

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA



**Metody měření tahových sil moderních strojů na
zpracování půdy**

Katedra zemědělských strojů

Doktorská disertační práce

Vypracoval: Ing. Petr Procházka

2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele a uvedl jsem veškerou použitou literaturu. Tištěná a elektronická verze se doslovně shodují.

JMÉNO A PŘÍJMENÍ: Ing. Petr Procházka

PODPIS:

DATUM: 10. 5. 2016

Abstrakt

Předložená doktorská disertační práce je orientována na vývoj techniky pro měření tahových sil moderních zemědělských strojů na zpracování půdy o větších pracovních záběrech. Prostředky pro měření tahových sil vyšších než 100 kN jsou k dispozici pouze omezeně. Za účelem odstranění nevýhod použití tahové tyče (nutnost použití dvou traktorů, problémy s koordinací měřicí soupravy při otáčení např. na souvratích, nižší operativnost měření) byl vyvinut měřicí rám pro měření tahové síly.

Ve snaze co nejlépe charakterizovat fyzikální vlastnosti půdy byly před testováním nově vyvinutého měřicího rámu odebrány neporušené vzorky půdy (Kopeckého válečky) a byl měřen penetrační odpor půdy jak horizontálním, tak vertikálním penetrometrem.

Měřeními provedenými na konkrétních pozemcích bylo prokázáno, že námi vyvinutá měřicí zařízení byla schopna měřit tahovou sílu až do hodnoty 200 kN a vyšší. Měření tahové síly pomocí měřicího rámu bylo z praktického hlediska plně srovnatelné s měřeními tahovou tyčí.

Byl prokázán značný vliv vlhkosti půdy na výsledky měření penetračního odporu půdy. Výsledky měření s vertikálním a horizontálním penetrometrem naznačily podobnost jejich práce. Horizontální penetrometr by mohl být vhodnou variantou rychlé charakteristiky fyzikálních vlastností půdy za podmínky přesného měření půdní vlhkosti.

Dostatečně přesné měření okamžité vlhkosti půdy společně s přesným měřením pracovní hloubky kypřiče jsou aktuálními náměty pro další výzkum.

Klíčová slova: tahová síla, tahová tyč, měřicí rám, horizontální penetrometr, vertikální penetrometr

Abstract

This Ph.D. thesis is focused on tensile forces measurement process of modern tillage machines for bigger working width. There is a limited amount of measuring devices for tensile forces higher than 100 kN. To eliminate tensile rod disadvantages (need of use of two tractors is complicated for measuring operation during the headlands turns) the new measuring frame was developed to measure the tensile forces.

To characterize the physical attributes of the soil, before the new developed measurement, the samples of unbroken soil were taken (Kopecky's cylinders). The penetration resistance of soil was measured in a horizontal and vertical profile by use of penetrometer.

The measuring made on specific lands proven the new developed measuring device to be able to measure the tensile force up to 200 kN and more. The practical use of the measuring device was comparable to the measuring by a tensile rod during the measuring process.

The considerable influence of the soil moisture was proven by the penetration measurements of the soil. The vertical and horizontal penetrometer measurements showed a similarity of the measuring method. The horizontal penetrometer might be a useful measuring method for a quick analysis of soil physical character considering accurate soil moisture measuring.

Accurate instant soil moisture measuring and precise measurement of chisel plough working depth is a current theme for a future research

Key words: tensile force, tensile rod, measuring frame, horizontal penetrometer, vertical penetrometer

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval svému školiteli prof. Dr. Ing. Františkovi Kumhálovi, který byl po celou dobu mého doktorského studia zdrojem vědeckých inspirací a trpělivým odborným rádcem. Děkuji Ing. Pavlovi Syrovátkovi za spolupráci při vývoji měřicího rámu a Ing. Karlovi Kubínovi Ph.D. a Ing. Jiřímu Vondříčkovi Ph.D. za spolupráci při experimentálních měřeních. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vladimíru Šafránkovi předsedovi představenstva Zemědělské společnosti Písková Lhota a.s. za umožnění provádění polních experimentálních měření a zapůjčení dvou traktorů včetně obsluh a taktéž Ing. Jiřímu Sobotovi místopředsedovi představenstva Zemědělské společnosti Sloveč a.s. za vstřícný přístup a vyčlenění experimentálního pozemku k polním měřením a taktéž za zapůjčení dvou traktorů včetně obsluh. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat Ing. Radce Procházkové za odborné vedení při statistickém zpracování naměřených dat z experimentálních měření. Poděkování také patří JUDr. Ing. Ladislavu Bednářovi majiteli společnosti BEDNAR FMT s.r.o za umožnění a vstřícný přístup při výrobě měřicího rámu pro měření tahových sil. Můj dík patří i kolegům z Katedry zemědělských strojů ČZU za výpomoc a umožnění laboratorních měření. Tuto práci bych rád věnoval svému otci za celoživotní inspiraci.

Obsah

1	ÚVOD.....	1
2	NEJVÝZNAMNĚJŠÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TAHOVOU SÍLU.....	3
2.1	Fyzikální vlastnosti půdy.....	4
2.2	Objemová hmotnost.....	4
2.2.1	Pórovitost půdy	6
2.2.2	Struktura půdy.....	6
2.2.3	Mechanický odpor půdy	6
2.3	Zjišťování fyzikálních vlastností půdy.....	7
2.3.1	Kopecského válečky	7
2.3.2	Penetrační odpor půdy	8
2.3.3	Vertikální penetrometry	9
2.3.4	Horizontální penetrometry	17
2.4	Výhody a nevýhody jednotlivých metod zjišťování fyzikálních vlastností půdy	20
3	MĚŘENÍ TAHOVÝCH ODPORŮ STROJŮ	21
3.1	Metody měření, požadavky na měřicí zařízení	21
3.2	Stávající dostupné metody měření	23
3.3	Výhody a nevýhody jednotlivých metod z praktického hlediska	25
4	CÍL PRÁCE.....	28
5	MATERIÁLY A METODY.....	29
5.1	Tyč pro měření tahového odporu	29
5.2	Rám pro měření tahového odporu	31

5.3 Metodika měření fyzikálních vlastností půdy	38
5.3.1 Metodika penetračního měření	39
5.3.2 Metodika měření pomocí metody odběru Kopeckého válečků	40
5.4 Metodika měření tahových odporů	44
5.4.1 Experimentální měření - Písková Lhota dne 9. dubna 2013	44
5.4.2 Experimentální měření - Písková Lhota dne 10. října 2013	45
5.4.3 Experimentální měření - Sloveč dne 30. října 2014	47
6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A DISKUSE	53
6.1 Výsledky měření - Písková Lhota dne 9. dubna 2013.....	53
6.2 Výsledky měření - Písková Lhota dne 10. října 2013	53
6.2.1 Dílčí závěr z měření v Pískové Lhotě 10. října 2013.....	60
6.3 Výsledky měření – Sloveč 30. října 2014	61
6.3.1 Statistická analýza dat z 1. měřicí jízdy (měření 12).....	61
6.3.2 Statistická analýza dat ze 2. měřicí jízdy (měření 13)	67
6.3.3 Statistická analýza dat ze 3. měřicí jízdy (měření 14)	71
6.3.4 Dílčí závěry z měření tahových sil ve Slovči, 30. října 2014 (1. - 3. měřicí jízdy)	74
6.4 Statistická analýza dat tahových sil se zahloubeným kypřiče a fyzikálních vlastností na jednotlivých měřicích úsecích pokusného pozemku ve Slovči.....	74
6.4.1 Statistická analýza naměřených dat 1. měřicího úseku.....	75
6.4.2 Statistická analýza naměřených dat 2. měřicího úseku.....	82
6.4.3 Statistická analýza naměřených dat 3. měřicího úseku.....	90
6.4.4 Statistická analýza naměřených dat 4. měřicího úseku.....	96
6.4.5 Statistická analýza naměřených dat 5. měřicího úseku.....	98
6.4.6 Statistická analýza naměřených dat 6. měřicího úseku.....	100
6.5 Statistická analýza závislosti tahových sil na hloubce zpracování půdy	102
6.5.1 Statistická analýza závislosti velikosti tahových sil na hloubce zpracování půdy na 4. měřicím úseku	102

