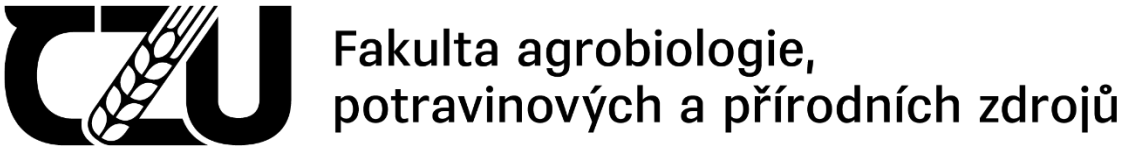
Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra pedologie a ochrany půd



Vliv způsobu hospodaření na zhutnění půd na různých půdních typech

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Tomáš Hrdlička

Pěstování rostlin

Vedoucí práce: doc. Ing. Vít Penížek Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci " Vliv způsobu hospodaření na zhutnění půd na různých půdních typech" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14. 4. 2023 _____

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vítu Penížkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky, pomoc a trpělivost při zpracování této diplomové práce. Dále děkuji za umožnění studia a trpělivost při zpracování této diplomové práce mé rodině a za cenné rady při psaní mé sestře Bc. Zuzaně Hrdličkové. Poděkování bych touto cestou rád věnoval i soukromým zemědělcům Lence Kubešové, Miroslavu Panskému, Josefu Rousovi, doc. Ing. Vítu Penížkovi, Ph.D. a hlavnímu vedoucímu rostlinné výroby Školního zemědělského podniku ČZU v Lánech Martinu Foučkovi, DiS za poskytnutí ploch pro možnost měření a odběru půdních vzorků na jejich pozemcích.

Vliv způsobu hospodaření na zhutnění půd na různých půdních typechv práce

Souhrn

Zhutnění, označované také termínem utužení, či pedokompakce, je jeden z nejvýznamnějších degradačních procesů půd. Při procesu pedokompakce dochází ke snížení pórovitosti, a v důsledku toho ke zvýšení objemové hmotnosti, zhoršení infiltrace vody do půdy a zhoršení provzdušnění. Podle odborných odhadů postihuje v České republice přibližně 45 % plochy zemědělské půdy.

Náchylnost (zranitelnost) půd vůči utužení závisí především na půdní zrnitosti, vlhkosti půdy, struktuře půdy, pH půdy a obsahu humusu. Soubor půdních vlastností a jejich uspořádání v rámci půdních horizontů rozčleňuje půdy na jednotlivé půdní typy, které mají odlišný charakter. Práce se proto zaměřuje na tři půdní typy, které jsou důležité z hlediska zemědělské produkce: černozem, hnědozem a fluvizem.

Ve vědecké literatuře je možné se setkat s mnoha studiemi, které studují vliv technologií zpracování půdy na utužení půd. Četné studie se však zaměřují jen omezený typ půd (často černozemě). V dnešní době, se však bezorebné technologie, z řady důvodů, uplatňují na mnohem širší škále půd. Z tohoto důvodu si tato práce klade za cíl popsat stav a možné rozdíly utužení půd pod dvěma typy technologie zpracování – orebné a bezorebné na třech výše uvedených půdních typech.

Výsledky práce neprokázaly výrazné odlišnosti v ukazatelích utuženosti půd mezi sledovanými technologiemi zpracování půdy, a to u všech třech sledovaných půdních typů. Z hlediska celkového hodnocení byla nejméně utuženým půdním typem fluvizem modální, která vykazovala jen slabé utužení v podorničí u obou typů zpracování. Hnědozem a černozem vykázaly obdobný trend míry utužení. Překvapivým výsledkem, je prakticky totožný průběh, míra a hloubka utužení u černozemě a hnědozemě. Obecným předpokladem je, že u černozemí je míra utužení menší, a naopak se dá očekávat vyšší utužení u hnědozemí, které mají méně vyvinutou půdní strukturu.

Ani u jedné ze zkoumaných lokalit/variant nebyl zachycen zřetelný trend průběhu indikátoru utužení, který by prokázal jasné technogenní utužení (nárůst hodnot v podorničí a jich následný pokles směrem k půdotvornému substrátu).

Menší průkaznost utužení na základě penetrometrického odporu je dána vlivem vlhkosti na tento ukazatel a problematikou správného stanovení limitu utužení penetrometrického odporu s ohledem na danou vlhkost měřených půd. Naproti tomu u objemové hmotnosti nemá vlhkost na měření vliv.

Klíčová slova: černozem, hnědozem, fluvizem, utužení půdy, technologie zpracování půdy, penetrometrický odpor, objemová hmotnost

Influence of management practices on soil compaction in different soil types

Summary

Soil compaction is one of the most important soil degradation processes. During the process of pedocompaction, porosity is reduced, bulk density increases, water infiltration and aeration is reduced. According to expert estimates, soil compaction affects approximately 45 % of agricultural land in the Czech Republic.

The susceptibility (vulnerability) of soils to compaction depends mainly on soil texture, soil moisture, soil structure, soil pH and humus content. The combination of soil properties and their arrangement within soil horizons divides soils into different soil types, which have different characteristics. The work therefore focuses on three soil types that are important for agricultural production: chernozem, luvisol and fluvisol.

In the scientific literature, it is possible to find many studies that examine the influence of tillage technologies (tillage x no-till) on soil compaction. However, many studies focus on only a specific types of soils (often chernozems). Nowadays, however, no-till technologies are being applied to a much wider range of soils for a number of reasons. Therefore, this study aims to describe the status and possible differences of soil compaction under two types of tillage technology (tillage and no-till) on the three soil types mentioned above.

The results of the study showed no significant differences in soil compaction between the studied tillage technologies among all three soil types. In terms of overall assessment, the least compacted soil type was fluvisol, which showed only weak compaction in the subsoil for both tillage types. Luvisol and chernozem showed a similar trend in compaction intensity. A surprising result, is the virtually identical pattern and depth of compaction for chernozem and luvisol. The general assumption is that the rate of compaction is lower in chernozems, and conversely, higher compaction can be expected in luvisols, which have less developed soil structure.

For none of the sites/variants studied was a clear trend in the pattern of the detected compaction, which would show a clear technogenic influence on compaction (an increase in the subsoil and subsequent decrease towards bottom of soil profile).

The lower significance of compaction based on the penetrometric resistance is probably due to the influence of moisture on this indicator and the problem of correctly setting the compaction limit of the penetrometric resistance with respect to a given moisture content of the measured soils. In contrast, the bulk density is not affected by the moisture content.

Keywords: chernozem, luvisol, fluvisol, soil compaction, tillage technology, no-till, penetrometric resistence, bulk density

Obsah

1 Úvod ..... - 9 -

2 Vědecká hypotéza a cíle práce ..... - 10 -

3 Literární rešerše ..... - 11 -

3.1 Zhutnění zemědělských půd ..... - 11 -

3.1.1 Rozsah zhutnění v ČR a ve světě ..... - 12 -

3.1.2 Faktory podmiňující utužení půd ..... - 13 -

3.1.2.1 Půdní vlastnosti ..... - 14 -

3.1.2.2 Půdní typy a utužení půd ..... - 17 -

3.1.3 Technologie zpracování půd ..... - 21 -

3.1.3.1 Orba ..... - 21 -

3.1.3.2 Minimalizační technologie ..... - 23 -

3.1.4 Pohyb techniky po pozemku ..... - 25 -

3.1.5 Důsledky zhutnění ..... - 25 -

3.1.5.1 Fyzikální vlastnosti ..... - 26 -

3.1.5.2 Biologické vlastnosti ..... - 27 -

3.1.5.3 Negativní vliv na zemědělskou produkci ..... - 28 -

3.2 Stanovení zhutnění půd ..... - 29 -

3.2.1 Nepřímé projevy utužení půd ..... - 29 -

3.3 Ukazatele utužení ..... - 30 -

3.3.1 Objemová hmotnost ..... - 30 -

3.3.2 Penetrometrický odpor ..... - 32 -

4 Metodika ..... - 35 -

4.1 Popis terénních prací a metod měření ..... - 35 -

4.2 Charakteristika zájmových území ..... - 37 -

4.2.1 Lokalita 1: hnědozem ..... - 37 -

4.2.2 Lokalita 2: fluvizem ..... - 39 -

4.2.3 Lokalita 3: černozem ..... - 41 -

5 Výsledky ..... - 44 -

5.1 Lokalita 1: hnědozemě ..... - 44 -

5.2 Lokalita 2: fluvizem ..... - 47 -

5.3 Lokalita 3: černozem ..... - 50 -

5.4 Vztah měřených ukazatelů utužení ..... - 52 -

6 Diskuze ..... - 55 -

7 Závěr ..... - 57 -

8 Literatura ..... - 58 -

9 Samostatné přílohy I

1 Úvod

Zhutnění, označované také termínem utužení, či pedokompakce, je jeden z nejvýznamnějších degradačních procesů půd. Při procesu pedokompakce dochází ke snížení pórovitosti, a v důsledku toho ke zvýšení objemové hmotnosti, zhoršení infiltrace vody do půdy a zhoršení provzdušnění. Přestože je zhutnění u některých zrnitostně těžkých půd přirozeným procesem, v mnohem větší míře se setkáváme s utužením antropogenně podmíněným. To vzniká především působením tlaku při přejezdu pozemků zemědělskou technikou. Je ovlivněno také způsobem a hloubkou zpracování půdy, nebo nadměrným zatížením pozemků pasoucími se hospodářskými zvířaty. Přestože není přesný plošný rozsah zhutnění znám, dle odborných odhadů postihuje v České republice přibližně 45 % plochy zemědělské půdy a řadí se tak spolu s vodní erozí na špičku degradačních procesů ohrožujících naše půdy.

Ve vědecké literatuře je možné se setkat s mnoha studiemi, které se zaměřují na vliv technologií zpracování půdy na utužení půd. Četné studie se však zaměřují na jen omezený typ půd (často černozemě) a to s ohledem na místo rozvoje bezorebných technologií. V dnešní době, se však bezorebné technologie z řady důvodů, uplatňují na mnohem širší škále půd. Z tohoto důvodu si tato diplomová práce klade za cíl popsat stav a možné rozdíly v utužení půd pod dvěma typy technologie zpracování – orebné a bezorebné na třech odlišných půdních typech, které jsou však důležitou součástí naší produktivní zemědělské krajiny: tedy černozemi, hnědozemi a fluvizemi.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

Práce je zaměřena na popis zhutnění půd pod klasickým orebným obhospodařováním a využíváním minimalizační bezorebné technologie. Práce řeší potenciální rozdíly průběhu zhutnění v půdním profilu u černozemě, hnědozemě a fluvizemě v klimaticky odlišných regionech.

Hypotéza:
Různé půdní typy reagují odlišně na zhutnění dané různými způsoby obhospodařování.

3 Literární rešerše

3.1 Zhutnění zemědělských půd

Zhutňování půd (označováno také jako pedokompakce, či utužení půd), je projevem špatného fyzikálního stavu půdy, kdy dochází ke snížení pórovitosti a nárůstu objemové hmotnosti, a to působením tlaku na půdu. Fyzikálním poškozením dochází ke zmenšení pórovitosti a v důsledku toho se zmenšuje prostor pro vodu a vzduch (Šarapatka 2002). Utužené půdy často brání růstu kořenů v důsledku nadměrného penetračního odporu, který rostliny nejsou schopny často překonat (Mowrer 2019).

K tomuto půdnímu degradačnímu procesu dochází jak přirozeně, tak často bývá vyvolán působením člověka v rámci obdělávání pozemků. V podmínkách České republiky jsou zasaženy přirozeným zhutněním půd především zrnitostně těžké, tedy jílovité půdy (Šarapatka 2014). Ke zhutnění půd v důsledku lidské činnosti, které je často nazýváno jako antropogenní utužení, dochází především působením přejezdů těžké zemědělské mechanizace. Tento typ utužení je možné pozorovat i na všech ostatních půdách, i když vykazují přirozenou vyšší odolnost v závislosti na lokálních podmínkách. Zhutnění půdy lze také pozorovat na pastvinách, kde je výsledkem přílišného zatížení ploch pasoucími se hospodářskými zvířaty. Výsledná míra utužení závisí na míře ohrožení půd zemědělskou činností a je také podmíněna půdními vlastnosti. Náchylnost (zranitelnost) půd vůči utužení závisí na kombinaci chemických, fyzikálně-chemických, fyzických i biologických vlastnostech půd.

Z hlediska půdních vlastností, majících vliv na zranitelnost vůči pedokompakcí lze uvést především půdní zrnitost, vlhkost půdy, strukturu půdy, pH půdy, obsah humusu.

Půdy těžší, s vyšším podílem jílových částic, jsou méně odolné oproti půdám s vyšším zastoupením písčité frakce. Dále má vliv vlhkost půdy, kdy se ve vlhkých půdách snižuje koheze a tím se umožnuje pohyb půdním agregátům a zrnům a tím i jejich kompaktnější uspořádání. Proto se zvyšujícím se podílem vody v půdě se zvyšuje možnost kompakce půdy. Významnou roli hraje také obsah humusu v půdě. Půdy s nízkým obsahem humusu mají nižší schopnost odolávat zhutnění. Stejně tak hraje roli pH půdy. Kyselé půdy mají menší schopnost odolávat utužení oproti půdám neutrálním, či zásaditým, z důvodu hůře vyvinuté půdní struktury. Po shrnutí výše uvedených faktorů jsou nejvíce ohrožené půdy přemokřené, kyselé, málo strukturní a v neposlední řadě s nízkým obsahem humusu (Šarapatka 2014). Detailní popis vlivu jednotlivých půdních vlastností je v kapitole 3.1.2.1 Půdní vlastnosti.

Mimo vlastnosti půd, které, jak bylo výše uvedeno, určují míru možné zranitelnosti, tedy potenciál vůči pedokompakci, je skutečný stav utužený dán především způsobem obhospodařování pozemků. Tradičním způsobem kultivace půdy v Evropě je především systém využívající orbu. Nově se stále častěji uplatňují bezorebné / minimalizační systémy využívané historicky především v USA, ale uplatňující se na stále větších plochách i v našem regionu. Tyto dva základní systémy obhospodařování jsou dále zpracovány 3.1.3 Technologie zpracování půd.

V rámci sledování zhutnění půd je důležité si uvědomit, že přestože působení zemědělské mechanizace přichází shora, může utužení zasahovat do velkých hloubek. Přílišné zatěžování půd může tedy ovlivnit nejen orniční horizont, kde lze toto zhutnění relativně jednoduše

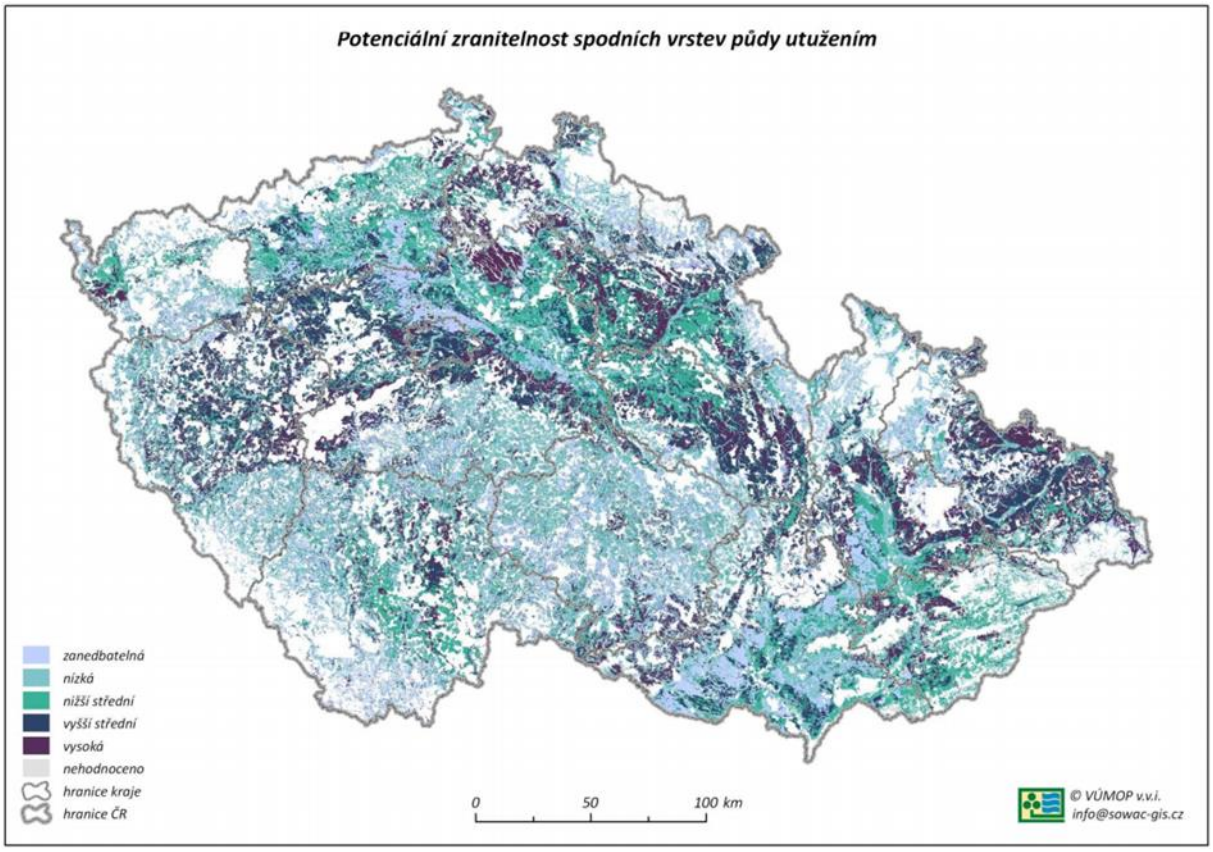
odstranit kypřením či orbou, ale stejně tak i podorniční horizonty, kde nedochází běžně ke kultivaci a tím se vytváří takzvané podorniční prahy. Poznatky ukazují, že degradace zhutněním se v současnosti týká především hlubších vrstev – tzv. podorničních horizontů (Javůrek & Vach 2008).

3.1.1 Rozsah zhutnění v ČR a ve světě

Dle odborného odhadu je v ČR postiženo zhutněním zhruba 45 % zemědělské půdy, z toho 15 % je zhutnění přirozené (genetické), podmíněné přirozenými vlastnostmi těžkých půd (Lhotský 2000). Zranitelnost půd k utužení v ČR je zachycena na obrázku č. 1. Prostorové uspořádání zranitelných půd odpovídá výskytu půd dle jejich základního popisu v předchozí kapitole, kdy vysokou zranitelnost je možné sledovat v místech výskytu zrnitostně těžších, méně humózních a kyselých půd.

Skutečný stav utužení není přesně znám, neboť neexistuje ucelený monitorovací systém utužení půd v ČR. Existuje pouze omezený soubor dat Ústředního zkušebního a kontrolního úřadu zemědělského (ÚKZÚZ), který prováděl monitoring utužení pomocí penetrometického měření na 15 lokalitách v letech 2009 až 2011 (ÚKZÚZ 2023). Oblast sledování byla omezena na území Jižní Moravy a Jižních Čech. Měření byla prováděna na vybraných půdních typech: černozem, hnědozem, fluvizem, kambizem, pseudoglej, s nízkou skeletovitostí. Měření a odběry vzorků probíhaly dvakrát ročně vždy v jarním a podzimním termínu za vhodných půdních vlhkostních podmínek, a to po skončení přípravy půdy k setí nebo sázení a po sklizni pěstované plodiny. Na každé lokalitě bylo provedeno deset penetrometrických měření do hloubky 72 cm. Současně bylo odebíráno 5 porušených půdních vzorků pro zjištění půdní vlhkosti z hloubky 4 – 8 cm, 16 – 20 cm, 36 – 40 cm, 52 – 56 cm a 68 – 72 cm.

Výsledky měření ukázaly, že nejhorších hodnot penetračního odporu dosáhla lokalita s kulturou TTP. Dále bylo zjištěno, že plochy na zkušebních stanicích ÚKZÚZ vykazovaly lepších hodnot v ornici a hlouběji do podorničí – pozvolné zvyšování odporu půdy v porovnání s plochami, na nichž hospodaří zemědělské podniky. Byl také zjištěn výrazný vliv vlhkosti půdy na celkové rozdíly penetrometrického odporu a stejně tak i vliv předchozí agrotechniky. Autoři doporučují pro měření penetračního odporu období jara, kdy jsou nejoptimálnější vlhkostní podmínky (ÚKZÚZ 2023).



Obrázek 1. Potenciální zranitelnost spodních vrstev zemědělské půdy utužením (Zdroj: VÚMOP 2021)

Stejně jako v České republice, je utužení půd významným degradačním procesem i v jiných částech světa. Zhutnění půdy je zodpovědné za 30 % degradace půdy na celém světě (IPCC 2019). Týká se logicky především oblastí s intenzivní zemědělskou produkcí (Bai et al. 2008). Mimo tyto oblasti bylo však utužení půd popsáno i v jiných částech světa. Např. mělké zhutnění půdy pod bezorebnou technologií bylo často pozorováno v Brazílii (Ferreria et al., 2022). V subsaharské Africe se zhutnění půdy odhaduje na 40 %, což má negativní dopad na zemědělskou produkci a životní prostředí (Tondoh 2019). Zhutnění půd vážně postihuje i některé části Evropy, zejména jižní oblast kontinentu (Panagos et al. 2015).

Častěji než v našich podmínkách, se se světě uplatňuje i pedokompakce způsobená nadměrnou pastvou zvířat (Bai et al. 2008). Problematika utužení je v těchto oblastech o to závažnější, že podmiňuje další degradační procesy, ke kterým jsou půdy v daných oblastech náchylné, jako jsou eroze půdy. Dochází tak k výraznému snížení produkce plodin a navýšení zranitelnosti celé společnosti z důvody ekonomicko-sociálních důsledků (Cerdà & Doerr 2011).

3.1.2 Faktory podmiňující utužení půd

Jak bylo uvedeno v úvodu práce, tak náchylnost (zranitelnost) půd vůči utužení závisí na kombinaci chemických, fyzikálně-chemických, fyzikálních i biologických vlastnostech půd. Jedná se především o půdní zrnitost a strukturu, vlhkost půdy (jak aktuální, tak o celkový vlhkostní režim půd). Z chemických vlastností lze pak uvést především pH půdy a obsah humusu, které ovlivňují tvorbu půdní struktury. Významnou roli hrají i biologické vlastnosti půd. Ty se však spíše uplatňují při její nápravě, než při přímém vlivu na zranitelnost půd.

Skutečný stav půd, tedy zda je zhutněná či ne, pak udává velikost a typy vlivů působení na půdu, které k této degradaci vedou. Jak bylo uvedeno, jedná se především o způsob obhospodařování zemědělských pozemků a jejich využití. Protože se zhutnění půdy týká především orné půdy, je diplomová práce zaměřena na tuto oblast. V rámci obhospodařování se v současné době na našem území uplatňují především dvě základní technologie. První z nich je tradiční orebná technologie, které je v mírně pozměněné podobě uplatňována od 19. století. Základem této technologie je orba půd tradičními pluhy. Kromě orby se samozřejmě uplatňují další kroky ve zpracování půdy, tak aby mohlo dojít k založení porostů nebo aby docházelo k optimálnímu hospodaření s vláhou a redukci tlaku plevelů. Jedná se především o smykování, vláčení, podmítku, předseťovou přípravu kombinovanými stroji a případně válení. Zmíněná technologie vede k relativně vysokému počtu pojezdů po pozemku, což znamená zvýšené riziko utužení. Pozitivum je, že se naopak uplatňuje relativně hluboké prokypřování půdního profilu.

Druhou, z dnes stále častěji se uplatňujících technologií, je bezorebný systém. Klasická orba je v tomto případě nahrazena mělkým prokypřováním. Často také dochází ke sdružování několika operací do jedné, což vede k omezování počtu pojezdů.

