měření infiltrací, které proběhlo dne 22. 8. 2016, bylo provedeno celkem 12 měření. Jednalo se o 6 měření infiltrací na zhutněné půdě a o 6 infiltrací na půdě, která nebyla pojezdem mechanismu zhutněná. Infiltrační měření byly v tento den zahájeny v ranních hodinách a skončeny byly ve večerních hodinách, což znamenalo dosažení vyššího množství jednotlivých experimentů. V pořadí druhá kampaň měření je taktéž, jako ta první znázorněna na Obr. č. 7.

Během obou termínů měření panovalo podobné, bezdeštné a slunečné počasí, s teplotami v průměru okolo 25°C.

Metoda jednoválcového infiltrometru

Původně bylo zamýšleno provést infiltrační pokusy pomocí metody simulace dešťové srážky zařízením, které se nazývá dešťový simulátor. Na základě konzultace a doporučení pedagogů z Katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování České zemědělské univerzity bylo od této metody dešťového simulátoru pro svoji náročnost upuštěno. Z tohoto důvodu byla zvolena vhodnější a v terénu jednodušeji proveditelná metoda měření infiltrace vsakovacími válci, neboli metoda jednoválcového infiltrometru.

Měření principiálně vycházelo nejprve z osazením infiltrometru do povrchu půdy, který byl vystavený destrukčním vlivům těžební techniky, tj. byl zhutněný. V blízkosti instalovaného infiltrometru byl proveden odběr půdních vzorků (určení objemové půdní vlhkosti a objemové hmotnosti), poté bylo provedeno vlastní měření infiltrační rychlosti výtopovou metodou na zhutněné půdě.

V odpovídající vzdálenosti (cca 3 m) od zhutněného místa, bylo vyhledáno místo, které nebylo vystaveno účinkům těžebního mechanismu, tj. nebylo mechanicky zhutněno, ale zároveň nebylo od zhutněného místa příliš vzdálené. Na nezhutněném povrchu byl instalován infiltrometr a následně v jeho blízkosti proběhl odběr půdních vzorků, jako v případě zhutněného povrchu. Poté proběhlo vlastní měření rychlosti infiltrace výtopou.

Ve dnech 4. 8. a 22. 8. 2016 bylo realizováno celkem 18 měření, z toho byla polovina měření provedena na nezhutněném povrchu a polovina na zhutněném povrchu půdy.

4.2.1 Pomůcky a příslušenství

Pro realizaci infiltračních měření metodou výtopy bylo využito jednoho válce o průměru 30 cm (druhý, vnější válec nebyl při měřeních použit). Nezbytnou součástí infiltrační soupravy je ocelový hřebínek se systémem svisele odstupňovaných hrotů, sloužící k odečtu poklesu sledované hladiny. Měřicí systém je proti usazování a zanášení nečistoty v okolí měřících hrotů během infiltrace chráněn sítkou. K usazení infiltračního válce použila obsluha litinový kříž, přes který palicí válec na požadovanou úroveň do půdy zapravila. Zapuštění válce lze provést i šetrnějším způsobem pomocí hydraulického zvedáku a speciální konstrukce. Při experimentu je nezbytné, aby měřicí stupnice byla ve vodorovné poloze, součástí vybavy je vodováha.

Dalšími nepostradatelnými součástmi jsou zásobní kanystry na vodu, kalibrované nádoby různých objemů, teploměr, stopky, plochý rýč, nůž, nůžky, metr, záznamové archy a psací potřeby. Následující obrázky č. 13 a Obr. č. 14 vyobrazují pomůcky a příslušenství nezbytná k provedení měření.



Obr. č. 13 - nezbytné pomůcky a příslušenství pro měření infiltrace. (Redl, 2016).
 Obr. č. 14 - před začátkem infiltrace. (Redl, 2016).

4.2.2 Přípravné práce

Přípravné práce začínaly před každým experimentem obdobným způsobem. Nejprve bylo nalezeno vhodné místo pro usazení válce. V pořadí první měření bylo provedeno vždy nejprve na ztuhlém povrchu. Místo usazení infiltračního válce bylo zvoleno přímo ve stopě těžebního mechanismu. Vybrán byl úsek s viditelným ztuhnutím (otisk vzorku pneumatiky), který dále nesměl být v těsné blízkosti stojaté vody (louže). Na místo měření byly dopraveny všechny potřebné pomůcky, včetně barelů s vodou. Původně bylo zamýšleno odebírat vodu pro účely měření z nedaleké bezejmenné vodoteče, přičemž při místním šetření bylo zjištěno, že během horkého léta se v tomto toku nenachází téměř žádná použitelná voda. Náhradním řešením byl odběr vody z nedaleké studny místního hřbitova, která byla dobře dostupná a zajistila tak pro účely měření kvalitnější vodu, nežli by byla voda ze zmíněné vysychající vodoteče.

Samotnému zapuštění válce do půdy předcházela zjevná kontrola, zdali se v tomto profilu nenachází velké kořeny nebo půdní výdutě. Vedení kořenů půdou by mohlo znemožnit zapuštění válce, nebo dokonce válec při zatlačování poškodit. Zjevně rozrušený povrch by mohl vést k netěsnostem a nechtěné ztrátě vody při měření. Obdobná situace nastala v případě měření na neztuhnutém povrchu, kdy celý proces instalace a měření musel být zopakován na vhodnějším místě. V případě měření na neztuhnutém povrchu byl pro snazší odečet z měřícího systému přiměřeně sestřihán travní porost. Sestřihávání bylo provedeno opatrně, aby nedocházelo k vytrhávání rostlin ze země a tím k narušení povrchu půdy. Na místa určená k měření nebylo vstupováno, aby vlivem sešlapu nedocházelo k deformacím půdní struktury a ke zkreslení hodnot měření. Před zapuštěním válce

byl povrch půdy okolo válce obřezán, a válec se tak mohl rovnoměrně zapustit do půdy. V případě, že nůž při pronikání půdou kladl odpor, bylo místo zapouštění posunuto.

Infiltrační válec byl zapuštěn pomocí litinového kříže a gumové palice naplněné ocelovými kuličkami. Během zatlučení stál pomocník na litinovém kříži, aby kříž úderu palice nesklouzával z válce a nedocházelo k poškození kříže i samotného válce. Zatlučení bylo provedeno do úrovně 6 centimetrů. Po zatlučení válce proběhla vizuální kontrola na těsnosti mezi půdou a infiltračním válcem, přičemž místa kudy by voda mohla protékat, byla dotěsněna. Přípravná fáze je uvedena v příloze fotodokumentace na obrázcích č. 30, č. 31, č. 32 a č. 33.

V závěru instalace byl na válec umístěn mechanismus, který drží měřicí hřebínek a současně nastavuje výšku tohoto hřebínku. Měřicí hřebínek musí být ve vodorovné poloze - k tomu slouží aretační šrouby na mechanismu, který hřebínek drží. Vodorovná poloha byla kontrolována pomocí vodováhy. Výška hrotu od povrchu půdy by neměla být příliš velká, ideálně se doporučuje mezi 2 – 3 cm.

4.2.3 Odběr půdních vzorků

Pomocí odebraného půdního vzorku lze určit základní fyzikální charakteristiky půdy. Pro potřeby měření je vhodné stanovit *objemovou vlhkost* [%] a *objemovou hmotnost* [g/cm³] na nezhutněných a zhutněných půdách, následně tyto hodnoty porovnat.

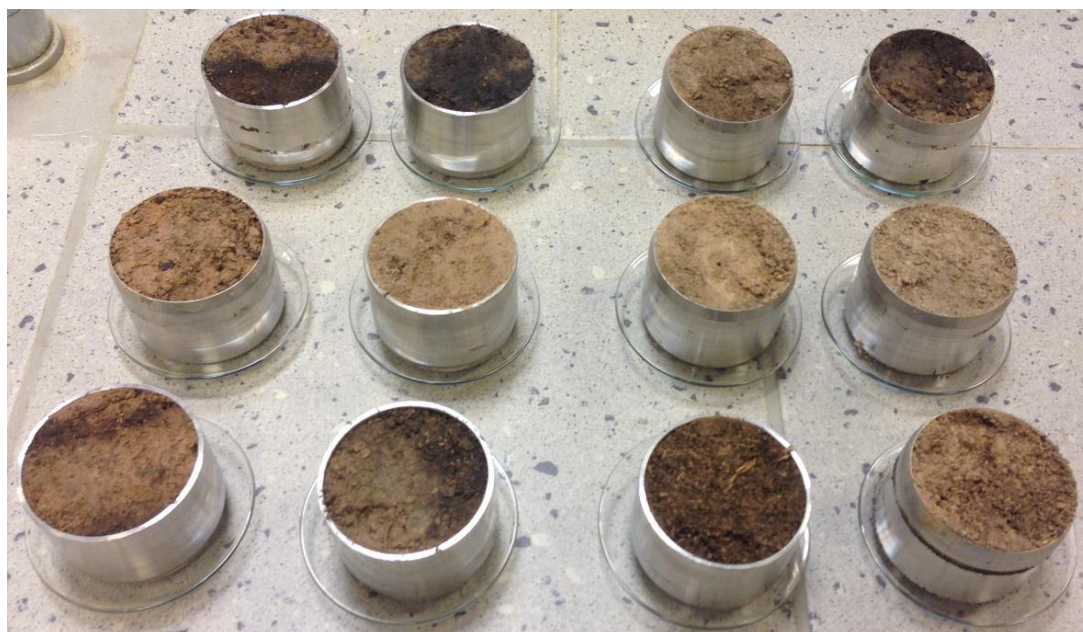
Pro odběry půdních vzorků posloužily speciální kovové válečky (tzv. Kopeckého válečky) z nerez oceli o objemu 100 cm³. Vzorky byly odebrány na všech místech, kde probíhaly měření infiltrace. V konkrétním případě byly odebrány 2 vzorky (2 válečky) v přiměřené vzdálenosti od již zapuštěného infiltračního válce (před začátkem infiltrace). Odběr vzorků nesměl být proveden v bezprostřední blízkosti válce, aby nedošlo k porušení půdy a tedy k negativnímu ovlivnění infiltrační charakteristiky. Vzdálenost místa odběru vzorku od válce byla přibližně mezi 60 – 80 cm.

Nejprve byly lopatkou odstraněny svrchní vrstvy tzv. hrabanky (8 – 10 cm). Na takto připravený povrch byl přiložen odběrný váleček usazený do hlavy, do které několika ranami gumovou palicí došlo k zatlačení válečku do půdy. K vyjmutí válečku s odebraným vzorkem posloužila opět plochá lopatka. Vyjmutí muselo probíhat opatrně, aby nebyl půdní vzorek z válečku vysypán nebo naopak aby nedošlo k utužení půdy uvnitř válečku. Vzorek půdy po odběru je uvedený na obrázku č. 34 v příloze fotodokumentace. Půda v lese byla během odběrů vzorků

poměrně vysušená a sypká, proto se často nedařilo odebrat vzorek v uspokojivém stavu, což si vynutilo opakování odběrů. Po vytažení byl vzorek očištěn, případné nadbytečné množství půdy bylo plochým nožem odstraněno a vzorek byl plastovými zátkami uzavřen. Před uložením vzorku do kufru byly do přiloženého měřicího formuláře zapsány příslušná čísla válečků.

Vzorky byly v nejbližších hodinách převezeny do univerzitní laboratoře, kde nejprve probíhalo jejich vážení a poté při teplotě 105°C proběhlo v automatické sušárně jejich sušení. Vysušené vzorky se pak znovu vážily a následně se počítala jejich objemová vlhkost a objemová hmotnost. Tabulka s přehledem odebraných vzorků a určenou objemovou vlhkostí a objemovou hmotností je uvedena v kapitole 5. Výsledky měření.

Na níže uvedeném obrázku je vidět přehled odebraných vzorků ze dne 4. 8. 2016. Zajímavostí je rozdílná barva půdy v jednotlivých vzorcích, která je způsobena různým poměrem organických látek v odebrané zemině. Obrázky č. 37 a č. 38 (příloha fotodokumentace) zobrazují tentýž půdní vzorek č. 52 (nezhutněná půda) před vysušením a po vysušení.



Obr. č. 15 - již vysušené vzorky z odběru uskutečněného dne 4. 8. 2016.
(Redl, 2016).

4.2.4 Postup při měření

Je-li infiltrační zařízení správně osazeno (odpovídající hloubka, měřící systém ve vodorovné poloze, okolí válce dotěsněno) a byl proveden odběr půdních vzorků, zbývalo dopravit na lokalitu zásobní nádoby s dostatečným množstvím vody potřebné k provedení infiltrace.

Do přiloženého formuláře (Pavlásek & Jačka, 2014) určeného pro potřeby měření byly kromě časových průběhů infiltrace zapisovány nejrůznější údaje - popis vegetačního pokryvu a stavu půdního povrchu na místě experimentu, průměr infiltračního válce a hloubka jeho zapuštění do půdy, souřadnice lokality, čísla válečků s odebraným vzorkem půdy, teplota dolévané vody, teplota vzduchu a aktuální počasí. Tento formulář je dále uzpůsobený pro zapisování jednotlivých stupňů měřících hrotů a k nim příslušným časovým údajům.

