

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra zemědělských strojů



Disertační práce

Působení strojů na půdu v souvislosti s erozními procesy

**Effects of Machines on Soil in Connection with Erosion
Processes**

**Vypracoval: Ing. Brož Pavel
Školitel: prof. Ing. Josef Hůla, CSc.**

© 2024 ČZU v Praze

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci s názvem „Působení strojů na půdu v souvislosti s erozními procesy“ vypracoval samostatně a použil pouze literární prameny uvedené v seznamu literatury.

V Praze dne 5. 2. 2024

Ing. Pavel Brož

Poděkování

Děkuji mému školiteli prof. Ing. Josefovi Hůlovi, CSc. za odbornou podporu v průběhu doktorského studia i cenné rady při zpracování této disertační práce. Děkuji i všem spoluautorům článků za jejich odborný přínos a spolupráci při získávání a zpracování dat. Dále děkuji i zemědělskému podniku Agro Nesperka, s.r.o. za možnost provádění polních experimentů.

Abstrakt

Většina výzkumu eroze půdy v České republice je zaměřena především na erozi vodní a větrnou. Tato eroze patří k nejvíce diskutovaným faktorům půdní degradace. Eroze při zpracování půdy není tak zkoumaná jako výše zmíněná vodní eroze, a přitom se podílí značným způsobem na degradaci půdy obdobně jako eroze vodní či větrná. Půdní degradace je známý pojem spojený s pomalým snižováním půdní úrodnosti. V podmínkách České republiky je zásadním rizikem velká míra zornění a svažitost orných ploch. Pro zjištění translokace půdních částic byla provedena řada měření ve Středočeském kraji. Používané metody výzkumu vycházejí z postupů použitých v zahraničí a v České republice jsou nové. V práci byl zjištěn odlišný účinek nových pracovních nástrojů a opotřebovaných nástrojů, dále byl hodnocen vliv jednotlivých technologií hospodaření a vliv svažitosti pozemků.

Klíčová slova: Zpracování půdy, eroze, úrodnost půdy.

Abstract

Most soil erosion research in the Czech Republic is focused primarily on water and wind erosion. This erosion is one of the most discussed factors of soil degradation. Tillage erosion is not as researched as the water erosion mentioned above, and it contributes significantly to soil degradation, similar to water or wind erosion. Soil degradation is a familiar term associated with the slow decline of soil fertility. In the conditions of the Czech Republic, the major risk is a high level of visibility and the slope of arable land. To determine the translocation of soil particles, a number of measurements were carried out in the Central Bohemia region. The research methods used are based on procedures used abroad and are new in the Czech Republic. In the work, a different effect of new work tools and worn tools was found, and the influence of individual management technologies and the influence of land slope were evaluated.

Key words: Tillage, tillage erosion, soil fertility.

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Historie.....	3
3 Přehled o současném stavu problematiky, která je předmětem disertační práce	4
3.1 Zpracování půdy.....	4
3.2 Podstata jevu eroze zpracováním půdy a jeho významnost.....	7
3.3 Poškození půdy	8
3.3.1 Zhutnění	8
3.4 Eroze zpracováním půdy.....	9
3.4.1 Půdní eroze	11
3.4.2 Eroze zpracováním půdy a vlastnosti půdy	13
3.4.3 Propojení mezi erozí zpracováním půdy a dalšími druhy eroze.....	14
3.4.4 Vliv eroze půdy na půdní organický uhlík (SOC).....	16
3.4.5 Vliv technologií zpracování půdy na erozi půdy	18
3.4.6 Vliv směru zpracování půdy na erozi půdy	19
3.5 Metody používané pro hodnocení eroze půdy	20
3.5.1 Metoda makroznačkovačů „tracers„	21
3.5.2 Metoda makroznačkovačů „drť bílého vápence„.....	21
4 Modelování eroze půdy.....	22
4.1 Universal Soil Loss Equation (USLE).....	22
4.2 Empirický model eroze	23
4.3 Dynamický model	26
4.3.1 Počáteční podmínky modelování pohybu půdních částic.....	27
4.3.2 Odvození rovnice pro modelování eroze pomocí difúzní vlny.....	27
5 Cíl disertační práce	31
5.1 Cíl disertační práce.....	31
5.2 Hypotéza	31
6 Metodika práce.....	32
6.1 Experimentální lokalita	32
6.2 Odběr půdních vzorků.....	33
6.3 Značkovače a způsob jejich použití	34
6.3.1 Drť bílého vápence	34
6.3.2 Očíslované hliníkové krychličky	35
6.3.3 Doplnková měření.....	37
6.4 Stroje použité při polních experimentech	39
6.5 Metodika experimentů	41

7	Výsledky práce	48
7.1	Hodnocení ostrosti pracovních nástrojů na přemístění půdních částic	48
7.2	Erozní vliv dvou technologií zpracování půdy na přemístování půdních částic	57
7.3	Erozní vliv tří strojů na předset'ovou přípravu půdy	59
7.4	Hodnocení přesunu půdních částic s opakovanými přejezdy při přípravě půdy pro setí	66
7.5	Hodnocení přesunu půdních částic s využitím makroznačkovačů drtě bílého vápence.....	72
7.6	Hodnocení rozmístění půdních částic pracovními nástroji radličkového a talířového kypřiče při třech pracovních rychlostech	76
7.7	Hodnocení vlivu přemístění půdních částic u dvou strojů určených na zpracování půdy	81
7.8	Hodnocení přemístění půdních částic aktivně poháněným kypřičem.....	83
7.9	Modelace pohybu půdních částic	84
8	Diskuse	86
9	Výstupní metodika pro hodnocení posunu půdních částic.....	90
9.1	Zhodnocení přínosů disertační práce a doporučení pro další výzkum.	91
9.2	Doporučení pro praxi	92
10	Závěr.....	94
11	Seznam použitých zdrojů	95
12	Příloha	103

Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Mechanismus eroze zpracováním půdy

Obrázek č. 2: Princip eroze zpracováním půdy

Obrázek č. 3: Závislost eroze zpracováním půdy a pracovní rychlosti při zpracování

Obrázek č. 4: Eroze ornice

Obrázek č. 5: Typické míry infiltrace pro různé půdy

Obrázek č. 6: Pohyb půdních částic (obr. a) a translokace organického uhlíku (obr. b)

Obrázek č. 7: Směry pohybů zpracování půdy při experimentu

Obrázek č. 8: Trojúhelníková diskretizace dvou-rozměrné oblasti pro řešení využitelné pro řešení kinematické vlny metodou konečných prvků

Obrázek č. 9: Zákon zachování hmoty

Obrázek č. 10: Modelace vodní eroze pomocí difúzní vlny

Obrázek č. 11: Lokalita a tvar experimentálního pozemku

Obrázek č. 12: Drt' bílého vápence uložená v rýze

Obrázek č. 13: Povrch půdy po jejím zpracování

Obrázek č. 14: Rozmístěné hliníkové krychličky

Obrázek č. 15: Profilograf

Obrázek č. 16: Navigace NAV-500

Obrázek č. 17: Siloměr S-38

Obrázek č. 18: Posun značkovačů při celosezónním měření

Obrázek č. 19: Parcelka s trojúhelníkovou sítí bodů, generovaná v softwaru GMSH

Obrázek č. 20: Potenciál eroze půdy, vypočtené pomocí aplikace modelu DRUtES

Obrázek č. 21: Potenciál vzniku eroze půdy při zpracování půdy

Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Podobnosti a rozdíly mezi erozí zpracováním půdy, vodní a větrnou erozí

Tabulka č. 2: Vyjadřuje hodnotu faktoru P

Tabulka č. 3: Objemová hmotnost a pórovitost

Tabulka č. 4: Statistická významnost posunu půdních značkovačů u kypřiče Kromexim

Tabulka č. 5: Statistická významnost tahové síly u kypřiče Kromexim

Tabulka č. 6: Statistická významnost profilu dna půdy u kypřiče Kromexim

Tabulka č. 7: Statistická významnost rozdílů u délky posunu značkovačů

Tabulka č. 8: Statistická významnost rozdílů pro vektorový úhel posunu značkovačů

Tabulka č. 9: Statistická významnost rozdílů u délky posunu značkovačů

Tabulka č. 10: Statistická významnost rozdílů pro vektorový úhel posunu značkovačů

Tabulka č. 11: Statistická významnost rozdílů u délky posunu značkovačů

Tabulka č. 12: Statistická významnost rozdílů pro vektorový úhel posunu značkovačů

Tabulka č. 13: Statistická významnost posunu značkovačů u měřených strojů

Tabulka č. 14: Statistická významnost velikosti vektorového úhlu značkovačů u měřených strojů

Tabulka č. 15: Statistická významnost posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tabulka č. 16: Statistická významnost velikosti vektorového úhlů posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tabulka č. 17: Statistická významnost posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tabulka č. 18: Statistická významnost velikosti vektorového úhlů posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tabulka č. 19: Statistická významnost posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tabulka č. 20: Statistická významnost velikosti vektorového úhlu posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tabulka č. 21: Statistická popisná statistika indikátorů přemístěných mimo drážku

Tabulka č. 22: Hmotnostní podélný posun pro talířový kypřič

Tabulka č. 23: Hmotnostní podélný posun pro radličkový kypřič

Tabulka č. 24: Hodnoty získané metodou součtové křivky

Seznam grafů

- Graf č. 1: Výsledky posunu půdních značkovačů u kypřiče Kromexim
- Graf č. 2: Výsledky tahové síly u kypřiče Kromexim
- Graf č. 3: Profil povrchu a dna půdy po zpracování radličkovým kypřičem Kromexim
- Graf č. 4: Výsledky posunu půdních značkovačů u pluhu PH5-35, svažitost 2°
- Graf č. 5: Výsledky velikosti vektorových úhlů svažitost 2°
- Graf č. 6: Výsledky posunu půdních značkovačů u pluhu PH5-35, svažitost 6°
- Graf č. 7: Výsledky velikosti vektorových úhlů svažitost 6°
- Graf č. 8: Výsledky posunu půdních značkovačů u pluhu PH5-35, svažitost 11°
- Graf č. 9: Výsledky velikosti vektorových úhlů svažitost 11°
- Graf č. 10: Výsledky posunu půdních značkovačů
- Graf č. 11: Velikosti vektorových úhlů pro posun značkovačů
- Graf č. 12: Výsledky posunu půdních značkovačů u talířového kypřiče s rovnoběžnou geometrií nástrojů
- Graf č. 13: Velikosti vektorových úhlů značkovačů talířového kypřiče s rovnoběžnou geometrií nástrojů
- Graf č. 14: Výsledky posunu půdních značkovačů u talířového kypřiče s geometrií nástrojů do tvaru X.
- Graf č. 15: Velikosti vektorových úhlů značkovačů talířového kypřiče s geometrií nástrojů do tvaru X.
- Graf č. 16: Výsledky posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče
- Graf č. 17: Velikosti vektorových úhlů značkovačů radličkového kypřiče
- Graf č. 18: Výsledky posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče
- Graf č. 19: Velikosti vektorových úhlů značkovačů radličkového kypřiče
- Graf č. 20: Výsledky posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče
- Graf č. 21: Velikosti vektorových úhlů značkovačů radličkového kypřiče
- Graf č. 22: Výsledky posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče
- Graf č. 23: Velikosti vektorových úhlů značkovačů radličkového kypřiče
- Graf č. 24: Hmotnostní posun (do svahu)
- Graf č. 25: Hmotnostní posun (se svahu)
- Graf č. 26: Hmotnostní posun (po vrstevnici)
- Graf č. 27: Hmotnostní posun (do svahu)
- Graf č. 28: Hmotnostní posun (se svahu)

Graf č. 29: Hmotnostní posun (po vrstevnici)

Graf č. 30: Percentilové vzdálenosti

Graf č. 31: Označuje podélnou vzdálenost

Graf č. 32: Označuje intenzity přemístění půdy (Tm)

Graf č. 33: Množství a vzdálenost posunu značkovačů při zpracování půdy radličkovým kypričem

Graf č. 34: Množství a vzdálenost posunu značkovačů při zpracování půdy talířovým kypričem

Graf č. 35: Množství a vzdálenost posunu značkovačů při zpracování půdy vířivým kypričem

Graf č. 36: Potenciál eroze půdy při použití talířového kypriče

Seznam použitých zkratk

DZES - Dobrý zemědělský a environmentální stav půdy

GPS - Globální polohový systém

GIS - Geografický informační systém

WaTEM - Model eroze vodní a eroze při zpracování půdy

SEDEM – Model usazování

VÚMOP – Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy

GPS – Globální polohový systém

RTK – Real time kinematic

SOC – Soil organic carbon

HPJ - Hlavní půdní jednotka

Seznam použitých vzorců

1, Empirickým modelem USLE (RUSLE)

2, Zákon zachování hmoty

3, Rovnice kontinuity s objemovou vlhkostí

4, Richardsova rovnice

5, Derivace retenční křivky pro Richardsovu rovnici

6, Richardsova rovnice v difúzním tvaru

7, Konečný stav Richardsovy rovnice v difúzním tvaru

8, Rovnice difúzní vlny

Příloha 1

Seznam fotografií z měření.

1 Úvod

Půda je jedním z nejdůležitějších a nejcennějších aspektů pro udržení života na Zemi. Bez půdy by nebylo možné pěstovat rostliny, které následně slouží jako zdroj obživy člověka. Hodnota půdy souvisí s její velice těžkou schopností se obnovovat. Z historie je patrné, že úspěšný rozvoj jednotlivých kultur je podmíněn půdními schopnostmi produkovat dostatek kvalitních potravin pro obyvatelstvo a také pro chovaný hospodářský dobytek. Dílčím způsobem můžeme tuto závislost vidět jak ve vyspělých, tak i rozvojových státech současného světa. Schopnost obnovy půdy po předchozím poškození je značně problematická a pomalá. Nahrazení poškozených částí půdy trvá desítky až stovky let, v některých případech nemusí dojít k nahrazení vůbec. Poslední dekády stávajícího období jsou charakteristické extrémním tlakem na produkční schopnost půdy a minimalizaci nákladů s touto schopností spojenou. Jak samotná produkční schopnost, tak i minimalizace nákladů jsou spojeny s použitím technologických systémů obhospodařování. Bohužel tyto technologické systémy nemusí být vždy použity optimálním způsobem a mohou vést k půdní degradaci a poškození půdy. Půdní degradace je známý pojem spojený s pomalým snižováním půdní úrodnosti. Samotné snižování půdní úrodnosti je ovlivněno i vývojem nových technologií, jako je rozvoj aplikačních ochranných látek typů herbicidů, insekticidů, fungicidů či používaných minerálních hnojiv. Tyto nové technologie částečně omezují vliv samotné půdy na velikost produkce. Bohužel spolehnouti se jen na výše zmíněné nové technologie není zcela bezpečné. Používané nové technologie mohou být v budoucnu omezovány a to zejména legislativním způsobem. Po omezení těchto technologií pak může být půda již nenávratně poškozená. Ve většině vyspělých států světa je obecné vnímání dostatku potravin bráno za standard či samozřejmost. Bohužel většina potravin je do těchto míst importována z jiných oblastí, protože část místní půdy je buď zabrána urbanistickým způsobem nebo je půda již natolik zdegradována, že není schopná dostatečné produkce. To ale není, díky importu potravin, bráno za vážný problém. Půdní degradace je tedy neobornou veřejností posuzována za nedůležitý problém a nedostává tedy takovou pozornost jako jiná environmentální tematika.

Hlavním rizikem degradace zemědělské půdy v České republice je vodní eroze. Ovšem nejedná se pouze o problematiku České republiky nebo střední Evropy. Vodní eroze společně s erozí větrnou postihují téměř celý svět. Eroze je přírodní proces, který má za následek rozrušování půdního povrchu s následným přemísťováním půdních částic a jejich

sedimentací v důsledku činnosti vody, větru a ledu. Vodní a větrná eroze tak patří mezi pečlivě sledované jevy. V posledních desítkách let se ale začal objevovat ještě pojem eroze při zpracování půdy. Tato eroze nepatří mezi zcela prozkoumané jevy, i když její význam na některých pozemcích může mít stejné či ještě větší následky jako eroze vodní. Erozi zpracování půdy lze označit jako sestupný pohyb půdních částic způsobený zpracováním půdy. Pracovní nástroje půdu do určité míry kypří a to v závislosti na typu půdy, vlhkosti půdy, hloubce zpracování či typu stroje. Tam kde je půda zpracovávána sestupným směrem, půda se přemísťuje po svahu. Kde probíhá zpracování půdy vzestupným směrem, půda se posune nahoru ale o menší vzdálenost.

V podmínkách České republiky je zásadním rizikem velká míra zornění a velká průměrná svažitost orných ploch. Pro všechny výše zmíněné důvody je důležité, aby úroveň poznání nejen problematiky eroze zpracováním půdy neustále stoupala a byla tak tvořena opatření vedoucí ke zmírnění nežádoucích způsobů hospodaření.

Úvod je zakončen citací z roku 1937 Franklina Delana Roosevelta „Národ který ničí svoji půdu, tak ničí sám sebe.“

2 Historie

Eroze zpracováním půdy a s tím související problematika studia přemísťování půdních částic jednotlivými pracovními operacemi a stroji určenými pro zpracování půdy je poměrně novou dílčí částí v oblasti výzkumu eroze (Govers et al. 1999). Argumentem proč hledat nové typy eroze se stalo především pozorované snížení půdní úrodnosti v místech s konvexními (vypoukliny) částmi pozemků, toto snížení půdní úrodnosti nebylo možné popsat a vysvětlit pouze vodní erozí. Byly pozorovány tedy zásadní rozdíly mechanismů jednotlivých erozí. Erozi zpracováním půdy lze efektivně pozorovat na půdních blocích, které byly a jsou vystaveny intenzivnímu zpracování půdy. Goves et al. (1999) uvádí, že zatímco v západní Evropě a Americe byla věnována značná pozornost v oblasti vodní eroze, tak ve východní Evropě nebyl vliv zpracování půdy na přesun půdních částic dříve také dostatečně zkoumán.

Takováto tvrzení se částečně vyskytují v publikacích Zachara (1970) nebo Janečka et al. (2002). Tito autoři se ale dlouhodobě zaměřovali především na výzkum eroze vodní.

3 Přehled o současném stavu problematiky, která je předmětem disertační práce

3.1 Zpracování půdy

Tak, jak se rozvíjelo zemědělství, docházelo i k rozvíjení zpracování půdy. Zpracování půdy mělo odpradáвна až do současnosti jasný důvod. Vytvořit ideální podmínky pro optimální růst pěstovaných prodin (Hůla et al. 2010). Zpracování půdy se používá ke zlepšení strukturálních vlastností půdy a úpravě distribuce velikosti půdních pórů, aby se vytvořily žádoucí vlastnosti pro pohyb plynů, vody, chemikálií a tepla pro usnadnění růstu plodin s minimální degradací životního prostředí v důsledku eroze a kontaminace podzemních vod (Leij et al. 2002).

Pro vytvoření optimálních podmínek zpracování půdy je důležitá vstupní energie. Dříve tato energie byla limitována lidskou, následně zvířecí silou. V posledních desítkách let je tato energie, až na malé výjimky, nahrazována stroji. V některých částech zejména rozvojového světa je používána zvířecí a lidská síla dodnes. Velikost strojů pohybujících se po polích má značný vliv na intenzitu zpracování půdy. Zpracování půdy můžeme definovat jako mechanický zásah do půdy vedený za účelem vytvoření příznivých fyzikálních podmínek pro růst plodin v orební vrstvě (Or et Ghezzehei 2002). Při zpracování orné půdy může docházet k rozrušení půdních agregátů. Půdní agregáty jsou základními jednotkami půdní struktury a funkce půdy. Jsou důležitým hlediskem při zlepšování půdy z hlediska strukturální stability, obsahu živin v půdě a mikrobiální aktivity (Xia et al. 2022). Agregátní stabilita jako fyzikální vlastnost půdy je stále více považována za klíčový indikátor kvality půdy a citlivosti k erozi půdy (Nsabimana et al. 2021, Abbas et al. 2021). Paul et al. (2013) uvádí, že i samotná technologie zpracování půdy, ovlivňuje stabilitu půdních agregátů, množství vzduchu a vody.

Postupy zpracování půdy obecně rozdělujeme podle hloubky, intenzity a způsobu prokypření. Volba způsobu zpracování je ovlivňována nejen agrotechnickými podmínkami, ale i používáním různých pěstitelských systémů, ekonomickými a kulturními barierami. Dílčí část hraje také vzdělání a ochota používat nové a ne zcela prozkoumané technologie.

V současné době rozdělujeme zpracování půdy na dvě základní technologie. Technologie konvenční (technologie využívající orbu) a technologii minimalizační (bez použití orby).

Hůla et al. (2008) dále rozdělili minimalizační technologii na:

- Minimalizační s kypřením půdy do malé hloubky.
- Půdoochranné zpracování, zde zůstává minimálně 30 % povrchu zaseté půdy pokryto rostlinnou biomasou.
- Přímé setí (setí do půdy, která není před setím zpracována žádnou kypřicí technologií).

V současnosti se ovšem vyskytují bezorebné technologie se zpracováním do vyšší hloubky a to až do 60 cm (Brant et al. 2020).

Bezorebné technologie vznikly v USA, zde jsou také nejvíce využívány. Brady a Weil (1999) charakterizovali bezorebnou technologii pěti základními variantami:

- NO-TILL – Půda není před setím zpracována žádnou kypřicí technologií.
- RIDGE-TILL – Zpracování půdy do hrůbků.
- STRIP-TILL – Pásové zpracování půdy.
- MULCH-TILL – Technologie s nejméně 30 % pokrytí povrchu půdy rostlinnými zbytky nebo těsně pod povrchem půdy.
- REDUCE-TILL – Jiný systém zpracování půdy a setí, při kterém je nejméně 30 % rostlinných zbytků na povrchu půdy.

Významným faktorem zvyšujícím produktivitu v zemědělství je rozvoj nové techniky, technických řešení a technologických postupů. Technizace a mechanizace zemědělství vedla k dlouhodobému poklesu počtu lidí, kteří se na primární produkci podílí a ke stále většímu používání větších pracovních strojů či použití více kombinací pracovních částí stroje. Bohužel se ukazuje, že přílišná intenzita zpracování půdy může být na závadu a vést ke zhutnění půdy (Kroulík et al. 2009). Zásadním problémem zůstává, že půda po intenzivním zpracování je náchylnější ke všem druhům eroze. Z toho důvodu se začíná vyskytovat jakýsi kompromis mezi zpracováním půdy a následnými potřebami rostlin, zachování úrodnosti a snížení spotřeby pohonných hmot při zpracování (Šařec et Žemličková, 2016). Nové technologie zpracování půdy, které kladou důraz na dostatečné prokypření a zároveň dostatečné pokrytí půdy meziplodinou, byly vyvíjeny za účelem omezení půdní eroze. Princip pásového zpracování půdy spočívá v tom, že půda je kypřena pouze v těch místech, kde poté porostou kulturní rostliny. Tyto technologie jsou možné používat díky navigačním systémům GPS (Mašek et al. 2009). Vhodnost navigačních technologií pro precizní zemědělství také doporučují Rataj et al. (2019). Brant et al. (2020) se ve své studii zaměřují

na porovnání intenzity přejezdů a závislosti velikosti souprav a zvolené technologii se velikost přejeté plochy. Výsledky se pohybují od 42 % pro přímé setí po 88 % u orby. Jak již bylo zmíněno, z důvodu nárůstů celkové hmotnosti pracovních souprav je nutné významně optimalizovat trajektorie pracovních jízd.

Půdoochranné technologie ovlivňují činitelé vodní eroze (Novák et al. 2017). Princip ochrany spočívá ve využívání mulče z posklizňových zbytků nebo přímo vypěstovaných a rozmulčovaných rostlin na povrchu půdy (Li et al. 2018). Tato organická hmota snižuje povrchový odtok. Jako dílčí část ochrany půdy mohou sloužit i organická hnojiva, kde zpracování půdy je redukováno na co nejmenší počet pracovních operací (Brož et al. 2023).

Price et al. (2011) uvádí, že minimalizační zpracování půdy snižuje fyzický pohyb půdy na minimum potřebné pro zakládání plodin a produkci. Když se důsledně používá systém hospodaření s půdou a plodinami, výrazně se snižuje eroze půdy a je uznáváno pro potenciál zlepšit kvalitu půdy a ochranu vody a vodu dostupnou pro rostliny. Výsledky ze studií simulace dešťových srážek ukazují, že minimalizační zpracování půdy může snížit odtok a zvýšit infiltraci v těchto systémech o 29 % až 46 % (Sullivan et al. 2007).

Ve studiích zaměřených na vliv posklizňových zbytků v rámci vodní eroze, jsou posklizňové zbytky hodnoceny kladně. Toto kladné hodnocení ovšem nemusí platit, zaměříme-li se na hodnocení eroze při zpracování půdy. Velké množství nedokonale nadrceného organického mulče na povrchu půdy může znamenat zvýšení přesunu částic. Pracovní nástroje zejména kypřičů mohou být ucpávány a narušují tak tok zeminy při kypření. Pohyb půdních částic ve směru zpracování půdy je tedy výraznější (značný vliv na tuto schopnost organické hmoty má vlhkost, pokud je organická hmota suchá snadněji prochází kypřičem, pokud je vlhkost organické hmoty výrazná, ulpívání a zachytávání půdy je znatelnější) (Zhang et al. 2009).

Každé zpracování orné půdy znamená změnu fyzikálních vlastností (objemovou hmotnost, pórovitost a penetrační odpor), tyto nejdůležitější metody popisuje Dexter (1988) jako stěžejní při zkoumání eroze.

Moreira et al. (2016) uvádí, že půda, poté co je zpracována, se nachází v nakypřeném stavu s razantně zvýšenou pórovitostí a zmenšenou objemovou hmotností. Tyto dosažené vlastnosti půdy jsou hodnoceny kladně vzhledem k rozvoji kořenového systému. Bohužel naměřené parametry nejsou stálé. Přirozené sesedání půdy, vodní srážky a následné vysychání půdy budou časem opět měnit půdní vlastnosti k původním.

Technologie s využitím orby se nazývá konvenční technologií. Konvenční zpracování půdy utužuje ornou půdu pod zoranou vrstvou, na povrchu se nachází půda s velkým množstvím pórů, ovšem pod zpracovanou vrstvou zanikají nekapilární vrstvy a vzrůstá objem nerozložených posklizňových zbytků (Busari et al. 2022). Utužování půdy v podorničí se dá částečně zabránit jízdou traktoru na povrchu půdy, ne po dně brázdy (Kumhála et al. 2007).

Volba vhodné technologie zpracování půdy je poměrně složitý proces. Často tento proces bývá ovlivněn i ekonomickými a sociálními parametry. Do jisté míry je teda i volba technologie ovlivněna dotační politikou (Poláková et Soukup 2020). Nelze navrhnout jednoznačné řešení, které by platilo pro všechny půdní podmínky. Optimální je praktické zhodnocení kvality práce odpovídající zvolenému systému v místních podmínkách. Důležité je také splnění legislativních podmínek DZES (Dobry zemědělský a environmentální stav půdy) na pozemcích s výraznější sklonitostí. Důležité je také podotknout, že tato legislativní omezení jsou zaměřena na erozi vodní a nijak nezahrnují ostatní typy erozí.

3.2 Podstata jevu eroze zpracováním půdy a jeho významnost

Vědecké studie dokazují, že eroze zpracováním půdy je stejně významná jako eroze vodní. Faktory ovlivňující erozi půdy lze rozdělit do dvou kategorií: přírodní a lidské faktory. Řada studií prokázala, že sklon svahu je hlavním přírodním faktorem ovlivňujícím erozi zpracováním půdy a eroze zpracováním půdy se zvyšuje s rostoucím sklonem svahu (Wildemeersch et al., 2014), (Novák, 2018). Lidské faktory v procesu zpracování půdy jsou složité a proměnlivé, což je jedním z úskalí výzkumu eroze zpracováním půdy. V různých topografických a půdních podmínkách si zemědělci vybírají specifické nástroje pro zpracování půdy, vhodný směr a hloubku zpracování půdy podle proveditelnosti a efektivity práce (Xu et al. 2019). To platí i pro podmínky v České republice. Jako hlavní proces degradace půdy je zde stále považována eroze vodní, ale v podmínkách kopcovitého terénu Vysočiny či jižní Moravy studie dokazují srovnatelnost mezi erozí vodní a erozí zpracováním půdy (Novák et al. 2017). Vzhledem k historii vzniku půdních bloků v ČR, kdy byly menší pozemky sloučeny do větších půdních bloků, fenomén degradace půdy nabyl na intenzitě. V současné době je průměrná velikost půdních bloků v ČR jedna z největších v Evropě (Brož et al. 2022).

Govers et al. (1999) ve své studii hodnotili primární zpracování půdy pomocí pluhu a kypřiče. Došel k závěru, že eroze půdy vzniklá tímto primárním zpracováním je shodná

s projevy eroze vodní. Lindstrom et al. (1992) prováděli studii zpracování půdy v severozápadní části USA ve státě Minnesota. Studie byla zahájena s cílem kvantifikovat pohyb půdy obděláváním půdy ve svahovité krajině. Ze získaných výsledků sestavil regresní rovnici, a pokusil se predikovat půdní posun během sto let. Vypočtené průměrné roční čisté rychlosti pohybu půdy směrem od konvexní svahové polohy byly až $30 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Ještě intenzivnější ztrátu půdy publikovali ve své studii Blanco et Lal (2008). Eroze zpracováním půdy v podmínkách západní Evropy může dosáhnout až $60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Lobb et al. (1995) prováděli studii eroze zpracováním půdy v jihovýchodní části Kanady ve státě Ontario. Výsledky studie ukazují, že samotná orba způsobila nejméně 70 % celkové ztráty půdy v důsledku přirozené a orbní eroze. Lobb et al. (1999) také poukazují na lidský faktor při zpracování půdy. Při zpracování půdy může obsluha stroje zahlubovat pracovní nástroje kypřičů hlouběji nebo je naopak vymělit. To do jisté míry ovlivňuje vznikající půdní erozi.

3.3 Poškození půdy

Půdní degradaci lze považovat za problém 21. století (Svoray, 2022). Poškození půdy je problémem celého světa, v současné době je poškozena alarmujícím způsobem 1/3 orné půdy. Mezi hlavní procesy degradace půdy patří zrychlená eroze, vyčerpání zásoby organického uhlíku v půdě a ztráta biologické rozmanitosti, ztráta úrodnosti půdy a nerovnováha prvků, acidifikace a zasolování (Lal, 2015). V podmínkách České republiky jsou největší problémy spojeny s erozí, zhutněním půdy a oduhličováním půdy (Šařec, 2017).

3.3.1 Zhutnění

Zemědělství v jednadvacátém století je charakterizováno vysokou efektivitou. Bohužel je efektivita docílena stále se zvětšující zemědělskou technikou a její hmotností. Právě s nadměrnou hmotností je spojen jev zhutňování půdy a jeho nepříznivé účinky (Kroulík, 2012). Na půdní zhutnění má vliv pojezdový mechanismus tažného prostředku, zda je kolový nebo pásový, ale i prokluz kol a následné smykové napětí (Kumhála et al. 2007). Do jisté míry ovlivňují zhutnění půdy i kypřicí technologie (orba), které jsou prováděné do stále stejné pracovní hloubky (Hůla et al. 2008). S rozrušením půdního zhutnění souvisí také ekonomika pěstování (Pulkrábek et al. 2016). Půdní zhutnění zabraňuje

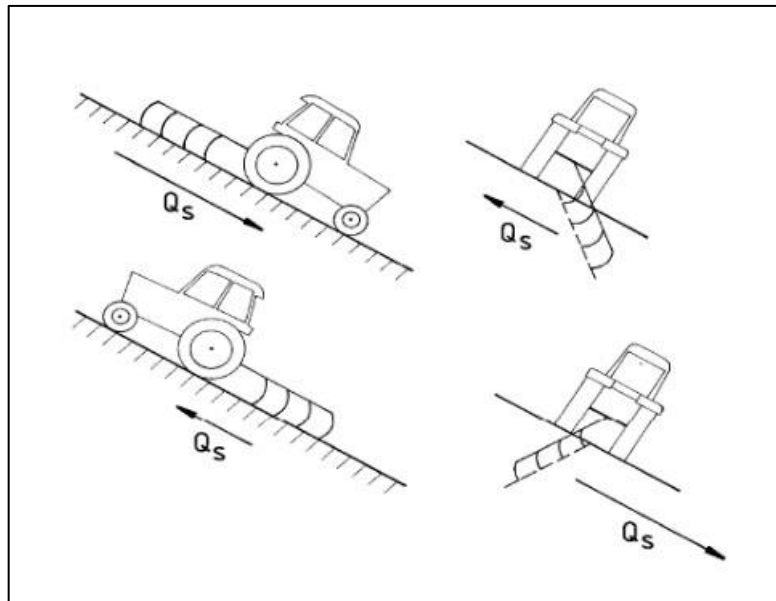
kořenovému systému rostlin pronikat do půdy a čerpat živiny. To negativně ovlivňuje výnosový potenciál dané plodiny (Kroulík et al. 2011). Sklenička (2016) poukazuje na skutečnost, že zhutnělá půda negativně ovlivňuje vsakování vody do půdy. Prudké dešťové srážky pak půda není schopná absorbovat a dochází ke vzniku povrchového odtoku. Je tedy prokázána jistá souvislost mezi zhutněním půdy a vznikem vodní eroze.

3.4 Eroze zpracováním půdy

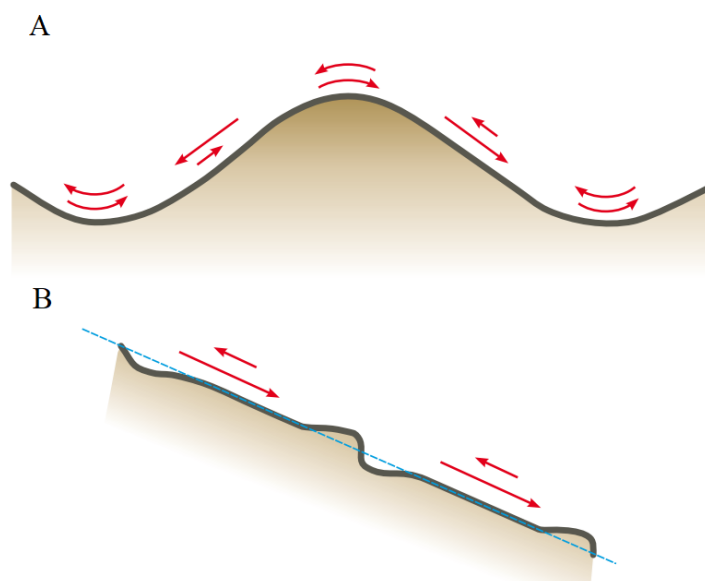
Eroze půdy značí činnost vody, větru, ledu a v posledních dvou desetiletích také činnosti zpracováním půdy. Opomeneme-li totiž základní rizika snižující kvalitu zemědělské půdy, jakými jsou vodní a větrná eroze, úbytek organické hmoty v půdě, omezení biologických aktivit v půdě a zhutnění půdy, tak i samotné zpracování půdy významně přispívá k zmenšování profilu ornice. Zpracováním půdy vyvolaná eroze půdy vede k postupnému odstraňování půdních horizontů a odpovídající akumulaci půdních sedimentů a živin v konkávních částech svahů (Wilken et al. 2020).