3.1.2.1 Půdní vlastnosti

Zrnitost

Zrnitost půdy hraje významnou roli v rámci náchylnosti půd k utužení a to spolu s půdní strukturou. Obecně je uváděno, že náchylné k tužení (i přirozenému) jsou půdy s vysokým obsahem jílu (Welke & Fyles 2005; Kolka et al. 2012). U jílovitých půd však může být další zhutňování obtížnější, neboť při vlhkosti dostatečné k tomu, aby se jílové částice mohly pohybovat jedna přes druhou, je prostor pórů obvykle zaplněn vodou, kterou nelze snadno vytlačit. Stejně tak dochází omezeně k utužování písčitého materiálu, protože relativně velké částice se obtížně stlačují. Někteří autoři proto jako nejvíce zranitelné půdy uvádějí půdy hlinité, respektive prachovité, u niž jsou půdní částice strukturně uspořádány (Warren & Taylor 2023). Nicméně může platit, že struktura není příliš stabilní, a proto je náchylná k destrukci vedoucí k následnému utužení. To platí především u půd s vysokým podílem prachovitých částic v kombinaci s kyselým pH a nízkým obsahem humusu.

Dalším důvodem, proč jsou těžké tj. jílovité a hlinitojílovité půdy nejnáchylnější k zhutnění, je fakt, že zadržují více vody po delší dobu a zvýšená vlhkost činí půdy zranitelnými. U písčitých půd je zhutnění na obsahu vody méně závislé (Lhotský 2000).

Čím vyšší je obsah jílu a vody, tím větší je citlivost půd na působící tlak a intenzivnější zhutňování půdy.

Půdní struktura

Půdní částice jsou u většiny půd uspořádány do půdních agregátů tvořících půdní strukturu a porézní systém půdy. Struktura je žádoucí vlastností půdy a je nezbytná pro dobrý růst rostlin. Půdy s dobře vyvinutou strukturou podporují růst kořenů a mají dobré drenážní vlastnosti, vysokou schopnost zadržovat vodu a zajišťují dobré provzdušňování a výměnu plynů (Koenig & Cerny 2010).

Typ půdní struktury a stupeň jejího vyvinutí závisí na mnoha dalších faktorech jako je půdní zrnitost, pH půdy, přítomnost dvojmocných kationtů (především Ca) nebo obsah a kvalita humusu.

Dobrou strukturu mají přirozeně půdy hlinité, středně těžké. Stabilitu půdních agregátů pak podmiňuje především vyšší obsah humusu s převahou huminových kyselin nad fulvokyselinami. Stejně tam příznivě působí vysoký obsah Ca, s kterým souvisí i neutrální, popř. slabě zásaditá půdní reakce. Vliv tohoto dvoumocného kationtu přispívá totiž ke koagulaci jílů a také tvorbě vazeb organominerálního komplexu. Z hlediska stability půdní struktury a tedy odolnosti vůči utužení lze nejlépe hodnotit svrchní horizonty černozemí. Oproti tomu půdy slabě kyselé s nízkým obsahem humusu a v kombinaci s vysokým podílem prachových částic (typicky hnědozemě, či luvizemí na spraších) mají často strukturu slabě vyvinutou a jsou náchylné k rozplavování, tvorbě škraloupu a utužení (Lhotský 2000).

Kromě vnitřních půdních faktorů mají vliv na stav struktury i vnější faktory, kterými jsou způsoby obhospodařování (kultivace) a typ pěstovaných plodin. Das et al. (2022) ve své publikaci uvádí, že ke zlepšení struktury významným způsobem napomáhá pěstování vhodných hlavních plodin, tak i meziplodin, které svým kořenovým vlášením mechanicky shlukují půdní částice a tím dochází k agregaci půdy a zároveň tyto meziplodiny dodávají důležitou organickou hmotu do půdy.

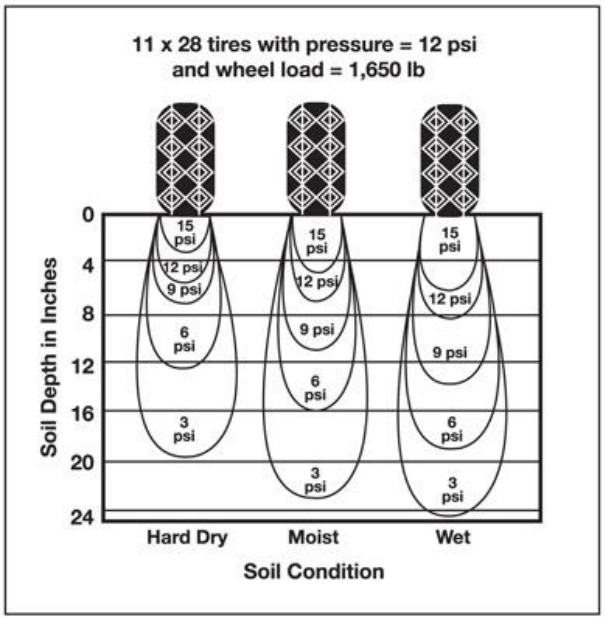
Kvalitu půdní struktury lze stanovovat několika způsoby, jedním z nejčastěji uváděných je měření stability půdních agregátů, která má vliv na to, jak půda reaguje na silné dešťové srážky. Právě eroze a zhutnění jsou z velké části způsobeny degradací agregátů. Zároveň jsou tyto půdy vystaveny nižšímu riziku hlubokého zhutnění než půdy s méně stabilními agregáty (Flynn et al. 2020).

Intenzivní zpracování půdy může výrazně měnit typ půdní struktury. Časté pojezdy a pedokompakce způsobuje tvorbou destičkovité/deskovité struktury ve vysoce zhutněné části půdního profilu (Dorner et al. 2022). Častá je také tvorba polyedrické, či prismatické půdní struktury v místech pedokompakce. Přítomnost těchto typů půdní struktury může být dobrým orientačním ukazatelem utužení půd.

Vlhkost půdy

Vlhkost půdy hraje při utužení půd klíčovou roli. Obecně platí, že k maximálnímu zhutnění půdy dochází, když je vlhkost půdy na úrovni polní vodní kapacity nebo blízko ní. Principem je, že voda v půdě snižuje kohezní síly (působí jako mazivo) mezi půdními částicemi, umožňuje tak pohyb mezi nimi a tím dochází k vlastnímu stlačení prostor mezi půdními částicemi.

Kromě celkového vlivu na utužení půdy má vliv na charakter utužení také průběh vlhkosti v rámci celého půdního profilu. Pokud je půda v celém profilu suchá a pevná, nemusí docházet k významnému utužení. Pokud jsou však povrchové vrstvy vlhké a měkké a leží na suchém podorničním pfoilu (typické pro pozdní léto), mohou být horní vrstvy silně stlačeny. Pokud jsou naopak povrchové vrstvy suché a pevné a pod nimi leží vlhká půda, může se stlačení přenášet směrem dolů a stlačovat níže ležící zranitelnější půdu (Batey 2009).



Obrázek 2.Hloubka utužení půdy při různých stavech vlhkosti: suchá půda (vlevo), vlhká (uprostřed), a mokrá (vpravo). Převzato z: Idowu & Angadi (2013)

V zemědělských půdách často vzniká utužení působením vnější síly na půdu, ke kterému dochází při obdělávání půdy nebo při přejezdech, když je obsah vody v půdě příliš vysoký (Van Orsouw et al. 2022). Z tohoto důvodu, jsou půdy ve vlhčích klimatických regionech, náchylnější k utužení, neboť je větší pravděpodobnost zvýšené vlhkosti a tím i zvýšení případů vstupu zemědělské techniky na pozemky při vlhkostním stavu, kdy už dochází k utužení, oproti klimatickým regionům s větším výskytem sušších podmínek. Tento princip je umocněn dále zrnitostí půdy (těžší půdy drží více vláhy a po delší období), popř. i topografií území (místní lokální zamokření).

Půdy těžšího charakteru jsou obhospodařovatelné hůře, při obdělávání je zapotřebí brát v potaz optimální půdní vlhkost (Kopecký 1928). Naopak půdy lehčího charakteru je možné obdělávat s vyšší vlhkostní variabilitou bez rizika zhoršení půdní struktury (Lhotský 2000).

Půdní reakce

Efekt půdní reakce vůči utužení půd spočívá v jejím vlivu na stabilitu půdní struktury. Slabě kyselé a kyselé půdy mají půdní strukturu zpravidla méně vyvinutou a půdní agregáty jsou proto méně stabilní. Jedním z přístupů, jak ovlivnit stabilitu půdní struktury je proto vápnění půd, které zvyšuje pH půdy a dvojmocné kationty zlepšují půdní strukturu (Junior et al. 2020). Vápníkem se nepochybně udržuje dobrý chemický i fyzikální stav půdy. Vápněním lze udržovat ideální pH především u půd, kdy je hodnota pH nízká. Optimální hodnoty pH napomáhají k tvorbě půdní struktury a stabilnějším půdním agregátů (Frank et al. 2021). Jako dvoumocný kationt působí vápník jako dobrý agregační prostředek (Lhotský 2000), který vede snižování objemové hmotnosti (Junior et al. 2020; Frank et al. 2021).

Obsah humusu

Organická hmota působí na prevenci proti pedokompakci a to především díky jejímu příznivému působení na tvorbu půdních agregátů a tím tedy na samotnou půdní strukturu (Batey 2009). Humusové látky (především huminy a huminové kyseliny) se podílí především na

mikroagregaci – tedy tvorbě agregátů na primární úrovni (Hoorman et al. 2009). Dochází zde k provázání organických molekul s jílovými minerály, tedy tvorbě tzv. organo-minerálního komplexu. Zvýšený obsah humusu proto obvykle vede k snížení objemové hmotnosti a tím zvýšení porozity (Eden et al. 2011; Kuncoro et al. 2014), lepší infitraci vody, či snížení penetračního odporu (Ohu et al. 1994).

Vztah mezi obsahem humusu rezistencí vůči pedokompakci však není často přímý, neboť je ovlivňován velikostí a typem struktury půdy, a na vlastnostech spojených s retencí vody v půdě, soudržností nebo objemovou hmotností (Braida et al. 2010).

3.1.2.2 Půdní typy a utužení půd

Soubor půdních vlastností a jejich uspořádání v rámci půdních horizontů rozčleňuje půdy na jednotlivé půdní typy, které mají odlišný charakter. Půdní typy jsou základním komunikačním prostředkem pro vyjádření souboru těchto vlastností, celkových předpokladů půd z hlediska půdní úrodnosti či využitelnosti. Práce se zaměřuje na tři půdní typy, které jsou důležité z hlediska zemědělské produkce. Mají významný plošný rozsah na našem území a jejich velká část patří mezi intenzivně využívané zemědělské plochy, často využívané jako orná půda. Jedná se o půdní typ černozem, hnědozem a fluvizem. Všechny tyto půdy patří mezi výrazně bonitní půdní typy a stejně tak tomu je i v globálním měřítku. V rámci vědeckých prací je pak možné nalézt základní poznatky ze studií, které se zaměřili na zkoumání právě těchto půdních jednotek. Studie jsou víceméně výhradně zaměřeny na porovnání vlivu různých agrotechnik v rámci jednoho půdního typy, než na porovnávání mezi nimi.

3.1.2.2.1 Černozemě

Velká část vědeckých studií je zaměřena na studium zhutnění u černozemních půd (v mezinárodních klasifikacích spadají do skupin půd Chernozems, Phaeozems a některé Calcisols (dle WRB) a Mollisols (del Soil Taxonomy). Velké množství studií z této půdní jednotky je dáno obecně vysokým zájmem o tyto půdy jako představitele vůbec potenciálně nejúrodnějších půd a jejich relativně velkým celosvětovým plošným rozsahem a jejich výskytem v USA, odkud se začaly rozšiřovat bezorebné technologie. Byly vyjádřeny obavy, že systémy redukovaného zpracování půdy mohou vést k nadměrnému zhutnění půdy, což může mít negativní dopad na růst plodin (Grantr & Lafond 1993).

Příkladem práce zaměřené na toto téma je studie (Grantr & Lafond 1993) jejímž cílem bylo zjistit vliv systémů nulového (ZT), minimálního (MT) a konvenčního zpracování půdy (CT) a střídání plodin na objemovou hmotnost půdy a penetrační odpor po 4 letech na těžké jílovité černozemi v jihovýchodním Saskatchewanu (Kanada). Penetrační odpor a objemová hmotnost půdy se zvýšily v povrchových 10 cm půdy při ZT ve srovnání s CT hospodařením. V hlubších zónách však systém zpracování půdy neměl průkazný vliv ani na objemovou hmotnost, ani na penetrační odpor. Penetrační odpor byl nicméně v hlubší zóně půdy (30 až 45 cm) ve všech systémech zpracování půdy zvýšený, nicméně ne natolik, aby výrazně ovlivnil produkci plodin.

Ferreras a kol. (2000) sledovali změnu zhutnění půdy pomocí penetrometrického odporu, objemové hmotnosti, struktury pórů a stability agregátů u hlinité černozemi v Argentině na

pozemku, který byl 3 roky obděláván bezorebnou technologií (NT), kdy v předchozím období 25 let byl obděláván konvenčně (CT) po dobu 25 let. Ve své studii zjistili, že velikost penetračního odporu vykazovala po založení porostu hodnoty NT: 1,6 MPa, CT: 1,1 MPa v hloubce 5-10 cm; NT: 1,6 MPa, CT: 1,0 MPa v hloubce 10-15 cm; a NT: 1,3 MPa, CT: 0,9 MPa v hloubce 15-20 cm. Dále zjistili, že způsob obdělávání měl vliv na podíl jemných kapilárních pórů, který byl větší při CT než při NT (CT: 26,1 %, NT: 16,8 %). Stabilita struktury, měřená suchým i mokrým proséváním, nebyla mezi jednotlivými ošetřeními prokázána. V rámci měření také bylo zjištěno, že došlo u NT obhospodařování k zhoršení infiltrace a negativnímu vlivu na vlhkostní režim půdy a růst kořenů rostlin. Obdobné výsledky byly získány po třech letech používání NT technologie na černozemi v Argentině, kdy došlo k zvýšení jak objemové hmotnosti, tak penetračního odporu v porovnání s jejich hodnotami u konvenčního zpracování (Botta et al. 2022).

Výsledky práce autorů Rause et al. (2007), kteří porovnávali tři způsoby zpracování půd na kambické černozemi v západním Rumunsku, ukázaly, že ukazatele utužení půdy měly nejnižší hodnoty u konvenčního zpracování (CT), střední hodnoty u minimalizačního (MT) a minimální hodnoty u varianty bezorebného zpracování (NT). Autoři také prokázaly vliv daných technologií na zastoupení stabilních agregátů (nejvyšší u konvenčního zpracování) a prokázali rozdíly ve výnosech plodin, které byly obvykle vyšší v konvenčním zpracování, ale ne vždy statisticky významné.

V rámci 10ti letého pokusu zaměřeného na bezorebné zpracování (v porovnání s konvenčním) černozemí na spraši v Idahu (USA) bylo zjištěno, že minimalizace mí vliv na zvýšení objemové hmotnosti půd, ale ne na penetrační odpor (Hammel 1989). Obdobné výsledky poskytla práce Hilla & Cruse (1985) kdy po čtyřech (respektive šesti) letech pěstování plodin bez zpracování půdy nebylo zjištěno žádné zhutnění. Naopak byl zaznamenán příznivější stav půdní struktury, neboť u obou subtypů sledovaných černozemí se při bezorebném zpracování půdy zvýšila stabilita agregátů. Zlepšení půdní struktury u bezorebné technologie bylo prokázáno i u černozemě v Severovýchodní Číně v rámci 11ti letého experimentu (Chen et al. 2015).

Práce autorů Hilla & Cruse (1985) naopak vliv různého způsobu zpracování půdy na objemovou hmotnost neprokázala. Byl ale prokázán vliv na penetrační odpor, který byl vyšší u bezorebného způsobu zpracování půdy (ale průkazně pouze u jedné ze dvou lokalit). Ani u jednoho ze způsobů zpracování půd však nebyl zaznamenán penetrační odpor přesahující hodnoty limitující rozvoj kořenů plodin. K opačným závěrům došli autoři v oblasti Agrentinských pamp, kde byly naopak horší fyzikální vlastnosti (zvýšenený penetrační odpor – především v podorničí) zachyceny u konvenčního zpracování půd (Micucci & Taboada 2006). Ale i zde, stejně tak jako v práci autorů (Grantr & Lafond 1993), nebyl prokázán negativní vliv na růst plodin.

V některých případech se vliv různého zpracování půd u černozemí neprokázal. Příkladem může být práce Badalíkové et al. (2009), kdy byly porovnávány na dvou lokalitách tři různé způsoby zpracování půdy pro cukrovou řepu: 1) hluboké kypření do hloubky 0,35 m, 2) mělké kypření do hloubky 0,18 m a 3) orba do hloubky 0,25 m na černozemích na spraši na Jižní Moravě. Po čtyřech letech sledování možných změn autoři zjistili, že studované agrotechniky neměly významný vliv na změny fyzikálních vlastností sledované černozemě.

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že vliv technologií zpracování půdy na utužení černozemí není jednoznačný. Mnohé studie prokázaly opačné výsledky, nebo nebylo dosaženo statisticky průkazných rozdílů. Důvodem může být, že černozemě obecně patří mezi půdy s nejvyšší odolností (rezistencí) vůči utužení. To je dáno jejich příznivými fyzikálně-chemicko-biologickými vlastnosti, především pak relativně vysokým obsahem kvalitního humusu, který je jedním z důležitých faktorů vývoje půdní struktury, dále přítomnost dvojmocných kationtů (především vápníku), které mají také pozitivní vliv na půdní strukturu. Neopomenutelných vlivem je také výskyt černozemí v teplých sušších regionech, kdy celkový vlhkostní režim nahrává tomu, že se půda často nachází v takovém vlhkostním stavu, kdy přejezdy zemědělskou technikou mají menší vliv na jejich utužení.

3.1.2.2.2 Hnědozemě a luvizemě

Hnědozemě a luvizemě spadají do referenční třídy Luvisolů (Luvisols dle WRB, Alfisols dle Soil Taxonomy), která zahrnuje i půdní typ šedozem. Šedozemě jsou půdy velmi produkční, ale relativně malého plošného rozsahu. Výrazně větší plošné zastoupení mají hnědozemě. Jedná se velmi úrodné půdy, obvykle vyvinuté na spraších, tak jako tomu je u černozemí, nicméně již v méně příznivějších klimatických podmínkách. Jde o oblasti, kde srážky výrazněni převažují nad evapotranspirací (což je ještě více umocněno u luvizemí). V rámci pedogeneze, tak docházelo k vyluhování karbonátů, okyselování (umocněné přirozenou vegetací, kterou byly listnalé lesy) což vedlo k omezené tvorbě humusového horizontu, který je přirozeně mělký s nižším obsahem humusu. Dnes jeho mocnost odpovídá hloubce ornice. Snížené pH, nižší obsah humusu a vysoký podíl prachové frakce dělá tyto půdy náchylné k rozplavování a tvorbě slabě vyvinuté půdní struktury. Z tohoto důvodu, jsou tyto půdy náchylné k tvorbě krust (škraloupu), erozi a také utužení – zvláště ve srovnání s černozeměmi.

I v rámci této půdní jednotky, která je rozšířena u nás, ale i ve světě, je možné nalézt studie zabývající se vlivem technologie zpracování půdy na jejich fyzikální vlastnosti, i když ne v takové míře jako u černozemí. Více se zde setkáváme s výzkumem zaměřeným na vliv přejezdů technikou o různé hmotnosti.

Oproti černozemím se často setkáváme se zjištěním výraznějších a jednoznačnějších rozdílů. Příkladem může být práce (Bogunovic & Kisić 2017) z Chorvatska, která porovnává (1) konvenční zpracování (CT), (2) konzervační zpracování (CM) a (3) systém bez zpracování (NT) luvizemí v Chorvatsku. Práce zjistila, že ve všech systémech zpracování půdy se objemová hmotnost a penetrační odpor zvyšovaly s hloubkou a největší nárůst od povrchu do nejhlubší vrstvy byl v průměru pozorován u systému CT, kdy největší penetrační odpor ze všech měření (5,9 MPa) byl pozorován v poslední sezóně u systému CT v hloubce 40 cm. Prokázán byl i vliv na výnos plodiny kdy nejvyššího výnosu kukuřice v první sezóně bylo dosaženo u systému CT, zatímco v ostatních sezónách bylo nejvyššího výnosu ozimé pšenice a kukuřice dosaženo u systému CM. Lepší fyzikální vlastnosti a menší utužení bylo zaznamenáno i v rámci šestiletého pokusu na hlinité luvizemi v Německu, kdy primární předpoklad, že konvenční zpracování půdy je pro tyto půdy lepší než konzervační zpracování půdy (Ehlers et al. 2000), pokud jde o výnosy cukrové řepy, ozimé pšenice nebo v určitých mezích ozimého ječmene na hlinitém písku (Sommer & Zach 1992). Lepší stav půdy a lepší výnosy dokázala i studie na

luvizemí oglejené (stát New York, USA). Lepších výsledků, ale bylo dosaženo a po víc než 5 letech uplatňování bezorebné technologie (Karunatilake et al. 2000).

Kromě obvyklého porovnávání různých způsobů zpracování půd je možné se setkat se studiemi zaměřenými na vliv pojezdu zemědělskou technikou. Příkladem může být práce, kdy bylo studováno, jak jednorázové přejetí 35 t těžkého kombajnu na sklizeň cukrovky ovlivní utužení v luvizemi oglejené na spraši (Simojoki et al. 2008). Práce prokázala, že došlo k výraznějšímu utužení v ornici i podorničí u půdy zpracovávané konvenční technologií, než minimalizační. Studie také prokázala, že u tohoto půdního typy vede minimalizace k tvorbě většího počtu ve vodě stabilních agregátů a tím ke zlepšení půdní struktury ve svrchní části půdy. Stejně tak bylo prokázáno, že pojezd v okamžiku vlhkostního stavu půd, blížícího se polní vodní kapacitě, způsobí utužení až do podorničí. K podobným závěrům došla studie zaměřená na zkoumání vlivu 10ti násobného přejezdu zemědělskou technikou (Hartmann et al. 2012). Kdy výsledky vedly k závěru, že kolové zatížení 6,3 Mg způsobuje zhutnění, u obou zpracování půdy a způsobilo změny půdní struktury. Podobné výsledky byly získány při 6ti krát se opakujícím zatížení 5 Mg v Německu na luvizemi na sprašové hlíně, která byla obdělávána konvenčním (orba) a konzervačním (rotační) systémem po dobu více než 25 let. U bou zpracování došlo k narušení půdní struktury. Při nižším tlaku (2,5 Mg) byla pozorována degradace půdní struktury pouze u konvenčně obdělávané půdy (Wiermann et al. 2000). K obdobným závěrům došli i autoři dalších prací z Německa (Sommer & Zach 1992, Horn & Fleige 2009).

3.1.2.2.3 Fluvizemě

Fluvizemě, součást referenční třídy Fluvisolů, představují v našich podmínkách různě produkční půdy. Na středních a dolních tocích větších vodních toků však představují významnou součást zemědělského půdního fondu, který je intenzivně využíván. Fluvizemě patří mezi typické nezonální půdy a můžeme se s nimi setkat ve všech klimatických oblastech v různých částech světa, kdy v mnoha regionech představují hlavní místa zemědělské produkce (s ohledem na dostupnost vody pro závlahy).

Přestože fluvizemě představují významnou půdní jednotku o jejich vztahu mezi typem zpracování půd a utužením existuje naprosté minimum vědeckých prací. Výjimkou je studie (Kuncoro et al. 2014) zkoumající vliv konvenčního zpracování půdy (CT), minimálního zpracování půdy (MT) a redukovaného zpracování půdy (RT). Penetrační odpor nepřekročil hodnotu 2,5 MPa u žádné z variant. U varianty CT byl pozorován nižší podíl ve vodě stabilních agregátů.

