

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra zemědělských strojů



Vliv zemědělských technologií na vlastnosti půdy

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Martin Bárta

Vedoucí práce: Ing. Jan Chyba, Ph.D.

Praha 2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Martin Bárta

Zemědělská technika

Název práce

Vliv zemědělských technologií na vlastnosti půdy

Název anglicky

The impact of agricultural technologies on soil properties

Cíle práce

Na základě literární rešerše týkající se zemědělských technologií, zpracování půdy, zhutnění a utužení půdy provést vyhodnocení vlivu technologií na půdu.

Student se zaměří na vybranou zemědělskou technologii a následně vyhodnotí vliv této technologie na vybrané vlastnosti půdy.

Metodika

Zpracovat literární rešerši a posoudit stávající technologie a jejich vliv na půdu a uvést vhodné aplikace těchto technologií. Dále, posoudit vliv vybraných technologií na vybrané vlastnosti půdy a její stav.

Předpokládaná osnova práce:

1. Úvod
2. Literární rešerše
3. Vyhodnocení
4. Diskuse
5. Závěr

Seznam literatury

Přílohy

Doporučený rozsah práce

40-60

Klíčová slova

vlastnosti půdy, zemědělské technologie, zhutnění půdy

Doporučené zdroje informací

- CARTER, M R. – GREGORICH, E G. – CANADIAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE. *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton, Fla.: Taylor & Francis [distributor], 2008. ISBN 978-0-8493-3586-0.
- CHYBA, J. – KUMHÁLA, F. – ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. STAVEBNÍ FAKULTA. *Vliv technologie řízeného pohybu strojů po pozemcích na fyzikální vlastnosti půdy a výnosy plodin [rukopis]*. Disertační práce. Praha: 2013.
- KUMHÁLA, F. – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. KATEDRA ZEMĚDĚLSKÝCH STROJŮ. *Zemědělská technika : stroje a technologie pro rostlinnou výrobu*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007. ISBN 978-80-213-1701-7.
- KUTÍLEK, M. – NIELSEN, D R. *Soil : the skin of the planet earth*. Dordrecht ; Heidelberg ; New York ; London: Springer, 2015. ISBN 978-9401797887.
- KUTÍLEK, M. *Půda planety Země*. Praha: Dokořán, 2012. ISBN 978-80-7363-212-0.
- MCKYES, E. *Agricultural Engineering Soil Mechanics*. Amsterdam: Elsevier, 1989. ISBN 0-444-88080-1.
- MCKYES, E. *Soil cutting and tillage*. Amsterdam: Elsevier, 1985. ISBN 0-444-42548-9.
- MORGAN, R P C. *Soil erosion and conservation*. Malden: Blackwell, 2005. ISBN 1-4051-1781-8.
- NOVÁK, P. – HŮLA, J. – ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. STAVEBNÍ FAKULTA. *Zpracování půdy při zaměření na omezení vodní eroze půdy při pěstování vybraných polních plodin = Soil tillage focusing on the reduction of water erosion of soil in the cultivation of selected field crops*. Disertační práce. Praha: 2014.
- WHITE, R E. *Principles and practice of soil science : the soil as a natural resource*. Oxford ; Malden: Blackwell Science, 2006. ISBN 0-632-06455-2.
-

Předběžný termín obhajoby

2022/2023 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Jan Chyba, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zemědělských strojů

Elektronicky schváleno dne 2. 2. 2022

prof. Dr. Ing. František Kumhála

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 27. 03. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma: Vliv zemědělských technologií na vlastnosti půdy vypracoval samostatně a použil jen zdrojů a pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

dne: _____

podpis: _____

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Chybovi, Ph.D. za odborné rady a dohled nad vypracováním této práce. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Petru Novákovi, Ph.D. za poskytnutí pokusného pozemku. V neposlední řadě bych rád poděkoval rodině za podporu ve studiu.

Abstrakt: Cílem této diplomové práce je vyhodnotit vliv zemědělských technologií na vybrané vlastnosti půdy. V rešeršní části práce je nejprve obecně pojednáno o půdě, jsou popsány její fyzikální vlastnosti, infiltrační schopnosti a metody jejich měření. Dále jsou představeny některé zemědělské technologie zpracování půdy a jsou posouzeny dopady používání těchto technologií na vybrané fyzikální a infiltrační vlastnosti půdy. Praktická část práce se zabývá provedeným polním pokusem na pozemku u obce Nesperská Lhota. Tento pozemek byl v minulosti rozdělen na dvě části, z nichž první je v současné době obhospodařována orebnými technologiemi a na druhé je udržován trvalý travní porost (TTP). Při pokusu byla část pozemku s TTP využívána jako souvrať pro zemědělskou techniku, která obhospodařovala část pozemku s orebným způsobem hospodaření. Cílem pokusu bylo zjistit, jaký vliv na vlastnosti půdy, na daném pozemku, by měl tento systém hospodaření. Naměřené hodnoty byly graficky a statisticky zpracovány v programu Statistica. Z výsledků měření vyplývá, že na části pozemku s TTP, která byla používána jako souvrať, došlo ke snížení schopnosti půdy rychle infiltrovat vodu, k omezení neproduktivního výparu, k nárůstu penetračního odporu a objemové hmotnosti půdy.

Klíčová slova: vlastnosti půdy, zemědělské technologie, zhutnění půdy

The impact of agricultural technologies on soil properties

Summary: The aim of this diploma thesis is to evaluate impact of agricultural technologies on soil properties. The first theoretical part of this thesis deals with soil in general and its selected physical properties, infiltration ability and methods of their measurement are described. Further is presented some agricultural technologies of tillage and the impact of using these technologies on selected physical soil properties. The practical part of this theses deals with a field experiment near Nesperská Lhota. In the past, the field was divided into two parts, on which different agricultural technologies are used. On the first part of the field conventional tillage are used. On the second part of the field permanent grass plot are established. Selected soil properties were investigated on these field to determine the soil impacts of these different technologies on a given field. Measured values were graphically and statistically processed in the Statistica program. On a plot with permanent grass was measured lower non-productive evaporation, lower soil infiltration capacity, higher penetration resistance and bulk density.

Key words: soil properties, agricultural technologies, soil compaction

Obsah

| | |
|---|----|
| 1. Úvod..... | 1 |
| 2. Cíl práce | 3 |
| 3. Půda..... | 4 |
| 3.1. Půdní voda | 4 |
| 3.2. Zhutňování půdy..... | 5 |
| 4. Fyzikální vlastnosti půdy..... | 6 |
| 4.1. Objemová hmotnost | 6 |
| 4.2. Pórovitost..... | 7 |
| 4.3. Penetrační odpor půdy | 8 |
| 5. Infiltrační schopnosti půdy | 9 |
| 5.1. Nasycená hydraulická vodivost..... | 10 |
| 5.2. Nenasycená hydraulická vodivost..... | 13 |
| 6. Zpracování půdy | 16 |
| 6.1. Orebné zpracování půdy..... | 17 |
| 6.1.1. Podmítka..... | 17 |
| 6.1.2. Orba | 18 |
| 6.1.3. Předseťová příprava | 20 |
| 6.2. Bezorebné zpracování půdy..... | 20 |
| 6.2.1. Minimalizační zpracování půdy | 20 |
| 6.2.2. Půdoochranné zpracování půdy | 21 |
| 6.2.3. Přímé setí..... | 22 |
| 7. Metodika..... | 23 |
| 7.1. Odběr a rozbor neporušeného půdního vzorku | 24 |
| 7.2. Měření penetračního odporu | 25 |
| 7.3. Metoda nasycené hydraulické vodivosti | 25 |

| | |
|--|----|
| 7.4. Metoda nenasycené hydraulické vodivosti | 26 |
| 8. Výsledky měření | 27 |
| 8.1. Neporušené půdní vzorky | 27 |
| 8.1.1. Vlhkost | 27 |
| 8.1.2. Objemová hmotnost..... | 28 |
| 8.1.3. Pórovitost celková | 29 |
| 8.1.4. Pórovitost kapilární | 30 |
| 8.1.5. Pórovitost nekapilární | 31 |
| 8.2. Penetrační odpor | 32 |
| 8.3. Nasycená hydraulická vodivost..... | 34 |
| 8.4. Nenasycená hydraulická vodivost..... | 35 |
| 9. Diskuze..... | 36 |
| 9.1. Neporušené půdní vzorky | 36 |
| 9.2. Penetrační odpor | 38 |
| 9.3. Nasycená hydraulická vodivost..... | 38 |
| 9.4. Nenasycená hydraulická vodivost..... | 39 |
| 10. Závěr | 40 |
| Seznam použité literatury | 42 |
| Seznam veličin a zkratk..... | 49 |
| Seznam obrázků..... | 51 |
| Seznam tabulek | 52 |

1. Úvod

Zemědělství, jako jedno z nejstarších činností, které hrálo nezastupitelnou roli ve vývoji člověka a lidské společnosti, prošlo obdobně jako většina odvětví světového hospodářství, v posledních mnoha letech, výraznou proměnou z hlediska intenzifikace a vlivu nově aplikovaných technologií. Avšak stále se zde nachází mnoho faktorů, které ve větší míře ovlivnit nelze, a to počasí a půdu. Zejména proto právě s půdou, jakožto základním přírodním zdrojem, který se utváří stovky let, musí být zacházeno s úctou a maximální šetrností.

Se snahou zvýšit biodiverzitu v krajině a minimalizovat půdní erozi vešlo v platnost nařízení nadnárodních organizací na omezení výměry půdních celků, které jsou oseté monokulturou a do budoucna se plánuje toto omezení ještě více zpřísnit. Povede však skutečně plošné omezení výměry například k omezení eroze? V některých lokalitách určitě ano, ale s tímto nařízením se jistě umocní i některé další současné problémy. Například zmenšení výměry povede nepochybně k opačnému trendu současnosti, a to ke zmenšování pracovního záběru a velikosti strojů, čímž pochopitelně nastane zvýšení počtu přejezdů techniky po pozemku, zejména na souvratích, což povede nesporně k většímu zhutnění půdy a následnému zhoršení infiltrace vody do půdy.

Zpracování půdy je bezpochyby energeticky nejnáročnější zemědělská operace, ale přitom je to také jeden ze způsobů, pomocí kterých lze v krajině efektivně zadržovat vodu. Čeští zemědělci si toto vše velice dobře uvědomují, a právě proto se k půdě snaží chovat maximálně šetrně. Velice hojně se tedy u nás rozšiřují metody omezující výše zmíněná negativa, jako například: pásové zpracování půdy, přímé setí, setí do mulče, používá se biopásů, souvratě se osévají plodinami, které omezují povrchový odtok a erozi, do půdy se zapravuje organická hmota apod.

Pro letošní rok se připravují nové dotační podmínky přímých plateb. Pro splnění podmínek dobrého a environmentálního stavu (DZES 4) se bude muset na souvratích podél vodních toků založit ochranný pás o minimální šířce 3 m a pro půdní bloky se svahem více jak 7° o minimální šířce 3 + 25 m. Tento pás bude muset být osetý jinou než hlavní plodinou z daného seznamu a nebudou se na něm moci aplikovat jakákoliv hnojiva. Jako hlavní důvod pro zřizování těchto pásů je uváděno omezení půdní eroze, kterou tento ochranný pás jistě zmírní, ale neumocní

se tímto opatřením například ostatní výše uvedené problémy, se kterými se zemědělství v současné době potýká?

Z této myšlenky, kdy jsou souvratě osety jinou plodinou, vychází praktická část této diplomové práce. Pokusný pozemek byl v minulosti rozdělen na dvě části, z nichž první je v současné době obhospodařována orebnými technologiemi a na druhé je udržován trvalý travní porost (TTP). Při pokusu byla část pozemku s TTP využívána jako souvrať pro zemědělskou techniku, která obhospodařovala část pozemku s orebným způsobem hospodaření. Cílem pokusu bylo zjistit, jaký vliv na vlastnosti půdy, na daném pozemku, by měl tento systém hospodaření.

2. Cíl práce

Na základě literární rešerše týkající se zemědělských technologií, zpracování půdy, zhutnění a utužení půdy provést vyhodnocení vlivu technologií na půdu.

Student se zaměří na vybranou zemědělskou technologii a následně vyhodnotí vliv této technologie na vybrané vlastnosti půdy.

Dílčí cíle práce:

- Zhodnotit vliv vybraných zemědělských technologií na fyzikální vlastnosti půdy.
- Zhodnotit vliv vybraných zemědělských technologií na infiltrační schopnosti půdy.

Vědecké otázky:

- a) Má opakovaný přejezd techniky po pozemku při dané zemědělské technologii vliv na fyzikální vlastnosti a infiltrační schopnosti půdy?
- b) Mají rozdílné zemědělské technologie různý vliv na fyzikální vlastnosti a infiltrační schopnosti půdy?
- c) Lze použitím rozdílné zemědělské technologie na souvratích omezit zhutnění půdy a zlepšit její infiltrační schopnosti?

3. Půda

Půda vzniká působením klimatu, vegetace a půdních organismů na mateční substrát, kterým může být hornina nebo její zvětralina přenesená vodou nebo větrem (KUTÍLEK, 2012). Půda je životním prostředím půdních organismů, biotopem planě rostoucí vegetace a slouží k pěstování užitkových rostlin. Je regulátorem koloběhu látek, může fungovat jako úložiště, ale i zdroj potenciálně rizikových látek, je to dynamický a stále se vyvíjející živý systém. Základní a rozhodující vlastností půdy je její úrodnost. Rozlišujeme úrodnost přirozenou a skutečnou. Přirozená úrodnost je dána přirozenými podmínkami, v nichž se půda vytvořila nedotčena lidskou činností a závisí zejména na zrnitosti, celkové zásobě živin a edafonu. Skutečná úrodnost zahrnuje z části úrodnost přirozenou, ale je převážně vytvořena člověkem, a proto je zpravidla vyšší než úrodnost přirozená (ŠNOBL et al., 2005).

3.1. Půdní voda

Obsah vody v půdě je hlavní parametr ovlivňující růst rostlin. Aktuální zásoba vody v půdě závisí především na úhrnu srážek a výšce hladiny podzemních vod. Důležitá je však vlastnost půdy zadržovat vodu, jenž závisí především na textuře a struktuře (SÁŇKA et al., 2018). Na vodu v půdě působí řada sil, které jsou podmíněny typy porézního prostředí a podle kterých lze půdní vodu rozdělit na tři formy (PAVLŮ, 2018):

- volná voda (též gravitační, která není pevně vázaná na pevnou složku půdy),
- voda kapilární (její pohyb je řízen kapilárními silami),
- voda adsorpční (která je pevně vázaná a nedostupná).

Vlhkost půdy se pohybuje ve velkém rozmezí od suché, po nasycenou a je v čase velmi proměnlivá. Tuto vlhkost popisují charakteristiky vyjadřující její určité konkrétní stavy, které se nazývají hydrolimity a mezi které patří (SÁŇKA et al., 2018):

- plná vodní kapacita (všechny póry jsou zaplněny vodou, je rovna pórovitosti),
- maximální kapilární vodní kapacita (schopnost půdy zadržet vodu pro potřeby vegetace),
- retenční vodní kapacita (ustálený stav vlhkosti, voda je pod vlivem kapilárních sil),
- bod vadnutí (vegetace již není schopna překonat síly, kterými jsou molekuly vody poutány).

3.2. Zhutňování půdy

Zhutňování půdy (pedokompakce) může vznikat činností člověka, nebo zcela přirozeně sesedáním půdy či jinými vnějšími vlivy. Jedná se o jev, kdy dochází ke změně prostorového uspořádání půdy a to tak, že dochází k nárůstu objemové hmotnosti, ke snížení pórovitosti a ke snížení schopnosti půdy infiltrovat a zadržovat vodu. Z pohledu ochrany půdy a zachování úrodnosti je podstatnější zhutnění půdy, které vzniká nadměrnými přejezdy zemědělské techniky po pozemku (PAVLŮ, 2018).

S rostoucí intenzifikací zemědělství v posledních letech se samozřejmě zvýšila i výkonnost strojů, a tím pádem i jejich velikost, což má pochopitelně negativní dopad na zhutňování půd, a to hlavně v podorničních vrstvách. Problém zhutňování podorničí je spojen zejména s konvenčním systémem zpracování půdy pomocí radličného pluhu, při kterém dochází ke zpracování půdy tzv. na jednu hloubku. Ovšem riziko zhutnění je v tomto případě závislé především na půdních podmínkách a druhu půdy (COOPER et al., 2020). Písčité půdy jsou obecně náchylné ke zhutnění méně než půdy jílovité (PAVLŮ, 2018).

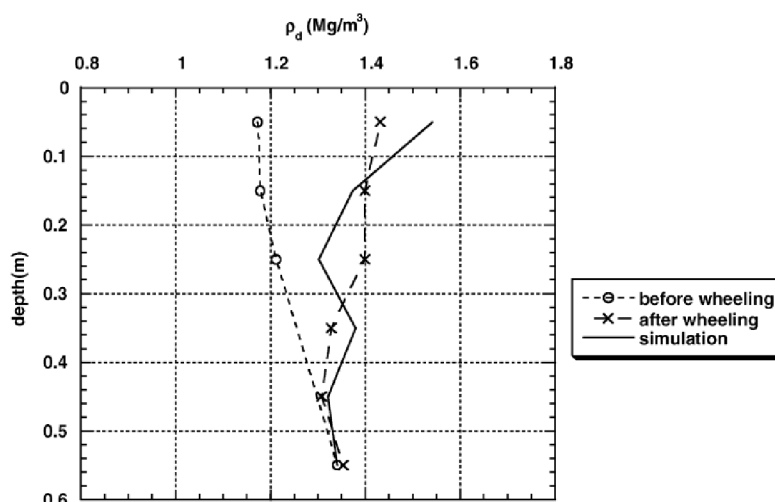
Nadměrným zhutněním se zvyšuje odpor půdy vůči jejímu zpracování a tím pádem dochází ke zvýšení energetické náročnosti na její obdělávání. Při následném odstranění zhutněné půdy hloubkovým kypřičem se energetická náročnost ještě dále zvyšuje. JAVŮREK et al. (2008) uvádí, že se za posledních 30 let v důsledku zhutnění těžkých a středně těžkých půd zvýšil orební odpor o 30 % a na souvratích až o 80 %.