Úspěšná realizace měření infiltrace touto metodou je proveditelná v minimálním počtu dvou pracovníků. Z tohoto důvodu se měření účastnili právě dva pracovníci, z čehož jeden pracovník prováděl dolévání vody do infiltračního válce (zároveň hlásil údaje o aktuální hladině u jednotlivých měrných hrotů) a druhý pracovník tyto údaje zaznamenával do měřícího formuláře a obsluhoval časomíru.

Vlastní měření infiltrace začíná stiskem časomíry a současným opatrným naléváním vody na vybranou úroveň měrného hrotu. Nalévání musí probíhat opatrně, aby jednak nedošlo k vylití vody z nádoby mimo infiltrační válec, ale také nesmí dojít k znečištění prostoru mezi ochrannou sítí a měrnými hroty. Povrch půdy je v lesním prostředí tvořený především hrabankou, která při nalévání vody plave na hladině (mohlo by dojít ke znečištění měrných hrotů). Voda se do infiltračního válce nalévá z větší kalibrované nádoby známého objemu. Nalítý objem z této nádoby je zaznamenán do formuláře. Během prvních vteřin hladina vody ve válci klesá rychleji, z tohoto důvodu obsluha hlásí pouze čísla těchto hrotů. Pracovník provádějící zápis do formuláře zapisuje čísla těchto hrotů a k nim příslušný časový údaj. Rychlý pokles hladiny byl při měření infiltrace typický pro nezhutněné plochy, na kterých byl tento pokles enormní. V okamžiku, kdy došlo ke zpomalení infiltrační rychlosti, vybral pracovník jeden konkrétní hrot, který nahlásil spolu s časem odtržení vodní hladiny od tohoto hrotu. Při odtržení hladiny od tohoto „referenčního hrotu“ doléval adekvátní množství vody, které taktéž nahlásil. Střídavě tedy obsluha hlásila časy dolévání vždy stejného množství vody a okamžiky odtržení vodní hladiny od tohoto příslušného hrotu. Pracovník obsluhující časomíru tyto časové údaje zapisoval do formuláře. Tento postup probíhal až do okamžiku, kdy byl přibližně stejný časový úsek mezi jednotlivými dolitími. Infiltrační rychlost

se mění v průběhu času v závislosti na nasycení půdního prostředí vodou. Jakmile došlo k ustálení infiltrační rychlosti, byla na několika místech v infiltračním válci změřena hloubka výtopy, tj. hloubka od půdního povrchu po hladinu – tyto hodnoty byly zapsány a zprůměrovány. Závěrečná fáze infiltrace je znázorněna na Obr. č. 16.



Obr. č. 16 - na závěr měření infiltrace je potřeba změřit průměrnou hloubku výtopy ve válci. (Redl, 2016).

Z výše uvedeného obrázku je patrný nesporný význam ochranné sítky během měření na lesních půdách. Na obrázcích č. 35 a č. 36 (příloha fotodokumentace) je uveden průběh infiltrace na nezhutněné půdě.

Po skončení infiltrací byly jednotlivé záznamové archy zkontrolovány a následně z nich byla data přepsána do elektronické podoby, aby mohla být dále zpracována. Program použitý pro zpracování dat byl MS Excel 2010. V tomto programu byly zvláště v jednotlivých záložkách zpracovány všechny měřené infiltrace (celkem 18 měření). Z každého měření bylo zvláště výstupem grafické znázornění kumulativní infiltrace za určitý čas a grafické znázornění infiltrační rychlosti. V kapitole 5. *Výsledky měření* je uvedeno porovnání infiltrované vody do půdy během jedné minuty. Odebrané půdní vzorky byly taktéž přepsány do elektronické podoby a vyhodnoceny v programu MS Excel 2010. Pro jednotlivé dny, kdy byly vzorky odebrány (4. 8. a 22. 8. 2016) byly spočítané průměrné hodnoty vztahující se k objemové vlhkost půdy a objemové hmotnosti půdy.

4.3 Zpracování a analýza dat

4.3.1 Kumulativní infiltrace a infiltrační rychlost

Z naměřených celkových hodnot kumulativní infiltrace a infiltrační rychlosti byla sestavena základní popisná statistika. V této statistice jsou zahrnuty průměrné hodnoty, směrodatná odchylka a koeficient variace zkoumaných veličin, zvláště rozdělených pro infiltrace na zhutněném a nezhutněném povrchu. Odděleně jsou vypočteny také hodnoty předmětných veličin pro oba dva termíny měření. Kromě tabulkového zobrazení jsou průměrné hodnoty a hodnoty kumulativní infiltrace z jednotlivých měření vyjádřeny též graficky.

K výše popsanému vyjádření měřených veličin jsou hodnoty kumulativní infiltrace vypočteny také v čase 1. minuty. Tabulkovými údaji jsou vypočtené průměrné hodnoty, směrodatná odchylka a koeficient variace v jednotlivých infiltračních skupinách. Graficky jsou vyjádřeny hodnoty průměrné kumulativní infiltrace v 1. minutě na zhutněných a nezhutněných půdách, ale i hodnoty kumulativní infiltrace za stejné časové období pro jednotlivá měření.

Pro vypočtení hodnot a vytvoření grafických průběhů kumulativní infiltrace a infiltrační rychlosti bylo využito programu Excel 2010.

4.3.2 Vyhodnocení půdních vzorků

Odebrané půdní vzorky se podrobily laboratornímu vážení dvakrát. Nejprve proběhlo vážení vzorků přímo po odběru a poté byly vzorky váženy po vysušení, přičemž naměřené hodnoty byly zapsány do předem vytvořené tabulky v programu Excel 2010. U jednotlivých vzorků byly z naměřených hodnot vypočteny hodnoty objemové vlhkosti a objemové hmotnosti, kdy tyto veličiny jsou současně vyjádřeny i v průměrných hodnotách pro zhutněné a nezhutněné vzorky. Kromě průměrných hodnot obsahuje tabulkové vyjádření hodnoty směrodatné odchylky a koeficientu variace vztahující se k hodnotám objemové hmotnosti a objemové vlhkosti.

5. Výsledky měření

5.1 Terénní měření 4. 8. 2016

Během první kampaně měření infiltrace proběhlo celkem 6 experimentálních měření, přičemž 3 pokusy byly realizovány na nezhutněných půdách a 3 pokusy se uskutečnily na půdách zhutněných (rozmístění viz Obr. č. 7).

Tab. č. 6 uvádí jednotlivé pořadí experimentů na nezhutněných půdách a k nim příslušné naměřené hodnoty. Údaj v prvním sloupci t_{celk} představuje celkový čas trvání měření v sekundách, druhý sloupec I_{celk} označuje celkovou hodnotu kumulativní infiltrace v délkových jednotkách mm. V posledním sloupci této tabulky označený i_{celk} je uvedena příslušná hodnota ustálené infiltrační rychlosti v jednotkách mm/s. V řádku pod jednotlivými experimenty jsou spočítány průměrné hodnoty z výše uvedených ukazatelů.

Údaje v Tab. č. 7 přísluší naměřeným hodnotám na zhutněných půdách. Jsou zde, jako v předešlé tabulce uvedeny jednotlivé infiltrační pokusy a jejich pořadí (označeny Z1 až Z3), hodnoty celkového trvání infiltrace, hodnoty celkové kumulativní infiltrace a hodnoty ustálené infiltrační rychlosti.

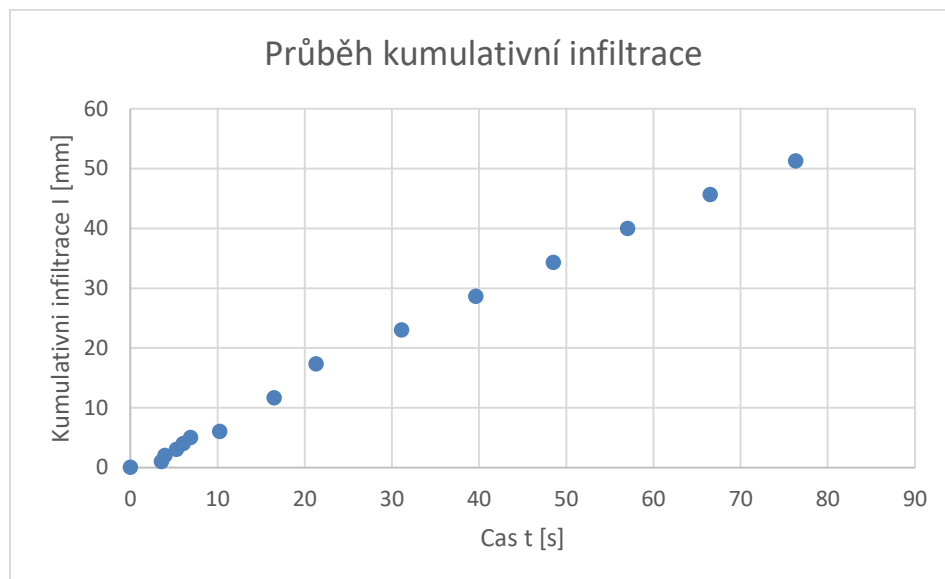
Z Tab. č. 6 je na první pohled zřejmé, že u měření N1_2 dosáhla kumulativní infiltrace nejvyšších hodnot za celou dobu měření. Oproti tomu „sousední“ infiltrace Z1_2 (Tab. č. 7) dosáhla hodnoty kumulativní infiltrace na zhutněné půdě řádově nižších hodnot. Zhutněný povrch u měření Z1_2 nedosahoval podobných parametrů, jako v případě dalších dvou měření provedených v tento den na zhutněné půdě. Z důvodu nedostatečného zhutnění půdy dosahovala kumulativní infiltrace při tomto měření výrazně vyšších hodnot. Průběhy kumulativních infiltrací měření N1_2 a měření Z1_2 jsou uvedeny na obrázcích Obr. č. 17 a Obr. č. 18.

Nezhutněná půda - 4. 8. 2016			
pořadí experimentů	t_{celk} [s]	I_{celk} [mm]	i_{celk} [mm/s]
N1_1	99,41	18,08607	0,193987
N1_2	76,35	51,27074	0,612421
N1_3	74,72	34,70892	0,466535
průměr	83,49	34,69	0,42
směrodatná odchylka	13,81	16,59	0,21
koeficient variace	0,17	0,48	0,50

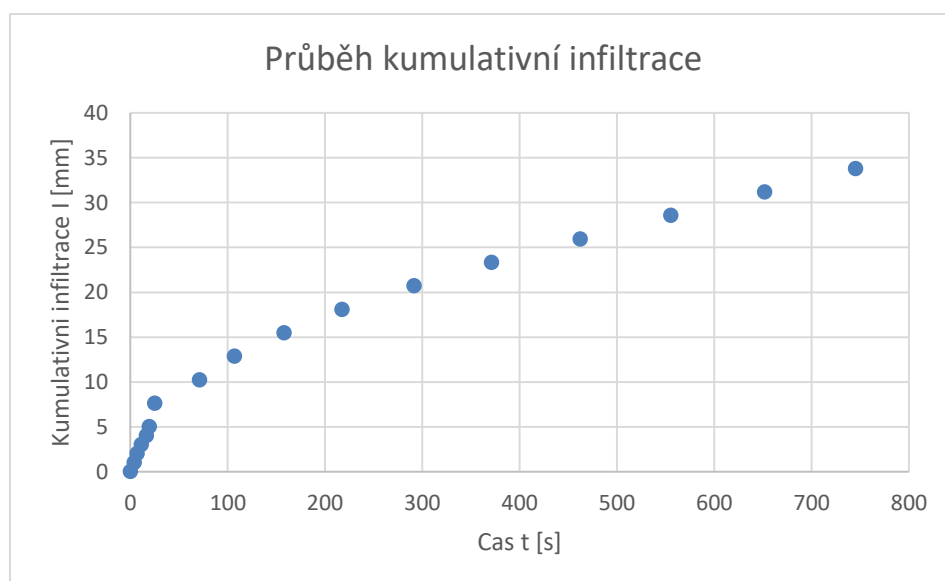
Tab. č. 6 - infiltrační pokusy konané dne 4. 8. 2016 na nezhutněném lesním povrchu, celkové hodnoty. (Redl, 2016).

Zhutněná půda - 4. 8. 2016			
pořadí experimentů	t_{celk} [s]	l_{celk} [mm]	i_{celk} [mm/s]
Z1_1	4793,09	6,82942	0,001425
Z1_2	745,26	33,78936	0,027761
Z1_3	5913,03	4,29183	0,000580
průměr	3817,13	14,97	0,01
směrodatná odchylka	2718,61	16,35	0,02
koeficient variace	0,71	1,09	1,56

Tab. č. 7 - infiltrační pokusy konané dne 4. 8. 2016 na zhutněných půdách, celkové hodnoty. (Redl, 2016).



Obr. č. 17- N1_2, kumulativní infiltrace na nezhutněné půdě. (Redl, 2016).



Obr. č. 18 - Z1_2, kumulativní infiltrace na zhutněné půdě. (Redl, 2016).