Eroze zpracováním půdy je tedy spojena s přemístováním půdy, a to v celém půdním profilu. To bylo důvodem pro studium tohoto jevu, protože mechanismus vodní eroze tento celkový posun nevysvětluje a větrná eroze nedosahuje takové intenzity. Je tedy patrný celkový rozdíl mezi mechanismy erozí působících na půdu. Čím více je půda zpracovávána, tím více je znatelný druh eroze. Jistou roli zde může také hrát technologie a způsob zpracování půdy. Kumhála et al. (2007) uvádí, že na svazích asi 5 až 8 % je třeba orat po vrstevnici, aby brázdami nestékala voda a neodnášela ornici a aby byl k orbě využit otočný pluh. Hůla et al. (2008) uvádí i vhodnost střídání směru pracovních jízd pro omezení nežádoucího dopadu u minimalizační technologie. Při využívání GPS navigačních systémů je snadné dodržet přesné zpracování půdy a nedochází tak k překrytí pracovních operací, snadno je tak dodržena i technologická kázeň (Mašek et al. 2014).

V rámci pracovních operací jsou půdní částice rozrušeny a nadzvednuty. Působením gravitace a kinetické energie vzniklé pohybem pracovního tělesa, půdní částice nedopadají na původní místo, ale jsou po svahu mírně transportovány – obrázek 1 a obrázek 2. Velikost transportu půdy na obrázku znázorňují šipky.



Obrázek č. 1: Mechanismus eroze zpracováním půdy
(Govers et al. 1999)



Obrázek č. 1: Princip eroze zpracováním půdy. (A) Variabilita translokace půdy v kopcovité krajině. Půda přemístěná kypřením bude mít za následek ztrátu půdy na konvexních svahových polohách. Naopak, depozice nastává v konkávních částech svahu (Govers et al. 1999, Hůla et al. 2024 in press).

Eroze zpracováním půdy je globální proces degradace půdy, který je třeba vzít v úvahu spolu s vodní erozí při posuzování vlivů půdy na produktivitu, kvalitu životního prostředí a vývoj krajiny (Van Oost et al. 2006).

Podle Gristina (2022) jsou hlavní faktory, které ovlivňují půdní erozi:

- Textura půdy (erodovatelnost půdy).
- Vlhkost půdy.
- Pracovní rychlost stroje.
- Sklon půdního bloku.

Podle dalších autorů jako jsou: Kouselou et al. 2018, Turkelboom et al. 1999, Novara et al. 2019, Novara et al. 2022, Logsdon 2013, hraje značnou roli také:

- Hloubka a směr zpracování půdy.
- Typ stroje (typ pracovních nástrojů).
- Kategorie zpracování půdy (např. primární zpracování půdy, sekundární zpracování).
- Délka a tvar půdního bloku.
- Počet opakování půdního zpracování.

3.4.1 Půdní eroze

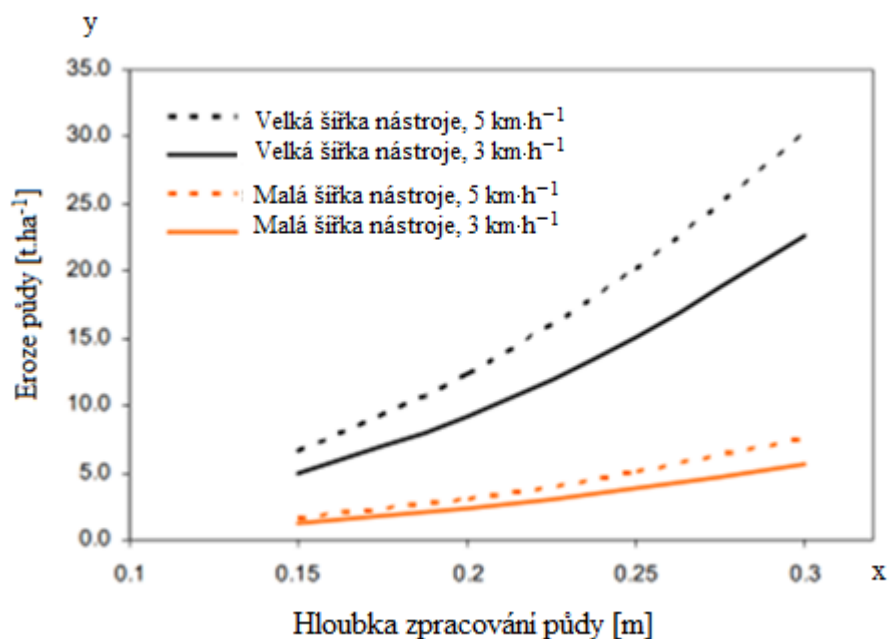
Velikost eroze zpracováním půdy koreluje s charakteristikami krajiny. Topograficky složitější terény jsou vždy náchylnější k erozi zpracováním půdy než relativně rovné nebo jednotné pozemky. Eroze zpracováním půdy se zvyšuje s rostoucím sklonem svahu (Gessess et al. 2015).

Velikost eroze při zpracování půdy je ovlivněna předchozími půdními podmínkami před nebo v době zpracování půdy. Velikost přemístění půdních částic je často vyšší v nezpevněných než ve zpevněných půdách. Předem zpracované půdy se tak přemísťují snadněji než nezpracované půdy. Zvýšení objemové hmotnosti půdy má za následek vyšší míru eroze při zpracování půdy. Objemová hmotnost je dynamická vlastnost půdy, která se mění s obsahem vody v půdě, typem zpracování půdy, texturou půdy a obsahem organické hmoty (Blanco et Lal., 2008). Samotná eroze zpracováním je ovlivněna několika faktory:

- Hloubka zpracování: Čím větší je hloubka pronikání nářadí na zpracování půdy, tím větší je množství půdy dostupné pro přemístění při zpracování půdy.

Hluboké kypření se často používá k rozrušení zhutnělých částí půd, zejména v kolejových rádcích a souvratích pozemků. Zvýšení hloubky zpracování z 20 na 40 cm může zvýšit přemístění půdy o 75 % (St. Gerontidis et al. 2001).

- Rychlost zpracování: Rychlost zpracování půdy je hlavním řízením posunu a dopravy půdy, která se lineárně zvyšuje se zvyšováním rychlosti traktoru. Odhaduje se, že snížení rychlosti zpracování půdy ze 7 na 4 km h⁻¹ snižuje erozivitu zpracování půdy asi o 30 % (Quine et al. 2003). Viz obrázek číslo 3.

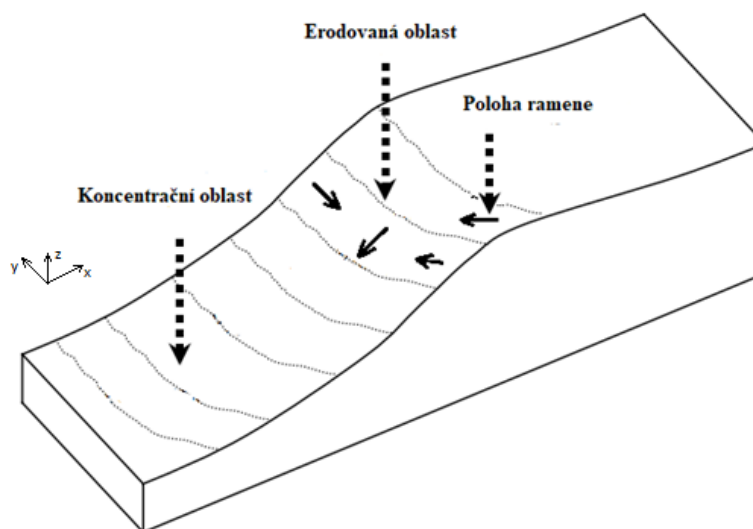


Obrázek č. 3: Závislost eroze zpracováním půdy a pracovní rychlosti při zpracování (Quine et al. 2003).

- Frekvence obdělávání půdy: Čím vyšší je počet přejezdů strojů na zpracování půdy, tím větší množství půdy je přemístěno (Blanco et Lal, 2008).

3.4.2 Eroze zpracováním půdy a vlastnosti půdy

Vlastnosti půdy: Změny profilových charakteristik ovlivňují variabilitu půdních vlastností ornice a podložních horizontů. Odstraněním ornice z poloh ramen se odkryje podloží s odlišnými fyzikálními, chemickými a biologickými vlastnostmi od původní půdy – obrázek číslo 4.



Obrázek č. 4: Eroze ornice

(Blanco et Lal, 2008), upravil (Brož, 2022).

Eroze zpracováním půdy mění vlastnosti půdy. Objemová hmotnost, pórovitost, schopnost zadržovat vodu, hydraulická vodivost, organický a anorganický C, pH a biologické aktivity patří mezi první vlastnosti půdy, které lze snadno změnit půdní erozí. Svahy ramen mají obvykle vyšší obsah jílu než rovinné oblasti (Heckrath et al. 2005). Odkrytí jílovitého podloží negativně ovlivňuje strukturu půdy, zadržování vody a koloběh živin. Odhalená podloží jsou bohatá na obsah uhličitánů, ale chudá na obsah organického C v půdě (Papiernik et al. 2005). Půdy na konvexních polohách mají také vyšší rychlost odpařování a odvodňování než půdy na konkávních polohách, které mají vyšší obsah půdní vody. Ztráty v organické hmotě jsou lineárně korelovány se ztrátami v půdě (Li et Lindstrom, 2001). Eroze zpracováním půdy také přenáší živiny a chemikálie (například dusičnany) do níže položených oblastí, zvyšuje tak koncentraci, což je proces, který může způsobit znečištění podzemních vod.

3.4.3 Propojení mezi erozí zpracováním půdy a dalšími druhy eroze

Eroze obděláváním půdy se do značné míry shoduje s vodní a větrnou erozí. Podobnosti erozí jsou uvedené v tabulce číslo 1. Vodní a větrná eroze je například řízena dešťovými srážkami a intenzitou větru, zatímco eroze zpracováním půdy je ovlivněna intenzitou zpracování půdy.

Tabulka č. 1: Podobnosti a rozdíly mezi erozí zpracováním půdy, vodní a větrnou erozí (Blanco et Lal., 2008)

Eroze zpracováním půdy	Vodní eroze	Větrná eroze
Závisí na intenzitě zpracování půdy	Závisí na intenzitě deště a síle povrchového odtoku	Závisí na intenzitě větru
Nevytváří rýhy (jako vodní eroze)	Vytváří rýžky, rýhy a výmoly	Akumuluje půdní částice a vytváří převěje
Translokace půdních částic posunem a rotací	Transport velkých i malých půdních částic posunem	Transport půdních částic ve formě suspenze, skokem, saltací nebo sunutím po povrchu
Nepřesouvá půdní částice mimo pozemek	Přesouvá půdní částice mimo pozemek	Přesouvá půdní částice mimo pozemek
Translokace půdy na malou vzdálenost	Může přesouvat půdní částice na velkou vzdálenost	Může přesouvat půdní částice na velkou vzdálenost
V krajině nevytváří viditelné formy eroze a má pomalý proces	V krajině vytváří viditelné formy eroze (rýhy) a má rychlý proces	V krajině vytváří viditelné formy eroze a má rychlý proces
Je ovlivněna sklonem pozemku a půdními podmínkami	Je ovlivněna sklonem pozemku, délkou pozemku a půdními podmínkami	Převážně je ovlivněna půdními podmínkami

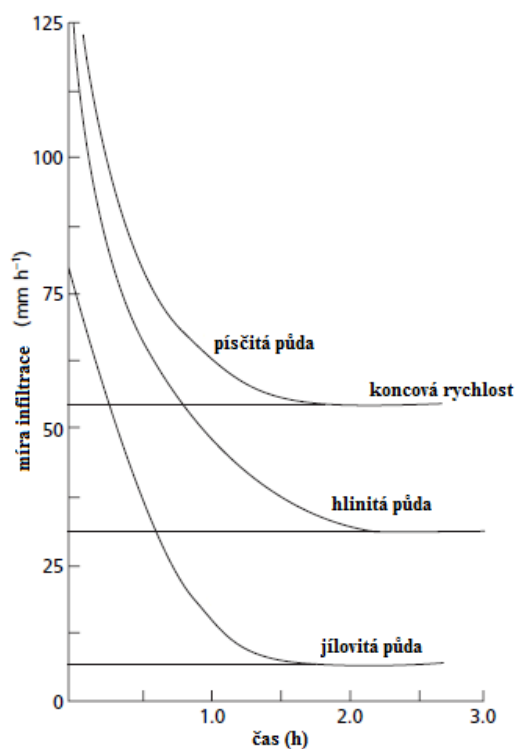
Obdělávání půdy, na rozdíl od vody a větru, zřídka transportuje půdu mimo místo, kde je půda obdělávána, ale redistribuuje ji přímo na poli. Velké množství volné půdy se postupně sesouvá se svahu dolů (Blanco et Lal, 2008).

Papiernik (2005) uvádí, že kypření půdy při zpracovávání je prováděno rovnoměrně a v celé vrstvě půdy. Takto zpracovaná půda je tedy ještě více náchylnější k erozi vodní a erozi větrné. Eroze zpracováním půdy tedy kromě fyzického přemísťování půdních částic, nepřímo přispívá k erozi vodní a erozi větrné. Shodné výsledky jsou zaznamenány i v dalších studiích.

Wang et al. (2016) uvádí, že mezi vodní erozí a erozí zpracováním půdy mohou existovat silné interakce. Tyto interakce byly poprvé identifikovány Lobbem et al. (1995) a jsou od té doby předmětem teoretického výzkumu. Ovšem velký nedostatek údajů u hydrodynamických parametrů a dynamice půdní erodovatelnosti v systémech svažitých polí je znatelný dodnes. Výsledky experimentů ukazují, že čím intenzivnější bylo zpracování půdy, tím větší byly vytvořené koncentrace sedimentu. Wang také popisuje vliv hloubky zpracování a vhodnost velikosti pozemku. Ge et al. (2007) uvádí, že rychlost eroze půdy v horních a středních částech svahu byla intenzivnější než v dolní části. Experimentální svah měl délku 110 m a průměrnou svažitost 10,12 %. Vztah mezi zpracováním půdy a vodní erozí byl popsán kvadratickou funkcí.

Tuto problematiku také částečně publikoval Morgan (2005). Morgan hovoří o rychlosti infiltrace vody v závislosti na vlastnostech půdy, a tedy i jejím zpracování. Obecně platí, že půdy s hrubou texturou, jako jsou písky a písčité hlíny, mají vyšší míru infiltrace než jílovité půdy, protože obsahují větší mezery mezi póry. Popis půdy je zaznamenán na obrázku číslo 5. Podle Derpsch et al. (1991) ale záleží na velikosti půdních částic nacházejících se na povrchu dané půdy a schopnosti půdy vytvářet krusty. Tvorba povrchové krusty vzniká ucpáním vzduchových pórů v půdě. Toto ucpání je zapříčiněno prudkým dopadem dešťových kapiček. Účinek dešťových kapiček na částice půdy je nejnadhěji určen velikostí hybnosti jedné kapky, která spadá na šikmou plochu. Dešťová kapka s určitou kinetickou energií způsobí po dopadu oddělení malých částeczek půdy, které zakryjí a ucpou povrchové póry v půdě a vytvoří kluzkou povrchovou vrstvičku. Dešťová voda potom stéká spolu s malými částeczkami půdy až k místu, kde se jejich rychlost vlivem sklonu pozemku sníží a dochází k usazování částic půdy.

Velikosti půdních částic nacházejících se na povrchu půdy a vliv používaných technologií na tuto problematiku také publikovali Vomáčka et al. (2019), Kroulík et al. (2007) nebo Chyba et al. (2013). Kroulík et al. (2007) zmíněnou problematiku doplňuje o infiltrační schopnost půdy, pokrytí povrchu půdy zbytky plodiny a hodnoty objemové hmotnosti zeminy. V závěru zdůrazňuje vliv technologií na pórovitost půdy.



Obrázek č. 5: Typické míry infiltrace pro různé půdy (Withers et Vipond 1974), upravitel: (Brož 2022).

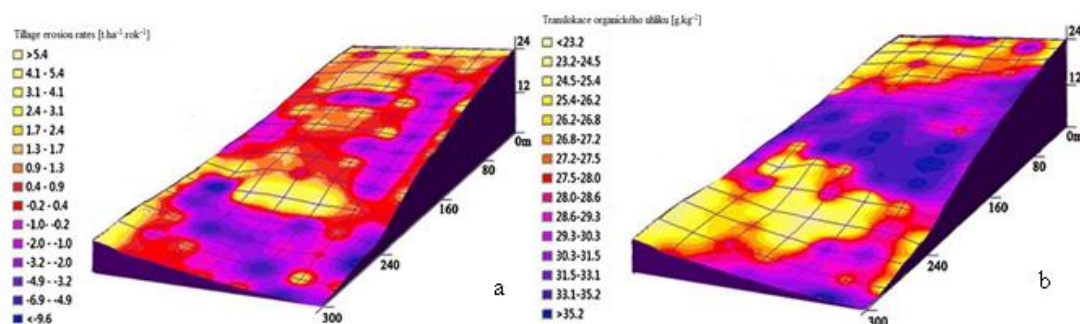
Dílním způsobem je eroze ovlivněna stavem půdy ještě před samotným erodováním. Loch et Foley (1994) ve své studii zmiňují důležitost počáteční vlhkosti půdy. Odolnost půdních agregátů proti dopadům kapek deště je ovlivněna právě půdní vlhkostí. Při dopadu kapek na vyschlou půdu dochází k intenzivnějšímu rozrušení půdních agregátů a výraznějšímu vyplavování půdních částic. To způsobuje větší ztrátu zpracované půdy a ještě dochází k intenzivnějšímu efektu ucpávání půdních pórů. Následně dochází ke zvýšení povrchového odtoku vody ze zpracované půdy.

3.4.4 Vliv eroze půdy na půdní organický uhlík (SOC)

Velmi významný problém celosvětového zemědělství je ztráta půdního uhlíku. Tato ztráta je způsobená několika faktory. Jedním z důvodů může být omezená živočišná produkce, nebo příliš velké využití rostlinných zbytků k energetickým účelům. To je často ovlivněno dotační politikou. Organická hmota se na půdy často aplikuje jako hnůj nebo kompost. V posledních dobách je také velmi často využíváno odpadu z bioplynových stanic a čistíren odpadních vod. Rozklad organických látek v půdách s nízkým obsahem uhlíku může představovat problém (Ames et al. 1984).

Světové půdy jsou sice třetí největší globální zásobou uhlíku po oceánských a geologických zásobách uhlíku. Obsahují asi dvakrát více organického uhlíku než atmosféra a třikrát více než biomasa. Půda může být hlavním zdrojem nebo propadem emisí oxidu uhličitého (CO₂) v závislosti na využití půdy a režimu hospodaření. Redukované a minimalizační zpracování půdy oproti konvenčnímu zpracování nabízí potenciál ke zvýšení zásob organického uhlíku v půdě (Frank et al. 2015).

Zhao et al. (2018) ve své studii pozorovali erozi zpracováním půdy a s touto problematikou spojený úbytek organického uhlíku (SOC-soil organic carbon). Uhlík vázaný v orné vrstvě půdy určuje zásoby živin. Nedostatek živin v konkrétní oblasti vede ke kolísání úrodnosti půdy. Na obrázku číslo 6 je zaznamenána translokace půdních částic v důsledku orby a prostorová translokace organického uhlíku. Vysoké ztráty půdy nastaly v horní a spodní část svahu, zatímco oblasti střední a spodní části odrážely akumulaci půdy. Translokace organického uhlíku vykazovala přibližně opačný trend než eroze při obdělávání půdy na studovaném poli a koncentrace organického uhlíku negativně korelovaly s mírou eroze při zpracování půdy, což naznačuje, že eroze při zpracování půdy pravděpodobně přispěla k redistribuci organického uhlíku.



Obrázek č. 6: Pohyb půdních částic (obr. a) a translokace organického uhlíku (obr. b) (Zhao et al. 2018), upravil: Brož (2024).

Van Oost et al. (2005) publikovali, že zpracování půdy redistribuuje půdu v množstvích, která často převyšují účinek redistribuce půdy vyvolané pouhou vodní erozí. Studie ukázaly důležitost zpracování půdy pro variabilitu půdy v rámci pole a dospěly k závěru, že eroze zpracováním půdy výrazně koreluje (vede k významným tokům C) s přesouváním organického uhlíku. Bohužel se ale vyskytuje i závislost orné vrstvy půdy a samotného podloží, příměsí v podloží s nízkým obsahem organického uhlíku pak při orbě

ředí vrstvy organického uhlíku na povrchu. To znamená, že orná vrstva organického uhlíku je erodována rychleji, než je nahrazována (nahrazována z podloží ale i z rostlinné produkce). Kromě výše zmíněných problémů může eroze půdy vést ke ztrátě čisté primární produkce, tedy výnosu pěstovaných plodin. Nedostatek vegetačního krytu po většinu roku tak zintenzivňuje vodní erozi. Tento koloběh pak přispívá k dynamičnosti celkové eroze (Wang et al. 2019). Hou et al. (2021) poukazují na skutečnost, že jemnější, méně husté částice, se vyznačují vyšším obsahem organického uhlíku než hrubší, hutná zemina. K podobným výsledkům dochází i Wacha et al. (2020), navíc publikuje, že na velikost ztráty organického uhlíku má vliv správná orientace zpracování půdy. Zhao et al. (2012) rozdělují uhlík (SOC) podle jeho aktivity v půdě. Rozdělení je na frakci aktivního uhlíku a frakci pasivního uhlíku. Parton et al. (1987) ještě aktivní frakci uhlíku rozdělují na část rychlou (střední doba zadržení je asi 1-5 let) a část pomalou (střední doba zadržení 20-40 let). Zhao et al. (2012) takto rozdělený uhlík porovnávají s velikostí vzniklých agregátů po zpracování půdy. Došel k závěru, že zpracování půdy má vliv na zmíněnou koncentraci. Ve studii byly provedeny tři technologie zpracování půdy, technologie bez orby, technologie s orbou a technologie s použitím hloubkového kypření. Z výsledků je patrné, že v technologii bez orby došlo k většímu zvýšení uhlíku v makroagregátech. Jako makroagregáty autor označuje části půdy větší než 250 μm . Dále ale autor uvádí, že orba vedla k vyšší koncentraci uhlíku v agregátech o velikosti 50-500 μm . Systémy dlouhodobého zpracování půdy tedy významně ovlivní frakce a složení uhlíku v půdě. Schjonning et al. (2009) publikují i jistou shodu mezi množstvím organického uhlíku a fosforu v půdě. Potvrzuje výsledky předchozích autorů o směru pohybu půdy a přikládá alarmující zjištění i o pohybu dalších prvků. Z výsledku je patrné, že rozdíl obsahu prvků mezi erodovanou a neerodovanou půdou byl až 38 %.

3.4.5 Vliv technologií zpracování půdy na erozi půdy

Snížení intenzity zpracování půdy může snížit množství přemístěné půdy a vzdálenost přesunu, tudíž může dojít ke snížení míry eroze. Jak už bylo zmíněno, jednotlivé části strojů, jejich nástroje a geometrické tvary ovlivňují velikost půdní eroze. Podobným způsobem dochází k ovlivnění posunu při použití jednotlivých technologií zpracování půdy. Kouselou et al. (2018) porovnávali velikost posunu půdy a míru eroze při zpracování půdy v různých systémech. Ve studii byla použita orba (konvenční zpracování půdy), hluboké kypření půdy bez obracení půdy (redukované zpracování půdy), mělké kypření

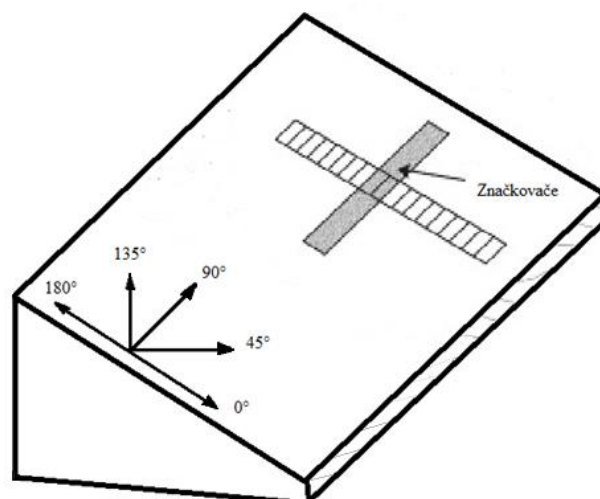
(minimalizační zpracování půdy) a systém bez použití zpracování půdy. Konvenční zpracování půdy podél vrstevnice způsobilo výrazně větší posun půdy (až 57 cm) ve směru zpracování půdy než snížené a minimální systémy zpracování půdy (~20 a ~15 cm, v tomto pořadí). Konvenční zpracování půdy také způsobilo laterální posun půdy (směrem dolů v hlavním směru svahu, míra eroze při zpracování půdy) než redukované nebo minimální systémy zpracování. Celkový naměřený posun půdních částic ve směru jízdy byl třikrát větší u konvenční technologie než u redukované technologie a čtyřikrát větší než u technologie minimalizační.

3.4.6 Vliv směru zpracování půdy na erozi půdy

Když se zpracování půdy provádí nahoru ve směru svahu, půda se pohybuje nahoru a posunutí je redukováno. Ovšem když je zpracování půdy prováděno směrem se svahu, zpracování půdy definuje maximální translokaci půdy směrem dolů (De Alba et al. 2006).

Většina studií o erozi při zpracování půdy je založena na určitém směru zpracování půdy a jen zřídka používá směr zpracování půdy jako proměnnou. Mnoho studií uvádí vztah posunu půdních částic v závislosti na použitém stroji, na typu pracovního nástroje, na pracovní rychlosti. Některé studie se zaměřují na směr zpracování půdy, a to v závislosti, zda je pracovní operace prováděna proti svahu či po svahu (Heckrath et al. 2006; Zhao et al. 2018). Xu et al. (2019) publikují studii, jak směr zpracování půdy ovlivňuje translokaci půdy a jaký je vliv kombinovaného působení mezi sklonem svahu a směrem zpracování půdy. Studie byla provedena na jihozápadě Číny v okrese Yuanmou. V experimentu bylo vybráno pět směrů zpracování půdy v intervalech 45° od 0° do 180° a do půdy byly umístěny značkovače. Obrázek číslo 7 znázorňuje použití experimentu. Výsledky studie dokazují, že obdělávání svahu proti svahu je efektivnější a vede ke snížení půdní eroze.

Autoři hodnotí účinky translokace půdy ve směrech 135° a 180° jako shodné, ale z důvodu obtížnosti zpracování půdy na strmých svazích doporučují, aby se použilo šikmé stoupání (135°). Další autoři, kteří se zaměřovali na problematiku vlivu směru zpracování půdy byli Heckrath et al. (2006). Autoři posuzovali vliv posunu na lehké půdě v mírně zvlněné oblasti dánského Jutska. Bylo zjištěno, že vliv směrovosti zpracování půdy na redistribuci půdy při orbě nahoru a dolů ve svahu pod úhlem 45° ke směru maximálního sklonu, otáčení půdy nahoru, bylo nejméně erozní.



Obrázek č. 7: Směry pohybů zpracování půdy při experimentu
(Xu et al. 2019), upravil: (Brož 2023).

3.5 Metody používané pro hodnocení eroze půdy

Pro sledování eroze zpracováním půdy se využívají různé metody. Využívají se indikátory určené pro jednotlivá měření či indikátory používané pro celé série měření. Značkovače umístěné do půdy před zpracováním půdy mají tu výhodu, že konkrétní eroze půdy může být izolována od dlouhodobé eroze, která je vždy kombinací různých erozních procesů (Fiener et al. 2018).

Značkovače můžeme rozdělit na mikroindikátory (průměr < 2 mm) a makroindikátory (průměr > 2 mm). Mikroindikátory se aplikují jako rozpuštěné látky nastříkané na půdu, např. roztok chloridu sodného (Barneveld et al. 2009), nebo jako magnetické částice (Zhang et Li, 2011). Typickými makroindikátory jsou barevné kameny (Zhang et Li, 2011, Logsdon, 2013, Brož et al. 2020) a různé druhy kovů, většinou hliníkové kostky (Barneveld et al. 2009), které jsou často jednotlivě číslovány. Kromě toho byly použity přístupy, které se pokoušejí napodobit půdu se záměrem realističtěji simulovat pohyb půdy, například barevné agregáty půdy (Dupin et al. 2009). Hlavní výhodou makrostopovačů je, že ve většině případů lze sledovat pohyb jednotlivých, očíslovaných částic. Hlavní nevýhodou je velmi zdlouhavá aplikace a zejména vyhledávání značkovačů ze zpracované vrstvy půdy.

3.5.1 Metoda makroznačkovaců „tracers„

Nejčastěji používanou metodou pro měření posunu půdních částic je metoda „tracers„ (Govers et al. 1999, Zhang et al. 2009). Princip této metody spočívá v umístění stopovačů (tracers) do půdy. Následuje prokypření půdy pomocí daného pracovního stroje a následné zaměření polohy. Přehled jednotlivých stopovačů použitých pro měření posunu půdních částic uvádí Logsdon (2013). Stopovače jsou vloženy v řadě do drážky. Drážka se stopovači je umístěna kolmo na směr pracovní jízdy stroje. Hliníkové krychličky mohou být očíslovány od 1 do 20. Délka hrany krychličky stopovače je 16 mm. Hustota hliníku je podobná hustotě minerálních částic v půdě, jak uvádí Van Muysen et al. (2002).

3.5.2 Metoda makroznačkovaců „drť bílého vápence„

Druhou velmi často používanou metodou je drť bílého vápence o velikost částic 10-16 mm. Drť je umístěna do rýh širokých 0,20 m a dlouhých 1 m. Rýhy jsou delší stranou situovány kolmo ke směru následujících jízd strojů na zpracování půdy. Hloubka rýh a následného zasypaní je volena tak, aby hloubka odpovídala nastavené hloubce působení pracovních nástrojů strojů na zpracování půdy. Při zpracování půdy do hloubky větší než 0,12 m bývá použita kromě bílého vápence i drť vápence odlišné barvy. Takto odlišná značkovací tělíska jsou před zpracováním půdy uložena do rýh ve dvou vrstvách. Po projetí soupravy traktoru s příslušným strojem jsou tělíska ručně z půdy vybrána v úsecích po 0,30 m nebo 0,15 m, ve směru jízdy strojů. Úseky jsou rozděleny i ve směru příčném na tři části po 0,33 m. Následným zvážením je zjištěna hmotnost tělísek jako ukazatel posunu půdních částic zpracováním půdy. Největším nedostatkem metody je její pracnost (zdlouhavé je ruční vybírání velkého počtu tělísek z půdy po jejím zpracování) - (Logsdon 2013).

4 Modelování eroze půdy

Modelování eroze je důležité pro pochopení procesů, jimiž se eroze půdy řídí. Předpovídání rychlosti eroze půdy a identifikace, respektive výběr vhodných opatření proti erozi může značným způsobem snižovat ztrátu tak vzácného přírodního útvaru jako je půda. Modelování umožňuje pochopení procesů řízení eroze, vyhodnocení dopadů eroze na konkrétním místě, identifikaci strategie pro kontrolu eroze a hodnocení výkonnosti postupů ochrany půdy pro snížení eroze (Blanco et Lal, 2008).

Dobře vyvinuté a správně kalibrované modely poskytují dobré odhady rizik eroze půdy. Modely musí umět integrovat procesy, faktory a příčiny v různých prostorových a časových měřítcích. Mnoho modelů má různé predikční schopnosti. Tyto schopnosti jsou dále podporovány příchodem technologických nástrojů, jako je dálkový průzkum Země a GIS, zvyšuje se tak užitečnost erozních modelů. Dálkové snímání je užitečné například k odhadu zemského pokryvu ve velkých zeměpisných oblastech, což je kritický vstup pro modelování eroze. Dálkový průzkum Země a nástroje GIS také umožňují škálování modelovaných dat z malých ploch (např. USLE) na velké plochy (Blanco et Lal, 2008).

Nearing (2017) rozděluje erozní modely na tři skupiny: empirické, koncepční a fyzikálně založené. Empirické modely vycházejí z analýz experimentálního měření v terénu a vlivů jednotlivých faktorů na erozi. Empirické modely vycházející z rovnice USLE (Wischmeier et Smith, 1978), hodnotí erozi z dlouhodobého hlediska. Výhoda empirických modelů tkví především v relativně malé náročnosti na vstupní data. Nevýhodou je omezená schopnost popisu časové a prostorové homogenity srážek. Dalším způsobem, jak lze erozi půdy modelovat je deterministické modelování pomocí modelu kinematické vlny (Liu et al. 2004).

4.1 Universal Soil Loss Equation (USLE)

Nejznámějším empirickým modelem je USLE (RUSLE), revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy (Wischmeier et Smith, 1965). Dlouhodobá průměrná roční ztráta erozí je zde vyjádřena rovnicí:

$$G = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

G = průměrná dlouhodobá ztráta půdy [$t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$],

R = faktor erozní účinnosti dešťů [$\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$],
K = faktor erodibility půdy [$\text{t} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{h}$],
L = faktor délky svahu [-],
S = faktor sklonu svahu [-],
LS = bývá také souhrnně nazýván topografický faktor,
C = faktor ochranného vlivu vegetačního pokryvu [-],
P = faktor účinnosti protierozních opatření [-].

Z rovnice USLE (RUSLE) vycházejí i další erozní modely. Jedná se například o modely WATEM/SEDEM. Jako další empirické modely lze uvést model založený na multikriteriálním bodovém ohodnocení hlavních erozních faktorů (Kliment, Langhammer, 2005) nebo model SPADs (De Vente et al. 2008).

4.2 Empirický model eroze

WaTEM/ SEDEM je empirický model eroze a transportu sedimentů. Model byl vyvinut na katedře Fyzikální a regionální geografie Katolické univerzity v Lovani v Belgii. Je spojením dvou modelů: WaTEM (Water and Tillage Erosion Model) a SEDEM (Sediment Delivery Model), které byly vyvinuty na stejném výzkumném pracovišti za finanční podpory Územního odboru Ministerstva pro Flandry (Vaas Oost et al. 2000).

WaTEM/ SEDEM je charakterizován jako jednoduchý a uživatelsky přívětivý software. Vývoj modelu byl proveden za účelem hodnocení vlivu zemědělského hospodaření na krajinu a posuzování účinnosti protierozních opatření. Používá se při odhadu ztráty půdy zejména při působení vodní eroze. Pomocí modelu lze předpovídat i usazování degradovaných půdních částic. Výsledky by měly napomoci při plánování efektivních protierozních opatření a při určování vhodných osevních postupů, s tím souvisejícím zpracováním půdy, na jednotlivých pozemcích (Van Rompaey et al. 2007).

K vypočtení průměrné roční ztráty půdy používá model WaTEM/ SEDEM výše zmiňovanou rovnici RUSLE. Vlastnosti povrchového odtoku jsou počítány na základě algoritmu, který zahrnuje velikost pozemků, směr zpracování půdy a přítomnost mezí, cest či krajinných prvků (Van Rompaey et al. 2007).

Vstupy v modelu WaTEM/SEDEM tvoří průměrné roční hodnoty jednotlivých faktorů. Pracuje se soubory ve formátu softwaru Idrisi32. Nejprve model spočítá

dlouhodobou průměrnou roční ztrátu vodní erozí. Tato ztráta vychází z rovnice Empirického modelu USLE (RUSLE).

Popis vstupů v modelu VaTEM/SEDEM

R - Erozní účinnost srážek

Janeček et al. ve své publikaci z roku 1992 uvádí, že erozní účinnost srážek je závislá na počtu a intenzitě. Pro území České republiky tak byla prvotně stanovena průměrná hodnota $20 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$. Do výpočtu zahrnul dešťové srážky o vydatnosti rovné a vyšší 10 mm. Intenzita těchto srážek byla rovná nebo vyšší $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Tato průměrná hodnota je vztažena k vegetačnímu období.