Zhutněním půdy se při různých technologiích zpracování půdy zabýval BOGUNOVIC et al. (2018), který zjistil, že v případě konvenčního zpracování byla objemová hmotnost půdy v hloubce do 10 cm nižší než v případech, kdy byly použity technologie přímého setí a hloubkového kypření. Naopak v podorniční hloubce 30–40 cm vykazovala objemová hmotnost vyšší hodnoty v případě konvenčního zpracování. Porovnáním konvenčního zpracování půdy a systému CTF se ve své práci zabýval i CHYBA (2013), který při pokusu zjistil, že zhutnění půdy má významný vliv na hodnoty penetračního odporu. Při prvním přejezdu za kontrolovaných podmínek se hodnoty penetračního odporu zvýšili více než čtyřnásobně a při opakovaném přejezdu dokonce více než desetinásobně.

4. Fyzikální vlastnosti půdy

4.1. Objemová hmotnost

Objemová hmotnost je obecně definována jako poměr hmotnosti půdy k jejímu objemu v neporušeném stavu. Uvádí se v $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. V případě půdy, která je výrazně pórovitá, je vždy objemová hmotnost znatelně nižší než měrná hmotnost. Její hodnoty jsou ovlivněny výskytem půdních pórů, mezer, zrnitostí, strukturou půdy a vlhkostí. Objemová hmotnost půdy je důležitou veličinou k posouzení zhutnění půdy (SÁŇKA et al., 2018). To potvrdil i DICKSON et al. (1996), který se zabýval sledováním tlaků na půdu zemědělskými stroji nebo DEFOSSEZ et al. (2002), jenž zjistil, že objemová hmotnost půdy se v závislosti na přejezdech zemědělské techniky v různých hloubkách mění (obrázek 1).



Obrázek 1. Objemová hmotnost půdy (ρ_d) v závislosti na hloubce (depth), porovnání simulace (simulation) a modelu (before wheeling – před přejezdem, after wheeling – po přejezdu) (DEFOSSEZ et al., 2002)

Objemová hmotnost půdy se zpravidla stanovuje jako objemová hmotnost redukovaná, tedy po vysušení vzorku. Neporušený půdní vzorek se odebírá do Kopeckého válečků o objemu 100 cm^3 . Nízký poměr mezi objemovou hmotností a měrnou hmotností indikuje vysoký stupeň zhutnění půdy. Vysoký poměr, daný nízkou objemovou hmotností, naopak indikuje vysokou pórovitost půdy, a tedy menší míru zhutnění. Obecně je objemová hmotnost nižší u půd organických a vyšší u půd minerálních. To je dáno nejen nižší hmotností vlastních částic, ale zejména výskytem většího množství půdních pórů a mezer v organickém materiálu (SÁŇKA et al., 2018). Objemová hmotnost minerálních půd kolísá mezi $0,8 - 1,8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, u organických půd většinou mezi $0,2 - 0,3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (POKORNÝ et al., 2007).

4.2. Pórovitost

Pórovitost je veličina, která určuje poměr mezi objemem pórů k celkovému objemu půdy. Čím více je půda kypřejší, tím více obsahuje pórů a pórovitost v takových případech může dosahovat až hodnoty 70 %. U půd zhutněných se naopak pórovitost pohybuje okolo hodnoty 30 %. Běžné hodnoty pórovitosti se pohybují v rozmezí 40-50 % pro ornici a 30-40 % pro podornici (PAVLŮ, 2018). Půdní póry lze rozdělit do následujících tří skupin (SÁŇKA et al., 2018):

- nekapilární (vyplněny vzduchem, voda z nich odtéká),
- semikapilární (vyplněny vodou i vzduchem),
- kapilární (zaplněny vodou, která je zadržována vztlínáním), viz (tabulka 1).

Tabulka 1. Rozdělení půdních pórů podle jejich zastoupení a velikosti (SÁŇKA et al., 2018) (upraveno: Bárta)

| Druh pórů | Velikost [μm] | Lehká půda [% obj.] | Střední půda [% obj.] | Těžká půda [% obj.] |
|---------------|---------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| nekapilární | >50 | 20-30 | 10-15 | 5-15 |
| semikapilární | 0,2-50 | 5-15 | 20-25 | 15-20 |
| kapilární | <0,2 | 5-10 | 15-20 | 25-35 |
| pórovitost | - | 35-45 | 45-55 | 50-70 |

Optimálně by měli kapilární póry tvořit 2/3 pórovitosti (tento poměr je však vždy závislý na daném druhu půdy). Zbytek by měl připadnout rovným dílem mezi póry nekapilární a semikapilární. Pokud by bylo kapilárních pórů více, mohlo by to znesnadnit infiltraci vody do půdy a při srážkách by se následně zvýšil povrchový odtok, což by mohlo vést k nadměrné erozi a k nedostatečné zásobě vody pro vegetaci. Semikapilární póry usnadňují vodě lépe pronikat do půdy a tím, že ji dočasně zadržují, také přispívají k jejímu vnikání do větších hloubek. Póry nekapilární vodě umožňují do půdy pronikat, při jejich nadměrném zastoupení se vlhkost na povrchu půdy příliš nezvyšuje a vsakující se voda prostupuje takovou rychlostí, že nedochází k nasycení kapilárních pórů, zásoba vody je tedy velmi nízká a ztrácí se z dosahu kořenů rostlin (VALLA et al., 2002).

To, jaký vliv má zhutnění půdy na pórovitost, zkoumala ALAKUKKU (1996). Při víceletém polním pokusu naměřila, že zhutněním jílovité půdy, které způsobil přejezd techniky, se snížila pórovitost až do hloubky 0,5 m. MATEO-MARÍN et al. (2022) zkoumali strukturu půdy, na kterou byla aplikována kejda a zjistili, že její aplikace v agronomických dávkách může pomoci zlepšit strukturu půdy i množství pórů v půdě.

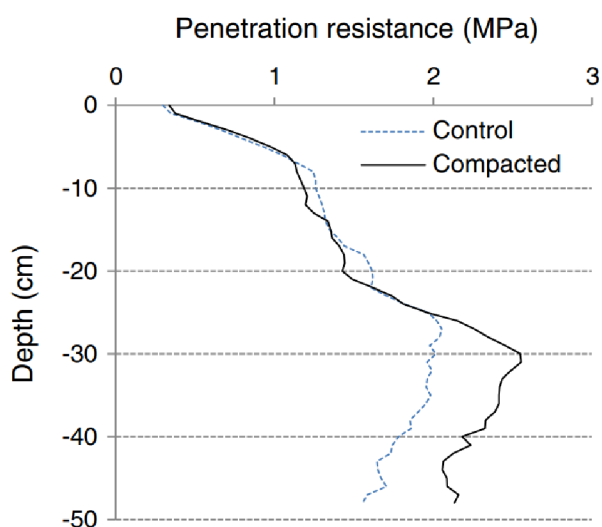
4.3. Penetrační odpor půdy

Penetrační odpor půdy je nepřímo měřitelná fyzikální veličina, která úzce souvisí se zhutněním půdy. V polních podmínkách bývá penetrační odpor měřen zpravidla půdním penetrometrem, který poskytuje snadné a rychlé údaje o pevnosti půdy. Odpor proti průniku kužele penetrometru do půdy je způsoben základními vlastnostmi jako: pevnost půdy ve smyku, stlačitelnost a tření (DEXTER et al., 2007). GAO et al. (2016) uvádí, že penetrační odpor má v zemědělství značný význam, neboť dobře předpovídá schopnost, jakou budou moci kořeny plodin pronikat do půdy.

Penetračním odporem se ve své práci zabýval například UNGER (1996), který zaznamenával jeho hodnoty v různých hloubkách (5, 15, 25, 35 a 45 cm) při rozdílném způsobu zpracování půdy (orba a redukované zpracování půdy) v kolejovém řádku a na nepřejeté ploše. Hodnoty penetračního odporu byly výrazně větší v kolejovém řádku v hloubkách 5, 15 a 25 cm. V hloubkách 35 a 45 cm byly hodnoty penetračního odporu taktéž větší v prostoru kolejového řádku, avšak rozdíly nebyly již statisticky významné.

ZHAO et al. (2022) sledoval prostorovou variabilitu hodnot penetračního odporu taktéž při různých způsobech zpracování půdy v hloubce 0-60 cm. Při jeho pokusu se obecně hodnoty penetračního odporu značně snížily v případech, kdy byla použita orba a hloubkové kypření. V případě orby se však hodnoty penetračního odporu zvyšovaly v hloubce 30-40 cm, což by vypovídalo o vzniku utužené podorniční vrstvy. V případě, kdy byl použit ke zpracování půdy rotační kypřič se hodnoty penetračního odporu zvyšovaly již od hloubky 10 cm. Z dlouhodobého hlediska, byly hodnoty penetračního odporu nejnižší v případech, kdy bylo použito hloubkového kypření.

ETANA et al. (2013) provedl polní pokus, ve kterém se zabýval zhutněním půdy na ploše, která byla 14 let před měřením 4x přejeta sklízecem cukrové řepy. Pro srovnání provedl měření i na kontrolní ploše, která nebyla sklízecem přejeta. Při vyhodnocení pokusu zjistil, že hodnoty penetračního odporu nevykazovaly do hloubky 28 cm statisticky významné rozdíly, což bylo způsobeno každoročním zpracováním půdy a přírodními procesy. V hloubce 28-48 cm byl však penetrační odpor vyšší v případě přejeté plochy (obrázek 2). Zhutnění podorniční vrstvy na ploše, která byla 14 let před měřením 4x přejeta sklízecem cukrové řepy se tak ukázalo jako trvalé.



Obrázek 2. Penetrační odpor půdy (penetration resistance) do hloubky (depth) 48 cm na kontrolní ploše (control) a přejeté ploše (compacted) (ETANA et al., 2013)

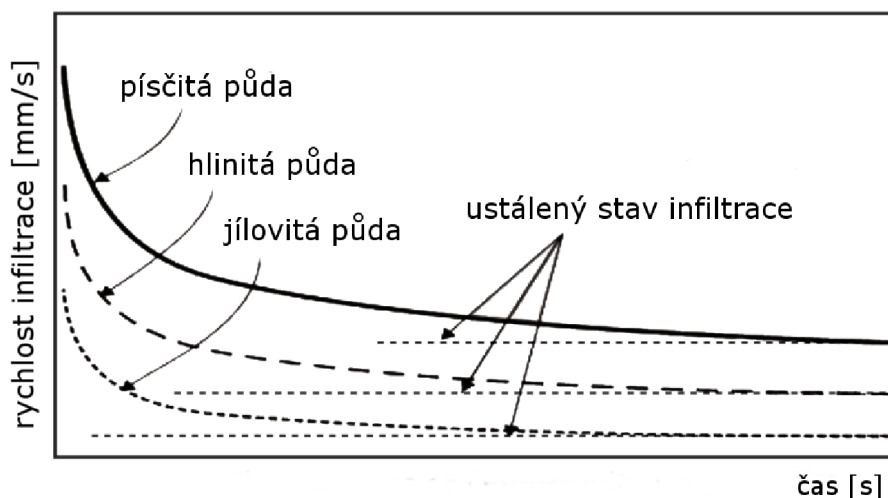
5. Infiltrační schopnosti půdy

Infiltrační schopnost lze definovat jako rychlost, kterou se vsakuje voda do půdy. Může být měřena za deště, nebo z výtopy povrchu. Jedná se o určitou charakteristiku půdního profilu za specifických podmínek. Z rychlosti infiltrace lze vypočítat hydraulickou vodivost prostředí (VALLA et al., 2002).

Vstup vody do půdy je ovlivněn gravitačními silami a silami, kterými působí na vodu půdní matrice. Proto se vstup vody do půdy může uskutečnit ve vertikálním i horizontálním směru. Infiltrací označujeme zpravidla prostup vody směrem dolů. Proniká-li voda do suché půdy, lze pozorovat smáčenou vrstvu, nazývanou také „wet front“. Síly, kterými působí půdní matrice na smáčenou vrstvu nelze v současné době přesně změřit. Lze však měřit hloubku a tvar mokré vrstvy a množství infiltrované vody. Naměřené hodnoty infiltračních schopností půdy mají poměrně velkou vypovídající hodnotu, nejen o množství infiltrované vody, ale i o koloidních částicích a živinách, které jsou v půdě obsaženy (KIRKHAM, 2005).

Infiltrace vody do půdy je obvykle vyšší na začátku doby smáčení povrchu suché půdy, ale časem poměrně rychle klesá a po několika hodinách je infiltrace téměř konstantní (obrázek 3). To je způsobeno zvyšujícím se odporem proti prostupu smáčené vrstvy, který zapříčiňují zejména bobtnající jílnaté částice a rostoucí délka průtokových kanálů. Písčité půdy mají na rozdíl od půd jílovitých vysokou infiltrační schopnost (protože se půda příliš nezanáší jílnatými

částicemi), ale nízkou polní vodní kapacitu. Jílovité půdy mají naopak nízkou infiltrační schopnost, ale vysokou polní vodní kapacitu (CHEREMISINOFF, 1997).



Obrázek 3. Příklad infiltračních křivek pro různé druhy půd (MILLER, 1994) (upraveno: Bárta)

5.1. Nasycená hydraulická vodivost

Nasycená hydraulická vodivost (K_{fs}) je schopnost, s jakou nasycené půdní póry propouštějí vodu, nebo taktéž rychlost proudění vody, při které by se dané množství vody pohybovalo vertikálně jednotkovou plochou půdy, při aktuálním jednotkovém gradientu vlhkosti (NSSH, 2021). BAGARELLO et al. (2004) tvrdí, že nasycená hydraulická vodivost je jedna z nejdůležitějších vlastností určujících infiltraci vody do půdy, povrchový odtok, vyplavování pesticidů a distribuci toxických látek do podzemních vod. Tento autor dále uvádí, že nasycená hydraulická vodivost silně závisí na struktuře půdy a naměřené hodnoty tak mohou být v různých časech značně odlišné. Z důvodu měnících se klimatických podmínek je proto potřeba provádět měření v polních podmínkách tak, aby se neporušilo funkční spojení vzorku s okolní půdou. A tak tento autor s využitím dřívějších prací jiných autorů vyvinul metodu Simplified Falling-Head (SFH), k jejímuž provedení ve srovnání s ostatními složitějšími a zdlouhavějšími metodami postačí pouze malý prstenec, malý objem vody, vlhkoměr a stopky.

BAGARELLO et al. (2006) vycházel z Philipovi rovnice, který upravil původní Greenovu a Amptovu rovnici odvozenou roku 1911 a vytvořil tak jednorozměrnou kumulativní infiltraci I [m] pro SFH:

$$t = \frac{\Delta\theta}{K_{fs}(1-\Delta\theta)} \left[\frac{I(t)}{\Delta\theta} - \frac{H_0 - \psi_f}{1-\Delta\theta} \ln \left(1 + \frac{(1-\Delta\theta)I(t)}{\Delta\theta(H_0 - \psi_f)} \right) \right] \quad (1)$$

kde:

- t – je čas [s]
- $\Delta\theta$ – rozdíl mezi polním nasyceným (θ_{fs}) a počátečním (θ_i) objemovým obsahem vody v půdě [-]
- K_{fs} – nasycená hydraulická vodivost [$m \cdot s^{-1}$; $mm \cdot h^{-1}$]
- H_0 – výška hladiny v čase $t=0$ [m]
- ψ_f – tlaková výška na smáčené straně [m]

Hodnota ψ_f může být nahrazena parametrem α^* [m^{-1}], pokud bude použita následující rovnice:

$$\alpha^* = \frac{K_{fs}}{\phi_m} = -\frac{1}{\psi_f} \quad (2)$$

kde:

- ϕ_m – je polní nasycený potenciál matricového toku [$m^2 \cdot s^{-1}$]

Poté lze zapsat rovnici (1) následovně:

$$t = \frac{\Delta\theta}{K_{fs}(1-\Delta\theta)} \left[\frac{I(t)}{\Delta\theta} - \frac{H_0 + \frac{1}{\alpha^*}}{1-\Delta\theta} \ln \left(1 + \frac{(1-\Delta\theta)I(t)}{\Delta\theta \left(H_0 + \frac{1}{\alpha^*} \right)} \right) \right] \quad (3)$$

BAGARELLO et al. (2006) použil rovnici (3) a zjednodušil metodu SFH pro stanovení K_{fs} . Tato metoda spočívá v rychlé aplikaci známého objemu vody V [m^3] na povrch půdy, který je ohraničený malým prstencem pevně zasunutým do půdy. Zaznamenává se čas t_a [s] od doby, kdy je voda aplikována na povrch půdy, do okamžiku, kdy již plocha povrchu půdy A [m^2] není pokryta vodou. Pokud se uvažuje: $t=t_a$ a $I(t_a)=H_0=D$, pak platí, že $D=V/A$ [m] je hloubka vody odpovídající objemu vody V . Rovnice (3) se pak dá zapsat ve tvaru:

$$K_{fs} = \frac{\Delta\theta}{(1-\Delta\theta)t_a} \left[\frac{D}{\Delta\theta} - \frac{\left(D + \frac{1}{\alpha^*}\right)}{1-\Delta\theta} \ln \left(1 + \frac{(1-\Delta\theta)D}{\Delta\theta \left(D + \frac{1}{\alpha^*}\right)} \right) \right] \quad (4)$$

K výpočtu hodnoty K_{fs} podle rovnice (4) je nutné naměřit t_a , $\Delta\theta$ a odhadnout parametr α^* . Z teoretického hlediska neexistují pro oblast provádění experimentu žádné limity, ale existují praktická omezení. Tím že jsou známy $\Delta\theta$ a hloubka vložení prstence do půdy, je možné určit objem pórů v oblasti vymezené prstencem a aby byl zajištěn jednorozměrný tok, je vhodné zvolit objem vody menší nebo roven objemu pórů v této oblasti. Protože rovnice (4) zahrnuje gravitační složku, figuruje zde pouze časové omezení, které může nastat pouze je-li pod prstencem vlhčí vrstva půdy nebo dojde-li ke trojrozměrnému toku (BAGARELLO et al., 2006).