Z výše uvedených grafických průběhů (N1_2 a Z1_2) je zřejmé, že míra zhutnění se odráží nejen na časovém průběhu infiltrace, ale také i na množství infiltrované vody do půdy. Větší množství infiltrované vody v případě pokusu N1_2 na nezhutněném povrchu může znamenat uplatnění preferenčních cest, různých výdutí v půdě, kudy voda mohla proudit.

Z odebraného vzorku půdy byla zjištěna nejen struktura půdy v místě měření, ale také důležité ukazatele zhutnění, jako je objemová vlhkost půdy a objemová hmotnost půdy. Tyto a další veličiny jsou uvedeny v Tab. č. 8, kdy jednotlivý řádek tabulky odpovídá příslušnému vzorku půdy označeným číslem válečku. Ve sloupci „vzorky z totožné lokality“ je uvedena číselně a barevně dvojice válečků odebraných ze stejné lokality.

Z výsledných hodnot je na první pohled zřejmé, že vzorky odebrané na nezhutněné půdě mají výrazně nižší objemovou vlhkost (obsah vody ve struktuře půdy), nežli vzorky, které byly odebrány na zhutněné půdě. Zjištěná objemová hmotnost „Z“ vzorků je vyšší, než u odebraných vzorků z nezhutněné lokality. V Tab. č. 9 jsou hodnoty objemové vlhkosti a objemové hmotnosti uvedeny v průměrných hodnotách. Za povšimnutí stojí téměř dvojnásobná průměrná hodnota objemové vlhkosti, které dosahují zhutněné půdy.

č. válečku	hmotnost odebraného válečku (vč. víček a válečku) [g]	hmotnost 2 víček [g]	hmotnost sklíčka [g]	hmotnost válečku se sklíčky, bez víček, s odebranou zeminou [g]	hmotnost válečku [g]	hmotnost válečku se sklíčky, bez víček, s odebranou zeminou po vysušení [g]	objemová vlhkost [%]	objemová hmotnost [g/cm ³]	zhutněno/nezhutněno	vzorky z totožné lokality
52	180,2	15,9	21,3	185,6	109,8	163,04	22,56	0,319	N	3
55	240,5	15,9	20,1	246,5	107,4	231,53	14,97	1,040	N	1
64	238,2	16,1	20,2	242,3	111,4	224,84	17,46	0,932	N	2
57	209,4	16	21,4	214,7	110,8	197,58	17,12	0,654	N	1
63	233,6	16	21,3	238,8	108,8	222,19	16,61	0,921	N	3
69	247,2	16,1	21,3	252,4	110,7	237,69	14,71	1,057	N	2
65	296,1	16	21,3	301,3	110,2	266,47	34,83	1,350	Z	3
59	265,6	16	21,2	270,8	107,5	251,74	19,06	1,230	Z	1
61	295,7	15,9	19,9	299,8	109,8	255,3	44,50	1,256	Z	1
54	298,3	15,8	20,1	302,6	107,9	266,52	36,08	1,385	Z	3
70	286,6	16	21,3	292	110,4	259,96	32,04	1,283	Z	2
72	207,9	15,9	20,2	212,2	109,1	178,36	33,84	0,491	Z	2

Tab. č. 8 - přehled odebraných vzorků půdy ze dne 4. 8. 2016. (Redl, 2016).

	objemová vlhkost [%]	objemová hmotnost [g/cm ³]
průměr N (nezhutněné půdy)	17,24	0,82
směrodatná odchylka N	2,84	0,28
koeficient variace	0,16	0,35
průměr Z (zhutněné půdy)	33,39	1,17
směrodatná odchylka	8,25	0,34
koeficient variace	0,25	0,29

Tab. č. 9 - průměrné hodnoty objemové vlhkosti a objemové hmotnosti odebraných vzorků půdy ze dne 4. 8. 2016. (Redl, 2016).

5.2 Terénní měření 22. 8. 2016

V průběhu druhé kampaně měření infiltrace vody na lesních půdách bylo uskutečněno celkem dvanáct experimentálních měření, z nichž polovina měření byla uskutečněna na nezhutněných půdách a polovina měření na půdách zhutněných. Tato kampaň a přesná lokalizace infiltračních experimentů je zakreslena na Obr. č. 7 (obě kampaně jsou od sebe znatelně rozlišeny). Stanovené značení nezhutněných a zhutněných ploch bylo i v tomto druhém případě dodrženo. Vzhledem ke skutečnosti, že bylo použito k popisu druhého termínu měření stejných tabulek, které rovněž obsahující stejné měřené veličiny, nebude vysvětlení k těmto tabulkám v této kapitole již podrobněji rozebíráno.

Z níže uvedené Tab. č. 10 vyplývá, že nejvyšší hodnota celkové kumulativní infiltrace byla dosažena během krátkého času při prvním měření v pořadí N2_1, na nezhutněném povrchu. Kumulativní infiltrace na zhutněném povrchu podle údajů z Tab. č. 11 byla změřena (taktéž během krátké doby) u měření Z2_1 (sousední infiltrace).

Nejméně vody se do půdy infiltrovalo při měření N2_4 na nezhutněné půdě (Tab. č. 10) a při měření na zhutněné půdě Z2_4 (Tab. č. 11), které trvalo po nejdelší čas.

Nezhutněná půda - 22. 8. 2016			
pořadí experimentů	t_{celk} [s]	l_{celk} [mm]	i_{celk} [mm/s]
N2_1	87,88	54,92958	0,591212
N2_2	72,41	38,70892	0,484577
N2_3	207,12	52,68545	0,250815
N2_4	128,67	30,46479	0,217213
N2_5	112,58	35,70892	0,260819
N2_6	61,32	32,29421	0,506467
průměr	111,66	40,80	0,39
směrodatná odchylka	53,00	10,49	0,16
koeficient variace	0,47	0,26	0,42

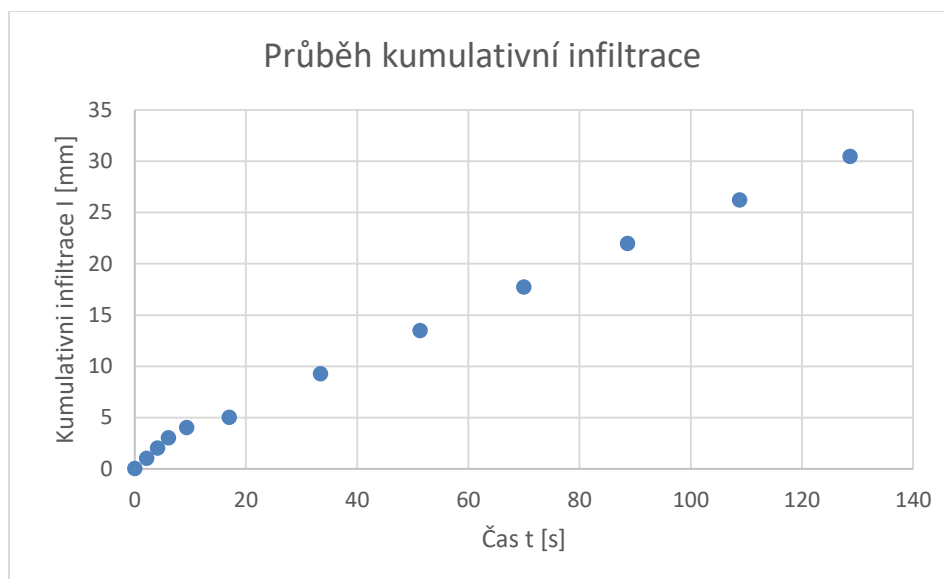
Tab. č. 10 - infiltrační pokusy konané dne 22. 8. 2016 na nezhutněném povrchu, celkové hodnoty. (Redl, 2016).

Zhutněná půda - 22. 8. 2016			
pořadí experimentů	t_{celk} [s]	l_{celk} [mm]	i_{celk} [mm/s]
Z2_1	298,92	10,43775	0,026225
Z2_2	3052,43	6,52789	0,001587
Z2_3	3200,01	5,82942	0,000925
Z2_4	5755,35	1,69765	0,000300
Z2_5	855,76	8,96119	0,006462
Z2_6	177,44	9,52707	0,039258
průměr	2223,32	7,16	0,01
směrodatná odchylka	2185,21	3,21	0,02
koeficient variace	0,98	0,45	1,32

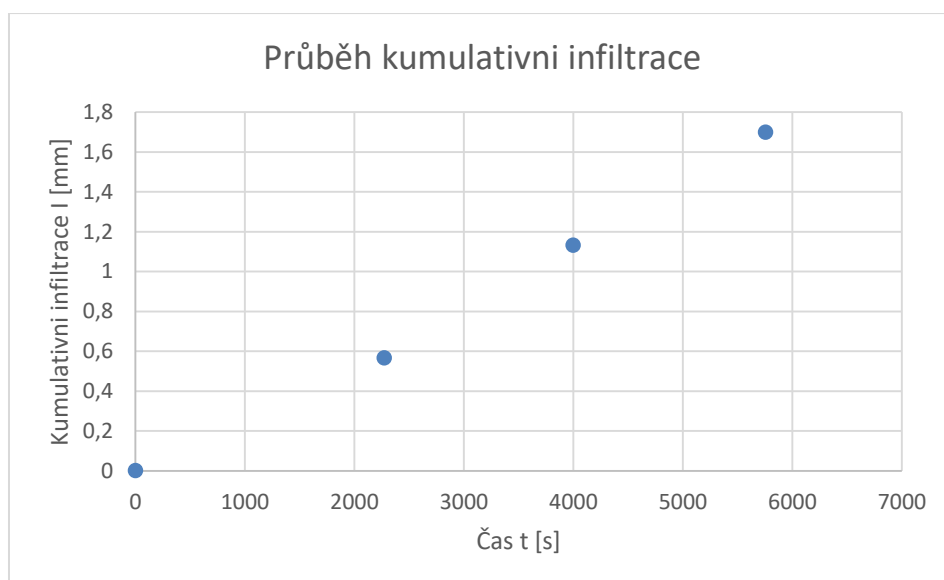
Tab. č. 11 - infiltrační pokusy konané dne 22. 8. 2016 na zhutněném lesním povrchu, celkové hodnoty. (Redl, 2016).

Na následujících obrázcích (Obr. č. 19 a č. 20) jsou graficky znázorněny průběhy kumulativních infiltrací na nezhutněném a zhutněném povrchu, při kterých se do půdy zasáкло nejmenší množství vody v porovnání s ostatními měřeními.

Měření N2_4 trvalo přibližně 2 minuty a infiltrovalo se během něj do půdy přibližně 30, 46 mm vody. Oproti tomu měření Z2_4 trvalo přibližně 96 minut a infiltrovalo se při něm do půdy pouze 1, 70 mm vody. Při porovnání celkové délky obou uvedených měření trval pokus Z2_4 na zhutněné půdě 48x delší dobu, nežli pokus N2_4 na nezhutněné půdě, přičemž se do půdy infiltrovalo množství vody pouze 1,7 mm.



Obr. č. 19 - N2_4, průběh kumulativní infiltrace na nezhutněné půdy.
(Redl, 2016).



Obr. č. 20 - Z2_4, průběh kumulativní infiltrace na zhutněné půdě.
(Redl, 2016).

Obdobně, jako při první kampani byly i ve druhém kampani měření infiltrace dne 22. 8. 2016 odebrány vždy dvojice půdních vzorků v okolí infiltračního válce. Celkem bylo odebráno během druhého termínu 24 vzorků půdy, z čehož polovina vzorků připadla nezhutněným a polovina vzorků zhutněným půdám. Vzorky jsou uvedeny v Tab. č. 12. Barevně rozlišený a spárovány jsou vzorky, pocházející ze stejné lokality odběru.

V zásadě až na výjimky platí, že vzorky „N“ (nezhutněné půdy), mají nižší objemovou vlhkost i objemovou hmotnost, nežli vzorky označené jako „Z“, které byly

odebrány na zhutněných půdách. Výjimky tvoří pouze vzorky, které nebyly při odběru plně dosypány, jejich vnitřní struktura byla tvořena různými výdutěmi či půdy obsahovaly organické prvky, např. kořínky rostlin. V příloze fotodokumentace jsou uvedeny fotografie (Obr. č. 37 a č. 38) zachycující odebrané půdní vzorky v době před sušením a v době po vysušení. Tab. č. 13 uvádí průměrné hodnoty objemové vlhkosti a objemové hmotnosti. Podobně, jako při první kampani je průměrná hodnota objemové vlhkosti na zhutněných půdách téměř dvojnásobná oproti nezhutněným půdám.