Nastupující klimatická změna, na území České republiky, ovšem vedla k změně srážkových intenzit (Chloupek et al. 2004). Proto Janeček et al. (2006) předpokládají nárůst hodnoty R faktoru a doporučuje optimalizovat hodnotu R faktoru na velikost 45 až $66 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$.

Dostál et al. (2006) také provedli výpočet R faktoru pro 37 srážkoměrných stanic v České republice za období 2000-2005. Hodnoceny byly srážky s maximální intenzitou alespoň $24 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ a celkovým úhrnem alespoň 12,5 mm. Výsledky faktoru R byly stanoveny na $74 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$. Od roku 2016 doporučuje VÚMOP, v.v.i. pro výpočet používat novou mapu regionalizovaného faktoru erozní účinnosti přívalového deště (R), která byla pro ministerstvo životního prostředí (MŽP) připravena v roce 2015.

K - faktor erodibility půd

V rovnici USLE je K faktor definován jako faktor, který představuje náchylnost půdy k erozi nebo-li schopnost půdy odolávat působení rozrušujícího účinku deště a transportu povrchového odtoku (Vopravil et al. 2009). Zastupuje půdní vlastnosti a charakteristiky, které se významně podílí na vzniku erozního procesu (zrnitost půdy, infiltrace a propustnost půdy, obsah humusu aj.). Faktor erodovatelnosti půdy byl stanoven podle hlavních půdních jednotek (HPJ) bonitační soustavy půd v měřítku 1: 5 000 (VÚMOP, 2022).

LS - faktor délky a sklonu svahu

Vliv sklonu a délky svahu na intenzitu eroze je vyjádřen kombinací faktoru sklonu svahu S a faktoru délky svahu L, tzv. topografickým faktorem LS v charakteristických (reprezentativních) odtokových drahách na vyšetřovaném pozemku, který představuje

poměr ztrát půdy na jednotku plochy svahu ke ztrátě půdy na standardním pozemku o délce 22,13 metrů se sklonem 9 %, L - faktor délky svahu vyjadřuje vliv nepřerušené délky svahu na velikost ztráty půdy erozí, S – faktor sklonu svahu vyjadřuje vliv sklonu svahu na velikost ztráty půdy erozí (Janeček et al. 2007).

C - faktor vlivu pěstované vegetace na půdě

Vliv vegetačního pokryvu na smyv půdy se projevuje přímou ochranou povrchu půdy před destruktivním působením dopadajících dešťových kapek a zpomalováním rychlosti povrchového odtoku a nepřímo působením vegetace na půdní vlastnosti, zejména na pórovitost a propustnost, včetně omezení možnosti zanášení pórů jemnými půdními částicemi a mechanickým zpevněním půdy kořenovým systémem. Ochranný vliv vegetace je přímo úměrný pokryvnosti a hustotě porostu v době výskytu přívalových dešťů (měsíce duben – září). Proto dokonalou protierozní ochranu představují porosty trav a jetelovin, zatímco běžným způsobem pěstované širokořádkové plodiny (kukuřice, okopaniny, sady a vinice) chrání půdu nedostatečně (Janeček et al., 2007).

P - faktor protierozních opatření

Hodnoty faktorů účinnosti protierozních opatření P jsou uvedeny v Tabulce č. 2. Jestliže na pozemku nejsou tato opatření uplatněna nebo nelze předpokládat, že by byly dodrženy uvedené podmínky maximálních délek a počtů pásů, nelze s účinností příslušných opatření vyjádřených hodnotami faktoru P počítat a hodnota faktoru P = 1 (Janeček et. al., 2007).

Tabulka č. 2: Hodnota faktoru P (Janeček et. al., 2007).

Protierozní opatření	Sklon svahu [%]			
	2-7	7-12	12-18	18-24
Maximální délka svahu po spádnici při konturovém obdělávání	120 [m]	60 [m]	40 [m]	0 [m]
	0,6	0,7	0,9	1,0
Maximální šířka a počet pásů při pásovém střídání	40 [m]	30 [m]	20 [m]	20 [m]
	6 pásů	4 pásy	4 pásy	2 pásy

Okopaniny s víceletými píceřinami	0,30	0,35	0,40	0,45
Okopaniny s ozimými obilovinami	0,50	0,60	0,75	0,90
Hrázkování, resp. přerušované brázřování podél vrstevnic	0,25	0,30	0,40	0,45

(modře znázorněná hodnota koef. P)

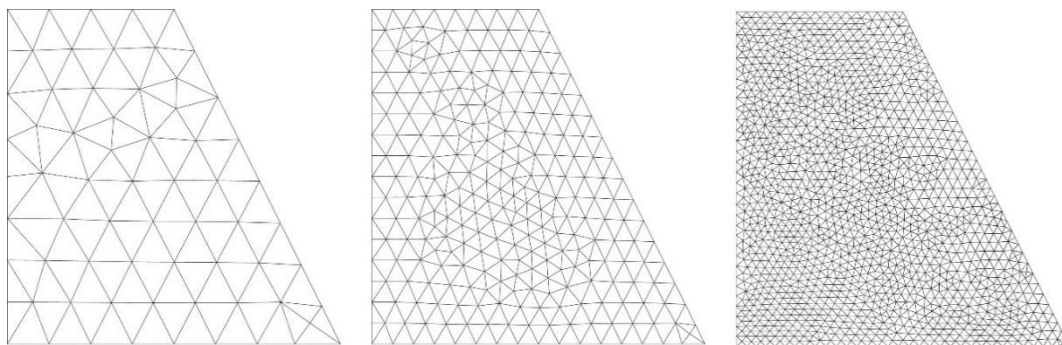
4.3 Dynamický model

Když pracovní nástroje zpracovávají půdu, dochází tak k uvolňování půdních částic. Tyto uvolněné částice začnou proudit ve směru zpracování a na svažitéch pozemcích dochází ke změně proudu částic ve prospěch svahu za působení zemské gravitace. Velikost svahu tak do značené míry ovlivňuje směr toku půdních částic.

Svah s jednoduchou konfigurací lze obecně zjednodušit jako jednorozměrný (1D) svah s hladkým a jednotným povrchem. Proces generování toku vody (směsi vody a půdy) na tomto druhu svahu lze simulovat průměrnou infiltrací vody do půdy a teorií jednorozměrných kinematických nebo difúzních vln (Liu et al. 2004). Skutečný svah však obecně není hladký a vykazuje místní nepravidelnosti. Proudění zeminy při zpracování půdy přenáší půdní částice do níže položených oblastí a vytváří tak koncentrovaný přenos. Simulace těchto koncentračních tras na povrchu svahů je důležitá pro predikci tvorby eroze půdy (Li et al. 2003). Proces tvorby toku vody na svahu se složitou topografií by měl být simulován tak, aby byl proces koncentrace proudění adekvátně reprezentován.

Jednorozměrný dynamický model obecně používaný v pozemním proudění není schopen simulovat tvorbu intenzity přenosu půdy a koncentraci pozemního proudění na nepravidelných svazích. Jedním z možných způsobů je využití dvou-rozměrného modelu. Pro každý bod je specifikována jiná rutina toku zeminy a vypočítá se tak zvýšení a snížení zeminy v sousedních bodech. Pro simulaci toku zeminy jsou propojeny vždy tři body. Toto propojení tvoří trojúhelníky, které jsou viditelné na obrázku číslo 8. Jednotlivé obrázky se liší v hustotě oblasti diskretizační sítě (100, 500 a 2500 bodů). Triangulace podle Delauneyho (1934) oblast je diskretizována takovým způsobem, aby jednotlivé trojúhelníky byly optimální. To znamená, co nejbliže rovnostrannému trojúhelníku. Z čehož vyplývá, že optimální síť není rovnoměrná síť. Charakter sítě je dán tvarem hranice a hustotou sítě. Difúzní vlna je na této síti řešena numerickou integrací. S rostoucí hustotou sítě roste přesnost numerického řešení rovnice, ale zároveň roste výpočet náročnosti úloh. Volba

optimální hustoty sítě je v řadě případů problematika kvalifikovaného odhadu. Nicméně existuje celá řada robustních teorií (Dolejší et al. 2019). Kvalita sítě je dána nejhorším poměrem mezi největší a nejmenší výškou trojúhelníku. Čím je číslo poměru blíže k číslu 1, tím je síť kvalitnější. Na základě této myšlenky byl aplikován model difúzní vlny.



Obrázek č. 8: Trojúhelníková diskretizace dvou-rozměrné oblasti pro řešení využitelné pro řešení kinematické vlny metodou konečných prvků (Dolejší et al. 2019).

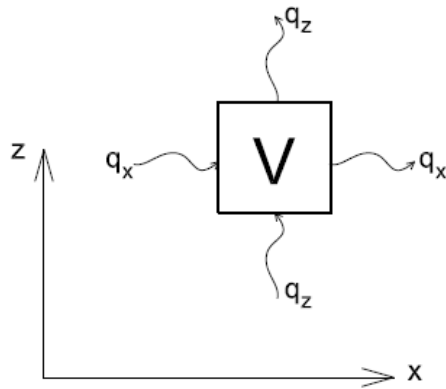
4.3.1 Počáteční podmínky modelování pohybu půdních částic

Rozeznáváme tři typy okrajových podmínek pro tuto rovnici, jsou to:

- Dirichletova okrajová podmínka (podmínka stabilní).
- Neumannova okrajová podmínka (podmínka nestabilní).
- Newtonova okrajová podmínka (Tato podmínka definuje na dané hranici součet řešení diferenciální rovnice a jeho první derivace, může se označovat Robinova podmínka (okrajová)).

4.3.2 Odvození rovnice pro modelování eroze pomocí difúzní vlny

Zákon zachování hmoty je fyzikální zákon. Zákon je znázorněný na obrázku číslo 9, kde písmeno q zde znázorňuje pohyb veličiny v ose x a y . Dále písmeno q_x vyjadřuje nutnost změnu objemu (písmena V), při podmínce že písmeno q_x na vstupu je větší než q_x na výstupu. Tento poznatek umožnil odvození rovnic pro řadu aplikací jako je pohyb vody, půdy, tepla, látek - mísitelných a nemísitelných (rychlost změny toku je rovna rychlosti změny akumulovaného objemu. Toto tvrzení je pak možné zapsat následovně).



Obrázek č. 9: Zákon zachování hmoty
(Kuráž, 2014)

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -\frac{\partial V}{\partial t} \quad (2)$$

Pro zjednodušení byl tedy zaveden diferenciální operátor divergence ($\nabla \cdot$) a rovnici je tedy možné zapsat kompaktněji nezávisle na počtu proměnných jako

$$-\frac{\partial V}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{q}$$

Rovnice proudění vychází z rovnice objemového toku \vec{q} a objemové funkce V . Můžeme tedy definovat objemový tok \vec{q} . Objemový tok je definován Darcy-Buckinghamovým zákonem, je tedy možné zapsat (uvažujeme izotropní prostředí)

$$\vec{q} = -K(h)(\nabla h + \nabla z)$$

V případě dvourozměrného proudění v ose x a z bude platit vzorec

$$q_x = -K(h) \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$q_z = -K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right)$$

Potom po dosazení do rovnice kontinuity (3) dostaneme vzorec

$$-\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial \left(-K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(-K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right) \right)}{\partial z}$$

Objemovou funkci V je možné přímo nahradit objemovou vlhkostí $\theta(h)$. Rovnici je pak možné přepsat následovně

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial \left(-K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right)}{\partial z} + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (3)$$

takže rovnice (4) je výsledná rovnice pro nenasycené proudění pro izotropní prostředí pro dvě proměnné x a z , pro jednu proměnnou z bude rovnice v následujícím tvaru

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right)}{\partial z} + \frac{\partial K(h)}{\partial z}$$

pomocí diferenciálního operátoru divergence ($\nabla \cdot$) je možné Richardsovu rovnici zapsat následovně

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \nabla \cdot (K(h) \nabla h) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (4)$$

$\theta(h)$ je retenční křivka [-], $K(h)$ je nenasycená hydraulická vodivost [$L \cdot T^{-1}$] a h je kapilární tlaková výška [L]. Derivace retenční křivky je zde možná, a proto lze Richardsovu rovnici zapsat v následujícím tvaru

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (K(h) \nabla h) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (5)$$

Rovnice číslo (5) je označována jako tzv. Richardsova rovnice ve smíšeném tvaru a rovnice (6) je označována jako Richardsova rovnice v kapacitním tvaru. Panují různé názory na vhodnost použití Richardsovy rovnice ve smíšené nebo kapacitní formě z hlediska kvality a implementace jejich numerického řešení. Pro úplnost, Richardsovu rovnici je ještě možné formulovat v tzv. difúzním tvaru.

Richardsova rovnice v difúzním tvaru je formulovaná tak, aby její řešení byla pouze objemová vlhkost. Je možné tedy uvažovat i takovýto tvar

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{K(\theta)}{C(\theta)} \nabla \cdot \theta \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (6)$$

zde $C(\theta)$ vyjadřuje retenční vodní kapacitu. Poměr $K(\theta) \cdot C(\theta)^{-1}$ je nazýván půdní vodní difuzivita $D(\theta)$ [$L^2 \cdot T^{-1}$]. A byl zaveden následovně. V originálním tvaru Richardsovy

rovnice se vyskytuje prostorová derivace kapilární tlakové výšky, pro jednorozměrnou úlohu je možné tento člen uvažovat jako $\partial h \cdot \partial z^{-1}$. Protože Richardsova rovnice v difúzním tvaru uvažuje své řešení pouze jako objemovou vlhkost θ a protože je možné uvažovat kapilární tlakovou výšku jako funkci θ – tedy $h(\theta)$ je možné tuto transformaci provést opět pomocí věty o derivaci složené funkce $f'(g) = f'g'$, v případě Richardsovy rovnice to znamená

$$\frac{\partial h}{\partial z} = \frac{dh}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

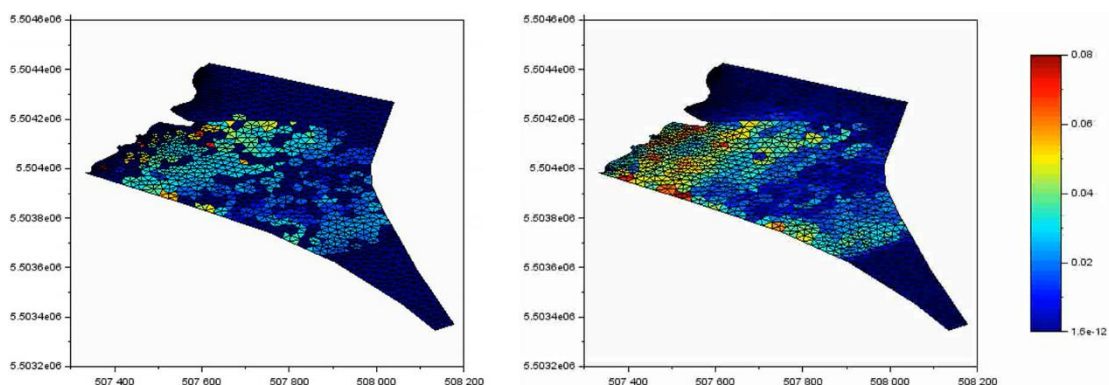
tedy

$$\frac{\partial h}{\partial z} = \frac{1}{C(h)}$$

Proto je možné uvažovat

$$K(h)\nabla \cdot h = \frac{K(\theta)}{C(\theta)} \nabla \cdot \theta \quad (7)$$

Richardsova rovnice v difúzním tvaru má pouze jedno, ale zásadní omezení. Je-li rovnice napsána pro proměnnou θ , vstupní hodnoty srážky jsou do modelu zadávány s velkým rozptylem. Srážka je do modelu zadávána jako tok. Samotný tok je možné pomocí difuzivity D gradientem objemové vlhkosti popsat. V případě nasycení je půda plně nasycena nastává v modelu závažný problém. Retenční vodní kapacita je rovna nule. V rovnici se vyskytuje dělení retenční vodní kapacitou a dělení nulou přirozeně nemůže vést ke smysluplnému řešení. Difúzní tvar Richardsovy rovnice má tedy omezené použití (Kuráž, 2014). Příklad Difúzní vlny je viditelný na obrázku číslo 10.



Obrázek č. 10: Modelace vodní eroze pomocí difúzní vlny

Zdroj: vlastní

5 Cíl disertační práce

5.1 Cíl disertační práce

Navrhnout a ověřit opatření na snížení projevů eroze zpracováním půdy. Formou experimentu postupně získat data, na jejichž základě je možné stanovit celkový nežádoucí posun částic v profilu ornice při zpracování půdy vybranými stroji v definovaných půdních podmínkách. Experimentálně naměřená data budou porovnávána s daty získanými z počítačového modelování (využití modelů WATEM/SEDEM). Výsledkem je metodika pro hodnocení posunu půdních částic stroji na zpracování půdy a nový postup s variantami hospodaření v podmínkách zvýšeného ohrožení erozí zpracováním půdy.

5.2 Hypotéza

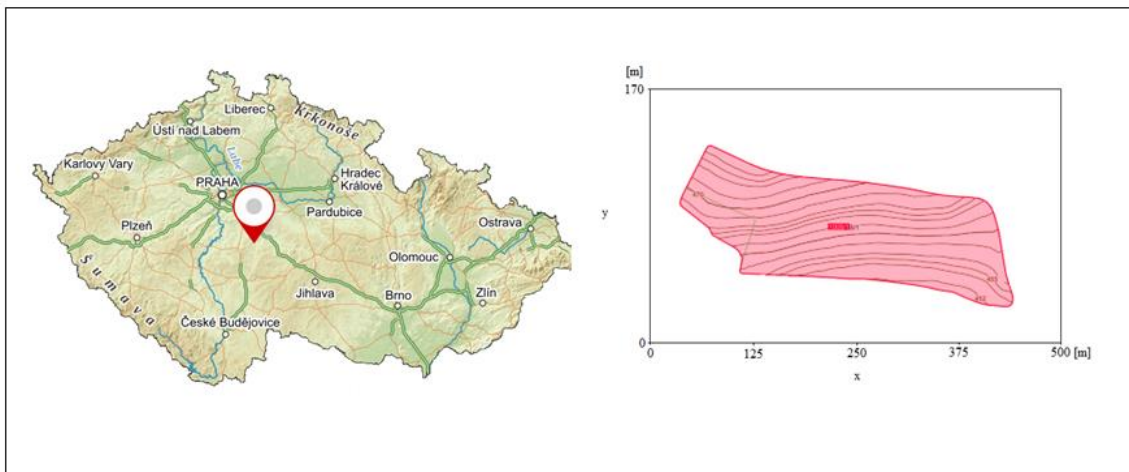
Nežádoucí posun půdních částic ve směru spádnice lze na svažitých pozemcích významně omezit volbou strojů na zpracování půdy a úpravou těchto strojů v pracovních postupech spočívajících v redukci nadměrné intenzity působení pracovních nástrojů na půdu.

6 Metodika práce

Metodika představuje problematiku a hodnocení eroze zpracováním půdy v podmínkách České republiky. Mezi základní rizika, která degradují půdu patří vodní a větrná eroze, dále pokles organické hmoty v půdě, snížené biologické aktivity zhutnění půdy, snížení uhlíku v půdě, tak i samotné zpracování půdy přispívá k zmenšování profilu ornice. V podmínkách České republiky je za hlavní degradační proces považována eroze vodní. Ze současně publikovaných studií však vychází najevo, že eroze zpracováním půdy je přinejmenším stejně tak významná jako vodní eroze. Metodika se zabývá zpracováním půdy, metodami měření v terénu, postupy získání dat a částečně modelací eroze při zpracování půdy s cílem stanovit ztrátu půdy.

6.1 Experimentální lokalita

Všechna polní měření byla provedena v lokalitě Nesperská Lhota u Vlašimi (GPS 49,690435 N“;14,815578 E“) na pozemku s písčitohlinitou kambizemí, částice < 0.01 mm: 29 % hmotnosti. Průměrná svažítost pozemku 4,2°, a nadmořská výška 461 metrů nad mořem. Lokalita experimentálního pozemku a samotný pozemek jsou zachyceny na obrázku číslo 11. Velikost pozemku 4,74 ha byla měřena v LPIS s použitím GIS jako celkové plochy. Výměra mírně a silně erozně ohrožené půdy 3,64 ha. Experimentální pozemek je zařazen jako standardní orná půda s konvenčním hospodařením.



Obrázek č.11: Lokalita a tvar experimentálního pozemku

Zdroj: vlastní

6.2 Odběr půdních vzorků

V experimentální lokalitě byly před začátkem polních experimentů provedeny odběry půdních vzorků.

- Neporušené půdní vzorky:

Neporušené půdní vzorky byly odebírány současně s měřením půdních posunů. Odběr byl proveden metodou sady na odběr Kopeckého fyzikálních válečků o objemu 100 cm^3 z hloubek 0,1, 0,15 a 0,2 m a výpočet vybraných hydro-fyzikálních parametrů půdy jako je objemová hmotnost redukována a pórovitost. Válečky byly vyhodnoceny v laboratořích České zemědělské univerzity v Praze dle normy ISO EN 17989-2. Vzorky na stanovení fyzikálních vlastností je nutno odebírat alespoň ve třech opakováních (Pokorný et al. 2007). Výsledky průměrů jsou zaznamenány v tabulce číslo 3.

Tabulka č. 3: Objemová hmotnost a pórovitost

Hloubka [m]	Objemová hmotnost [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	Pórovitost [%]
0,1	1,49	43,8
0,15	1,52	43,3
0,2	1,51	43,1

- Porušené půdní vzorky:

Porušené půdní vzorky byly odebírány před začátkem měření polních experimentů. Z porušených půdních vzorků byl sledován parametr zrnitosti.

6.3 Značkovače a způsob jejich použití

Pro posouzení posunu půdních částic se nejčastěji používají tzv. „tracer“ metody. Základní princip metod spočívá v umístění stopovačů „tracers“ do půdy a zaměření jejich počáteční polohy. Po provedení pracovní operace daným strojem se detekuje poloha stopovačů. Podle rozmístění jednotlivých značkovačů se vyhodnotí posun půdních značkovačů. V experimentech vyhodnocených v této práci byly použity dva typy značkovačů: drť bílého vápence a očíslované hliníkové krychličky.

6.3.1 Drť bílého vápence

Jedná se o vytříděnou drť bílého vápence o velikost částic 10-16 mm. Drť je zachycena na obrázku číslo 12 a na obrázku číslo 13. Drť byla umístěna do rýhy. Rýhy byly delší stranou situovány kolmo ke směru následujících jízd strojů na zpracování půdy. Hloubka rýh byla zvolena tak, aby se shodovala s hloubkou působení pracovních nástrojů strojů na zpracování půdy. Po provedení pracovní operace příslušným strojem byla tělíska ručně z půdy vybrána v úsecích po 0,30 m ve směru jízdy strojů. Úsek měření byl rozdělen ve směru příčném na tři části po 0,33 m. Zvážením jednotlivých značkovačů byla zjištěna hmotnost. Hmotnost byla použita jako ukazatel posunu půdních částic zpracováním půdy na jeden pracovní přejezd vybraného stroje.



Obrázek č.12: Drť bílého vápence uložená v rýze

Zdroj: vlastní



Obrázek č.13: Povrch půdy po jejím zpracování

Zdroj: vlastní

6.3.2 Očíslované hliníkové krychličky

Hliníková tělíska byla uložena do rýhy v půdě, kolmo na směr pohybu stroje na zpracování půdy. Hliníková tělíska jsou zachycena na obrázku č. 14 (umístění značkovačů na půdu před zpracováním). Krychličky byly očíslovány z důvodu přesného umístění

a přesného zapsání jednotlivých stopovačů. Po provedení pracovní operace daného stroje byly krychličky detekovány a byla zaznamenána jejich přesná poloha v souřadnicovém systému. Ve vybraných případech byly provedeny měření s více vrstvami značkovačů. Značkovače byly umístěny jak do pracovní hloubky stroje, tak na povrch. Pro rozlišení jednotlivých sad byla zvolena zelenožlutá barva. Hloubka umístění značkovačů byla zvolena tak, aby odpovídala pracovní hloubce daného stroje.

Hliníkové značkovače byly použity z důvodu, dobré detekovatelnosti při vyhledávání detektorem kovu. Hliník má odlišné elektrické vlastnosti než například železo, a proto jde jednoznačně určit jeho pozici ve zpracované vrstvě půdě. Druhým důvodem je hustota hliníku. Hustota hliníku je $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ což odpovídá průměrné specifické hmotnosti minerálních půd, která je přibližně $2,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Dílčím důvodem využití hliníkových značkovačů byla také jejich odolnost proti poškození při pracovních přejezdech zemědělských strojů.



Obrázek č.14: Rozmístěné hliníkové krychličky

Zdroj: vlastní

6.3.3 Doplnková měření

Byl použit mechanický profilograf pro hodnocení drsnosti povrchu půdy po pracovním přejezdu daným strojem. Dále byl použit profilograf pro měření tvaru dna také po zpracování půdy. Měření profilografem bylo provedeno vždy třikrát, a to v jedné linii a jedním směrem. Profilograf se skládá z rámu, ve kterém je uloženo padesát tři pruty. Tyto pruty mají shodnou délku a shodné rozestupy. Rozestupy mezi jednotlivými pruty byl 25 mm. Za měřicími pruty se nachází deska. Tato deska je vybavena stupnicí pro snadnější odečítání naměřené hodnoty. Celý rám měřidla je uložen na teleskopických podpěrách, jak je vidět na obrázku číslo 15.



Obrázek č.15: Profilograf

Zdroj: vlastní

Pro učení přesné polohy pracovního stroje byla použita navigace GPS GPS - TRIMBLE NAV-500. GPS je zachycena na obrázku číslo 16. Přesnou polohou se rozumí určení souřadnic severní či jižní šířky a východní či západní délky, ale zároveň i určení nadmořské výšky a rychlosti traktoru který byl spojen s pracovním strojem určeným ke zpracování půdy při experimentu. Navigace NAV-500 byla spojena s pracovním displejem GFX-350 a byly přijímány korekce z různých konstelací GNSS. Při získávání dat nebyl využit systém RTK.

Data z navigace byly přeneseny ručně pomocí zařízení USB a upraveny ze souboru Shape file do souboru Excel office. Dále byl použit program GIS pro získání výstupních map.



Obrázek č.16: Navigace NAV-500

Zdroj: vlastní

Pro měření tahové síly byl použit měřič tahového odporu tenzometrický siloměr S-38. Měřicí přístroj je znázorněn na obrázku číslo 17. Rozsah měření siloměru je do 200 kN. Siloměr bylo nutné umístit do ocelové klece tak, aby síly působily pouze v tahu nebo tlaku. Ohnutí siloměru může způsobit jeho zničení. Siloměr byl kalibrován na stacionárním pracovišti. Kalibrace byla provedena na tahovém zkušebním stroji ZDM 50 t. Údaje ze siloměru byly snímány každé 2 s do notebooku, který byl umístěn v kabině traktoru. Při experimentu byla použita dvojice traktorů spojená měřicím zařízením, druhý traktor neměl zařazený převodový stupeň.



Obrázek č.17: Siloměr S-38

Zdroj: vlastní

6.4 Stroje použité při polních experimentech

Talířový kyprič Akpil byl stroj o záběru 3 m. Stroj byl vybaven dvěma řadami talířů, první řada používá talíře s výřezy, druhá řada používá hladké talíře. Velikost umístěných talířů byla 500 mm, tedy běžná velikost. Uspořádání pracovních nástrojů bylo standardní do tvaru X. Úhel, pod kterým byly natočeny hřídele nesoucí talíře podmítače, činil 20°.

Talířový kyprič AGRO-MASZ (BT-27) byl stroj s pracovním záběrem 2,7 m. Stroj využíval dvou řad talířů vzájemně rovnoběžných ozubených talířů o průměru 460 mm. Jištění pracovních talířů bylo provedeno pomocí pryžových elementů. Hloubkové vedení zajišťoval utužovací válec. Rozteč talířů v jedné řadě byla 250 mm a rozteč mezi řadami 850 mm. Maximální pracovní hloubka talířů byla 120-140 mm.

Kombinovaný kyprič Saturn se využíval ke zpracování půdy před setím. Stroj používaný při měření byl návěsný a měl pracovní záběr 6 metrů. Jednotlivé sekce mají pracovní záběr 1,5 metrů. Kyprič urovnává, kypří, drobí a zpětně utužuje půdu. Přední válce měly za úkol vyrovnávat pracovní sekci a rovnat povrch půdy. Následné smykové lišty rovnaly povrch a podle velikosti mezery mezi lištou a předními válci určovaly množství zeminy, zejména hrud, které byly zpětně přehozeny před první válec. Následovala sekce kypření. Kypření bylo prováděno pomocí šípových radliček rozprostřených ve dvou řadách.

Tyto radličky odřezávali skývu v celém profilu. Záběr jednotlivých radliček byl 250 mm. Po části kypření byla vyskytující se velice podobné míchací válce jako v přední části. Za válci se opět nacházela smyková lišta. Nastavení smykové lišty bylo shodné jako v první části kypřiče, a shodně docházelo k míchaní a rozdrobování hrud. Kyprič byl zakončen válci pěchovací částí. Utužení půdy bylo prováděno pomocí válců typu crosskill.

Pluh Ross PH5-35 byl stroj určený k orbě. Pluh měl pracovní záběr 1,75 m a byl osazen pěti orebními tělesy. Před každým pracovním tělesem byla umístěna předradlička. Stroj byl zapojen za traktor pomocí tříbodového závěsu.

Kyprič Kromexim byl koncipován jako radličkový kyprič nesený ve tříbodovém závěsu traktoru. Pracovní dláta byla na kypřiči umístěna ve dvou řadách. Geometrie dlát umožňovala hlubší zpracování půdy do 300 mm. Při polních experimentech byla tato pracovní dláta vybavena bočními křídly. Za pracovními dláty byly umístěny rovnací talíře a prutový válec. Trubkový válec měl variabilní pozici a proto bylo možné přesné nastavení a dodržení požadované pracovní hloubky. Pracovní záběr kypřiče byl 3 m.

Vířivý kyprič Rabewerk byl stroj s pracovním záběrem 3 m. Maximální pracovní hloubka stroje byla 15 cm. Stroj využívá pro zpracování půdy výměnné nože a ozubený pěchovací válec. Velikost otáček pracovních nástrojů byla $344 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Nože byly poháněny od vývodového hřídele traktoru. Velikost otáček vývodového hřídele při zpracování půdy byla $540 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Doporučený výkon motoru traktoru byl 100 kW. Velikost pěchovacího válce byla 510 mm.

Kyprič Lemken Smaragd patřil do kategorie kombinovaných radličkových kypričů. Tento kyprič byl navržen pro mělké zpracování půdy. Kyprič byl osazen pěti šípovými radličkami s křídélky. Pro optimální rovnání půdy po zpracování radličkami byl stroj vybaven rovnacími talíři a pěchovacím válcem. Pracovní záběr stroje byl 2,2 m. Maximální pracovní hloubka stroje byla stanovena na 20 cm. Pro připojení k tažnému traktoru byl využit tříbodový závěs traktoru. Doporučený výkon traktoru byl 90 kW.

6.5 Metodika experimentů

Metodika pro hodnocení ostrosti pracovních nástrojů na přemístění půdních částic

Hodnoceny byly dva stroje. Radličkový kypřič Komexim a pluh Ross PH5-35. Pro radličkový kypřič byla vyhodnocena délka posunu značkovačů a směrový úhel posunu značkovačů. Jako značkovače byly zvoleny hliníkové krychličky, s celkovým počtem 120 kusů. Ty byly umístěny do jedné řady kolmo na následný pracovní směr stroje pro zpracování půdy. Krychličky byly seřazeny podle vyražených čísel od 1 do 20. Rozstup jednotlivých značkovačů byl konstantní. Velikost rozstupu byla 0,1 m. Hodnoceny byly tři směry zpracování půdy a to do svahu, se svahu a rovina. Velikost sklonu do svahu a i se svahu byla 5° a byly měřena pomocí sklonoměru (BMI, Germany). Pracovní rychlost stroje při které byl polní experiment prováděn byla $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a pracovní hloubka stroje byla 0,1 m.

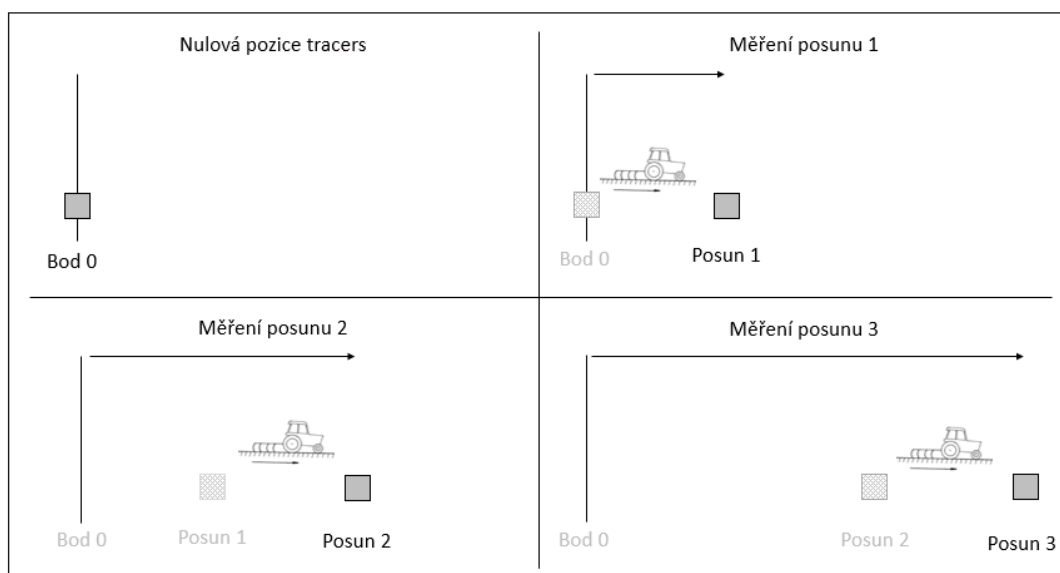
Pro pluh Ross PH5-35 byla vyhodnocena také délka posunu značkovačů a směrový úhel posunu značkovačů. Jako značkovače byly zvoleny opět hliníkové krychličky s počtem 480 kusů. Rozstup značkovačů 0,1 m. Rozstup značkovačů byl tedy 2 m. Bohužel pracovní záběr experimentálního pluhu byl pouze 1,75 m byla pracovní operace opakována 2x. Opakovaný přejezd pluhu byl vždy stejným směrem a stejnou rychlostí. Důvodem bylo zachování smyslu klopení půdní vrstvy. Při orbě byly značkovače umístěny ve dvou hloubkách a to do pracovní hloubky a na povrch s celkovým počtem 480 kusů. Pracovní hloubka stroje byla při experimentu 0,2 m. Pracovní rychlost byla $6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Sklony pozemku, na kterých byl polní experiment proveden byly 2°, 6° a 11°. Sklonitost pozemku byla měřena pomocí sklonoměru (BMI, Germany). Směry orby při experimenty byly orientovány jak se svahu, tak proti svahu.

Velikost opotřebení byla pro tento experiment stanovena vždy na hraničních životnosti ostří. Ostré ostří je charakterizováno jako ostří nové, bez jakéhokoliv použití. Tupé ostří je charakterizováno jako ostří, které není schopné při pracovní činnosti udržet pracovní stroj v dostatečné pracovní hloubce a dále není schopné ochránit slupici stroje, na které je ostří umístěno, před opotřebením.