Další práce se zabývají pouze porovnáním hodnot objemové hmotnosti s jinými půdními typy pod obdobným způsoben využití nebo popis stavu pod běžným užíváním půd. Příkladem takové práce je studie z Turecka (Simsek et al. 2019), kdy je u fluvizemě popsán zhutnělý horizont v hloubce 30 až 65 cm, který dle autorů vznikl dlouhodobou kultivací v průběhu desítek let. Vopravil et al. (2021) přinášejí srovnání vybraných půdních vlastností – mezi nimi i objemovou hmotnost - mezi různými půdními typy (kambizem, luvizemí, fluvizem, černozem, černice, pseudoglej a glej) pro území ČR. Z hlediska objemové hmotnosti fluvizemě vykazují rozsah hodnot mezi 1,09–1,63 g.cm-3. Kdy hodnota 1,09 je nejnižší mezi všemi půdními typy.

Autoři dále uvádějí, že oproti 60. letům 20. stol. Došlo k nártu OH o 15,6 % (u černozemí o 7,5 a hnědozemí o 4,4 %).

3.1.3 Technologie zpracování půd

Zpracování půd je jedním ze základních postupů v zemědělství. Snahou člověka je vytvořit kultivací co možná nejpříznivější podmínky půdního prostředí. Díky vědeckému poznání, místním znalostem zemědělce, či dodržováním nároků legislativní povinnosti dle povahy pozemku, zemědělec musí určit správnou technologii, která bude, na daném pozemku uplatňována. Od počátků zemědělství, jež formuje půdní prostředí více než 7 000 let došlo a stále dochází k vývoji způsobům a technologií zpracování půdy. Vzhledem k měnícímu se klimatu a dostání legislativním požadavkům se jednotlivé technologie mohou uplatňovat i na lokalitách, kde v řádu několika málo let, či nižší desítky let zpět nebyly vhodné.

3.1.3.1 Orba

Orba představuje konvenční základní zpracování půdy. Orebná technologie zpracování půdy je o poznání složitější než minimalizační technologie, a to především v množství operací jež orebná technologie zahrnuje. K výhodám orby patří především téměř dokonalé zaklopení rostlinných zbytků včetně semen. K těmto výhodám je však za potřebí zmínit jedu z hlavních nevýhod orebné technologie, kterou je zvýšená eroze (Muysen et al. 2002, Novák & Mašek 2018).

Výčet operací orebné technologie obsahuje v obvyklém sledu kultivačních operací během pěstební sezóny:

- Podmítka,
- Ošetření podmítky, je-li to nutné,
- Případný výsev meziplodin,
- Orba,
- Předseťová příprava,
- Setí
- Plečkování, či jiná operace v porostním období (Křen et al. 2015).

Použití orebné technologie má v Evropě velkou tradici. Správně provedená orba půdu obrací, mísí, nakypří a rozdrobí. Díky kypření dochází ke zvýšení pórovitosti ornice, zejména pak nekapilárních pórů. Při vhodné půdní vlhkosti dopomáhá k drobení půdy na menší agregáty a také ovlivňuje agregátové uspořádání půdy. Doba provedení se liší dle pěstovaných plodin a lze ji rozdělit na orbu letní, seťovou k ozimům, podzimní k jařinám a jarní (Kvěch & Škoda1985; Brant 2021).

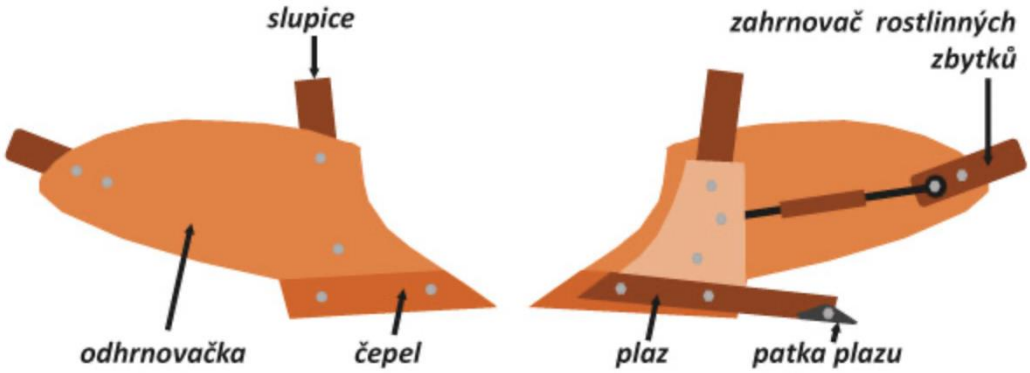
Při orbě je úplně narušován povrch půdy v celém záběru pluhu. Na povrchu půdy nezůstává více než 15 % primární organické hmoty. Orba je schopna na těžkých půdách zvýšit pórovitost až o 50 %. U lehkých půd se zvýšení pórovitosti pohybuje okolo 30 %. Zvýšením pórovitosti půdy se zvýší aerace a tím se zvýší i mineralizace půdní organické hmoty (Šnobl et

al. 2007). Na lehkých půdách je pro orbu vhodnou vlhkostí 8-12 % (hmotnostních), na středních 16-18 % a na těžkých 18-21 %. Nicméně v praxi nejsou tyto hodnoty dodržovány. Zemědělci vždy na základě svých zkušeností posoudí vhodný vlhkostní stav pro provedení. Ve velmi suchých podmínkách, kdy není takových hodnot vlhkosti dosahováno, je spíše vhodnější využít minimalizační technologie. Naopak půdy se sklonem k zamokření jsou pro systém orby velmi vhodné. Hloubka orby hraje významnou roli i s ohledem na kumulaci srážkové vody, podpoření mikrobiální aktivity a uvolňování živin. Pěstované plodiny také lépe vytváří kořenový systém plodin v orniční vrstvě (Šimon & Lhotský 1989; Mirzaev et al. 2019).

Orba je nejčastěji prováděna radličnými pluhy (Kostelanský 2004). Rozhodnutí o hloubce orby je řízeno hlavně požadavkem následných plodin v osevním postupu. Rozlišujeme orbu:

- mělkou (do 18 cm),
- střední (18-25 cm),
- hlubokou (25-30 cm),
- velmi hlubokou (nad 30 cm).

Radličný pluh odřízne část ornice, překlopí ji a rozdrobí. Během tohoto procesu je organická hmota z půdního povrchu zapravena do půdy. Pluh zanechává povrch hřebenitý, seskupený do hrůbků a brázd. Primárním pracovním nástrojem pluhu je orební těleso, které se skládá z čepele, odhrnovačky (čepel a odhrnovačka společně tvoří radlici), slupice a plazu s patkou (Plaster 2014). Orebné těleso je zachyceno na obrázku č. 3.



Obrázek 3. Konstrukce orebního tělesa radličného pluhu (Brant 2021)

Pokud jsou půdy náchylné k zamokření, je výhodné je zpracovávat orebným systémem. Hlubší orbou se zvyšuje rozklad organické hmoty a zlepšuje se propustnost půdy, což umožňuje rostlinám lépe přijímat živiny, zejména dusík a fosfor. Moderní způsoby zpracování půdy často kombinují různé pracovní operace, jako je orba s drcením hrud, předseťová příprava nebo setí. (Křen et al. 2015).

V posledních letech se význam orby široce diskutuje, nicméně nelze její důležitost i v dnešní době rozporovat (Novák & Mašek 2018). Je ale třeba zmínit, že jsou s orbou spojené nepříznivé účinky na půdní organismy. Orba vede k snižování počtu žížal a chvostoskoků (Hůla et al. 1997). Mezi její další nedostatky můžeme řadit zranitelnost zorané půdy k erozi, zhutnění a větší pracovní i energetickou náročnost (Mirzaev et al. 2019). Orba je energeticky náročná zvláště na těžkých půdách. I přes to, že je jejím primárním účelem nakypření půdy, může

docházet k utlačování a utužování častým provozem zemědělské mechanizace při následujících operacích (Stach 1997; Reicosky & Archer 2007). Při porovnání bezorebného zpracování půdy s konvenčním je pozorovatelná změna půdní struktury, která ovlivňuje schopnost absorbovat a transportovat vodu. U minimalizační technologie byla prokázána vyšší objemová hmotnost, nižší nasycená hydraulická vodivost a zadržování více vody (Hubbard et al. 1994).

3.1.3.2 Minimalizační technologie

Minimalizační technologie, často také označované jako redukované či minimální zpracování půdy, představují systémy zpracování půd využívající jako hlavní nástroje při zpracování půdy radličkové a talířové podmítače a s tím související zpracování půdu do menších hloubek než u orby. Stále častěji jsou využívány i kombinace pracovních nástrojů. Na jednom rámu se nachází sekce talířů a radliček nebo dalších jiných orgánů. Rozlišují se dvě základní varianty řešení. Kombinace talíře a šípové radličky, kdy talíře narušují utuženou půdu, šípové radličky urovnávají dno brázdy a vytváří rovinu seťového lůžka. Druhou možností je kombinace talířů a dlátových radliček využívaná především na těžkých a utužených půdách (Javorek 2008; Pospíšil 2020).

K hlavním výhodám minimalizačního zpracování patří snížení zatížení půdy přejezdy, které lze eliminovat snížením intenzity zpracování. Za využití minimalizačních technologií obdělávání půdy lze eliminovat nutnost přejezdů po pozemku díky vynechání některých operací. Z toho vyplývá, že minimalizace je založena na možnosti využití zjednodušených postupů. V suchých oblastech lze těmito bezorebnými technologiemi snížit ztráty vody z půdy, dalšími pozitivy je snížení nákladů na přípravu půdy (Kroulík et al. 2009, Šarapatka & Urban 2006). K dalším přednostem minimalizačních technologii patří především zachování půdních fyzikálních vlastností, které vedou především ke snížení aerace a tím snížení rychlosti mineralizace. To může mít za následek především zvýšenou schopnost např. agregace a s tím související tvorbou půdní struktury, snížení vodní či větrné eroze. V neposlední řadě k výhodám minimalizačního zpracování půdy patří urychlení při kultivaci (Lhotský 2000).

Při uplatnění minimalizačního zpracování půdy se uplatňují tyto následné pracovní operace v následném sledu:

- Podmítka,
- Ošetření podmítky, je-li to nutné,
- Případný výsev meziplodin,
- Předseťová příprava (touto operací je v bezorebném systému myšlena druhá podmítka),
- Výsev hlavní plodiny,
- Plečkování, či jiná operace v porostním období (Křen et al. 2015).

Odhaduje se, že bez orby se celosvětově obhospodařuje více než 150 milionů hektarů zemědělské půdy. Ve srovnání s konvenčním zpracováním půdy podporuje minimalizace v kombinaci s dalšími konzervačními postupy (např. diverzifikace osevního systému, trvalé travní porosty) ochranu půdy a vody. To se děje v důsledku snižujícího se odtoku. Zvyšuje se obsah organického uhlíku v půdě. Za použití minimalizační technologie dochází ke zlepšení

koloběhu živin či snížení spotřeby energie a emisí skleníkových plynů, což se odráží na vyšším výnosu plodin. Za využití dalších technologií, kterými jsou například no-till či strip-till, je narušení půdy omezeno na secí dráhu secí botky, do které secí jednotka ukládá semena a hnojiva do půdy, takže většina povrchu půdy zůstává nenarušená a pokrytá rostlinnými zbytky (Ferreria et al. 2022). Konzervační technologie je více rozšířena v USA, naopak orba se využívá více v Evropě jako tradiční způsob zpracování půdy. U tématu zpracování půdy často dochází u zastánců jednotlivých technologií k názorovým rozepřím (Hůla 2001).

Při zpracování půdy omezené na minimum je důležité brát zřetel na provedení všech operací, protože často nepodařené obdělání půdy touto technologií není možné v krátkém časovém horizontu napravit. Minimalizační zpracování půdy je nutné, jak pro regulaci plevelných rostli či zaplevelujících kulturních rostlin, tak i pro založení nového porostu (Hůla 2001). Studie ukázaly, že v minimalizačním zpracování se zhutněná půdní vrstva často nachází v orničním profilu, což znesnadňuje plodinám přijímat vodu a živiny. Zhutnění půdy v této hloubce (0,07–0,20 m) snižuje pórovitost půdy a konektivitu pórů, a tím i infiltraci vody a kapacitu akumulace vody. Z tohoto důvodu je doporučováno občasné zpracování půdy podrýváním, protože slouží k překonání zhutnění půdy pod bezorebnými systémy. Tyto praktiky však mohou zvýšit výrobní náklady a jejich příznivé účinky z hlediska dlouhodobého zvýšení produktivity jsou pouze marginální, protože půda je citlivá na opětovné zhutnění (Ferreria et al. 2022). Například Kornecki & Kichler (2022) ve své publikaci uvádí jako vhodný doplněk k bezorebné technologii použití meziplodin. Využívání krycích plodin při minimalizačním zpracování půdy je stále populárnější a stává se standardem. Meziplodiny se před setím hlavní plodiny umrtví válením a přímo do tohoto mulče se zaseje hlavní plodina nebo dojde k minimálnímu zpracování půdy a následnému výsevu hlavní plodiny. Jednou z hlavních výhod je omezení neproduktivního výparu v době klíčení semen, omezení růstu plevelů, vysoká sekvestrace uhlíku a omezení eroze.

Z výše uvedených důvodů si získávají podporu systémy obdělávání půdy s méně destruktivním narušováním půdy, tím se tedy zlepšují její vlastnosti a její produktivita. Tyto systémy jsou nazývány jako alternativní, při takovémto hospodaření je hlavním úkolem zachování či zlepšení ideálních hydrologických a fyzikálních směrů v rostlinné výrobě a dlouhodobému zlepšení zdravotního stavu půdy a udržitelnosti agroekosystémů (Afshar et al. 2022).

Při použití technologií minimálního zpracování půdy, je klíčové věnovat podmítce maximální pozornost. Podmítka je totiž jediným agrotechnickým zásahem, který zajišťuje vytvoření vhodného lůžka pro setí plodin a má významný vliv na budoucí úrodu (Javorek 2008). Podmínky pro růst se mohou lišit od jednotlivých rostlinných druhů. Úspěšné postupy konzervačního obdělávání půdy závisí na schopnosti zemědělců integrovat správné principy do rostlinné výroby s účinnými systémy ochrany proti škůdcům. Zatímco úspory paliva, práce a půdy přiměly mnoho zemědělců k zavedení konzervačního obdělávání půdy, zdokonalené metody a vybavení by měly toto zavádění ještě zvýšit (Gebhardt et al. 1985).

Použití jednotlivých technologií je různé v jednotlivých světových regionech. Vzhledem k různým novým vědeckým poznáním je používání jednotlivých technologií dosti dynamické, a to i z důvodu dostání novým právním požadavkům v rámci ochrany půdy. Moderní zemědělství však volí typy kultivace dle klimatických a půdních podmínek. Na otázku orat či neorat nelze jednoznačně odpovědět (Hůla 2001). Pohledy se na téma zpracování půdy mění,

tyto názory se opírají často o vědecké poznání, jednou z dalších pohnutek je vývoj samotného zemědělství (Ledvina et al. 2000).

3.1.4 Pohyb techniky po pozemku

Pro dokonalé urovnání povrchu pozemku je zvykem zemědělců se s mechanizací pohybovat po poli pod určitým úhlem vůči předcházející jízdě. Tyto praktiky však postrádají smyslu při používání techniky se záběrem nad 6 m. Pohyb techniky pod různým úhlem zvyšuje zhutnění půd. Při využití technologie s kolejovými řádky se koncentruje pojezd po pozemku pouze do kolejových stop a to především při aplikaci hnojiv či pesticidů. To však nemá vliv na přejezdy při zpracování půdy, jak dokázala studie Rataj et al. (2017), kdy byly sledovány čtyři pracovní operace. Pohyb strojů při zpracování půdy byl pod různými úhly jednotlivých operací a to 15 °, 25 °, 35 ° a 40 ° ke směru setí. Po prozkoumání ploch po stopách pneumatik byly zjištěny následující plochy přejezdů, či míst bez přejezdu techniky: 39 % plochy bez přejezdu, 39 % plochy bylo přejeto 1x, 19 % plochy 2x a 3 % plochy bylo přejeto trojnásobně. Při pohybu mechanizace diagonálně neboli úhlopříčně tj. pod úhlem cca 45° dochází především při přípravě půdy ať už při podmítce po sklizni plodin, či předseťové přípravě k neproduktivnímu překrývání již jednou zkultivovaných míst (tato místa jsou tedy zpracována nejméně dvakrát) a to především na souvratích (Konupčík & Špelina 1978). V dnešní době je pohyb strojů často řízen za pomocí navigačních systémů, které zvyšují kvalitu a efektivnost práce. Tyto vyspělé systémy stanovují přesný pohyb strojů ve vztahu k velikosti a tvaru pozemku. Dále dodržují trajektorie jednotlivých jízd např. při přihnojování či ochraně rostlin, také eliminují poškození porostů přejezdem (Brant et al. 2016). Při soustřeďování přejezdů mechanizace po půdě do trvalých kolejových stop se záběrem strojů 4 m dochází k poklesu intenzity pojezdů technikou na 37,6 %. Při použití strojů se záběrem 8 m intenzita klesá na 31,3 % (Kroulík et al. 2009).

U technologie bezorebné je vynechána orba. Proto tedy v závislosti pohybu techniky na pozemku je u bezorebné technologie nejméně o jeden přejezd po pozemku zátěž na půdu snížena (Křen et al. 2015).

3.1.5 Důsledky zhutnění

Kompakce půdy přináší celou řadu negativních dopadů, jak na vlastní půdu, tak na další složky životního prostředí a samozřejmě na zemědělskou produkci (Lhotský 2000). Zhutnění půdy ovlivňuje mnoho fyzikálních, chemických a biologických procesů v půdě a může způsobit environmentální problémy (například erozi, záplavy a vyplavování živin a pesticidů do podzemních vod) a agronomické problémy, jako je snížení růstu rostlin a výnosů (Moinfara et al. 2022). Zhutnění půdy může vést ke snížení propustnosti, propojení pórů, zadržování vody, růstu kořenů a příjmu živin. Odhadované ztráty výnosů v důsledku zhutnění a jeho vlivy mohou dosáhnout až 40 % (Van Orsouw et al. 2022).

Pedokompakce spolu s chemizací dále způsobuje snížení aktivity půdních organismů (Meeus 1995). Při překročení kritických hodnot degradace fyzikálních vlastností dochází ke škodlivému působení na půdní faunu (edafon) a flóru a dochází k neefektivnímu využití

aplikovaných hnojiv (Lhotský 2000). Kořeny jsou schopny proliferovat v příznivých půdních zónách a omezovat růst v méně příznivých půdních zónách pro efektivní růst k vodě a využití živin. Modelování příjmu vody by mohlo určit, jak kořeny mění agregaci a biopóry (Timlin & Ahuja 2013). S degradační změnou vlastností půdy jsou přímým způsobem spojena závažná rizika ekologického rázu, například zvýšené riziko vodní eroze a s tím související i zvýšený povrchový odtok vody. Tímto jevem jsou pak ohroženy především povrchové vodní zdroje kontaminací (Hůla 2001). Dopady zhutnění na míru mineralizace uhlíku a kořenovou biomasu se značně liší v závislosti na typu půdy, stavu provzdušnění, rostlinných druzích a inherentní úrovni zhutnění půdy (Das et al. 2022).

Lhotský (2000) ve své publikaci uvádí, že důsledkem je především stagnace výnosů (citelná především u náročných plodin, například u cukrovky), aby se však těmto dopadům předešlo, produkují se šlechtěním nové odrůdy rostlin tolerantních ke zhutnění. Takto geneticky vybavené rostliny (odrůdy) mají zlepšené fyziologické znaky především tedy vyšší toleranci ke zhutněným půdám oproti rostlinám bez těchto genetických znaků (Das et al. 2022).

Jedním z důsledků zhutnění, které byly popsány ve vědecké literatuře, je zvýšení objemové hmotnosti o 11,5 – 17,7 % a dále snížení intenzity mineralizace uhlíku mezi 36,2 – 91,9 % v porovnání s nezhutněnou půdou (Das et al. 2022). Utužování půdy představuje vážnou hrozbu pro zemědělskou produktivitu, protože může vést ke ztrátám výnosů v rozmezí od 5 % do 40 %. Kvantifikace stavu utužení může zemědělcům a správcům půdy pomoci určit optimální řízení, aby se těmto ztrátám předešlo (Van Orsouw et al. 2022).

3.1.5.1 Fyzikální vlastnosti

Dle Lhotského (2000) je následkem půdní kompakce zvýšení objemové hmotnosti a s tím související snížení pórovitosti a zároveň omezení propustnosti, s kompakcí je dále spjata ztráta půdní struktury, kdy tlak na půdu fyzikálně ničí půdní agregáty. Dále zhutnění omezuje pohyb půdního vzduchu a vody, tím je zároveň ovlivňován obsah vody a vzduchu v jednotlivých půdních horizontech (Javůrek a Vach 2008). Utužení také mění velikosti pórů, což zase snižuje rychlost infiltrace. Pokles infiltrace může nepřímo ovlivnit další funkce, jako je difuze kyslíku, růst kořenů a vegetačních vrcholů, mikrobiální aktivitu a biochemické procesy související s odstraňováním znečišťujících látek (Das et al. 2022). Timlin & Ahuja (2013) ve své publikaci uvádí, že kořenové vlášení přispívá k rozvoji agregátů a struktury půdy samotné prodlužování kořenů má za následek radiální posun částic a zvýšení objemové hmotnosti až o 30 % v blízkosti rostoucích kořenových špiček. Spolu s mikrobiální aktivitou tyto pohyby, vyvolanému aktivitou kořenů, vedou k disperzi a agregaci půdních částic a vytváření fyzikální struktury půdy.

Pokud je půda příliš zhutněná, zvyšuje se náročnost běžného obdělávání, především při orbě. V posledních 30 letech se zjistilo, že v důsledku zhutnění se orební odpor středně těžkých a těžkých půd zvýšil průměrně o 30 % a na souvratích dokonce až o 80 %. To vede k vyšší spotřebě pohonných hmot a nákladů na orbu. Pokud se snažíme odstranit zhutnění půdy (např. hloubkovým kypřením), energetická náročnost se ještě výrazněji zvyšuje. Při nápravě zhutnění v podorničí je spotřeba nafty na hloubkové kypření do hloubky 0,65 metru přibližně 45 litrů na hektar (Javůrek a Vach 2008).

3.1.5.2 Biologické vlastnosti

Při vyšší pedokompakci se omezuje hlavně půdní mezoedafon, který tvoří dešťovky, chvostoskoci, členovci aj.. Přitom jsou tito živočichové důležití, neboť se přímým způsobem spolupodílejí na tvorbě drobtovité struktury půdy. Vytvářejí chodbičky, vylučují stabilizující látky pro tvorbu půdních drobtů. Tím zvyšují pórovitost a propustnost půdy pro vodu a vzduch (Javůrek a Vach 2008).

Půdní fauna má důležité funkce pro úrodnost půdy a udržitelné zemědělství. Žížaly mohou podporovat tvorbu a stabilitu agregátů při průchodu jejich trávicí soustavou, jejich činnost spojenou s jejich pohybovou aktivitou v půdě a sekreci polysacharidů. Příkladem může být jeden ze zástupců kroužkovců *Lumbricus terrestris* jež také hraje ústřední roli při infiltraci vody (Euteneuer et al. 2021).