Hodnoty parametru α^* stanovil pro různé podmínky ELRICK et al. (1989) (tabulka 2), který zjistil, že hodnoty nasycené hydraulické vodivosti nejsou silně závislé na volbě tohoto parametru a pokud jsou dodržovány všechny ostatní definované postupy, potom volba parametru α^* vede vždy k rozumným odhadům K_{fs} . Pokud je však nutné z různých důvodů velmi přesné stanovení K_{fs} , lze hodnotu parametru α^* stanovit laboratorně.

Tabulka 2. Hodnoty parametru α^* stanovené pro různé struktury a textury půd (ELRICK et al., 1989) (upraveno: Bárta)

| | |
|--------------------------------|--|
| $\alpha^* = 1 \text{ m}^{-1}$ | Zhutnělé jíly (jezerní a mořské sedimenty, apod.). |
| $\alpha^* = 4 \text{ m}^{-1}$ | Primárně nestrukturované půdy s jemnou texturou. |
| $\alpha^* = 12 \text{ m}^{-1}$ | Většina strukturovaných půd od jílovitých až po jílovitohlinité a také středně nestrukturované jemné písčité a hlinitopísčité půdy. Volba pro většinu půd. |
| $\alpha^* = 36 \text{ m}^{-1}$ | Hrubé šterkovité písky, vysoce strukturované půdy s velkými makropóry a trhlinami. |

DEXTER et al. (2004) zkoumal nasycenou hydraulickou vodivost, která byla měřena ve zpracovávané vrstvě půdy a v podorničí. Tento autor zjistil, že naměřené hodnoty objemové hmotnosti a logaritmu K_{fs} ve zpracovávané vrstvě půdy mezi sebou poměrně dobře lineárně korelují. V podorničí však hodnoty K_{fs} leží zpravidla vždy nad regresní přímkou, což autor přisuzuje přítomnosti biopórů, zejména pak kořenovým kanálkům. Nižší hodnoty K_{fs} pro ornici autor naopak přikládá ničení těchto biopórů zpracováním půdy. Dále tento autor zjistil, že pokud dojde k hloubkovému kypření utužené podorniční vrstvy a tato vrstva bude v budoucnu

opět ztuhne, pak může dojít ke snížení K_{fs} na hodnoty nižší než před provedeným hloubkovým kypřením, což by mohlo mít vážné důsledky v podobě omezeného vsakování vody a následné eroze, čímž by se mohla snížit dostupnost vody pro kořeny rostlin. Hloubkové kypření by tedy nemělo být použito v případech, kdy by mohla být zničena struktura podorniční vrstvy a když by mohlo dojít k opětovnému ztuhnutí této vrstvy. KELLER et al. (2012) zkoumal souvislost mezi nasycenou hydraulickou vodivostí a variabilitou výnosu plodiny na pozemku. Výsledky jeho výzkumu naznačují, že příčinou nízkého výnosu plodiny byla degradovaná půdní struktura. Nižší hodnoty K_{fs} byly zjištěny v zónách s nízkou výtěžností a ukázaly se jako dobrý indikátor výnosu s poměrně vysokým koeficientem determinace.

5.2. Nenasycená hydraulická vodivost

Dojde-li k aplikaci vody na povrch půdy, pak se ve většině případů půdní póry začnou plnit vodou, avšak jen do určité míry. Zbytek prostoru, který zaujímají póry, zůstane vyplněn vzduchem. Za předpokladu, že je tlak vzduchu v pórech atmosférický, lze v takových případech mluvit o tzv. nesaturaci, nebo nenasyceném proudění (WALLACH, 2008). V takovém prostředí je hnací silou proudění gradient potenciálu a nenasycená hydraulická vodivost je funkcí vlhkosti. Neustálené nenasycené proudění popisuje Richardsova rovnice (5), která vznikne sloučením rovnice kontinuity a Darcy-Buckinghamovy rovnice (ŠIMŮNEK et al., 1988):

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \text{div}\{K(h)[\text{grad}(h) + \text{grad}(z)]\} \quad (5)$$

kde:

- C – je hydraulická kapacita [m^{-1}]
- h – tlaková výška půdní vody [m]
- t – čas [s]
- K – tenzor hydraulické vodivosti [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$]
- z – prostorová souřadnice orientovaná kladně vzhůru [m]

Ke stanovení nenasycené hydraulické vodivosti se v polních podmínkách využívá řada zařízení. Jedno z těchto zařízení je podtlakový Mini-Disk infiltrometr firmy Decagon Devices, což je malé zařízení s manuální obsluhou, které je umístěno na povrchu půdy. Toto zařízení je založeno na metodě navržené ZHANGEM (1997), která je jednoduchá a funguje i na povrchu

suché půdy. Metoda vychází z dvousložkového numerického řešení procesu infiltrace pod diskem infiltrometru za určitý čas a lze ji vyjádřit rovnicí:

$$I = C_1\sqrt{t} + C_2t \quad (6)$$

kde:

- I – je kumulativní infiltrace na jednotku plochy [m]
- C_1 – parametr související se sorptivitou půdy [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1/2}$]
- C_2 – parametr hydraulické vodivosti [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
- t – čas [s]

Nenasycená hydraulická vodivost půdy K [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$] se vypočítá:

$$K = \frac{C_1}{A} \quad (7)$$

kde:

- C_1 – je hodnota křivky kumulativní infiltrace a druhé odmocniny času [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1/2}$]
- A – hodnota van Genuchtenova parametru (tabulka 3), která se vztahuje k rychlosti sání dané zrnitostní frakce půdy a poloměru disku infiltrometru [-]

Van Genuchtenovy parametry A pro 12 zrnitostních frakcí půdy byly vypočteny z následujících rovnic:

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1)\exp[2.92(n - 1.9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0.91}} \quad n \geq 1.9 \quad (8)$$

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1)\exp[7.5(n - 1.9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0.91}} \quad n < 1.9 \quad (9)$$

kde:

- n [-] a α [m^{-1}] - jsou retenční parametry půdy
- h_0 – tlaková výška infiltrometru [m]
- r_0 – poloměr disku infiltrometru [m]

Tabulka 3. Van Genuchtenovy parametry A pro různé půdní frakce, pro poloměr disku 2,25 cm a hodnoty tlakové výšky od 0,5 do 6 cm, $\alpha [m^{-1}]$ a $n [-]$ jsou retenční parametry, $h_0 [m]$ je tlaková výška (DECAGON, 2021) (upraveno: Bárta)

| Půdní frakce | α | n/h_0 | A | | | | | | |
|---------------------------|----------|---------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | | | -0,5 | -1 | -2 | -3 | -4 | -5 | -6 |
| Písek | 0,145 | 2,68 | 2,84 | 2,4 | 1,73 | 1,24 | 0,89 | 0,64 | 0,46 |
| Hlinitý písek | 0,124 | 2,28 | 2,99 | 2,79 | 2,43 | 2,12 | 1,84 | 1,61 | 1,4 |
| Písčitá hlína | 0,075 | 1,89 | 3,88 | 3,89 | 3,91 | 3,93 | 3,95 | 3,98 | 4 |
| Hlína | 0,036 | 1,56 | 5,46 | 5,72 | 6,27 | 6,87 | 7,53 | 8,25 | 9,05 |
| Prach | 0,016 | 1,37 | 7,92 | 8,18 | 8,71 | 9,29 | 9,9 | 10,55 | 11,24 |
| Prachovitá hlína | 0,02 | 1,41 | 7,1 | 7,37 | 7,93 | 8,53 | 9,19 | 9,89 | 10,64 |
| Písčitá jílovitá hlína | 0,059 | 1,48 | 3,21 | 3,52 | 3,24 | 5,11 | 6,15 | 7,41 | 8,92 |
| Jílovitá hlína | 0,019 | 1,31 | 5,86 | 6,11 | 6,64 | 7,23 | 7,86 | 8,55 | 9,3 |
| Prachovitá jílovitá hlína | 0,01 | 1,23 | 7,89 | 8,09 | 8,51 | 8,95 | 9,41 | 9,9 | 10,41 |
| Písčitý jíl | 0,027 | 1,23 | 3,34 | 3,57 | 4,09 | 4,68 | 5,36 | 6,14 | 7,04 |
| Prachovitý Jíl | 0,005 | 1,09 | 6,08 | 6,17 | 6,36 | 6,56 | 6,76 | 6,97 | 7,18 |
| Jíl | 0,008 | 1,09 | 4 | 4,1 | 4,3 | 4,51 | 4,74 | 4,98 | 5,22 |

Nenasycenou hydraulickou vodivostí se při různých způsobech zpracování půdy zabýval např. KOOL et al. (2019) který zjistil, že v případě přímého setí byla nenasycená hydraulická vodivost nižší než v případě konvenčního zpracování půdy. Dle výzkumu WU et al. (1992) naopak nenasycená hydraulická vodivost nevykazovala při použití orby a přímého setí výraznější rozdíly. BECK-BROICHSITTER et al. (2020) prováděli víceletý polní pokus, ve kterém sledovali nenasycenou hydraulickou vodivost. Princip tohoto pokusu spočíval v zatravnění pozemku, na kterém bylo dříve konvenčně hospodařeno a jehož podorniční vrstva byla zhutněná. Část tohoto pozemku byla oseta travní směsí a část vojtěškou. Cílem bylo zjistit, zdali víceleté zatravnění hluboce kořenícími rostlinami může zlepšit půdní strukturu a rozrušit zhutněnou podorniční vrstvu. Dle naměřených hodnot po 9 letech od zatravnění, prošly obě části pozemku strukturálním zlepšením půdy. Část pozemku s vojtěškou však vykazovala nepatrně lepší výsledky obnovy pórů ve vertikálním směru, což je pro restrukturalizaci zhutněné vrstvy výhodnější. Podobným pokusem se zabývala i KODEŠOVÁ et al. (2011), která zkoumala půdní strukturu a hydraulické vlastnosti na orné půdě a trvalém travním porostu. V půdě pod trvalým travním porostem naměřila mírně vyšší hodnoty nenasycené hydraulické vodivosti než v případech každoročního zpracování půdy, což bylo způsobeno vyšším podílem rovnoměrně rozložených pórů. Při statistické analýze, se však průměrné hodnoty nenasycené hydraulické vodivosti na orné půdě a trvalém travním porostu nelišily.

6. Zpracování půdy

Zpracování půdy v zemědělství upravuje podmínky pro růst a vývoj rostlin a reguluje probíhající procesy v půdě. Samotný pojem „zpracování půdy“ lze definovat jako: všechny zásahy a opatření, kterými se půda pro zemědělské využití upravuje, tedy i agromeliorační a půdoochranné zásahy, avšak ve většině případů je tento pojem spojován s úkony, které zahrnují obdělávání ornice a podorničí. Zjednodušeně lze tedy říci, že zpracování půdy představuje mechanické zásahy do půdy, které v půdě ovlivňují (ŠKODA et al., 1998):

- vodní a vzdušné poměry,
- půdní mikroflóru a mineralizaci živin,
- humifikační pochody,
- rozvoj chorob a škůdců.

Zpracování půdy při současném trendu ekologizace zemědělství taktéž rozhoduje o regulaci zaplevelení a v tomto ohledu jeho význam dále narůstá. Zpracováním půdy se také do půdy zapravují organická a minerální hnojiva, posklizňové zbytky apod. V neposlední řadě zpracování půdy ovlivňuje faktory související s úrodností půdy, jako například: hloubku ornice, zrnitost půdy, množství humusu, pórovitost, objemovou hmotnost, biologickou aktivitu aj. (ŠKODA et al., 1998).

V současné době lze rozdělit základní způsoby zpracování půdy následovně (HŮLA et al., 2008):

- orebné zpracování půdy, též konvenční nebo tradiční zpracování půdy (půda je každoročně zpracovávána radličným pluhem),
- bezorebné zpracování půdy, které lze rozdělit následovně:
 - minimalizační zpracování půdy (zpracování půdy do zpravidla malé hloubky, nebo hluboké kypření bez obracení ornice),
 - půdoochranné zpracování půdy (povrch půdy musí po zasetí zůstat pokryt rostlinnými zbytky z minimálně 30 %, např. pásové zpracování půdy),
 - přímé setí (setí do nezpracované půdy, kdy by mělo minimálně 80 % povrchu zůstat pokryto rostlinnými zbytky nebo strništěm).

6.1. Orebné zpracování půdy

Orebné, konvenční nebo tradiční zpracování půdy jsou technologie, kdy dochází ke každoročnímu opakovanému kypření a obracení ornice radličným pluhem. V současné době lze do orebného zpracování půdy zahrnout i spojení pracovních operací, jako například spojení předseťové přípravy se setím, podpovrchové utužení půdy nebo drcení hrud. Jedná se o tradiční metody, které jsou prováděny před založením porostu a jejich postupy jsou dlouhodobě ověřeny a zajišťují výnosové jistoty i při méně příznivých polních podmínkách (KŘEN et al., 2015).

Operace orebného zpracování půdy lze rozdělit na (ŠKODA et al., 1998):

- základní zpracování půdy (podmítka a orba),
- příprava půdy před setím a sázením (kypření, vláčení, smykování, válení, aj.)
- kultivace půdy během vegetace (plečkování, oborávání, vláčení a válení).

6.1.1. Podmítka

Podmítka je základní mělké zpracování půdy, které by mělo následovat bezprostředně po sklizni plodiny. Dříve se k tomuto účelu nejčastěji používaly podmítací pluhy, ale v dnešní době se využívají zejména kombinované radličkové a talířové kypřiče (KŘEN et al., 2015). Radličkové kypřiče lze použít do větších hloubek, lépe podřezávají plevely a dobře mísí rostlinné zbytky s půdou. Talířové kypřiče oproti tomu lépe překlápí skývu a zaklápí rostlinné zbytky, lépe se přizpůsobují povrchu pole a dobře pracují i ve vyšších pracovních rychlostech. Hloubka podmítky se nejčastěji pohybuje v rozmezí 8 až 15 cm. Mezi důležité faktory, které rozhodují o kvalitní podmítce patří: dodržování rovnoměrné pracovní hloubky všech nástrojů a včasné provedení podmítky co nejdříve po sklizni, díky čemuž bude zajištěno (ZITTA et al., 1999):

- šetrné hospodaření s půdní vláhou přerušením kapilárních cest vody v půdě,
- prokypření utužené půdy a zlepšení jejího fyzikálního stavu,
- odplevelení půdy a zlepšení vzcházení výdrolu,
- zapravení rostlinných zbytků do půdy a jejich rychlejší mikrobiální rozklad.

BRANT et al. (2021) uvádí, že kvalitní a včasné provedená podmítka redukuje ztráty půdní vláhly vytvořením horní nakypřené vrstvy, která naruší kapilární proudy k povrchu půdy a značně sníží neproduktivní výpar vody. Dle tohoto autora se může z jednoho nepodmítnutého hektaru vypařit za den až 30 m³ vody. Toto tvrzení potvrzuje například i ŠKODA et al. (1998).

6.1.2. Orba

Orba je základní metoda orebného zpracování půdy, která má vliv na celkový stav půdy. Za předpokladu, že jsou skývy při orbě klopeny pod určitým úhlem i ve vertikálním směru, je orba považována za horizontální způsob zpracování půdy. Má-li orba vyhovovat veškerým základním požadavkům, měla by být prováděna při optimální vlhkosti půdy. Optimální vlhkost půdy pro orbu se u těžkých půd pohybuje v rozmezí 14-18 %, u středních 18-20 %, a u lehkých není již tak rozhodující. Při orbě za příznivé vlhkosti dochází k dobrému drobení půdy, kdy se skývy rozpadají na menší celky, čímž se výrazně zvyšuje pórovitost o 30 až 70 % (ZITTA et al., 1999). Správně provedená orby by dle ŠKODY et al. (1998) měla splnit tyto podmínky:

- obrátit skývy (tedy zapravit rostlinné zbytky se slámou a plevelem hluboko do půdy a vynést splavené živiny a koloidní částice ze spodních vrstev ornice),
- mísit ornici (promísit zaorávaný materiál s hnojem, zeleným hnojením, nebo s průmyslovými hnojivy),
- kypřit půdu (zvýšit pórovitost a provzdušněnost půdy),
- drobit půdu (zajistit co nejlepší povrch půdy pro jeho následné zpracování a urovnání).

KŘEN et al. (2015) uvádí, že z hlediska doby provedení lze orbu rozdělit na: jarní, letní podzimní, zimní a z hlediska způsobu provedení na orbu: do skladu, do rozoru, do svahu, dokola a do roviny. Hloubka orby závisí především na polních podmínkách a následném výběru plodiny v osevním postupu a lze ji rozlišit na orbu: mělkou (do 18 cm), střední (18-24 cm), hlubokou (24-30 cm) a velmi hlubokou (nad 30 cm). Zvláštním případem je orba rigolovací, která se provádí pro zakládání trvalých kultur jako: vinice, ovocné sady a chmelnice, její hloubka se pohybuje od 40 do 70 cm (ŠKODA et al., 1998).