č. válečku	hmotnost odebraného válečku (vč. víceč a válečku) [g]	Hmotnost 2 víceč [g]	hmotnost sklíčka [g]	hmotnost válečku se sklíčky, bez víceč, s odebranou zeminou [g]	hmotnost válečku [g]	hmotnost válečku se sklíčky, bez víceč, s odebranou zeminou po vysušení [g]	objemová vlhkost [%]	objemová hmotnost [g/cm ³]	zhutněno/nezhutněno	vzorky z totožné lokality
161	160,8	15,9	21,3	166,2	111,1	152,4	13,80	0,200	N	2
165	250,6	16,2	33,1	267,4	113,9	256,8	10,60	1,098	N	1
34	274,5	15,9	33,1	291,3	111,3	259,4	31,90	1,150	N	6
43	232,4	15,6	32,7	249,4	110,4	224,2	25,20	0,811	N	6
4	198,9	16	32,6	215,5	113,1	194,7	20,80	0,490	N	4
167	168,2	15,8	32,4	184,5	111	172,8	11,70	0,294	N	1
162	201	15,9	32,7	217,8	112,8	200,9	16,90	0,554	N	5
132	163	15,8	32,8	180	111	165,7	14,30	0,219	N	3
48	208,3	16,1	21,3	213,4	110,5	198,5	14,90	0,667	N	3
107	207,2	16	21,3	212,5	110,3	190,5	22,00	0,589	N	4
36	178,2	15,9	21,2	183,5	114,1	166	17,50	0,307	N	5
166	161,2	16	32,4	177,5	111,4	162,8	14,70	0,190	N	2
108	272,9	15,6	21,3	278,4	108,5	221,9	56,50	0,921	Z	2
87	202	15,8	32,4	218,7	114,7	202,8	15,90	0,557	Z	6
109	306	16	32,6	322,6	109,7	290,1	32,50	1,478	Z	4
111	284,3	16,1	33,7	301,9	111,1	259,6	42,30	1,148	Z	4
39	217,8	16	32,7	234,6	111	217,1	17,50	0,734	Z	5
78	291,5	15,9	33,2	308,9	111,1	280,6	28,30	1,363	Z	6
164	277,2	16	32,1	293,1	109	246,2	46,90	1,051	Z	1
37	239,3	15,8	33,8	257,4	112,9	231,5	25,90	0,848	Z	5
15	290,3	15,9	20,1	294,6	112,7	269,4	25,20	1,366	Z	3
20	222,7	15,8	20,1	226,7	111,5	209,2	17,50	0,776	Z	3
115	306,7	16	20,2	310,9	111,8	273,2	37,70	1,412	Z	2
163	288,3	16	32,6	304,9	110	257,4	47,50	1,148	Z	1

Tab. č. 12 - přehled odebraných vzorků půdy ze dne 22. 8. 2016. (Redl, 2016).

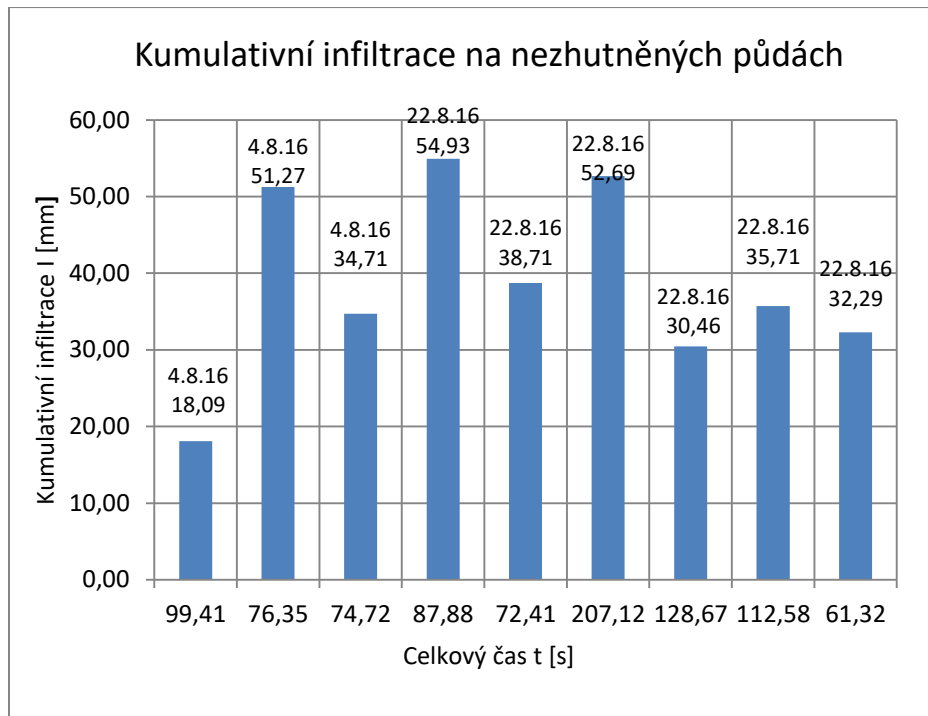
	objemová vlhkost [%]	objemová hmotnost [g/cm³]
průměr N (nezhutněné půdy)	17,86	0,55
směrodatná odchylka	6,15	0,26
koeficient variace	0,34	0,48
průměr Z (zhutněné půdy)	32,81	1,07
směrodatná odchylka	15,3	0,32
koeficient variace	0,47	0,3

Tab. č. 13 - průměrné hodnoty objemové vlhkosti a objemové hmotnosti odebraných vzorků půdy ze dne 22. 8. 2016. (Redl, 2016).

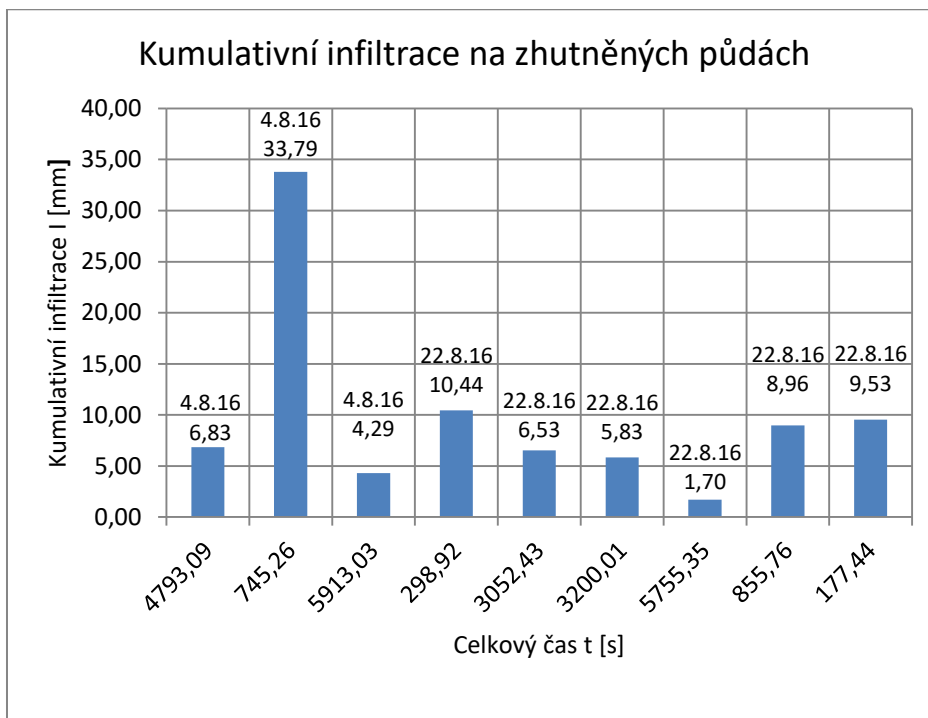
5.3 Celkové shrnutí naměřených dat

V této podkapitole je provedeno porovnání hodnot kumulativní infiltrace. Graficky jsou zvláště porovnávána data dosažené kumulativní infiltrace naměřené na nezhutněných půdách a zvláště jsou porovnána data získána měřeními na půdách zhutněných. Kumulativní infiltrace je vyjádřena jednak samostatně (jednotlivá měření), v průměrných hodnotách, nebo v čase 1. minuty.

Následující grafický průběh (Obr. č. 21) společně znázorňuje jednotlivé hodnoty, kterých dosáhla kumulativní infiltrace při měření na nezhutněném povrchu během dvou termínů měření. Konkrétně se jedná o hodnoty celkové doby trvání infiltrace a infiltrovaného množství vody do půdy. Obr. č. 22 vyobrazuje taktéž dosažené hodnoty kumulativní infiltrace, ale s hodnotami uvedenými pro měření na zhutněných půdách. Z tohoto grafu je patrné zvýšené množství infiltrované dne 4. 8. 2016 na zhutněné půdě. Této zvýšené hodnoty infiltrace dosáhla z důvodů uplatnění preferenční cesty v půdě (např. dutina po kořeni stromu, nebo půdnímu živočichu). Porovnáním dat z obou grafů lze jednoznačně určit přímou souvislost mezi mírou zhutnění a infiltrovaným množstvím vody, které je v případě zhutněných ploch minimální.



Obr. č. 21 - grafické znázornění průběhů kumulativních infiltrací měřených na nezhutněných půdách. (Redl, 2016).



Obr. č. 22 - grafické znázornění průběhů kumulativních infiltrací měřených na zhutněných půdách. (Redl, 2016).

Z naměřených dat vyplývají následující hodnoty:

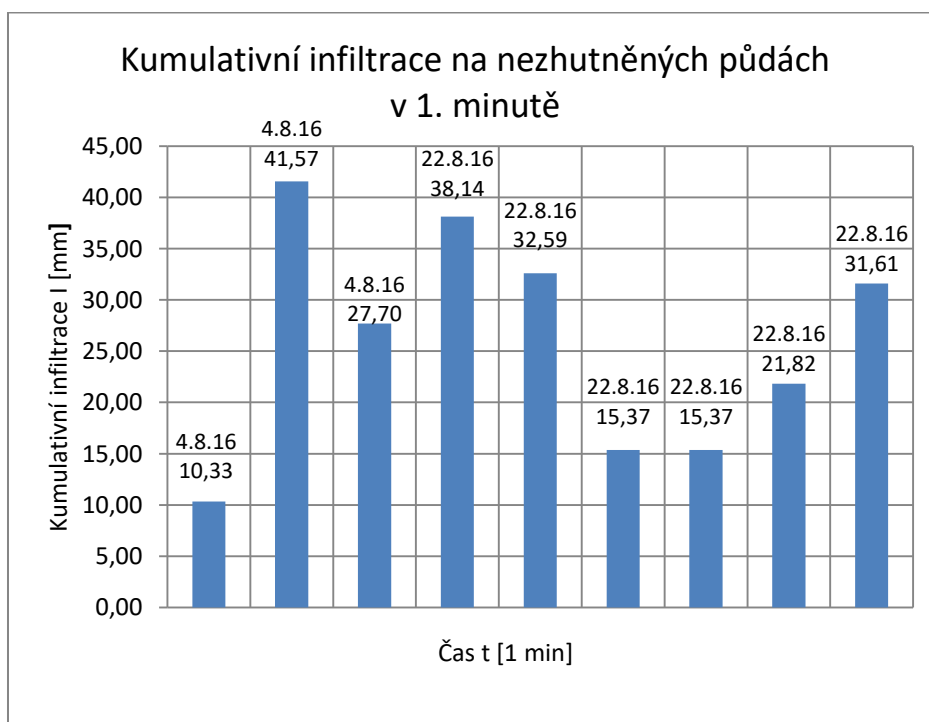
Kumulativní infiltrace – nezhutněné půdy

Celková doba trvání všech měření byla 15, 34 minut. Kumulativní infiltrace dosáhla hodnoty 34, 89 cm.

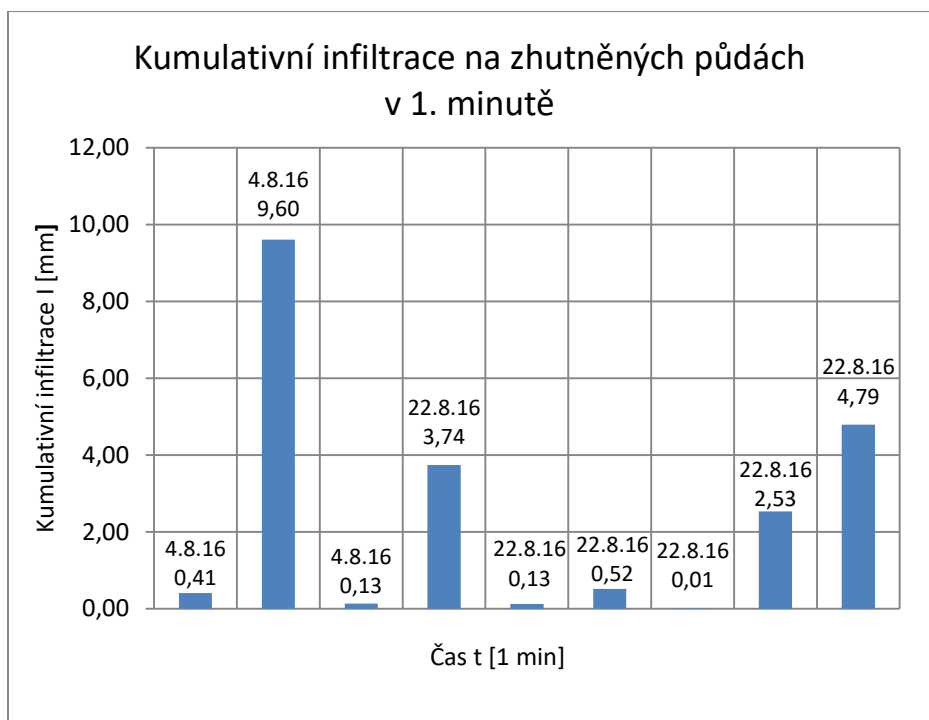
Kumulativní infiltrace – zhutněné půdy

Celková doba trvání všech měření byla 6, 89 hodin. Kumulativní infiltrace dosáhla hodnoty 8, 79 cm.