Zhutnění ovlivňuje složení mesoedafonu (žížal), nikoli však jejich počet, jak ve své studii dokázal např. Pižl (1992). Utužení a jeho dopady na život půdních organismů není vázán jen na mesoedafon jako jsou např. zmíněné žížaly, ale i mikroedafon, jež je tvořen jednobuněčnými organismy, kterými jsou např. prvoci či bakterie. Tito zástupci jsou tvořeni převážně aerobními organismy. Rozvoj těchto organismů je vázán jak na dostatečnou zásobu organického uhlíku, tak i na dobrou aeraci a půdní vlhkost. Mikroedafon hraje nezastupitelnou roli v procesech při přeměnách organických a minerálních látek (Hůla 2001).

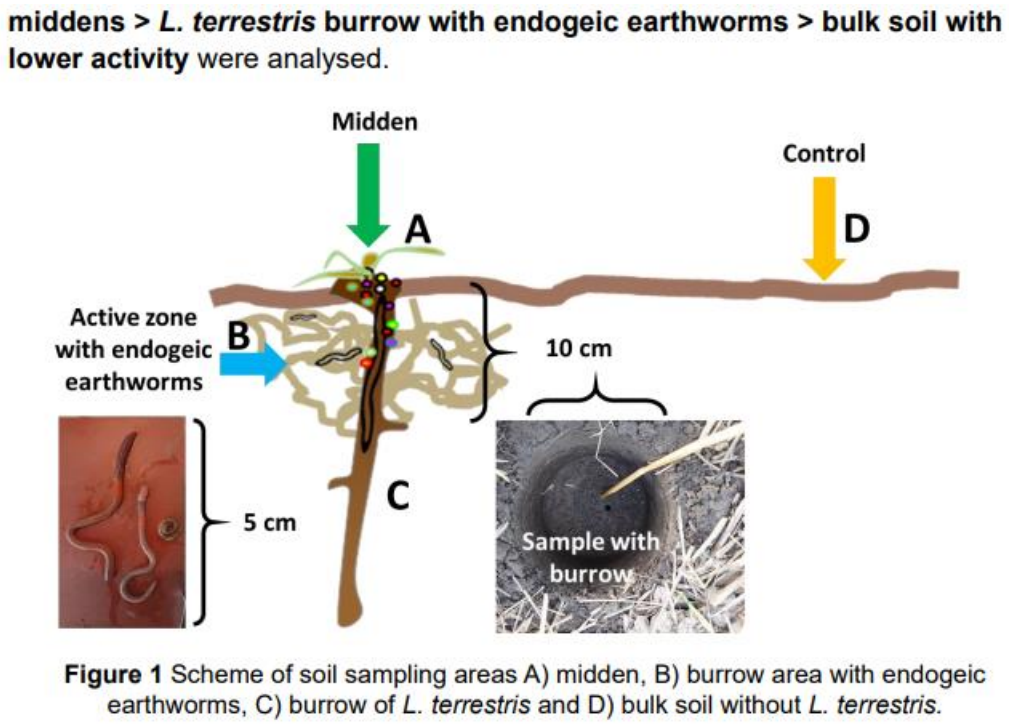


Figure 1 Scheme of soil sampling areas A) midden, B) burrow area with endogeic earthworms, C) burrow of *L. terrestris* and D) bulk soil without *L. terrestris*.

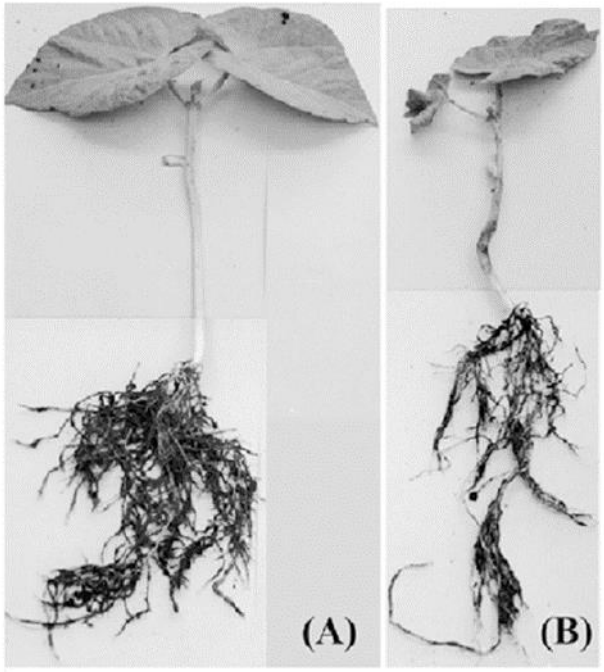
Obrázek 4. Půda poznamenána aktivitou žížal (Euteneuer et al. 2021).

3.1.5.3 Negativní vliv na zemědělskou produkci

Stejně jako má zhutnění půd nežádoucí dopady na půdní vlastnosti, tak se tyto přenášení na vlastní produktivitu (úrodnost) půd (Hůla 2001). Tyto fyzikální změny zhoršující půdní stav omezují správný rozvoj kořenů rostlin. To postihuje především plodiny, které vytvářejí hlavní kůlový kořen (řepka olejka, sója, slunečnice), neboť je kořenům znemožněno pronikání utuženou vrstvou půdy do podorničních částí půdy, a dochází k jejich deformaci horizontálním směrem (Hůla 2001). Především výše míry utužení, zhoršuje kvalitu produkce a výnos plodin.

Úrodnost půdy lze také definovat na základě jednotlivých fyzikálních vlastností (Pulkrábek et al. 2015). Pro dosažení maximální produktivity se obvykle udává, že lehké půdy by měly mít objemovou hmotnost v rozmezí 1,2-1,3 g.cm^{-3}, středně těžké půdy 1,3-1,4 g.cm^{-3} a těžké půdy 1,4-1,5 g.cm^{-3}. Půdy s objemovou hmotností nad těmito hodnotami mají tendenci být zhutnělé, což má za následek mělké zakořeňování rostlin, narušení morfologické stavby kořenů a další problémy (Mulholland et al. 1996). Dále se zpomaluje růst, a je-li překročena objemová hmotnost půdy nad 1,8 g.cm^{-3}, růst se zastavuje (Pulkrábek et al. 2015). Schopnost dozrávání rostlin je závislé na dostatečné provzdušněnosti půd. Půda by měla být schopná splňovat následující požadavky rostlin:

1. růst kořenů;
2. dostatečné zásobení vodou;
3. dostatečná aerace;
4. dostatečné zásobení minerálními živinami;
5. dostatečná pufrovací schopnost proti změnám teploty a pH.



Obrázek 5. Rozdíl v růstu rostliny v půdě bez zhutnění (A) a půdě zhutnělé (B), (Převzato z: Alessa a Earnhard 2000).

Kromě omezeného růstu kořenů, které jsou důležité pro výživu rostlin, jsou obzvláště citlivé plodiny, jejichž produkční orgány rostou v půdě, ať už v podobě kořenu (řepa cukrovka) nebo hlíz (brambory). U těchto plodin jsou hospodářské ztráty z důvodu zhutnění půd nejvýraznější. Například Huntenburg et al. (2021) popsal pokles výnosu brambor na utuženém

pozemku o 31 % oproti neutužené kontrole. Studie ze Švédska věnující se výnosu jarní pšenice na půdě utužené a neutužené Liu et al. (2022), prokázala, že půdy zhutnělé mají vyšší výnos v suchém roce, a naopak se výnos snížil v roce vlhčím, proto tedy lze konstatovat, že klíčovou roli vlivu kompakce na výnos obilnin nehraje pouze samotná míra zhutnění, ale také průběh počasí v jednotlivých letech. Dále pak studie ze Skotska prokázaly snížení výnosu travní nadzemní biomasy o 11,4 až 12 %, toto snížení bylo zapříčiněné zhutněním hospodářskými zvířaty. Další sledované snížení výnosu travní nadzemní biomasy o 14,5 % bylo zapříčiněno zhutněním mechanickým, tyto výsledky byly zjištěny po třech letech zhutňování (Hargreaves et al. 2019).

3.2 Stanovení zhutnění půd

Existuje mnoho způsobů, jak stanovit zhutnění půdy, které se liší podle přesnosti a principů. V některých případek se na utužení může usuzovat pouze na základě projevů růstu rostlin, chování vody na pozemcích (stagnace vody po deštích), nebo na základě morfologických znaků půd, jako je typ a výskyt některých typů půdní struktury.

Pro kvantitativní popis míry utužení je využíváno stanovení různých fyzikálních charakteristik. Často se stanovuje objemová hmotnost a penetrační odpor. Typ zvolené metody se odvíjí od faktorů jako je časová a cenová náročnost stanovení, nebo náchylnost k chybám a přesnost měření. Běžné je i sledování vztahů mezi jednotlivými ukazateli, neboť se ukazuje, že volba měření má podstatný vliv na výsledek studií utužování půdy (Van Orsouw et al. 2022).

3.2.1 Nepřímé projevy utužení půd

Nepřímé projevy zhutnění půdy lze sledovat s ohledem na sníženou pórovitost a s tím související infiltraci na rovinatých pozemcích v podobě periodické stagnace vody (Sáňka et al. 2018). Výskyt těchto jevů je často nejvýraznější na pozemcích na souvratích, kde bývá půda nejvíce zhutněná od otáčení techniky. Pokud je půda příliš nasycená vodou, může se projevit buď přímo viditelným stagnováním vody nebo omezeným růstem rostlin způsobeným nadměrnou vlhkostí a nedostatkem kyslíku. Na utužených částech půdního profilu je také možné pozorovat deformace v růstu kořenů, které jsou soustředěny na povrchu půdy (hrud) a jemnější kořeny nepronikají do středu půdních agregátů (Pavlů 2018).

Orientačně je možné také indikovat utužení podle typu struktury půdních agregátů. Ty by měly mít spíše drobtovitý, kulovitý charakter (Khel & Vopravil 2015). V utužených částech půdního profilu se setkáváme s typicky výrazně vyvinutou polyedrickou půdní strukturou, nebo s deskovitou půdní strukturou (viz Obr. 6). Deskovitá půdní struktura je typická pro tzv. orební dno („plough pan“) – tedy hloubku půdy, která je hranicí orby.

Obrázek 6. Ukázka deskovité půdní struktury a obrůstání pedů kořeny rostlin.

S mírou utužení také obvykle narůstá pevnost půdních agregátů a kyprý, či soudržný půdní materiál se přeměňuje na ulehlý až tuhý (tvrdý). Tvar i chování půdních agregátů slouží pro orientační určení degradace půdy utužením. Při potřebě přesného stanovení míry utužení je proto třeba přistoupit k stanovování vybraných půdních vlastností v terénu, či laboratoři.

3.3 Ukazatele utužení

Hodnocení zhutnění půd se provádí především na základě dvou půdních vlastností. Jednou z nich je objemová hmotnost půdy. S ní pak úzce souvisí i pórovitost půdy. Druhým přístupem stanovování utužení půdy je pak měření penetrometrického odporu.

3.3.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost půdy znamená váhu suché pórovité zeminy v objemu 1 x 10^{-4} m^3 v neporušeném stavu. V poslední době je také označována jako redukovaná objemová hmotnost. Jako neredukovaná objemová hmotnost se uvádí objemová hmotnost neporušeného půdního vzorku s přirozenou vlhkostí. Objemová hmotnost půdy závisí na jejím mechanickém a petrografickém složení, množství a velikosti pórů a na obsahu organických látek v půdě (Hraško 1962). Organická hmota snižuje specifickou i objemovou hmotnost půdy (Šimek 2004).

Obvykle se hodnoty objemové hmotnosti zvyšují směrem od ornice k níže ležícím horizontům. Pokud tomu tak není, může to indikovat nadměrné zhutnění svrchní vrstvy nebo malou ulehlost spodních horizontů. Objemová hmotnost je užitečným ukazatelem pro nalezení přechodu mezi oblastí kultivovanou a oblastí, která je již ulehlá (Jandák 2003). S objemovou hmotností úzce souvisí i pórovitost, kterou je možné právě na základě objemové (a specifické hmotnosti) vypočítat. Proto se velmi často v hodnocení uvádějí obě veličiny.

Hodnoty objemové hmotnosti, které indikují utužení, se liší dle jednotlivých zdrojů a autorů a neexistuje jedna přesná hraniční hodnota mezi utuženou a neutuženou půdou (Tab 1 a 2). Hodnoty se také často liší dle jednotlivých plodin, neboť jsou na zhutnění půd různě citlivé. Stejně tak bývá hodnocení odlišné pro různé půdní druhy (viz Tab. 1).

Tabulka 1. Kritické limity objemové hmotnosti indikující zhutnění půd (Šarapatka 2002).

	Objemová hmotnost ($g.cm^{-3}$)	Pórovitost (%)
Písčité půdy	1,51-1,53	40
Hlinité půdy	1,41-1,46	45
Jílovité půdy	1,28-1,30	47

Pro stanovení optimální objemové hmotnosti je důležité brát zřetel na půdní strukturu, od toho se následně odvíjí rozhodnutí, zda půdní zhutnění přesahuje práh škodlivosti. Pro středně až jemně strukturní půdy je zdánlivě optimální rozmezí objemové hmotnosti pro maximální výnos plodiny 0,9 – 1,2 $Mg.m^{-3}$. Rozsah objemové hmotnosti 1,25 – 1,30 $Mg.m^{-3}$ představuje horní hranici, při jejímž překročení může být výnos plodin snížen nedostatečným provzdušňováním půdy. Druhá horní hranice 1,4 – 1,6 $Mg.m^{-3}$ představuje míru utužení, za kterou může být výnos plodin snížen nadměrnou mechanickou odolností. Půdy s objemovou hmotností < 0,9 $Mg.m^{-3}$ mohou vést k nedostatečnému ukotvení rostlin v důsledku nízké pevnosti půdy, snížené dostupnosti vody pro rostliny a snížení kapilární vzlínavosti a zpřístupnění živin či jejich transportu ke kořenům rostlin (Dorner et al. 2022).

Objemová hmotnost půdy je jedním z nejčastěji používaných parametrů k identifikaci zhutnění půdy.

Tabulka 2. Kritické hodnoty vybraných fyzikálních vlastností zhutnělé půdy (Lhotský 2000).

	J	JV, JH	H	PH	HP	P
Objemová hmotnost po vysoušení ($g.cm^{-3}$)	> 1,35	> 1,40	> 1,45	> 1,55	> 1,60	> 1,70
Pórovitost (% objemu)	< 48	< 47	< 45	< 42	< 40	< 38
Penetrační odpor půdy (MPa) při vlhkosti (% hm.)	2,8-3,2	3,3-3,7	3,8-4,2	4,5-5,0	5,5	6
	28-24	24-20	18-16	15-13	12	10

J – jíl, JV –jílovitá půda, JH – jílovitohlinitá půda, H – hlinitá půda, PH – písčitohlinitá půda, HP –hlinitopísčitá půda, P –písčitá půda

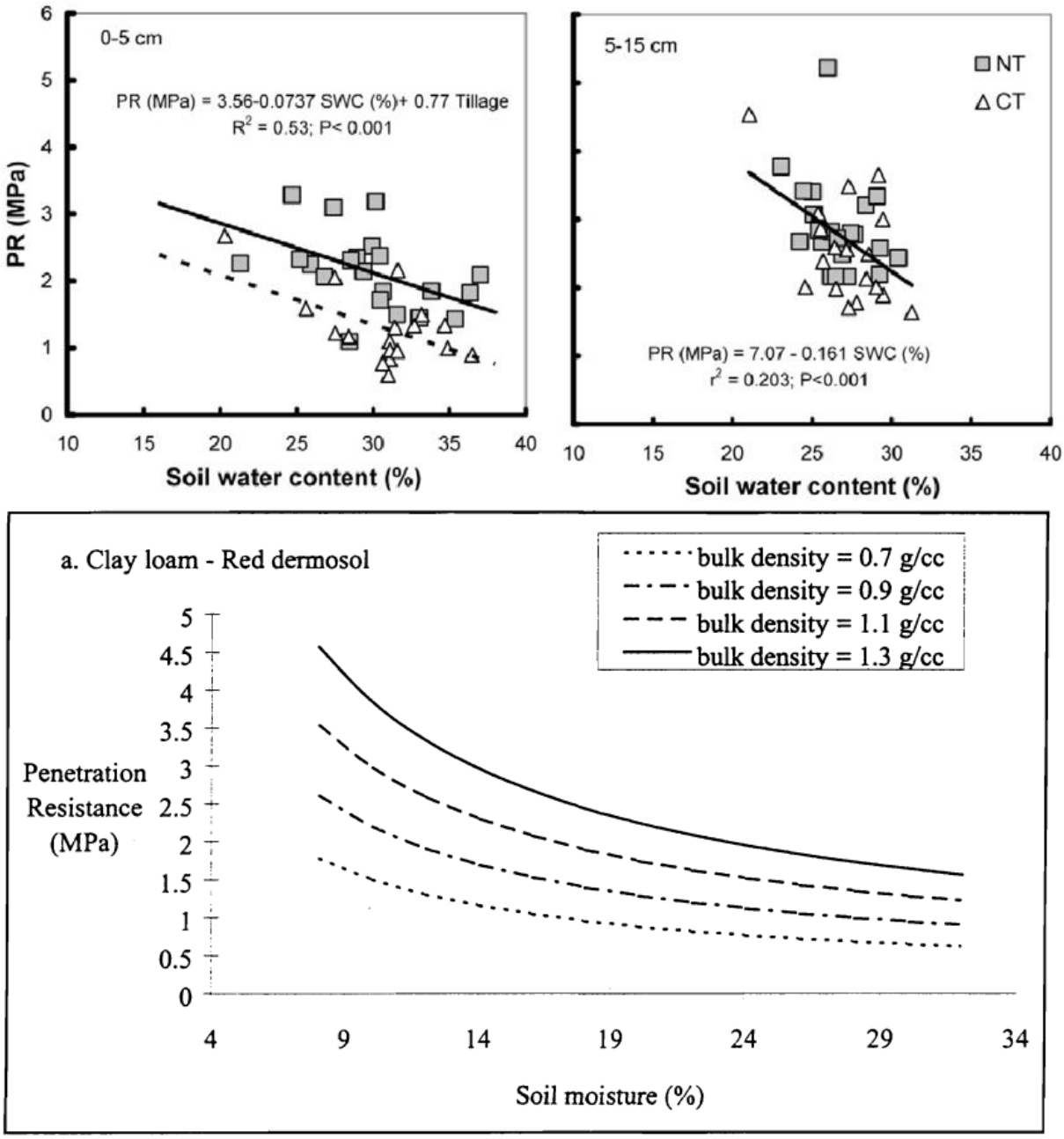
3.3.2 Penetrometrický odpor

Druhou z často používaných metod stanovení stupně pedokompakce je měření penetrometrického (penetračního) odporu. Penetrometrický odpor je odpor pronikání přesně definovaného hrotu do půdy. Hodnota penetrometrického odporu (PO) se stanoví jako:

PO [MPa] = Síla [N]/Povrch hrotu[cm^2] *100.

Měření penetrometrem je vhodné uskutečnit, když je půdní profil vlhký rovnoměrně, to znamená provádět měření v jarním období, v takovém případě se výsledky obejdou bez vlhkostní korekce, protože na penetromerický odpor má vliv půdní vlhkost (Javůrek a Vach 2008). Zhutnění půdy lze také posoudit pomocí penetrologrů, které měří PO půdy. Tato vlastnost půdy souvisí s odporem, který kladou kořeny rostlin při prorůstání půdou. Jedná se tedy spíše o měřítko pevnosti půdy než její hustoty. Ve zhutněných půdách ztěžuje pronikání kořenů do půdy v důsledku zvýšení pevnosti půdy. To má za následek mělký růst kořenů, což zvyšuje zranitelnost vůči suchu a snižuje efektivní hloubku, v níž jsou živiny pro rostliny dostupné. PO lze měřit z povrchu půdy pomocí ručního kuželového penetrometru, což nevyžaduje výkop půdní sondy ani laboratorní analýzy na rozdíl od vyhodnocení zhutnění za pomocí objemové hmotnosti.

Mezi stupněm utužení a velikostí penetrometrického odporu je přímá závislost (Lhotský 2000). Použití PO jako měřítka stavu zhutnění půdy není bez problémů. Měření je kromě objemové hmotnosti a textury půdy citlivé na vlhkostní podmínky půdy a chybu obsluhy. Naměřená hodnota PO se obvykle snižuje s rostoucí vlhkostí půdy, což znamená, že PO bude vyšší, pokud je půda suchá, a nižší, pokud je vlhká. Vztah mezi PO a půdní vlhkostí je popsán řadou autorů (např. Alvarez et al. 2009; Constantini 1997), Vždy je navázán na specifické podmínky (Obr. 7.) a neexistuje jednoznačná pedotransferová funkce, která by umožnila přepočet PO pro měnící se vlhkost.



Obrázek 7. Příklad vztahu mezi penetrometickým odporem (PR) a půdní vlhkostí (Soil water content; převzato z Alvarez et al. 2009 - nahoře a Constantini 1997 - dole)

Van Orsouw et al. (2022) ve své publikaci popisuje objemovou hmotnost a penetrometrický odpor jako dvě odlišná měření, která lze obě použít k charakterizaci zhutnění půdy, ale ze své podstaty tato měření vycházejí z odlišných principů vlastností půdy (tj. hustotu, resp. pevnost půdy). Také poukazuje na několik studií, jež ukázaly, že korelace mezi těmito dvěma měřeními není zdaleka dokonalá. Je možné, že přímá klasifikace stavu zhutnění půdy pomocí objemové hmotnosti půdy neposkytne stejný výsledek jako klasifikace pomocí PO, což vede k chybné interpretaci. Pokud zemědělci používají tato měření, jako základ pro rozhodnutí o hospodaření a snížení škodlivého dopadu zhutnění půdy, může to potenciálně vést k situaci, kdy by se hospodaření lišilo, kdyby se použil jiný nástroj měření. Je proto zásadní určit míru shody mezi oběma metodami pro přímou klasifikaci stavu zhutnění půdy.

Pokud se snažíme měřit zhutnění půdy, je vhodné, aby vzdálenost mezi jednotlivými sondami na pozemcích s jednotným druhem půdy nepřekračovala 100 metrů. Pokud jsou pozemky heterogenní, je třeba vzdálenost mezi sondami zkrátit a na menších pozemcích by mělo být alespoň 10 sond. Tato metoda je obecně vhodná pro srovnávání odlišných pozemků s různým způsobem zpracování půdy.

Je také důležité věnovat zvýšenou pozornost správnosti měření, která závisí i na rychlosti a plynulosti zapichování penetrometru (Van Orsouw et al. 2022). Je potřeba vzít v potaz, že penetrometrické měření není vhodné do všech půd, především pak rašeliništních či kamenitých (Lhotský 2000).

Vlastní určení, zda je půda zhutněná, se prování porovnáním naměřených hodnot s mezními hodnotami z literatury (tabulka 2 a 3), které jsou spojeny se škodlivými účinky na růst rostlin (Van Orsouw et al. 2022). Z tabulky je patrné, že existuje rozdíl v mezních hodnotách, které jsou dané variabilitou dalších půdních vlastností, jako je zrnitost půdy, nebo její vlhkost.

Tabulka 3. Kritické hodnoty penetrometrického odporu zhutnělé půdy od několika autorů, jež ve své publikaci uvádí (převzato z: Van Orsouw et al. 2022).

Table 1 The use of **soil** penetration resistance thresholds in existing literature, along with any sources cited in each study.