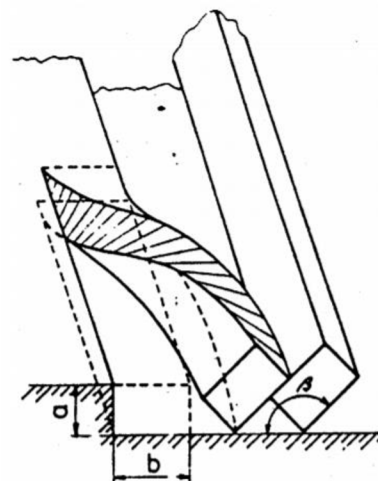
Pro provedení orby jsou v současnosti používány ve většině případů radličné pluhy. V minulosti byly využívány i talířové, výkyvné, nebo rýčové pluhy. Hlavním pracovním ústrojím radličného pluhu je orební těleso, jehož hlavní části jsou čepel a odhrnovačka. Odhrnovačku tvoří hrudí a křídlo a lze ji podle tvaru rozdělit na: válcovou, kulturní, pološroubovou a šroubovou. Válcové odhrnovačky mají nejstrměji postavené hrudí a křídlo je tvořeno z parabolického válce, tudíž půdu dobře drobí ale špatně překlápějí. Šroubové odhrnovačky mají naopak hrudí nejméně strmé a křídlo je tvořeno šroubovou plochou, tudíž půdu špatně

drobí ale dobře překlápějí. Pro správné obracení skývy orebním tělesem, musí být dodržen orební poměr (obrázek 4), což je poměr šířky záběru orebního tělesa k hloubce orby. Jako minimální mezní hodnota pro orební poměr platí (NEUBAUER, 1989):

$$K_o = \frac{b}{a} \geq 1,27 \quad (10)$$

kde:

- K_o – je orební poměr [-]
- b – šířka záběru orebního tělesa [m]
- a – hloubka orby [m]



Obrázek 4. Obracení skývy při orbě (ŠKODA et al., 1998)

Dle KŘENA et al. (2015) lze za nevýhody klasické orby považovat zpracování půdy tzv. na jednu hloubku, kdy dochází vlivem zhutnění k oddělování podorničních vrstev, dále malou plošnou výkonnost, vysoké riziko vodní eroze a neekologičnost z pohledu velkého množství spotřebovaného paliva. Za výhody lze považovat dokonalé zapravení rostlinných zbytků a plevelů hluboko do půdy a dále nenahraditelnost orby v případech, kdy je nutné zapravit do půdy organická hnojiva. BRANT et al. (2016) uvádí, že při provedení klasické orby dochází k lepšímu prohřívání ornice vlivem nízkého zastoupení rostlinných zbytků na povrchu půdy. COOPER et al. (2020) sledoval půdní vlastnosti při orebném zpracování půdy během 5letého pokusu a zjistil, že v zimních měsících lépe proniká srážková voda půdním profilem, avšak v teplých obdobích nastává opačná situace a dochází k nadměrným výparům půdní vláhly. Dále tento autor zjistil, že vlivem dlouhodobého zpracovávání půdy na jednu hloubku může docházet k oddělování podorničních vrstev a k jejich následnému zhutnění. Objemová hmotnost ornice při orbě naopak vykazuje výrazně menší hodnoty než při použití bezorebných technologií.

6.1.3. Předseťová příprava

Předseťová příprava je soubor polních operací, které umožňují provést optimální zasetí, nebo sázení a vytváří tak příznivé podmínky pro vzcházení rostlin a jejich další růst a vývoj v prvních fázích vegetace. V případě orebného zpracování půdy je předseťová příprava důležitá z důvodu urovnání povrchu půdy a urychlení přirozeného slehnutí půdy po orbě. Dále provedená předseťová příprava šetří půdní vláhu, odpleveluje půdu a připravuje seťové lůžko (ZITTA et al., 1999). K provedení předseťové příprava jsou používány stroje s aktivními pracovními nástroji (vířivé kypřiče, rotační kypřiče a kývavé brány), pasivními pracovními nástroji (kombinátory, brány, smyky, válce), nebo secí kombinace, kdy dochází k provedení setí a přípravy půdy při jednom přejezdu (ROH et al., 2003).

6.2. Bezorebné zpracování půdy

Bezorebné zpracování půdy je soubor technologií, při nichž je půda zpracovávána bez orby, a tedy nedochází ke každoročnímu obracení ornice, lze je tak považovat za vertikální způsoby zpracování půdy. Hlavními důvody pro užívání bezorebných technologií jsou ekologická, ekonomická a technická hlediska. Dále by měly bezorebné technologie splňovat tyto parametry KŘEN et al. (2015):

- do jisté míry omezovat intenzitu zpracování půdy spojováním pracovních operací a snižovat počet přejezdů po pozemcích,
- zlepšovat fyzikální a strukturní stav půdy a zabraňovat zhutnění půdy,
- minimalizovat půdní erozi
- snižovat náklady na polní operace a zvyšovat plošnou výkonnost,
- zlepšovat hospodaření se srážkovou vodou, půdní vláhou a organickou hmotou.

6.2.1. Minimalizační zpracování půdy

Minimalizace s kypřením půdy se provádí nejčastěji ve formě mělkého kypření, v případě potřeby však může být půda prokypřena i hlouběji, avšak je žádoucí, aby tomu tak bylo bez obracení ornice (HŮLA et al., 2008). V případě minimalizace s mělkým kypřením bývá jako prvotní zpracování půdy po sklizni provedena podmínka, jejíž cíle jsou shodné s podmínkou prováděnou před orbou. Pro další zpracování půdy se používají radličkové kypřiče, které prokypří půdu hlouběji za optimálního promíchání s rostlinnými zbytky. V případě

minimalizace s hlubokým kypřením se po podmítce provádí další zpracování půdy pomocí dlátových kypřičů, dlátových pluhů, nebo podrýváků, které zpracovávají půdu do větších hloubek a v jistém smyslu tak nahrazují tradiční orbu radličným pluhem (KŘEN et al., 2015).

COOPER et al. (2020) uvádí, že při minimalizačním zpracování půdy se snižuje vyluhování živin v horních vrstvách půdy a snižuje se jejich povrchový odtok. Dále tento autor uvádí, že v případě minimalizačního zpracování půdy byla při polním pokusu zjištěna nižší objemová hmotnost než v případě, kdy byla použita metoda přímého setí. SCHLÜTER et al. (2018) sledoval rozdíly mezi konvenčním zpracováním půdy a minimalizačním zpracováním půdy. Rozdíly ve struktuře půdy se dle tohoto autora projevily už v hloubce 13 cm kdy v případech, kdy nebyla použita orba, došlo ke zhutnění půdy již v této malé hloubce.

6.2.2. Půdoochranné zpracování půdy

Půdoochranné zpracování půdy jsou způsoby zpracování půdy, po kterých zůstává nejméně 30 % povrchu půdy po zasetí pokryto rostlinnými zbytky (tj. $1,2 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ v suché hmotě) (HŮLA et al., 2008). V našich podmínkách se z těchto způsobů nejvíce uchytilo pásové zpracování půdy (strip-tillage) a setí do mulče (mulch-tillage).

Pásové zpracování půdy

Pásové zpracování půdy je jednou z půdoochranných technologií bezorebného zpracování půdy, přičemž se zpracovává půda v pásech ve směru řádku plodiny, která se následně vysévá. Množství rostlinných zbytků na povrchu půdy po použití této technologie by mělo být minimálně 30 %. Rozteč pásů se pohybuje nejčastěji v rozmezí 0,4–0,9 m a šířka kypřeného pásu půdy bývá v závislosti na pěstované plodině 0,15–0,25 m. Dle standardu by plošné zastoupení pásů nemělo přesáhnout 25 % plochy pozemku. Hloubka zpracování půdy není limitována. Technologie pásového zpracování půdy bývá nejčastěji používána pro širokořádkové plodiny a v situacích, kdy je nutné minimalizovat erozi půdy (BRANT et al., 2016).

Z technologického hlediska je pásové zpracování půdy poměrně náročná technologie na dodržování přesnosti pracovních jízd, zejména pak v případech, kdy jsou polní operace prováděny ve více krocích a je tedy nutné dodržet navazování zpracovávaných pásů půdy. V praxi je možné se setkat se dvěma způsoby provedení pásového zpracování půdy. První způsob (klasické pásové zpracování půdy) spočívá v provedení kypření předem nezpracované

půdy. Tato metoda je vhodnější pro případy, kdy je vyžadována intenzivnější protierozní ochrana. Druhý způsob (intenzivní pásové zpracování půdy) je kombinace celoplošného mělkého kypření s kombinací pásového kypření půdy. Z protierozního hlediska je tato metoda méně výhodná, avšak je vhodnější pro případy, kdy je plánováno metodu strip-tillage používat jednou za několik let (BRANT et al., 2016). Tento autor dále uvádí, že metoda pásového zpracování je vhodnější pro širokořádkové plodiny než jiné bezorebné technologie, neboť z důvodu odstranění rostlinných zbytků z prostoru řádku dochází k lepšímu ohřevu horních vrstev ornice.

Setí do mulče

Setí do mulče je v podstatě minimalizační zpracování půdy doplněné o využívání organické hmoty, a to buď z posklizňových zbytků, nebo z nadzemní biomasy meziplodin. Nadzemní biomasu tvoří zpravidla nízké plodiny, jako: jetel, obiloviny či vymrzající meziplodiny. Oproti technologii přímého setí, by však při technologii setí do mulče mělo dojít k částečnému promíchání mulče s půdou. V sušších oblastech se ponechává mulče na povrchu více, ve vlhčích méně. Setí se provádí stroji, které z prostoru řádku odhrnou mulč do stran a bylo tak zajištěno dobrého kontaktu osiva s půdou (HŮLA et al., 2008).

6.2.3. Přímé setí

Přímé setí do nezpracované půdy (no-tillage) je půdoochranná technologie, která spočívá v přímém výsevu plodiny do nezpracované půdy, nejčastěji do strniště vzniklého po předplodině, přičemž musí po zasetí zůstat na povrchu půdy nejméně 80 % rostlinných zbytků (HŮLA et al., 2008). Setí do nezpracované půdy je podmíněno nezaplevelenými pozemky vytrvalými plevely. Využívá se v oblastech, kde ulehle a přeschlé půdy znemožňují zpracování půdy (ZITTA et al., 1999). CROPWATCH-UNIVERSITY OF NEBRASKA (2023) na svém webu uvádí, že provedení přímého setí spočívá v kvalitní přípravě pozemku, na kterém bude metoda použita, a to ve formě rovnoměrného rozmístění posklizňových a rostlinných zbytků. V případech, kdy dochází k nadměrnému zhutnění půdy je možné provést před přímým setím hloubkové kypření dlátovými kypřiči bez obracení a promíchávání půdy. FÉRNANDEZ et al. (2015) uvádí, že při víceletém polním pokusu byla zjištěna nižší objemová hmotnost půdy v případech, kdy bylo použito pásové zpracování půdy než při metodě přímého setí.

7. Metodika

Polní pokus byl proveden na pozemku u obce Nesperská Lhota, Středočeský kraj, Česká republika (obrázek 5). Tento pozemek s hlinitopísčitou půdou byl v minulosti rozdělen na dvě části, z nichž první je v současné době obhospodařována orebnými technologiemi (v grafech a tabulkách varianta označovaná jako „pole“) a na druhé je udržován trvalý travní porost (TTP). Při pokusu byla část pozemku s TTP využívána jako souvrať pro zemědělskou techniku, která obhospodařovala část pozemku s orebným způsobem hospodaření. Cílem pokusu bylo zjistit, jaký vliv na vlastnosti půdy, na daném pozemku, by měl tento systém hospodaření. Na obou částech pozemku byla všechna měření prováděna v kolejevém řádku a mimo něj. K měření fyzikálních a infiltračních vlastností půdy byly použity metody: odběr neporušeného půdního vzorku, měření penetračního odporu, měření nasycené hydraulické vodivosti (SFH) a nenasycené hydraulické vodivosti (Mini-Disk). K vyhodnocení naměřených hodnot byl použit program Statistica, ve kterém byly výsledky graficky zobrazeny a podrobeny statistické analýze pomocí Tukeyova testu homogenních skupin (Tukeyův HSD test).



Obrázek 5. Družicový snímek pokusného pozemku, část (A) je obhospodařována konvenčním systémem a část (B) s TTP (LPIS, 2023) (upraveno: Bárta)

7.1. Odběr a rozbor neporušeného půdního vzorku

Ke stanovení fyzikálních vlastností (vodní a vzdušné poměry) půdy byla vybrána metoda neporušeného půdního vzorku. K odběru byly použity Kopeckého fyzikální válečky (obrázek 6) o objemu 100 cm³. Odebráno bylo celkem 24 vzorků (4 x 6 pro každou oblast pokusu). K rozboru a výpočtům byla použita následující tabulka (VALLA et al., 2002):

Tabulka 4. Přehled stanovení hodnot z neporušeného půdního vzorku (VALLA et al., 2002) (upraveno: Bárta)

| Stanovení | Symbol | Výpočet | Jednotka |
|----------------------------|-------------|--|--------------------|
| Momentální vlhkost | O_{mom} | $(G_A - G_F)$ | % obj. |
| Nasáklivost | O_{ns} | $(G_B - G_F)$ | % obj. |
| Vlhkost 30-minutová | O_{30} | $(G_C - G_F)$ | % obj. |
| Max. kap. Vodní kapacita | O_{MKK} | $(G_D - G_F)$ | % obj. |
| Retenční vodní kapacita | O_{RVK} | $(G_E - G_F)$ | % obj. |
| Specifická hmotnost | ρ_z | $n / (n + p_{H_2O} - p_z)$ | g·cm ⁻³ |
| Sušina | G_H | $G_F - (G_V - G_S)$ | g |
| Objemová hmotnost | ρ_d | G_H / V_S | g·cm ⁻³ |
| Pórovitost celková | P | $(\rho_z - \rho_d) \cdot 100 / \rho_z$ | % obj. |
| Pórovitost kapilární | P_k | O_{RVK} | % obj. |
| Pórovitost nekapilární | P_n | $P - O_{30}$ | % obj. |
| Provzdušněnost | V_z | $P - O_{mom}$ | % obj. |
| Max. kap. Vzdušná kapacita | K_{MKKvz} | $P - O_{MKK}$ | % obj. |
| Retenční vzdušná kapacita | K_{RVKvz} | $P - O_{RVK}$ | % obj. |

kde (hmotnosti v g, objem v cm³):

- G_A – vzorek s přirozenou vlhkostí
- G_B – vzorek kapilárně nasycený
- G_C – vzorek po 30 min. odsávání
- G_D – vzorek po 2 hod. odsávání
- G_E – vzorek po 24 hod. odsávání
- G_F – vzorek po vysušení při 105 °C
- G_H – čistá hmotnost vzorku po vysušení při 105 °C
- G_V – hmotnost fyzikálního válečku
- G_S – hmotnost hodinového skla
- n – navážka pro stanovení specifické hmotnosti
- p_{H_2O} – hmotnost pyknometru s vodou
- p_z – hmotnost pyknometru se zeminou
- V_S – objem fyzikálního válečku



Obrázek 6. Kopeckého válečky k odběru neporušených půdních vzorků (vlevo) s odběrovou hlaví (vpravo) (foto: Bárta)

7.2. Měření penetračního odporu

Pro měření penetračního odporu byl použit půdní penetrometr zkonstruovaný na Technické fakultě České zemědělské univerzity v Praze (obrázek 7). Kužel na hrotu penetrometru má úhel 30° a plochou 100 mm^2 .



Obrázek 7. Půdní penetrometr používaný k měření (foto: Bárta)

7.3. Metoda nasycené hydraulické vodivosti

Jedna z metod, která byla použita k měření infiltračních schopností půdy, byla metoda nasycené hydraulické vodivosti (SFH). Při měření byl použit postup dle BAGARELLA et al. (2004), uvedený v kapitole 5.1. Jako pomůcky k měření byly použity prstence (obrázek 8) o vnitřním průměru 150 mm , tloušťce stěny 2 mm a výšce 150 mm . K měření vlhkosti půdy byl použit vlhkoměr FIELDSCOUT TDR 350 a k měření času ruční stopky. Objem vody V , který byl

aplikován na povrch půdy byl 0,5 l. Jako hodnota parametru α^* bylo zvoleno 12 m^{-1} . K výpočtům nasycené hydraulické vodivosti byla použita rovnice (4).



Obrázek 8. Prstence, do kterých byl aplikován daný objem vody (vlevo) a vlhkoměr FIELDSCOUT TDR 350 (vpravo) (foto: Bárta)

7.4. Metoda nenasyčené hydraulické vodivosti

Druhá metoda, která byla použita k měření infiltračních schopností byla metoda nenasyčené hydraulické vodivosti (Mini-Disk). Při měření byly použity podtlakové infiltrometry Mini-Disk Decagon Devices (obrázek 9) s poloměrem disku 2,25 cm. Sací výška infiltrometru byla zvolena -1 cm. K výpočtům nenasyčené hydraulické vodivosti byl použit pracovní list v MS Excel.