Na obrázcích Obr. č. 23 a Obr. č. 24 jsou uvedeny grafické průběhy již zmíněných hodnoty kumulativní infiltrace v 1. minutě. Zobrazeny jsou zvlášť hodnoty naměřené na nezhutněných a zhutněných půdách. Zvýšená hodnota infiltrovaného množství vody (Obr. č. 24) při měření Z1_2 dne 4. 8. 2016 je dána uplatněním preferenčních cest v půdě.



Obr. č. 23 - grafické znázornění průběhů kumulativních infiltrací v 1. minutě na nezhutněných půdách. (Redl, 2016).

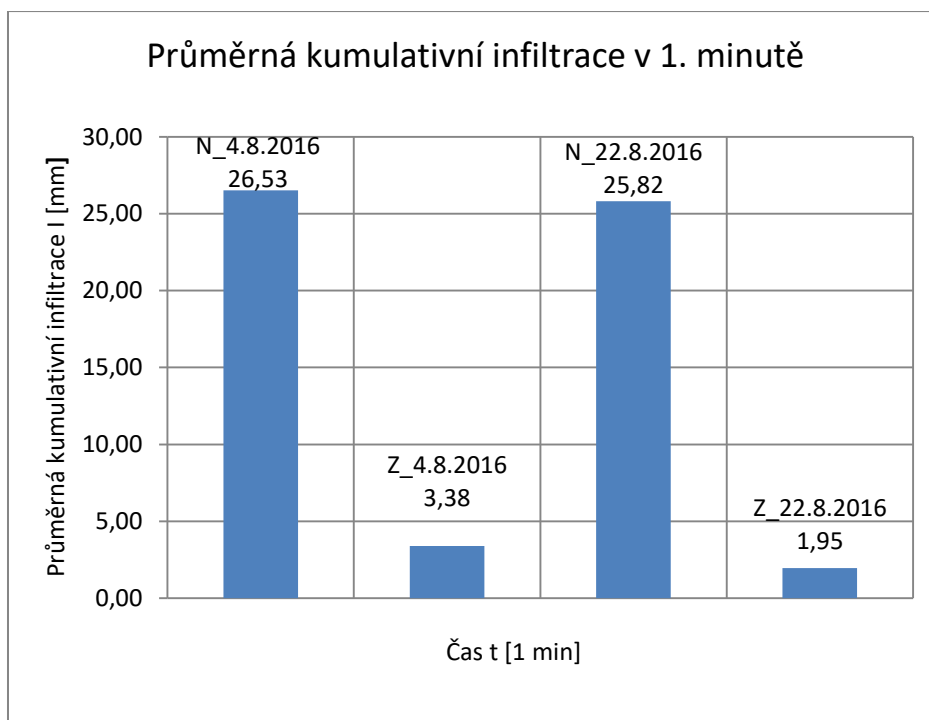


Obr. č. 24 - grafické znázornění průběhů kumulativní infiltrace v 1. minutě na zhutněných půdách. (Redl, 2016).

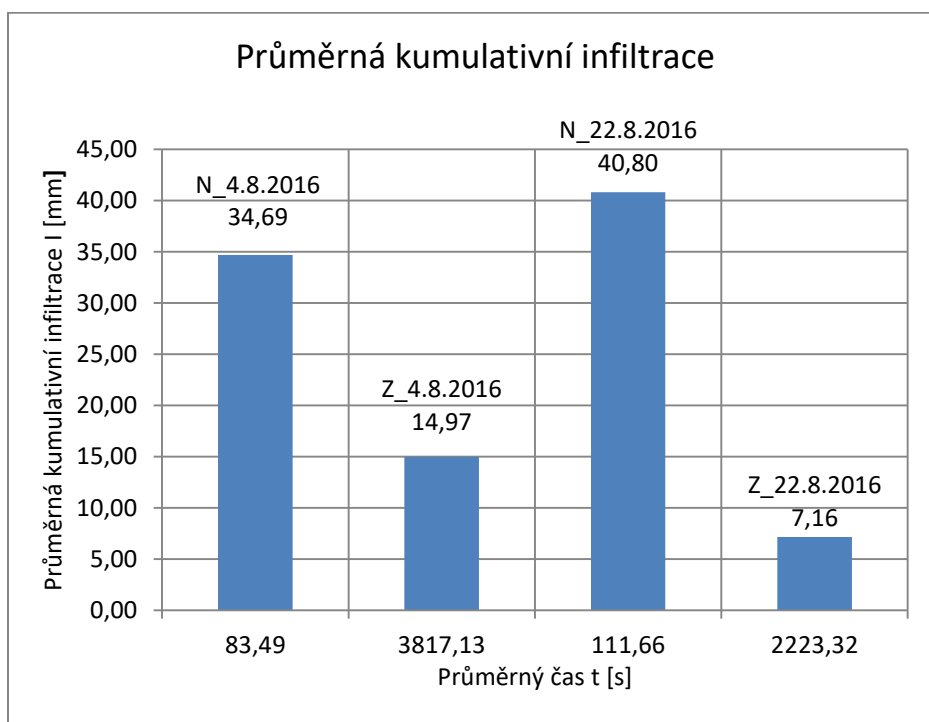
Níže uvedená tabulka Tab. č. 14 a obrázek Obr. č. 25 zobrazují tytéž průměrné hodnoty kumulativní infiltrace v 1. minutě, jen jiným způsobem vyjádřené. V tabulce jsou hodnoty zvlášť rozděleny po jednotlivých termínech měření. Podobně jako v případě celkových hodnot, vykazují hodnoty kumulativní infiltrace vztahené k 1. minutě na nezhutněných půdách výrazně zvýšené množství infiltrované vody ve srovnání se zhutněnými půdami.

Průměrná kumulativní infiltrace v 1. minutě				
	N_4. 8. 2016	Z_4. 8. 2016	N_22. 8. 2016	Z_22. 8. 2016
	I_{1min} [mm]	I_{1min} [mm]	I_{1min} [mm]	I_{1min} [mm]
počet experimentů	3	3	6	6
průměr	26,53	3,38	25,82	1,95
směrodatná odchylka	15,65	5,39	9,65	2,04
koeficient variace	0,59	1,59	0,37	1,04

Tab. č. 14 - srovnání průměrné kumulativní infiltrace v 1. minutě dosažené na zhutněných a nezhutněných půdách během dvou kampaní. (Redl, 2016).



Obr. č. 25 - grafické porovnání průměrné kumulativní infiltrace v 1. minutě dosažené na zhutněných a nezhutněných půdách během dvou kampaní. (Redl, 2016).



Obr. č. 26 - grafické porovnání průměrných hodnot kumulativní infiltrace dosažených na zhutněných a nezhutněných půdách během dvou kampaní. (Redl, 2016).

Na výše uvedeném Obr. č. 26 jsou graficky znázorněny průměrné hodnoty kumulativních infiltrace po jednotlivých termínech měření a na jednotlivých půdách. Při měřeních, která proběhla dne 4. 8. 2016 na nezhutněném povrchu, se do půdy vsáklo v průměru 35 mm vody za necelou minutu a půl, zatímco na zhutněné půdě se vsáklo necelé poloviční množství vody za zhruba hodinový čas. Dne 22. 8. 2016 se při měření na nezhutněném povrchu do půdy vsáklo v průměru 41 mm za necelé dvě minuty, zatímco zhutněný povrch absorboval přibližně 1/6 tohoto množství za zhruba 37 min.

6. Diskuse

6.1 Terénní měření

Realizace infiltračních experimentů za pomoci metody zasakovacího válce se v rámci sledování vlivu lesnické mechanizace na infiltrační charakteristiky lesních půd ukázala jako poměrně náročně proveditelná. Půdní prostředí je v lesním porostu z velké části bohatě protkáno kořeny stromů, které bránily zejména při instalaci infiltrační soupravy. Aby byla měření co nejpřesněji provedená, musela proto obsluha infiltrační válce z půdy opakovaně vytahovat a přemisťovat na vhodnější místo. Existence hustého kořenového zápoje se projevovala nejen obtížemi při instalaci měřicí soupravy, ale v některých případech i při samotných měřeních (na nezhutněných půdách) docházelo k nekontrolovatelným ztrátám vody během infiltrace. Důvodem byly výdutě v půdním horizontu po odumřelých kořenech stromů. Tento jev však z infiltračního hlediska nelze nikoliv označit za nežádoucí, jelikož je tomu přesně naopak. K podobným překážkám, jako při instalaci infiltračního válce docházelo také při odběrech půdních vzorků. Odběrné válečky byly často při vytahování vzorků z půdy nedosypané. Svůj podíl na tom sehrál jednak vyšší poměr lesní hrabanky, která byla před odběrem v co největším množství odstraněna, dále také přítomnost již zmiňovaných kořenů. Nižší půdní vlhkost v tomto případě také způsobovala nesoudržnost půdního vzorku. Vzhledem k tomu, že měření probíhala během horkého letního měsíce srpna, bylo pro provedení infiltrací potřeba dostatečné množství vody. Podle původních předpokladů se uvažovalo pro odběr vody k provedení infiltrací využít bezejmenného toku, který však při zahájení měření dne 4. 8. 2016 neposkytoval téměř žádné použitelné množství vody. Situaci nakonec vyřešil zdroj vody z místní studny na nedalekém hřbitově, který poskytl kvalitní alternativní zdroj vody pro infiltrační měření.

Výše zmíněné důvody stojí především za původně neočekávaným, nízkým počtem provedených infiltračních měření dne 4. 8. 2016, která bylo v tento den provedena pouze 3 dvojice měření. Jak již bylo zmíněno, poměrně zásadní ovlivnění průběhu měření znamenala zvýšená spotřeba infiltrované vody. V 1. minutě dosahovala průměrná kumulativní infiltrace na nezhutněných půdách téměř 8 x vyšších hodnot, než na půdách zhutněných. Celkové průměrné množství 35 mm se do nezhutněné půdy infiltrovalo za více jak minutu. Evidentní rozdíl nastává v porovnání s infiltrací na zhutněných půdách, která dosahovala celkové průměrné hodnoty 15 mm za téměř hodinový čas.

Odběr půdních vzorků, který předcházela jednotlivým infiltračním měřením na nezhutněném a zhutněném povrchu, zaznamenal stejně, jako v případě terénního měření (uvedeného v kapitole 3.4.5) zvýšené hodnoty objemové hmotnosti a objemové vlhkosti. Průměrná vlhkost dosahovala na zhutněných půdách téměř dvojnásobné hodnoty uvedenou pro půdy nezhutněné. Hodnota objemové hmotnosti byla pro nezhutněné půdy stanovena na průměrnou hodnotu $0,82 \text{ g/cm}^3$, zatímco na zhutněných půdách dosahovala průměrné hodnoty $1,17 \text{ g/cm}^3$.

Z důvodů nízkého počtu dosažených měření dne 4. 8. 2016 bylo rozhodnuto v co nejbližší době měření pro svoji průkaznost zopakovat. Termín dalšího měření byl stanoven na 22. 8. 2016. V tento den započala měření na základě zkušeností z předchozího měření v ranních hodinách. Během celého dne bylo provedeno 6 párů měření. Za 1. minutu byla průměrná kumulativní infiltrace na nezhutněných půdách téměř 13 x vyšších, než na zhutněných půdách. Kumulativní infiltrace dosahovala v tento den při všech měřeních provedených na nezhutněných půdách téměř 6 násobku průměrného množství infiltrovaného na zhutněných půdách. Celkové průměrné množství vody se infiltrovalo na nezhutněném povrchu za necelé 2 minuty, zatímco průměrné množství infiltrované na zhutněných půdách trvalo přibližně 37 minut. Uvedená celková délka infiltrace na zhutněném povrchu je částečně zkreslená celkovou délkou prvního a posledního měření, které trvaly oproti zbylé většině měření výrazněji kratší dobu.

Průměrné hodnoty objemové vlhkosti byly podobně, jako v případě prvního měření na půdách zhutněných dvojnásobné ve srovnání s hodnotami dosaženými na nezhutněném povrchu. Průměrné hodnoty objemové hmotnosti jsou $0,55 \text{ g/cm}^3$ pro půdy nezhutněné, zatímco hodnota $1,07 \text{ g/cm}^3$ představuje zhutněné půdy. Výše uvedené hodnoty přibližně korespondují s hodnotami, které naměřili Rejšek & kol. (2011) na zhutněných a nezhutněných lesních půdách.

Jak je z výše uvedeného textu patrné, délka jednotlivých měření byla různá v závislosti na zhutnění. Lišil se celkový čas infiltrací na půdách nezhutněných a jiný čas byl naměřený pro půdy zhutněné. Průměrná infiltrační rychlost dosahovala dne 4. 8. 2016 na nezhutněném povrchu $0,42 \text{ mm/s}$, a to je 42 x vyšší rychlost oproti půdám zhutněným. Podobný vývoj trendu infiltrační rychlosti nastal dne 22. 8. 2016, přičemž průměrná infiltrační rychlost dosahovala na nezhutněném povrchu hodnoty $0,39 \text{ mm/s}$, která představuje 39 x vyšší infiltrační rychlost ve srovnání s hodnotami dosaženými na zhutněném povrchu.