Pro zjištění fyzikálních vlastností půdy byly odebrány Kopeckého válečky. Válečky byly vyhodnoceny v laboratořích České zemědělské univerzity v Praze.

Metodika pro hodnocení dvou technologií zpracování půdy na přemísťování půdních částic

Experiment byl zaměřen na hodnocení přesunu půdních částic a velikosti vektorového úhlu v konvenční technologii a v minimalizační technologii zpracování půdy. Pro konvenční technologii byly zaměřeny 3 parcelky s úrovní svažítostí pozemku 2°, 6° a 11° a pro technologii minimalizační také 3 parcelky s totožnou svažítostí. Sklonitost pozemku byla měřena pomocí sklonoměru (BMI, Germany). Parcelky byly zaměřeny na začátku pokusu v době primárního zpracování půdy (podmítky) a jejich označení se na pozemku ponechalo až do ukončení posledního měření po přípravě půdy pro setí. Postup měření je vidět na obrázku číslo 18.



Obrázek č.18: Posun značkovačů při celosezónním měření

Zdroj: vlastní

Na označených parcelkách se soupravy (traktor a stroj na zpracování půdy) pohybovaly vždy ve směru vrstevnic. Od nulového bodu příslušné parcelky se souprava (traktor a stroj na zpracování půdy) pohybovala vždy stejným směrem. Rychlost pohybu souprav při zpracování byla dodržena podle údajů od výrobců. U talířového kypřiče Akpil byla rychlost $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, u pluhu Ross PH-5 35 byla rychlost $7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, u kypřiče Kromexim určeného k minimalizačnímu zpracování půdy byla rychlost $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a u kombinovaného kypřiče Saturn určeného k předset'ové přípravě půdy při konvenčním zpracování půdy byla pracovní rychlost $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Pro tento pudní experiment byly opět použity hliníkové značkovače, které byly

umístěny do jedné řady kolmo na pracovní směr daného stoje. Po analyzování a zapsání naměřených výsledků posunu značkovačů byly značkovače umístěny přesně do měřeného místa. Pro následnou pracovní operaci značkovače už nebyly v jedné řadě. V případě orební technologie byla pracovní operace pluhu opakována z důvodu malého pracovního záběru pluhu. Pro tento typ experimentu byla použito celkem 120 hliníkových značkovačů. Po provedení experimentu byly všechny značkovače nalezeny, nedošlo tak ke ztrátě žádného značkovače. Data byla zpracována softwarem MS Excel (Microsoft Corp., USA) a Statistica 12 (Statsoft, USA). Pro zjištění fyzikálních vlastností půdy byly odebrány Kopeckého válečky.

Metodika pro hodnocení erozního vlivu tří strojů na předseťovou přípravu půdy

Byla vyhodnocena délka posunu značkovačů a směrový úhel posunu značkovačů při sekundárním zpracování půdy (předseťová příprava). Jako značkovače půdního posunu byly zvoleny hliníkové kostičky, které byly umístěny do dvou řad kolmo na pracovní směr daného stoje. Jedna řada značkovačů byla umístěn na povrchu druhá řada značkovačů byla umístěna v pracovní hloubce kypřičů. Pracovní hloubka kypřičů byla stanovena na 8 cm. K pozorování byly vybrány tři druhy strojů. Prvním stroj byl kypřič Kromexim s radličkami, další dva stroje byly kypřiče s talíři. První talířový kypřič AGRO-MASZ (BT-27) měl zvolenou geometrii talířů v rovnoběžné rovině. Druhý talířový kypřič Akpil měl zvolenou geometrii talířů do tvaru X. Pro půdní experiment byly zaměřeny 3 parcely s úrovní svažítostí pozemku 2°, 6° a 11°. Sklonitost pozemku byla měřena pomocí sklonoměru (BMI, Germany). Směr pohybu strojů byl rovnoběžný se směrem spádnice. Pracovní rychlost kypřičů, při provádění experimentu, byla vždy shodná a to $9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Pro provedení půdního experimentu bylo použito 360 značkovačů a všechny značkovače byly po provedení experimentu nalezeny a vyhodnoceny.

Data byla zpracována softwarem MS Excel (Microsoft Corp., USA) a Statistica 12 (Statsoft, USA). Pro zjištění fyzikálních vlastností půdy byly odebrány Kopeckého válečky.

Metodika pro hodnocení přesunu půdních částic s opakovanými přejezdy při přípravě půdy pro setí

Experiment byl zaměřen na hodnocení přesunu půdních částic a velikosti vektorového úhlu v konvenční technologii s opakovanými přejezdy při přípravě půdy pro setí. Pro experiment byly vybrány 3 parcely s úrovní svažítostí pozemku 2°, 6° a 11°. Sklonitost pozemku byla měřena pomocí sklonoměru (BMI, Germany). Stroj pro opakovanou přípravu

půdy byl zvolen kombinovaný kypřič Saturn. Pracovní hloubka kypřiče byla 8 cm. Pracovní rychlost stroje byla vždy shodná a to $9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Jako značkovače půdního posunu byly zvoleny hliníkové kostičky, které byly umístěny do dvou řad kolmo na pracovní směr daného stroje. Pro provedení půdního experimentu bylo použito 360 hliníkových značkovačů. Všechny značkovače byly po provedení experimentu nalezeny a vyhodnoceny. Směr pracovního pohybu stroje na pokusných parcelách byl vždy stejný, a to po vrstevnici půdního bloku. Data byla zpracována softwarem MS Excel (Microsoft Corp., USA) a Statistica 12 (Statsoft, USA). Pro zjištění fyzikálních vlastností půdy byly odebrány Kopeckého válečky.

Hodnocení přesunu půdních částic s využitím makroznačkovačů drtě bílého vápence

Experiment byl zaměřen na hodnocení přesunu půdních částic, bylo využito makroznačkovačů drť bílého vápence pro určení přesunu množství půdy při pracovním pohybu stroje. Při experimentu bylo využito dvou strojů. První stroj byl radličkový kypřič Kromexim, druhý stroj byl talířový kypřič Akpil. Pro polní experiment bylo vybráno 6 parcel. První tři parcely byly určeny pro stroj Kromexim druhé tři parcely byly určeny pro stroj Akpil. Pro jednotlivé stroje byly vybrány tři směry pracovního pohybu stroje. První pracovní směr byl proveden do svahu, druhý pracovní směr byl ze svahu a třetí pracovní směr byl po vrstevnici. Parcely do svahu měly průměrnou svažítost pozemku $9,5^\circ$. Parcely ze svahu měly průměrnou svažítost $9,3^\circ$. Parcely určené pro pracovní pohyb stroje po vrstevnici byly vybrány téměř na rovině se sklonem $2,1^\circ$. Pracovní rychlost strojů při experimentu byla vždy shodná a to $8,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Pracovní hloubka strojů byla 10 cm. Na každé parcele byly odebrány tři sondy o velikosti $33 \times 20 \times 10$ cm. Tyto odebrané sondy pak byly zasypány drtí bílého vápence. Do každé sondy bylo umístěno průměrně 8,4 kg drtě. Sto použitých značkovačů vážilo 296 g. Po provedení pracovní operace stroje byly značkovače ručně vybrány. Vybrané množství značkovačů v daném intervalu bylo zváženo na váze Soehnle profesionall (Soehnle corp., Germany) na Technické fakultě. Data byla zpracována softwarem MS Excel (Microsoft Corp., USA) a Statistica 12 (Statsoft, USA). Pro zjištění fyzikálních vlastností půdy byly odebrány Kopeckého válečky.

Metodika hodnocení rozmístění půdních částic pracovními nástroji radličkového a talířového kypřiče při třech pracovních rychlostech

Průměrný sklon experimentálních parcelek byl $1,7^\circ$ (po spádnici). Zpracování půdy bylo prováděno v sestupné orientaci. Jako traktor byl použit traktor Zetor 12045

o jmenovitém výkonu 90 kW, který umožňoval provedení nejvyšší požadované pracovní rychlost 14 km·h⁻¹ u obou pracovních strojů. Byl použit talířový kypřič Akpil a radličkový kypřič Lemken Smaragd. Metoda popsaná Logsdonem (2013) byla použita k posouzení posunu půdy. Metoda spočívá v použití makro značkovačů vložených do ornice v hloubce, která odpovídá požadované hloubce následného zpracování půdy. Značkovače byly použity k označení posunutí části ornice při jejím zpracování. Byl použit drcený bílý vápenec (velikost částic 10–16 mm). Sto použitých značkovačů vážilo 296 g. Byl zvolen rozměr drážky o šířce 0,20 m a délka drážky (kolmo ke směru jízdy) byla 1 m. Hloubka rýhy byla 0,10 m pro talířový podmítač a 0,20 m pro radličkový kypřič. Do ní bylo umístěno 25 kg drceného bílého vápence drážkou pro talířový kypřič a 50 kg drceného bílého vápence pro radličkový kypřič. Byly zvoleny tři varianty pracovních rychlostí (4,5± 0,2, 9,0± 0,2 a u obou strojů bylo naměřeno 14 km·h⁻¹± 0,2 km·h⁻¹). Po zpracování půdy byla bílá vápencová drť ručně sesbírána ve vyznačených úsecích. U talířového kypřiče byly sekce intervalu odběru vzorků 0,30 m; u radličkového kypřiče měly první čtyři sekce interval vzorkování 0,30 m, pro ostatní sekce interval vzorkování byl prodloužen na 0,60 m. Každá sekce byla rozdělena do tří podsekcí (vlevo, uprostřed a vpravo). Hmotnost značkovačů byla stanovena z jednotlivých sekcí. Vybrané množství značkovačů bylo zváženo na váze Soehnle professionall (Soehnle corp., Germany) na Technické fakultě.

Metodika hodnocení vlivu přemístění půdních částic u dvou strojů určených na zpracování půdy

Experiment byl zaměřen na hodnocení přesunu půdních částic. Při experimentu byl pozorován maximální posun značkovačů a dále množství značkovačů. Bylo využito hliníkových značkovačů, které byly očíslovány. Značkovače byly umístěny do řady na povrchu půdy kolmo na následný pracovní pohyb daného stroje. Pro tento experiment bylo využito 120 značkovačů. Všechny značkovače byly po provedení pracovní operace na zpracování půdy nalezeny. Při experimentu bylo využito dvou strojů pro primární zpracování půdy. Experiment byl tedy prováděn na strništi po sklizni. První stroj byl radličkový kypřič Kromexim druhý stroj byl talířový kypřič Akpil. Pro polní experiment bylo vybráno 6 parcel. První tři parcely byly určené pro stroj Kromexim, druhé tři parcely byly určeny pro stroj Akpil. Pro jednotlivé stroje byly vybrány již výše uvedené tři směry pracovního pohybu. První pracovní směr byl proveden do svahu, druhý pracovní směr byl se svahu a třetí pracovní směr byl po vrstevnici. Parcely do svahu měly průměrnou svažitost

pozemku 9,5°. Parcely ze svahu měly průměrnou svažítost 9,3°. Parcely určené pro pracovní pohyb stroje po vrstevnici byly vybrány téměř na rovině se sklonem 2,1°. Pracovní rychlost strojů při experimentu byla vždy shodná a to $8,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Pracovní záběr strojů byl u stroje Kromexim 3 m a u stroje Akpil 3,15 m. Pracovní hloubka strojů byla 10 cm. Pro zjištění fyzikálních vlastností půdy byly odebrány Kopeckého válečky. Data byla zpracována softwarem MS Excel (Microsoft Corp., USA) a Statistica 12 (Statsoft, USA).

Metodika hodnocení přemístění půdních částic aktivně poháněným kypřičem

Experiment byl zaměřen na hodnocení přesunu půdních částic, bylo využito makroznačkovačů drt' bílého vápence pro určení přesunu množství půdy při pracovním pohybu stroje. Při experimentu bylo využito pouze jednoho stroje. Byl to stroj pro zpracování půdy, vířivý kypřič. Stroj byl při experimentu aktivně poháněn vývodovým hřídelem traktoru s frekvencí otáčení $540 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Pro stroj byl vybrán směr po vrstevnici. V tomto směru byly vybrány tři parcely. Na první parcele pracoval stroj s pracovní rychlostí $5,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Na druhé parcele pracoval stroj s rychlostí $7,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Na třetí parcele pracoval stroj s rychlostí $11,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Parcely do svahu měly průměrnou svažítost pozemku 2,5°. Sklon jednotlivých parcel byl měřen pomocí digitálního sklonoměru (BMI, Německo). Pracovní hloubka strojů byla 10 cm. Na každé parcele byly zhotoveny tři sondy o velikosti 33x20x10 cm. Tyto sondy pak byly zasypány drtí bílého vápence. Do každé sondy bylo umístěno průměrně 6 kg drtě. Sto použitých značkovačů vážilo 296 g. Hmotnost značkovačů byla stanovena z jednotlivých sekcí. Vybrané množství značkovačů bylo zváženo na váze Soehnle profesionall (Soehnle corp., Germany) na Technické fakultě. Data byla zpracována softwarem MS Excel (Microsoft Corp., USA) a Statistica 12 (Statsoft, USA).

Metodika modelace pohybu půdních částic

V rámci práce bylo využito i metod matematického modelování. Problémem modelování jevu eroze zpracováním půdy je to, že vzhledem k nízkému prozkoumání tohoto jevu neexistují specializované modely zaměřující se pouze na tento jev. Modelace tak vychází z původních modelů pohybu vody po půdě/v půdě s úpravou podmínek. Model byl zaměřen na distribuci ornice v orné půdě. Byla použita počáteční podmínka popisující nehomogenní rozdělení půdy před začátkem simulace eroze půdy. Zpracování půdy je z pohledu modelace analogicky zaměněno za difúzní vlnu, s kterou pracuje i následující

model. Difúzní vlna tak v modelu znamená individuální přejezd stroje po pozemku. Rovnice popisující model je rovnice difúzní vlny s počáteční podmínkou určující nulový posun zeminy tedy nulový difúzní tok. Difúzní vlna je řešena diskrétně, jednotlivý časový krok popisuje jednotlivý pracovní přejezd stroje na zpracování půdy.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot D \nabla C - S \cdot C \quad (8)$$

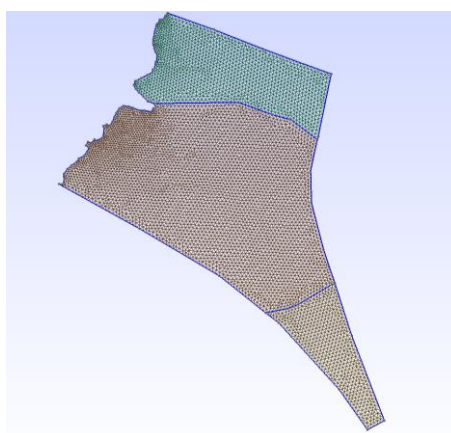
C - Množství ornice na m²

D – Difúzní koeficient [m² S⁻¹]

S – Ztráta půdy [t⁻¹]

$$\vec{q} = -D \cdot \nabla C$$

Cílem modelu bylo využít aplikaci DRUtES na distribuci reálný posunů ornice po dobu simulace reálného zpracování půdy na definované parcele. Parcela je znázorněn na obrázku číslo 19. Parcela je vyplněna nepravidelnou trojúhelníkovou sítí (TIN) bodů o souřadnicích X,Y,H, kde H reprezentuje nadmořskou výšku ve výškovém referenčním systému, X a Y pak klasické souřadnice délky a šířky. Balt po vyrovnání (Bpv) s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m. Hodnocená parcela, kde se sklon reliéfu pohybuje v rozmezí 0 až 16,87°. Velikost sklonu 16,87° není zcela vhodná pro provádění agronomických operací. Průměrnou nadmořská výškou 436,5 m n.m. a v rozsahu 414,9 – 466 m n.m. Výškové hodnoty jednotlivých bodů trojúhelníků sloužily pro získání jednotlivých sklonů na parcele.



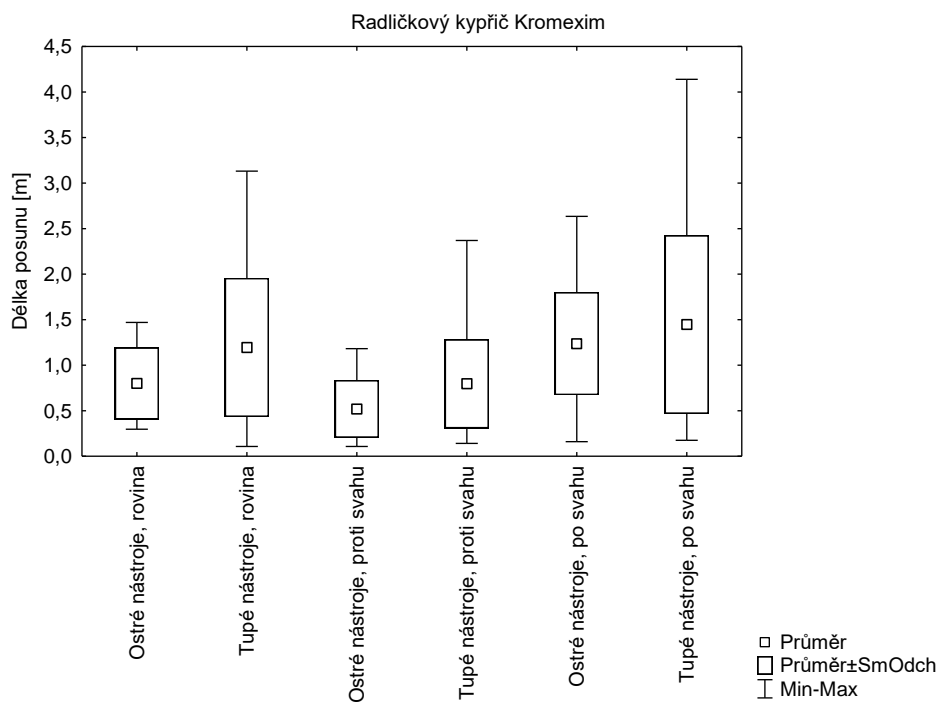
Obrázek č.19: Parcelka s trojúhelníkovou sítí bodů, generovaná v softwaru GMSH

Zdroj: vlastní

7 Výsledky práce

7.1 Hodnocení ostrosti pracovních nástrojů na přemístění půdních částic

Byla vyhodnocena délka posunu značkovačů a směrový úhel posunu značkovačů Graf číslo 1 znázorňuje délku posunu značkovačů. Největší posun byl zaznamenán u pohybu stroje po svahu s opotřebovanými nástroji. Nejmenší posun byl zaznamenán v případě pohybu stroje proti svahu s neopotřebovanými nástroji. Průměrné hodnoty značkovačů jsou zaznamenány v tabulce číslo 4. Z naměřených hodnot je patrné, že opotřebované nástroje na zpracování půdy mají větší vliv na posun půdních částic než nástroje nové. V tabulce číslo 4 je také zaznamenána statistická významnost naměřených hodnot. Cílem tohoto polního experimentu bylo vyhodnotit vliv ostrosti pracovních nástrojů na přemístění půdních částic. Pro hodnocení byly zvoleny typické stroje pro zpracování půdy v evropských podmínkách. Dílčím cílem bylo získat data pro udržitelné hospodaření na půdě ohrožené zhutněním a erozí. Průměrná vlhkost půdy v době provádění experimentu byla naměřena 10,7 % obj., průměrná objemová hmotnost $1,39 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a průměrná pórovitost 45,5 %.



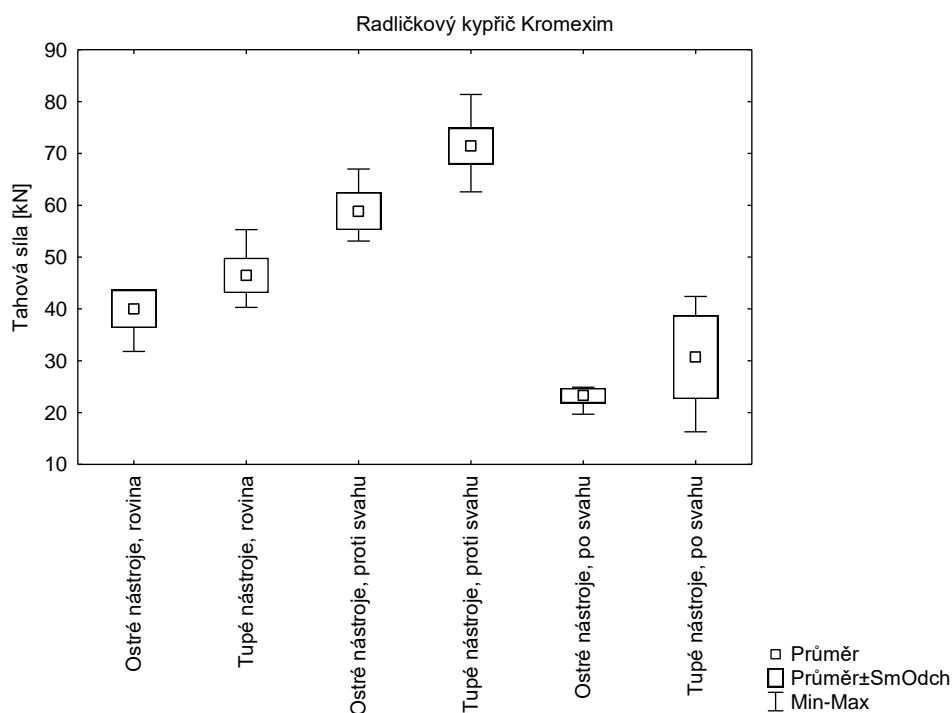
Graf č. 1: Výsledky posunu půdních značkovačů u kypřiče Kromexim

Tabulka č. 4: Statistická významnost rozdílů u posunu půdních značkovačů u kypřiče

Kromexim

Tukeyův HSD test; proměnná Var2 (Tabulka dat4) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = ,39166, SV = 114,00					
Č. buňky	Var1	Var2 Průměr	1	2	3
3	Ostré nástroje, proti svahu	0,520000		****	
4	Tupé nástroje, proti svahu	0,796000	****	****	
1	Ostré nástroje, rovina	0,780000	****	****	
2	Tupé nástroje, rovina	1,195000	****		****
5	Ostré nástroje, po svahu	1,237000	****		****
6	Tupé nástroje, po svahu	1,446000			****

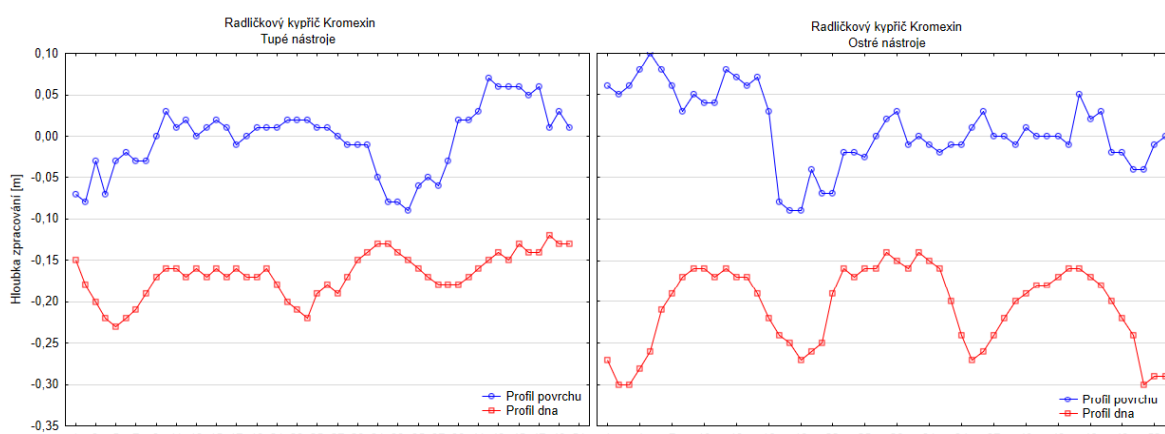
V grafu číslo 2 je zaznamenána tahová síla kypřiče. Z výsledku je patrné, že největší tahová síla byla naměřena při pohybu stroje proti svahu s opotřebovanými nástroji. Nejmenší tahová síla byla naměřena při pohybu stroje po svahu s neopotřebovanými nástroji. V tabulce číslo 4 je zaznamenána statistická významnost naměřených hodnot. Výsledky měření drsnosti povrchu půdy mechanickým profilografem jsou zaznamenány v grafu číslo 3. Z grafu je patrný členitý profil povrchu půdy vytvořený i členitý profil povrchu dna. Největší intenzita členění je zaznamenána na půdním experimentu provedeným s opotřebovanými nástroji. Maximální výchylka zde činila -30 mm. V tabulce číslo 4 je zaznamenána statistická významnost rozdílů u naměřených hodnot profilu dna půdy u kypřiče Kromexim.



Graf č. 2: Výsledky tahové síly u kypřiče Kromexim

Tabulka č. 5: Statistická významnost rozdílů u tahové síly u kypřiče Kromexim

Tukeyův HSD test; proměnná Tahová síla Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = 22,411, SV = 128,00								
Č. buňky	Typ	Tahová síla [kN]	1	2	3	4	5	6
5	Ostré nástroje, po svahu	23,27000	****					
6	Tupé nástroje, po svahu	30,68000		****				
1	Ostré nástroje, rovina	40,00500			****			
2	Tupé nástroje, rovina	46,47200				****		
3	Ostré nástroje, proti svahu	58,85000					****	
4	Tupé nástroje, proti svahu	71,42000						****

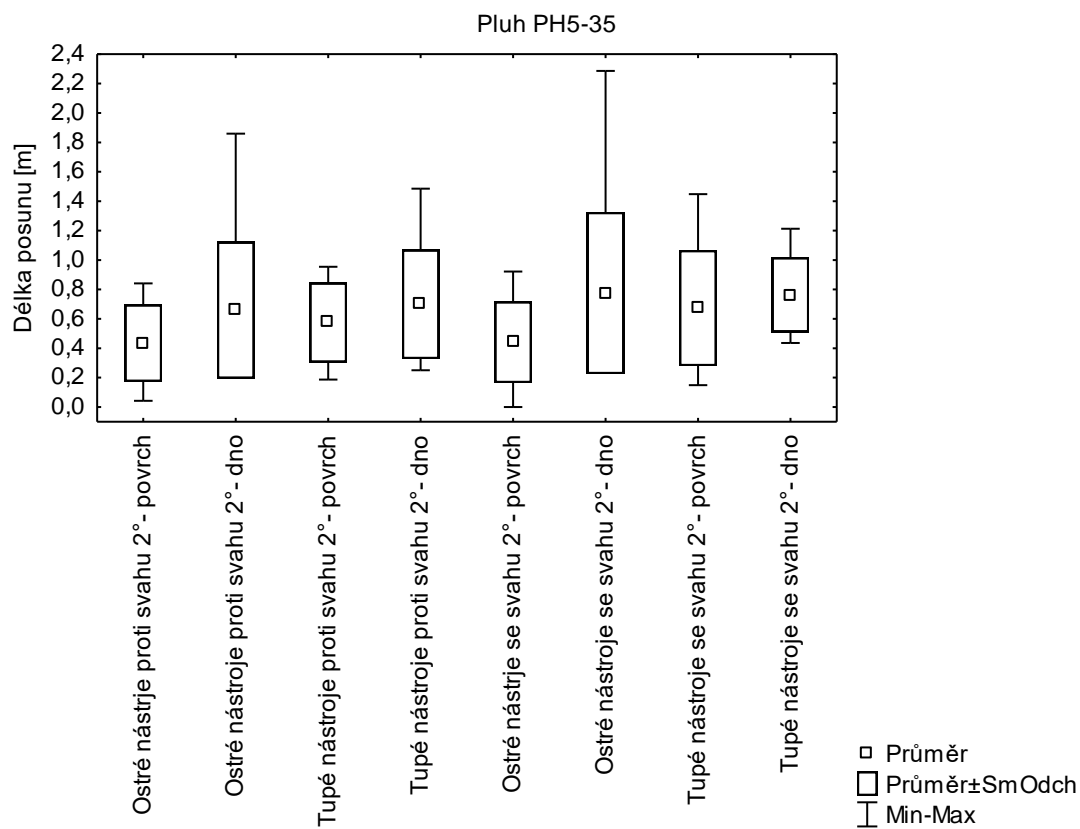


Graf č. 3: Profil povrchu a dna půdy po zpracování radličkovým kypřičem Kromexim

Tabulka č. 6: Statistická významnost rozdílů u profilu dna půdy u kypřiče Kromexim

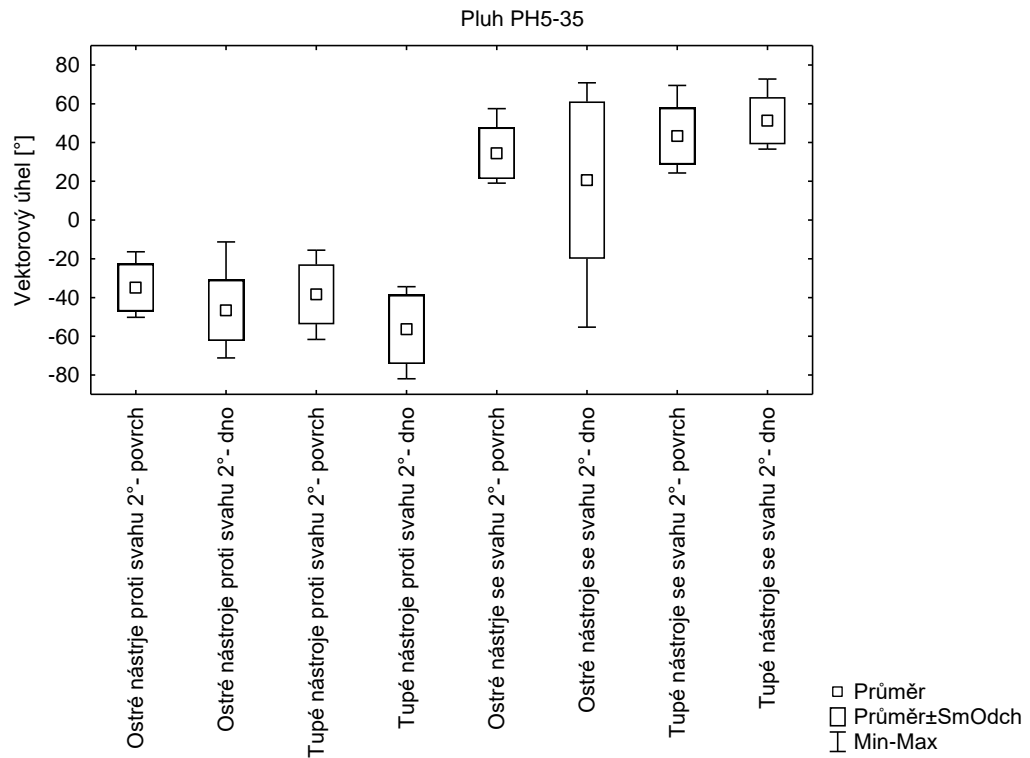
Tukeyův HSD test; proměnná Var1 (Tabulka dat4) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = ,00158, SV = 101,00				
Č. buňky	Var2	Var1 Průměr	1	2
2	Ostré nástroje, dno	-0,206000	****	
1	Tupé nástroje, dno	-0,167000		****

Výsledky posunu půdních značkovačů a směrový úhel značkovačů u pluhu PH5- 35 jsou zaznamenány v grafech číslo 4 až 8. V grafu číslo 4 je zaznamenán posun půdních částic na svahu se sklonem 2°. Největší posun byl zaznamenán na pluhu s neopotřebovanými nástroji a směrem klopení půdy se svahu. Rozdíly však byly statisticky nevýznamné.



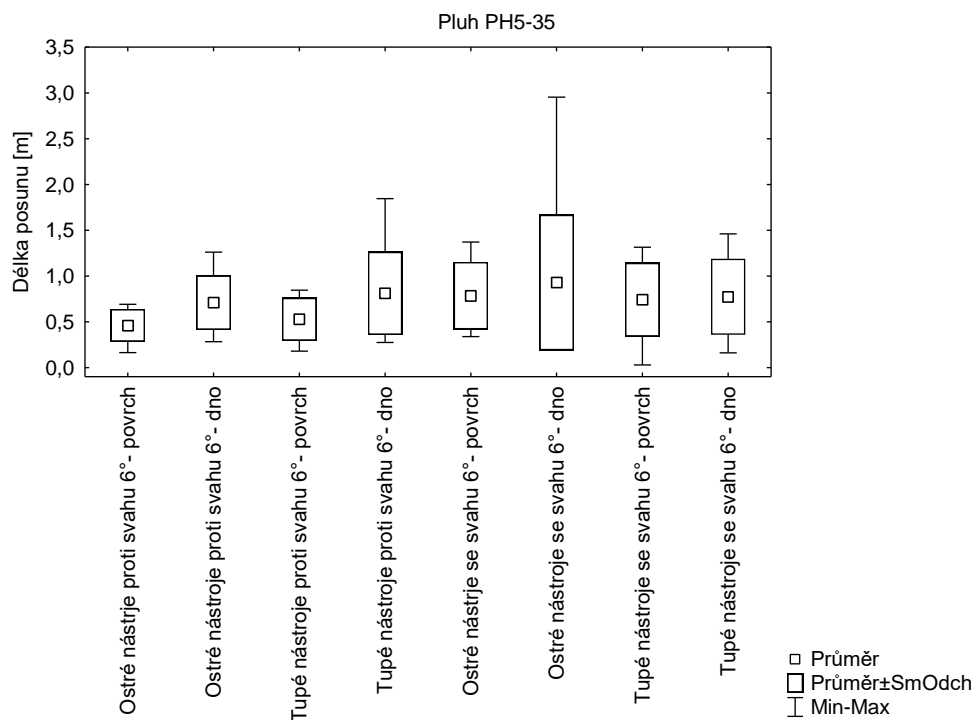
Graf č. 4: Výsledky posunu půdních značkovačů u pluhu PH5-35, svažitost 2°

Velikost vektorových úhlů, pro naměřené délky posunu na svahu s 2° sklonem, jsou zaznamenány v grafu číslo 5. Z grafu je patrný rozdíl ve směru klopení, ale nebyl zaznamenán rozdíl mezi opotřebovanými nástroji a neopotřebovanými nástroji. Největší velikost vektorového úhlu byla zaznamenána na pluhu s neopotřebovanými nástroji a směrem klopení půdy se svahu. Jednalo se o značkovače umístěné v hloubce zpracovávání půdy.