Threshold Value for Soil Compaction	Authors	Cited Source
	Using a single threshold	
2.0 MPa	Agostini et al. [30]	Gupta & Allmaras [31]
	De Lima et al. [32]	Da Silva et al. [33]
	Fabrizzi et al. [34]	Gupta & Allmaras [31]; Hamblin [35]
	Fernández et al. [36]	-
	Hernandez-Ramirez et al. [37]	Da Silva et al. [33]
	Lapen et al. [38]	Bengough & Mullins [28]; Greacen [39]
	Martins et al. [40]	Barbosa et al. [41]; Otto et al. [42]; Salem et al. [43]
	Özgöz et al. [44]	Zaman [45]
	Tebebu et al. [46]	Hamza & Anderson [47]; Taylor & Gardner [48]
	Van Leeuwen et al. [49]	-
	Wilson et al. [50]	Wilson et al. [51]
2.5 MPa	Alvarez & Steinbach [52]	-
3.0 MPa	Coelho et al. [53]	Taylor & Gardner [48]
4.2 MPa	Stock et al. [54]	-
	Using a range of thresholds	
1.5 MPa to 3.0 MPa	Laboski et al. [55]	Boone et al. [56]
2.0 MPa to 3.0 MPa	Çelik et al. [57]	Bengough et al. [58]; De Moraes Sá et al. [59]
	Müller et al. [60]	Bengough & Mullins [28]
	Tekeste et al. [61]	Bradfort [62]; Taylor & Gardner [48]

Pro účely této práce (i s ohlede na relativně vyšší vlhkost půd při měření penetračního odporu (více kapitola Výsledky) byl vzat tlak 2,5 MPa jako hodnota limitu utužení, která bylo určena jako vážený průměr hodnot uvedených autory v tabulce 2 a 3. Pro účely stanovení utužení na základě objemové hmotnosti, byly převzaty hodnoty dle Lhotského et al. (2000).

4 Metodika

4.1 Popis terénních prací a metod měření

Výběr pozemků s třemi odlišnými půdními typy byl proveden na základě podkladové mapy BPEJ. Po vytipování lokalit s výskytem daných půdních typů, kterými byly černozemě, hnědozemě a fluvizemě a s oběma způsoby hospodaření – konvenční s orbou a bezorebnou technologií, byl následný krok oslovení zemědělských podnikatelů na základě veřejného registru půdy LPIS. Zemědělské subjekty byly osloveny s prosbou o poskytnutí ploch pro výkop půdních sond (Obr. 8.), jež slouží k určení půdního typu vyskytujícího se na daném pozemku a odběru vzorků pro stanovení objemové hmotnosti a pro změření penetrometrického odporu.

Obrázek 8. Ukázka kopané půdní sondy.

Měření pentrometrem (Penetrologger 6.00 Eijkelkamp) bylo provedeno na každé lokalitě pod oběma technologiemi zpracování půdy. Jednotlivé plochy byly penetrometricky měřeny v lokalizacích dle přiloženého obrázku (Obr. 10, 12 a 14) u každé z lokalit. Vpichy penetrometrem byly provedeny na daném pozemku vždy ve třech opakováních, každé z opakování zahrnovalo lineárně uspořádané hnízdo o 10 vpiších. Směr lokalizace vpichů byl vždy kolno na směr kultivace půdy. Toto měření bylo provedeno na všech měřených variantách. Hloubka penetrometrického měření byla provedena do 80 cm.

Obrázek 9. Ukázka zavíčkovaných odebraných válečků před laboratorním vyhodnocením.

Kopané sondy, na každé variantě 1 sonda (tedy celkem 6 půdních sond), následně sloužily k odběru neporušených půdních vzorků (Obr. 9). Odběr Kopeckého válečků byl proveden vždy z čela dané sondy. V každé sondě byly odebrány Kopeckého válečky v deseti centimetrových hloubkových intervalech od 0 do 80 cm, v každém hloubkovém intervalu ve třech opakováních. Kopeckého válečky zároveň sloužily k určení aktuální vlhkosti. Po stanovení půdní vlhkosti byly vzorky vysušeny v horkovzdušné sušárně 3 dny při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti pro určení objemové hmotnosti půdy.

4.2 Charakteristika zájmových území

4.2.1 Lokalita 1: hnědozem

Pro porovnání různých typů zpracování půdy na půdním typu hnědozem byly vybrány pozemky v obci Lány. Pozemky poskytl Školní podnik Lány České zemědělské univerzity v Praze. Pozemky jednotlivých typů kultivace byly v bezprostřední blízkosti, proto vzdálenost vzorkovacích stanovišť nebyla větší než 50 m.

Minimalizační technologie je ve ŠP lány uplatňována pouze k ozimým plodinám, vzhledem k osevnímu postupu byla na daném pozemku uplatňována minimalizační technologie pouze 2 roky zpět. Orebná technologie je využívána jako kultivace k plodinám jarním, daný pozemek byl orán v loňském roce po ozimé plodině, a tedy po minimalizační technologii.

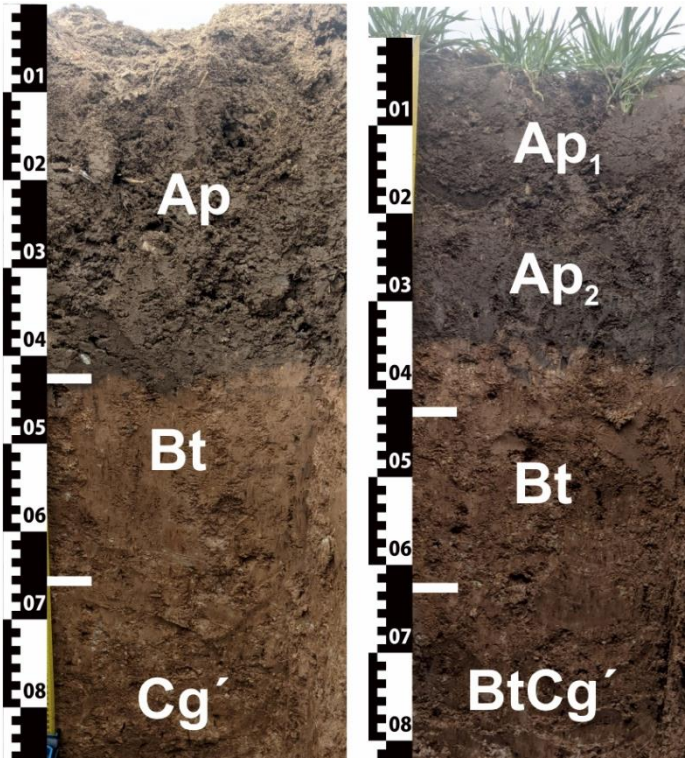
Tato lokalita se nachází ve středočeském kraji okres Kladno, katastrální území Lány, půdní blok 5301-0, díl půdního bloku 5301/2. Tento díl půdního bloku je rozdělen na 2 části. Nadmořská výška 421 m. Lokalizace měření spadá dle geologického řazení do kladensko-rakovnické pánve, vznik tohoto geologického celku je řazen do období Paleozoika. Soustava je dále řazena k předplatformní jednotce českého masivu a podsoustavy svrchní Karbon a Perm. Na území se vyskytují horniny z období vzniku celého celku, jako jsou červenohnědé prachovce a jílovce, pískovce, slepence (Česká geologická služba: Geovědní mapy 2023). Lokálně jsou překryty sprašovými hlínami.

Umístění kopaných sond a vpichů penetrometrem byla zvolena tak, aby nedocházelo k ovlivnění měření efektem vyššího zhutnění z důvodů otáčející se techniky, či přejezdy kolejových meziřádků (Obr. 10).

Obrázek 10. Znázornění jednotlivých míst vpichů menetrometrem (žluté body) a místo kopané sondy (červený terč) na bezorebné technologii (B) a technologii orebné (O).

Z pedologického hlediska se jedná o hnědozem modální slabě oglejenou na sprašové hlíně (Obr. 11) spadající do čtvrtého klimatického regionu (suchý a mírně teplý). Charakteristika tohoto regionu je dána ročním úhrnem srážek 450–550 mm. K dalším kritériím řazení patří průměrná roční teplota, která činí 7-8,5 °C se sumou teplot nad 10 °C činící rozsah 2400–2600 (VÚMOP 2023).

Půdotvorný substrát a celkový popis vzorkované části pozemku je vždy uveden u vzorkovacích míst s popisem půdní sondy v kapitole Výsledky.



Obrázek 11. Zobrazující půdní profil hnědozemě na oraném pozemku (vlevo) a pozemku s bezorebnou technologií (vpravo).

4.2.2 Lokalita 2: fluvizem

Dalším z půdních typů vybraných k porovnání míry zhutnění na plochách využívající dlouhodobě minimalizační zpracování půdy a zpracování půdy využívající orbu byla fluvizem v katastrálním území Dolany u Prahy, okres Mělník, Středočeský kraj. Oslovenými zemědělci byli doc. Ing. Vít Penížek Ph.D. využívající ke zpracování půdy orebný systém. Dalším osloveným zemědělcem byl pan Josef Rous hospodařící na půdách dlouhodobě bezorebně. Pozemek, na kterém je více než 5 let uplatňována orebná technologie, je identifikovatelný číslem půdního bloku 5801-0 a dílu půdního bloku 5801/5. Na pozemku s číslem půdního bloku 5801-1 a číslem dílu půdního bloku 5801/4 je využívána technologie minimalizační.

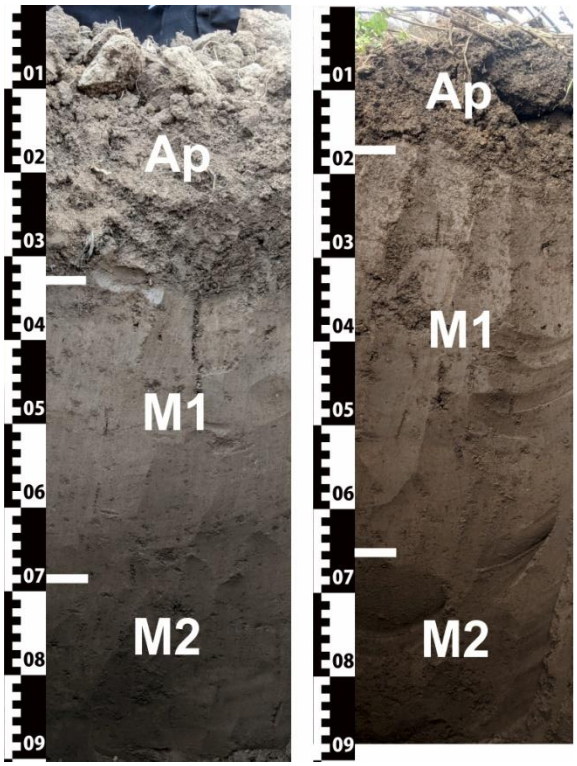
Umístění kopaných sond a vpichů penetrometrem byla i zde zvolena tak, aby nedocházelo k ovlivnění měření efektem vyššího zhutnění z důvodů otáčející se techniky, či přejezdy kolejových meziřádků (Obr. 12).

Obrázek 12. Znázornění jednotlivých míst vpichů menetrometrem (žluté body) a místo kopané sondy (červený terč) na bezorebné technologii (B) a technologii orebné (O).

Nadmořská výška obou zmíněných pozemků je 175 m. Geologické podloží tvoří holocénní říční sedimenty (Česká geologická služba 2023).

Jedná se o půdní typ fluvizem modální (Obr. 13), jež je řazen dle půdně-klimatických charakteristik BPEJ do prvního klimatického regionu – suchý a teplý. Charakteristika tohoto regionu je dána ročním úhrnem srážek pod 500 mm. K dalším kritériím řazení patří průměrná roční teplota, která činí 8-9 °C se sumou teplot nad 10 °C činící rozsah 2600–2800 (VÚMOP 2023).

Půdotvorný substrát a celkový popis vzorkované části pozemku je vždy uveden u vzorkovacích míst s popisem půdní sondy v kapitole Výsledky.



Obrázek 13. Půdní profil fluvizemě na oraném pozemku (vlevo) a pozemku s bezorebnou technologií (vpravo).

4.2.3 Lokalita 3: černozem

Pro porovnání různých typů zpracování půdy na půdním typu černozem za účelem porovnání míry pedokompakce byly vybrány pozemky v katastru obcí Libochovice a Křesín, okres Litoměřice, Ústecký kraj. Pozemek s bezorebnou kultivací, která je na pozemku dlouhodobě využívána (více než 10 let) poskytl soukromý zemědělec Miroslav Panský. Díl půdního bloku číslo 8202/6 ležící v půdním bloku číslo 8201-0 se nachází v katastru Křesín s nadmořskou výškou 211 m. Díl půdního bloku číslo 6204/1 ležící v půdním bloku 6204-0 nacházející se v katastru Libochovice s nadmořskou výškou 199 m poskytla paní Lenka Kubešová, na tomto pozemku se hospodaří několik desítek let orebným systémem. Pozemky jednotlivých typů kultivace byly vzdáleny cca 1 000 m (Obr. 14).

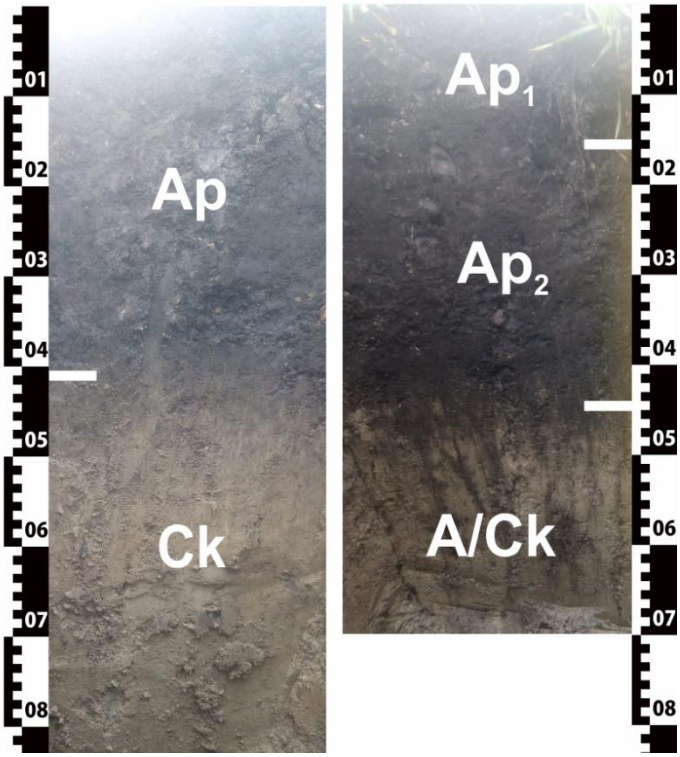
I zde bylo umístění kopaných sond a vpichů penetrometrem zvoleno tak, aby nedocházelo k ovlivnění měření efektem vyššího zhutnění z důvodů otáčející se techniky, či přejezdy kolejových meziřádků (Obr. 14).

Obrázek 14. Znázornění jednotlivých míst vpichů penetrometrem (žluté body) a místo kopané sondy (červený terč) na bezorebné technologii (B) a technologii orebné (O) se znázorněním jednotlivých pozemků v pravém horním rohu.

Lokalizace měření spadá dle geologického řazení vzniku oblasti do hercynského systému České tabule, z oblastní geologie podcelku Házmburské tabule. Z geologické aktivity území vyplívá, že charakter území je rovinatý až mírně zvlněný. Pozemky, na nichž probíhalo měření jsou z geologického hlediska totožné, na obou lokalitách se uplatňují slíny, jež jsou druhohorní sedimenty České křídové tabule. Na obou lokalitách se uplatňuje ve svrchní části půdního profilu také příměs spraše (Česká geologická služba 2023).

Z pedologického hlediska se jedná o černozem pelická na slínu (Obr. 15) spadající do prvního klimatického regionu suchý a teplý. Charakteristika tohoto regionu je dána ročním úhrnem srážek pod 500 mm. K dalším kritériím řazení patří průměrná roční teplota, která činí 8-9 °C se sumou teplot nad 10 °C činící rozsah 2600–2800 (VÚMOP 2023).

Půdotvorný substrát a celkový popis vzorkované části pozemku je vždy uveden u vzorkovacích míst s popisem půdní sondy v kapitole Výsledky.

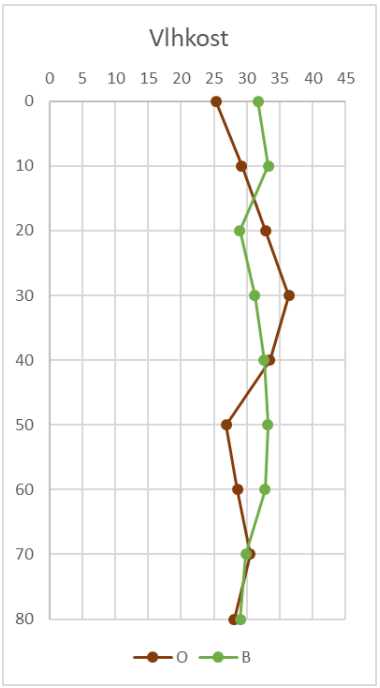


Obrázek 15. Půdní profil černozemě na oraném pozemku (vlevo) a pozemku s bezorebnou technologií (vpravo).

5 Výsledky

5.1 Lokalita 1: hnědozemě

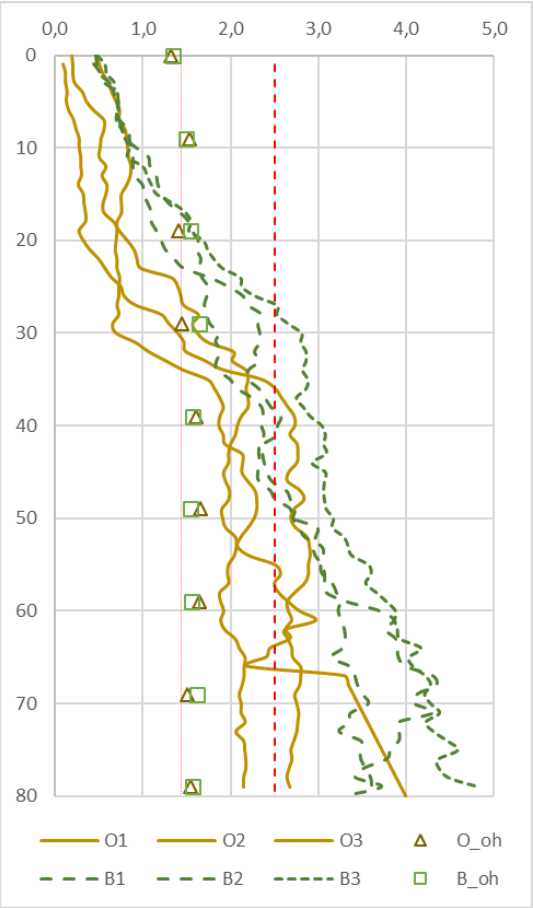
V rámci lokality hnědozem byl popsaným půdním typem hnědozem modální slabě oglejená na sprašové hlíně s níže ležícím přechodem do permokarbonských sedimentů. Na obou typech využití byl půdní profil téměř totožný. Pod kultivovaným horizontem (Ap) se nacházel luvický horizont a níže půdotvorný substrát (Obr. 11). Z morfologického hlediska nebyly v profilu nelezeny žádné výrazné znaky utužení půd (jako je polyedrická, deskovitá, či prismatická struktura). Z hlediska zrnitosti celý profil spadá do půd hlinitých až jílovitohlinitých.



Graf 1. Průběh vlhkosti v půdním profilu pod orebným (O) a bezorebným (B) zpracováním půdy

Z hlediska vlhkosti půdy vykazuje orebná technologie nejnižší hodnotu v povrchové vrstvě (25 %), následně prudce stoupá až 33,5 % v hloubce 30 cm. Následný výrazný pokles je zaznamenán v hloubkách 40 – 50 cm. Od 50 do 80 cm není zaznamenám výrazný výkyv hodnot. Maximální hodnota v hloubce 30 cm může být vysvětlena maximálním sycením této části profilu v důsledku kapilárního zdvihu k dolní hranici orby, či omezeným zasakováním vody pod tuto část profilu. Varianta obdělávaná minimalizační technologií má více ustálený průběh a v celém profilu se pohybuje v úzkém rozpětí hodnot (29-33 %).

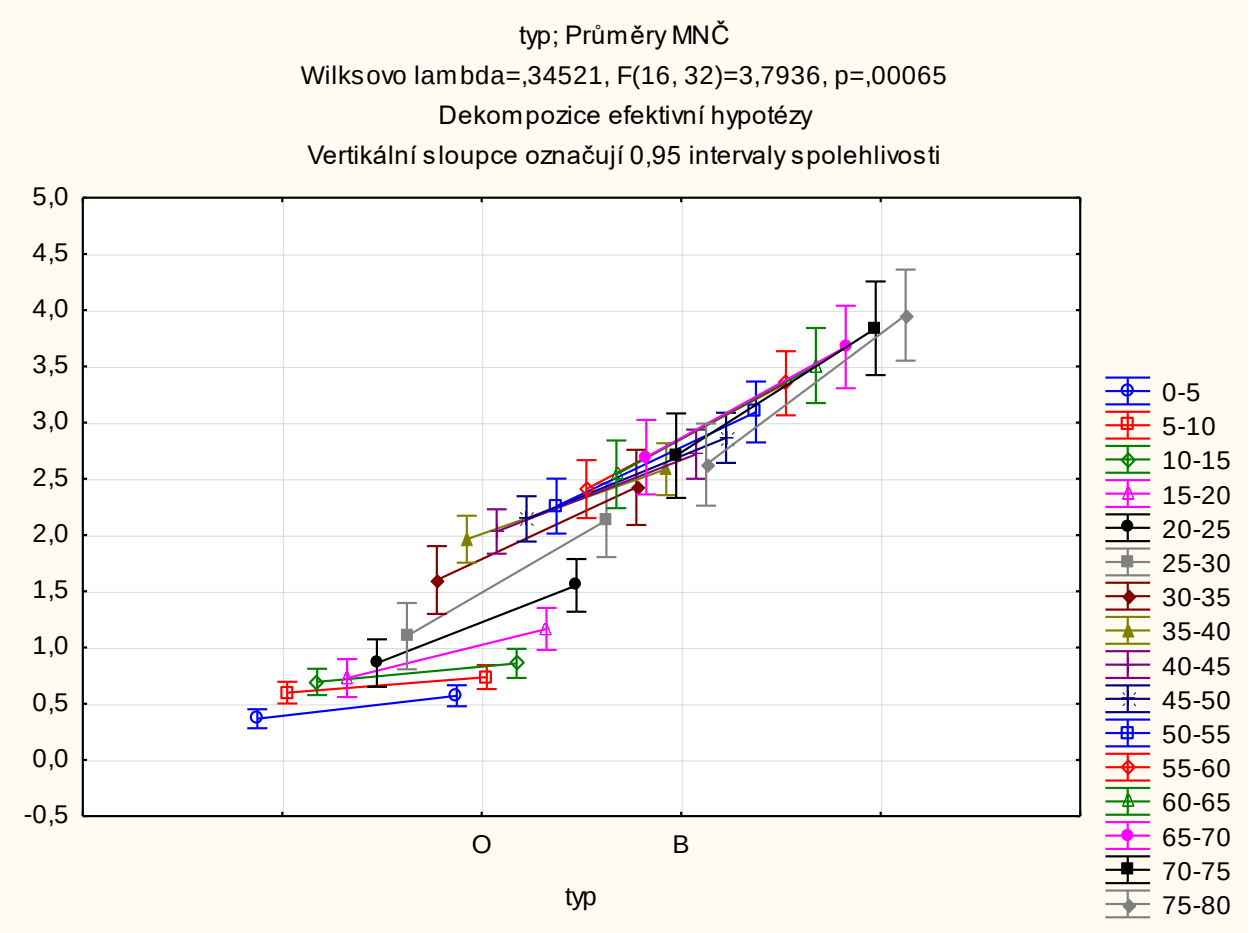
Celkově je průměrná vlhkost neznatelně vyšší u bezorebné technologie (31,4 %) oproti orebné (30,1 %).



Graf 2. Průběh objemové hmotnosti půd (g.cm^{-3}) u orebné (O_oh) a bezorebné (B_oh) technologie a penetračního odporu u jednotlivých sad měření na orné (O1, O2, O3) a bezorebně zpracované (B1, B2, B3) půdě. Tečkovaná čára indikuje limitní hodnotu utužení určeného na základě objemové hmotnosti, čerchovaná čára pak limit na základě penetračního odporu.