Do jaké míry dosahovalo zhutnění půdního povrchu, přímo ovlivňovalo infiltrační průběhy. Z tohoto důvodu trvala celková doba měření infiltrací na nezhutněných půdách poměrně krátkou dobu ve srovnání s provedenými měřeními na půdách zhutněných. Nezhutněným povrchem se do půdy infiltrovalo značné množství vody, vzrostla tedy její spotřeba, přičemž byl předpokládán podobný vývoj tohoto trendu. Situace, která nastala při měřeních na zhutněném povrchu, dosahovala zcela jiných hodnot, než při infiltracích na nezhutněné půdě.

Závěrem lze označit infiltrační schopnosti zhutněných půd za výrazně zhoršené ve srovnání s infiltracemi půd nezhutněných, protože zhutněné vzorky mají vyšší objemovou vlhkost. Zhutnění mělo velký vliv na snížení pórovitosti a zvýšení objemové hmotnosti.

Jak bylo na začátku této kapitoly uvedeno, nepatří metoda infiltračních válců svým použitím v lesních podmínkách k nejjednodušším metodám. Přesto však bylo její realizací dosaženo zajímavých hodnot, které si zaslouží v problematice pojezdu lesních půd zvýšené pozornosti. Pokračování tématu zhutnění lesních půd vlivem pojezdu lesnické mechanizace provedené metodou infiltračních válců by bylo vhodné doplnit metodami zadešťovacího zařízení nebo zařízeními k měření hydraulické vodivosti.

6.2 Preventivní a nápravná opatření

6.2.1 Preventivní opatření

Technická a technologická opatření

Skoupý & kol. (2011) provedli rozdělení preventivních opatření, které vedou k minimalizaci poškození půdy a porostu lesnickou těžební technikou na opatření technického a technologického charakteru.

Technická opatření je vhodné uplatnit již během návrhu těžebního stroje a závisí tak na výrobci techniky. V těchto raných fázích vývoje je tak potřeba zvážit použití vhodného typu konstrukce podvozku i hmotnostní parametry celého stroje.

V současné době jsou lesnické těžební mechanismy vybaveny z velké části kolovým podvozkem, který u vybraných typů stroje dokáže vystavit pojížděnou půdu většímu statickému tlaku. Jak se však zmiňuje Skoupý & kol. (2011), je potřeba u stroje také dbát na jeho dynamický účinek. Snížení statického tlaku na povrch půdy lze zajistit zvolením konstrukce podvozku – podvozek s více nápravami (více styčných ploch), použitím kol většího průměru či instalací kolopásů. Zařízení vybaveno kolopásky se lépe v terénu pohybuje, rozkládá statický tlak rovnoměrněji,

čímž minimalizuje míru zhutnění. Aplikace širokoplášťových nízkotlakých pneumatik, které vystavují povrch působení tlaku mezi 80 – 150 kPa je mnohem vhodnější z hlediska zhutnění oproti používání standardních pneumatik o působení tlaku mezi 100 – 280 kPa. Nízkotlaké pneumatiky jsou vyrobeny s dezénem, který minimalizuje poškozování povrchu půdy. (Skoupý & kol. 2011).

Podvozek stroje může být kromě kol a pásu vybavený také tzv. kráčivým podvozkem.

Technologická opatření v sobě zahrnují především použití vhodné strojní technologie, dle konkrétních požadavků danými lokalitou a správné načasování prací v porostu. O těchto opatřeních ve většině případů rozhoduje hospodář nebo příslušný orgán státní správy. Nedodržení technologických zásad je příčinou vzniku velkých škod na půdě a porostu. Mezi důležitá a často opomíjená technologická opatření patří podle Skoupého & kol. (2011) vliv minimalizace škod z pohledu velikosti zakázky nebo opomíjení klimatických podmínek.

Technologická opatření vyplývají z velikosti zakázky, dokáží minimalizovat škody na půdě i v porostu za předpokladu, jsou-li sjednány zakázky většího rozměru. U takových to zakázek lze použít vhodnou technologii vedoucí k minimalizaci poškození.

Opatření podniknutá v rámci klimatických podmínek souvisí s upřednostněním lokalit, které jsou co do pravděpodobnosti poškození vlivem počasí vyhodnoceny jako nejrizikovější – zde by měly být za vhodných klimatických podmínek práce dokončeny nejdříve a následně pak by se měly práce přesunout na lokality, bez rizika poškození.

Předcházení eroze

Pojezdem mechanismu po povrchu půdy je zhutňován půdní horizont a vytvářejí se stopy (koleje) v půdě. V případě nepřízně počasí se nedokáže voda do zhutněného povrchu půdy infiltrovat a dochází tak k povrchovému odtoku, který působí erozivně na obnaženou půdu.

Eroze, kterou zapříčinil provoz lesnické techniky je doprovázená spolupůsobením několika faktorů, které průběh eroze umocňují. Například vliv klimatu a sklonitost terénu přispívají k erodovatelnosti půdy. Ovlivnění eroze (zvýšení, potlačení) závisí také na půdních vlastnostech, které určují, zda je půda k erozi náchylná či nikoliv. Zejména se jedná o únosnost půdy a její erodovatelnost, délka a sklon svahu, míra skeletnatosti půdy, vegetační pokryv.

Autoři Vavříček & Kučera (2014) charakterizují jednotlivé druhy půd z hlediska poškození těžebně dopravní erozí jako:

Velmi silně rizikové půdy – Na těchto rizikových druzích půd by neměla být prováděná holoseč. K transportu dřeva by se ideálně měly používat lanové dráhy s břemeny plně zavěšenými. Doporučuje se nepoužívat kolových mechanismů, ale v případě nutnosti pouze pásových strojů za splnění podmínek ochrany půdního povrchu, např. pomocí klestu nebo rohože. Terénní práce ideálně situovat do zimních měsíců.

Silně rizikové půdy – Jedná se o půdy přemokřené – z tohoto důvodu je potřeba těžbu situovat do suchých měsíců. Pro soustřeďování kmenů je doporučeno využívat lanové dráhy a zároveň minimalizovat použití kolových mechanismů (v každém případě pouze s využitím nízkotlakých pneumatik popř. kolopásky). Přibližovací cesty, kterým hrozí zamokření by měly být odvodněny drenáží.

Půdy střední odolnosti – Při dopravě kmenů používat lanových drah. Použití kolové techniky omezeně – na krátké úseky a s využitím nízkotlakých pneumatik. Přibližovací linky zřizovat mimo prudké svahy a přemokřená místa.

Silně rezistentní půdy – Terénní práce lze provádět s využitím kolové techniky s možností vlečení břemena. Soustřeďovací linky je před zahájením soustřeďování dříví v terénu vyznačit.

Velmi silně rezistentní půdy – Vysoká odolnost těchto půd nevyžaduje vyznačení přibližovacích linek. Při vlečení kmenů je potřeba dbát na minimální poškození povrchu půdy.

Minimalizace počtu přejezdu

Opakované jízdy lesnického mechanismu ve stále stejné stopě prokazatelně negativně působí na půdní horizont. K nejvýraznějšímu zhutnění dochází během prvních třech přejezdů. Pojezdy s opakováním mohou zapříčinit, že dojde ke změnám v plasticitě povrchového půdního horizontu. (Skoupý & kol. 2011).

Ze studie, která měla ověřit zhutňování půd kolovým traktorem (typ 450C Timber Jack) v lesích v oblasti severního Íránu vyplynulo, že k nejvýraznějšímu nárůstu objemové hmotnosti půdy došlo mezi prvními 11 průjezdy mechanismu. Se zvyšujícími se počty přejetími nebyly nárůsty objemové hmotnosti půdy natolik význačné. (Naghdi & kol. 2007).

Zásadní rozhodnutí by mělo být učiněno již během přípravných prací, tj. před vytyčováním soustřeďovací linky. V souvislosti se soustřeďováním se nabízí otázka,

zda použít techniku o menších hmotnostech a minimalizovat tak tlak na půdu při průjezdech za cenu zvýšených přejezdů (malá kapacita stroje), nebo využít hmotnostně těžší techniku s vyšší kapacitou za předpokladu snížení počtu přejezdu. Nabízí se také alternativní možnost soustřeďování kmenů pomocí pásových nebo kráčivých stojů.

Snižování počtu přejezdů v lesnické praxi přispívá k minimalizaci poškození půdy zhutněním. Maximální tolerovaná hranice udává v zahraničí 6 přejezdů ve stejné stopě. (Skoupý & kol. 2011).

6.2.2 Nápravná (technická) opatření

Nápravná opatření reagují na v minulosti nevhodně zvolené nebo neúčinně provedené postupy při těžebních činnostech v lesích. Cílem nápravných opatření je nejen zlepšit současný stav lesních půd, zabránit erozi a degradaci půd, odstranit zhutněná místa, nadlepsit hydrickou funkci lesů, zabránit povodním, ale také si vzít ponaučení z chyb a směřovat vývoj lesních ekosystémů k trvale udržitelnému rozvoji lesů.

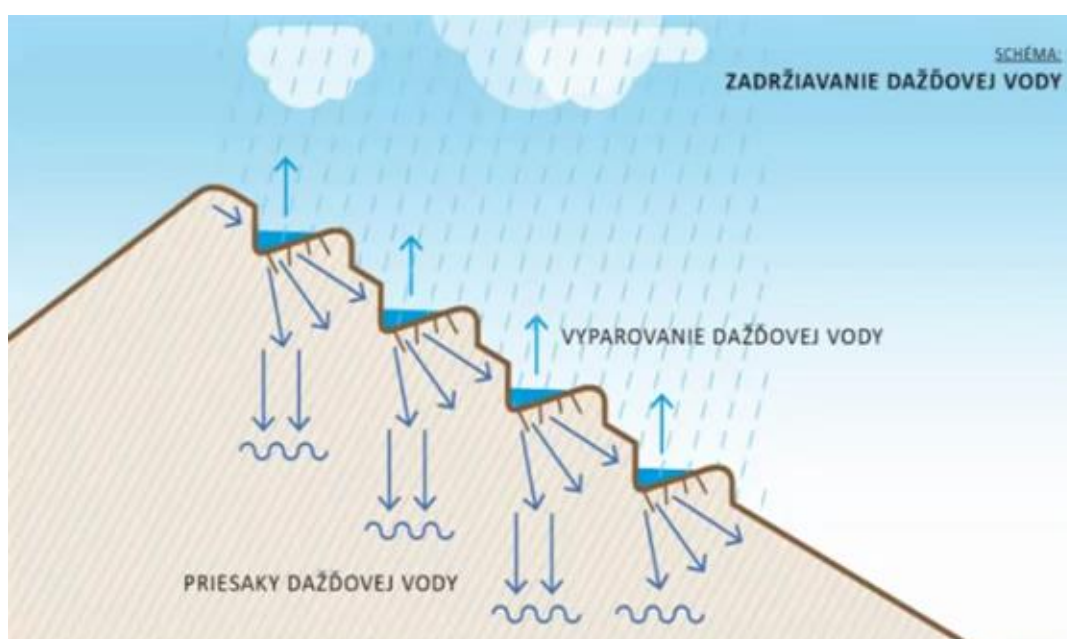
Narušení zhutněných ploch

Narušením zhutněných ploch, zejména stop, které vznikly provozem lesnické techniky při soustřeďování dříví, docílíme retence srážkové vody v místě jejího dopadu a současně zabráníme vzniku vodní eroze. V praxi vyzkoušený a ověřený způsob představil jeho autor Štefan Vaľo, kdy v roce 2011 na dvou místech na východním Slovensku mechanicky pomocí bagru rozrušil utužený povrch nepoužívaných přibližovacích cest, které v minulosti sloužily ke stahování dřeva. Rozrušování zhutněného povrchu půdy probíhalo příčně proti svahu po celé šířce původní stopy od nejvyšších míst v terénu postupně směrem do údolí. Narušování do hloubky 1,5 m byly také svahy v bezprostředním okolí zhutněných ploch, které dosahovaly výšky více, jak dva metry.

Jak se autor zmiňuje, po dokončení prací došlo během krátkého času k dešti, kdy „rekultivovaný“ povrch dokázal tuto srážku zadržet. Postupem času si voda v jamkách dokázala vytvořit nové póry a pronikla tak do spodních vod, k pramenům a ke kořenům rostlin. Voda vytékající z pórů v narušeném svahu zasakovala do rozrušené půdy, případně se zachytila ve vytvořených jamkách. Na jaře roku 2013 proběhla na rekultivovaných plochách pozorování, kdy byla zachycená voda zaznamenána pouze v 15 % jamek. Schématický obrázek Obr. č. 27 znázorňuje proces zachycení a infiltrace dešťových srážek na mechanicky rozrušeném půdním povrchu. Mechanicky vybudované jamky dokáží podobným

způsobem, jako prohlubně vzniklé vývratem stromu vytvořit nový ekosystém pro obojživelníky nebo vzácné druhy rostlin. (Valtera & Schaetzel, 2017).