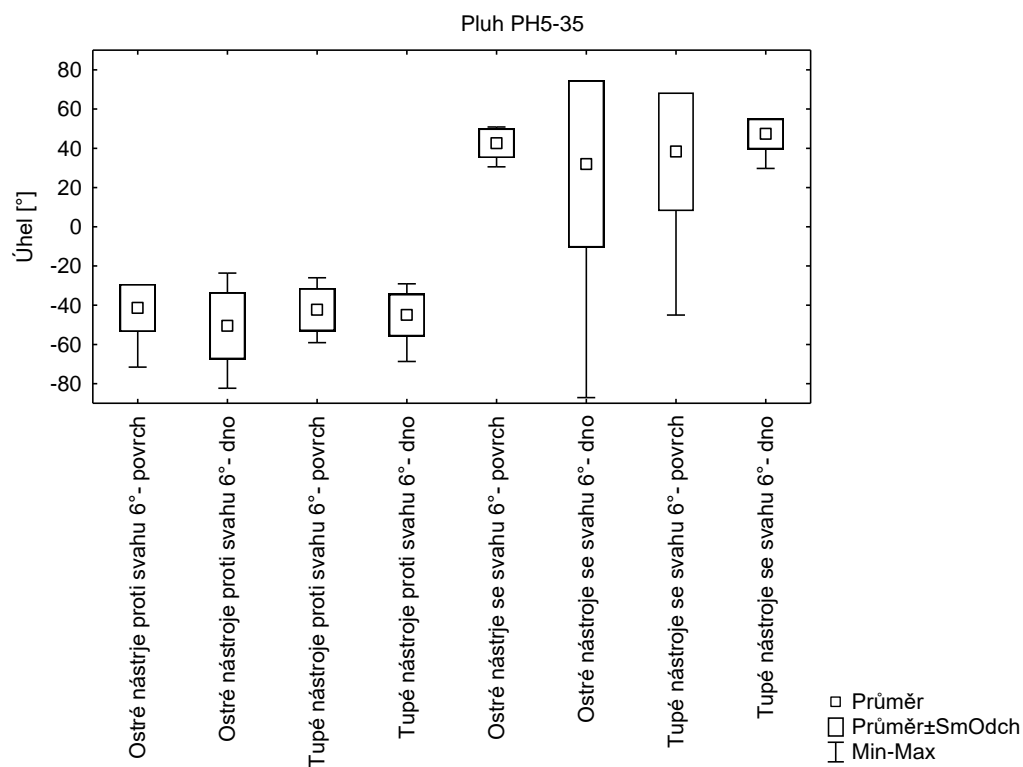
Graf č. 5: Výsledky velikosti vektorových úhlů svažitost 2°

V grafu číslo 6 je zaznamenán posun půdních částic na svahu se sklonem 6°. Největší posun byl zaznamenán na pluhu s neopotřebovanými nástroji a směrem klopení půdy se svahu. Jednalo se o značkovače umístěné v hloubce zpracování půdy.



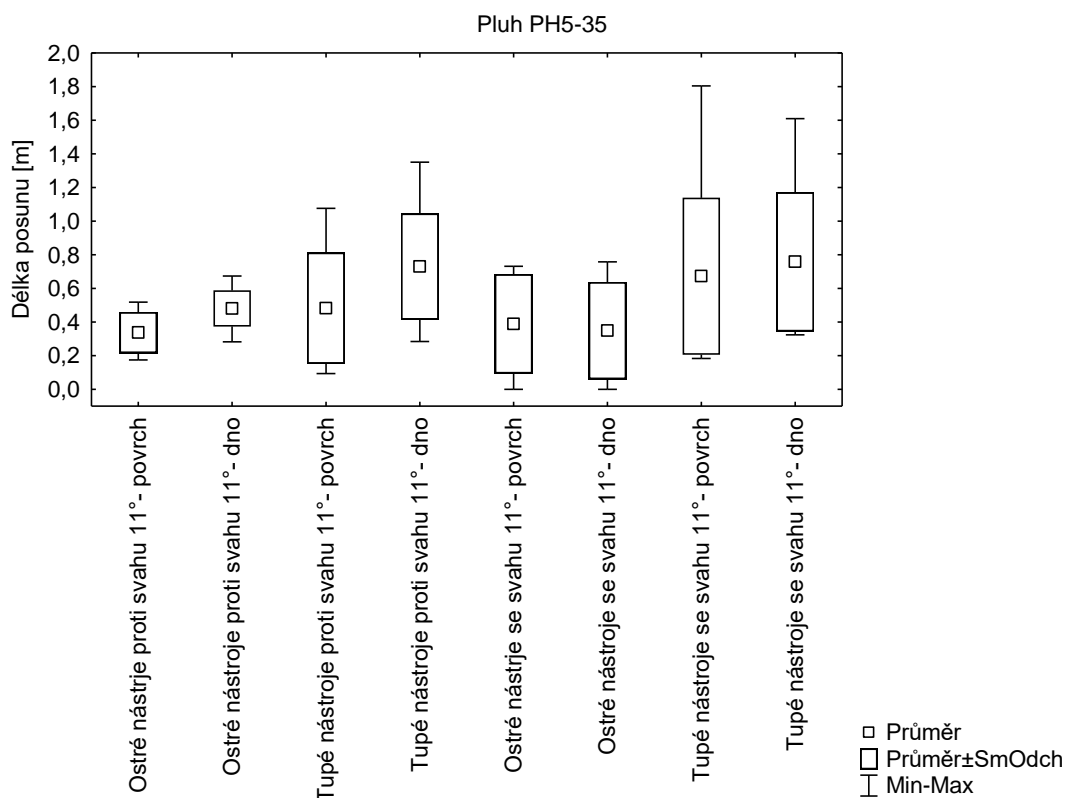
Graf č. 6: Výsledky posunu půdních značkovačů u pluhu PH5-35, svažítost 6°

Velikost vektorových úhlů, pro naměřené délky posunu na svahu s 6° sklonem, jsou zaznamenány v grafu číslo 7. Z grafu je patrný rozdíl ve směru klopení, ale nebyl zaznamenán významný rozdíl mezi vlivem opotřebovaných a neopotřebovaných nástrojů.



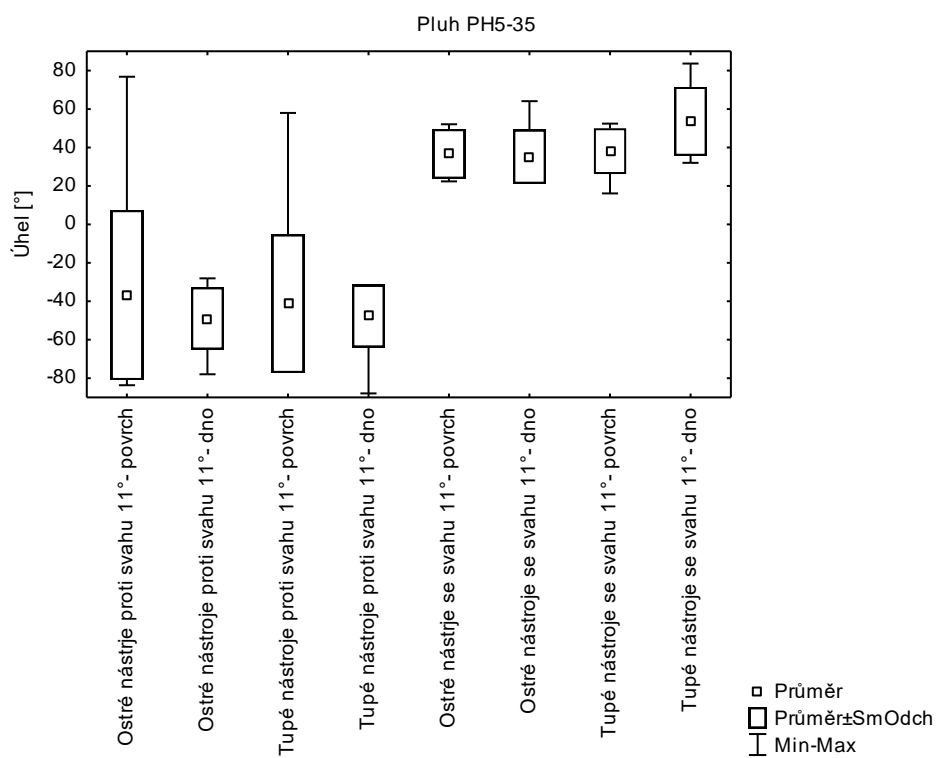
Graf č. 7: Výsledky velikosti vektorových úhlů svažitost 6°

V grafu číslo 8 je zaznamenán posun půdních částic na svahu se sklonem 11°. Největší posun byl zaznamenán na pluhu s neopotřebovanými nástroji a směrem klopení půdy se svahu. Jednalo se o značkovače umístěné na povrchu zpracovávání půdy.



Graf č. 8: Výsledky posunu půdních značkovačů u pluhu PH5-35, svazitost 11°

Velikost vektorových úhlů, pro naměřené délky posunu na svahu s 11° sklonem, jsou zaznamenány v grafu číslo 9. Z grafu je patrný rozdíl ve směru klopení, ale nebyl zaznamenán rozdíl mezi opotřebovanými nástroji a neopotřebovanými nástroji.

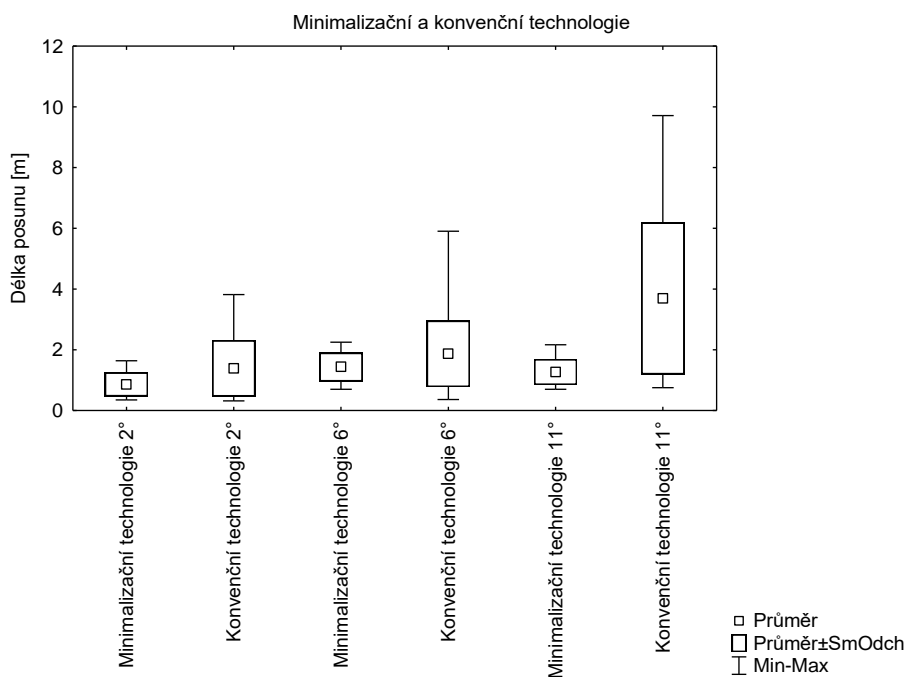


Graf č. 9: Výsledky velikosti vektorových úhlů svažitost 11°

7.2 Erozní vliv dvou technologií zpracování půdy na přemístování půdních částic

Hlavním cílem polního experimentu bylo vyhodnotit vliv dvou technologií zpracování půdy na přemístování půdních částic během operací zpracování půdy na třech různých sklonech v průběhu vegetačního období. Pro hodnocení byla zvolena konvenční technologie zpracování půdy a technologie redukovaného zpracování půdy. Předpokládaným dílčím cílem bylo rozšířit podklady pro realizaci udržitelného hospodaření na půdě v podmínkách ohrožení půdy ztuhnutím a erozí. Průměrná vlhkost půdy v době provádění experimentu byla naměřena 8,5 % obj., průměrná objemová hmotnost 1,42 g·cm⁻³ a průměrná pórovitost 46,3 %.

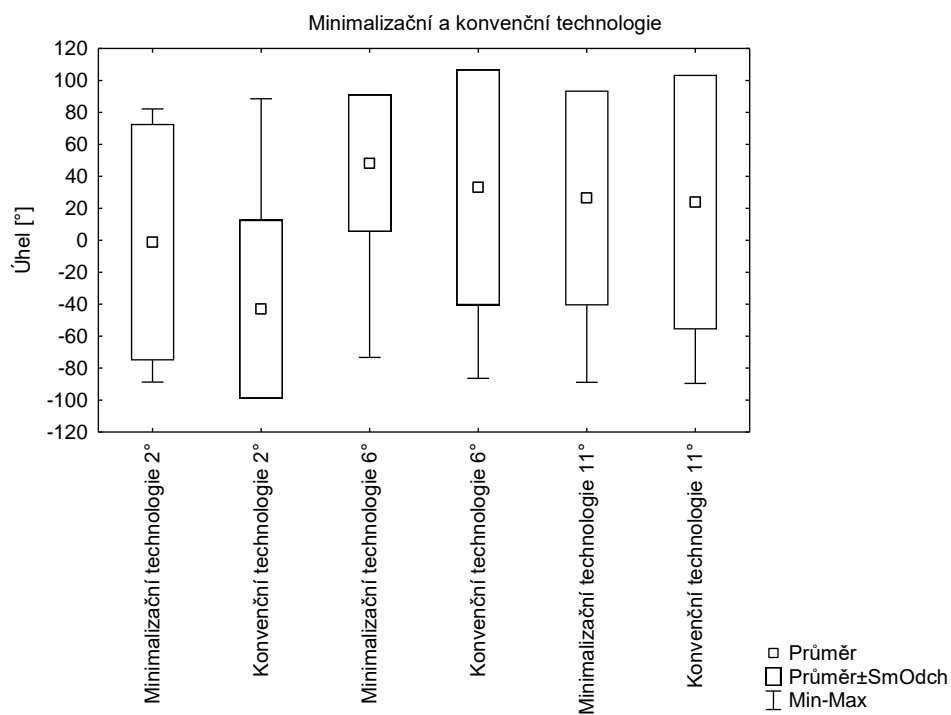
Výsledky posunu půdních značkovačů jsou uvedeny v grafu č.10. Z grafu je patrné, že větší posun byl zaznamenán vždy v konvenční technologii, než v technologii minimalizační. K nejvýraznějšímu posunu došlo na experimentální parcelce se sklonem 11°.



Graf č. 10: Výsledky posunu půdních značkovačů

Velikost vektorových úhlů je zaznamenána v grafu č. 11. Z grafu je patrné, že na experimentálních parcelkách se sklonem 6° a 11° vyjádřil směrový vektor posun půdních částic směrem se svahu dolů. Na parcelce se sklonem 2° při využití konvenční technologie zpracování půdy vyjádřil směrový vektor posun půdních částic směrem proti svahu.

Předpokládanou příčinou je zpracování půdy pomocí radličného pluhu provádějícího orbu s překlápěním zpracovávané vrstvy ornice proti svahu. Na parcelce se sklonem 2° a minimalizační technologii nebyl zaznamenán vliv příčné svažitosti pozemku na směrový vektor.

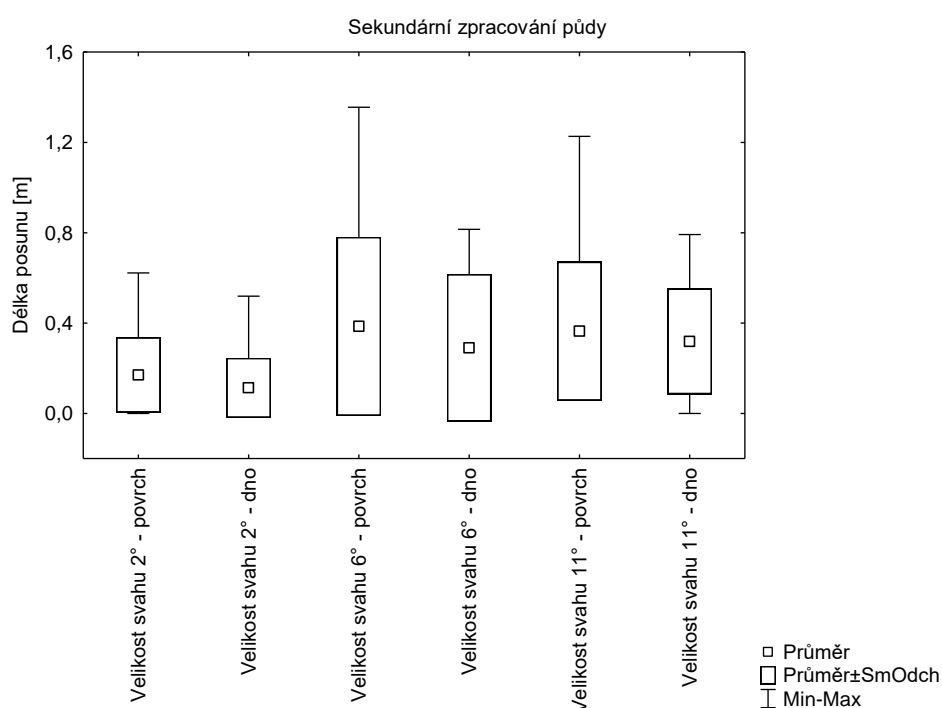


Graf č 11: Velikosti vektorových úhlů pro posunu půdních značkovačů

7.3 Erozní vliv tří strojů na předset'ovou přípravu půdy

Cílem polních experimentů v této dílčí studii bylo vyhodnotit vliv tří vybraných strojů na předset'ovou přípravu půdy v definovaných půdních podmínkách zemědělského podniku Agro Nesperka, s.r.o. Dílčím cílem bylo opět získat data pro udržitelné hospodaření na půdě v podmínkách ohrožení půdy ztuhnutím a erozí.

Výsledky posunu půdních značkovačů, pro talířový kypřič s rovnoběžnou geometrií pracovních talířů jsou uvedeny v grafu č.12. Z grafu je patrné, že větší posun značkovače byl zaznamenán na pokusné parcelace se sklonem 6°. Jednalo se o značkovač, který byl při experimentu umístěn v pracovní hloubce kypřiče 8 cm pod povrchem. Maximální posun činil 1,22 m. Statistická významnost je zaznamenána v tabulce číslo 7. Statistická významnost s využitím Tukeyova testu byla zaznamenána pouze mezi daty naměřenými na svahu 2° a značkovači umístěnými v pracovní hloubce a svahem 6° se značkovači na povrchu. Průměrná vlhkost půdy v době provádění experimentu byla naměřena 12,6 % obj., průměrná objemová hmotnost 1,49 g·cm⁻³ a průměrná pórovitost 43,33 %.

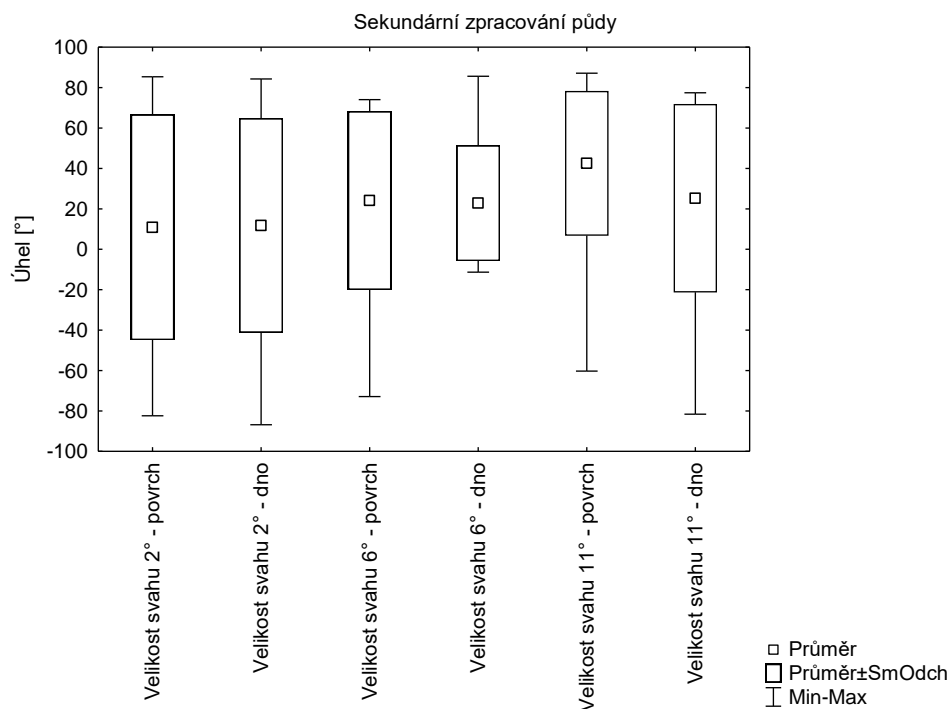


Graf č. 12: Výsledky posunu půdních značkovačů u talířového kypřiče s rovnoběžnou geometrií nástrojů

Tabulka č. 7: Statistická významnost rozdílů u délky posunu značkovačů

Č. buňky	Tukeyův HSD test; proměnná Var2 (Tabulka dat1) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = ,07596, SV = 114,00			
	Var1	Var2 Průměr	1	2
2	Velikost svahu 2° - dno	0,113282	****	
1	Velikost svahu 2° - povrch	0,170269	****	****
4	Velikost svahu 6° - dno	0,290667	****	****
6	Velikost svahu 11° - dno	0,318809	****	****
5	Velikost svahu 11° - povrch	0,364427	****	****
3	Velikost svahu 6° - povrch	0,385848		****

Velikost vektorových úhlů je zaznamenána v grafu č. 13. Z grafu je patrné, že značkovače umístěné na parcelách s vyšší svažností měly po provedení experimentu kladný, tedy erozní, směr. Největší průměrný úhel posunu značkovačů 42,56° byl zaznamenán na parcele se sklonem 11°. Statisticky významné rozdíly nebyly v případech velikosti vektorových úhlů zaznamenány, výsledky se nachází v tabulce číslo 8.

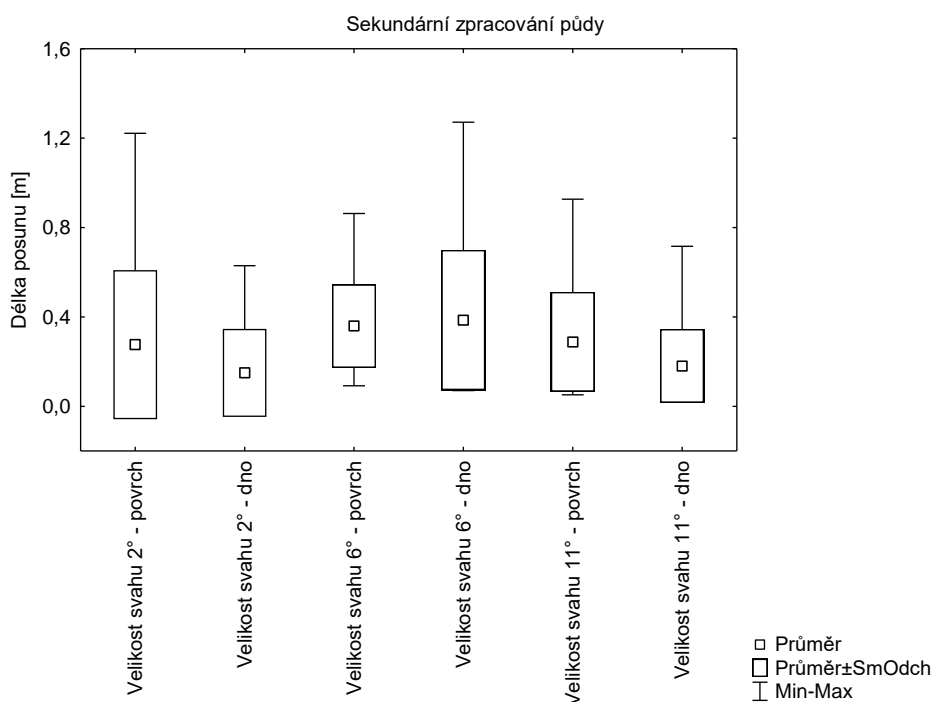


Graf č. 13: Velikosti vektorových úhlů značkovačů talířového kypřiče s rovnoběžnou geometrií nástrojů

Tabulka č. 8: Statistická významnost rozdílů pro vektorový úhel posunu značkovačů

Tukeyův HSD test; proměnná Var3 (Tabulka dat1) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = 2025,0, SV = 114,00			
Č. buňky	Var1	Var3 Průměr	1
1	Velikost svahu 2° - povrch	10,89316	****
2	Velikost svahu 2° - dno	11,78281	****
4	Velikost svahu 6° - dno	22,81060	****
3	Velikost svahu 6° - povrch	24,10272	****
6	Velikost svahu 11° - dno	25,28372	****
5	Velikost svahu 11° - povrch	42,56219	****

Výsledky posunu půdních značkovačů, pro talířový kypřič s geometrií pracovních talířů do tvaru X jsou uvedeny v grafu č.14. Z grafu je patrné, že větší posun značkovačů byl zaznamenán na pokusné parcelace se sklonem 6°. Maximální posun činil 1,27 m a byl naměřen na parcele se sklonem 6° a značkovači umístěnými v pracovní hloubce 8 cm. Statistická významnost rozdílů je uvedena v tabulce číslo 9. Statistická významnost s využitím Tukeyova testu byla zaznamenána pouze mezi daty naměřenými na svahu 2° a značkovači umístěnými v pracovní hloubce a svahem 6° se značkovači umístěnými v pracovní hloubce.

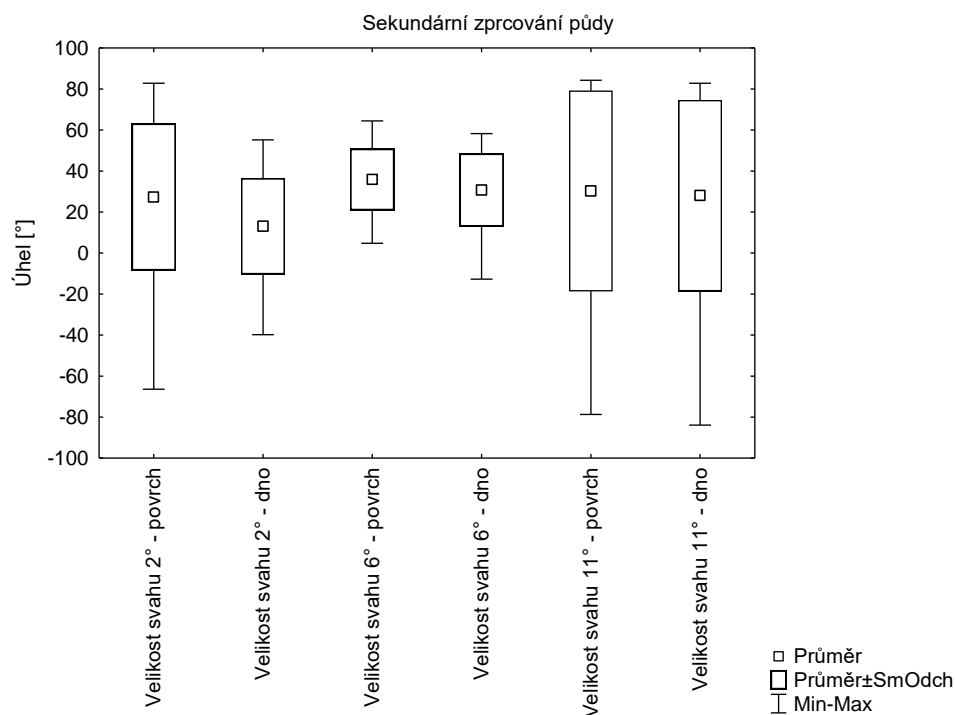


Graf č. 14: Výsledky posunu půdních značkovačů u talířového kypřiče s geometrií nástrojů do tvaru X.

Tabulka č. 9: Statistická významnost rozdílů u délky posunu značkovačů

Tukeyův HSD test; proměnná Prom2 (Tabulka dat1) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = ,05995, SV = 114,00				
Č. buňky	Prom1	Prom2 Průměr	1	2
2	Velikost svahu 2° - dno	0,149407	****	
6	Velikost svahu 11° - dno	0,180675	****	****
1	Velikost svahu 2° - povrch	0,276075	****	****
5	Velikost svahu 11° - povrch	0,288751	****	****
3	Velikost svahu 6° - povrch	0,358938	****	****
4	Velikost svahu 6° - dno	0,386202		****

Velikost vektorových úhlů je zaznamenána v grafu č. 15. Z grafu je patrné že značkovače umístěné na parcelách měly po provedení experimentu kladný, tedy erozní, směr. Největší průměrný úhel posunu značkovačů 35,56° byl zaznamenán na parcele se sklonem 11° a značkovači které byly umístěny na povrchu. Statisticky významné rozdíly nebyly v případech velikosti vektorových úhlů zaznamenány. Výsledky jsou uvedeny v tabulce číslo 10.

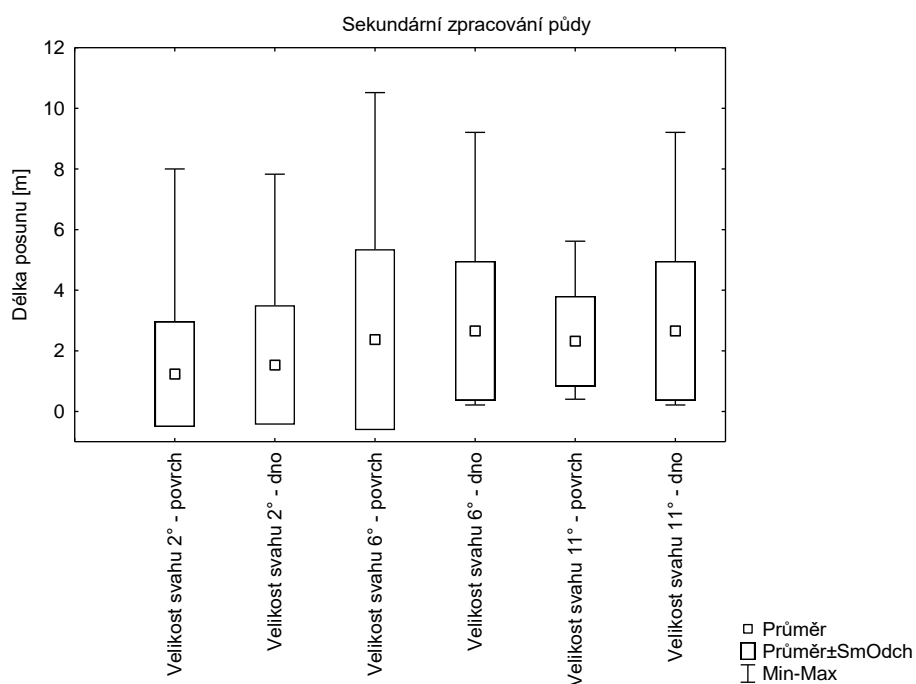


Graf č. 15: Velikosti vektorových úhlů značkovačů talířového kypřiče s geometrií nástrojů do tvaru X.

Tabulka č. 10: Statistická významnost rozdílů pro vektorový úhel posunu značkovačů

Tukeyův HSD test; proměnná Prom3 (Tabulka dat1) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = 1155,6, SV = 114,00			
Č. buňky	Prom1	Prom3 Průměr	1
2	Velikost svahu 2° - dno	13,08388	****
1	Velikost svahu 2° - povrch	27,34693	****
6	Velikost svahu 11° - dno	27,99234	****
5	Velikost svahu 11° - povrch	30,28330	****
4	Velikost svahu 6° - dno	30,75077	****
3	Velikost svahu 6° - povrch	35,86111	****

Výsledky posunu půdních značkovačů, pro radličkový kypřič jsou uvedeny v grafu č.16. Z grafu je patrné, že větší posun značkovače byl zaznamenán na pokusné parcelace se sklonem 6°. Jednalo se o značkovač, který byl při experimentu umístěn na povrchu. Maximální posun činil 10,52 m. Statistická významnost je uvedena v tabulce číslo 11. Statistická významnost s využitím Tukeyova testu nebyla zaznamenána.

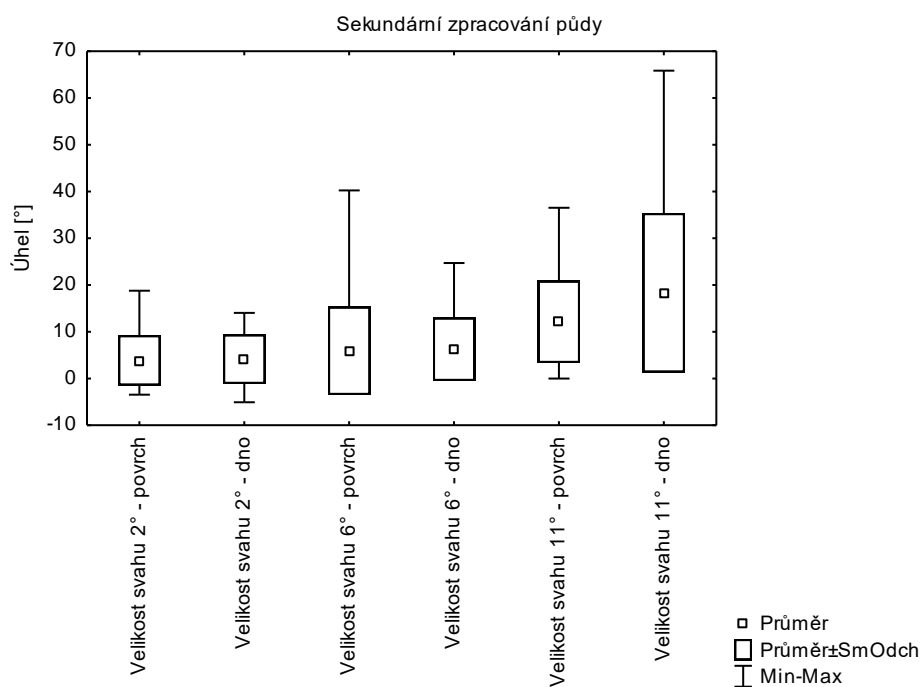


Graf č. 16: Výsledky posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tabulka č. 11: Statistická významnost rozdílů u délky posunu značkovačů

Tukeyův HSD test; proměnná Var2 (Tabulka dat2) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = 4,7640, SV = 114,00			
Č. buňky	Var1	Var2 Průměr	1
1	Velikost svahu 2° - povrch	1,232907	****
2	Velikost svahu 2° - dno	1,535786	****
5	Velikost svahu 11° - povrch	2,316565	****
3	Velikost svahu 6° - povrch	2,367988	****
6	Velikost svahu 11° - dno	2,660799	****
4	Velikost svahu 6° - dno	2,660799	****

Velikost vektorových úhlů je zaznamenána v grafu č. 17. Z grafu je patrné, že značkovače umístěné na parcelách měly po provedení experimentu kladný, tedy erozní, směr. Největší průměrný úhel posunu značkovačů 35,56° byl zaznamenán na parcele se sklonem 11° a značkovači, které byly umístěny na povrchu. Statisticky významné rozdíly nebyly v případech velikosti vektorových úhlů zaznamenány. Statisticky významné rozdíly jsou uvedeny v tabulce číslo 12.



Graf č. 17: Velikosti vektorových úhlů značkovačů radličkového kypřiče

Tabulka č. 12: Statistická významnost rozdílů pro vektorový úhel posunu značkovačů

Tukeyův HSD test; proměnná Var3 (Tabulka dat2) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = 92,680, SV = 114,00				
Č. buňky	Var1	Var3 Průměr	1	2
1	Velikost svahu 2° - povrch	3,88519	****	
2	Velikost svahu 2° - dnc	4,13969	****	
3	Velikost svahu 6° - povrch	5,91978	****	
4	Velikost svahu 6° - dnc	6,24538	****	
5	Velikost svahu 11° - povrch	12,10561	****	****
6	Velikost svahu 11° - dnc	18,34485		****

Celkové porovnání statistické významnosti naměřených hodnot vzdálenostního posunu pro jednotlivé stroje ukazuje tabulka číslo 13. Z tabulky je patrné, že statisticky významný rozdíl se nachází mezi talířovými kypřiči a radličkovým kypřičem. Tabulka číslo 14 ukazuje statistickou významnost vektorového úhlu pro jednotlivé stroje. Z tabulky je patrné že statisticky významný rozdíl se nachází mezi talířovými kypřiči a radličkovým kypřičem.