6.5.2	Statistická analýza závislosti velikosti tahových sil na hloubce zpracování půdy na 5. měřicím úseku	103
6.5.3	Statistická analýza závislosti velikosti tahových sil na hloubce zpracování půdy na 6. měřicím úseku	104
6.6	Celkové porovnání výsledků měření tahových sil na pokusném pozemku (6 měřicích úseků) ve Slovči	106
6.7	Analýza fyzikálních vlastností na pokusném pozemku ve Slovči	108
6.7.1	Testování hypotézy o rozdílu vlhkosti půdy na první a druhé části pokusného pozemku.....	108
6.7.2	Testování hypotézy o rozdílu objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) na první a druhé části pokusného pozemku	111
6.7.3	Testování hypotézy o rozdílu horizontálního penetračního odporu půdy (MPa) na první a druhé části pokusného pozemku	113
6.7.4	Testování hypotézy o rozdílu vertikálního penetračního odporu (MPa) v hloubce 0,12 m na první a druhé části pokusného pozemku	114
6.7.5	Testování hypotézy o rozdílu tahové síly (N) na první a druhé části pokusného pozemku.....	116
7	SOUHRNNÁ DISKUSE K DOSAŽENÝM VÝSLEDKŮM.....	120
8	ZÁVĚR	125
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	126

Seznam obrázků

Obrázek 1: Moderní souprava na zpracování půdy - pásový traktor John Deere a talířový kypřič BEDNAR ATLAS AM 10000.	1
Obrázek 2: Závislost mezi objemovou hmotností půdy (Mg.m^{-3}) a hloubkou (m), porovnání simulace s experimentálním modelem (Defosse a kol., 2002), (upraveno).....	5
Obrázek 3: Foto z průběhu odběru neporušených půdních vzorků metodou Kopeckého válečků.....	7
Obrázek 4: Půdní kuželový penetrometr dle Normy ASAE S313.3.....	9
Obrázek 5: Praktické měření za pomoci ručního vertikálního penetrometru.	12
Obrázek 6: Hlavní části horizontálního kombinovaného penetrometru a provedení elektrod.	19
Obrázek 7: Praktické provedení zařízení na měření tahových sil označené jako TH 300.	24
Obrázek 8: Tenzometrický snímač k měření tahové síly U 10 M (Pražan a Podpěra, 2011).	24
Obrázek 9: Tenzometrický snímač HBM Z4 vestavěný v ochranné kovové kleci (Preč a kol., 2008).....	25
Obrázek 10: Talířový kypřič BEDNAR ATLAS AM 12 000.....	26
Obrázek 11: Předset'ový kombinátor BEDNAR SWIFTER SM 18 000.....	27
Obrázek 12: Měřicí tahová tyč pro měření tahového odporu strojů pro zpracování půdy.	30
Obrázek 13: Celkový pohled na návrh měřicího rámu.	31
Obrázek 14: Horní pohled na měřicí rám s vyznačenou pozicí/roztečí ok pro závěs kategorie 3 a 4.....	33
Obrázek 15: Tenzometrické táhlo.....	33
Obrázek 16: Detail horizontálního penetrometru.	34
Obrázek 17: Boční pohled na stroj s vyznačenou hloubkou penetrometru.	35
Obrázek 18: Silový rozbor měřicího rámu (vlevo reálná konstrukce, vpravo matematický model).	35
Obrázek 19: Uvolnění závěsného bodu. a) uvolnění bodu bez uvažování deformací táhla a závěsného rámu, b) provedeno uvolnění s uvažovanou deformací obou prutů. ..	36

Obrázek 20: Měřicí rám připojený do soupravy s traktorem a měřeným strojem.....	37
Obrázek 21: Technický náčrt měřicího rámu.....	37
Obrázek 22: Reálné provedení měřicího rámu.....	38
Obrázek 23: Ruční vertikální penetrometr PN – 10.....	39
Obrázek 24: Letecký snímek pole s pokusným pozemkem (48 x 100 m) ve Slovči.....	41
Obrázek 25: Mapa pokusného pozemku s odběrnými místy pro zjištění objemové hmotnosti půdy (červená kolečka) a trajektorie jednotlivých jízd (modrá kolečka), pořadí jednotlivých měřicích jízd a měřicích úseků – modrá čísla (1 - 6).....	42
Obrázek 26: Kopeckého válečky na filtračním papíře s překrytou horní základnou hodinovým sklem.....	43
Obrázek 27: Měřicí sestava. Z prava: tažný traktor John Deere 8345R, tahová měřicí tyč, tažený traktor John Deere 8220 pro nesení a ovládání kypřiče, kypřič Ecoland EO 4000.....	45
Obrázek 28: Měřicí zařízení (měřicí tahová tyč) mezi oběma traktory.....	46
Obrázek 29: Příčný profil zpracované půdy - Písková Lhota dne 10. října 2013.....	47
Obrázek 30: Měřicí souprava. Zleva: tažný traktor John Deere 8320RT, měřicí rám, měřicí tyč, tažený traktor New Holland T7050 pro zvedání a spouštění kypřiče, kypřič Köckerling Gruber Vario s pracovním záběrem 5 m.....	48
Obrázek 31: Rám pro měření tahové síly: (1) Dvoubodový závěs pro připojení tažné tyče nebo stroje na zpracování půdy, (2) Tenzometrický siloměr (200 kN), (3) Připojení na tříbodový závěs tažného traktoru, (4) Horizontální penetrometr.....	49
Obrázek 32: Příčný profil zpracované půdy - Sloveč dne 30. října 2014.....	51
Obrázek 33: Krabicové grafy výsledků měření tahové síly v (N) při jezdové rychlosti 6, 8 a 10 (km.h ⁻¹) pro písčitou a jílovitou půdu při pracovní hloubce 0,1 m.....	54
Obrázek 34: Shapiro-Wilksův test normality tahových sil při pracovní rychlosti 6, 8 a 10 (km.h ⁻¹) v písčité půdě a hloubce zpracování 0,1 m.....	55
Obrázek 35: Shapiro-Wilksův test normality tahových sil při pracovní rychlosti 6, 8 a 10 (km.h ⁻¹) v jílovité půdě a hloubce zpracování 0,1 m.....	56
Obrázek 36: Krabicové grafy výsledků měření tahové síly v (N) při jezdové rychlosti 6, 8 a 10 (km.h ⁻¹) pro písčitou a jílovitou půdu při pracovní hloubce stroje 0,15 m.....	57

Obrázek 37: Krabicové grafy výsledků penetračního měření penetrometrem PN-10 v (MPa) pro různé sledované hloubky v (m) pro písčitou a jílovitou půdu.....	60
Obrázek 38: Graf průběhů tahových sil (N) měřených na tahové tyči a měřicím rámem a horizontálního penetračního odporu (MPa) 1. měřicí jízdy.....	62
Obrázek 39: Krabicový graf výsledků měření tahové síly (N) - měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem 1. měřicí jízdy.....	63
Obrázek 40: Shapiro-Wilksův test a elementární statistické charakteristiky o rozdělení a vlastnostech naměřených dat tahových sil v souboru měřených tahovou tyčí 1. měřicí jízdy.....	64
Obrázek 41: Shapiro-Wilksův test a elementární statistické charakteristiky o rozdělení a vlastnostech naměřených dat tahových sil v souboru měřených měřicím rámem 1. měřicí jízdy.....	64
Obrázek 42: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) a tahové síly měřené na tyči (N) 1. měřicí jízdy.....	66
Obrázek 43: Graf průběhů tahových sil (N) měřených na tahové tyči a měřicím rámem a horizontálního penetračního odporu (MPa) 2. měřicí jízdy.....	67
Obrázek 44: Krabicový graf průměrných hodnot tahové síly měřena tahovou tyčí a měřicím rámem 2. měřicí jízdy.....	68
Obrázek 45: Shapiro-Wilksův test a elementární statistické charakteristiky o rozdělení a vlastnostech naměřených dat tahových sil v souboru měřených tahovou tyčí 2. měřicí jízdy.....	68
Obrázek 46: Shapiro-Wilksův test a elementární statistické charakteristiky o rozdělení a vlastnostech naměřených dat tahových sil v souboru měřených měřicím rámem 2. měřicí jízdy.....	69
Obrázek 47: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) a tahové síly měřené na tyči (N) 2. měřicí jízdy.....	70
Obrázek 48: Graf průběhů tahových sil (N) měřených na tahové tyči a měřicím rámem a horizontálního penetračního odporu (MPa) 3. měřicí jízdy.....	71
Obrázek 49: Shapiro-Wilksův test a elementární statistické charakteristiky o rozdělení a vlastnostech naměřených dat tahových sil v souboru měřených tahovou tyčí 3. měřicí jízdy.....	72