Schopnost narušeného povrchu půdy efektivně zachytávat dešťové srážky ověřila vlastními měřeními i Slovenská Akadémia Vied. Měření bylo provedeno za pomoci simulátoru deště, který na zhutněné a zerodované cestě, která dříve sloužila pro účely soustřeďování dříví, simuloval srážku o intenzitě 100 mm po dobu třech hodin. Totéž měření proběhlo na zhutněné cestě, která byla následně mechanicky rozrušená bagrem. Výsledkem měření bylo prokázání, že zhutněná půda nezadržela téměř žádnou vodu, oproti půdě mechanicky rozrušené, která zachytila téměř 100 % simulované srážky.



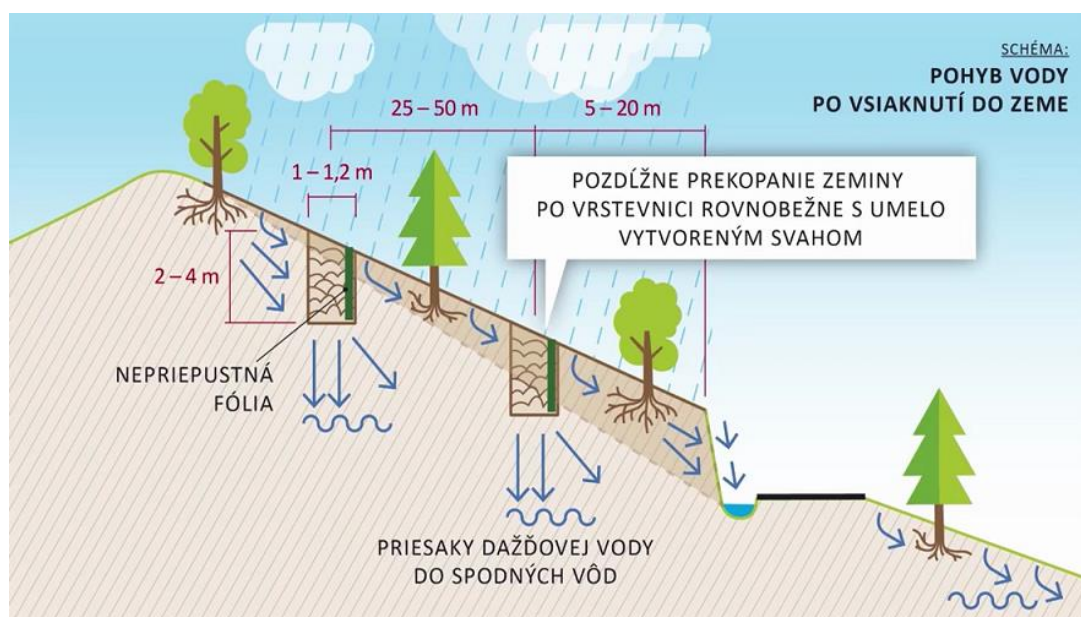
Obr. č. 27 - schématické znázornění zachycujících se dešťových srážek v uměle vytvořených jamkách s postupnou infiltrací do půdního horizontu. (Štefan Vaľo, 2017).

Řešení problémů umělých svahů

Svahy, které byly v minulosti v souvislosti s výstavbou lesní sítě náročně sklonově upravovány, se v současné době výrazněji podílejí na ztrátách podzemních vod. Dochází tomu tak na základě zpřetrhání pórů v půdním horizontu, kdy póry z vyšších vrstev půdy na svahu odvádějí v narušeném místě vodu z pórů na povrch půdy. Voda vyvěrající na povrchu se již nedokáže vrátit zpět do hlubších vrstev půdy, namísto toho je prostřednictvím uměle vytvořených příkopů odváděna po zhutněném povrchu.

Štefan Vaľo navrhl řešení této problematiky uměle vytvořených svahů, které je níže znázorněno a vychází ze schématického obrázku Obr. č. 28.

Nad porušeným svahem ve vzdálenosti 5 – 20 m (v závislosti na sklonu svahu) je potřeba po vrstevnici vykopat přerušovací kanál o minimální šíři 1 m a hluboký 2 – 4 m. Do tohoto kanálu je potřeba v jeho spodní části umístit nepropustnou fólii, která zabrání pronikání vody do odvodňované části svahu. Takto připravený výkop zasypeme a uvedeme do původního stavu. Tímto řešením dojde k přerušení pórů, ze kterých voda vsákne do rozkopané země a následně do hlubších vrstev půdy.



Obr. č. 28 - schématické znázornění řešení problematiky uměle vytvořených svahů. (Štefan Vaľo, 2017).

7. Závěr

Autor této diplomové práce si kladl za cíl prokázat přímé souvislosti mezi mechanizovanou těžbou v lesním porostu a probíhajícími infiltračními procesy na takto utužených lesních půdách. V rámci provedených infiltračních měření (rozdělených do dvou jednodenních kampaní) byl prokázán výrazný negativní dopad pojezdu těžební techniky na změnu infiltračních vlastností u zhutněných půd.

Zhutněné a nezhutněné půdy se podrobily odběru půdních vzorků a infiltračním měřením, jejichž výsledné hodnoty byly vyhodnoceny a následně mezi sebou porovnány. U zhutněných půd byla zjištěna snížená pórovitost, což dokládají výrazně vyšší hodnoty objemové hmotnosti a objemové vlhkosti, ve srovnání s hodnotami vzorků odebraných z nezhutněných lokalit. Provedená měření jednoznačně poukazují na nepříznivý vliv zhutnění na průběh infiltrace, kdy nezhutněné půdy prokazují, že i zvýšené množství vody dokáže rychle absorbovat. Při první kampani dosáhla celková průměrná kumulativní infiltrace 35 mm (nezhutněný povrch) a 15 mm (zhutněný povrch). Průměrná infiltrační rychlost byla na nezhutněném povrchu 42 x vyšší, než na povrchu zhutněném. Podle výsledků měření se v průběhu druhé kampaně infiltrovalo celkové průměrné množství 41 mm (nezhutněný povrch) a 7 mm (zhutněný povrch). Průměrná infiltrační rychlost byla 39 x vyšší, jak na povrchu zhutněném. Jednotlivá měření jsou podložena graficky vyhodnocenými průběhy výše uvedených kumulativních infiltrací a infiltračních rychlostí.

Součástí výstupu této práce je návrh preventivních a technických opatření, která účinně zabraňují vzniku zhutnění; popřípadě na půdách již poškozených dokáže zamezit erozivní činnosti povrchového odtoku. Nejúčinnějšími preventivními opatřeními, které snižují vznik zhutnění a eroze půdy jsou: minimalizace počtu přejezdů těžební techniky po půdním povrchu a pojezdy těchto strojů za vhodných klimatických podmínek (bezdeštné počasí). Technická opatření řeší již vzniklou situaci mechanickým narušením zhutněného a erodovaného povrchu půdy pomocí těžké techniky (bagru). Dopady uměle vybudovaných svahů pomáhá odstranit instalace nepropustné fólie do půdy ve svahu. Cílem opatření je zajištění přirozené infiltrace srážkových vod do půdního horizontu. Prostřednictvím těchto opatření dojde jednak k zabránění v odnosu kvalitního humusu, k zabránění usazování splavenin ve vodních tocích a vodních nádržích s případnými následky (eutrofizace vod).

Preventivní a nápravná opatření se musí nejprve začít realizovat v horách a v lesích, protože poškozená lesní půda nedokáže během dešťů zadržet vodu,

kteřá v níže položených oblastech způsobuje povodně. Srážková voda nebo voda z tající sněhové pokrývky během teplých letních měsíců v krajině chybí.

Aplikace zmíněných opatření, striktní dodržování pravidel a postupů hospodaření v lesních porostech (trvale udržitelné hospodaření), které bude šetrné k životnímu prostředí nelze účinně prosadit bez zakotvení v platné legislativě. V tomto směru bylo již v minulosti podniknuto několik kroků. V roce 1982 vznikla právní norma (č. 13/1982), která upravovala lesnické hospodaření v ochranných pásmech vodních zdrojů. I když jejímu vzniku předcházela studie, která prokázala, že šetrné hospodaření je nejméně 11 x výhodné, než odstraňování následků eroze ve vodních nádržích, byla tato norma po roce 1989 zrušena.

V současné době, kdy má lidstvo přímo před očima měníci se životní prostředí (povodně, období sucha), je nutné si v čas uvědomit a zahájit řešení nápravy nevhodných lesních zásahů. Součinnost lesních hospodářů, vlastníků lesa a ochrany životního prostředí je v tomto ohledu nutná.

8. Přehled literatury a použitých zdrojů

Ambrožová J., 2007: Aplikovaná a technická hydrobiologie. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha, 226 s.

AOPK ČR, 2017: Klimatická charakteristika mírně teplé oblasti. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha, online: <http://www.ochranaprirody.cz>, cit. 15. 1. 2017.

Arshad M. A., Coen G. M., 1992: Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture* 7: 5 – 12.

Bouwer H., 2002: Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal* 10: 121 – 142.

Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E., 2015: The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management* 338: 124 – 138.

Cenia, 2017: Zhutnění půdy. Česká informační agentura životního prostředí, Praha, online: <http://www.vitejtenazemi.cz/cenia>, cit. 21. 1. 2017.

Císlerová M., 1989: Inženýrská hydroopedologie. ČVUT, Praha, 156 s.

ČGS, 2017: Geologická mapa. Česká geologická služba, Praha, online: <http://geology.cz>, cit. 14. 1. 2017.

ČÚZK, 2017: Katastrální území. Český úřad zeměměřičský a katastrální, Praha, online: <http://www.nahlizenidokn.cuzk.cz>, cit. 22. 12. 2016.

Dešťový simulátor, 2017: Laboratorní simulátor deště. ČVUT, Praha, online: <http://www.destovy.simulator.sweb.cz>, cit. 16. 1. 2017.

Hildebrand E. E., Puls C., Gaertig T., Schack-Kirchner H., 2000: Flächige Bodenverformung durch Befahren. *Umweltvorsorge* 55: 683 – 686.

Herrick J. E., Jones T. L., 2002: A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1320 – 1324.

Horáček J., Ledvina R., Koubalíková J., 1994: Cvičení z geologie a půdoznalství. JUZF, České Budějovice, 114 s.

Horton R. E., 1933: The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transaction American Geophysical Union* 14: 445 – 460.

Hůla J., Procházková B., Badalíková B., Dryšlová T., Horáček J., Javůrek M., Kovaříček P., Kroulík M., Kumhála F., Smutný V., Tippl M., Winkler J., 2010: Dopad netradičních technologií zpracování půdy na půdní prostředí. Výzkumný ústav zemědělské techniky, v. v. i., Praha, 58 s.

IPR Praha, 2016: Online mapa. Institut plánování a rozvoje hlavního města Prahy, Praha, online: <http://www.geoportalpraha.cz>, cit. 22. 12. 2016.

Jačka L., Pavlásek J., 2014: Infiltrace vody do půdního prostředí. ČZU, Praha, 81 s.

Javůrek M., Vach M., 2008: Negativní vlivy zhutnění půd a soustava opatření k jejich odstranění. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i., Praha, 24 s.

Kameníčková I., 2006: Hydropedologie – Hydropedologické praktikum. VUT FAST v Brně, Brno, 76 s.

Kovaříček P., Šindelář R., Kroulík M., Hůla J., Vlášková M., 2007: Method of water soil infiltration by sprinkling. Research Institute of Agricultural Engineering, Prague, 150 s.

Kutílek M., 1966: Vodohospodářská pedologie. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 275 s.

Kutílek M., Kuráž V., Císlerová M., 2000: Hydropedologie 10. ČVUT, Praha, 176 s.

Lhotský J., 2000: Zhutňování půd a opatření proti němu. Ústav zemědělských a potravinářských informací, Praha, 62 s.

Mapy.cz, 2016: Nadmořská výška, online: <http://www.api.mapy.cz>, cit. 12. 1. 2017.

Mašíček T., Toman F., Vičanová M., 2011: Infiltration ability of soil in fast-growing species plantation. In: Středová H., Rožnovský J., Litschmann T. eds.: Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí. Mendelova univerzita v Brně, Brno.

Matula S., Kozáková H., 1997: A simple pressure infiltrometer for determination of soil hydraulic properties by in situ infiltration measurements. Rostlinná výroba 43 (9): 405 – 413.

Naghdi R., Bagheri I., Akef M., Mahdavi A., 2007: Soil compaction caused by 450 C Timber Jack wheeled skidder (Shefarood forest, northern Iran). *Journal of forest science* 53 (7): 314 – 319.

Naše voda, 2017: Naše voda – informační portál o vodě, online: <http://www.nase-voda.cz>, cit. 5. 1. 2017.

Neruda J., 2008: Harvesterové technologie lesní těžby. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 150 s.

Pavlásek J., Jačka L., 2014: *Hydropedologie*. ČZU, Praha, 103 s.

Pavlásek J., Jačka L., 2014: *Válcový infiltrometr – manuál pro terénní cvičení*. ČZU, Praha, 16 s.

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

Riedl O., Zachar D., 1973: *Lesotechnické meliorace*. Státní zemědělské nakladatelství Praha, Praha, 586 s.

Rejšek K., Holčíková P., Kuráž V., Kučera A., Dundek P., Formánek P., Vránová V., 2011: Saturated hydraulic conductance of forest soils affected by track harvesters. *Journal of forest science* 57, 2011 (7): 321 – 339.