Tabulka č. 13: Statistická významnost posunu značkovačů u měřených strojů

Tukeyův HSD test; proměnná Var3 (Tabulka dat2) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = 1,6720, SV = 357,00				
Č. buňky	Var1	Var3 Průměr	1	2
3	Talířový kypřič s geometrií nástrojů do >	0,273341	****	
2	Talířový kypřič s rovnoběžnou geometrií	0,273884	****	
1	Radličkový kypřič	2,129140		****

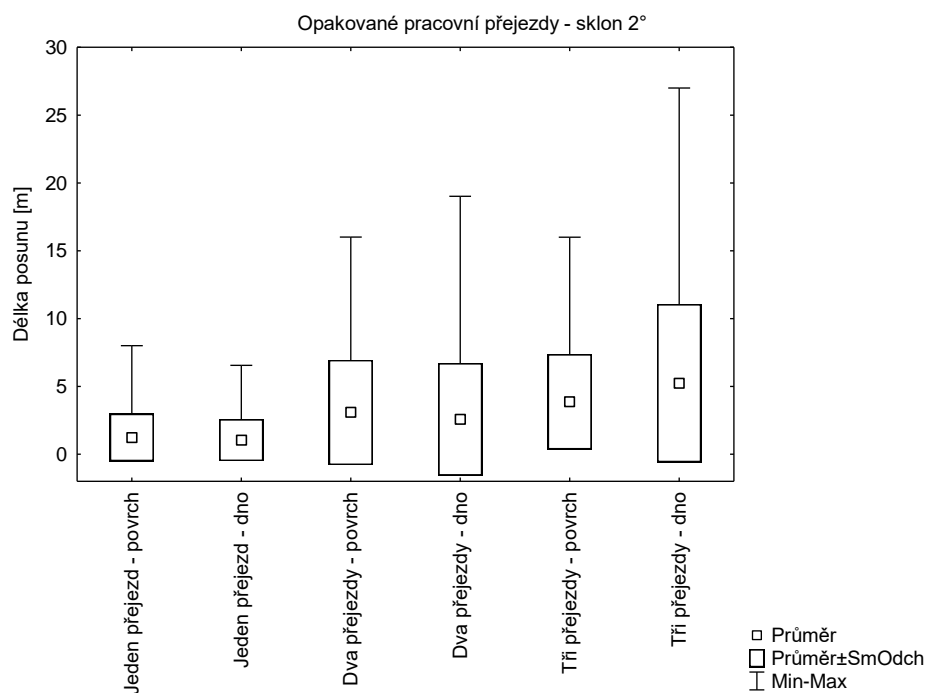
Tabulka č. 14: Statistická významnost velikosti vektorového úhlu značkovačů u měřených strojů

Tukeyův HSD test; proměnná Var4 (Tabulka dat2) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = 1108,0, SV = 357,00				
Č. buňky	Var1	Var4 Průměr	1	2
1	Radličkový kypřič	8,44008		****
2	Talířový kypřič s rovnoběžnou geometrií	22,90587	****	
3	Talířový kypřič s geometrií nástrojů do >	27,55305	****	

7.4 Hodnocení přesunu půdních částic s opakovanými přejezdy při přípravě půdy pro setí

Cílem polního experimentu bylo opět získat data potřebná k rozšíření podkladů pro racionální hospodaření na ohrožených půdách. Průměrná vlhkost půdy v době provádění experimentu byla naměřena 18,5 % obj., průměrná objemová hmotnost 1,41 g·cm⁻³ a průměrná pórovitost 46,71 %.

Výsledky posunu půdních značkovačů se sklonem 2°, pro radličkový kypřič jsou uvedeny v grafu č.18. Z grafu je patrné, že největší posun značkovačů byl naměřen u parcely se třemi opakovanými pracovními operacemi. Maximální posun činil 27 m. Statistická významnost je uvedena v tabulce číslo 15. Významnost byla vyhodnocena na základě provedení Tukeyova testu.

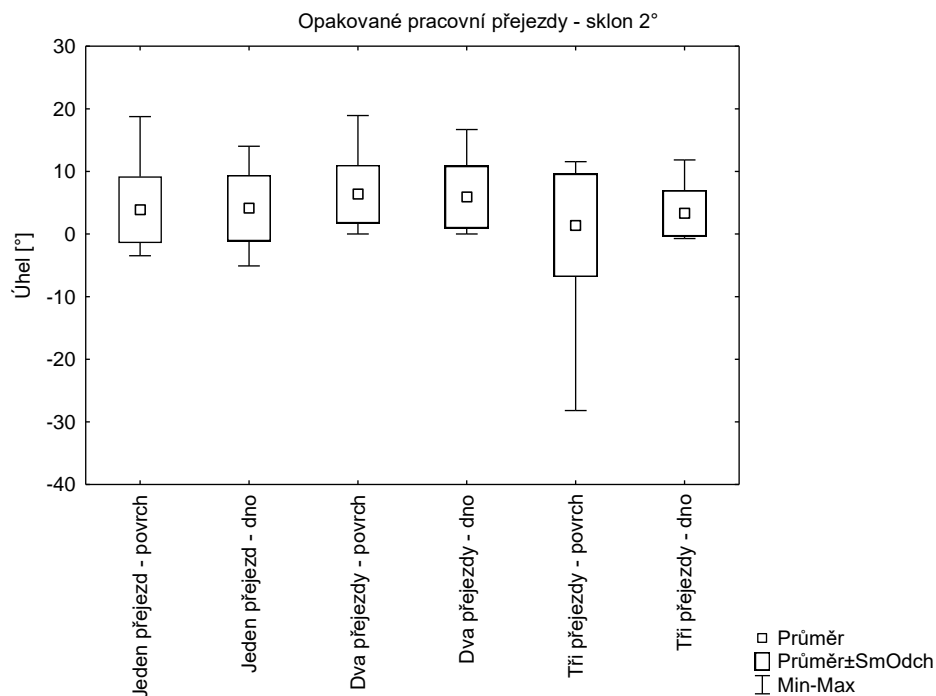


Graf č. 18: Výsledky posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tabulka č. 15: Statistická významnost posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tukeyův HSD test; proměnná Var5 (Tabulka dat1) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = 13,919, SV = 114,00				
Č. buňky	Var2	Var5 Průměr	1	2
2	Jeden přejezd - dno	1,007071	****	
1	Jeden přejezd - povrch	1,332900	****	
4	Dva přejezdy - dno	2,444749	****	****
3	Dva přejezdy - povrch	3,008195	****	****
5	Tři přejezdy - povrch	3,865458	****	****
6	Tři přejezdy - dno	5,239788		****

Velikost vektorových úhlů je zaznamenána v grafu č. 19. Statisticky významné rozdíly jsou uvedeny v tabulce číslo 16.

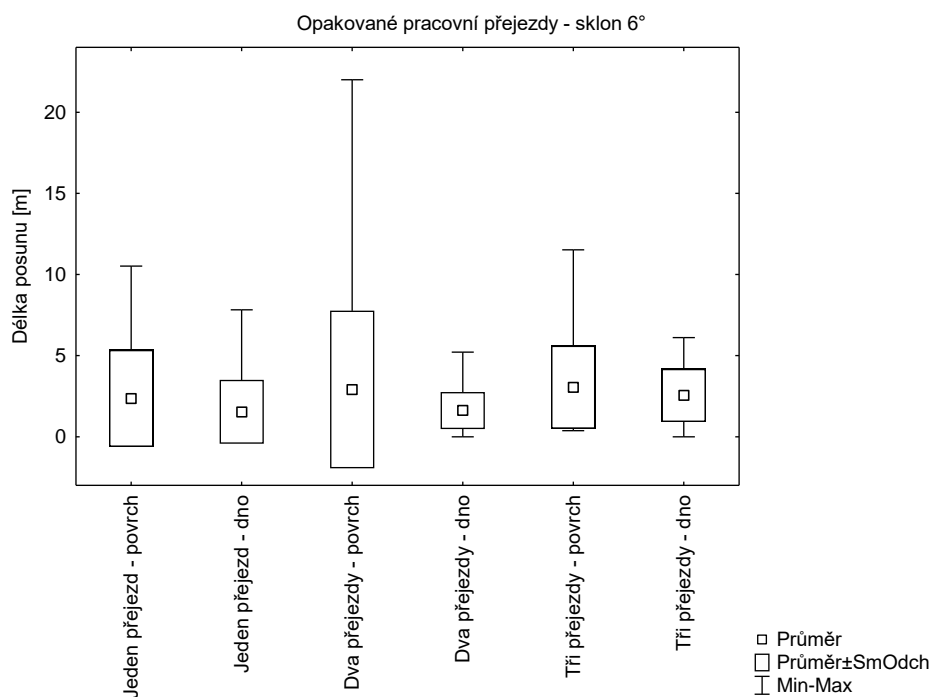


Graf č. 19: Velikosti vektorových úhlů značkovačů radličkového kypřiče

Tabulka č. 16: Statistická významnost velikosti vektorového úhlu posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tukeyův HSD test; proměnná Var6 (Tabulka dat1) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = 30,579, SV = 114,00			
Č. buňky	Var2	Var6 Průměr	1
5	Tři přejezdy - povrch	1,393169	****
6	Tři přejezdy - dno	3,307965	****
1	Jeden přejezd - povrch	3,885187	****
2	Jeden přejezd - dno	4,139686	****
4	Dva přejezdy - dno	5,902481	****
3	Dva přejezdy - povrch	6,384870	****

Výsledky posunu půdních značkovačů se sklonem 6°, pro radličkový kypřič jsou uvedeny v grafu č. 20. Z grafu je patrné, že největší posun značkovače byl naměřen u parcely se dvěma opakovanými pracovními operacemi. Maximální posun činil 22 m. Statistická významnost je uvedena v tabulce číslo 17. Významnost byla vyhodnocena na základě provedení Tukeyova testu.

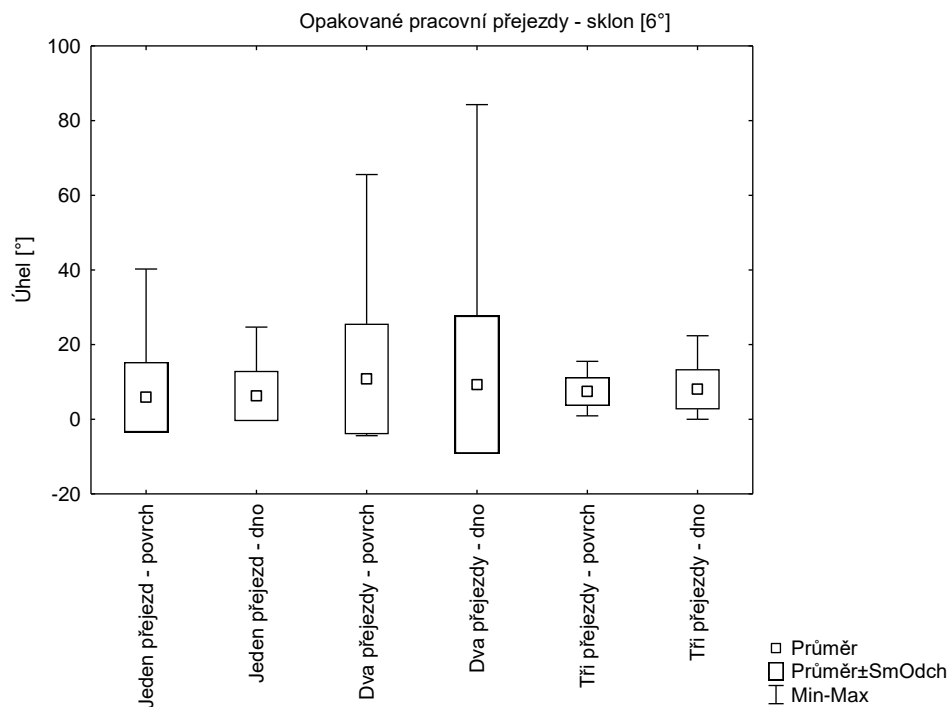


Graf č. 20: Výsledky posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tabulka č. 17: Statistická významnost posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tukeyův HSD test; proměnná Var4 (opakované 6) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = 7,8214, SV = 114,00			
Č. buňky	Var1	Var4 Průměr	1
2	Jeden přejezd - dno	1,535786	****
4	Dva přejezdy - dno	1,617527	****
1	Jeden přejezd - povrch	2,367988	****
6	Tři přejezdy - dno	2,549557	****
3	Dva přejezdy - povrch	2,914434	****
5	Tři přejezdy - povrch	3,057143	****

Velikost vektorových úhlů je zaznamenána v grafu č. 21. Statisticky významné rozdíly jsou uvedeny v tabulce číslo 18.

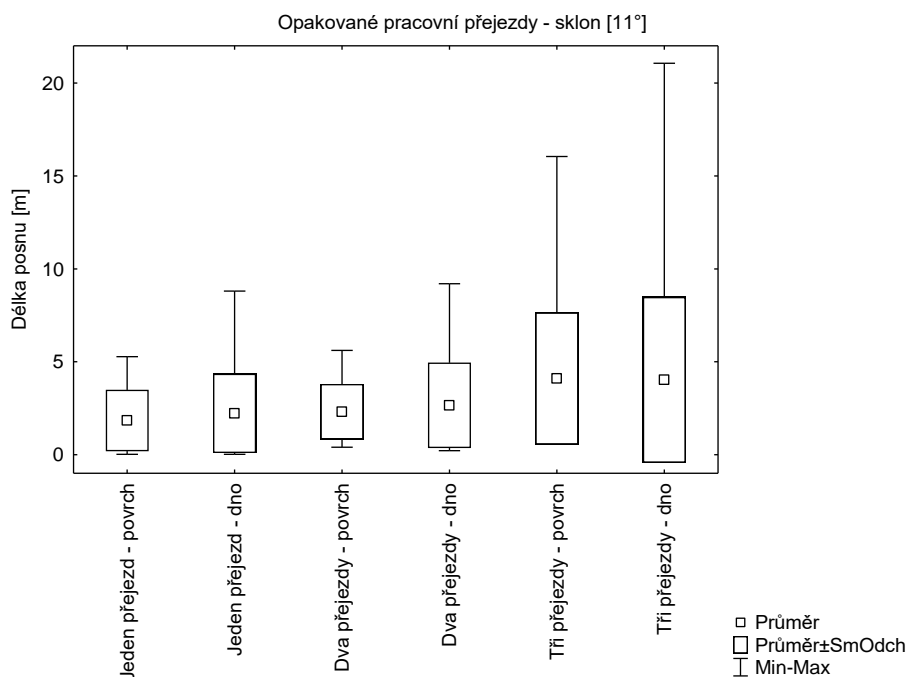


Graf č. 21: Velikosti vektorových úhlů značkovačů radličkového kypřiče

Tabulka č. 18: Statistická významnost velikosti vektorového úhlu posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tukeyův HSD test; proměnná Var5 (opakované 6) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = 122,87, SV = 114,00			
Č. buňky	Var1	Var5 Průměr	1
1	Jeden přejezd - povrch	5,91978	****
2	Jeden přejezd - dno	6,24538	****
5	Tři přejezdy - povrch	7,42132	****
6	Tři přejezdy - dno	8,03871	****
4	Dva přejezdy - dno	9,30168	****
3	Dva přejezdy - povrch	10,80962	****

Výsledky posunu půdních značkovačů se sklonem 11°, pro radličkový kypřič jsou uvedeny v grafu č.22. Z grafu je patrné, že největší posun značkovačů byl naměřen u parcely se třemi opakovanými pracovními operacemi. Maximální posun činil 21 m. Statistická významnost je uvedena v tabulce číslo 19. Významnost byla vyhodnocena na základě provedení Tukeyova testu.

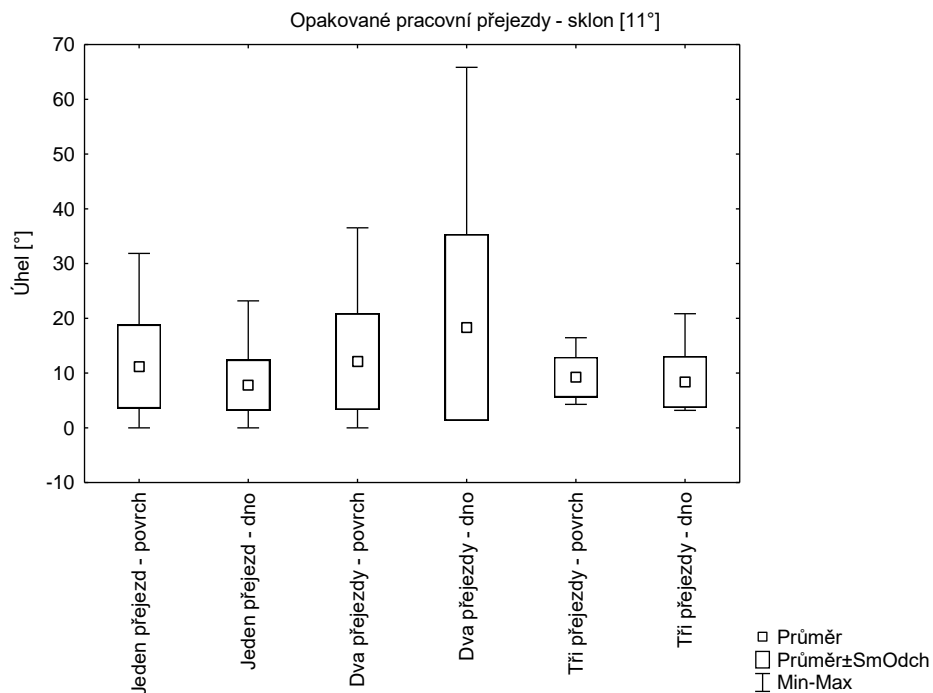


Graf č. 22: Výsledky posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tabulka č. 19: Statistická významnost posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tukeyův HSD test; proměnná Var4 (opakování 11) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = 7,8732, SV = 114,00			
Č. buňky	Var1	Var4 Průměr	1
1	Jeden přejezd - povrch	1,843565	****
2	Jeden přejezd - dno	2,227191	****
3	Dva přejezdy - povrch	2,316565	****
4	Dva přejezdy - dno	2,660799	****
6	Tři přejezdy - dno	4,029685	****
5	Tři přejezdy - povrch	4,101970	****

Velikost vektorových úhlů je zaznamenána v grafu č. 23. Statisticky významné rozdíly jsou uvedeny v tabulce číslo 20.



Graf č. 23: Velikosti vektorových úhlů značkovačů radličkového kypřiče

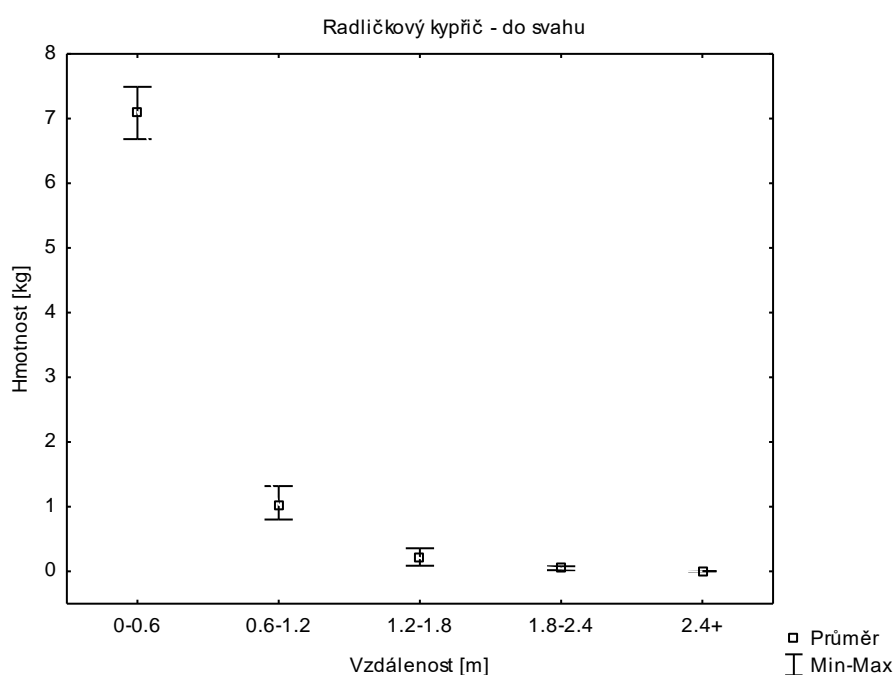
Tabulka č. 20: Statistická významnost velikosti vektorového úhlu posunu půdních značkovačů radličkového kypřiče

Tukeyův HSD test; proměnná Var5 (opakování 11) Homogenní skupiny, alfa = ,05000 Chyba: meziskup. PČ = 80,154, SV = 114,00				
Č. buňky	Var1	Var5 Průměr	1	2
2	Jeden přejezd - dno	7,81756	****	
6	Tři přejezdy - dno	8,38942	****	
5	Tři přejezdy - povrch	9,27305	****	
1	Jeden přejezd - povrch	11,20377	****	****
3	Dva přejezdy - povrch	12,10561	****	****
4	Dva přejezdy - dno	18,34485		****

7.5 Hodnocení přesunu půdních částic s využitím makroznačkovačů drtě bílého vápence

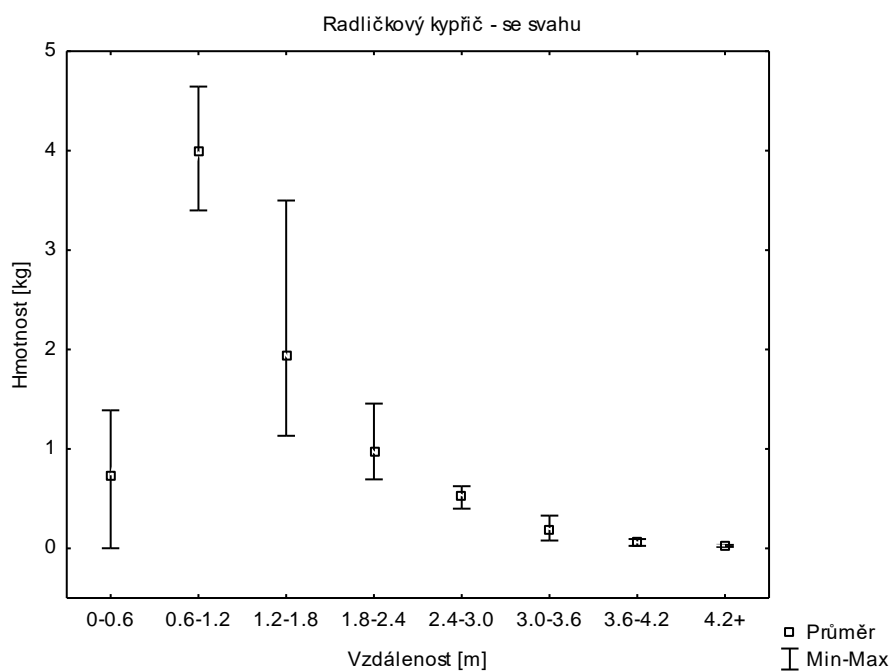
Cílem polního experimentu v této dílčí studii bylo vyhodnotit vliv přemístění půdních částic při využití jedné skupiny značkovačů. Dílčí cíl byl v souladu s již výše uvedenými dílčími cíli. Průměrná vlhkost půdy v době provádění experimentu byla naměřena 7,3 % obj., průměrná objemová hmotnost $1,43 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a průměrná pórovitost 45,71 %.

Výsledky hmotnostního posunu drtě bílého vápence při pohybu stroje do svahu jsou zaznamenány v grafu číslo 24. Z grafu je patrné že nejvíce značkovačů bylo umístěno v rozmezí 0,0 a z 0,6 m. Pohyb drtě byl zaznamenávána do vzdálenosti 2,4 m.



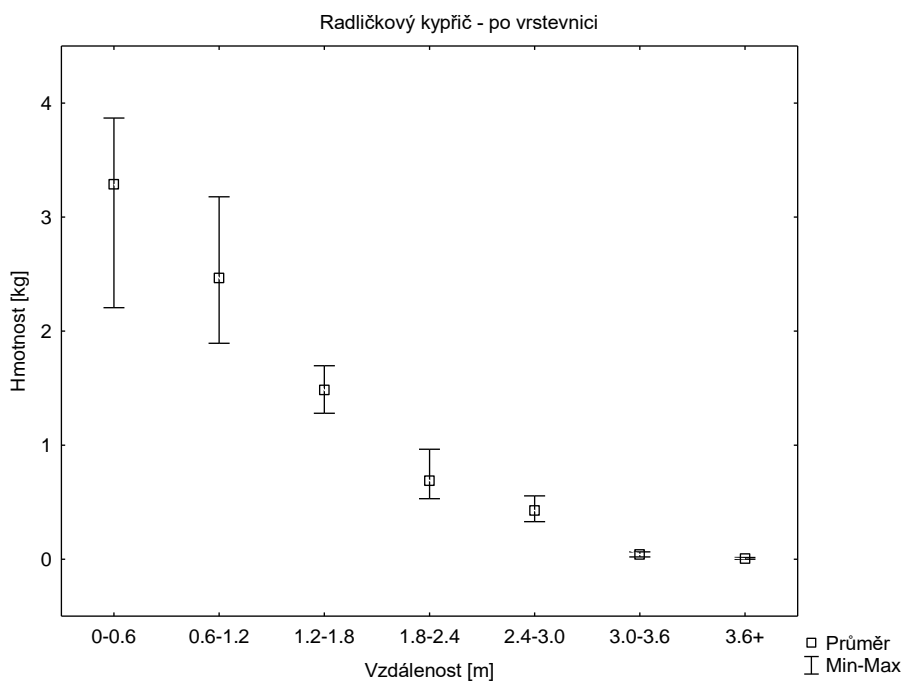
Graf č. 24: Hmotnostní posun (do svahu)

Výsledky hmotnostního posunu drtě bílého vápence při pohybu stroje ze svahu jsou zaznamenány v grafu číslo 25. Z grafu je patrné že nejvíce značkovačů bylo umístěno v rozmezí 0,6 a z 1,2 m. Pohyb drtě byl zaznamenávána do vzdálenosti 4,2 m.



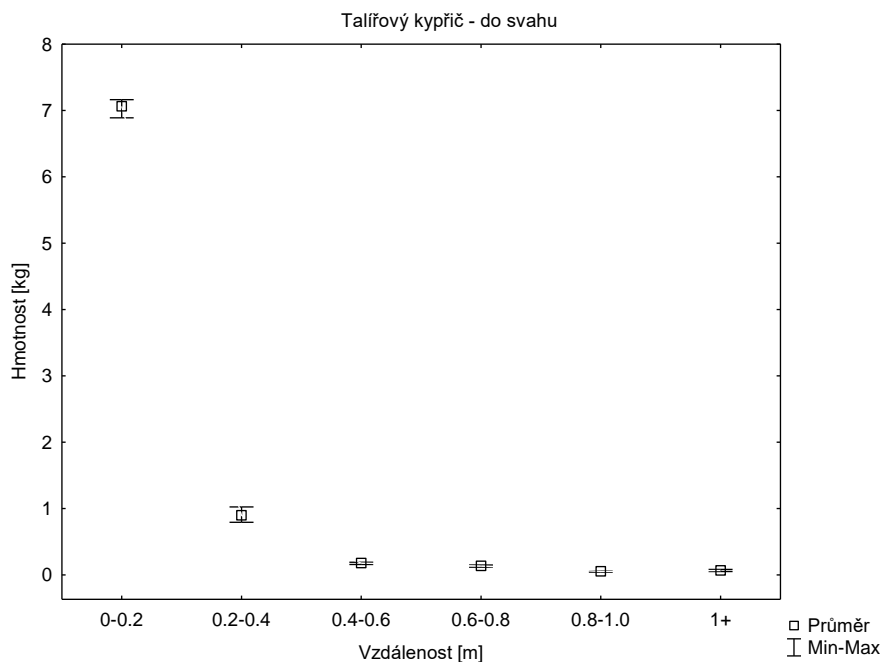
Graf č. 25: Hmotnostní posun (se svahu)

Výsledky hmotnostního posunu drtě bílého vápence při pohybu stroje po vrstevnici jsou zaznamenány v grafu číslo 26. Z grafu je patrné že nejvíce značkovačů bylo umístěno v rozmezí 0 a z 0,6 m. Pohyb drtě byl zaznamenávána do vzdálenosti 3,6 m.



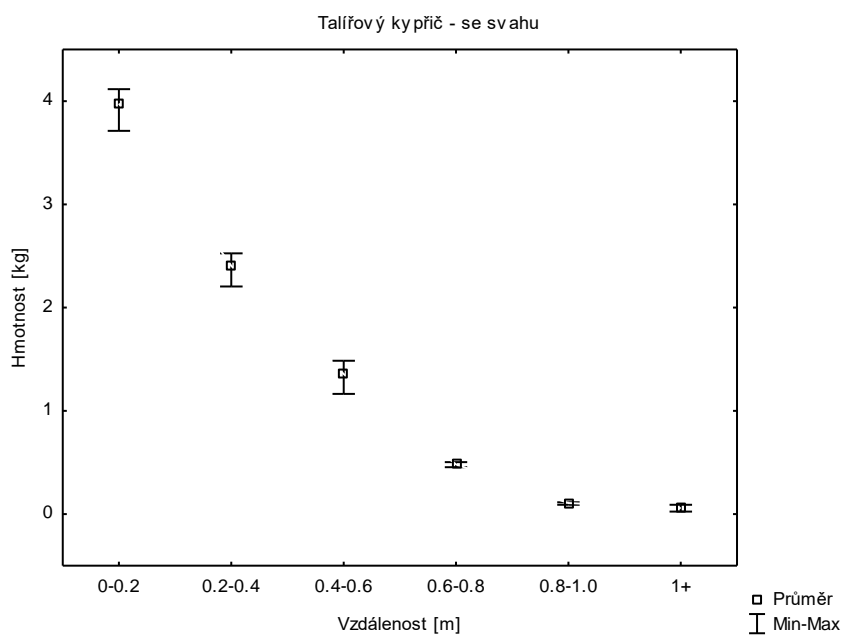
Graf č. 26: Hmotnostní posun (po vrstevnici)

Výsledky hmotnostního posunu drtě bílého vápence při pohybu stroje do svahu jsou zaznamenány v grafu číslo 27. Z grafu je patrné, že nejvíce značkovačů bylo umístěno v rozmezí 0 a z 0,2 m. Pohyb drtě byl zaznamenávána do vzdálenosti 1 m.



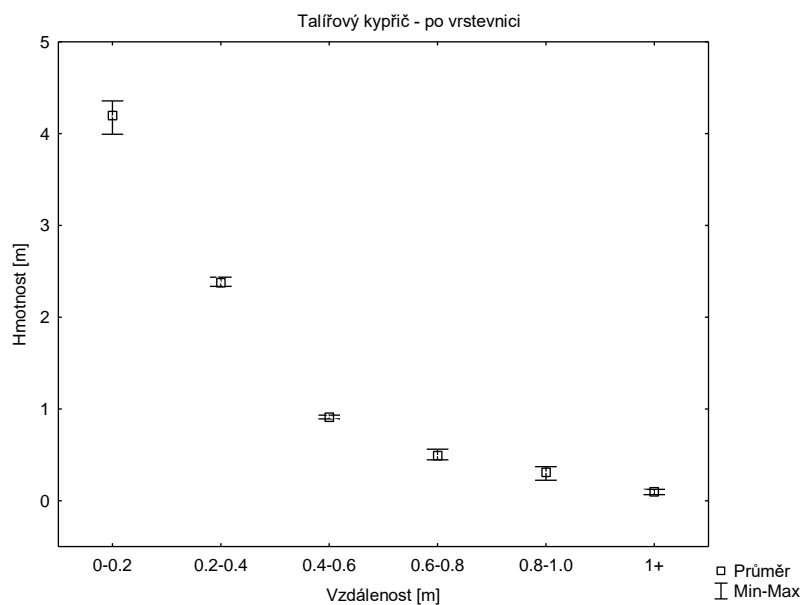
Graf č. 27: Hmotnostní posun (do svahu)

Výsledky hmotnostního posunu drtě bílého vápence při pohybu stroje ze svahu jsou zaznamenány v grafu číslo 28. Z grafu je patrné, že nejvíce značkovačů bylo umístěno v rozmezí 0 a z 0,2 m. Pohyb drtě byl zaznamenávána do vzdálenosti 1 m.



Graf č. 28: Hmotnostní posun (se svahu)

Výsledky hmotnostního posunu drtě bílého vápence při pohybu stroje po vrstevnici jsou zaznamenány v grafu číslo 29. Z grafu je patrné, že nejvíce značkovačů bylo umístěno v rozmezí 0 a z 0,2 m. Pohyb drtě byl zaznamenáván do vzdálenosti 1 m.

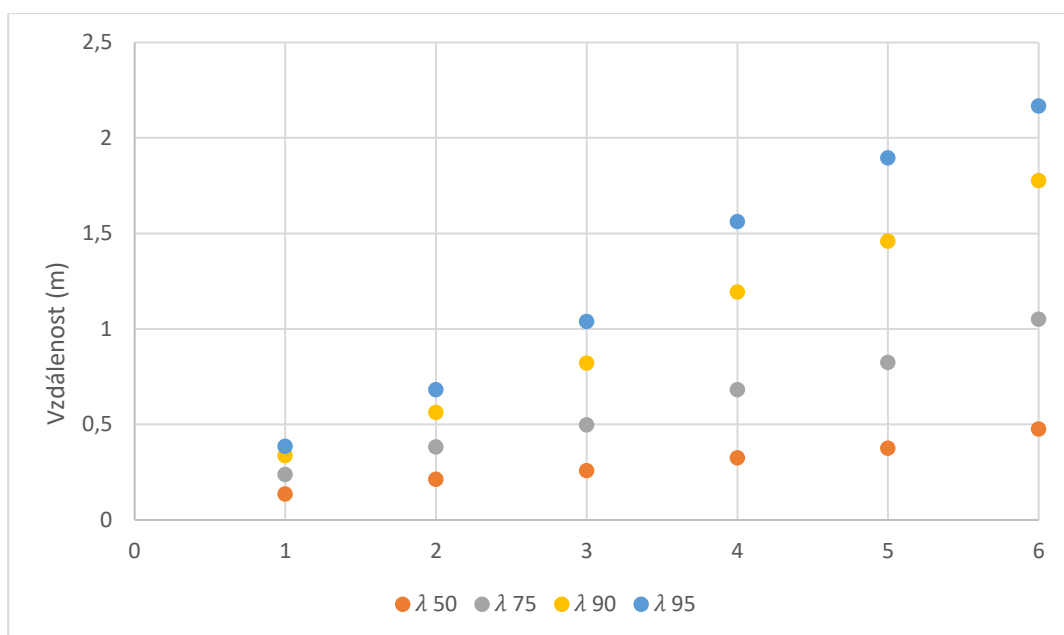


Graf č. 29: Hmotnostní posun (po vrstevnici)

7.6 Hodnocení rozmístění půdních částic pracovními nástroji radličkového a talířového kypřiče při třech pracovních rychlostech

Cílem experimentu bylo zhodnotit rozmístění půdních částic pracovními nástroji radličkového a talířového kypřiče při třech pracovních rychlostech a posoudit souvislost s erozí zpracováním půdy. Obsah částic menších než 0,01 mm v ornici byl 29 %. Pozemek byl po sklizni ovsa (sklizeň senáže). Vlhkost půdy v době měření byla 12,2 %, průměrná objemová hmotnost 1,50 g·cm⁻³ a průměrná pórovitost 43,1 %.