Obrázek 50: Shapiro-Wilksův test a elementární statistické charakteristiky o rozdělení a vlastnostech naměřených dat tahových sil v souboru měřených měřicím rámem 3. měřicí jízdy.	72
Obrázek 51: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) a tahové síly měřené na tyči (N) 3. měřicí jízdy.....	73
Obrázek 52: Graf výsledků měření sledovaných veličin v 1. měřicím úseku - průběhů tahových sil (N) měřených tahovou tyčí a měřicím rámem, průběhu horizontálního penetračního odporu (MPa). Naměřené hodnoty objemových hmotností ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) a hodnoty vertikálního penetračního odporu (MPa).	75
Obrázek 53: Krabicové grafy naměřených hodnot tahových sil měřených tahovou tyčí a měřicím rámem 1. měřicího úseku.....	76
Obrázek 54: Shapiro-Wilksův W-test a elementární statistické charakteristiky souboru naměřených dat tahových sil měřicím rámem v 1. měřicím úseku.	77
Obrázek 55: Shapiro-Wilksův W-test a elementární statistické charakteristiky souboru naměřených dat tahových sil v souboru měřených tahovou tyčí v 1. měřicím úseku.	77
Obrázek 56: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) a tahové síly měřené tahovou tyčí (N) 1. měřicího úseku.	78
Obrázek 57: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na horizontálním penetračním odporu (MPa) 1. měřicího úseku.....	79
Obrázek 58: Graf závislost průměrné tahové síly měřené na rámu (N) a objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 1. měřicího úseku.	80
Obrázek 59: Graf závislost průměrné tahové síly měřené na rámu (N) na vertikálním penetračním odporu (MPa) 1. měřicího úseku.....	80
Obrázek 60: Graf závislost horizontálního penetračního odporu (MPa) na objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 1. měřicího úseku.	81
Obrázek 61: Graf závislost vertikálního penetračního odporu (MPa) na horizontálním penetračním odporu (MPa) 1. měřicího úseku.....	81
Obrázek 62: Graf výsledků měření sledovaných veličin ve 2. měřicím úseku - průběhů tahových sil (N) měřených tahovou tyčí a měřicím rámem, průběhu horizontálního penetračního odporu (MPa). Naměřené hodnoty objemových hmotností ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) a hodnoty vertikálního penetračního odporu (MPa).	82

Obrázek 63: Krabicové grafy naměřených hodnot tahových sil měřených tahovou tyčí a měřicím rámem 2. měřicího úseku (střední hodnota měřena průměrem).....	83
Obrázek 64: Krabicové grafy naměřených tahových sil měřených tahovou tyčí a měřicím rámem 2. měřicího úseku (střední hodnota měřena mediánem).	83
Obrázek 65: Shapiro-Wilksův W-test a elementární statistické charakteristiky souboru naměřených dat tahových sil měřicím rámem ve 2. měřicím úseku.....	84
Obrázek 66: Shapiro-Wilksův W-test a elementární statistické charakteristiky souboru naměřených dat tahových sil tahovou tyčí ve 2. měřicího úseku.	84
Obrázek 67: Graf závislosti tahové síly naměřené na rámu (N) a na tahové síle naměřené na tahové tyči (N) 2. měřicího úseku.	85
Obrázek 68: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na horizontálním penetračním odporu (MPa) 2. měřicího úseku.....	86
Obrázek 69: Graf závislost průměrné tahové síly měřené na rámu (N) a objemové hmotnosti půdy (g.cm^{-3}) 2. měřicího úseku.	87
Obrázek 70: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na vertikálním penetračním odporu (MPa) ve 2. měřicím úseku.	87
Obrázek 71: Graf závislost vertikálního odporu půdy (MPa) na objemové hmotnosti půdy (g.cm^{-3}) 2. měřicího úseku.	88
Obrázek 72: Graf závislost horizontálního penetračního odporu půdy (MPa) na objemové hmotnosti půdy (g.cm^{-3}) 2. měřicího úseku.	88
Obrázek 73: Graf závislosti vertikálního penetračního odporu (MPa) na horizontálním penetračním odporu (MPa) 2. měřicího úseku.....	89
Obrázek 74: Graf výsledků měření sledovaných veličin ve 3. měřicím úseku - průběhů tahových sil (N) měřených tahovou tyčí a měřicím rámem, průběhu horizontálního penetračního odporu (MPa). Naměřené hodnoty objemových hmotností (g.cm^{-3}) a hodnoty vertikálního penetračního odporu (MPa).	90
Obrázek 75: Krabicové grafy naměřených hodnot tahových sil měřených tahovou tyčí a měřicím rámem 3. měřicího úseku.....	91
Obrázek 76: Krabicové grafy naměřených tahových sil měřených tahovou tyčí a měřicím rámem 3. měřicího úseku.....	91
Obrázek 77: Shapiro-Wilksův W-test a elementární statistické charakteristiky souboru naměřených dat tahových sil tahovou tyčí ve 3. měřicím úseku.	92

Obrázek 78: Shapiro-Wilksův W-test a elementární statistické charakteristiky naměřených dat tahových sil měřicím rámem ve 3. měřicího úseku.....	92
Obrázek 79: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na tahové síle měřené tahovou tyčí (N) ve 3. měřicího úseku.....	93
Obrázek 80: Graf závislost tahové síly měřené na rámu (N) a horizontálního penetračního odporu (MPa) 3. měřicího úseku.	94
Obrázek 81: Graf závislost průměrné tahové síly měřené na rámu (N) na objemové hmotnosti půdy (g.cm^{-3}) ve 3. úseku měření.	95
Obrázek 82: Graf závislosti průměrné tahové síly měřené na rámu (N) na vertikálním penetračním odporu (MPa) ve 3. měřicím úseku.....	95
Obrázek 83: Graf zaznamenaných hodnot 4. měřicího úseku - průběhu tahových sil (N) měřených měřicím rámem, průběhu horizontálního penetračního odporu (MPa). Naměřené hodnoty objemových hmotností (g.cm^{-3}) a hodnoty vertikálního penetračního odporu (MPa).	96
Obrázek 84: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na horizontálním penetračním odporu (MPa) ve 4. měřicím úseku.....	97
Obrázek 85: Graf závislost průměrné tahové síly měřené na rámu (N) na objemové hmotnosti půdy (g.cm^{-3}) ve 4. měřicím úseku.	97
Obrázek 86: Graf zaznamenaných hodnot 5. měřicího úseku - průběhu tahových sil (N) měřených měřicím rámem, průběhu horizontálního penetračního odporu (MPa). Naměřené hodnoty objemových hmotností (g.cm^{-3}) a hodnoty vertikálního penetračního odporu (MPa).	98
Obrázek 87: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na horizontálním penetračním odporu (MPa) na 5. měřicím úseku.....	99
Obrázek 88: Graf závislosti průměrné tahové síly měřené na rámu (N) na objemové hmotnosti půdy (g.cm^{-3}) na 5. měřicím úseku.	99
Obrázek 89: Graf zaznamenaných hodnot 6. měřicího úseku - průběhu tahových sil (N) měřených měřicím rámem, průběhu horizontálního penetračního odporu (MPa). Naměřené hodnoty objemových hmotností (g.cm^{-3}) a hodnoty vertikálního penetračního odporu (MPa).	100
Obrázek 90: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na horizontálním penetračním odporu (MPa) v 6. měřicím úseku.	101

Obrázek 91: Graf závislosti průměrné tahové síly měřené na rámu (N) na objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) v 6. měřicím úseku.	101
Obrázek 92: Graf průběhu naměřených hodnot tahových sil (N) a hloubky zpracování - hloubka penetrometru (m) na 4. měřicím úseku.	102
Obrázek 93: Graf závislosti tahové síly (N) měřené měřicím rámem na hloubce zpracování (m) na 4. měřicím úseku.	103
Obrázek 94: Graf průběhu naměřených hodnot tahových sil (N) a hloubky zpracování - hloubka penetrometru (m) na 5. měřicím úseku.	103
Obrázek 95: Závislosti tahové síly (N) měřené měřicím rámem na hloubce zpracování (m) na 5. měřicím úseku.	104
Obrázek 96: Graf průběhu naměřených hodnot tahových sil (N) a hloubky zpracování - hloubka penetrometru (m) na 6. měřicím úseku.	104
Obrázek 97: Závislost tahové síly (N) měřené měřicím rámem na hloubce zpracování (m) na 6. měřicím úseku.	105
Obrázek 98: Krabicový graf tahových sil (N) jednotlivých měřicích jízd zaznamenaných z tahové tyče a měřicího rámu.	106
Obrázek 99: Porovnání středních hodnot tahové síly (N), (mediánu a průměru) z prvních třech měřicích úseků měřených tahovou tyčí.	108
Obrázek 100: Krabicové grafy naměřených hodnot vlhkosti půdy (%) na první (východní) a druhé (západní) části pozemku.	109
Obrázek 101: Rozdělení vlhkosti (%) na obou částech pozemku a Shapiro-Wilksův test normality.	109
Obrázek 102: Mapa znázornění vlhkostí půdy (%) pokusného pozemku ve Slovči. ...	110
Obrázek 103: Rozložení hodnot objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) na obou částech pozemku a Shapiro-Wilksův test normality.	111
Obrázek 104: Krabicové grafy naměřených hodnot objemové hmotnosti ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) v první (východní) a druhé (západní) části pokusného pozemku ve Slovči.	112
Obrázek 105: Mapa znázornění objemových hmotností půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) pokusného pozemku ve Slovči.	112
Obrázek 106: Rozložení hodnot horizontálního penetračního odporu půdy (MPa) na obou částech pozemku a Shapiro-Wilksův test normality.	113