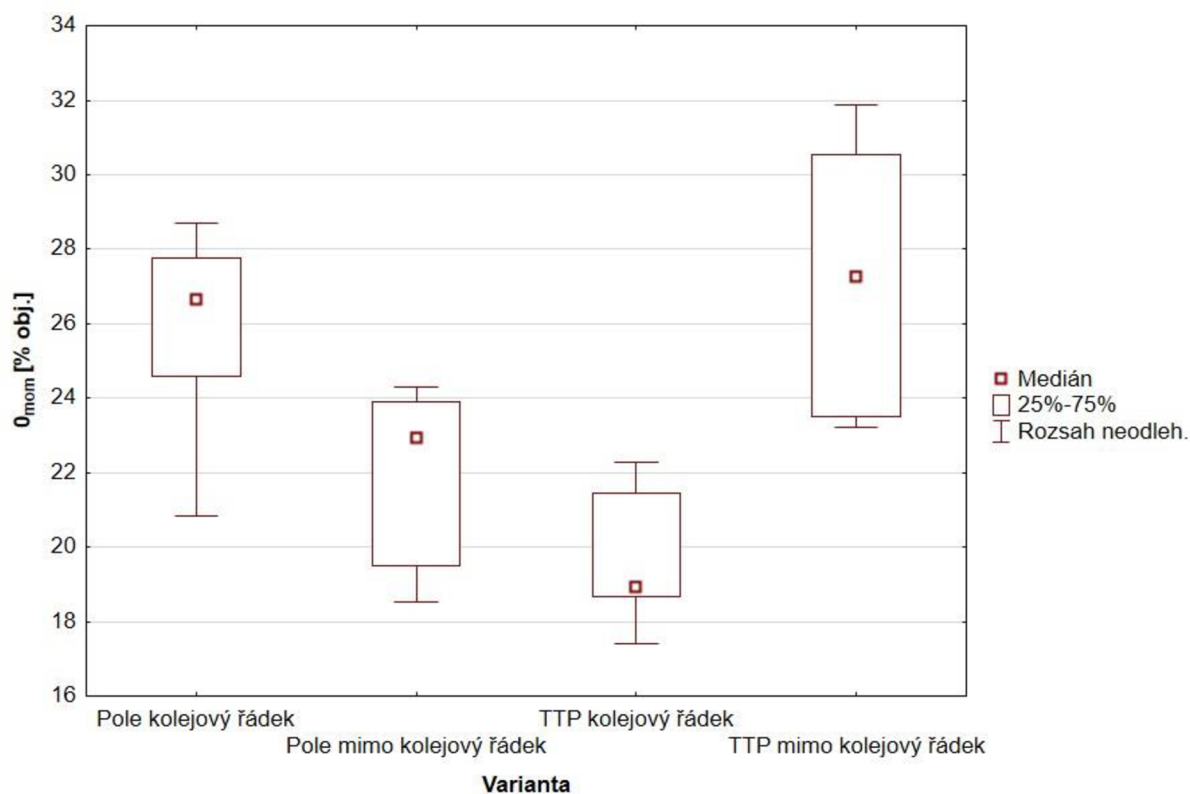
Obrázek 9. Podtlakové Mini-Disk infiltrometry Decagon Devices (foto: Bárta)

8. Výsledky měření

8.1. Neporušené půdní vzorky

8.1.1. Vlhkost

Momentální vlhkosti půdy naměřené při různých variantách jsou graficky zobrazeny na obrázku 10. Nejvyšší vlhkost byla naměřena na TTP mimo kolejový řádek a nejnižší naopak v kolejovém řádku na TTP. Dle Tukeyova HSD testu (tabulka 5) se statisticky významným rozdílem mezi variantami. U polních variant byla naměřena vyšší vlhkost v kolejovém řádku než mimo kolejový řádek. Na základě Tukeyova HSD testu taktéž se statisticky významným rozdílem.



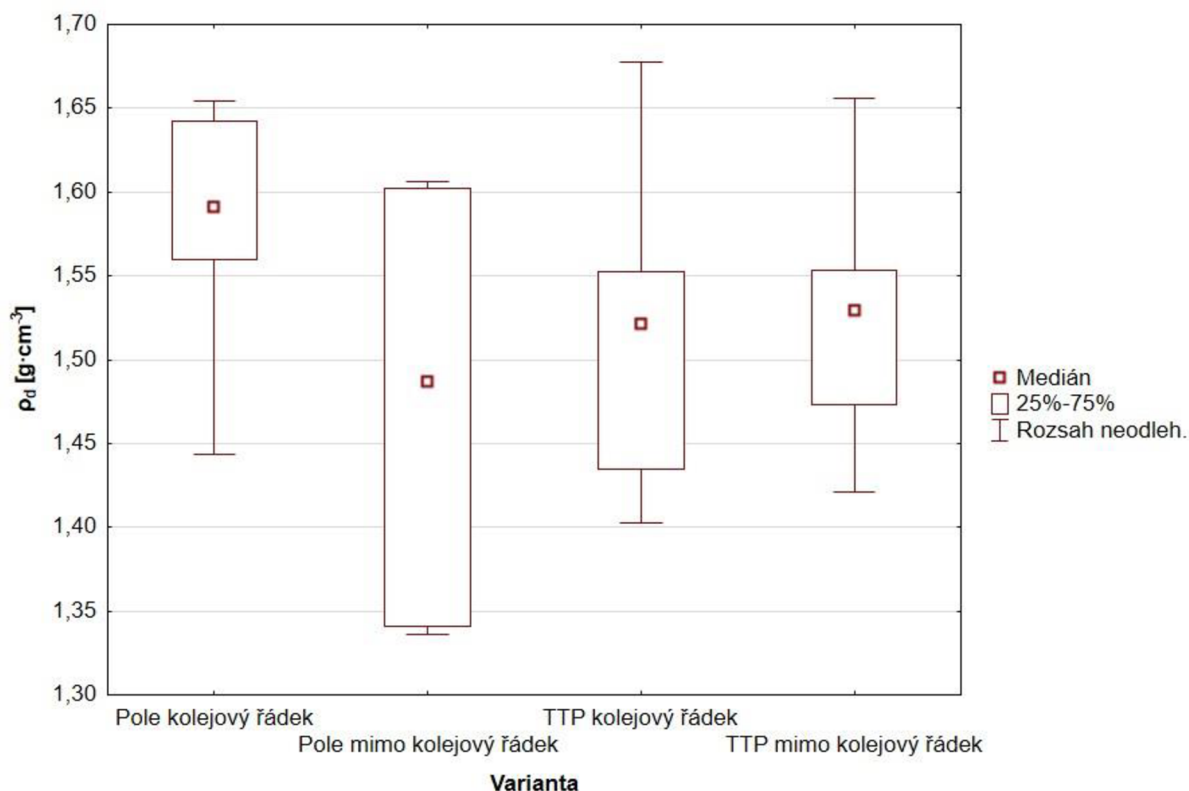
Obrázek 10. Momentální vlhkost půdy (O_{mom}) pro jednotlivé varianty

Tabulka 5. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro momentální vlhkosti (O_{mom}), $\alpha = 0,05$

| Varianta | O_{mom} [% obj.] Průměr | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------|------------------------------|------|------|------|
| TTP kolejový řádek | 19,61033 | **** | | |
| Pole mimo kolejový řádek | 22,0125 | **** | **** | |
| Pole kolejový řádek | 25,85267 | | **** | **** |
| TTP mimo kolejový řádek | 27,27367 | | | **** |

8.1.2. Objemová hmotnost

Výsledné objemové hmotnosti jsou uvedeny na obrázku 11. Nepatrně vyšší hodnoty byly naměřeny na poli v kolejovém řádku, nižší naopak na poli mimo kolejový řádek (mediány těchto hodnot se lišily o 7 %). Hodnoty naměřené na TTP byly navzájem velmi podobné. Dle Tukeyova HSD testu nebyly mezi jednotlivými variantami nalezeny statisticky významné rozdíly (tabulka 6).



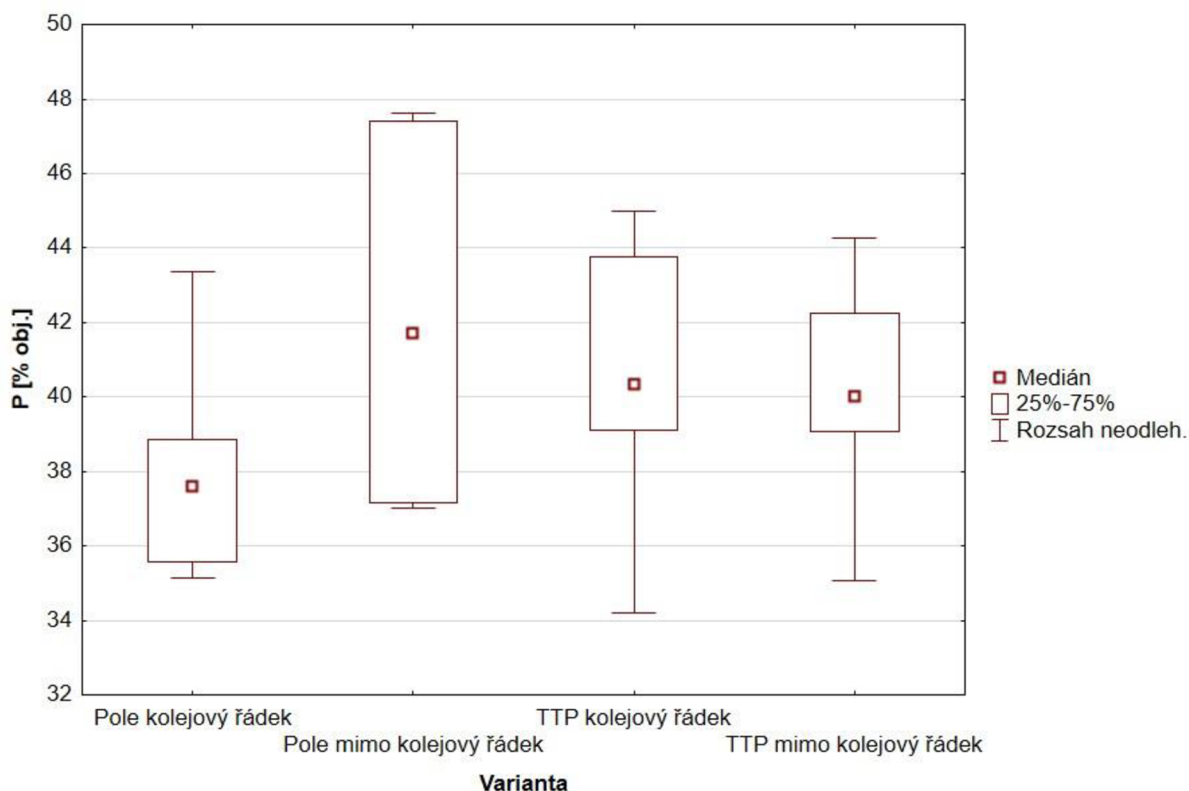
Obrázek 11. Objemová hmotnost půdy (ρ_d) pro jednotlivé varianty

Tabulka 6. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro objemové hmotnosti (ρ_d), $\alpha = 0,05$

| Varianta | ρ_d [g·cm ⁻³] Průměr | 1 |
|--------------------------|--|------|
| Pole mimo kolejový řádek | 1,47649 | **** |
| TTP kolejový řádek | 1,51832 | **** |
| TTP mimo kolejový řádek | 1,52704 | **** |
| Pole kolejový řádek | 1,58041 | **** |

8.1.3. Pórovitost celková

Celkové pórovitosti pro jednotlivé varianty jsou uvedeny na obrázku 12. Nejnižší hodnoty byly naměřeny na poli v kolejovém řádku, naopak nejvyšší na poli mimo kolejový řádek. Mediány celkových pórovitostí na TTP v kolejovém řádku i mimo něj byly velmi podobné. Dle Tukeyova HSD testu nebyly mezi jednotlivými variantami nalezeny statisticky významné rozdíly (tabulka 7).



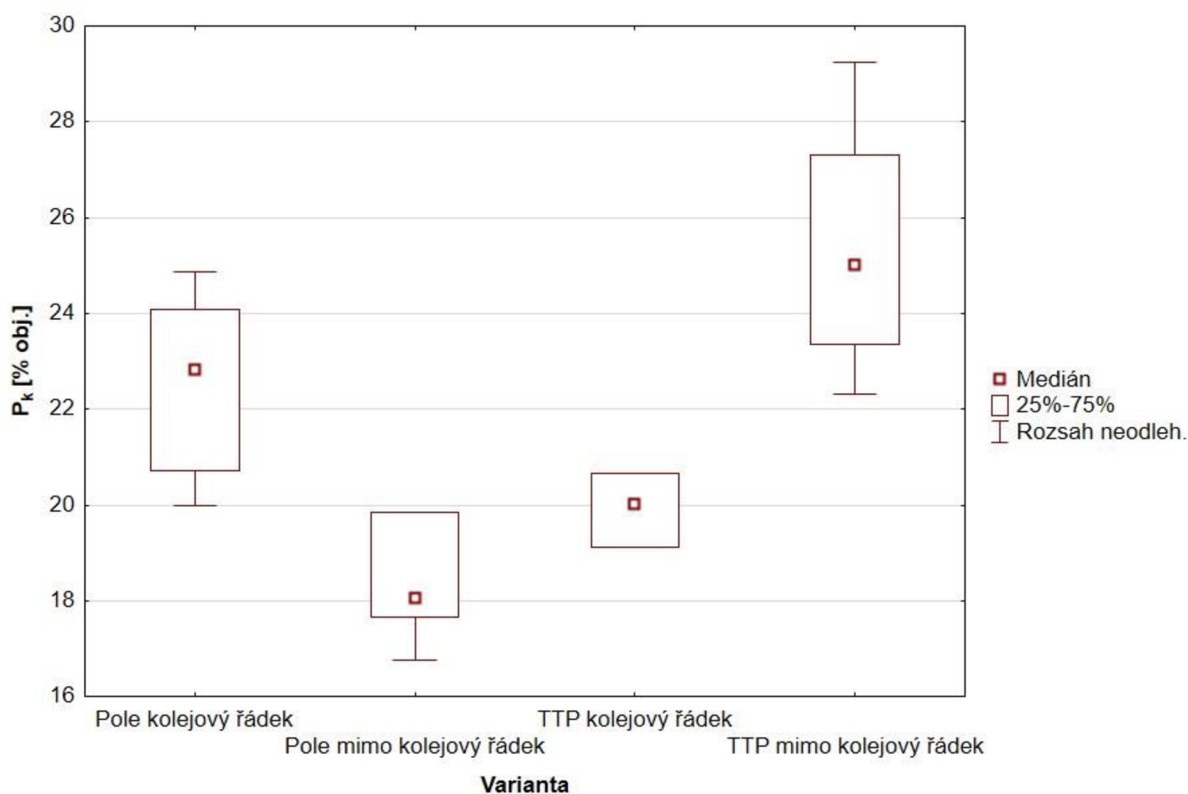
Obrázek 12. Celková pórovitost (P) pro jednotlivé varianty

Tabulka 7. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro celkové pórovitosti (P), $\alpha = 0,05$

| Varianta | P [% obj.] Průměr | 1 |
|--------------------------|----------------------|------|
| Pole kolejový řádek | 38,02301 | **** |
| TTP mimo kolejový řádek | 40,11595 | **** |
| TTP kolejový řádek | 40,45797 | **** |
| Pole mimo kolejový řádek | 42,09843 | **** |

8.1.4. Pórovitost kapilární

Výsledné kapilární pórovitosti jsou uvedeny na obrázku 13. Na poli byly nižší hodnoty naměřeny mimo kolejový řádek, na TTP naopak v kolejovém řádku. Celkově byla nejvyšší kapilární pórovitost naměřena na TTP mimo kolejový řádek a nejnižší na poli mimo kolejový řádek. Dle Tukeyova HSD testu byly mezi jednotlivými variantami nalezeny statisticky významné rozdíly (tabulka 8). Zajímavé je zejména, že na TTP byly výsledky naměřeny v opačném trendu než v obdobných variantách na poli.



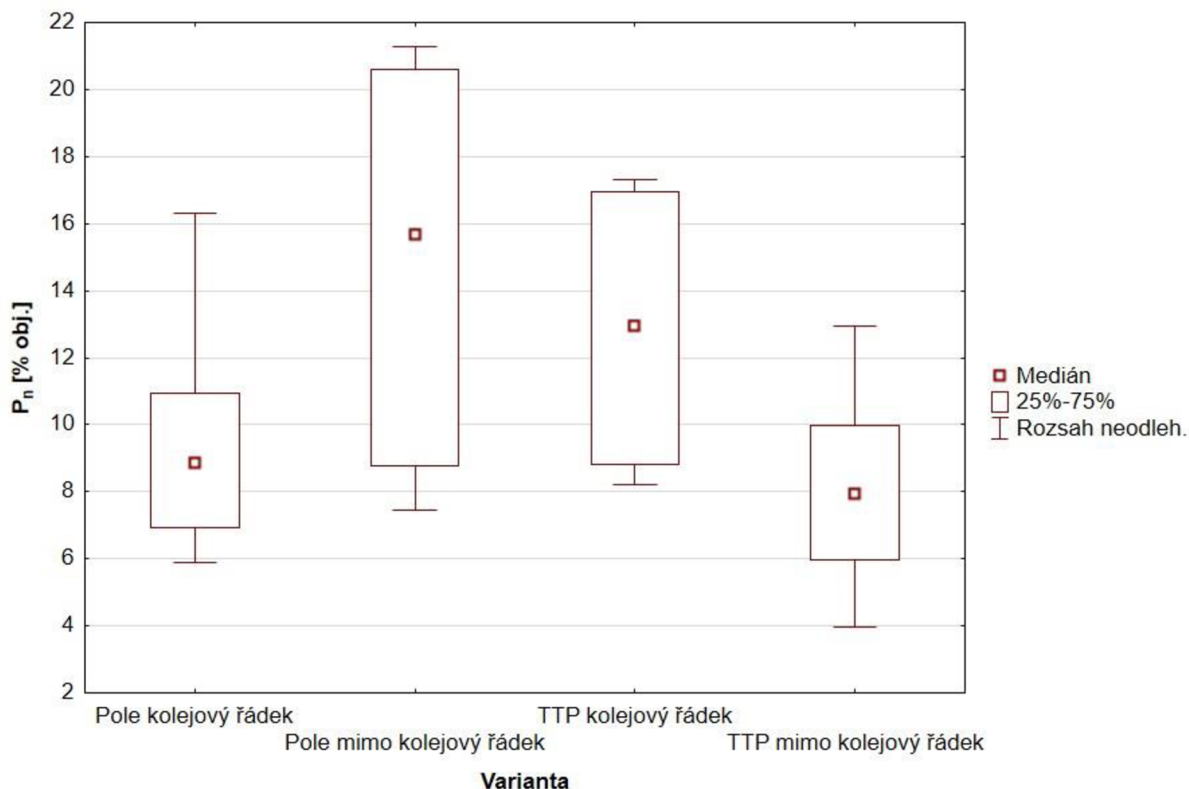
Obrázek 13. Pórovitost kapilární (P_k) pro jednotlivé varianty

Tabulka 8. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro kapilární pórovitosti (P_k), $\alpha = 0,05$

| Varianta | P_k [% obj.] Průměr | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------|--------------------------|------|------|------|
| Pole mimo kolejový řádek | 18,92150 | **** | | |
| TTP kolejový řádek | 20,54383 | **** | **** | |
| Pole kolejový řádek | 22,55550 | | **** | **** |
| TTP mimo kolejový řádek | 25,36633 | | | **** |

8.1.5. Pórovitost nekapilární

Naměřené hodnoty nekapilárních pórovitosti jsou uvedeny na obrázku 14. Celkově byla nejvyšší nekapilární pórovitost naměřena na poli mimo kolejový řádek, nejnižší naopak na TTP mimo kolejový řádek. Na poli byla vyšší nekapilární pórovitost naměřena mimo kolejový řádek a na TTP v kolejovém řádku. Na základě Tukeyova HSD testu nebyly mezi jednotlivými variantami nalezeny statisticky významné rozdíly.