Hodnoty objemové hmotnosti v hloubce 0 – 10 cm vykazují stejnou intenzitu prokypření jak u technologie orané, tak minimalizační. To může být způsobeno efektem přirozeného selhávání půdy v důsledku povětrnostních podmínek. Následný pokles objemové hmotnosti je zaznamenám v intervalu 20 - 30 cm u technologie orebné oproti minimalizační, to je způsobeno právě odlišnými systémy kultivace. Půda pod orebným systémem se nachází na samé hranici limitu braného jako utužení půd (1,43 g.cm^{-3}; Šarapatka 2002). Níže pak tento limit plně překračuje, kdy se hodnoty pohybují v intervalu 1,5-1,6 g.cm^{-3}. U bezorebné technologie dochází k překročení limitu již od hloubky 10 cm a drží se až do 80 cm.

Penetrační odpor roste u obou variant do hloubky 40-50 cm. V případě orané varianty je nízký po hloubku orby (cca 25 cm) a následuje rychlý vzestup na maximum mezi 40-50 cm, přičemž od hloubky 35 cm je překročen limit utužení. Pod něj se půda vrací až v hloubce cca 65 cm. U bezorebné technologie je růst PO, který je o něco vyšší, téměř lineární až do hloubky cca 30 cm. Odtud se růst zpomaluje, nicméně trvá až do hloubky 80 cm. Hloubka překročení meze utužení leží výš než u orané varianty, tj. v hloubce cca 27 cm a pod limit utužení již neklesá.



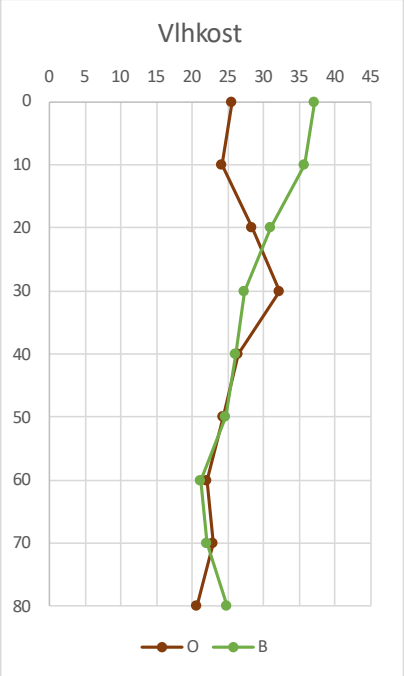
Graf 3. Porovnání průměrných hodnot PA (v MPa) půd u orebné (O) a bezorebné technologie (B) v intervalech po 5 cm pomocí testu ANOVA.

Graf 3 ukazuje zhodnocení statisticky významných rozdílů mezi hodnotami PO u daných dvou sledovaných typů zpracovávání půdy. Hodnoty byly vyhodnoceny pomocí testu ANOVA pro hloubkové intervaly 5 cm (Tabulka 1 v přílohách). Statisticky významné rozdíly (hl. významnosti p = 0,05) PO mezi technologiemi obdělávání (Příloha 1) byly identifikovány v celém půdním profilu, mimo hloubkový interval 5-10 a 10-15 cm (nicméně i zde se hranice průkaznosti velmi blížila hladině 0,05 neboť dosahovala 0,058 respektive 0,063). V celé hloubce je vyšší PO u orné technologie.

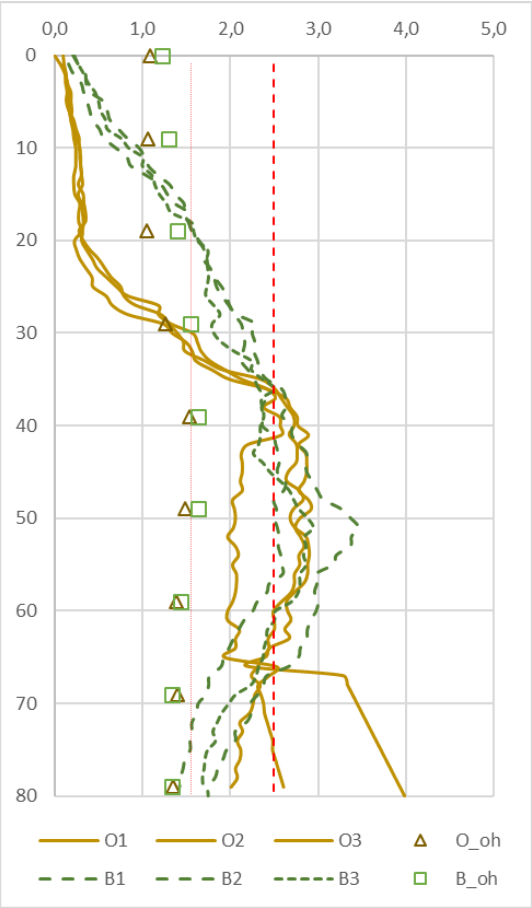
5.2 Lokalita 2: fluvizem

V rámci lokality fluvizem byl popsaným půdním typem fluvizem modální na nivním sedimentu. Na obou typech využití byl půdní profil téměř totožný. Pod kultivovaným horizontem (Ap) se nacházel nivní sediment (Obr, 13). Z morfologického hlediska nebyly v profilu nelezeny žádné znaky utužení půd (jako je polyedrická, deskovitá, či prismatická struktura). Z hlediska zrnitosti celý profil spadá do půd písčitohlinitých.

Z grafu 4 je zřejmé že půda pod orebným systémem vykazuje průměrnou vlhkost 25,2 %. Od 0 do 30 cm dochází k postupnému nárůstu z 25 až na 32 %, což může být způsobeno znemožněním kapilární vzlínavosti vody k povrchu pávě v důsledku orby, kdy se voda k povrchu může dostávat pouze omezeně. Níže v půdním profilu je vlhkost ustálena na konstantní hodnotě okolo 23 %. Naopak u bezorebné technologie vlhkost půdy v intervalu 0-30 cm klesá (z 37 na 27 %) - V hloubkovém intervalu 40 – 80 cm dochází k narovnání trendu a obsah vody je u obou technologií téměř totožný. Celkově je průměrná vlhkost mírně vyšší u bezorebné technologie (27,8 %) oproti orebné (25,2 %).



Graf 4. Průběh vlhkosti v půdním profilu pod orebným (O) a bezorebným (B) zpracováním půdy

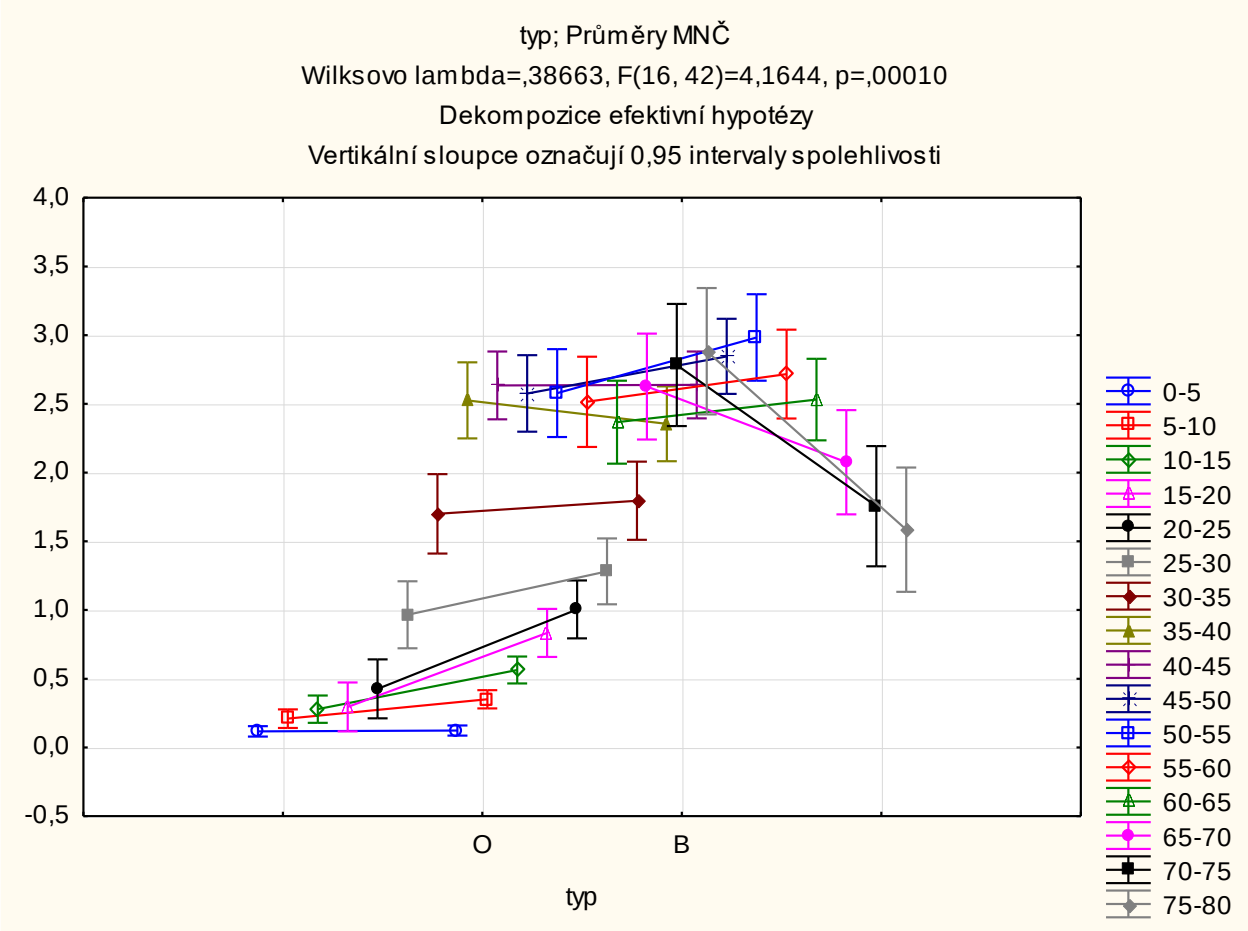


Graf 5. Průběh objemové hmotnosti půd (g.cm^{-3}) u orebné (O_oh) a bezorebné (B_oh) technologie a penetračního odporu u jednotlivých sad měření na orné (O1, O2, O3) a bezorebně zpracované (B1, B2, B3) půdě. Tečkovaná čára indikuje limitní hodnotu utužení určeného na základě objemové hmotnosti, čerchovaná čára pak limit na základě penetračního odporu (dle Lhotský 2000).

Objemová hmotnost vykazuje v rámci orané varianty nejnižší hodnoty v intervalu od 0 – 20 cm, což odpovídá nakypřené vrstvě orbou. Následně dochází k nárůstu na maximum – v hloubce 40-50 cm (hodnoty okolo 1,5 g.cm^{-3}) a níže v profilu k částečnému poklesu. V hloubce 40 cm je hraničně překročen limit utužení.

Celkově vyšší hodnoty vykazuje technologie bezorebná, kde není tak výrazným způsobem znát zásah kypření a nárůst je téměř lineárně stoupající do hloubky 40-50 cm. Následně v hloubkových intervalech 60 – 80 cm obě varianty dosahují stejných hodnot, kde se tato objemová hmotnost zdá být přirozená z půdně-genetických vlastností daného stanoviště. Překročení limitních hodnot u bezorebné technologie je dosaženo v hloubkovém intervalu 30-50 cm.

Penetrační odpor roste u obou variant do hloubky 40-50 cm. V případě orané varianty je nízký po hloubku orby (cca 25 cm) a následuje rychlý vzestup na maximum mezi 40-50 cm, přičemž od hloubky 35 cm je překročen limit utužení. Pod něj se půda vrací až v hloubce cca 60-70 cm. U bezorebné technologie je růst PO téměř lineární a to do hloubky cca 50 cm. Odtud je trend opačný. Hloubka překročení meze utužení je prakticky identická jako u orané varianty.

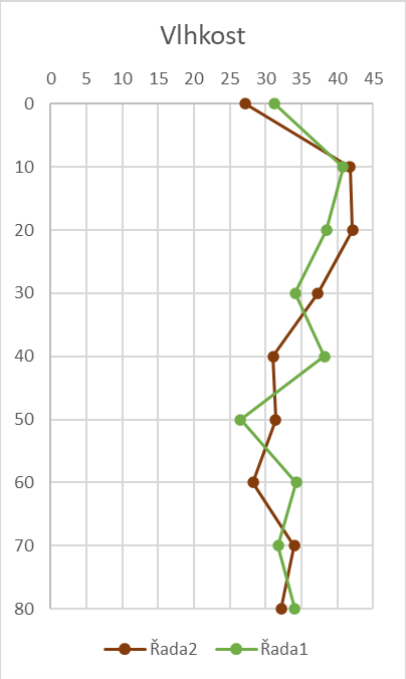


Graf 6. Porovnání průměrných hodnot PA (v MPa) půd u orebné (O) a bezorebné technologie (B) v intervalech po 5 cm pomocí testu ANOVA.

Graf 6 ukazuje zhodnocení statisticky významných rozdílů mezi hodnotami PO u daných dvou sledovaných typů zpracovávání půdy. Hodnoty byly vyhodnoceny pomocí testu ANOVA (hladina významnosti 0,05) pro hloubkové intervaly 5 cm (Tabulka 2 v přílohách). Statisticky významné rozdíly PO mezi technologiemi obdělávání byly identifikovány v hloubkových intervalech 5-30 a dále 65-80 cm. V intervalu 0-30 je vyšší PO u orné, naopak v intervalu 65-80 cm u bezorebné technologie. V ostatních případech nebyly prokázaly statistický významné rozdíly hodnot PO pro dané technologie.

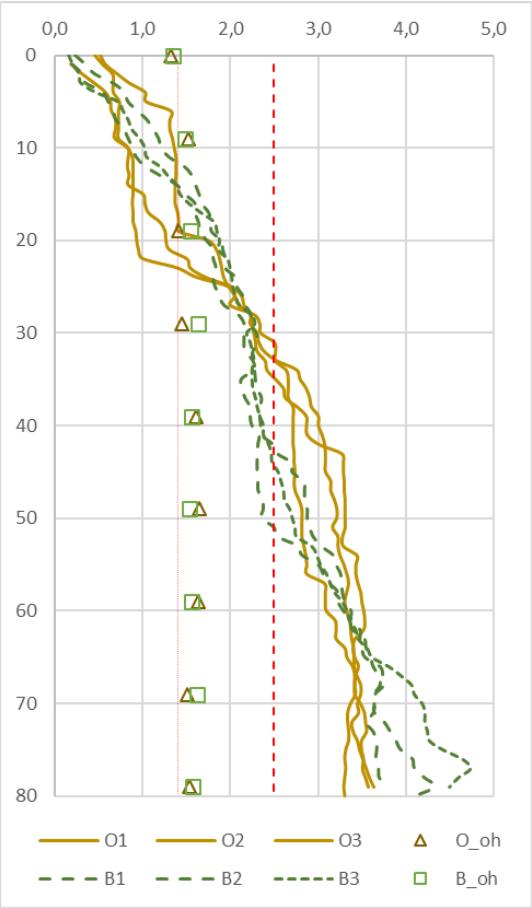
5.3 Lokalita 3: černozem

V rámci lokality černozem byl popsaným půdním typem černozem pelická na slínu. Na obou typech využití byl půdní profil značně podobný. Pod kultivovaným horizontem (Ap) se nacházel půdotvorný substrát tvořený rozpadem slínu (Obr, 15). U pozemku s bezorebnou technologií byly známky výrazné biologické aktivity mesoedafonu projevující se značným promísením materiálu z A horizontu do půdotvorného substrátu. Z morfologického hlediska nebyly v profilu nelezeny žádné výrazné znaky utužení půd (jako je polyedrická, deskovitá, či prismatická struktura). Z hlediska zrnitosti celý profil spadá do půd jílovitohlinitých až jílovitých.



Graf 7. Průběh vlhkosti v půdním profilu pod orebným (O) a bezorebným (B) zpracováním půdy

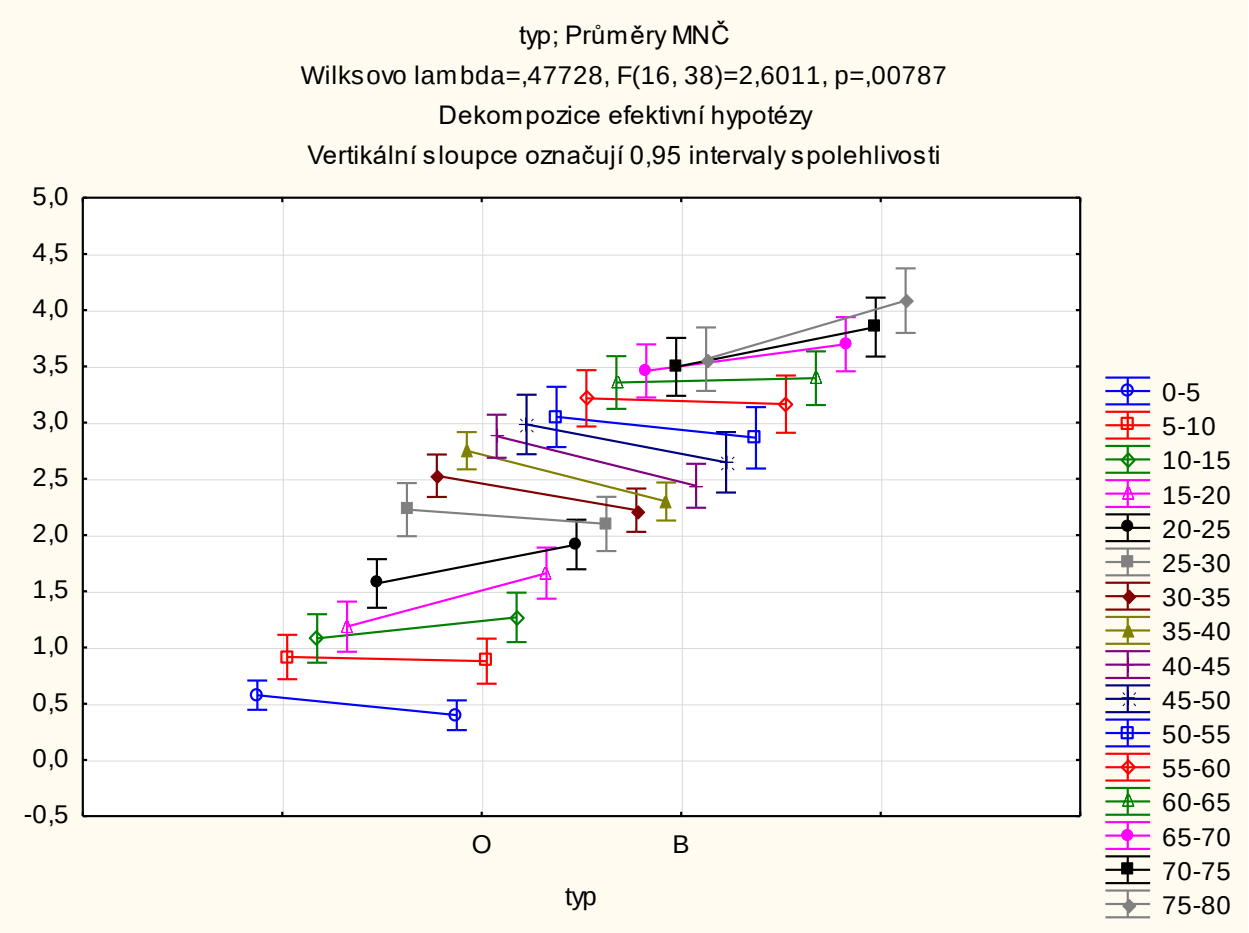
Vlhkostní režim u daných dvou typů zpracování nevykazuje prakticky žádné rozdíly. Z trendu je patrné osychání nejsvrchnější části půdy. Zvýšené hodnoty v intervalu 10-20(30) cm ukazují na větší nasycení půdy ze srážek. Níže je již vlhkost konstantní. Celkově je, stejně jako u předchozích dvou lokalit, průměrná vlhkost vyšší (i když zanedbatelně) u bezorebné technologie (34,4 %) oproti orebné (33,9 %).



Graf 8. Průběh objemové hmotnosti půd (g.cm^{-3}) u orebné (O_oh) a bezorebné (B_oh) technologie a penetračního odporu u jednotlivých sad měření na orné (O1, O2, O3) a bezorebně zpracované (B1, B2, B3) půdě. Tečkovaná čára indikuje limitní hodnotu utužení určeného na základě objemové hmotnosti, čerchovaná čára pak limit na základě penetračního odporu (dle Lhotský 2000).

Objemová hmotnost u rozdílných systémů zpracování půdy v černozemní oblasti vykazuje totožný trend u jednotlivých variant obhospodařování. V celé mocnosti profilu dochází k postupnému nárůstu objemové hmotnosti z 0,84 na 1,40 u bezorebné technologie respektive z 1,14 na 1,65 u orebné technologie. U orebného systému je v celém profilu objemová hmotnost vyšší (1,48 g.cm^{-3}) než u minimalizační technologie (1,25 g.cm^{-3}). Překročení mezního limitu pro určení utužení těžkých jílovitých půd (1,35 g.cm^{-3}) dochází u orebné technologie již od 20 cm, u bezorebné až od hloubky 50 cm.

V případě orané varianty je penetrační odpor velmi nízký po hloubku orby (opět cca 25 cm) a po něm následuje rychlý vzestup na maximum mezi 40-50 cm, limit utužení je však překročen u orebné technologie v cca 32cm hloubky. U bezorebné technologie je růst PO do hloubky 10 cm, následuje stagnace a opětovný růst níže 25 cm, který pozvolně pokračuje, mez utužení překračuje ve 42 cm a od této hloubky stále lineárně stoupá až do 80 cm, kde nabývá maxima.



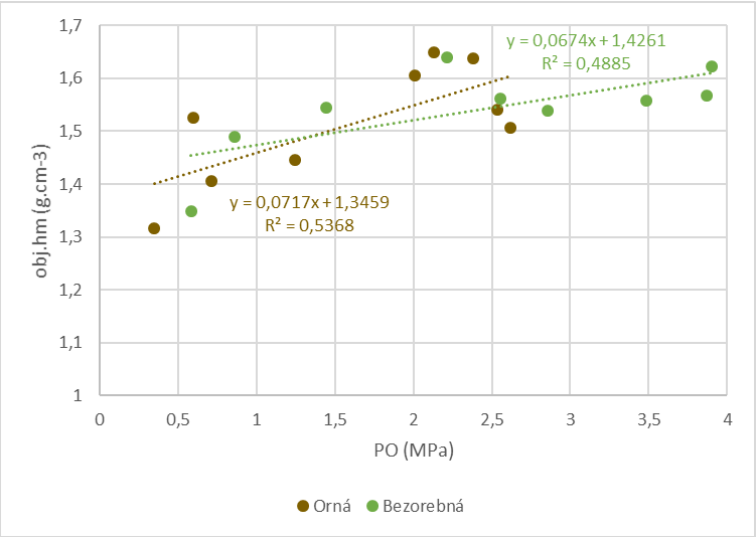
Graf 9. Porovnání průměrných hodnot PA (v MPa) půd u orebné (O) a bezorebné technologie (B) v intervalech po 5 cm pomocí testu ANOVA.

Graf 9 ukazuje zhodnocení statisticky významných rozdílů mezi hodnotami PO u daných dvou sledovaných typů zpracovávání půdy. Hodnoty byly vyhodnoceny pomocí testu ANOVA (hladina významnosti 0,05) pro hloubkové intervaly 5 cm (Tabulka 3 v přílohách). Statisticky významné rozdíly PO mezi technologiemi obdělávání byly identifikovány pouze v hloubkových intervalech 15-25, 30-45 a 75-80 cm.