Obrázek 107: Mapa znázornění horizontálních penetračních odporů (MPa) pokusného pozemku ve Slovči.....	114
Obrázek 108: Rozložení hodnot průměrného vertikálního penetračního odporu (MPa) v hloubce 0,12 m na obou částech pozemku a Shapiro-Wilksův test normality. .	115
Obrázek 109: Mapa znázornění vertikálního penetračního odporu (MPa) měřeného v hloubce 0,12 m pokusného pozemku ve Slovči.....	116
Obrázek 110: Krabicové grafy naměřených hodnot tahových sil (N) měřených měřicím rámem na první (východní) a druhé (západní) části pokusného pozemku.	117
Obrázek 111: Shapiro-Wilksův test normality naměřených hodnot tahové síly měřené na rámu (N) první a druhé části pokusného pozemku.	118
Obrázek 112: Mapa znázornění tahových sil (N) měřených měřicím rámem pokusného pozemku ve Slovči.....	119

Seznam tabulek

Tabulka 1: Kritické hodnoty vybraných fyzikálních vlastností zhutněné půdy (Lhotský, 2000).	8
Tabulka 2: Leveneův test homogenity rozptylů souborů hodnot tahových sil (N) při rychlosti 6, 8 a 10 (km.h ⁻¹) a hloubce zpracování 0,1 m.....	54
Tabulka 3: Leveneův test homogenity rozptylů naměřených hodnot tahových sil (N) v různých půdách (písečná, jílovitá) a hloubce zpracování 0,1 m.	55
Tabulka 4: Výsledky analýzy rozptylu dvojnásobného třídění naměřených souborů tahové síly (N) při jezdové rychlosti 6, 8 a 10 (km.h ⁻¹) a typu půdy (písečná, jílovitá) při hloubce zpracování 0,1 m.	56
Tabulka 5: Scheffeho test rozdílu středních hodnot tahové síly (N) při rychlosti 6, 8 a 10 (km.h ⁻¹) a hloubce zpracování 0,1 m.	57
Tabulka 6: Leveneův test homogenity rozptylů souborů hodnot tahových sil (N) při jezdové rychlosti 6, 8 a 10 (km.h ⁻¹) a při hloubce zpracování 0,15 m.....	58
Tabulka 7: Leveneův test homogenity rozptylů naměřených hodnot tahových sil (N) v různých půdách (písečná, jílovitá) při hloubce zpracování 0,15 m.....	58
Tabulka 8: Výsledky analýzy rozptylu dvojnásobného třídění naměřených souborů tahové síly (N) při jezdové rychlosti 6, 8 a 10 (km.h ⁻¹) a na rozdílném typu půdy (písečná, jílovitá) při hloubce zpracování 0,15 m.	59
Tabulka 9: Výsledky Scheffeho test rozdílu středních hodnot tahové síly (N) při jezdové rychlosti 6, 8 a 10 (km.h ⁻¹) a hloubce zpracování 0,15 m.	59
Tabulka 10: Wilcoxonův párový test rozdílnosti středních hodnot tahové síly (N) měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem 1. měřicí jízdy.	65
Tabulka 11: Hodnoty popisné statistiky 1. měřicí jízdy.	65
Tabulka 12: Wilcoxonův párový test rozdílnosti středních hodnot tahové síly (N) měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem 2. měřicí jízdy.	69
Tabulka 13: Hodnoty popisné statistiky 2. měřicí jízdy.	70
Tabulka 14: Wilcoxonův párový test rozdílnosti středních hodnot tahové síly (N) měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem 3. měřicí jízdy.	73
Tabulka 15: Hodnoty popisné statistiky 3. měřicí jízdy.	73
Tabulka 16: Wilcoxonův párový test rozdílnosti středních hodnot tahové síly (N) měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem. 1. měřicího úseku.	78

Tabulka 17: Hodnoty popisné statistiky 1. měřicího úseku.....	78
Tabulka 18: Wilcoxonův párový test rozdílnosti středních hodnot tahové síly (N) měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem 2. měřicího úseku.....	85
Tabulka 19: Hodnoty popisné statistiky 2. měřicího úseku.....	85
Tabulka 20: Wilcoxonův párový test rozdílnosti středních hodnot tahové síly (N) měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem 3. měřicího úseku.....	93
Tabulka 21: Hodnoty popisné statistiky 3. měřicího úseku.....	93
Tabulka 22: Vybrané základní statistické charakteristiky souborů naměřených hodnot tahových sil na pozemku ve Slovči, 30. října 2014.	106
Tabulka 23: Leveneův test homogenity rozptylů naměřených hodnot tahových sil (N).	107
Tabulka 24: Výsledky Mann-Whitneyova U Test vlhkostí půdy (%) na pozemku rozděleném do dvou částí.	110
Tabulka 25: Parametrický dvouvýběrový t-test objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) na pozemku rozděleném do dvou částí.....	111
Tabulka 26: Výsledky Mann-Whitneyova U Testu rozdílu horizontálního penetračního odporu (MPa) na pozemku ve Slovči rozděleném do dvou částí.	113
Tabulka 27: Výsledky Mann-Whitneyova U Testu rozdílu vertikálního penetračního odporu (MPa) v hloubce 0,12 m na rozděleném pozemku ve Slovči.	115
Tabulka 28: Výsledky Mann-Whitneyova U Testu rozdílu tahové síly (N) měřené na rámu na rozděleném v pozemku ve Slovči.	117

1 Úvod

Současné zemědělství přináší s sebou neustále zvyšující se nároky na tahové vlastnosti tažných prostředků z důvodu ekonomických a agronomických požadavků na stroje na zpracování půdy. V průběhu několika posledních let se požadavky na stroje na zpracování půdy změnilly, a to jak co do rostoucí velikosti záběru, což současně přináší i zvyšující se hmotnosti těchto strojů, tak co do určité míry i požadavků na hloubku, kvalitu a intenzitu zpracování půdy. Dnešní moderní stroje na zpracování půdy jsou těžší, větší mají vyšší výkonnost a zároveň jsou i účinnější (Varga a kol., 2009; Varga a kol., 2010). Tyto široko-záběrové moderní stroje (viz Obrázek 1) mají i velmi vysoké požadavky na energetickou náročnost tažných prostředků, která se odráží v ekonomice celého managementu v zemědělské prvovýrobě.



Obrázek 1: Moderní souprava na zpracování půdy - pásový traktor John Deere a talířový kypřič BEDNAR ATLAS AM 10000.

Pro správné řízení procesů v zemědělské prvovýrobě a pro kvalifikované navrhování konstrukce zemědělských strojů na zpracování půdy je nutná znalost energetické náročnosti těchto strojů.

V zemědělské praxi výběr vhodné technologie musí především odpovídat požadavkům na pěstování jednotlivých plodin, pro které se pozemek připravuje a taktéž je potřeba zohlednit stávající stav pozemku. Rozdílné nároky ve zpracování půdy mají pozemky po jarním ječmeni a jiné po zrnové kukuřici.

V praxi při vývoji zemědělských strojů jsou vývojoví pracovníci neustále stavěni před otázkou, jak tyto stroje konstrukčně dimenzovat z hlediska pevnosti. Příliš vysoká pevnostní rezerva stroj zbytečně prodražuje a v konečném důsledku se zvyšuje hmotnost samotného stroje. Příliš nízká rezerva zvyšuje riziko nedostatečné provozuschopnosti stroje a jeho následné provozní nespolehlivosti. Proto je v praxi bezpodmínečně nutné provádět pevnostní výpočty a zároveň provozní zkoušky. Znalost tahové síly je přitom zásadní. Tyto faktory vstupují do procesu konstrukce strojů.