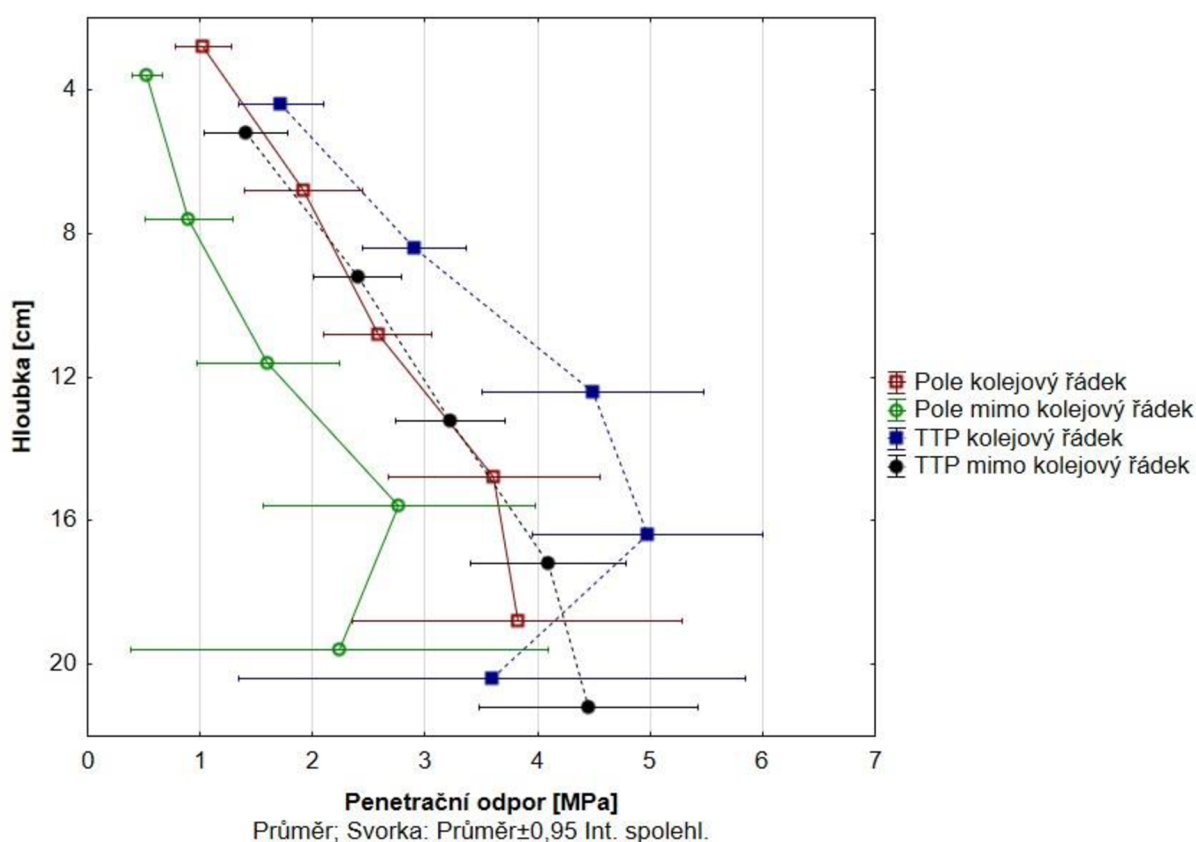
Obrázek 14. Pórovitost nekapilární (P_n) pro jednotlivé varianty

Tabulka 9. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro nekapilární pórovitosti (P_n), $\alpha = 0,05$

| Varianta | P_n [% obj.] Průměr | 1 |
|--------------------------|--------------------------|------|
| TTP mimo kolejový řádek | 8,13111 | **** |
| Pole kolejový řádek | 9,62117 | **** |
| TTP kolejový řádek | 12,87197 | **** |
| Pole mimo kolejový řádek | 14,91310 | **** |

8.2. Penetrační odpor

Výsledné hodnoty penetračních odporů pro jednotlivé varianty jsou uvedeny na obrázku 15. Vyšší hodnoty byly naměřeny v prostoru kolejového řádku, a to jak na poli, tak na TTP. Obecně však došlo k nárůstu penetračních odporů naměřených na TTP v kolejovém řádku i mimo něj, ve srovnání s obdobnými variantami na poli. Při všech variantách byl zaznamenán nárůst průměrných penetračních odporů s rostoucí hloubkou měření, a to v případě variant pole mimo kolejový řádek a TTP kolejový řádek do hloubky 16 cm a v případě variant pole kolejový řádek a TTP mimo kolejový řádek do hloubky 20 cm.



Obrázek 15. Penetrační odpory v různých hloubkách pro jednotlivé varianty

Tukeyovým HSD testem byly hledány statisticky významné rozdíly mezi průměrnými hodnotami penetračních odporů. Homogenní skupiny byly vyšetřovány jak pro jednotlivé varianty, tak pro jednotlivé hloubky. Výsledné statistiky jednotlivých testů byly z důvodu velkého množství dat pro přehlednost zpracovány a zobrazeny do křížové tabulky (tabulka 10).

Při provedení testu pro varianty byly v hloubkách 4, 8 a 12 cm nalezeny statisticky významné rozdíly mezi hodnotami penetračního odporu naměřených na poli a TTP. V hloubce 16 cm byly nalezeny statisticky významné rozdíly mezi hodnotami naměřenými na TTP v kolejovém řádku a ostatními variantami. V hloubce 20 cm nebyly již mezi jednotlivými variantami nalezeny statisticky významné rozdíly.

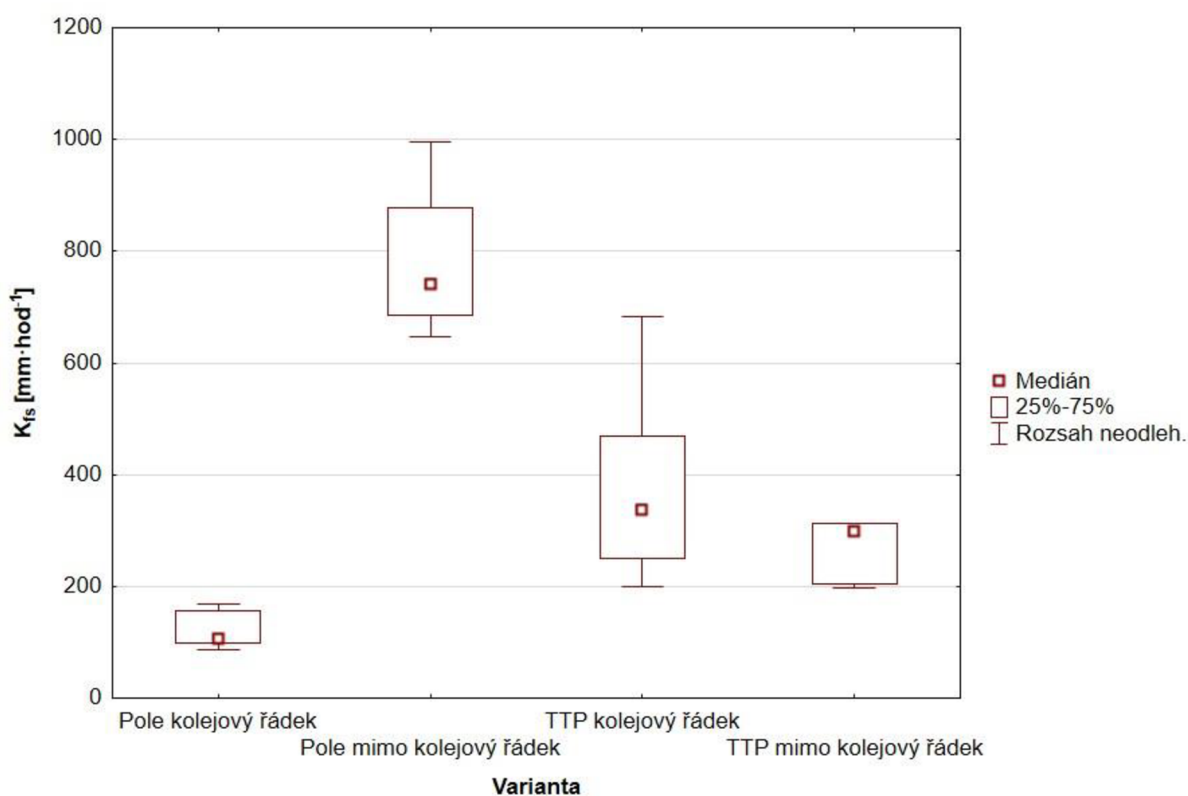
Pro hloubky byly taktéž nalezeny statisticky významné rozdíly mezi hodnotami penetračních odporů, kdy s rostoucí hloubkou měření rostly statisticky významně i penetrační odpory.

Tabulka 10. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro průměrné penetrační odpory v MPa, $\alpha = 0,05$; a, b, c – homogenní skupiny v řádku; 1, 2... - homogenní skupiny ve sloupci; k. ř. – kolejový řádek; m. k. ř. – mimo kolejový řádek

| Hloubka [cm] | Pole k. ř. | | Pole m. k. ř. | | TTP k. ř. | | TTP m. k. ř. | |
|--------------|------------|-----|---------------|-----|-----------|-----|--------------|-----|
| 4 | 1,03 | a,b | 0,53 | a | 1,72 | c | 1,41 | b,c |
| | | 2 | | 1 | | 2 | | 1 |
| 8 | 1,92 | a | 0,9 | c | 2,9 | b | 2,4 | a,b |
| | | 2,3 | | 1 | | 1,2 | | 1,2 |
| 12 | 2,58 | a,b | 1,6 | a | 4,49 | c | 3,22 | b |
| | | 1,3 | | 1,2 | | 1 | | 2,3 |
| 16 | 3,61 | a,b | 2,77 | a | 4,98 | b | 4,1 | a,b |
| | | 1 | | 2 | | 1 | | 3,4 |
| 20 | 3,82 | a | 2,24 | a | 3,6 | a | 4,45 | a |
| | | 1 | | 1,2 | | 1,2 | | 4 |

8.3. Nasycená hydraulická vodivost

Nasycené hydraulické vodivosti naměřené při různých variantách jsou uvedeny na obrázku 16. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny na poli mimo kolejový řádek, a naopak nejnižší hodnoty na poli v kolejovém řádku (medián této varianty se snížil o 86 %). Medián obdobných variant na TTP se v kolejovém řádku naopak zvýšil oproti variantě mimo kolejový řádek o 12 %. Dle Tukeyova HSD testu (tabulka 11) byl nalezen statisticky významný rozdíl ve 2. homogenní skupině mezi polními variantami a variantami na TTP. Na základě 3. homogenní skupiny byl statisticky významný rozdíl mezi nasycenou hydraulickou vodivostí naměřenou na poli mimo kolejový řádek a ostatními variantami.



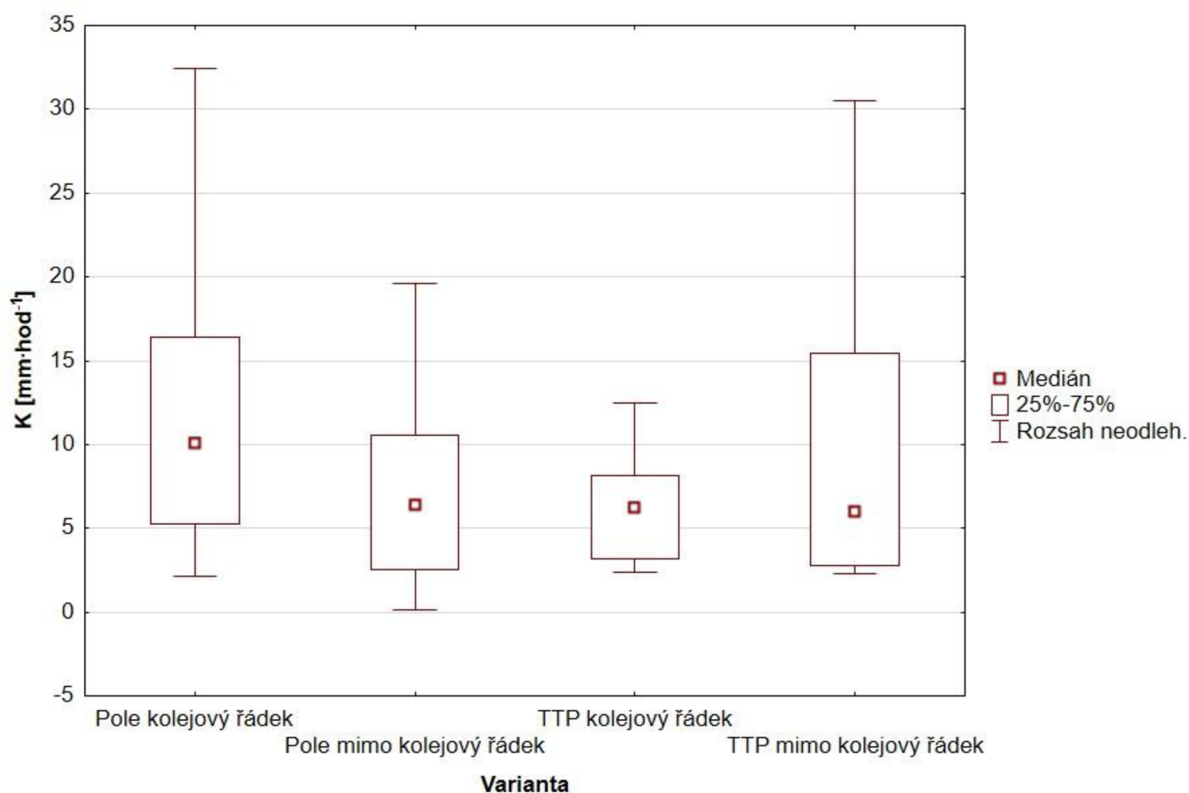
Obrázek 16. Nasycená hydraulická vodivost (K_{fs}) pro jednotlivé varianty

Tabulka 11. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro nasycené hydraulické vodivosti (K_{fs}), $\alpha = 0,05$

| Varianta | K_{fs} [mm·hod ⁻¹] Průměr | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------|--|------|------|------|
| Pole kolejový řádek | 123,6949 | **** | | |
| TTP mimo kolejový řádek | 313,2224 | **** | **** | |
| TTP kolejový řádek | 387,4091 | | **** | |
| Pole mimo kolejový řádek | 782,0202 | | | **** |

8.4. Nenasycená hydraulická vodivost

Výsledné hodnoty nenasycené hydraulické vodivosti jsou na obrázku 17. V případě variant pole mimo kolejový řádek, TTP kolejový řádek a TTP mimo kolejový řádek se mediány hodnot lišily zanedbatelně (do 7 %). Nejvyšší rozdíl mezi mediány hodnot byl zaznamenán mezi variantami pole kolejový řádek a TTP mimo kolejový řádek (medián druhé varianty byl oproti první nižší o 41 %). Tukeyův HSD test je uveden v tabulce 12. Mezi jednotlivými variantami nebyly nalezeny statisticky významné rozdíly.



Obrázek 17. nenasycená hydraulická vodivost (K) pro jednotlivé varianty

Tabulka 12. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro nenasycené hydraulické vodivosti (K), $\alpha = 0,05$

| Varianta | K [mm·hod ⁻¹] Průměr | 1 |
|--------------------------|---------------------------------------|------|
| TTP kolejový řádek | 6,24023 | **** |
| Pole mimo kolejový řádek | 7,35351 | **** |
| TTP mimo kolejový řádek | 10,15109 | **** |
| Pole kolejový řádek | 12,26090 | **** |

9. Diskuze

9.1. Neporušené půdní vzorky

Vlhkost

U polních variant byla vyšší momentální vlhkost naměřena v kolejovém řádku než mimo kolejový řádek se statisticky významným rozdílem. U variant na TTP byla naměřena vyšší vlhkost mimo kolejový řádek než v kolejovém řádku. Celkově byla nejvyšší momentální vlhkost půdy ze všech variant naměřena na TTP mimo kolejový řádek a nejnižší naopak na TTP v kolejovém řádku se statisticky významným rozdílem.