Graf číslo 30 ukazuje vzdálenost od začátku drážky na ose x a relativní koncentrace (frekvence) značkovačů na ose y. Drážka, místo, ve kterém se značkovací drť na začátku experimentu se nacházela, vytváří základ pro hypotetické distribuční funkce. Frekvence na jednotlivých vzdálenostech se sečtou, aby vznikla součtová křivka, která nabývá hodnoty od nuly do jedné. Oblast nad křivkou představuje relativní množství přemístěné zeminy (Lobb a Kachanoski 1999), druhý integrál uvažuje posunutí zeminy proti směru jízdy, například na svahu. K vyhodnocení statistických hypotéz byl použit Kruskal-Wallisův test a Tukeyův test signifikantních rozdílů (HSD). Podle Lobba a Kachanoski (1999) byla vytvořena sumační křivka, která



Graf č. 30: Percentilové vzdálenosti

byla vypočtena pro každou rychlost a každý stroj z průměrné hodnoty pro každou vzdálenost (interval). λ50, K vyhodnocení byly použity percentily λ75, λ90 a λ95 variabilita posunu

indikátoru. Ty určují vzdálenost, na kterou je 50, 75, 90 a 95 % vzdálenosti sledované drtě přesunuto (např.: 50 % částic se posunulo o $\lambda 50$ a méně) - (Lobb et al. 2001).

Vybrané popisné charakteristiky pro stroj a rychlostní skupiny jsou uvedeny v tabulce 21.

Tabulka č. 21: Statistická popisná statistika indikátorů přemístěných mimo drážku

Stroj	Množství přemístěných stopovačů [kg]	Aritmetický průměr [m]	Směrodatná odchylka [m]	Maximální vzdálenost [m]	Dolní kvartil [m]	Horní kvartil [m]
T1	20,99	0,46	0,5	3,45	0,15	0,45
T2	20,96	0,51	0,6	3,45	0,15	0,75
T3	16,62	0,65	0,72	3,45	0,15	0,75
D1	2,32	0,18	0,11	1,35	0,15	0,15
D2	3,99	0,31	0,23	1,35	0,15	0,45
D3	6,21	0,36	0,34	1,65	0,15	0,45

T- radličkový kypřič, D-talířový kypřič; rychlost: 1- 4,5 km·h⁻¹, 2 – 9 km·h⁻¹, 3 – 14- km·h⁻¹

Z tabulky je vidět, že hmotnost posunutých značkovačů vně drážky se zvyšovala s pracovní rychlostí talířového kypřiče. To může být způsobeno tím, že při nízkých rychlostech se část stopovačů pohybovala pouze uvnitř drážky. Naopak, u radličkového kypřiče byl počet přemístěných stopovačů podobný v prvních dvou rychlostech a při nejvyšší rychlosti byl výrazně nižší. Jak může být vidět ze středních hodnot, ve všech případech mimo nejvyšších pracovních rychlostí radličkového kultivátoru se pohybovala pouze více než polovina všech částic do prvního intervalu se střední hodnotou 0,15 m. Dále je vidět, že s přibývajícím pracovní rychlostí se aritmetický průměr a směrodatná odchylka zvyšuje.

Podélný posuv byl rozdělen do několika sekcí. Data jsou vyjádřena také pomocí homogenních skupin. Data ukazují vliv rychlosti stroje i mnohem intenzivnější práci radličkového kypřiče. V několika málo případech byl zaznamenán statisticky významný rozdíl. Tabulky 22 a 23 obsahují primární posun - data pro oba stroje.

Tabulka č. 22: Hmotnostní podélný posun pro talířový kypřič

Vzdálenost [m]	Hmotnost posunu [kg] pro rozdílné rychlosti [km·h ⁻¹]		
	D1	D2	D3
0 – 0,3	0,690 ^a	0,823 ^a	1,267 ^a

0,3 – 0,6	0,078 ^a	0,353 ^b	0,391 ^b
0,6 – 0,9	0,002 ^a	0,124 ^a	0,212 ^a
0,9 – 1,2	0,001 ^a	0,024 ^a	0,110 ^b
1,2 – 1,5	0,001 ^a	0,004 ^a	0,088 ^a
1,5 a více	0 ^a	0 ^a	0,003 ^a

^{a,b}označení stejnorodé skupiny ($P=0,95$); rychlost: 1- 4,5 km·h⁻¹, 2- 9 km·h⁻¹, 3- 14- km·h⁻¹

Tabulka č. 23: Hmotnostní podélný posun pro radličkový kypřič

Vzdálenost [m]	Hmotnost posunu [kg] pro rozdílné rychlosti [km·h ⁻¹]		
	T1	T2	T3
0 – 0,3	3,963 ^a	3,887 ^a	2,477 ^a
0,3 – 0,6	1,393 ^a	1,257 ^a	1,367 ^a
0,6 – 0,9	0,667 ^a	0,630 ^a	0,377 ^a
0,9 – 1,2	0,370 ^a	0,390 ^a	0,440 ^a
1,2 – 1,8	0,415 ^a	0,439 ^a	0,374 ^a
1,8 – 2,4	0,120 ^a	0,168 ^{a,b}	0,329 ^a
2,4 – 3,0	0,050 ^a	0,122 ^{a,b}	0,171 ^b
3 a více	0,016 ^a	0,044 ^a	0,056 ^a

^{a,b}označení stejnorodé skupiny ($P=0,95$); rychlost: 1- 4,5 km·h⁻¹, 2- 9 km·h⁻¹, 3- 14- km·h⁻¹

Tabulka 24 ukazuje hodnoty získané pomocí součtu - křivková metoda. Podle Lobba a Kachanoskiho (1999) byla vytvořena sumační křivka, která byla vypočítaná pro každou rychlost a každý stroj z průměrné hodnoty pro každou vzdálenost.

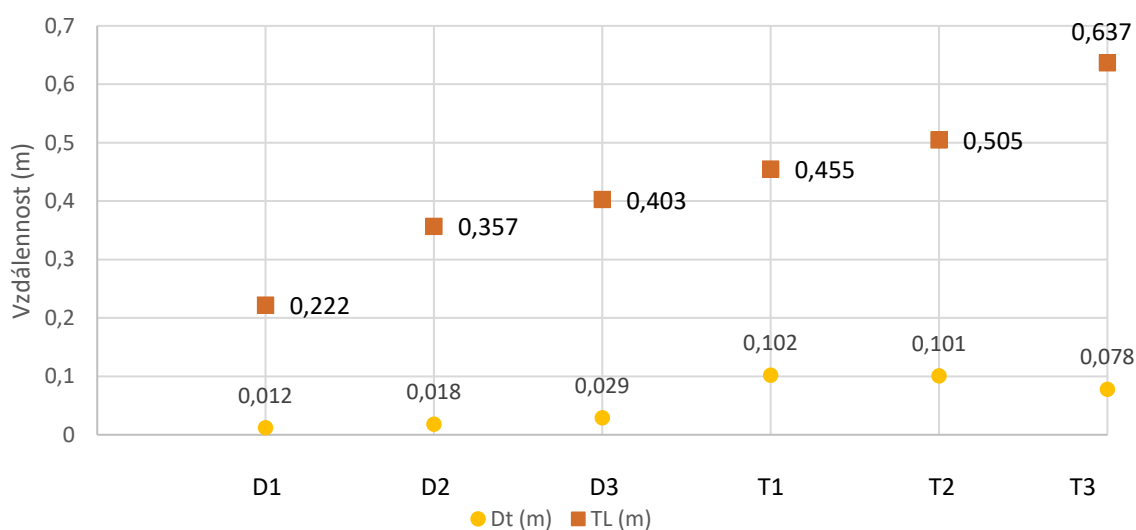
Tabulka č. 24: Hodnoty získané metodou součtové křivky

Parametry	D1	D2	D3	T1	T2	T3
Dp [m]	0,100	0,100	0,100	0,200	0,200	0,200
Dt [m]	0,012	0,018	0,029	0,102	0,101	0,078
Tp [m]	0,026	0,064	0,116	0,232	0,256	0,248
TL [m]	0,222	0,357	0,403	0,455	0,505	0,637
Tm [kg·m]	3,900	9,650	17,380	69,620	76,740	74,380
λ 50 [m]	0,135	0,213	0,258	0,324	0,375	0,476
λ 75 [m]	0,238	0,381	0,497	0,681	0,824	1,05

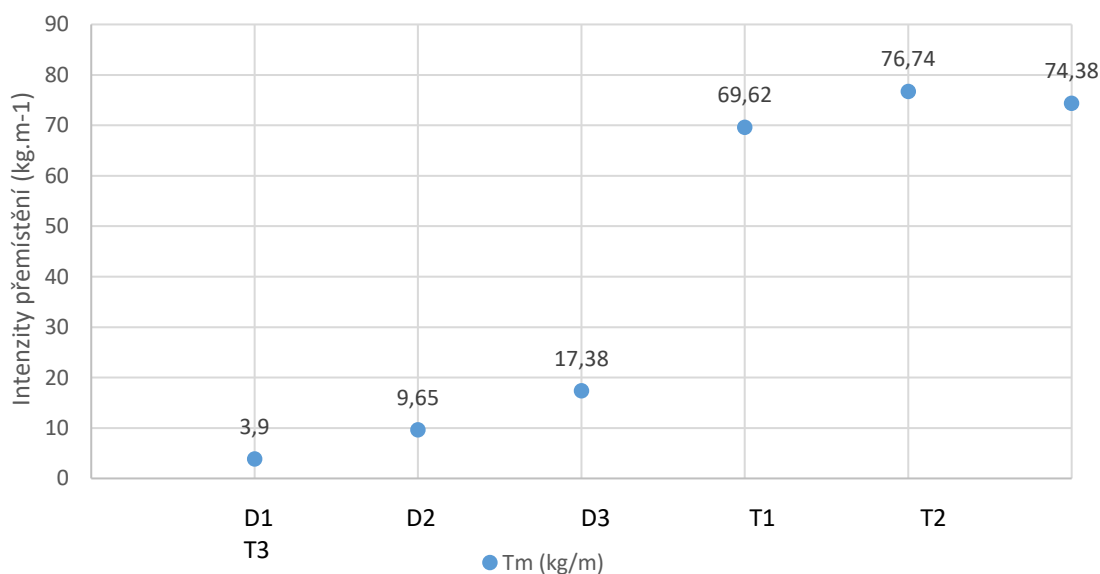
λ_{90} [m]	0,336	0,562	0,821	1,193	1,459	1,776
λ_{95} [m]	0,385	0,682	1,039	1,561	1,895	2,167
ε	1,090	0,870	1,350	1,330	1,240	0,490

D - talířový kypřič, *T* – radličkový kypřič; rychlost: 1- 4,5 km·h⁻¹, 2- 9 km·h⁻¹, 3- 14- km·h⁻¹
Dp - hloubka drážky, *Dt* - hloubka zpracování, *Tp* – posunutí přes *Dp*, *TL* – posunutí přes *Dt*, *Tm* – intenzita přemístění půdy, λ_{50} , λ_{75} , λ_{90} , λ_{95} – percentily, ε – chyba měření.

Hodnoty ukazují nižší účinek talířového kypřiče. Vliv rychlosti je také mnohem výraznější u talířového kypřiče než u radličkového kypřiče. Grafy 31 a 32 ukazují hodnoty získané pomocí metody součtové křivky.



Graf č. 31: Označuje podélnou vzdálenost



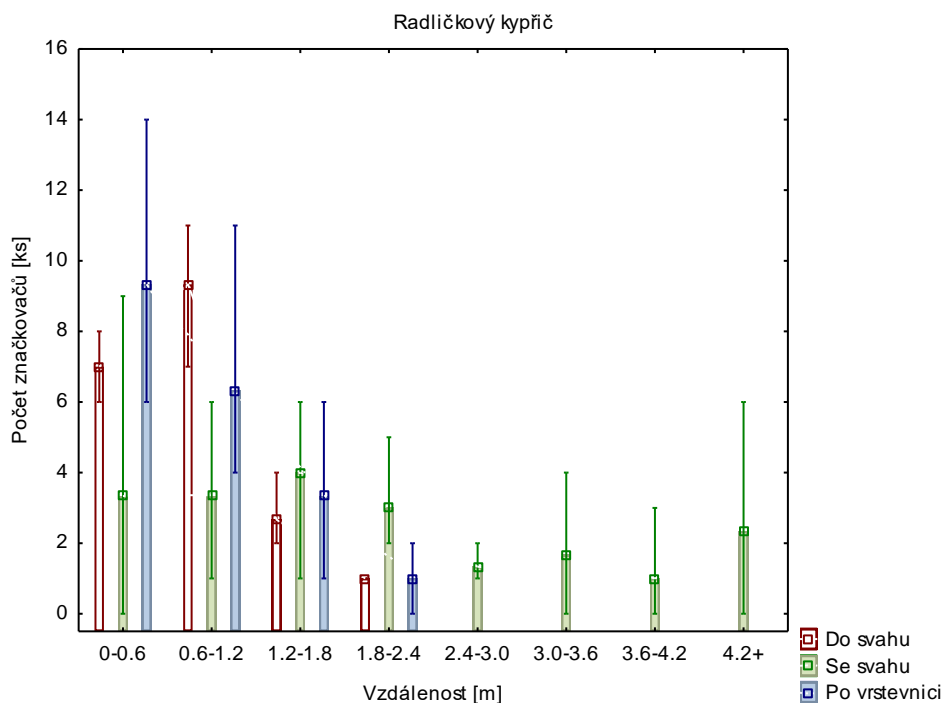
Graf č. 32: Označuje intenzity přemístění půdy (*Tm*)

Částice po zpracování talířovým kypřičem se přemístily, částice v hloubce zpracování (TL), do vzdálenosti přibližně 0,3 m a u radličkového kypřiče do vzdálenosti 0,5 m, jak je patrné z grafu 32. Jak z hodnoty intenzity přemístění zeminy T_m , tak z přemístění T_p pro hloubku drážky D_p , je vidět, že radličkový kypřič posunul značkovací stopovače více intenzivně. Je to dáno především větší hloubkou zpracování půdy D_t , stejně jako větší vzdálenost přemístění v hloubce zpracování půdy TL. Zároveň rychlosti obou strojů, intenzita posuvu T_m radličkového kypřiče byla asi sedminásobně vyšší než u talířového podmítače. Z hodnot vzdáleností posunutí TL, T_p , intenzity posunutí T_m a z procentuálních hodnot lze vidět posunutí se zvyšující se pracovní rychlostí (tabulka 21 a 22). Nárůst je nejlépe vidět především v nejvyšších percentilech. Posun radličkového kypřiče se s rostoucí rychlostí zvyšoval méně než u talířového kypřiče.

7.7 Hodnocení vlivu přemístění půdních částic u dvou strojů určených na zpracování půdy

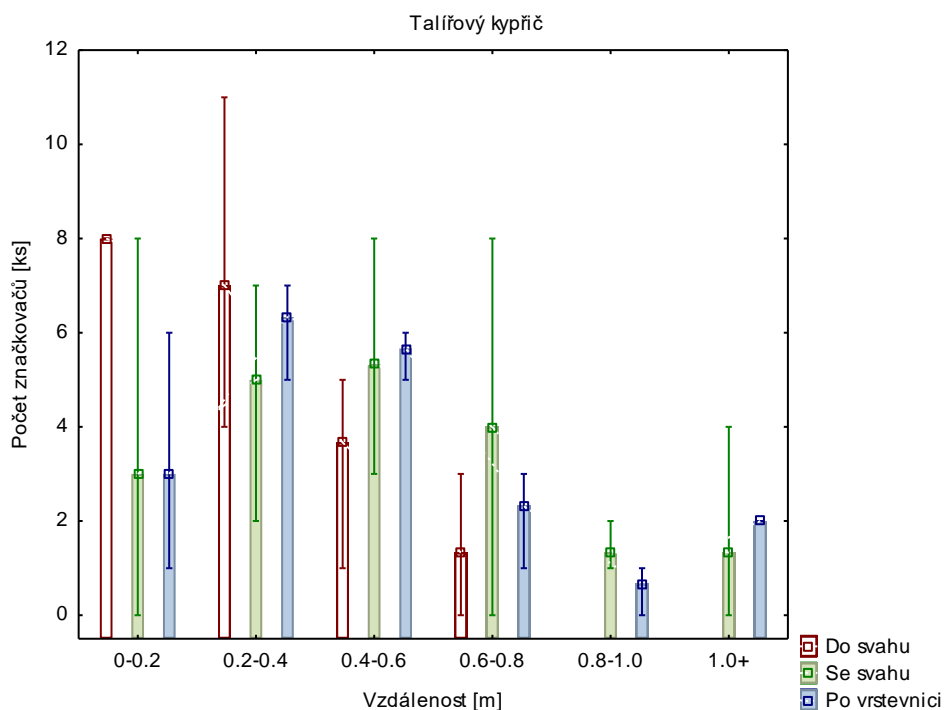
Experiment byl zaměřen na hodnocení posunu půdních částic při primárním zpracování půdy. Cílem polního experimentu v této studii bylo vyhodnotit vliv přemístění půdních částic dvou stroji určených na zpracování půdy. Dílčím cílem experimentu bylo prověřit jednotlivé metody měření a porovnat jednotlivé získané výsledky (s předchozím půdním experimentem číslo 5, Hodnocení přesunu půdních částic s využitím makroznačkovačů drtě bílého vápence). Průměrná vlhkost půdy v době provádění experimentu byla naměřena 13,1 %. Průměrná objemová hmotnost $1,50 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a průměrná pórovitost 44,1 %.

Výsledky posunu značkovačů při zpracování půdy radličkovým kypřičem a jejich zaznamenané množství je uvedeno v grafu číslo 33. Z grafu jsou viditelné výsledky měření pro pracovní pohyb do svahu, ze svahu a po vrstevnici. Při pracovním pohybu stroje se svahu byla naměřena maximální vzdálenost posunu značkovače 8 m. Při pracovním pohybu stroje do svahu byla naměřena maximální vzdálenost značkovače 2,2 m. Při pracovním pohybu stroje po vrstevnici byla naměřena maximální vzdálenost 2,25 m.



Graf č. 33: Množství a vzdálenost posunu značkovačů při zpracování půdy radličkovým kypřičem

Výsledky posunu značkovačů při zpracování půdy talířovým kypřičem a jejich zaznamenané množství je uvedeno v grafu číslo 34. Z grafu jsou viditelné výsledky měření pro pracovní pohyb do svahu, ze svahu a po vrstevnici. Při pracovním pohybu stroje se svahu byla naměřena maximální vzdálenost posunu značkovače ve 1,5 m. Při pracovním pohybu stroje do svahu byla naměřena maximální vzdálenost značkovače 0,78 m. Při pracovním pohybu stroje po vrstevnici byla naměřena maximální vzdálenost 1,8 m.



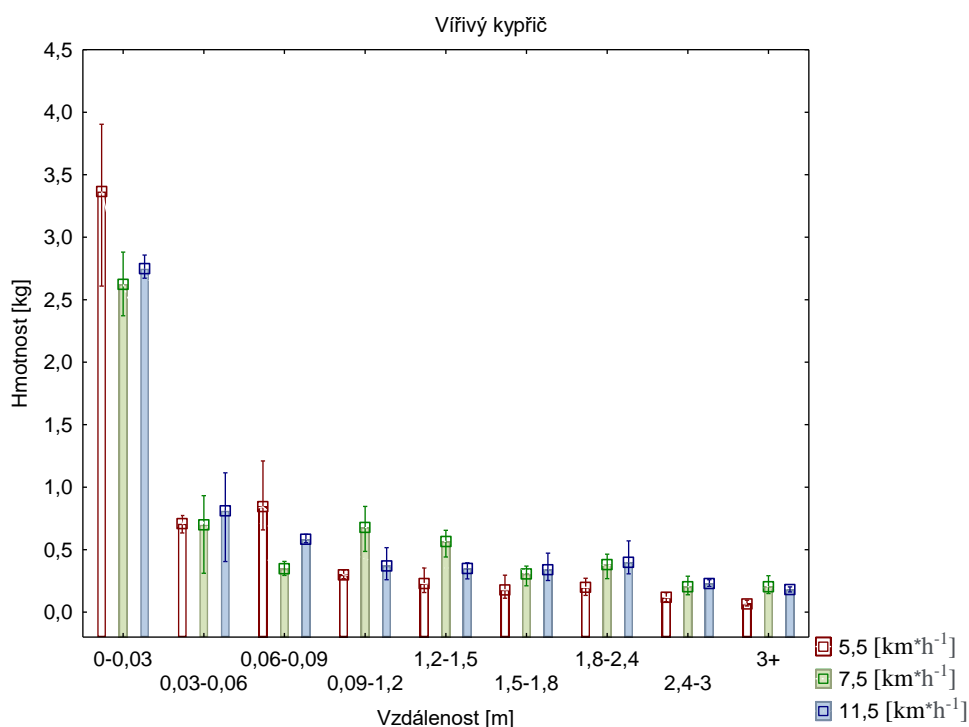
Graf č. 34: Množství a vzdálenost posunu značkovačů při zpracování půdy talířovým kypřičem

7.8 Hodnocení přemístění půdních částic aktivně poháněným kypříčem

Cílem polního experimentu v této dílčí studii bylo vyhodnotit vliv přemístění půdních částic při využití jedné skupiny značkovačů pro aktivně poháněný kypříč.

Dílčí cíl byl v souladu s již výše uvedenými dílčími cíli. Průměrná vlhkost půdy v době provádění experimentu byla naměřena 10,7 %. Průměrná objemová hmotnost $1,32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a průměrná pórovitost 50,4 %.

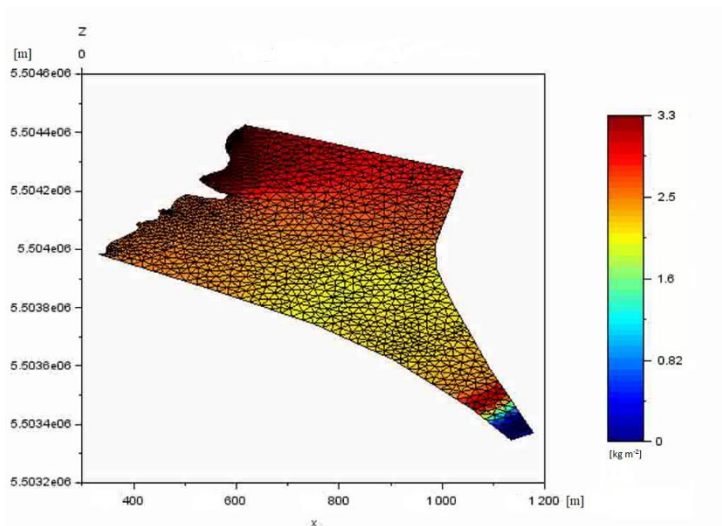
Výsledky hmotnostního posunu drtě bílého vápence při pohybu stroje po vrstevnici jsou zaznamenány v grafu číslo 35. Nejvzdálenější částice při pracovní rychlosti $5,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ byla nalezena ve vzdálenosti 5,97 m. Nejvzdálenější částice při pracovní rychlosti $7,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ byla nalezena ve vzdálenosti 5,27 m a nejvzdálenější částice při pracovní rychlosti $11,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \pm 0,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ byla nalezena ve vzdálenosti 8,1 m.



Graf č. 35: Množství a vzdálenost posunu značkovačů při zpracování půdy vířivým kypříčem

7.9 Modelace pohybu půdních částic

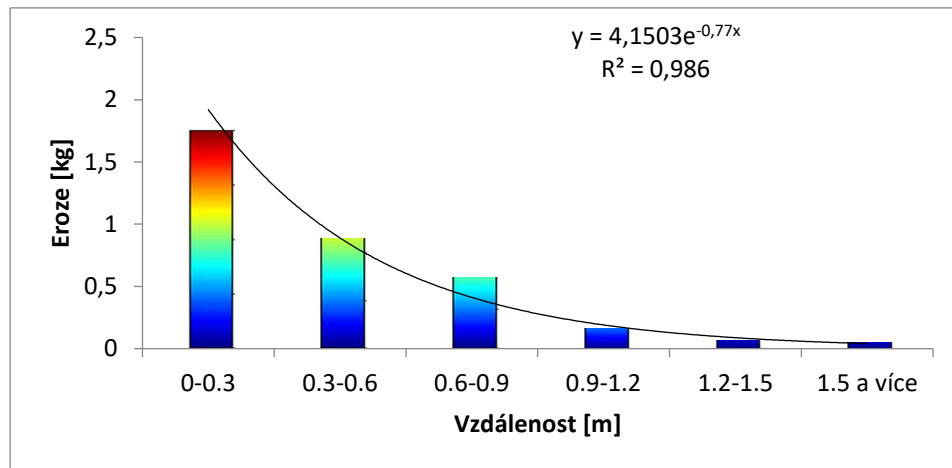
Na základě výše uvedených informací byla vypočtena ztráta půdy modelů DRUtES. Údaje jsou uvedeny na obrázku číslo 19. Nejvyšší riziko eroze půdy způsobující nejvyšší ztrátu půdy bylo analyzováno na strmých oblastech. Zde logicky souvisí svažitost a difúzní vlna (zpracování půdy) má přímý vliv na tento jev. Potenciální ztráta půdy se podle modelu DRUtES pohybovala od 0 do $3,3 \text{ kg m}^{-2}$, potenciál je znázorněn na obrázku číslo 20. Model prokazuje přímou souvislost mezi topografií pozemku a erozivním účinkem zpracování půdy. Tento výsledek modelace je tak v souladu s výsledky naměřenými v rámci této práce.



Obrázek č.20: Potenciál eroze půdy, vypočtené pomocí aplikace modelu DRUtES

Zdroj: vlastní

Jak bylo uvedeno výše, potenciální ztráta půdy se podle modelu DRUtES pohybovala od 0 do $3,3 \text{ kg m}^{-2}$. Tato hodnota by v praxi odpovídala erozi půdy při použití talířového kypříče. Hodnota je znázorněna v grafu 36. Pokud porovnáme výsledky modelu kinematické vlny s tímto měřením dojdeme k analogickému výsledku. Lze tedy konstatovat, že upravené modely původně vzniklé pro vodní erozi lze potenciálně využít k hodnocení eroze zpracování půdy v reálném prostředí. Samozřejmě kalibrace těchto modelů a parametry vstupních proměnných musí být předmětem dalšího výzkumu, který je větší než rozsah této práce.



Graf č. 36: Potenciál eroze půdy při použití talířového kypřiče

8 Diskuse

V diskusi jsou chronologicky uvedené a diskutované výsledky měření s ostatními autory z kapitoly výsledky.

Z výsledků experimentu, který se zaměřoval na vliv opotřebení pracovních nástrojů kypřiče na nežádoucí přemístování půdních částic v ornici, je patrné, že záleželo na konkrétním stroji určeného ke zpracování půdy. U stroje Kromexim se lišily výsledky posunu půdních částic. U pluhu PH5-35 k výraznému rozdílu hodnot nedošlo. Jak uvádí De Alba et al. (2006), pohyb půdních částic u pluhu se vyskytuje od 0,16 do 1,04 m. Dílčí výsledky naměřené v rámci této studie se shodují s výsledky De Alba et al. (2006). Potvrdily se výsledky zkoumání Tiessena et al. (2007) o výrazných rozdílech posunu půdních částic při zpracování půdy stroji s různou konstrukcí pracovních nástrojů. Tiessen et al. (2007) publikují průměrný posun půdních částic u pluhu 2 m a radličkový kypřič přesunul půdu o více než 3 m, přičemž maximální vzdálenost přemístění byla 5,6 m. Takto extrémní hodnoty v naší studii naměřeny nebyly. U kypřiče s opotřebovanými nástroji byla naměřena maximální hodnota posunu značkovače 4,14 m. Logsdon (2013) ve své práci uvádí, že posun při použití kypřiče půdy se pohyboval od 1,5 m až do 3 m. Quine et al. (1999) uvádí ve své práci maximální půdní posun 0,81 m. Ovšem k posunu byl použitý kypřič, který byl vybaven pouze s radličkami bez použití válců a rovnacích smyků. Ve studii Gerontidis et al. (2001), byl analyzován posun půdy ve třech hloubkách. Posun půdy při orbě se zvyšoval se zvětšující se pracovní hloubkou pluhu a sklonem svahu. Při maximální pracovní hloubce pluhu 40 cm, bylo naměřeno posunutí půdy 97 cm. Kouselou et al. (2018) uvádí, že pro pluh byl naměřen posun půdních částic od 0,33 do 0,57 m. Takto značně malé posuny půdy byly v naší studii naměřeny u orby proti svahu s neopotřebovanými nástroji a velikostí sklonu svahu 11°. Kouselou et al. (2018) dále uvádí posun půdních částic pro kypřič s hodnotami od 0,15 do 0,30 m. Takto malé hodnoty se nepotvrdily. Výsledky polního experimentu se shodují s výsledky Xu et al. (2019). Závažnost volby směru pohybu stroje byla zásadní z hlediska nežádoucího posunu půdních částic. Zdůrazňuje se potřeba hlubšího studia tohoto jevu. Blanco a Lal (2023) se ve své publikaci také věnují rozdílnému posunu půdních částic při směru orby po svahu a proti svahu. Uvádějí rozdíl mezi směry o velikosti od 0,7 až do 0,95 m. Toto se částečně shoduje s naší studii. Značkovače použité při orbě proti svahu měly velice malý posun a to pouhých 0,33 m. Značkovače použité při orbě se svahu dosahovaly posunu až 0,92 m.

Z výsledků experimentu, který se zaměřoval na vliv zvolených technologií se výsledky shodují s výsledky Kouselou et al. (2018). Konvenční zpracování půdy způsobilo závažnější posun půdních částic ve směru pohybu strojů, než minimální zpracování půdy. Byly však zjištěny zčásti odlišné výsledky u laterálního posunu půdních částic. Při malém sklonu svahu (2°) a jízdě strojů ve směru vrstevnic se projevilo překlápění zpracovávané vrstvy půdy radličným pluhem proti svahu příznivě. Při větším sklonu svahu (6° a 11°) nepostačilo překlápění skývy pluhem proti svahu k zabránění nežádoucímu posunu půdních částic laterálně se svahu směrem dolů při použití konvenční technologie zpracování půdy. Výsledky jsou v souladu s konstatováním Xu et al. (2019) o závažnosti volby směru pohybu strojů při zpracování půdy na svažitéch pozemcích z hlediska nežádoucího posunu půdních částic a o potřebě hlubšího studia tohoto jevu.

Z výsledků experimentu, který se zaměřoval na sekundární zpracování půdy je patrné, že záleželo na konkrétním stroji určeného ke zpracování půdy. V literatuře se vyskytuje jen malé množství experimentů, které popisují sekundárním zpracováním půdy vliv na translokaci půdy. Autoři, kteří se sekundárním zpracováním půdy zabývají, jsou Gristina et al. (2022).

Ve svém půdním experimentu popisují kultivátor s pracovní rychlostí $4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a hloubkou zpracování $0,15 \text{ m}$. Délka posunu půdních částic stanovují od $0,2$ do $0,58 \text{ m}$. Průměrný posun částic byl stanoven na $0,39 \text{ m}$. Tyto výsledky se částečně shodují s výsledky naměřenými u talířových kypřičů v této studii. Lobb et al. (1999) se zabýval translokací půdy v oblasti Ontario, Canada. Pro sekundární zpracování půdy použil „field cultivator“, s rychlostí zpracování $6,48 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a byly naměřeny hodnoty s průměrným posunem $0,321 \text{ m}$. Kouselou et al. (2018) pro měření použili také kypřič s pracovní rychlostí $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a naměřeným půdním posunem pouze $0,152 \text{ m}$. Naměřené hodnoty publikované v této disertační práci tyto malé hodnoty nepotvrzují. K podstatně vyšším hodnotám posunu dochází ve studii Turkelboom et al. (1999), který zaznamenává posun na pozemku s 16% sklonem $2,88 \text{ m}$, a na pozemku s 22% sklonem $3,81 \text{ m}$. Naměřené hodnoty v této práci se s hodnotami Turkelboom et al. výrazně neliší. Novara et al. (2019) pozorovali translokaci půdních částic v oblasti Santa Margherita del Belice na Sicílii, pro zpracování půdy použil kultivátor s pracovní rychlostí $4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Sklon svahu, na kterém byl experiment prováděn, byl 15° a posun částic činil $1,2 \text{ m}$. Novara et al. (2022) dále porovnávali vliv talířového kypřiče s pracovní rychlostí od 2 do $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a sklonem 6° . Výsledky ukazují, že střední translokační vzdálenost půdy se pohybovala do $1,14 \text{ m}$. Tyto výsledky se shodují

s naměřenými výsledky pro sklon 6° . Autoři Novák a Hůla (2018), došli k závěru, že při pracovní rychlosti $7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ dochází k maximálnímu posunutí částic až do 10 m. Autoři dále pozorují vektorový směr posunutí. Docházejí k závěru, že na svahu s velikostí 11° dochází k vektorovému posunutí až 60° . Toto bylo potvrzeno jen částečně. Vektorové posunutí značkovačů bylo zaznamenáno až k hodnotám 76° a to na svahu se sklonem 6° .

Experiment zaměřený na opakované pracovní přejezdy při přípravě půdy byl proveden zejména kvůli praktickému využití. V praxi je velice běžné, že půdy, které nejsou dostatečně připravené po jedné pracovní operaci jsou zpracovávány dvakrát i třikrát, a to ve shodném směru zpracování. Na vícenásobné pracovní přejezdy v případě sekundárního zpracování půdy poukazoval už Govers et al. (1999).

Experiment zaměřený na primární zpracování půdy s využitím makro značkovačů pro určení přesunu množství půdy při pracovním pohybu stroje. Toto měření bylo provedeno shodně s měřeními Logsdona (2013). Byl použit uhlíčitán vápenatý (vápenec). Znalosti o hmotnostním přesunu půdních částic jsou nadále využity pro tvorbu modelu. Mnoho autorů zkoumajících erozi půdy nevěnovalo velkou pozornost problematice primárního zpracování půdy. Například Li et al. (2007) ve své studii publikují, že ve svažitých pozemcích dochází při použití radličkového kypřiče k přesunu půdních částic od 0,28 do 1,17 m. V publikaci je také uvedeno, že ve vzdálenosti 1,14 m se nacházelo 95 % zpracovaných půdních částic. Pracovní rychlost byla $7,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Výsledky experimentu dále potvrdily vhodné použití stopovacích látek.

Experiment, zaměřený na zhodnocení rozmístění půdních částic pracovními nástroji radličkového a talířového kypřiče při třech pracovních rychlostech a posouzení souvislosti s erozí zpracováním půdy, byl vyhodnocen tak, že stopovače po zpracování talířovým kypřičem se přemístily do vzdálenosti přibližně 0,3 m a radličkového kypřiče do vzdálenosti 0,5 m. Radličkový kypřič posunul značkovací stopovače více intenzivně. To bylo vidět ze získaných hodnot T_m , T_p a D_p . Bylo to dáno především větší hloubkou zpracování D_t (Brož a Hůla, 2023). Tyto výsledky můžeme porovnat se studii dalších autorů. Metodologicky podobně bylo provedeno měření pomocí součtové křivky od Tiessen et al. (2007) v oblasti New Brunswick v Kanadě, v oblasti pěstování brambor s jílovitou půdou. Výsledky intenzity posunutí T_m jsou srovnatelné s měřením v této naší studii. Percentily publikované Tiessen et al. (2007) jsou vyšší, což platí v procentech, zejména pro $\lambda 50$. Zatímco v této studii byl použit radličkový kypřič dvouřadé konstrukce, Tiessen et al. (2007) použili třířadkový kultivátor. U talířového kypřiče byla vzdálenost přemístění TL srovnatelná s výsledky

získanými Tiessenem et al. (2007), je intenzita přesunu hmoty T_m nižší než u těchto autorů. To bylo zřejmě způsobeno nestejnou pracovní hloubkou uvolnění. Percentily vypočítané v našich měřeních jsou nižší. Prezentované výsledky přemístění půdních částic hodnocení jsou srovnatelné se získanými výsledky od Govers et al. (1999) a Van Muysen et al. (2006).