2 Nejvýznamnější faktory ovlivňující tahovou sílu

Energetická náročnost strojů na zpracování půdy vychází z hmotnosti samotného stroje, mechanické odolnosti půdy a intenzity zpracování půdy v jednotlivých půdních vrstvách, které mohou vykazovat různé hodnoty půdního odporu proti jejímu zpracování.

Při vývoji a výrobě zemědělských strojů na zpracování půdy má zcela zásadní vliv mechanický odpor půdy. Jak z hlediska pevnostního tak kvalitativního ve smyslu kvality zpracování půdy. Stroje jsou navrhovány také, aby vyhověly náročným agronomickým požadavkům a také aby byly provozuschopné pro dlouhodobé provozní zatížení. Z těchto důvodů se týmy výzkumníků zabývají problematikou mechanického odporu půdy. Jedním z ukazatelů fyzikálních vlastností půdy je právě mechanický odpor půdy. Mechanický odpor půdy - (MOP) - ovlivňuje zhutnění půdy, struktura půdy, vlhkost půdy atd. (Adamchuk a Christenson, 2005).

Výzkumy rovněž ukázaly, že příliš vysoké hodnoty půdního odporu mohou mít škodlivý vliv na růst kořenů a výnosy sklizně (Taylor a Gardner, 1963; Bowen, 1976). Kypření slouží ke zmenšení nebo zmírnění problémů s vysokým MOP. Tradiční způsoby určení technologií pro zpracování půdy se zakládají spíše na preventivní údržbě než na diagnostickém důkazu. Vědečtí pracovníci připouští neefektivitu takovéto technologie zpracování půdy a navrhují systémy zpracování půdy, kde se předepisuje nezbytná technologie zpracování půdy za účelem zmírnění problémů s vysokým MOP. Takovéto systémy by vyžadovaly stanovení pevnosti půdy pro účely určení potřebné hloubky kypření (Bowen a Coble, 1967; Schafer a kol., 1981).

Při obdělávání půdy přitom může být vysoký MOP jak příznivý, tak nepříznivý, podle daného záměru. Příznivý je pro vlastní umožnění provozu strojů na poli, protože zvyšuje únosnost půdy, ale nepříznivý je pro zpracování půdy, protože zvyšuje tahovou sílu, čímž znesnadňuje vytvoření optimální půdní struktury, narušuje klíčení semen a růst kořenů rostlin (Sirjacobs a kol., 2002). V dnešní době jsou všechny technologické operace v rostlinné výrobě vykonávány pomocí zemědělských strojů. To má spoustu výhod, jako např. nízké náklady na hektar, ale i nevýhody. Jednou z hlavních nevýhod je vedlejší dopad v podobě zhutnění půdy. Zhutnění půdy způsobené zemědělskými stroji je důležitým faktorem, který ovlivňuje tok oxidu uhličitého (Šima a Dubeňová, 2013) a oxidu dusného z půdy (Khaledian a kol., 2012; Šima a kol., 2013) a má tudíž významný

environmentální dopad. Zhutnění půd působí negativně také na životní prostředí (Ball a kol., 1999; Hůla a kol., 2009).

Půdní vrstvy omezující prostupnost kořenů snižují výnosy sklizně (Topakci a kol., 2010). Pro odstranění zhutnění půdy, které je způsobeno hlavně přejezdy zemědělskými stroji, se používá kypření (Hall a Raper, 2005). V konečném důsledku zhutnění také ovlivňuje výnosy sklizně (Savin a kol., 2009).

2.1 Fyzikální vlastnosti půdy

Pro správné hodnocení strojů na zpracování půdy je nutnost objektivně charakterizovat pozemek a k tomu je nutné udělat měření a vyhodnocení fyzikálních vlastností půdy.

Mezi základní fyzikální vlastnosti půdy patří následující:

- Objemová hmotnost.
- Pórovitost půdy.
- Struktura půdy.
- Mechanický odpor půdy.

2.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost půdy je hmotnost částic půdy v neporušeném stavu, tedy s póry, k poměru celkového objemu, který zaujímá. Hodnota objemové hmotnosti je přímo závislá na měrné hmotnosti, která závisí na obsahu organických látek, minerálů při různé hustotě. Objemová hmotnost je hmotností všech frakcí zeminy v objemové jednotce a to, pevných částí, kapalných a plyných frakcí. Je to hodnota podílu hmotnosti vzorku zeminy v neporušeném stavu v kilogramech a jejího objemu vzorku v metrech krychlových (viz Vzorec 1).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

kde:

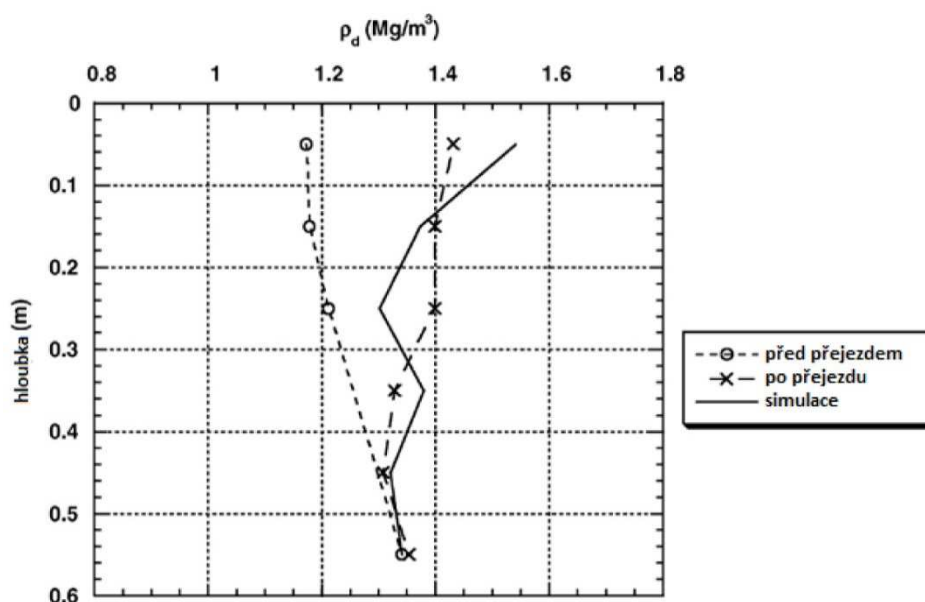
ρ – objemová hmotnost půdy ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$),

m – hmotnost půdního vzorku (kg),

V – objem půdního vzorku (m^3).

Tento parametr je často používán pro hodnocení půdního zhutnění (Johnson a kol., 2002). Závislost mezi fyzikálními vlastnostmi půd v různých hloubkách a půdním odporem byl sledován Defossezem a kol. (2002).

Na základě tohoto výzkumu vytvořil model závislosti mezi hloubkou půdy a objemovou hmotností. Tento model byl poté porovnán s měřeními s výsledky v reálných podmínkách. Výsledkem bylo zjištění, že přejezdy zemědělskou technikou se projevují do hloubky 0,35 m (viz Obrázek 2). Z Obrázku 2 je patrné že přejetá půda má vyšší objemovou hmotnost než půda bez přejezdu o $0,2 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$) a to do hloubky 0,2 m, a dále ukazuje snižující trend zhutnění až do hloubky 0,45 m. V této hloubce dosahuje hodnot podobných jako u půdy nezhutněné.



Obrázek 2: Závislost mezi objemovou hmotností půdy ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) a hloubkou (m), porovnání simulace s experimentálním modelem (Defossezem a kol., 2002), (upraveno).

Dickson a kol. (1996) také sledovali vztah tlaků na půdu zemědělskými stroji. Bylo zjištěno, že nepřejetá (nezhutněná) půda má nižší hodnoty objemové hmotnosti než při použití flotačních pneumatik nebo s využitím konvenčních pneumatik.

2.2.1 Pórovitost půdy

Pórovitost je velmi důležitou charakteristikou, která úzce souvisí s mechanickými vlastnostmi půdy. Při výpočtu pórovitosti záleží na objemu pórů a mezer mezi zrny půdy, který je vyjádřen v procentech celkového objemu.

$$n = \frac{V_p}{V_x} \times 100\% \quad (2)$$

kde:

n – pórovitost (%),

V_p - objem pórů v (m^3),

V_x - celkový objem vzorku zeminy (m^3).