Vyšší momentální vlhkost naměřenou na poli v kolejovém řádku než mimo řádek lze přisuzovat tomu, že opakovaným přejezdem techniky došlo ke zhutnění jinak kypré půdy po orbě a k následnému vytvoření kapilárních pórů, které umožnily vytvořit kapilární cesty vody v půdě, což způsobilo vztlínání vody z podorničí a její neustálou ztrátu neproduktivním výparem (JAVŮREK et al., 2008; GOLDBERG et al., 2022). Toto tvrzení potvrdily výsledky kapilárních pórovitostí, kdy byla u této varianty naměřena vyšší kapilární pórovitost než při variantě mimo kolejový řádek. Na TTP, tím že nebyla půda dlouhodobě kypřena, došlo vlivem opakovaných přejezdů taktéž ke zhutnění půdy, díky čemuž došlo k obdobnému efektu a půda byla schopna hůře zadržovat a infiltrovat vodu, a to i přes pokrytí povrchu půdy hustým travním porostem, který by měl chránit půdu proti výparu a zadržovat srážkovou vodu. Jak ale uvádí VAN DIJCK et al. (2002), povrch zhutněné půdy již nemá zásadní vliv na parametry infiltrace.

Celkově byly naměřené momentální vlhkosti všech variant velmi nízké, na TTP mimo kolejový řádek 27,2 % a v kolejovém řádku dokonce 18,9 %. To bylo způsobeno déle trvajícím suchem v dané oblasti na přelomu jara a léta. VALLA et al. (2002) uvádí, že optimální vlhkost půdy by přitom měla být pro obilniny 60-70 % a pro píce 75-85 %.

Objemová hmotnost

V případě objemových hmotností byly očekávány významné rozdíly v naměřených hodnotách jak v kolejovém řádku a mimo něj, tak i mezi TTP a polem. Naměřené hodnoty objemových hmotností na TTP v kolejovém řádku i mimo něj se však lišily pouze v řádu setin $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Na poli byly sice naměřeny vyšší hodnoty v kolejovém řádku než mimo řádek, což je v souladu s výsledky jiných autorů (ALAKUKKU, 1996; DEFOSSEZ et al., 2002; DICKSON et al.,

1996). Při statistickém zpracování však nebyly mezi jednotlivými variantami nalezeny statisticky významné rozdíly, což bylo způsobeno pravděpodobně velkým variačním rozpětí naměřených hodnot.

Pórovitost celková

Celková pórovitost byla naměřena nejnižší na poli v kolejovém řádku (37,6 % obj.), a naopak nejvyšší na poli mimo kolejový řádek (41,7 % obj.). Na TTP byly mediány celkových pórovitostí v řádku i mimo něj velmi podobné (39,1 a 40 % obj.). Po statistickém zpracování nebyly mezi jednotlivými variantami nalezeny významné rozdíly.

Dle VALLI et al. (2002) byly naměřené celkové pórovitosti všech variant velmi nízké (3 ze 4 variant byly vyhodnoceny jako velmi ulehle půdy, kdy hraniční pórovitost je dle tohoto autora pro ulehlou půdu 50 % obj. a pro velmi ulehlou 40 % obj.). Vyšší hodnoty celkové pórovitosti na poli mimo kolejový řádek oproti ostatním variantám lze přisuzovat orebnému zpracování půdy, po kterém je půda kyprá s nízkou objemovou hmotností (COOPER et al., 2020). Nižší hodnoty naměřené na poli v kolejovém řádku zapříčinily opakované přejezdy techniky, díky kterým došlo ke zhutnění půdy. Obdobné výsledky publikovali například FU et al. (2019) nebo ALAKUKKU et al. (1996). Celkové pórovitosti na TTP poměrně korespondovaly s naměřenými objemovými hmotnostmi, kdy taktéž nedošlo vlivem opakovaných přejezdů k výrazným změnám této veličiny.

Pórovitost kapilární

Kapilární pórovitost naměřená na poli byla nižší mimo kolejový řádek, na TTP naopak v kolejovém řádku. Celkově byla nejvyšší kapilární pórovitost naměřena na TTP mimo kolejový řádek a nejnižší na poli mimo kolejový řádek. Mezi variantami v kolejovém řádku na poli a TTP nebyly nalezeny statisticky významné rozdíly. Byly ale nalezeny statisticky významné rozdíly vůči těmto variantám mimo kolejový řádek na poli i TTP. Na poli mimo kolejový řádek byla naměřena statisticky významně nižší kapilární pórovitost a na TTP mimo kolejový řádek naopak statisticky významně vyšší kapilární pórovitost.

Nižší kapilární pórovitost naměřenou na poli mimo kolejový řádek způsobilo orebné zpracování půdy, díky kterému byly přerušeny kapilární cesty vody v půdě a vlivem nakypření půdy se na úkor kapilárních pórů zvětšil poměr pórů nekapilárních. K obdobným výsledkům došel například AZOOZ et al. (1996) nebo DESTAIN et al. (2016), kteří zaznamenali nižší počet

kapilárních pórů taktéž při orebném zpracování půdy. Ve výsledku kapilární pórovitosti korespondovaly s vlhkostmi půdy při daných variantách, kdy se při změně kapilární pórovitosti měnila i momentální vlhkost vázaná v půdě. Je tedy zřejmé, že zpracováním půdy se rozbíjí kapilární cesty vody v půdě a přejezdy po zpracované půdě tyto kapilární cesty naopak pomáhají vytvořit. V případě TTP je to naopak, příroda se sama snaží v nezpracované půdě vytvořit optimální podmínky, které ale přejezdy techniky poškozují.

Pórovitost nekapilární

Nejvyšší nekapilární pórovitost ze všech variant byla naměřena na poli mimo kolejový řádek, nejnižší naopak na TTP mimo kolejový řádek. Ve druhé z výše uvedených variant se jednalo o půdu, která nebyla zpracovávána, tudíž půdu ulehlou s nižším obsahem nekapilárních pórů. Na poli byla vyšší nekapilární pórovitost naměřena mimo kolejový řádek a na TTP v kolejovém řádku. Mezi jednotlivými variantami nebyly nalezeny statisticky významné rozdíly. Podobných výsledků dosáhli ve svých pracích i jiní autoři (JOSA et al., 2013; SMUTNÝ, 2015). V rozporu s těmito výsledky jsou ale zjištění MOZAFFARIHO et al. (2022), který naměřil vyšší nekapilární pórovitost na TTP s vojtěškou. Jak tento autor ale dále uvádí, tyto vyšší hodnoty způsobily hluboké kořenové systémy vojtěšky a vysoký obsah organické hmoty v půdě. Celkově nekapilární pórovitosti korespondují s kapilárními pórovitostmi, kdy se póry poměrově mění v závislosti na dané variantě.

9.2. Penetrační odpor

V případě měření penetračních odporů byly vyšší hodnoty naměřeny v prostoru kolejového řádku na poli i TTP, což potvrzuje, že opakovaným přejezdem techniky po pozemku došlo ke zhutnění půdy. Toto tvrzení je v souladu s výsledky CHYBY (2013), RADFORDA et al. (2007) nebo DICKSONA et al. (1996). Celkově došlo k nárůstu penetračních odporů naměřených na TTP v kolejovém řádku i mimo něj, ve srovnání s obdobnými variantami na poli, čímž lze potvrdit, že není-li půda ve větší míře kypřena, pak může snadno docházet k jejímu zhutnění (COOPER et al., 2020; FERNÁNDEZ et al., 2015).

9.3. Nasycená hydraulická vodivost

Nejvyšší hodnoty nasycené hydraulické vodivosti ze všech variant byly naměřeny na poli mimo kolejový řádek, a naopak nejnižší hodnoty na poli v kolejovém řádku se statisticky

významným rozdílem. Tyto výsledky potvrzují ZHANG et al. (2006), RAPER (2006) a KIRKHAM (2005) kteří tvrdí, že s rostoucím zhutněním půdy nasycená hydraulická vodivost klesá. Mezi hodnotami naměřenými na TTP v řádku i mimo řádek nebyly nalezeny statisticky významné rozdíly.

Vyšší nasycenou hydraulickou vodivost na poli mimo kolejový řádek způsobila kypřejší půda po orbě, kdy její pórovitost z větší část tvořily nekapilární póry (viz výsledky nekapilárních pórovitostí v kapitole 9.1.), které umožnily vodě rychleji pronikat do půdy (VALLA et al., 2002; SMUTNÝ, 2015). V důsledku toho došlo při této variantě k rychlejší infiltraci vody do půdy. Tomuto tvrzení ale odporují například výsledky AZOOZE et al. (1996), který naměřil vyšší nasycenou hydraulickou vodivost v případě přímého setí do nezpracované půdy než při orebném zpracování.

9.4. Nenasycená hydraulická vodivost

Vyšší hodnoty nenasycené hydraulické vodivosti byly naměřeny na poli v kolejovém řádku a nejnižší na TTP mimo kolejový řádek, ovšem mezi žádnými variantami nebyly nalezeny statisticky významné rozdíly. Tento výsledek potvrzuje i KODEŠOVÁ et al. (2011), která při obdobném pokusu taktéž nezaznamenala statisticky významné rozdíly v nenasycené hydraulické vodivosti, nebo ZHANG et al. (2006), který s rostoucím zhutněním nezaznamenal rozdíly v nenasycené hydraulické vodivosti. Vyšší hodnoty nenasycené hydraulické vodivosti naměřené na poli v řádku lze vysvětlit tím, že za nenasycených podmínek je pro vertikální pohyb vody půdou důležitá velikost kontaktní plochy sousedních agregátů, proto zhutnění půdy často způsobí zvýšení její infiltrační kapacity (BERLI et al., 2008; CARMINATI et al., 2007).

10. Závěr

Tato diplomová práce se věnovala vlivu zemědělských technologií na vlastnosti půdy. V rešeršní části práce bylo nejprve pojednáno o půdě, půdní vodě a zhutňování půdy. V následujících kapitolách byly představeny fyzikální a infiltrační vlastnosti půdy a dále některé současné způsoby zpracování půdy. Zvláštní pozornost byla věnována zejména tématům, která byla použita nebo souvisela s praktickou částí práce. V každé kapitole bylo téže na základě prací různých autorů pojednáno o vlivu vybraných zemědělských technologií na vlastnosti půdy.

Praktická část této diplomové práce se věnovala polnímu pokusu, při kterém byly zkoumány vybrané fyzikální a infiltrační vlastnosti půdy (objemová hmotnost, pórovitost, penetrační odpor, nasycená a nenasycená hydraulická vodivost) na dvou částech pozemku, kde byly používány rozdílné zemědělské technologie. Cílem pokusu bylo zjistit, jaký vliv na vlastnosti půdy, na daném pozemku, by měl tento rozdílný systém hospodaření uplatňovaný na souvratích.

Na části pozemku s TTP, která byla používána jako souvrať orebně obhospodařovaného pozemku, došlo vlivem zhutnění půdy k nárůstu hodnot objemové hmotnosti a penetračního odporu. Tím, že nebyla půda na TTP dlouhodobě kypřena se snížila její celková pórovitost, ale naproti tomu se zvýšila pórovitost kapilární. Vlivem pokrytí povrchu půdy hustým travním porostem byl na TTP značně omezen neproduktivní výpar. Z hlediska infiltračních vlastností se na TTP velmi snížila schopnost rychlého vsakování vody do půdy.

Zatravnění souvratí nebo vytvoření ochranných pásů TTP podél vodních toků by tak dle výsledků této práce mohlo vést nikoli jen, jak je uváděno k omezení eroze, ale taktéž by se tímto opatřením mohly umocnit některé současné problémy spojené s degradací zemědělských půd. Touto problematikou by tak bylo vhodné se dále zabývat a provést více měření pro různé půdní podmínky, kdy se tyto výsledky mohou v řadě lokalitách výrazně lišit.

Odpovědi na vědecké otázky:

- a) Má opakovaný přejezd techniky po pozemku při dané zemědělské technologii vliv na fyzikální vlastnosti a infiltrační schopnosti půdy?
 - Na základě naměřených hodnot v kolejovém řádku a mimo kolejový řádek má opakovaný přejezd techniky po pozemku významný vliv na veličiny, které souvisí s fyzikálními vlastnostmi nebo infiltračními schopnostmi půdy.
- b) Mají rozdílné zemědělské technologie různý vliv na fyzikální vlastnosti a infiltrační schopnosti půdy?
 - Z výsledků měření vyplívá že rozdílné zemědělské technologie mají různý vliv na fyzikální vlastnosti a infiltrační schopnosti půdy.
- c) Lze použitím rozdílné zemědělské technologie na souvratích omezit zhutnění půdy a zlepšit její infiltrační schopnosti?
 - Použitím rozdílné zemědělské technologie na souvratích nelze v tomto konkrétním případě omezit zhutnění půdy ani zlepšit její infiltrační schopnosti.

Seznam použité literatury

ALAKUKKU L., 1996, Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I. Short-term effects on the properties of clay and organic soils, *Soil and Tillage Research*, Volume 37, Issue 4, 1996, Pages 211-222, ISSN 0167-1987, [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(96\)01016-1](https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)01016-1).

AZOOZ R. H., ARSHAD M. A., 1996, Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems, *Canadian Journal of Soil Science*, 76(2): 143-152, <https://doi.org/10.4141/cjss96-021>

BAGARELLO V., IOVINO M., ELRICK D.E., 2004, A Simplified Falling-Head Technique for Rapid Determination of Field-Saturated Hydraulic Conductivity, *Soil Science Society of America Journal*, Volume 68, 2004, Pages 66-73, ISSN 0361-5995, <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.6600>.

BAGARELLO V., ELRICK D.E., IOVINO M., SGROI A., 2006, A laboratory analysis of falling head infiltration procedures for estimating the hydraulic conductivity of soils, *Geoderma*, Volume 135, 2006, Pages 322-334, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.12.008>.

BECK-BROICHSITTER S., GERKE H. H., LEUE M., VON JEETZE P. J., HORN R., 2020, Anisotropy of unsaturated soil hydraulic properties of eroded Luvisol after conversion to hayfield comparing alfalfa and grass plots, *Soil and Tillage Research*, Volume 198, 2020, 104553, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104553>.

BERLI M., CARMINATI A., GHEZZEHEI T. A., OR D. (2008), Evolution of unsaturated hydraulic conductivity of aggregated soils due to compressive forces, *Water Resour. Res.*, 44, W00C09, doi:10.1029/2007WR006501.

BOGUNOVIC I., PEREIRA P., KISIC I., SAJKO K., SRAKA M., 2018, Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia), *CATENA*, Volume 160, 2018, Pages 376-384, ISSN 0341-8162, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.009>.

BRANT V., 2021, Základy zpracování půdy (1): Podmítka (I.) - Články - Agromanuál.cz. Profesionální informace pro agronomy - Agromanual.cz [online]. Copyright © 2023 [cit. 20.01.2023]. Dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/zaklady-zpracovani-pudy-1-podmitka-i>

BRANT V., BEČKA D., CIHLÁŘ P., et al., 2016, Pásové zpracování půdy (strip tillage): klasické, intenzivní a modifikované. Praha: Profi Press, 2016. ISBN 978-80-86726-76-2.

CARMINATI A., KAESTNER A., HASSANEIN R., IPPISCH O., VONTOBEL P., FLÜHLER H., 2007, Infiltration through series of soil aggregates: Neutron radiography and modeling, *Advances in Water Resources*, Volume 30, Issue 5, 2007, Pages 1168-1178, ISSN 0309-1708, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.10.006>.

COOPER J. R., HAMA-AZIZ Z. Q., HISCOCK K. M., LOVETT A. A., VRAIN E., DUGDALE S. J., SÜNNENBERG G., DOCKERTY T., HOVESEN P., NOBLE L., 2020, Conservation tillage and soil health: Lessons from a 5-year UK farm trial (2013–2018), *Soil and Tillage Research*, Volume 202, 2020, 104648, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104648>.

CROPWATCH-UNIVERSITY OF NEBRASKA, 2023, Tillage and No-Till Systems, CropWatch. University of Nebraska–Lincoln [online]. Copyright © 2023 Všechna práva vyhrazena [cit. 01.03.2021]. Dostupné z: <https://cropwatch.unl.edu/tillage>

DECAGON Devices, 2021, Mini disk infiltrometer, user's manual, version14. DECAGON Devices, [On-Line], Available from: <http://www.decagon.com> [Accessed 20 January 2023].

DEFOSSEZ P. a RICHARD G., 2002, Models of soil compaction due to traffic and their evaluation, *Soil and Tillage Research*, Volume 67, Issue 1, 2002, Pages 41-64, ISSN 0167-1987, [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00030-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00030-2).

DESTAIN M. F., ROISIN C., DALCQ A. S., MERCATORIS B.C.N., 2016, Effect of wheel traffic on the physical properties of a Luvisol, *Geoderma*, Volume 262, 2016, Pages 276-284, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.028>.

DEXTER A.R., CZYZ E.A., GATE O.P., 2004, Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils, *Soil and Tillage Research*, Volume 79, Issue 2, 2004, Pages 185-189, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.007>.

DEXTER A.R., CZYZ E.A., GATE O.P., 2007, A method for prediction of soil penetration resistance, *Soil and Tillage Research*, Volume 93, Issue 2, 2007, Pages 412-419, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.05.011>.

DICKSON J. W. a RITCHIE R. M., 1996, Zero and reduced ground pressure traffic systems in an arable rotation 2. Soil and crop responses, *Soil and Tillage Research*, Volume 38, Issues 1–2, 1996, Pages 89-113, ISSN 0167-1987, [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(96\)01027-6](https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)01027-6).

ELRICK D.E., REYNOLDS W.D. AND TAN K.A., 1989, Hydraulic Conductivity Measurements in the Unsaturated Zone Using Improved Well Analyses, *Groundwater Monitoring & Remediation*, Volume 9, Issues 3, 1989, Pages 184-193, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1989.tb01162.x>

ETANA A., LARSBO M., KELLER T., ARVIDSSON J., SCHJØNNING P., FORKMAN J., JARVIS N., 2013, Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil, *Geoderma*, Volume 192, 2013, Pages 430-436, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.015>.