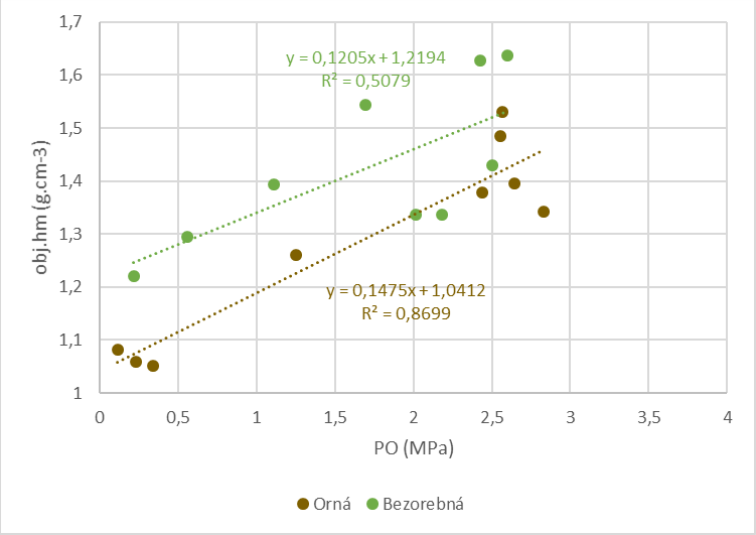
5.4 Vztah měřených ukazatelů utužení

Jak bylo uvedeno v literární rešerši a bylo prezentováno v předchozích výsledcích, existuje často souvislost různých ukazatelů utužení půd. Tato závislost však nemusí být vždy zřejmá, neboť měřené ukazatele ovlivňuje celá řada půdních vlastností a jsou na ně různě citlivé.

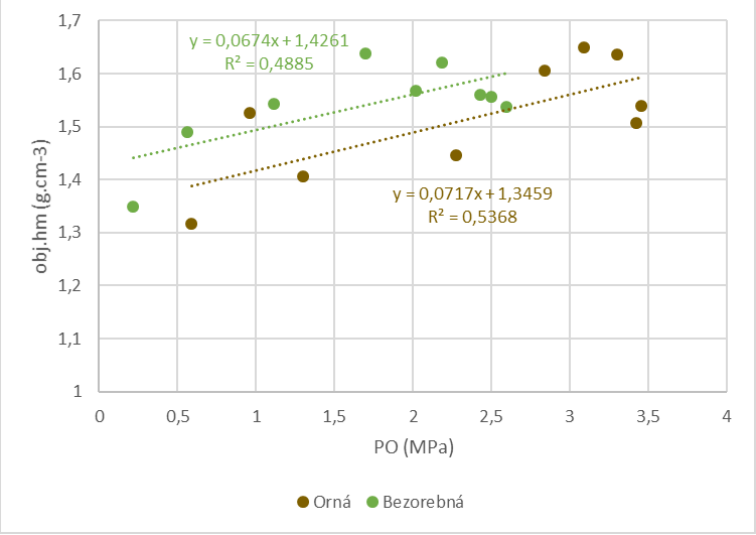
Grafy 10, 11 a 12 ukazují korelaci mezi objemovou hmotností a penetrometrickým odporem pro jednotlivé půdní typy a způsoby zpracování půd. Statisticky průkazná korelace byla nalezena ve všech případech (hladina spolehlivosti p = 0,05), pouze u orebného zpracování fluvizemě na hladině významnosti p = 0,01; tabulka 4).



Graf 10. Vztah objemové hmotnosti a penetrometrického odporu na hnědozemi pro orný a bezorebný typ zpracování půdy.



Graf 11. Vztah objemové hmotnosti a penetrometrického odporu na fluvizemi pro orný a bezorebný typ zpracování půdy



Graf 12. Vztah objemové hmotnosti a penetrometrického odporu na černozemi pro orný a bezorebný typ zpracování půdy

U všech lokalit a typů zpracování půd platí, že existuje kladná korelace mezi sledovanými ukazateli zhutnění. Ze sklonu korelační křivky a R^2 že daná korelace není příliš silná a vztah mezi objemovou hmotností a penetrometrickým odporem sice existuje, ale není zcela jednoznačný a není možné ho jasně interpretovat. Nejtěsnější korelace u orebně zpracovávané fluvizemě by mohla naznačovat, že vliv má na výslednou korelaci vlhkost půdy, neboť u této varianty je vlhkost půdy nejnižší (25,2 %), v rámci všech variant (27,8 – 34,4 %). Statisticky průkazná souvztažnost však nebyla mezi penetrometrickým odporem a vlhkostí půdy prokázána (kromě jedné - bezorebně zpracovávané fluvizemě) u žádné z variant (Tab. 4 a 5.)

Tabulka 4. Korelace mezi penetračním odporem (po) a objemovou hmotností (oh) u jednotlivých půdních typů (HM – hnědozem, FL – fluvizem a CM –černozem a typů zpracování půd (O – orná, B- bezorebné).

Korelace (korelace)
N=9 (Celé případy vynechány u ChD)

Proměnná	HM_O_oh	HM_B_oh	FL_O_oh	FL_B_oh	CM_O_oh	CM_B_oh
HM_O_po	0,726*					
HM_B_po		0,698*				
FL_O_po			0,933**			
FL_B_po				0,713*		
CM_O_po					0,733*	
CM_B_po						0,730*

**) Označ. korelace jsou významné na hlad. p < ,01000
*) Označ. korelace jsou významné na hlad. p < ,05000

Tabulka 5. Korelace mezi penetračním odporem (po) a vlhkostí půdy (V) u jednotlivých půdních typů (HM – hnědozem, FL – fluvizem a CM –černozem a typů zpracování půd (O – orná, B- bezorebné).

Korelace (korelace)
N=9 (Celé případy vynechány u ChD)

Proměnná	HM_O_V	HM_B_V	FL_O_V	FL_B_V	CM_O_V	CM_B_V
HM_O_po	-0,035					
HM_B_po		-0,253				
FL_O_po			-0,479			
FL_B_po				-0,949**		
CM_O_po					-0,377	
CM_B_po						-0,317

**) Označ. korelace jsou významné na hlad. p < ,01000
*) Označ. korelace jsou významné na hlad. p < ,05000

6 Diskuze

Trendy indikátorů utužení pod různými typy zpracování půd

V rámci hnědozemní lokality nebyly zjištěny výrazné odlišnosti v ukazatelích utuženosti půd mezi sledovanými technologiemi zpracování půdy. Neprokázal se trend, který popisují mnozí autoři, kteří uvádí lepší fyzikální stav půdy (nižší utužení) pod minimalizační technologií oproti orbě (Bogunovic & Kisić 2017, Ehlers et al. 2000, Karunatilake et al. 2000). Důvody nenalezení obdobného trendu jako u uváděných autorů může být více.

Přestože lokalita s hnědozemí vykazuje v rámci všech tří půdních celkově nejvyšší utužení, je otázkou, zda je toto utužení technogenního charakteru. Pro technogenní utužení je typické, že ukazatele utužení nabývají maximálních hodnot v podorničí, tj. v hloubce cca 30 - 50 cm a níže opět klesají. Na zájmové lokalitě nebyl tento trend ani u jedné z variant zachycen. Dochází k nárůstu nad mez utužení již relativně mělko, ale níže se tento trend nevrací (v případě orebného zpracování) respektive dochází k dalšímu nárůstu (v případě penetrometrického odporu u bezorebné technologie).

U fluvizemě je trend průběhu ukazatelů utužení odlišný. Jak u varianty s orebným zpracováním půdy, tak u bezorebné technologie, dochází k postupnému nárůstu jako objemové hmotnosti, tak penetrometrického odporu až do podorničí do hloubky 50 cm a následně k poklesu těchto hodnot směrem k závěru půdního profilu. To odkazuje na vliv utužení zemědělskou technikou. Obdobný výsledek ve své práci prezentují i Simsek et al. (2019). Zda se však jedná o obvyklý trend u fluvizemí nelze určit, protože práce studující utužení u fluvizemí prakticky neexistují. Výjimkou je např. práce Kuncoro et al. (2014), kteří nezjistili utužení u fluvizemě ani u jedné z technologií. Nicméně platí, že v hloubkovém intervalu (40 - 60 cm), který překračuje mez utužení půdy, neexistuje mezi hodnotami obou indikátorů utužení statisticky průkazný rozdíl (Graf 7, příloha 2) a z výsledků tedy nevyplývá, že by některá z technologií byla vhodnější.

Indikátory utužení u černozemí měly v celém hloubkovém profilu vzestupný trend bez zřetelného nárůstu utužení v podorničí. Přesto při porovnání obou technologií byly nalezeny statisticky průkazně odlišné hodnoty penetrometrického odporu mezi oběma variantami, kdy bezorebná měla nižší hodnoty než orebná. U objemové hmotnosti však takové rozdíly neexistují. I tak je možné usuzovat na to, že bezorebná technologie, má o něco menší vliv na utužení, než orebná. Výsledky se tak shodují pracemi mnoha autorů, kteří zkoumali vliv technologií kultivace na černozemě a nalezli jen minimální (Micucci & Taboada 2006), nebo nejednoznačné rozdíly hodnot indikátorů utužení (Badalíkové et al. 2009; Grantr & Lafond 1993; Hilla & Cruse 1985) u tohoto půdního typu. Obecně lze tento fakt vysvětlit tak, že černozemě mají díky svým chemicko-fyzikálním vlastnostem a výskytem v sušších regionech nejlepší předpoklady být odolné vůči utužení a tak u nich použitá technologie zpracování půdy nemá výraznější vliv.

Stejně jako u hnědozemní lokality existuje trend kontinuálního nárůstu objemové hmotnosti a především penetračního odporu až do hloubky, což může opět souviset i s přirozeným utužením s ohledem na jílovitý charakter půdy, respektive půdotvorného substrátu tvořeného slínem.

Vztah indikátorů utužení

Jako ukazatele utužení byly v práci použity dvě základní vlastnosti, které jsou běžně používané – objemová hmotnost a penetrometrický odpor. Pro vyhodnocení utužení je u obou těchto veličin nutné určit limit, který bude brán jako hranice utužení. Ve vědecké literatuře existuje relativně široký rozsah těchto hodnot. V případě objemové hmotnosti je situace jednodušší, neboť hranice zhutnění u OH jsou závislé především na půdní zrnitosti (Lhotský 2000), kdežto PO závisí na vlhkosti půdy (Alvarez et al. 2009, Constantini 1997, Lhotský 2000, Javůrek a Vach 2008), která je značně proměnlivá. V rámci této práce však nebyla tato souvztažnost prokázána (Tabulka 5). Objemová hmotnost je stabilnějším ukazatelem. U penetrometrického odporu je proto důležité dělat měření v období, kdy je půda co nejrovnoměrněji provlhčená, což bylo v rámci této páce dosaženo, a ideálně při stejném vlhkostním stavu u všech lokalit, což již zcela dodrženo nebylo a je prakticky i nereálné. Nicméně se v rámci práce se prokázalo, že existuje mezi oběma ukazateli (OH a PO) statisticky průkazná závislost (Tabulka 4), tak jak uvádějí i jiní autoři (např. Van Orsouw et al. 2022).

Porovnání utužení mezi jednotlivými půdními typy

Z hlediska porovnání utuženosti mezi jednotlivými půdními typy je patrný rozdíl mezi fluvizemí na jedné straně a hnědozemí a černozemí na straně druhé (Tab. 6). Limit utužení u fluvizemě byl překonán jen v menší části půdního profilu (podorničí). Vliv technologie zpracování není zřejmý každý z indikátorů ukazuje opačný výsledek.

Tab 6. Překročení meze utuženo na základě objemové hmotnosti (OH) a penetrometrického odporu (PO) a různých technologií zpracování (O – orná a B- bezorebná).

	HNĚDOZEM (HM)				FLUVIZEM (FL)				ČERNOZEM (CM)			
Hloubka (cm)	O_OH	B_OH	O_PO	B_PO	O_OH	B_OH	O_PO	B_PO	O_OH	B_OH	O_PO	B_PO
	($g.cm^{-3}$)		(MPa)		($g.cm^{-3}$)		(MPa)		($g.cm^{-3}$)		(MPa)	
0	1,32	1,35	0,35	0,58	1,08	1,22	0,11	0,22	1,32	1,35	0,59	0,46
10	1,53	1,49	0,60	0,86	1,06	1,29	0,24	0,56	1,53	1,49	0,96	1,04
20	1,41	1,54	0,71	1,44	1,05	1,39	0,34	1,11	1,41	1,54	1,30	1,63
30	1,45	1,64	1,24	2,22	1,26	1,54	1,25	1,70	1,45	1,64	2,27	2,22
40	1,61	1,56	2,01	2,55	1,53	1,63	2,57	2,43	1,61	1,56	2,84	2,52
50	1,65	1,54	2,13	2,86	1,49	1,64	2,56	2,60	1,65	1,54	3,09	2,88
60	1,64	1,56	2,38	3,48	1,38	1,43	2,44	2,50	1,64	1,56	3,30	3,30
70	1,51	1,62	2,62	3,90	1,40	1,34	2,64	2,19	1,51	1,62	3,42	3,70
80	1,54	1,57	2,53	3,87	1,34	1,34	2,83	2,02	1,54	1,57	3,46	3,91
	limit utužení OH = 1,435 g.cm-3				limit utužení OH = 1,55 g.cm-3				limit utužení OH = 1,40 g.cm-3			
	limit utužení PO = 2,5 Mpa				limit utužení PO = 2,5 Mpa				limit utužení PO = 2,5 Mpa			

Překvapivým výsledkem, je prakticky totožný průběh a míra a hloubka utužení u černozemě a hnědozemě. Obecným předpokladem je, že u černozemí je míra utužení menší, a naopak se dá očekávat vyšší utužení u hnědozemí, které mají méně vyvinutou půdní strukturu (Flynn et al. 2020), jsou méně humózní a náchylné k rozplavování (Lhotský 2000; Ohu et al. 1994) a to především ve svrchní vrstvě. To tato páce nepotvrdila.

7 Závěr

- V rámci práce nebyly zjištěny výrazné odlišnosti v ukazatelích utuženosti půd mezi sledovanými technologiemi zpracování půdy a to u všech třech sledovaných půdních typů. Neprokázal se trend, který popisují mnozí autoři, kteří uvádí lepší fyzikální stav půdy (nižší utužení) pod minimalizační technologií oproti orbě.
- Nejméně utuženým půdní typem byla fluvizem modální, která vykazovala jen slabé utužení v podorničí u obou typů zpracování.
- Hnědozem a černozem vykázaly obdobný trend míry utužení. Překvapivým výsledkem, je prakticky totožný průběh, míra a hloubka utužení u černozemě a hnědozemě. Obecným předpokladem je, že u černozemí je míra utužení menší, a naopak se dá očekávat vyšší utužení u hnědozemí, které mají méně vyvinutou půdní strukturu (Flynn et al. 2020), jsou méně humózní a náchylné k rozplavování (Lhotský 2000, (Ohu et al. 1994) a to především ve svrchní vrstvě. To tato páce nepotvrdila.
- Ani u jedné ze zkoumaných lokalit/variant nebyl zachycen zřetelný trend průběhu indikátoru utužení, který by prokázal jasné technogenní utužení (nárůst hodnot v podorničí a jich následný pokles směrem k půdotvornému substrátu). Kromě fluvizemě došlo k nárůstu nad mez utužení již relativně mělko, ale níže se tento trend nevracel (případně nebo docházelo k dalšímu nárůstu).
- Menší průkaznost utužení na základě penetrometrického odporu je dána vlivem vlhkosti na tento ukazatel a problematikou správného stanovení limitu utužení penetrometrického odporu s ohledem na danou vlhkost měřených půd. Naproti tomu u objemové hmotnosti nemá vlhkost na měření vliv. Nicméně se v rámci práce prokázala mezi oběma ukazateli a statisticky průkazná závislost.

8 Literatura

Afshar RK, Cabot P, Banet T, Li L, Ippolito JA. 2022. Furrow-irrigated corn residue management and tillage strategies for improved soil health. Soil and Tillage Research **216**. Available at https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198721003111.

Alessa L, Earnhard CG. 2000. Effects of Soil Compaction on Root and Root Hair Morphology: Implications for Campsite Rehabilitation. USDA Forest Service 15:99-104.

Alvarez CR, Taboada MA, Gutierrez Boem FH, Bono A, Fernandez PL, Prystupa P. 2009. Topsoil Properties as Affected by Tillage Systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. Soil Science Society of America Journal **73**:1242-1250. Available at http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj2008.0246.

Badalíková B, Pokorný E, Červinka J. 2009. Změny půdního prostředí při různých technologiích zpracování půdy k cukrovce. LISTY CUKROVARNICKÉ a ŘEPAŘSKÉ **2009**:308-310.

Bai, Z. G., Dent, D. L., Olsson, L. and Schaepman, M. E. 2008. Proxy global assessment of land degradation. Soil Use and Management 24: 223-234.

Batey T. 2009. Soil compaction and soil management a review. Soil Use and Management **25**:335-345. Available at https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x.

Bogunovic Igor, Ivica Kisić. 2017. Soil Compaction on Clay Loam Soil in Pannonian Region of Croatia under Different Tillage Systems. Journal of Agricultural Science and Technology 19: 475-486.

Botta GF, Nardon GF, Guirado Clavijo R. 2022. Soil Sustainability: Analysis of the Soil Compaction under Heavy Agricultural Machinery Traffic in Extensive Crops. Agronomy **12**. Available at https://www.mdpi.com/2073-4395/12/2/282.

Braida JA, Reichert JM, Reinert DJ, Veiga M da. 2010. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental **14**:131-139.

Brant V et al. 2016. Pásové zpracování půdy (strip tillage): klasické, intenzivní a modifikované. 1st edition. Profi Press, Praha.

Brant V. 2021. Základy zpracování půdy (1): Podmítka (I.). Available from: https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/zaklady-zpracovani-pudy-1-podmitka-i (accessed March 2023).

Brant V. 2021. Základy zpracování půdy (5): Orba (I.). Available from: https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/zaklady-zpracovani-pudy-5-orba-i (accessed March 2023).

Cerdà, A. and Doerr, S. H. 2011. Effect of vegetation changes on the hydrology of Mediterranean soils: a review. Earth-Science Reviews 108: 44-61.

Costantini A. 1997. Relationships between cone penetration resistance, bulk density, and moisture content in uncultivated, repacked, and cultivated hardsetting and non-hardsetting soils from the coastal lowlands of south-east queensland. New zealand journal of forestry science **1995**:395-412.

Das TK, Kabir A, Zhao W, Stenstrom M k., Dittrich TM, Mohanty SK. 2022. A review of compaction effect on subsurface processes in soil: Implications on stormwater treatment in roadside compacted soil. ELSEVIER **2022**:11. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Los Angeles, CA, USA. Available at http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160121 (accessed January 30, 2023).

Dorner J, Bravo S, Stoorvogel M, Dec D, ValleJohn S, Clunes J, Daniel H, Ole U, Lorena W, Felipe L. 2022 Short-term effects of compaction on soil mechanical properties and pore functions of an Andisol.:12.

Eden M, Schjønning P, Moldrup P, De Jonge LW. 2011. Compaction and rotovation effects on soil pore characteristics of a loamy sand soil with contrasting organic matter content. Soil Use and Management **27**:340-349. Available at https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-2743.2011.00344.x.

Ehlers W, Werner D, Mahner T. 2000. Effect of mechanical stress on structure and productivity of a loess-derived Luvisol with conventional and conservation tillage. Web of Science **2000**:321-333. Available at https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000087843600012 (accessed April 6, 2023).

Euteneuer P, Sturm L, Waschnig V, Wagentristl H, Neugschwandtner R, Butt KR. 2021. Can the smartphone application SLAKES distinguish between earthworm-influenced soil and bulk soil. Department of crop sciences:1.

Ferreras LA, Costa JL, Garcia FO, Pecorari C. 2000. Vliv neobdělávání půdy na některé půdní fyzikální vlastnosti strukturně degradovaného petrokalcikového paleudollu z jižní „Pampy“ Argentiny. Soil and Tillage Research **54** :31-39. Dostupné na https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198799001026.

Ferreria C, Tormena C, Costa E, Nunes M, Cesar C, L. Antille D, Preto V. 2022. Effectiveness of narrow tyne and double-discs openers to overcome shallow compaction and improve soybean yield in long-term no-tillage soil. ELSEVIER **2023**:10. 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Flynn KD, Bagnall DK, Morgan CLS. 2020. Evaluation of SLAKES, a smartphone application for quantifying aggregate stability, in high-clay soils. 345-353in Soil Science Society of America Journal. Available at https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/saj2.20012.

Frank T, Zimmermann I, Horn R. 2021. Impact of lime application on erosive strength and bulk density of aggregates. International Agrophysics **35**:301-306. Available at http://www.international-agrophysics.org/Impact-of-lime-application-on-erosive-strength-and-bulk-density-of-aggregates,143766,0,2.html.

Gebhardt MR, Daniel TC, Schweizer EE, Allmaras RR. 1985. Conservation Tillage. Science **230**:625-630. Available at https://www.science.org/doi/10.1126/science.230.4726.625.

Grantr CA, Lafond GP. 1993. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and peneUati6n resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. Canadian journal of soil science **1993**:223-232.

Hammel JE. 1989. Long-Term Tillage and Crop Rotation Effects on Bulk Density and Soil Impedance in Northern Idaho. Soil Science Society of America Journal **53**:1515-1519. Available at http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj1989.03615995005300050036x.

Hargreaves PR, Baker KL, Graceson A, Bonnett S, Ball BC, Cloy JM. 2019. Soil compaction effects on grassland silage yields and soil structure under different levels of compaction over three years. European Journal of Agronomy **109**. Available at https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1161030119300541.

Hartmann P, Zink A, Fleige H, Horn R. 2012. Effect of compaction, tillage and climate change on soil water balance of Arable Luvisols in Northwest Germany. Soil and Tillage Research **124**:211-218. Available at https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198712001274.

Hill RL, Cruse RM. 1985. Účinky obdělávání na objemovou hustotu a sílu půdy dvou mollisolů. Soil Science Society of America Journal **49** :1270-1273. Dostupné na http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj1985.03615995004900050040x.

Hoorman JJ, Moraes Sá JC, Reeder R. 2009. The Biology of Soil Compaction. Agriculture and Natural Resources **2009**:10. Available at https://ohioline.osu.edu/factsheet/SAG-10 (accessed April 7, 2023).

Horn R, Fleige H. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. Soil and Tillage Research **102**:201-208. Available at https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198708001074.

Hraško J. 1962. Rozbory pod. Slovenské vydavateľstvo podohospodarskej literatúry, Bratislava.

Hubbard R, HagroveW, Lowrance R, Williams R. 1994: Physical properties of a coastal plain soil as affected by tillage. Journal of Soil and Water Conservation. **49**:276-283.

Hůla J, Abraham Z, Bauer F. 1997. Zpracování půdy. Nakladatelství Brázda, Praha. ISBN 80-209-0265-1.

Hůla J. 2001. Mechanizace zemědělství: zpracování půdy. Available from: https://www.mechanizaceweb.cz/zpracovani-pudy/ (accessed April 2021).

Huntenburg K, Dodd IC, Stalham M. 2021. Agronomic and physiological responses of potato subjected to soil compaction and/or drying. Annals of Applied Biology 178:328–340.

Chen XW, Zhang XP, Liang AZ, Jia SX, Wei SC. 2015. profile evaluation of physical quality in no-till and conventional till of a chinese mollisol. web of science **2015**:954-958.

Idowu O, Angadi Sangu. 2013. Understanding and Managing Soil Compaction in Agricultural Fields from https://www.researchgate.net/publication/289602424_Understanding_and_Managing_Soil_Compaction_in_Agricultural_Fields/citation/download

Jandák J. 2003. Cvičení z půdoznalství. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno.