Celková pórovitost je obvykle vypočtena z měření objemové hmotnosti. (viz Vzorec 2). Celková pórovitost se mění s obsahem vody v půdě. Celková pórovitost půd vyžaduje posouzení vlivu zpracování půdy (McGarry, 1988). Pórovitost půdy je ta část objemu půdy, která není zaplněna půdními částicemi nebo organickým materiálem, ale je vyplněna plyny nebo vodou (White, 2006).

2.2.2 Struktura půdy

Půdní struktura je uspořádání jednotlivých půdních částic (např. písek, prach, jíl) do přírodních agregátů, které se nazývají pedy (Schaetzl, Anderson, 2005). Struktura půdy patří mezi nejdůležitější půdní vlastnosti, která přímo ovlivňuje úrodnost půdy. Je určena stavem celkového souboru půdních částic a jejich agregátů. Je podmíněna schopností spojovat částice pevné fáze nebo disagregovat větší celky půdní hmoty a vytvářet tak strukturní agregáty, jak uvádí Badalíková a kol. (2001).

2.2.3 Mechanický odpor půdy

Mechanický odpor půdy (MOP) může být ovlivněn mnoha faktory jako: zhutnění půdy, struktura půdy, obsah vody a další jiné parametry (Adamchuck a Christenson, 2005). MOP proti pronikání se liší v čase a prostoru (Krištof a kol., 2010). MOP je silně ovlivněn obsahem vody nebo vodním potenciálem a časová změna obsahu vody během vegetačního období se podílí na části časové změny MOP (To a Kay, 2005). Funkční

vztah mezi MOP a obsahem půdní vody nebo potenciálem je označován jako křivka MOP. Měření na půdních vzorcích odebraných z hloubky 50 až 75 mm napříč krajinou s rozdílnými způsoby obdělávání půdy ukázaly, že křivka MOP se liší na základě půdních charakteristik, jako je struktura, obsah organického uhlíku a objemová hmotnost půdy (Da Silva a Kay, 1997).

S odvoláním na definice použité pro odpor půdy je zjevné, že mnohé z nich se zaměřují na objemovou hmotnost půdy. V souladu s tím používá mnoho výzkumných pracovníků k měření odporu půdy objemovou hmotnost (Kamgar a Minaei, 2001; Chorom a Sadeghzade, 2005; Javadi a Spoor, 2006).

2.3 Zjišťování fyzikálních vlastností půdy

Fyzikální vlastnosti půdy lze zjišťovat různými metodami. Některé z nich jsou komplexní, u jiných se na fyzikálních vlastností půdy usuzuje pouze nepřímo.

2.3.1 Kopeckého válečky

Asi nejobjektivnější, avšak velice pracnou metodou zjištění fyzikálních vlastností půdy je odběr neporušených vzorků půdy tzv. Kopeckého válečky (Obrázek 3). Podrobně je odběr neporušených půdních vzorků popsán v Pedologickém praktiku ČZU Praha (Valla a kol., 2000). Z těchto vzorků se zjišťují následující hodnoty: momentální vlhkost, nasáklivost, maximální vodní kapacita, retenční vodní kapacita, zdánlivá hustota pevných částic zeminy, sušina, objemová hmotnost, pórovitost (celková, kapilární, nekapilární), provzdušenost, maximální vzdušná kapacita a retenční vzdušná kapacita. Veškeré tyto hodnoty by měly posloužit k zhodnocení pozemků. Kritické vybrané hodnoty fyzikální vlastnosti půdy jsou uvedeny v Tabulce 1.



Obrázek 3: Foto z průběhu odběru neporušených půdních vzorků metodou Kopeckého válečky.

Tabulka 1: Kritické hodnoty vybraných fyzikálních vlastností zhutněné půdy (Lhotský, 2000).

Vlastnost půdy	Půdní druh (obsah částic pod 0,01 mm v % hm.)					
	J > 75	JV - JH 75 - 45	H 45 - 30	PH 30 - 20	HP 20 - 10	P < 10
Objemová hmotnost po vysoušení (g. cm ⁻³)	> 1,35	> 1,40	> 1,45	>1,55	> 1,60	> 1,70
Pórovitost (% objemu)	< 48	< 47	< 45	< 42	< 40	< 38
Penetrační odpor půdy (MPa) při vlhkost (% hm.)	2,8 - 3,2	3,3 - 3,7	3,8 - 4,2	4,5 - 5,0	5,5	> 6,0
	28 - 24	24 - 20	18 - 16	15 - 13	12	10

J - jíl, JV - jílovitá půda, JH - jílovitohlinitá půda, H - hlinitá půda, PH - písčitohlinitá půda, HP - hlinitopísčítá půda, P - písčítá půda.

2.3.2 Penetrační odpor půdy

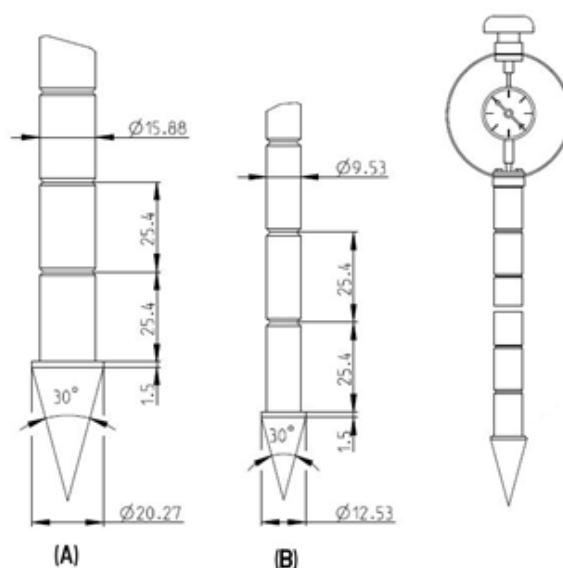
Další možností posouzení fyzikálních vlastností půdy je měření penetračního odporu půdy za pomoci penetrometru, což je odpor půdy proti vnikání kovového kuželíku o definovaných rozměrech rovnoměrným pohybem do půdy. Tento odpor se vyjadřuje v Pascalech (Pa) nebo v jejich násobcích. Tímto měřením lze zjistit penetrační odpor půdy v různých horizontech půdního profilu. Výhoda vyhodnocení penetračního odporu oproti měření objemové hmotnosti je ve snadném získání dat z půdního horizontu (v závislosti na hloubce dosahu penetrometru).

Penetračním měřením lze odhadnout hloubku zhutněné vrstvy a pak lze kypřič nastavit na správnou pracovní hloubku (Hall a Raper, 2005) tak, aby bylo možno narušit zhutněnou vrstvu půdy.

Penetrometry používané pro měření penetračního odporu půdy lze rozdělit do dvou skupin podle směru pohybu kovového kuželíku v půdě. Ten může být buď vertikální, nebo horizontální. Problémem je, že vyvinuté vertikální penetrometry mohou být použity pouze pro lokální měření. Měření penetračního odporu horizontálními způsoby je možno také automatizovat (Raper, 2005).

2.3.3 Vertikální penetrometry

Konstrukce vertikálního penetrometru včetně doporučení pro práci s ním je velmi dobře definováno americkou normou v dokumentech ASAE S313.3 a ASAE EP542. Podle této normy je půdní kuželový penetrometr doporučen jako měřicí přístroj pro zajištění standardní uniformní metody charakterizace penetračního odporu půd. Síla potřebná k zasunutí 30° kruhového kužele do půdy, vyjádřená v kPa, je ukazatelem pevnosti půdy, který se nazývá penetrační odpor půdy.



Obrázek 4: Půdní kuželový penetrometr dle Normy ASAE S313.3.

Norma ASAE S313.3 slouží především k následujícím účelům:

- Zajištění jednotného způsobu sestavování přístroje, který umožňuje měření všeobecných mechanických podmínek půdy a umožňuje podávání zpráv o půdních datech a jejich interpretaci různými výzkumnými pracovníky.
- Pomoc těm, kteří pracují s různými půdami a půdními podmínkami a kteří potřebují měřit fyzikální vlastnosti půdy pro účely srovnávání.
- Zajištění jednotného systému charakterizace půdních vlastností.

Norma ASAE S313.3 slouží pouze jako prostředek k sestavení přístroje na měření odporu půdy proti penetraci a neposkytuje konkrétní půdní hodnoty, jako je koheze, úhel tření nebo koeficient tření půda-kov. Protože naměřené výsledky jsou ovlivněny způsobem použití, uživatelé by se měli řídit prováděcí normou ASAE EP542.

Norma ASAE EP542 definuje postupy pro používání a vykazování údajů získaných pomocí půdního kuželového penetrometru.

Jako plochu podstavy norma definuje průřezovou plochu na podstavě kužele s hrotem o úhlu 30° vyjádřenou v mm^2 .