FERNÁNDEZ F.G., SORENSEN B.A., VILLAMIL M.B., 2015, A Comparison of Soil Properties after Five Years of No-Till and Strip-Till, *Agronomy Journal*, Volume 107, Issues 4, 2015, ISSN 1339-1346, <https://doi.org/10.2134/agronj14.0549>.

FU Y., TIAN Z., AMOOZEGAR A., HEITMAN J., 2019, Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction, *Soil and Tillage Research*, Volume 193, 2019, Pages 114-121, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.016>.

GAO W., WHALLEY W. R., TIAN Z., LIU J., REN T., 2016, A simple model to predict soil penetrometer resistance as a function of density, drying and depth in the field, *Soil and Tillage Research*, Volume 155, 2016, Pages 190-198, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.004>.

GOLDBERG-YEHUDA N., ASSOULINE S., MAU Y., NACHSHON U., 2022, Compaction effects on evaporation and salt precipitation in drying porous media, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Volume 26, Issues 9, 2022, ISSN 2499–2517, <https://doi.org/10.5194/hess-26-2499-2022>, 2022.

HŮLA J., PROCHÁZKOVÁ, B., 2008, Minimalizace zpracování půdy. Praha: Profi Press, 2008. ISBN 978-80-86726-28-1.

CHEREMISINOFF N. P., 1997, *Groundwater Remediation and Treatment Technologies*, William Andrew Publishing, 1997, Pages 85-126. ISBN 9780815514114

CHYBA, Jan., 2013, Vliv technologie řízeného pohybu strojů po pozemcích na fyzikální vlastnosti půdy a výnosy plodin. Praha, 2013. Disertační práce. Česká Zemědělská Univerzita v Praze, Technická fakulta, Katedra zemědělských strojů. Vedoucí práce prof. Dr. Ing. František Kumhála

JAVŮREK, Miloslav a Milan VACH., 2008, Negativní vlivy zhutnění půd a soustava opatření k jejich odstranění. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, 2008. ISBN 978-80-87011-57-7.

JOSA R., GORCHS G., GINOVRT M., SOLÉ-BENET A., 2013, Influence of tillage on soil macropore size, shape of top layer and crop development in a sub-humid environment, *Biologia*, Volume 68, Issue 6, 2013, ISSN 1099–1103, <https://doi.org/10.2478/s11756-013-0250-y>

KELLER T., SUTTER J. A., NISSEN K., RYDBERG T., 2012, Using field measurement of saturated soil hydraulic conductivity to detect low-yielding zones in three Swedish fields, *Soil and Tillage Research*, Volume 124, 2012, Pages 68-77, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.05.002>.

KIRKHAM M. B., 2005, Principles of Soil and Plant Water Relations, Academic Press, 2005, Pages 145-172. ISBN 978-0-12-409751-3

KODEŠOVÁ R., JIRKŮ V., KODEŠ V., MÜHLHANSELOVÁ M., NIKODEM A., ŽIGOVÁ A., 2011, Soil structure and soil hydraulic properties of Haplic Luvisol used as arable land and grassland, *Soil and Tillage Research*, Volume 111, Issue 2, 2011, Pages 154-161, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.09.007>.

KOOLD., TONG B., TIAN Z., HEITMAN J. L., SAUER T. J., HORTON R., 2019, Soil water retention and hydraulic conductivity dynamics following tillage, *Soil and Tillage Research*, Volume 193, 2019, Pages 95-100, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.020>.

KŘEN J., NEUDERT L., PROCHÁZKOVÁ B., SMUTNÝ V., HŮLA J., 2015, Obecná produkce rostlinná. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 978-80-7509-327-1.

KUTÍLEK M., 2012, Půda planety Země. Praha: Dokořán, 2012. ISBN 978-80-7363-212-0.

LPIS, 2023, Veřejný registr půdy, eAGRI, [online]. Dostupné z: <https://eagri.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny2/plpis/>

MATEO-MARÍN, N., BOSCH-SERRA, À. D., MOLINA, M. G., & POCH, R. M., 2022, Impacts of tillage and nutrient management on soil porosity trends in dryland agriculture. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13139, [online], URL: <https://doi.org/10.1111/ejss.13139>

MILLER S., 1994, Handbook for agrohydrology. Chatham: Natural Resources Institute, 1994. ISBN 9780859543897

MOZAFFARI H., AKBAR MOOSAVI A., SEPASKHAH A., CORNELIS W., 2022, Long-term effects of land use type and management on sorptivity, macroscopic capillary length and water-conducting porosity of calcareous soils, *Arid Land Research and Management*, 36 (4), 2022, Pages 371-397, <https://doi.org/10.1080/15324982.2022.2066582>

NEUBAUER K., 1989, Stroje pro rostlinnou výrobu. Praha: SZN. ISBN 80-209-0075-6.

NSSH (The National Soil Survey Handbook), 2021, U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. National soil survey handbook, title 430-VI. Available online. Accessed 19/1/2023.

PAVLŮ, Lenka., 2018, Základy pedologie a ochrany půdy. Vyd. 1., V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2018. ISBN 978-80-213-2876-1.

POKORNÝ, Eduard, Bořivoj ŠARAPATKA a Květuše HEJÁTKOVÁ., 2007, Hodnocení kvality půdy v ekologicky hospodařícím podniku: metodická pomůcka. Náměšť nad Oslavou: ZERA - Zemědělská a ekologická regionální agentura, 2007. ISBN 80–903548–5–8.

RADFORD B.J., YULE D. F., MCGARRY D., PLAYFORD C., 2007, Amelioration of soil compaction can take 5 years on a Vertisol under no till in the semi-arid subtropics, *Soil and Tillage Research*, Volume 97, Issue 2, 2007, Pages 249-255, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.005>.

RAPER R. L., KIRBY J. M., 2006, Soil compaction: How to do it, undo it, or avoid it, Agricultural Equipment Technology Conference. - Louisville, Kentucky, USA – 2006, - stránky 1-14, [On-line], USDA, http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/64200500/csr/ResearchPubs/raper/ra_per_06d.pdf

ROH J., KUMHÁLA F., HEŘMÁNEK P., 2003, Stroje používané v rostlinné výrobě. Vyd. 2. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2003. ISBN 80-213-0614-9.

SÁŇKA, Milan, Radim VÁCHA, Šárka POLÁKOVÁ a Přemysl FIALA., 2018, Kritéria pro hodnocení produkčních a ekologických vlastností půd. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2018. ISBN 978-80-7212-627-9.

SCHLÜTER S., GROßMANN C., DIEL J., WU G.-M., TISCHER S., DEUBEL A., RÜCKNAGEL J., 2018, Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties, *Geoderma*, Volume 332, 2018, Pages 10-19, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.001>.

SMUTNÝ, Vladimír, 2015, Význam technologií zpracování půdy a dalších agrotechnických opatření při pěstování obilnin: certifikovaná metodika. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 978-80-7509-369-1.

ŠIMŮNEK J., SEMOTÁN J., 1988, Numerická simulace transportu rozpuštěných látek v pórovitém prostředí, *Vodohospodářský časopis: Journal of Hydrology and Hydromechanics*, Praha: Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, 1988, 36 (2). ISSN 0042-790x.

ŠKODA, Vítězslav, 1998, Obecná produkce rostlinná. Praha: Česká zemědělská univerzita, 1998. ISBN 80-213-0450-2.

ŠNOBL, Josef a Josef PULKRÁBEK., 2005, Základy rostlinné produkce. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2005. ISBN 978-80-213-1340-8.

UNGER P. W., 1996, Soil bulk density, penetration resistance, and hydraulic conductivity under controlled traffic conditions, *Soil and Tillage Research*, Volume 37, Issue 1, 1996, Pages 67-75, ISSN 0167-1987, [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00508-0](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00508-0).

VALLA M., KOZÁK, J. NĚMEČEK J., MATULA S., BORŮVKA L. a DRÁBEK O., 2002, Pedologické praktikum. 2. vyd. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2006. ISBN 80-213-0914-8.

VAN DIJCK S.J.E, VAN ASCH TH. W. J, 2002, Compaction of loamy soils due to tractor traffic in vineyards and orchards and its effect on infiltration in southern France, *Soil and Tillage Research*, Volume 63, Issues 3–4, 2002, Pages 141-153, ISSN 0167-1987, [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00237-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00237-9).

WALLACH RONY, 2008, 3 - PHYSICAL CHARACTERISTICS OF SOILLESS MEDIA, Editor(s): Michael Raviv, J. Heinrich Lieth, *Soilless Culture*, Elsevier, 2008, Pages 41-116, ISBN 9780444529756.

WU L., SWAN J. B., PAULSON W. H., RANDALL G. W., 1992, Tillage effects on measured soil hydraulic properties, *Soil and Tillage Research*, Volume 25, Issue 1, 1992, Pages 17-33, ISSN 0167-1987, [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(92\)90059-K](https://doi.org/10.1016/0167-1987(92)90059-K).

ZHANG R., 1997, Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer, *Soil Science Society of America Journal* 61(4), ISSN 1024–1030.

ZHANG S., GRIP H., LÖVDAHL L., 2006, Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China, *Soil and Tillage Research*, Volume 90, Issues 1–2, 2006, Pages 117-125, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.08.012>.

ZHAO H., QIN J., GAO T., ZHANG M., SUN H., ZHU S., XU C., NING T., 2022, Immediate and long-term effects of tillage practices with crop residue on soil water and organic carbon storage changes under a wheat-maize cropping system, *Soil and Tillage Research*, Volume 218, 2022, 105309, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105309>.

ZITTA M., VOSTAL J., 1999, *Obecná fyto technika*. Vyd. 2. upr. Praha: Česká zemědělská univerzita, 1999. ISBN 80-213-0524-x.

Seznam veličin a zkratek

| Veličina | Interpretace | Jednotky |
|-------------|---|---|
| O_{30} | Vlhkost 30-minutová | [% obj.] |
| O_{MKK} | Max. kap. Vodní kapacita | [% obj.] |
| O_{mom} | Momentální vlhkost | [% obj.] |
| O_{ns} | Nasákivost | [% obj.] |
| O_{RVK} | Retenční vodní kapacita | [% obj.] |
| A | Plocha povrchu půdy, na který je při metodě SFH aplikována voda | [m ²] |
| | Hodnota van Genuchtenova parametru | [-] |
| a | Hloubka orby | [m] |
| b | Šířka záběru orebního tělesa | [m] |
| c | Hydraulická kapacita | [m ⁻¹] |
| C_1 | Parametr související se sorptivitou půdy | [m·s ^{-1/2}] |
| | Hodnota křivky kumulativní infiltrace a druhé odmocniny času | [m·s ^{-1/2}] |
| C_2 | Parametr hydraulické vodivosti | [m·s ⁻¹] |
| D | Hloubka vody; Výška hladiny | [m] |
| G_A | Vzorek s přirozenou vlhkostí | [g] |
| G_B | Vzorek kapilárně nasycený | [g] |
| G_C | Vzorek po 30 min. odsávání | [g] |
| G_D | Vzorek po 2 hod. odsávání | [g] |
| G_E | Vzorek po 24 hod. odsávání | [g] |
| G_F | Vzorek po vysušení při 105 °C | [g] |
| G_H | Čistá hmotnost vzorku po vysušení při 105 °C, Sušina | [g] |
| G_S | Hmotnost hodinového skla | [g] |
| G_V | Hmotnost fyzikálního válečku | [g] |
| h | Tlaková výška půdní vody | [m] |
| h_0 | Tlaková výška infiltrometru | [m] |
| H_0 | Výška hladiny v čase t=0 | [m] |
| I | Kumulativní infiltrace | [m] |
| K | Nenasycená hydraulická vodivost | [m·s ⁻¹ ; mm·h ⁻¹] |
| | Tenzor hydraulické vodivosti | [m·s ⁻¹ ; mm·h ⁻¹] |
| K_{fs} | Nasycená hydraulická vodivost | [m·s ⁻¹ ; mm·h ⁻¹] |
| K_{MKKvz} | Max. kap. Vzdušná kapacita | [% obj.] |
| K_O | Orební poměr | [-] |
| K_{RVKvz} | Retenční vzdušná kapacita | [% obj.] |
| n | Retenční parametr půdy | [-] |
| | Navážka pro stanovení specifické hmotnosti | [g] |
| P | Pórovitost celková | [% obj.] |

| Veličina | Interpretace | Jednotky |
|-----------------|---|------------------------------------|
| P_{H_2O} | Hmotnost pyknometru s vodou | [g] |
| P_k | Pórovitost kapilární | [% obj.] |
| P_n | Pórovitost nekapilární | [% obj.] |
| P_z | Hmotnost pyknometru se zeminou | [g] |
| r_0 | Poloměr disku infiltrometru | [m] |
| t, t_a | Čas | [s] |
| V | Objem | [m ³ ; l] |
| V_S | Objem fyzikálního válečku | [cm ³] |
| V_z | Prozdušněnost | [% obj.] |
| z | Prostorová souřadnice orientovaná kladně vzhůru | [m] |
| α | Retenční parametr půdy Hladina významnosti | [m ⁻¹] [-] |
| α^* | Parametr struktury a textury půdy | [m ⁻¹] |
| Δ_0 | Rozdíl mezi polním nasyceným a počátečním objemovým obsahem vody v půdě | [-] |
| ρ_d | Objemová hmotnost | [g·cm ⁻³] |
| ρ_z | Specifická hmotnost | [g·cm ⁻³] |
| Φ_m | Polní nasycený potenciál matricového toku | [m ² ·s ⁻¹] |
| ψ_f | Tlaková výška na smáčené straně | [m] |

| Zkratka | Interpretace |
|----------------|---|
| DZES | Dobry zemědělský a environmentální stav |
| HSD | Honestly significant difference (test homogenních skupin) |
| MS | Microsoft |
| NSSH | The National Soil Survey Handbook (národní příručka průzkumu půdy) |
| SFH | Simplifield Falling-Head (metoda měření nasycené hydraulické vodivosti) |
| TTP | Trvalý travní porost |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1. Objemová hmotnost půdy (ρ_d) v závislosti na hloubce (depth), porovnání simulace a modelu (DEFOSSEZ et al., 2002) | 6 |
| Obrázek 2. Penetrační odpor půdy do hloubky (depth) 48 cm na kontrolní ploše (control) a přejeté ploše (compacted) (ETANA et al., 2013) | 9 |
| Obrázek 3. Příklad infiltračních křivek pro různé druhy půd (MILLER, 1994) (upraveno: Bárta) | 10 |
| Obrázek 4. Obracení skývy při orbě (ŠKODA et al., 1998) | 19 |
| Obrázek 5. Družicový snímek pokusného pozemku, část (A) je obhospodařována konvenčním systémem a část (B) s TTP (LPIS, 2023) (upraveno: Bárta) | 23 |
| Obrázek 6. Kopeckého válečky k odběru neporušených půdních vzorků (vlevo) s odběrovou hlavicí (vpravo) (foto: Bárta)..... | 25 |
| Obrázek 7. Půdní penetrometr používaný k měření (foto: Bárta) | 25 |
| Obrázek 8. Prstence, do kterých byl aplikován daný objem vody (vlevo) a vlhkoměr FIELDSCOUT TDR 350 (vpravo) (foto: Bárta) | 26 |
| Obrázek 9. Podtlakové Mini-Disk infiltrometry Decagon Devices (foto: Bárta)..... | 26 |
| Obrázek 10. Momentální vlhkost půdy (O_{mom}) pro jednotlivé varianty | 27 |
| Obrázek 11. Objemová hmotnost půdy (ρ_d) pro jednotlivé varianty..... | 28 |
| Obrázek 12. Celková pórovitost (P) pro jednotlivé varianty | 29 |
| Obrázek 13. Pórovitost kapilární (P_k) pro jednotlivé varianty | 30 |
| Obrázek 14. Pórovitost nekapilární (P_n) pro jednotlivé varianty..... | 31 |
| Obrázek 15. Penetrační odpory v různých hloubkách pro jednotlivé varianty | 32 |
| Obrázek 16. Nasycená hydraulická vodivost (K_{fs}) pro jednotlivé varianty | 34 |
| Obrázek 17. nenasycená hydraulická vodivost (K) pro jednotlivé varianty | 35 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1. Rozdělení půdních pórů podle jejich zastoupení a velikosti (SÁŇKA et al., 2018) (upraveno: Bárta) | 7 |
| Tabulka 2. Hodnoty parametru α^* stanovené pro různé struktury a textury půd (ELRICK et al., 1989) (upraveno: Bárta) | 12 |
| Tabulka 3. Van Genuchtenovy parametry A pro různé druhy půd, pro poloměr disku 2,25 cm a hodnoty tlakové výšky od 0,5 do 6 cm, α [m^{-1}] a n [-] jsou retenční parametry, h_0 [m] je tlaková výška (DECAGON, 2021) (upraveno: Bárta)..... | 15 |
| Tabulka 4. Přehled stanovení hodnot z neporušeného půdního vzorku (VALLA et al., 2002) (upraveno: Bárta) | 24 |
| Tabulka 5. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro momentální vlhkosti (θ_{mom}), $\alpha = 0,05$ | 27 |
| Tabulka 6. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro objemové hmotnosti (ρ_d), $\alpha = 0,05$.. | 28 |
| Tabulka 7. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro celkové pórovitosti (P), $\alpha = 0,05$ | 29 |
| Tabulka 8. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro kapilární pórovitosti (P), $\alpha = 0,05$ | 30 |
| Tabulka 9. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro nekapilární pórovitosti (P), $\alpha = 0,05$. | 31 |
| Tabulka 10. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro průměrné penetrační odpory v MPa, $\alpha = 0,05$ | 33 |
| Tabulka 11. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro nasycené hydraulické vodivosti (K_{fs}), $\alpha = 0,05$ | 34 |
| Tabulka 12. Tukeyův HSD test homogenních skupin pro nenasycené hydraulické vodivosti (K), $\alpha = 0,05$ | 35 |