Skoupý A., Buchar J., Cibulka M., Holčíková P., Janata P., Kadlec J., Klimánek M., Klvač R., Kolařík J., Kulhavý J., Liška S., Menšík L., Mikita T., Neruda J., Nevřkla P., Rejšek K., Synek M., Ulrich R., Vavříček D., 2011: *Multikriteriální hodnocení technologií pro soustřeďování dříví*. Lesnická práce, s. r. o., Kostelec nad Černými lesy, 191 s.

Šarapatka B., 1996: *Pedologie*. UPOL, Olomouc, 235 s.

Švihla V., Černohous V., Kulhavý Z., Šach F., 2006: Retention of precipitation water by forest soil in a mountain catchment. In: Neuhöferová P. ed: *Amelioration in the Forestry and in the Landscape Engineering*, FLE ČZU, VÚMOP Praha, Praha: 35 – 44.

Valtera M., Schaetzl R. J., 2017: Pit – mound microrelief in forest soils: Review of implications for water retention and hydrologic modelling. *Forest Ecology and Management* 393: 40 – 51.

Vaľo Š., 2016: Klimatická zmena – reálne a overené riešenie. Vaľo Štefan, Košice, online: <http://www.povodne.sk>, cit. 20. 2. 2017.

Vavříček D., Kučera A., 2014: Lesnická pedologie pro posluchače LDF Mendelu v Brně. Mendelu, Brno, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav geologie a pedologie, Brno, 214 s.

Vodárna Káraný, 2016: Vodárna Káraný, Praha, online: <http://www.vodarnakarany.cz>, cit. 9. 10. 2016.

VUMOP, 2017: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v. v. i., Praha, online: <http://www.vumop.cz>, cit. 14. 1. 2017.

VÚV TGM, 2017: Mapa vodního hospodářství a ochrana vod. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha, online: <http://www.heis.vuv.cz>, cit. 14. 1. 2017.

VUZT, 2017: Polní simulátor deště. Výzkumný ústav zemědělské techniky, v. v. i., Praha, online: <http://www.vuzt.cz>, cit. 16. 1. 2017.

9. Přehled použitých zkratk a symbolů

AOPK	Agentura ochrany přírody a krajiny ČR
AVK	adsorpční vodní kapacita
BD	bod vadnutí
BPEJ	bonitovaná půdně ekologická jednotka
CENIA	česká informační agentura životního prostředí
ČGS	Česká geologická služba
ČH	číslo hygroskopicity
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
LB	lentokapilární bod
MAK	monomolekulární adsorpční kapacita
MKP	maximální kapilární kapacita
PH	půdní hydrolimit
PK	polní vodní kapacita
PUPFL	pozemek určený k plnění funkcí lesa
PVK	plná vodní kapacita
RVK	retenční vodní kapacita
SMZPV	syntetická mapa zranitelnosti podzemních vod
VÚMOP	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy
VÚV	Výzkumný Ústav Vodohospodářský T. G. Masaryka
VÚZT	Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i.

10. Přehled tabulek a obrázků

Obr. č. 1 - průběhy kumulativní infiltrace a infiltrační rychlosti v závislosti na čase.	18
Obr. č. 2 - potencionální zranitelnost vnitřních vrstev půd utužením.	25
Obr. č. 3 – schém. znázornění odvodňovacího procesu vlivem uměle vytvořeného svahu.	37
Obr. č. 4 - změny fyzikálních vlastností, lokalita Babice nad Svitavou - pojezd UKT.	39
Obr. č. 5 - polní nasycená hydraulická vodivost.	39
Obr. č. 6 - mapový výřez se zobrazenou zájmovou lokalitou.	42
Obr. č. 7 - rozmístění jednotlivých infiltračních pokusů na lokalitě "Jevany".	42
Obr. č. 8 - výřez lokality "Jevany" z geologické mapy.	43
Obr. č. 9 - výřez z mapového podkladu uvádí nejbližší evidovanou BPEJ.	44
Obr. č. 10 - výřez z mapy Klimatických regionů ČR.	45
Obr. č. 11 - klimatická charakteristika mírně teplé oblasti MT 9.	45
Obr. č. 12 - výřez z mapy Vodního hospodářství a ochrany vod.	46
Obr. č. 13 - nezbytné pomůcky a příslušenství pro měření infiltrace.	49
Obr. č. 14 - před začátkem infiltrace.	49
Obr. č. 15 - již vysušené vzorky z odběru uskutečněného dne 4. 8. 2016.	51
Obr. č. 16 - na závěr měření infiltrace je potřeba změřit prům. hloubku výtopy ve válci.	53
Obr. č. 17 - N1_2, kumulativní infiltrace na nezhtutněné půdě.	56
Obr. č. 18 - Z1_2, kumulativní infiltrace na zhtutněné půdě.	56
Obr. č. 19 - N2_4, průběh kumulativní infiltrace na nezhtutněné půdy.	60
Obr. č. 20 - Z2_4, průběh kumulativní infiltrace na zhtutněné půdě.	60
Obr. č. 21 - graf. znázornění průběhů kumul. infiltrací měřených na nezhut. půdách.	63
Obr. č. 22 - graf. znázornění průběhů kumul. infiltrací měřených na zhtutněných půdách.	63
Obr. č. 23 - graf. znázornění průběhů kumul. infiltrací v 1. minutě na nezhut. půdách.	64
Obr. č. 24 - graf. znázornění průběhů kumul. infiltrace v 1. minutě na zhut. půdách.	65
Obr. č. 25 - grafické porovnání průměrné kumulativní infiltrace v 1. minutě dosažené na zhtutněných a nezhtutněných půdách během dvou kampaní.	66
Obr. č. 26 - grafické porovnání průměrných hodnot kumulativní infiltrace dosažených na zhtutněných a nezhtutněných půdách během dvou kampaní.	66
Obr. č. 27 - schématické znázornění zachycujících se dešťových srážek v uměle vytvořených jamkách s postupnou infiltrací do půdního horizontu.	74
Obr. č. 28 - schématické znázornění řešené problematiky uměle vytvořených svahů.	75
Obr. č. 29 - celkový pohled na zájmovou lokalitu.	85
Obr. č. 30 - infiltrace ve stopě těžební techniky.	85
Obr. č. 31 - infiltrace na zhtutněném povrchu.	86
Obr. č. 32 - před započítím infiltrace na nezhtutněném povrchu.	87
Obr. č. 33 - zapuštění infiltračního válce a odběr vzorků půdy.	87
Obr. č. 34 - odběr půdního vzorku.	88
Obr. č. 35 - odečet poklesu hladiny.	88
Obr. č. 36 - infiltrace na nezhtutněném povrchu.	89
Obr. č. 37 - vzorek č. 52 (nezhtutněné půda) před sušením.	90
Obr. č. 38 - vzorek č. 52 po vysušení.	90
Obr. č. 39 - eroze, důsledek zhtutnění.	91
Obr. č. 40 - eroze na lesní svážnici.	91
Obr. č. 41 - zmrzlá zhtutněná půda.	92
Obr. č. 42 - povrchový odtok na jaře 2017.	93

Tab. č. 1 - vybrané hydrolimity a jim odpovídající rozmezí vlhkosti minerálních půd.	16
Tab. č. 2 - klasifikace pórovitosti u lesních půd.	30
Tab. č. 3 - ilustrativní hodnoty pórovitosti u lesních půd.	30
Tab. č. 4 - stanovené limitní hodnoty poškození půd lesnickou mechanizací podle Šimona & Lhotského (2000).	33
Tab. č. 5 - klasifikace kritických hodnot objemové hmotnosti u jednotlivých druhů půd z hlediska omezování růstových projevů rostlin.	34
Tab. č. 6 - infil. pokusy konané dne 4. 8. 2016 na nezhut. lesním povrchu, celk. hodnoty.	55
Tab. č. 7 - infil. pokusy konané dne 4. 8. 2016 na zhutněných půdách, celk. hodnoty.	56
Tab. č. 8 - přehled odebraných vzorků půdy ze dne 4. 8. 2016.	57
Tab. č. 9 - průměrné hodnoty objemové vlhkosti a objemové hmotnosti odebraných vzorků půdy ze dne 4. 8. 2016.	58
Tab. č. 10 - infiltrační pokusy konané dne 22. 8. 2016 na nezhutněném povrchu, celkové hodnoty.	59
Tab. č. 11 - infiltrační pokusy konané dne 22. 8. 2016 na zhutněném lesním povrchu, celkové hodnoty.	59
Tab. č. 12 - přehled odebraných vzorků půdy ze dne 22. 8. 2016.	61
Tab. č. 13 - průměrné hodnoty objemové vlhkosti a objemové hmotnosti odebraných vzorků půdy ze dne 22. 8. 2016.	62
Tab. č. 14 - srovnání průměrné kumulativní infiltrace v 1. minutě dosažené na zhutněných a nezhutněných půdách během dvou kampaní.	65

11. Přílohy – fotodokumentace



Obr. č. 29 - celkový pohled na zájmovou lokalitu. (Redl, 2016).



Obr. č. 30 - infiltrace ve stopě těžební techniky. (Redl, 2016).



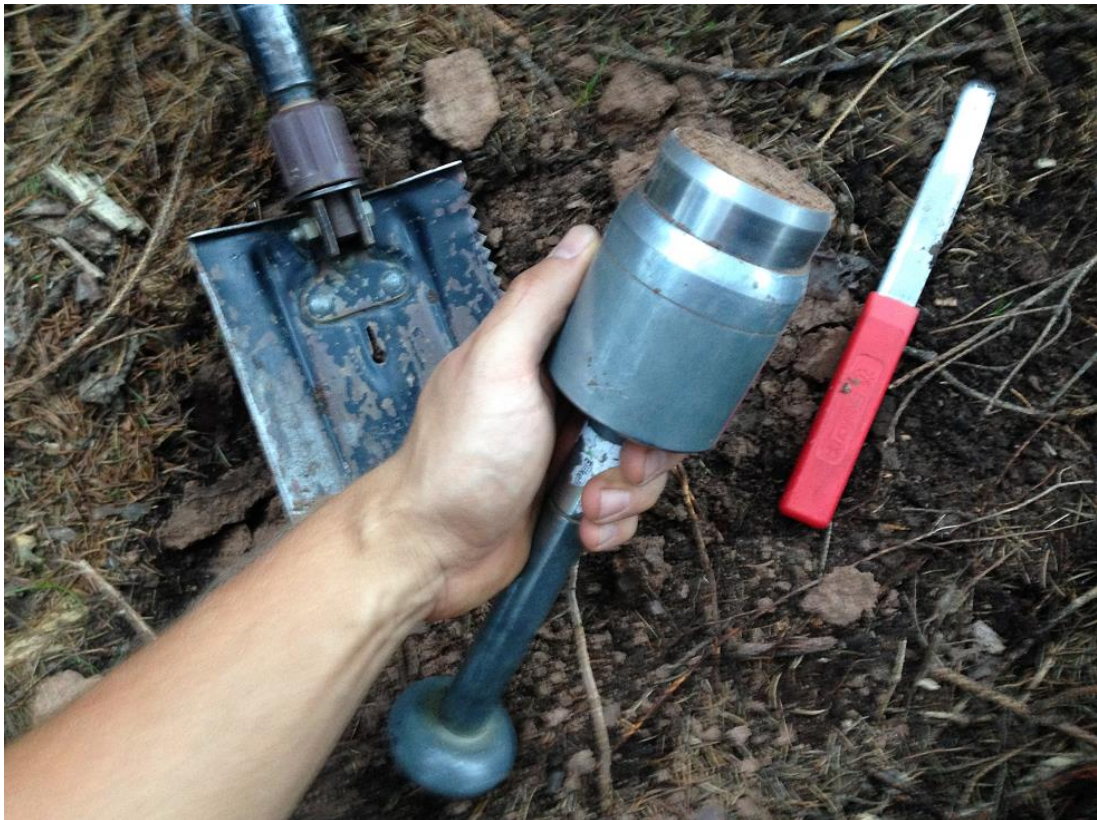
Obr. č. 31 - infiltrace na zhutněném povrchu. (Redl, 2016).



Obr. č. 32 - před započítím infiltrace na nezhutněném povrchu. (Redl, 2016).



Obr. č. 33 - zapuštění infiltračního válce a odběr vzorků půdy. (Redl, 2016).



Obr. č. 34 - odběr půdního vzorku. (Redl, 2016).



Obr. č. 35 - odečet poklesu hladiny. (Redl, 2016).



Obr. č. 36 - infiltrace na nezhutněném povrchu. (Redl, 2016).



Obr. č. 37 - vzorek č. 52 (nezhutněné půda) před sušením. (Redl, 2016).



Obr. č. 38 - vzorek č. 52 po vysušení. (Redl, 2016).

Zhutněné půdy z dalších lokalit



Obr. č. 39 - eroze, důsledek zhutnění. (Štefan Vaľo, 2017).



Obr. č. 40 - eroze na lesní svážnici. (Štefan Vaľo, 2017).



Obr. č. 41 - zmrzlá zhutněná půda. (Redl, 2017).



Obr. č. 42 - povrchový odtok na jaře 2017. (Redl, 2017).