Ručně ovládaný půdní kuželový penetrometr zobrazený na Obrázku 4 má kužel a odstupňovanou podstavu, měřící hloubku vniknutí kužele do půdy. Doporučují se dvě velikosti podstavy kužele: 323 mm^2 , průměr $20,27 \text{ mm}$ s průměrem tyče penetrometru $15,88 \text{ mm}$ pro měkké půdy (viz Obrázek 4A); a 129 mm^2 , průměr $12,83 \text{ mm}$ s průměrem tyče $9,53 \text{ mm}$ pro tvrdé půdy (viz Obrázek 4B). Jako vhodný počáteční povrch kužele se doporučuje maximálně AISI 416 nerezová ocel, strojově opracovaná na hladký povrch $1,6 \mu\text{m}$ dle Amerického ústavu pro železo a ocel. Kužel s plochou podstavy 129 mm^2 je vhodný pro ručně ovládané přístroje v tvrdé půdě, pokud není tyč delší než 457 mm . Odstupňování na tyči penetrometru je $25,4 \text{ mm}$ od sebe a slouží k identifikování hloubky na ručně ovládaných přístrojích. Měřicí přístroj ručně ovládaných jednotek by měl mít kapacitu penetračního odporu přibližně 2 MPa pro penetrometry s plochou podstavy 323 mm^2 a neměl by překračovat 5 MPa pro penetrometry s plochou podstavy 129 mm^2 , aby byl vhodný pro většinu zemědělských půdních podmínek. Je žádoucí přímé zobrazení aktuální hodnoty penetračního odporu. Kužely penetrometru by měly být vyměněny, když opotřebení průměru podstavy přesáhne 3% a tudíž ovlivňuje penetrační odpor o 5% . $1,5 \text{ mm}$ okraj na podstavě kužele zajišťuje delší životnost kužele bez podstatného ovlivnění přesnosti měření. Je třeba zvážit vyřazení kuželů i kvůli jiným faktorům, jako je přílišná tupost nebo přílišné opotřebení. Půdní podmínky rychle mění tvar a povrchovou úpravu kužele a změna průměru je brána jako kritérium pro vyřazení kužele.

Technický postup podle ASAE EP542 nastoluje standardní metody plánování, používání a vykazování dat získaných pomocí půdního kuželového penetrometru. Ačkoliv získávání dat pomocí půdního kuželového penetrometru je poměrně jednoduché, měly by být dodržovány popsané postupy pro získávání a vykazování dat, aby se minimalizovala variabilita měření.

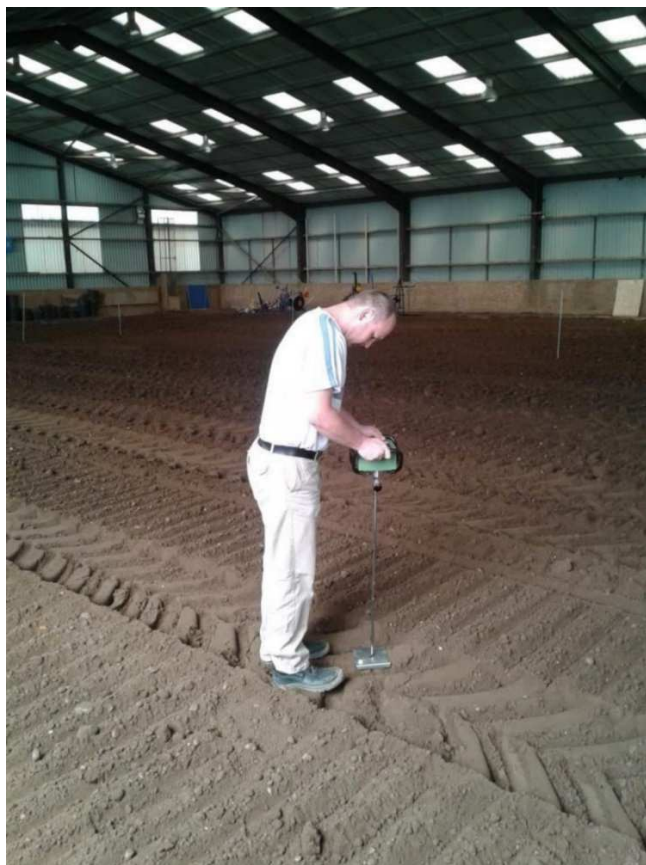
Norma definuje penetrační odpor jako sílu na jednotku plochy podstavy nutnou k zasunutí penetrometru skrz stanovený malý přírůstek půdy. Penetrační odpor byl původně

definován jako průměrný penetrační odpor pro horních 150 mm půdy, ale tento pojem byl od té doby rozšířen tak, aby zahrnoval hodnoty penetračního odporu v jakékoliv hloubce.

Půdní kuželový penetrometr vznikl z potřeby změřit pevnost půdy pro účely predikce sjízdnosti terénu pro vozidla. Jeho použití pro sjízdnost v zemědělství bylo vyvinuto a později prozkoumáno armádní agenturou USACE - Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station a následně představeno vědecké komunitě jako nástroj použitelný pro měření pevnosti půdy. Vývoj kuželového penetrometru vedl k úpravám tohoto nástroje, které z jednoduchého ručního přístroje učinily moderní sofistikovaný nástroj.

Norma dále definuje následující typy penetrometrů:

- Ručně ovládané kuželové penetrometry (viz Obrázek 5) jsou do půdy zasunovány jednou osobou, která tlačí na rukojeti připojené k tyči. Existují v podstatě dvě třídy těchto nástrojů. První třída je nástroj se „siloměrem“ nebo manometrem, kde je zapotřebí další osoba, která zaznamenává sílu a hloubku, když osoba provádějící měření zatlačuje hrot kužele do půdy. Tyto penetrometry vyžadují pro sběr dat velké množství času. Druhá třída ručně ovládaných kuželových penetrometrů se skládá z jednotek zatlačovaných ručně, kde sílu a hloubku zaznamenává datový záznamník. Ručně ovládané kuželové penetrometry podléhají značné variabilitě dat z důvodu nekonzistentní rychlosti penetrace způsobené odlišnou tvrdostí půdy, ale mají výhodu v tom, že jejich použití není limitováno výškou plodin.



Obrázek 5: Praktické měření za pomoci ručního vertikálního penetrometru.

- **Mechanické kuželové penetrometry.** Mechanické kuželové penetrometry jsou obvykle připevněny k traktoru, nákladnímu autu nebo přívěsu. K zatlačení kužele do půdy je využívána mechanická, hydraulická nebo elektrická síla, přičemž penetrační odpor a hloubka jsou zaznamenávány pomocí mikroprocesorového systému pro získávání dat. Protože u hydraulických systémů nemusí být nutně konstantní rychlost penetrace, bylo zjištěno, že výsledky z těchto strojů jsou podobné jako u ručně ovládaných penetrometrů (Morrison a Bartek, 1987). Mechanické kuželové penetrometry umožňují rychlý sběr dat při konstantní rychlosti penetrace a tudíž poskytují spolehlivější data o půdním profilu. Pokud však mechanické penetrometry nejsou připevněny k vozidlu s vysokou světelnou výškou, je jejich použití omezeno polními podmínkami a výškou plodiny (Tollner a Verma, 1984). Ve srovnání s ručně ovládanými kuželovými penetrometry jsou navíc poměrně drahé, více komplexní a vyžadují dodatečný zdroj energie.

Norma rovněž definuje získávání dat pomocí půdního kuželového penetrometru. Kužel by měl být do půdy zatlačen rovnoměrnou rychlostí přibližně $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Povrchová hodnota se měří v okamžiku, kdy je podstava kuželu v rovině s půdním povrchem. Poté by hodnoty měly být měřeny nepřetržitě, nebo tak často, jak je to jen možné, při současném udržování rychlosti penetrace na úrovni $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Není-li automatické zaznamenávání penetračního odporu možné, měla by druhá osoba provádět manuální měření při zvětšení hloubky o 50 mm nebo méně. Tyto hloubky by měly být indikovány značením na tyči kuželového penetrometru. Pokud by bylo zapotřebí penetrometr v určité hloubce vypnout (což je případ, kdy je test prováděn pouze jednou osobou), lze s penetrací a měřením znovu pokračovat bez uvádění nadměrných chyb. Ve velmi tvrdých půdách nemusí být dosažení tak vysoké rychlosti jako $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ možné, ale o něco nižší rychlosti nepovedou ke značným chybám. U lepidých půd by měly být kužel i tyč penetrometru mezi jednotlivými penetracemi důkladně omyty a osušeny.