Z výsledků experimentu, který se zaměřoval na primární zpracování půdy, bylo pozorováno maximální posunutí značkovačů a dále množství značkovačů. Výsledky ukazují, že i v primárním zpracování půdy dochází k překvapivě výrazným posunům částic v pracovním pohybu stroje. V této studii byl použit radličkový kypřič Kromexim a talířový kypřič Akpil. Pracovní rychlost strojů byla $8,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Wysocka a Czubaszek (2014) ve své studii zdůrazňují, že eroze půdy při použití talířového a radličkového kypřiče, je závislá hlavně na velikosti svahu. To se shoduje i s výsledky této studie. Kouselou et al. (2018) ve své studii popisují erozní problematiku ve velmi suchých částech Iránu. Autoři publikují erozi vznikající při použití radličkového kypřiče s pracovní rychlostí $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a velikostí svahu od 2 do 6 %. Posun značkovačů po provedení primárního zpracování hodnotí na 0,152 m. Novara et al. (2019) ve svém studii také pozoroval radličkový kypřič a došel k závěrům že na 15% svahu dochází při pohybu kypřiče do svahu k posunu značkovačů o 0,8 m a při pohybu stroje se svahu dochází k posunu 1,2 m. Výsledky naměřené v této experimentu se shodovaly s výsledky ostatních autorů.

Experiment zaměřený na půdní erozi při sekundárním zpracování půdy s využitím stroje, který měl aktivně poháněné pracovní nástroje. Vířivý kypřič posouval částice půdy ve směru pracovní jízdy shodně jako stroje pasivní. Při polním experimentu s vířivým kypřičem bylo zjištěno, že nejvzdálenější částice se nachází ve vzdálenosti až 8 m a to při pracovní rychlosti $11,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Při nižších pracovních rychlostech $5,5$ a $7,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ byla nalezena nejvzdálenější částice ve vzdálenosti přesahující 5 m. Tyto výsledky se shodují s výsledky Kayada et al. (2019). Ten ve své studii publikoval průměrný pohyb částic ve vzdálenosti asi 2,3 m ve směru stroje a v různých případech přesahoval hodnotu 5 m. Dále ve studii uvádí pracovní rychlost a to 1 a $3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Ve studii je také uvedena informace o nevhodnosti použití RFID značkovačů, protože až 60 % značkovačů bylo poškozeno vysokou rychlostí pracovních nástrojů. Další, kdo se věnoval problematice aktivně poháněných strojů byl Van Muysenen a Govers (2002). Ten ve své studii publikuje průměrné vzdálenosti posunu indikátoru od 0,18 m do 2,84 m. Pracovní rychlost, při které byla studie provedena byla od $5,76$ do $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Srovnání výsledků s naší studií je problematičké, protože vířivý kypřič byl osazen ještě secím strojem. V zemědělské praxi je to spojení velice

běžné ovšem není to ideální pro výzkumný experiment zaměřený na půdní erozi. Secí stroj by mohl do jisté míry ovlivnit naměřené výsledky. Van Muysenen a Govers (2002) publikují, že aktivně poháněné stroje pohybují velkou vrstvou půdy a dochází tak k intenzivní degradaci. S tímto tvrzením je možné souhlasit.

Model byl zaměřen na hodnocení přesunu půdních částic. Bylo využito software DRUtES pro stanovení erozních hodnot. Hodnoty byly stanoveny pro posun částic na hranici $3,3 \text{ kg m}^{-2}$. Macák et al. (2023) ve své studii použil erozní model RUSLE ve kterém došel k závěru, že na erozně ohrožených půdách dochází ke ztrátě $1,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Tato hodnota odpovídá erozi za celý rok. Papiernik et al. (2009) použili ve své publikaci model WATEM a zkombinoval erozi vodní a erozi zpracováním půdy. Ve studii došli k závěru, že kombinace erozí přináší roční ztrátu od 10 do $13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Bohužel v této studii není stanoven počet provedených pracovních operací zpracování půdy. Li et al. (2007) ve své studii publikovali půdní erozi s použitím modelu TILLEM. V publikaci je uveden úplný sled pracovních operací (jeden přejezd hlubokého kultivátoru, jeden přejezd lehkého kultivátoru následovaný pneumatickým secím strojem a dva přejezdy pružinovými bránami). Při tomto pracovním postupu je uváděna půdní eroze o velikosti $6,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Tato hodnota už se částečně shoduje s hodnotou uváděnou v modelu, který byl použit v této studii. V obecné rovině modely poskytují přijatelný odhad eroze půdy, se kterými se musí počítat při dlouhodobém hospodaření na orné půdě.

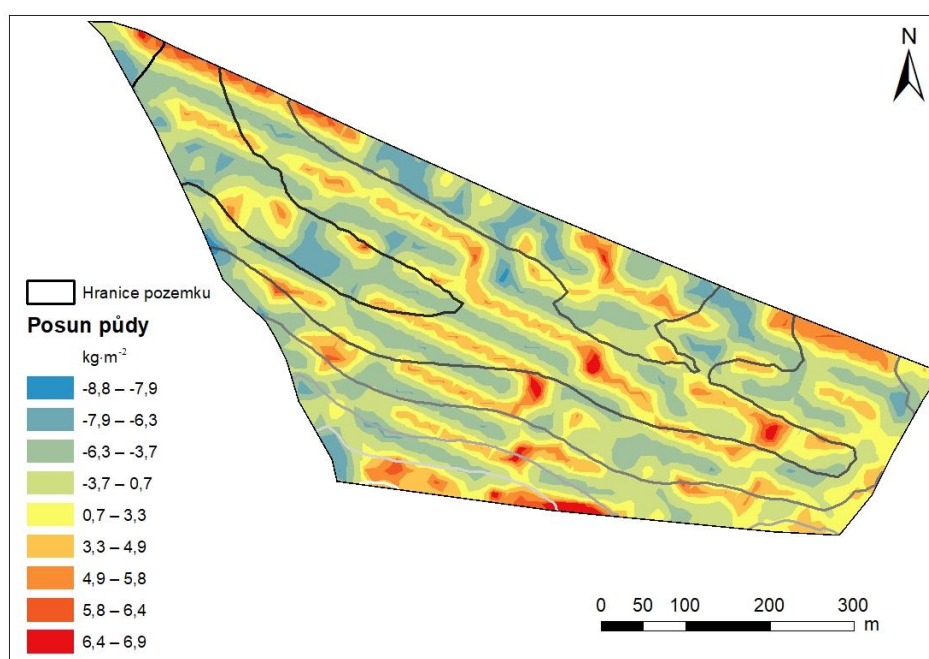
Z naměřených a s ostatními autory porovnaných výsledků vyplývají skutečnosti o nežádoucím vlivu strojů na zpracování půdy ve směru spádnice. Z výsledků je patrný rozdílný vliv jednotlivých strojů a technologií na tento posun. Hypotéza disertační práce se tak potvrzuje.

9 Výstupní metodika pro hodnocení posunu půdních částic

Z naměřených výsledků vyplývají nové poznatky o velikosti celkové ztráty půdy, jak při použití jednotlivých strojů, tak při využití různých technologií. Při experimentech byly zjištěny erozní posuny půdních částic. Na základě naměřených dat v této práci a na základě předchozích dat v rámci předchozího výzkumu na Katedře zemědělských strojů byla navržena metodika hodnocení posunu půdních částic.

Tato metodika vychází z primárních dat zjištěných přímým měřením a dále kombinuje tyto údaje s matematickým modelem. Metodika tedy spočívá ve vložení provozních dat soupravy

(typicky tažný prostředek a stroj pro zpracování půdy) a převod těchto dat na účinek na konkrétní lokalitě. Tento postup pak vyústí v přehlednou mapu zobrazující účinek stroje na dané lokalitě. Tento postup v době vzniku této práce není problematický ani z pohledu získání sekundárních dat tohoto modelu. Satelitní navigace se záznamem dat se stávají relativně nedílnou částí provozu strojních souprav a na jejich analýzu z tohoto pohledu je třeba tyto data dosadit do naměřených souvislostí, viz obrázek číslo 21.



Obrázek č.21: Potenciál vzniku eroze půdy při zpracování půdy

Zdroj: vlastní

Obecným problémem soudobého zemědělství však není nedostatek dat, ale spíše jejich přebytek. Velmi často dochází v praktické rovině k situaci, že není dat dále využito a řada zajímavých poznatků z nich zůstává skryto právě v tomto „datovém nadbytku“. Toto nelze samozřejmě aplikovat pouze na zemědělství – jedná se o obecný problém.

9.1 Zhodnocení přínosů disertační práce a doporučení pro další výzkum.

Předložená práce navazuje a rozšiřuje dosud provedený výzkum na Katedře zemědělských strojů. Přínos práce spočívá zejména v doplnění části datových sad pro další rozšíření povědomí o fenoménu eroze zpracováním půdy. Další přínos představuje propojení

primárních dat k matematickému modelování. Zde je třeba konstatovat, že toto bylo v rámci práce rozpracováno, ale bude třeba další výzkum pro větší zobecnění těchto modelů a jejich upřesnění. Nicméně i z výsledků této práce je patrné, že spojení primárních dat a modelů představuje vhodné spojení pro přenos informací do praxe. Povědomí o fenoménu eroze zpracováním půdy je stále v praxi relativně malé.

Další výzkum by měl spočívat v rozvoji informací o půdním přesunu a jejich rozšiřování. Zde se vhodnou alternativou k polním experimentům jeví Půdní kanál, který bude v nejbližší době zprovozněn na TF ČZU. Tento Půdní kanál obsahuje jasně definované vstupní podmínky (kalibrované částice písku o shodné vlhkosti). V takto definovaném prostředí by mohl být proveden výzkum s jednotlivými nástroji pro zpracování půdy. Nástroje měřené v půdním kanále by měly vždy jasně definovanou trajektorii pohybu. Této vlastnosti by šlo vhodně využít. Mohlo by se využít i nových značkovacích tělísek, které by využívaly možností Internetu věcí (IoT).

Výsledkem měření by měly být nové informace o pohybu částic. Tyto informace by pak sloužily zejména k vytvoření vylepšených modelů, které by přesněji vystihovaly podstatu přenosu částic a lépe zpracovávaly další vlivy. Těmi budou například změněná geometrie pracovních nástrojů, výskyt organické hmoty (její množství a rozmístění v půdním profilu), vliv fyzikálních parametrů půdy a další parametry ovlivňující zpracování půdy

9.2 Doporučení pro praxi

Z výzkumu uvedeném v této disertační práci je patrné, že nižší intenzita zpracování má přímý vliv na přesun půdních částic. Nicméně využití silně redukováných technologií založení porostu má v našich podmínkách relativně omezené využití a poměrně nízkou tradici. Proto nelze očekávat krátkodobé masivní rozšíření tohoto postupu. Zde obecně platí, že u redukováných technologií z pohledu přesunu, je vhodnější využití talířových nástrojů (radličky mají obecně vyšší efekt „hrnutí“ materiálu). Paradoxně lze konstatovat, že z pohledu eroze zpracováním může být přínosem orba. Jedná se o jedinou masivně rozšířenou operaci, která přemísťuje půdní částice i v příčném směru a dokáže tak (při vhodném směru klopení brázd) dopravovat částice snadno proti svahu. Orba tak paradoxně má kompenzační efekt k stálému využívání radličkových kypřičů. Tato myšlenka je poměrně zajímavá a částečně v rozporu s obecnými erozními předpoklady.

Hůře uchopitelnou kapitolou jsou doporučení k úpravám strojů. Určitý vliv má samozřejmě udržování pracovních nástrojů, jejich opotřebením a další faktory. Z pohledu konstrukce nelze očekávat masivní vliv teorie posunu částic přímo na stroje pro zpracování půdy. Částečné řešení by však šlo spatřovat v například mírném natáčení některých pracovních nástrojů (například smykových lišt), které výrazně posouvají půdní částice. Zde by bylo snazší využít některé známé přístupy např. ze zahradnictví. Zde jsou známé aplikace posuvných tříbodových závěsů a plynule měnitelná geometrie závěsných bodů. Dosud užívané mechanizační prostředky jsou známé spíše z plečkování a podobných aplikací. Jedná se tak spíše o tříbodové závěsy nižších kategorií (0-2). Avšak aplikace těchto již standardizovaných postupů i na větší přenášené síly by částečně mohla kompenzovat mírnou změnu posunu částic. I při pohybu po vrstevnici by tak mírné natočení pracovních orgánů (řádově nízké jednotky stupňů) mělo kompenzační efekt vůči posunu částic ve směru spádnice. Toto konstrukční řešení by šlo snadno aplikovat i u poháněných strojů pro zpracování půdy. V neposlední řadě je možné myšlenky posunu půdních částic zanést i do moderních SW prostředků pro navigaci s přípravou sledu pracovních jízd. I toto řešení může přispět ke snížení erozního účinku zpracování půdy.

10 Závěr

Vzhledem k tomu, že se erozi při zpracování půdy začala věnovat větší pozornost, byla provedena řada studií, která prokázala nemalý význam eroze zpracováním půdy. Přesto řada odborníků nepřikládá této problematice dostatečnou váhu, neboť nejsou o této problematice dostatečně informováni. V České republice totiž nebyla problematika eroze zpracováním půdy dostatečně řešena. Používané metody současného výzkumu vycházejí z postupů použitých v zahraničí a v České republice jsou nové.

Zvyšující se eroze půdy je globálním, ale i národním problémem s vysokým ekonomickým a environmentálním dopadem. Intenzivní hospodaření je rovněž ve znamení vysoké chemizace. Erozní procesy odnáší spolu se zeminou chemické látky různého druhu a stupně toxicity a podílí se na kontaminaci povrchových a podzemních vod.

Potřeba eliminace výše uvedených rizik je legislativně zakotvena i v dokumentech Evropské unie (Nařízení rady (ES) č. 73/2009). Tyto celospolečenské požadavky na funkci zemědělství se v rámci zemědělské politiky jednotlivých členských států implementují v podobě standardů Dobrého zemědělského a environmentálního stavu (DZES), z hlediska ochrany půdy se v České republice především jedná o DZES 1 a DZES 2. Standardy DZES zajišťují zemědělské hospodaření ve shodě s ochranou životního prostředí. Hospodaření v souladu se standardy DZES je jednou z podmínek pro poskytnutí plné výše přímých plateb. Jejich plnění se týká všech žadatelů o přímé platby a podpory.

Důležitou změnou je rozšíření podmínek standardu DZES 2, který je s účinností již od 1. července 2011 i na tzv. mírně erozně ohrožené půdy, na nichž bude možné zakládat porosty širokořádkových plodin pouze s využitím půdoochranných technologií omezujících vznik eroze půdy.

V této práci byl zjištěn odlišný účinek nových pracovních nástrojů a opotřebovaných nástrojů, dále byl pozorován vliv jednotlivých technologií hospodaření a vliv svažitosti. Naměřené výsledky do značné míry rozporují obecné tvrzení o erozi půdy. Například bylo potvrzeno, že orba radličným pluhem při klopení skýv proti svahu, je do značné míry protierozní. Orba by tak neměla být zcela zakazována a považována za degradační agronomickou operaci.

Eroze půdy je ucelený jev, který nemá být posuzován jen podle jedné souvislosti, ale je třeba zvážit komplexní pohled na opatření vedoucí k minimalizaci dopadů hospodaření na orné půdě.

11 Seznam použitých zdrojů

ABBAS, F., ZHU, Z.; AN, S. Evaluating aggregate stability of soils under different plant species in Ziwuling Mountain area using three renowned methods. *Catena*, 2021, 207: 105616.

AMES, R. N., Reid, C. P. P., Ingham, E. R. Rhizosphere bacterial population responses to root colonization by a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus. *New Phytologist*, 1984, 96.4: 555-563.

BARNEVELD, R. J., et al. Comparison of two methods for quantification of tillage erosion rates in olive orchards of north-west Syria. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103.1: 105-112.

BEAR, J. et al. *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering, McGraw-Hill international Book Co., 1979.

BLANCO, H., LAL, R. *Principles of soil conservation and management*. New York: Springer, 2008.

BLANCO, H., LAL, R. Tillage erosion. In: *Soil Conservation and Management*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 103-125.

BRADY, N., WEIL, R. R. *The nature and properties of soil* 12th ed. Mac. Pub. Com. New York, 1999, 625: 640.

BRANT, V. et al. Implementace principů precizního zemědělství do rostlinné výroby. Kurent, sro, 2020.

BROŽ, P., et al. The effect of large doses of organic fertilisers on maize. *Res. Agr. Eng*, 2023, 69: 94-100.

BROŽ, P.; HŮLA, J. Influence of primary tillage on the displacement of soil particles. *Res. Agr. Eng*, 2023, 69: 101-106.

BROŽ, P. et al. Soil Erosion During Secondary Tillage. Conference TAE, 2022, 42-49.

BROŽ, P. et al. Effect of stand establishment technology on tillage erosion. Conference YCIS 2020, 26-30

BUSARI, M., A. et al. Influence of tillage and crop residue management on soil hydraulic properties and wheat yield in Semi-arid region of India. Available at SSRN 4105838.

DE ALBA, S., et al. Assessment of tillage erosion by mouldboard plough in Tuscany (Italy). *Soil and Tillage Research*, 2006, 85.1-2: 123-142.

DELAUNAY, Boris, et al. Sur la sphere vide. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk*, 1934, 7.793-800: 1-2.

- DERPSCH, R., et al. Controle da erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: GTZ, 1991.
- DEXTER, A., R. Advances in characterization of soil structure. *Soil and tillage research*, 1988, 11.3-4: 199-238.
- DE VENDE, J. et al. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Global and planetary change*, 2008, 60.3-4: 393-415.
- DOLEJŠÍ, V., KURAZ, M., SOLIN, P. Adaptive higher-order space-time discontinuous Galerkin method for the computer simulation of variably-saturated porous media flows. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 72: 276-305.
- DOSTÁL, T. et al. Hodnoty R faktoru včetně povodňových let. In: *Metody a způsoby predikce povrchového odtoku, erozních a transportních procesů v krajině*, 2006. (In Czech).
- DUPIN, B., et al. Assessment of tillage erosion rates on steep slopes in northern Laos. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103.1: 119-126.
- FIENER, P., et al. Uncertainties in assessing tillage erosion—how appropriate are our measuring techniques. *Geomorphology*, 2018, 304: 214-225.
- FRANK, S., et al. The dynamic soil organic carbon mitigation potential of European cropland. *Global Environmental Change*, 2015, 35: 269-278.
- GE, F., et al. Response of changes in soil nutrients to soil erosion on a purple soil of cultivated sloping land. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27.2: 459-463.
- GESSESSE, B., BEWKET, Woldeamlak; BRÄUNING, Ac. Model-based characterization and monitoring of runoff and soil erosion in response to land use/land cover changes in the Modjo watershed, Ethiopia. *Land degradation & development*, 2015, 26.7: 711-724.
- GRISTINA, L., NOVARA, A., MINACAPILLI, M., Rethinking vineyard ground management to counter soil tillage erosion. *Soil and Tillage Research*, 2022, 217: 105275.
- GOVERS, G., LOBB, D., A., QUINE, T. A. Tillage erosion and translocation: emergence of a new paradigm in soil erosion research. *Soil & Tillage Research*, 1999.
- HECKRATH, G., et al. Tillage erosion and its effect on soil properties and crop yield in Denmark. *Journal of environmental quality*, 2005, 34.1: 312-324.
- HECKRATH, G., et al. The effect of tillage direction on soil redistribution by mouldboard ploughing on complex slopes. *Soil and Tillage Research*, 2006, 88.1-2: 225-241.
- HOU, T., et al. Tillage-induced surface soil roughness controls the chemistry and physics of eroded particles at early erosion stage. *Soil and Tillage Research*, 2021, 207: 104807.
- HŮLA, J., PROCHÁZKOVÁ, B. et al. Minimalizace zpracování půdy. Profi Press, 2008.

HŮLA, J. et al. Dopad netradičních technologií zpracování půdy na půdní prostředí: uplatněná certifikovaná metodika. Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2010.

HŮLA, J. et al. Může zpracování půdy přispívat k půdní erozi? Listy Cukrovarnické a Reparské, 2024, 140, č. 7–8, červenec – srpen (in press).

CHLOUPEK, O., HRSTKOVA, P.; SCHWEIGERT, P. Yield and its stability, crop diversity, adaptability and response to climate change, weather and fertilisation over 75 years in the Czech Republic in comparison to some European countries. *Field Crops Research*, 2004, 85.2-3: 167-190.

CHYBA, J., et al. Influence of soil cultivation and farm machinery passes on water preferential flow using brilliant blue dye tracer. *Agronomy Research*, 2013, 11.1: 25-30.

JANEČEK, M., et al. Ochrana zemědělské půdy před erozí: Realizační výstup st. úkolu" Intenzifikace využití půdy na svazích protierozními opatřeními". Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství, 1992.

JANEČEK, M., KUBÁTOVÁ, E., TIPPL, M. (2006): Nové určení faktoru erozní účinnosti dešťů – R pro území České republiky. In: Sborník příspěvků z odborného semináře Erozní procesy a pozemkové úpravy. KHMKI ČVUT v Praze a Česká společnost krajinných inženýrů. Praha, 7 s

JANEČEK, M. et al. Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2007.

KAYAD, A., et al. Assessing topsoil movement in rotary harrowing process by RFID (Radio-Frequency Identification) technique. *Agriculture*, 2019, 9.8: 184.

KLIMENT, Zd., LANGHAMMER, J. Modelování erozního ohrožení ve velkých územních celcích. *Geomorfologický sborník*, 2005, 4: 75-81.

KOLÁŘ V., PATOČKA C., BÉM J. *Hydraulika – Vysokoškolská učebnice pro stavební fakultu SNTL, Alfa, Bratislava, 1 edition, 1983.*

KOUSELOU, M., et al. Quantifying soil displacement and tillage erosion rate by different tillage systems in dryland northwestern Iran. *Soil Use and Management*, 2018, 34.1: 48-59.

KROULÍK, M., et al. Water infiltration into soil related to the soil tillage intensity. *Soil Water Res*, 2007, 2.1: 15-24.

KROULÍK, M., et al. The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies. *Soil and Tillage Research*, 2009, 105.1: 171-175.

KROULÍK, M., et al. Procedures of soil farming allowing reduction of compaction. *Precision agriculture*, 2011, 12.3: 317-333.

KROULÍK, M., et al. Benefits of GPS agricultural guidance for sustainable agriculture. *Agrociencia Uruguay*, 2012, 16.3: 107-116.

KUMHÁLA, F., et al. Zemědělská technika: stroje a technologie pro rostlinnou výrobu. Vyd. 1. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007, 426 s.

KURÁŽ, M., Hydrodynamika porézního prostředí, skriptum FŽP, ČZU V PRAZE, (2014), Praha

KURÁŽ, M., interní dokumentace k projektu, Vyhodnocení rizika a návrh opatření pro prevenci vzniku a šíření přírodních požárů v bezprostředním okolí povrchových zdrojů pitné vody včetně zohlednění důsledků změny klimatu, VH2020202105, 2021, Brno

LAGUNA, A.; GIRALDEZ, J. V. The description of soil erosion through a kinematic wave model. *Journal of Hydrology*, 1993, 145.1-2: 65-82.

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 2015, 7.5: 5875-5895.

LEIJ, F., J., GHEZZEHEI, T., A.; OR, D. Modeling the dynamics of the soil pore-size distribution. *Soil and Tillage Research*, 2002, 64.1-2: 61-78.

LINDSTROM, M., J.; NELSON, W. W.; SCHUMACHER, T. E. Quantifying tillage erosion rates due to moldboard plowing. *Soil and Tillage Research*, 1992, 24.3: 243-255.

LIU, G., et al. Conservation management effects on soil erosion reduction in the Sichuan Basin, China. *Journal of soil and water conservation*, 2001, 56.2: 144-147.

LOBB, D., A., KACHANOSKI, R. G., MILLER, M., H. Tillage translocation and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using ¹³⁷Cs as a tracer. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75.2: 211-218.

LOBB, D., A., KACHANOSKI, R. G., MILLER, M., H. Tillage translocation and tillage erosion in the complex upland landscapes of southwestern Ontario, Canada. *Soil and Tillage Research*, 1999, 51.3-4: 189-209.

LOBB, D. A., et al. Comparison of methods used to calculate tillage translocation using plot-tracers. *Journal of soil and water conservation*, 2001, 56.4: 321-328.

LOGSDON, S. D. Depth dependence of chisel plow tillage erosion. *Soil and Tillage Research*, 2013, 128: 119-124.s

LOCH, R. J., FOLEY, J. L. Measurement of aggregate breakdown under rain-Comparison with tests of water stability and relationships with field measurements of infiltration. *Soil Research*, 1994, 32.4: 701-720.

LI, S., LOBB, D. A., LINDSTROM, M., J. Tillage translocation and tillage erosion in cereal-based production in Manitoba, Canada. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94.1: 164-182.

- LI, S., et al. Tillage and water erosion on different landscapes in the northern North American Great Plains evaluated using ¹³⁷Cs technique and soil erosion models. *Catena*, 2007, 70.3: 493-505.
- LI, Z., et al. Developing sustainable cropping systems by integrating crop rotation with conservation tillage practices on the Loess Plateau, a long-term imperative. *Field Crops Research*, 2018, 222: 164-179.
- LIU, Q. Q., et al. Two-dimensional kinematic wave model of overland-flow. *Journal of Hydrology*, 2004, 291.1-2: 28-41.
- MACÁK, M., et al. Reduction in water erosion and soil loss on steep land managed by controlled traffic farming. *Land*, 2023, 12.1: 239.
- MAŠEK, J., et al. BENEFITS OF CONTROLLED TRAFFIC FARMING. In: *Engineering for Rural Development. Proceedings of the 8th International Scientific Conference, Jelgava, Latvia, 28-29 May, 2009*. Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering, Institute of Mechanics, 2009. p. 54-58.
- MAŠEK, J., et al. Traffic intensity in fields and technical possibilities for reduction of machinery passes. *Engineering for Rural Development*, 2014, 13: 216-220.
- MOREIRA, W., He, et al. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160: 53-64.
- MORGAN, R., P., Ch. *Soil erosion and conservation*. John Wiley & Sons, 2009.
- NEARING, M. A., LANE, L., J., LOPES, V., L. Modeling soil erosion. In: *Soil erosion research methods*. Routledge, 2017. p. 127-158.
- NSABIMANA, G., et al. Soil aggregate stability response to hydraulic conditions in water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Catena*, 2021, 204: 105387.
- NOVÁK, P., et al. The influence of sloping land on soil particle translocation during secondary tillage. *Agronomy Research*, 2017, 15.3: 799-805.
- NOVÁK, P., HŮLA, J., Translocation of the upper soil layer in multiple operations of seedbed preparation. *Research in Agricultural Engineering*, 2017, 63.Special Issue: S46-S52.
- NOVÁK, P., et. al. Zpracování půdy a jeho vliv na posun půdních částic ve smyslu erozního působení. *Habilitační práce*, Praha, 2018
- NOVARA, A., et al. Effect of Standard Disk Plough on Soil Translocation in Sloping Sicilian Vineyards. *Land*, 2022, 11.2: 148.
- NOVARA, A., et al. The effect of shallow tillage on soil erosion in a semi-arid vineyard. *Agronomy*, 2019, 9.5: 257.

- OR, D., GHEZZEHEI, T., A. Modeling post-tillage soil structural dynamics: a review. *Soil and Tillage Research*, 2002, 64.1-2: 41-59.
- PAPIERNIK, S. K., et al. Variation in soil properties and crop yield across an eroded prairie landscape. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 60.6: 388-395.
- PAPIERNIK, S. K., et al. Soil properties and productivity as affected by topsoil movement within an eroded landform. *Soil and tillage research*, 2009, 102.1: 67-77.
- PARTON, W., J., et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51.5: 1173-1179.
- POLÁKOVÁ, J., SOUKUP, J. Results of implementing less-favoured area subsidies in the 2014–2020 time frame: Are the measures of environmental concern complementary?. *Sustainability*, 2020, 12.24: 10534.
- PULKRÁBEK, Josef, et al. Vliv hloubky uložení hnojiva při hlubokém kypření půdy na produkci cukrové řepy. *Listy zemědělské*, 2016, 132: 9-10.
- PRICE, A., J., et al. Glyphosate-resistant Palmer amaranth: a threat to conservation tillage. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 66.4: 265-275.
- QUINE, T., A., et al. Fine-earth translocation by tillage in stony soils in the Guadalentin, south-east Spain: an investigation using caesium-134. *Soil and Tillage research*, 1999, 51.3-4: 279-301.
- QUINE, T., A., BASHER, L., R.; NICHOLAS, A., P. Tillage erosion intensity in the south Canterbury Downlands, New Zealand. *Soil research*, 2003, 41.4: 789-807.
- RATAJ, V., GALAMBOŠOV, J.; MACÁK, M. Presné poľnohospodárstvo a klimatické zmeny. *Životné prostredie*, 2019, 53, 2, p. 108 – 115.
- SAREC, P., et al. Impact of activators of organic matter on soil and crop stand properties in conditions of very heavy soils. *Proceedings of the Engineering for Rural Development*, Jelgava, Latvia, 2017, 24-26.
- ŠAŘEC, P., et al. Soil physical characteristics and soil-tillage implement draft assessment for different variants of soil amendments. *Agronomy Research*, 2016, 14.3: 948-958.
- SCHJØNNING, P., HECKRATH, G., CHRISTENSEN, B., T. Threats to soil quality in Denmark-A review of existing knowledge in the context of the EU Soil Thematic Strategy. Aarhus University, Faculty of Agricultural Sciences, 2009.
- SKLENICKA, P., Classification of farmland ownership fragmentation as a cause of land degradation: A review on typology, consequences, and remedies. *Land use policy*, 2016, 57: 694-701.
- SULLIVAN, D. G., et al. Potential impact of conservation tillage on conserving water resources in Georgia. *Journal of soil and water conservation*, 2007, 62.3: 145-152.

SVORAY, T., Soil Erosion: The General Problem. In: A Geoinformatics Approach to Water Erosion. Springer, Cham, 2022. p. 1-38.

TIESSEN, K. H. D., et al. Tillage translocation and tillage erosivity by planting, hilling and harvesting operations common to potato production in Atlantic Canada. *Soil and Tillage Research*, 2007, 97.2: 123-139.

TURKELBOOM, F., et al. Reassessment of tillage erosion rates by manual tillage on steep slopes in northern Thailand. *Soil and Tillage Research*, 1999, 51.3-4: 245-259.

VAN MUYSEN, W., GOVERS, G. Soil displacement and tillage erosion during secondary tillage operations: the case of rotary harrow and seeding equipment. *Soil and tillage research*, 2002, 65.2: 185-191.

VAN OOST, K., GOVERS, G., DESMET, P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape ecology*, 2000, 15.6: 577-589.

VAN OOST, K., et al. Tillage erosion: a review of controlling factors and implications for soil quality. *Progress in Physical Geography*, 2006, 30.4: 443-466.

VAN ROMPAEY, A., KRASA, J.; DOSTAL, T. Modelling the impact of land cover changes in the Czech Republic on sediment delivery. *Land use policy*, 2007, 24.3: 576-583.

VOMÁČKA, J., et al. Quality assessment of selected tillage machines for secondary soil tillage, 2019, 583-587.

VOPRAVIL, J., JANEČEK, M., TIPPL, M. Revised soil erodibility K-factor for soils in the Czech Republic. 2009.

VÚMOP, 2022, <https://statistiky.vumop.cz/?core=popis>

WACHA, K., M., et al. The impact of tillage row orientation on physical and chemical sediment enrichment. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2020, 3.1: e20007.

WANG, Y., et al. Impact of tillage erosion on water erosion in a hilly landscape. *Science of the Total Environment*, 2016, 551: 522-532.

WANG, B., et al. Soil aggregates as biogeochemical reactors and implications for soil-atmosphere exchange of greenhouse gases—A concept. *Global change biology*, 2019, 25.2: 373-385.

WILDEMEERSCH, J., et al. Tillage erosion and controlling factors in traditional farming systems in Pinar del Río, Cuba. *Catena*, 2014, 121: 344-353.

WILKEN, F., et al. Understanding the role of water and tillage erosion from $^{239+240}\text{Pu}$ tracer measurements using inverse modelling. *Soil*, 2020, 6.2: 549-564.

WISCHMEIER, W., H., et al. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. 1965.

WISCHMEIER, W., H., SMITH, D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.

WITHERS, B., et al. Irrigation: design and practice. BT Batsford Ltd., 1974.

WYSOCKA-CZUBASZEK, A.; CZUBASZEK, R. Tillage erosion: The principles, controlling factors and main implications for future research. Journal of Ecological Engineering, 2014, 15.4.

XIA, R, et al. Effects of soil erosion and soil amendment on soil aggregate stability in the cultivated-layer of sloping farmland in the Three Gorges Reservoir area. Soil and Tillage Research, 2022, 223: 105447.

XU, H. C., et al. Combined effects of tillage direction and slope gradient on soil translocation by hoeing. Catena, 2019, 175: 421-429

ZACHAR, D. Erózia pôdy. Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1970.

ZHANG, J. H.; SU, Z. A.; NIE, X. J. An investigation of soil translocation and erosion by conservation hoeing tillage on steep lands using a magnetic tracer. Soil and Tillage Research, 2009, 105.2: 177-183

ZHANG, J.; LI, F. An appraisal of two tracer methods for estimating tillage erosion rates under hoeing tillage. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11: 1227-1233.

ZHAO, H., et al. Tillage impacts on the fractions and compositions of soil organic carbon. Geoderma, 2012, 189: 397-403.

ZHAO, P., et al. Tillage erosion and its effect on spatial variations of soil organic carbon in the black soil region of China. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 72-81.

Software DRUtES, drutes.org

12 Příloha



Kombinovaný kypřič Saturn se využíval ke zpracování půdy před setím. Stroj používaný při měření byl návěsný a měl pracovní záběr 6 metrů. Jednotlivé sekce mají pracovní záběr 1,5 metrů. Kypřič urovnává, kypří, drobí a zpětně utužuje půdu.



Vířivý kypřič Rabewerk je stroj s pracovním záběrem 3 m. Maximální pracovní hloubka stroje 15 cm. Stroj využívá pro zpracování půdy výměnné nože a ozubený pčhovací válec. Velikost otáček pracovních nástrojů $344 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Nože jsou poháněny od vývodového hřídele traktoru.



Radličkový kypřič je stroj o záběru 3 m, stroj byl použitý jak pro primární tak pro sekundární zpracování půdy.



Talířový kypřič je stroj o záběru 3 m, stroj byl použitý jak pro primární tak pro sekundární zpracování půdy. Geometrie pracovních nástrojů byla rovnoběžná.



Talířový kypřič je stroj o záběru 2,6 m, stroj byl použitý jak pro primární tak pro sekundární zpracování půdy. Geometrie pracovních nástrojů byla do tvaru X.



Radličný pluh Ross PH 5-35 byl stroj určený k orbě. Pluh měl pracovní záběr 1,75 m a byl osazen pěti orebními tělesy. Před každým pracovním tělesem byla umístěna předradlička. Stroj byl zapojen za traktor pomocí tříbodového závěsu.



Vyhledávání hliníkových značkovačů s využitím detektoru kovů, vyznačování polohy značkovačů.



Měření půdní vlhkosti pomocí přístroje Fieldscout.



Dron byl využíván pro mentoring směru pracovních jízd a vizuální záznam posunu barevných značkovacích tělísek.



Profilograf byl použitý pro měření půdního povrchu.



Ostré a tupé pracovní nástroje použité pro hodnocení půdního posunu.