Javorek F. 2008. Podmítka základem zpracování půdy. Available from: https://zemedelec.cz/podmitka-zakladem-zpracovani-pudy/ (accessed March 2023).

Javůrek M, Vach M. 2008. Negativní vlivy zhutnění půd a soustava opatření k jejich odstranění. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha. ISBN 978-80-87011-57-7.

Junior EC, Gonçalves Jr AC, Seidel EP, Ziemer GL, Zimmermann J, Oliveira VHD de, Schwantes D, Zeni CD. 2020. Effects of Liming on Soil Physical Attributes: A Review. Journal of Agricultural Science **12**. Available at http://www.ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/view/0/43680.

Karunatilake U, van Es HM, Schindelbeck RR. 2000. Soil and maize response to plow and no-tillage after alfalfa-to-maize conversion on a clay loam soil in New York. Soil and Tillage Research **55**:31-42. Available at https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198700000969.

Khel T, Vopravil J. 2015. Možnosti identifikace utužení půdního profilu. Úroda 1: 63-66.

Koenig Rich, Cerny Teresa, 2010. Solutions to Soil Problems: IV. Soil Structure *All Current Publications.* Paper 957. https://digitalcommons.usu.edu/extension_curall/957

Kolka R, Steber A, Brooks K, Perry CH, Powers M. 2012. Relationships between Soil Compaction and Harvest Season, Soil Texture, and Landscape Position for Aspen Forests. Northern Journal of Applied Forestry **29**:21-25. Available at https://academic.oup.com/njaf/article/29/1/21-25/4774248.

Konupčík J, Špelina M. 1978. Využití strojů v rostlinné výrobě l. Teoretické základy využití strojů v rostlinné výrobě. Vysoká škola zemědělská, Brno.

Kopecký J. 1928. Půdoznalství: Část agrofysikální. Ministerstvo zemědělství, Praha

Kornecki TS, Kichler CM. 2022. Influence of Recurrent Rolling/Crimping of a Cereal Rye/Crimson Clover Cover Crop on No-Till Bush Bean Yield. AgriEngineering **4**:855-870. Available at https://www.mdpi.com/2624-7402/4/4/55.

Kroulík M, Hůla J, Kumhála F, Mašek F, Honzík J, I. 2009. hodnocení intenzity zatížení půdy pneumatikami zemědělských strojů. :6. Available at https://www.vuzt.cz/svt/vuzt/publ/P2009/078.pdf (accessed March 15, 2023).

Křen K, Neudert L, Procházková B, Smutný V, Hůla J. 2015. Obecná produkce rostlinná 2. část. Mendelova univerzita, Brno. ISBN 978-80-7509-327-1.

Kuncoro PH, Koga K, Satta N, Muto Y. 2014. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. Soil and Tillage

Research **143**:180-187. Available at https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198714000154.

Kuncoro PH, Koga K, Satta N, Muto Y. 2014. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. Soil and Tillage Research **143**:180-187. Available at https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198714000154.

Kvěch O, Škoda V. 1985. Současné a perspektivní způsoby zpracování půdy. Videopress MON, Praha.

Ledvina R., Horáček J., Šindelářová M. 2000. Geologie a půdoznalství. Jihočeská univerzita, České Budějovice. ISBN 80-900364-6-5.

Liu H, Colombi T, Jäck O, Keller T, Weih M. 2022. Effects of soil compaction on grain yield of wheat depend on weather conditions. Science of The Total Environment **807**. Available at https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969721058411.

Meeus, J. Chapter 8: Landscapes. In: Bourdeau, P., Stanners, D. 1995. Europe´s Environment. The Dobříš Assessment. European Environment Agency, Copenhagen, s. 172-189

Micucci FG, Taboada MA. 2006. Soil physical properties and soybean (Glycine max, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. Soil and Tillage Research **86**:152-162. Available at https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198705000310.

Mirzaev B, Mamatov F, Ergashev I, Ravshanov H, Mirzaxodjaev S, Kurbanov S, Kodirov U, Ergashev G. 2019. Effect of fragmentation and pacing at spot ploughing on dry soils. E3S Web of Conferences **135**:01065.

Moinfara A, Shahgholia G, Abbaspour Y, Mohammad G, Szymanekc M. 2022. Investigating the effect of the tractor driving system type on soil compaction using different methods of ANN, ANFIS and step wise regression. ELSEVIER **2022**:10. 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Mowrer JM. 2019. Soils Matter, Get the Scoop: What's the dirt on soil? Find out here. Soil Science Society of America (SSSA)., 5585 Guilford Road Madison WI 53711-5801. Available at http://www.soils.org/ (accessed January 30, 2023).

Mulholland JG, Nandra KS, Scott GB, Jones AW, Coombes NE. 1996. Nutritive value of subterranean clover in a temperate environment. Australian Journal of Experimental Agriculture **36**. Available at http://www.publish.csiro.au/?paper=EA9960803.

Muysen W, Govers G, Oost K. 2002. Identification of important factors in the process of tillage erosion: the case of mouldboard tillage. Soil and Tillage Research **65**:77-93.

Novák P, Mašek J. 2018. Doučasné trendy zpracování půdy. Available from: https://www.agrojournal.cz/clanky/soucasne-trendy-zpracovani-pudy-327 (accessed April 2021).

Ohu JO, Ekwue EI, Folorunso OA. 1994. The effect of addition of organic matter on the compaction of a Vertisol from Northern Nigeria. Soil Technology **7**:155-162. Available at https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0933363094900175.

Pavlů L. 2018. Základy pedologie a ochrany půdy. Česká zemědělská univerzita, Praha. ISBN: 978-80-213-2876-1.

Pižl V. 1992. Effect of soil compaction on earthworms (lumbricidae) in apple orchard soil. Soil Biology and Biochemistry 12:1573-1575.

Plaster EJ. 2014. Soil science & management. 6th ed. Delmar Cengage Learning, New York. ISBN 978-0-8400-2432-9.

Pospíšil J. 2020. Podmítka a podmítače. Available from: https://www.agromanual.cz/cz/clanky/mechanizace/podmitka-a-podmitace (acessed March 2023).

Pulkrábek J, Urban J, Jedličková M. 2015. Vliv podzimního zpracování půdy na zhutnění půdy v počátcích vegetace cukrové řepy. Available from: https://www.asz.cz/cs/odborne-clanky-a-analyzy/vliv-podzimniho-zpracovani-pudy-nazhutneni-pudy-v-pocatcich-vegetace-cukrove-repy.html (accessed April 2021).

Rataj V, Galambošová J, Macák M, Barát M. 2017. Utužování půdy a řízený pohyb strojů po poli (CTF). Mechanizace zemědělství **2017**:1. profi press. Available at https://mechanizaceweb.cz/utuzovani-pudy-a-rizeny-pohyb-stroju-po-poli-ctf/ (accessed March 14, 2023).

Raus L, Ailincai C, Balan A, Jitareanu G. 2007. The effect of different soil tillage systems on soil physical characteristics and crop yield of main crops from the Moldavian Plain, Romania. Departament of Soil Sience:4.

Reicosky DC, Archer DW. 2007. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. Soil and Tillage Research **94**:109-121.

Sáňka M, Vácha R, Poláková Š, Fiala P. 2018. Kritéria pro hodnocení produkčních a ekologických vlastností půd. Ministerstvo životního prostředí, Praha

Simojoki A, Fazekas-Becker O, Horn R. 2008. Macro- and microscale gaseous diffusion in a Stagnic Luvisol as affected by compaction and reduced tillage. Agricultural and Food Science **17**:252-264. Available at https://journal.fi/afs/article/view/5917.

Simsek U, Shein EV, Mikailsoy F, Bolotov AG, Erdel E. 2019. Subsoil Compaction: The Intensity of Manifestation in Silty Clayey Calcic Pantofluvic Fluvisols of the Iğdır Region (Eastern Turkey). Eurasian Soil Science **52**:296-299. Available at http://link.springer.com/10.1134/S1064229319030104.

Smith, P., J. Nkem, K. Calvin, D. Campbell, F. Cherubini, G. Grassi, V. Korotkov, A.L. Hoang, S. Lwasa, P. McElwee, E. Nkonya, N. Saigusa, J.-F. Soussana, M.A. Taboada, 2019: Interlinkages Between Desertification, Land Degradation, Food Security and Greenhouse Gas Fluxes: Synergies, Trade-offs and Integrated Response Options. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation,

sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Portner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press. https://www.ipcc.ch/…-6/

Sommer C, Zach M. 1992. Managing traffic-induced soil compaction by using conservation tillage. Soil and Tillage Research **24**:319-336. Available at https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/016719879290117T.

Stach J. 1995. Základní agrotechnika (Osevní postupy). Jihočeská univerzita, České Budějovice. ISBN 80-7040-117-6.

Šarapatka B, Dlapa P, Bednar Z. 2002. Kvalita a degradace půdy. Tiskservis, Olomouc.

Šarapatka B, Urban J. 2006. Ekologické zemědělství. PRO-BIO, Šumperk.

Šarapatka B. 2014. Pedologie a ochrana půdy. Tisk SABING spol., Olomouc.

Šimek M. 2004. Základy nauky o půdě. Jihočeská univerzita, České Budějovice.

Šimon J, Lhotský J. 1989. Zpracování a zúrodňování půd. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.

Timlin D, Ahuja LR. 2013. Enhancing Understanding and Quantification of Soil–Root Growth Interactions. 4 edition. Copyright 2013 American Society of Agronom, America.

Tondoh JE, Dimobe K, Guéi AM, Adahe L, Baidai Y, N'Dri JK, Forkuor G. 2019. Soil Health Changes Over a 25-Year Chronosequence From Forest to Plantations in Rubber Tree (Hevea brasiliensis) Landscapes in Southern Côte d'Ivoire: Do Earthworms Play a Role?. Frontiers in Environmental Science **7**. Available at https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2019.00073/full.

Van Orsouw TL, Mulder VL, Schoorl JM, Van Os GJ, Van Essen EA, Pepers KHJ, Heuvelink GBM. 2022. Practical Implications of the Availability of Multiple Measurements to Classify Agricultural Soil Compaction: A Case-Study in The Netherlands. Agronomy **12**:1669-1693.

Vopravil J, Formánek P, Khel T. 2021. Comparison of the physical properties of soils belonging to different reference soil groups. Soil and Water Research **16**:29-38. Available at http://swr.agriculturejournals.cz/doi/10.17221/31/2020-SWR.html.

Vrtná prozkoumanost, Geologická mapa 1: 50 000. In: Geovědní mapy 1: 50 000 [online]. Praha: Česká geologická služba (accessed April 11, 2023). Dostupné z: https://mapy.geology.cz/geocr50/

VÚMOP: eKatalog BPEJ. 2022. Available at https://www.vumop.cz/ (accessed April 11, 2023).

Warren J, Taylor R. 2023. Managing Soil Compaction. Oklahoma Cooperative Extension Service **2023**:4. Oklahoma.

Welke S, Fyles J. 2005. When Texture Matters: Compaction in Boreal Forest Soils. Forest Nutrition Group **2005**:4. Graphics & Layout: Kristin Kopra.

Wiermann C, Werner D, Horn R, Rostek J, Werner B. 2000. Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. Soil and Tillage Research **53**:117-128. Available at https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198799000902.

9 Samostatné přílohy

Příloha 1

Výsledky ANOVA - Statisticky významné rozdíly (hl. významnosti p = 0,05) PO mezi technologiemi obdělávání u hnědozemě

	Jednorozm. výsledky pro každou záv. proměnnou (FL_5cm_sta)Sigma-omezená parametrizaceDekompozice efektivní hypoté												
Efekt	Stupně (volnosti)	0-5 (SČ)	0-5 (PČ)	0-5 (F)	0-5 (p)	5-10 (SČ)	5-10 (PČ)	5-10 (F)	5-10 (p)	10-15 (SČ)	10-15 (PČ)	10-15 (F)	10-15 (p)
Abs. člen	1	10,656	10,656	224,736	0,000	21,631	21,631	349,771	0,000	29,243	29,243	320,333	0,000
typ	1	0,506	0,506	10,665	0,002	0,233	0,233	3,774	0,058	0,330	0,330	3,616	0,063
Chyba	47	2,229	0,047			2,907	0,062			4,291	0,091		
Celkem	48	2,734				3,140				4,621			
Efekt	Stupně (volnosti)	15-20 (SČ)	15-20 (PČ)	15-20 (F)	15-20 (p)	20-25 (SČ)	20-25 (PČ)	20-25 (F)	20-25 (p)	25-30 (SČ)	25-30 (PČ)	25-30 (F)	25-30 (p)
Abs. člen	1	43,468	43,468	230,119	0,000	70,655	70,655	237,015	0,000	126,731	126,731	217,826	0,000
typ	1	2,318	2,318	12,273	0,001	5,792	5,792	19,431	0,000	12,869	12,869	22,120	0,000
Chyba	47	8,878	0,189			14,011	0,298			27,344	0,582		
Celkem	48	11,196				19,803				40,214			
Efekt	Stupně (volnosti)	30-35 (SČ)	30-35 (PČ)	30-35 (F)	30-35 (p)	35-40 (SČ)	35-40 (PČ)	35-40 (F)	35-40 (p)	40-45 (SČ)	40-45 (PČ)	40-45 (F)	40-45 (p)
Abs. člen	1	196,419	196,419	323,652	0,000	250,891	250,891	866,993	0,000	273,621	273,621	#######	0,000
typ	1	8,227	8,227	13,556	0,001	4,711	4,711	16,280	0,000	5,725	5,725	22,036	0,000
Chyba	47	28,524	0,607			13,601	0,289			12,212	0,260		
Celkem	48	36,750				18,312				17,937			
Efekt	Stupně (volnosti)	45-50 (SČ)	45-50 (PČ)	45-50 (F)	45-50 (p)	50-55 (SČ)	50-55 (PČ)	50-55 (F)	50-55 (p)	55-60 (SČ)	55-60 (PČ)	55-60 (F)	55-60 (p)
Abs. člen	1	304,062	304,062	1125,63	0,000	347,180	347,180	873,418	0,000	402,039	402,039	907,438	0,000
typ	1	6,299	6,299	23,319	0,000	8,503	8,503	21,391	0,000	10,737	10,737	24,234	0,000
Chyba	47	12,696	0,270			18,682	0,397			20,823	0,443		
Celkem	48	18,995				27,185				31,560			
Efekt	Stupně (volnosti)	60-65 (SČ)	60-65 (PČ)	60-65 (F)	60-65 (p)	65-70 (SČ)	65-70 (PČ)	65-70 (F)	65-70 (p)	70-75 (SČ)	70-75 (PČ)	70-75 (F)	70-75 (p)
Abs. člen	1	443,312	443,312	732,586	0,000	491,169	491,169	670,657	0,000	519,410	519,410	551,550	0,000
typ	1	11,342	11,342	18,743	0,000	11,646	11,646	15,901	0,000	15,546	15,546	16,508	0,000
Chyba	47	28,441	0,605			34,421	0,732			44,261	0,942		
Celkem	48	39,783				46,067				59,807			
Efekt	Stupně (volnosti)	75-80 (SČ)	75-80 (PČ)	75-80 (F)	75-80 (p)								
Abs. člen	1	525,210	525,210	589,437	0,000								
typ	1	21,431	21,431	24,052	0,000								
Chyba	47	41,879	0,891										
Celkem	48	63,310											
	červeně jsou označeny případy se statisticky průkazným rozdílem na hladině p = 005												

Příloha 2

Výsledky ANOVA - Statisticky významné rozdíly (hl. významnosti p = 0,05) PO mezi technologiemi obdělávání u fluvizemě

	Jednorozm. výsledky pro každou záv. proměnnou (FL_5cm_sta)Sigma-omezená parametrizaceDekompozice efektivní hypoté												
Efekt	Stupně (volnosti)	0-5 (SČ)	0-5 (PČ)	0-5 (F)	0-5 (p)	5-10 (SČ)	5-10 (PČ)	5-10 (F)	5-10 (p)	10-15 (SČ)	10-15 (PČ)	10-15 (F)	10-15 (p)
Abs. člen	1	0,853	0,853	82,865	0,000	4,630	4,630	140,404	0,000	10,470	10,470	146,171	0,000
typ	1	0,001	0,001	0,053	0,819	0,293	0,293	8,892	0,004	1,201	1,201	16,767	0,000
Chyba	57	0,587	0,010			1,879	0,033			4,083	0,072		
Celkem	58	0,588				2,173				5,284			
Efekt	Stupně (volnosti)	15-20 (SČ)	15-20 (PČ)	15-20 (F)	15-20 (p)	20-25 (SČ)	20-25 (PČ)	20-25 (F)	20-25 (p)	25-30 (SČ)	25-30 (PČ)	25-30 (F)	25-30 (p)
Abs. člen	1	18,779	18,779	82,147	0,000	30,190	30,190	90,580	0,000	74,442	74,442	173,271	0,000
typ	1	4,271	4,271	18,681	0,000	4,934	4,934	14,804	0,000	1,471	1,471	3,423	0,069
Chyba	57	13,030	0,229			18,998	0,333			24,489	0,430		
Celkem	58	17,301				23,932				25,959			
Efekt	Stupně (volnosti)	30-35 (SČ)	30-35 (PČ)	30-35 (F)	30-35 (p)	35-40 (SČ)	35-40 (PČ)	35-40 (F)	35-40 (p)	40-45 (SČ)	40-45 (PČ)	40-45 (F)	40-45 (p)
Abs. člen	1	180,154	180,154	298,042	0,000	351,188	351,188	633,218	0,000	409,919	409,919	927,602	0,000
typ	1	0,134	0,134	0,222	0,640	0,430	0,430	0,776	0,382	0,000	0,000	0,000	0,984
Chyba	57	34,454	0,604			31,613	0,555			25,189	0,442		
Celkem	58	34,588				32,043				25,189			
Efekt	Stupně (volnosti)	45-50 (SČ)	45-50 (PČ)	45-50 (F)	45-50 (p)	50-55 (SČ)	50-55 (PČ)	50-55 (F)	50-55 (p)	55-60 (SČ)	55-60 (PČ)	55-60 (F)	55-60 (p)
Abs. člen	1	433,369	433,369	775,168	0,000	456,165	456,165	616,252	0,000	403,623	403,623	516,928	0,000
typ	1	1,071	1,071	1,915	0,172	2,415	2,415	3,263	0,076	0,599	0,599	0,767	0,385
Chyba	57	31,867	0,559			42,193	0,740			44,506	0,781		
Celkem	58	32,937				44,608				45,105			
Efekt	Stupně (volnosti)	60-65 (SČ)	60-65 (PČ)	60-65 (F)	60-65 (p)	65-70 (SČ)	65-70 (PČ)	65-70 (F)	65-70 (p)	70-75 (SČ)	70-75 (PČ)	70-75 (F)	70-75 (p)
Abs. člen	1	353,790	353,790	537,303	0,000	325,919	325,919	303,510	0,000	303,684	303,684	212,393	0,000
typ	1	0,399	0,399	0,606	0,440	4,471	4,471	4,164	0,046	15,567	15,567	10,887	0,002
Chyba	57	37,532	0,658			61,208	1,074			81,500	1,430		
Celkem	58	37,931				65,680				97,067			
Efekt	Stupně (volnosti)	75-80 (SČ)	75-80 (PČ)	75-80 (F)	75-80 (p)								
Abs. člen	1	294,344	294,344	192,494	0,000								
typ	1	24,862	24,862	16,259	0,000								
Chyba	57	87,159	1,529										
Celkem	58	112,021											
	červeně jsou označeny případy se statisticky průkazným rozdílem na hladině p = 005												

Příloha 3

Výsledky ANOVA - Statisticky významné rozdíly (hl. významnosti p = 0,05) PO mezi technologiemi obdělávání u černozemě

	Jednorozm. výsledky pro každou záv. proměnnou (FL_5cm_sta)Sigma-omezená parametrizaceDekompozice efektivní hypoté												
Efekt	Stupně (volnosti)	0-5 (SČ)	0-5 (PČ)	0-5 (F)	0-5 (p)	5-10 (SČ)	5-10 (PČ)	5-10 (F)	5-10 (p)	10-15 (SČ)	10-15 (PČ)	10-15 (F)	10-15 (p)
Abs. člen	1	13,026	13,026	110,830	0,000	44,250	44,250	163,883	0,000	75,836	75,836	234,118	0,000
typ	1	0,435	0,435	3,703	0,060	0,019	0,019	0,070	0,792	0,483	0,483	1,491	0,227
Chyba	53	6,229	0,118			14,311	0,270			17,168	0,324		
Celkem	54	6,665				14,330				17,651			

Efekt	Stupně (volnosti)	15-20 (SČ)	15-20 (PČ)	15-20 (F)	15-20 (p)	20-25 (SČ)	20-25 (PČ)	20-25 (F)	20-25 (p)	25-30 (SČ)	25-30 (PČ)	25-30 (F)	25-30 (p)
Abs. člen	1	111,428	111,428	322,675	0,000	166,995	166,995	512,270	0,000	257,199	257,199	660,968	0,000
typ	1	3,111	3,111	9,010	0,004	1,641	1,641	5,035	0,029	0,222	0,222	0,571	0,453
Chyba	53	18,302	0,345			17,277	0,326			20,624	0,389		
Celkem	54	21,414				18,919				20,846			

Efekt	Stupně (volnosti)	30-35 (SČ)	30-35 (PČ)	30-35 (F)	30-35 (p)	35-40 (SČ)	35-40 (PČ)	35-40 (F)	35-40 (p)	40-45 (SČ)	40-45 (PČ)	40-45 (F)	40-45 (p)
Abs. člen	1	310,045	310,045	1251,2	0,000	350,338	350,338	1829,1	0,000	388,600	388,600	1516,2	0,000
typ	1	1,290	1,290	5,207	0,027	2,802	2,802	14,628	0,000	2,679	2,679	10,454	0,002
Chyba	53	13,133	0,248			10,152	0,192			13,584	0,256		
Celkem	54	14,423				12,953				16,263			

Efekt	Stupně (volnosti)	45-50 (SČ)	45-50 (PČ)	45-50 (F)	45-50 (p)	50-55 (SČ)	50-55 (PČ)	50-55 (F)	50-55 (p)	55-60 (SČ)	55-60 (PČ)	55-60 (F)	55-60 (p)
Abs. člen	1	435,840	435,840	898,444	0,000	481,062	481,062	961,395	0,000	559,654	559,654	1282,4	0,000
typ	1	1,553	1,553	3,202	0,079	0,473	0,473	0,946	0,335	0,037	0,037	0,085	0,772
Chyba	53	25,711	0,485			26,520	0,500			23,130	0,436		
Celkem	54	27,264				26,993				23,167			

Efekt	Stupně (volnosti)	60-65 (SČ)	60-65 (PČ)	60-65 (F)	60-65 (p)	65-70 (SČ)	65-70 (PČ)	65-70 (F)	65-70 (p)	70-75 (SČ)	70-75 (PČ)	70-75 (F)	70-75 (p)
Abs. člen	1	626,778	626,778	1637,4	0,000	704,232	704,232	1811,7	0,000	741,623	741,623	1608,8	0,000
typ	1	0,020	0,020	0,053	0,819	0,777	0,777	1,999	0,163	1,722	1,722	3,735	0,059
Chyba	53	20,288	0,383			20,602	0,389			24,432	0,461		
Celkem	54	20,308				21,379				26,153			

Efekt	Stupně (volnosti)	75-80 (SČ)	75-80 (PČ)	75-80 (F)	75-80 (p)
Abs. člen	1	804,151	804,151	1453,2	0,000
typ	1	3,719	3,719	6,721	0,012
Chyba	53	29,328	0,553		
Celkem	54	33,047			

červeně jsou označeny případy se statisticky průkazným rozdílem na hladině p = 0,05