Určení umístění a velikosti vzorku je normou definováno následovně. Údaje o penetračním odporu – (PO) získané na náhodných místech pro zemědělské účely neposkytnou statisticky spolehlivé odhady PO (Cassel, 1982). Rozdíly v PO mohou více záviset na zpracování půdy než na půdní heterogenitě; z toho důvodu by měl být penetrační odběr vzorků prováděn s ohledem na zpracování půdy a na provoz. Doporučují se transekty, které jsou kolmo k řádkům, a odběr penetračních vzorků alespoň 150 mm od sebe podél transektů (Cassel, 1982; Manor a kol., 1991). Rovněž tak rozdělení pole na menší sekce a náhodný odběr vzorků z každé sekce může zvýšit přesnost odběru vzorků v rámci celého pole. Kompletní popis této problematiky viz Petersen a Calvin (1986).

Dva nejvýznamnější faktory, které ovlivňují PO, jsou objemová hmotnost půdy a obsah vody. Výzkumní pracovníci obvykle používají PO jako indikátor pevnosti půdy. Pro minimalizování účinků půdní vlhkosti na měření PO je vhodné provádět odběr vzorků tehdy, když je obsah půdní vlhkosti blízko polní kapacity. Pro lepší pochopení sil, kterým jsou kořeny vystaveny, a pokud je požadováno srovnání pevností půdy, je někdy PO měřen při jiném obsahu vody než při polní kapacitě. Je proto třeba vyvinout maximální úsilí k tomu, aby se zaručilo, že při provádění vícero měření nedochází ke značným změnám půdní vlhkosti. Je proto třeba zvážit minimalizování délky doby, během níž jsou data o PO získávána. Cassel (1982) uvádí minimální velikost vzorku potřebnou k poskytnutí spolehlivého odhadu průměrného PO jako:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \cdot s^2}{d^2} \quad (3)$$

kde:

n – počet pozorování,

α - je hladina významnosti ($p = 1 - \alpha$),

t - je hodnota studentova t-rozdělení pro $(n - 1)$ stupňů volnosti a hladinu významnosti α ,

s - je směrodatná odchylka,

d - je přípustná chyba odhadů, která je procentním podílem odhadovaného průměru (x).

Vzorec (3) předpokládá nezávislé vzorky a Gaussovo rozdělení pro jednotlivá pozorování. Pro použití tohoto vztahu by mělo být x a s nejprve získáno z předběžných vzorků. Pro $n \geq 30$ může být studentovo t-rozdělení nahrazeno standardním normálním rozdělením. Popřípadě Warrick a Nielsen (1980) doporučili velikost vzorku, $n =$ minimálně 20.

Tento postup by měl být dodržen i pro pokusy zahrnující měření PO, které se nezabývají zpracováním půdy. Pro dané místo by měla být vypočítána průměrná hodnota PO získaná při každém zvýšení hloubky a rovněž tak směrodatná odchylka a variační koeficient. Pro každé zkušební místo je poté PO (v jednotkách MPa) zaznamenán oproti hloubce (v metrech).

Měly by být uváděny následující související půdní vlastnosti:

- půdní typ / struktura (uvést procento jílu);
- obsah organické hmoty;
- obsah vody v půdním horizontu (humusový horizont);
- objemová hmotnost půdního horizontu (humusový horizont);
- historie sklízení / zpracování půdy (2 předešlé roky).

Rovněž by mělo být uvedeno následující:

- retenční křivka půdní vlhkosti na horizont;
- stav odvodnění;

- mez plasticity;
- velikost strukturních jednotek půdy (hroudy).

Norma ASEP EP542 dále řeší konkrétní využití dat o penetraci:

- Mobilita/sjízdnost. Tažné modely obvykle využívají průměrný PO pro horních 150 mm hloubky půdy.
- Hloubka vrstev omezujících prostupnost kořenů. Hodnoty PO se používají pro určení hloubky půdních vrstev, které brání růstu kořenů. Tyto ztuhlé vrstvy půdy mohou být způsobeny přirozenými příčinami nebo mohou vzniknout díky externím zdrojům, jako např. provoz vozidel.
- Kořenový růst. Kořeny rostlin jsou flexibilní a rostou skrz místa nejmenšího odporu. Minimální hodnoty PO mohou mít tudíž z hlediska kořenového růstu větší význam, než maximální nebo průměrné hodnoty horizontálního odporu (Bradford, 1986).

Nepravidelnosti PO mohou být způsobeny jak variabilitou půdy, tak chybami měřicích zařízení. Tyto nepravidelnosti se mohou projevit v takové míře, že způsobí vynechání datového bodu, nebo zaznamenání neobvyklé hodnoty. Vypátrání těchto chybných datových bodů a rozhodnutí o vhodném postupu jejich řešení je jedním z nejnáročnějších aspektů analýzy dat PO.

Analýza závislosti, chybějící údaje a odlehlé hodnoty

Regresní analýzu lze použít s penetračními daty, kdy PO je nezávislá proměnná (x) a další půdní parametr je závislá proměnná (y). Naopak pro jiné situace je PO použit jako závislá proměnná a další půdní parametr (jako hloubka v následujícím příkladu) je použit jako proměnná nezávislá (viz Vzorec 4).

$$PO = \beta_0 + \beta_1 D + \varepsilon \quad (4)$$

kde:

PO - je penetrační odpor (MPa),

β_0 - je průsečík osy y ,

β_1 - je sklon,

D - je hloubka (m),

ε – je rezidium.

Chybějící údaje

Je-li to alespoň trochu možné, mělo by být pro každou hloubku, pro kterou je požadován PO, získáno několik datových bodů. Pokud jsou v rozsahu 50 mm hloubky (maximální běžně používaný rozsah hloubky) získána více než 3 měření, pak by i při absenci jednoho datového bodu bylo stále možné uvádět průměrnou hodnotu pro danou hloubku. Není-li možné v rámci daného rozsahu hloubky získat toto množství dat, pak je nejlepší chybějící hodnotu z modelu prostě eliminovat, bez dalších pokusů o znovuvytvoření z jiných replikací. Je však třeba dbát opatrnosti, pro vyhnutí se přílišným chybám souvisejícím se sériovou korelací, když jsou data sdružována pro účely získání průměru pro konkrétní hloubku (Christenson a kol., 1989).

Odlehlé hodnoty

Odlehlé hodnoty vznikají, když kuželový penetrometr narazí na kámen, jiný tvrdý předmět nebo měkký předmět, například dutinu; pokud jiné nevysvětlitelné podmínky způsobí, že datové body se nachází jinde než obvykle; nebo když jsou zaznamenány chybné elektronické signály. Určení toho, zda je datový bod skutečný, nebo se jedná o odlehlou hodnotu, vyžaduje zkušenost s daným polem a zařízením. Jedním způsobem stanovení odlehlých bodů je vizuální kontrola dat při jejich zanesení na dvojrozměrný graf x-y. Dalším způsobem je určení průměru napříč rozsahem hloubek a poté výpočet odchylky napříč stejným rozsahem. Je-li u konkrétní hloubky zjištěna extrémní odchylka, může se zde vyskytovat vychýlený bod. Další šetření pomocí vhodných statistických metod, jak popsali (Snedecor a Cochran, 1967), může eliminovat chybné měření nebo odlehlou hodnotu.

Penetrační odpor půdy je empirická míra stavu půdy a měří čistý vliv několika půdních vlastností. Kuželový penetrometr není praktickou metodou pro stanovení zhutnění půdy na velkém pozemku (Raper a kol., 1999). Pokud mají být na pozemku určeny skutečné změny zhutnění půdy, musí být použit hustý režim odběru vzorků. Výzkumní pracovníci se pokouší navrhnout nástroje pro odběr vzorků, které mohou určit zhutnění půdy dostatečně rychle, aby bylo možno zmapovat zhutnění půdy v rámci pole (Raper a kol., 1999).

Toto úsilí vedlo k sestavení nástroje, který je schopný rychle určit pevnost půdy, měl však omezený úspěch. Nástroje byly schopny určit pevnost půdy pouze v samostatných hloubkách (Alihamsyah a Humphries, 1991; Adamchuk a kol., 2001). Systém, který by byl schopný rychle určit pevnost půdy napříč půdním profilem, je teprve třeba vyvinout. Byl zahájen projekt k vyvinutí snímače pevnosti půdy, který by mohl rychle určit zhutnění půdy napříč půdním profilem. Koncept kontinuálního (on-the-go, za jízdy) snímače pevnosti půdy byl vyvinut na Severokarolínské státní univerzitě (Alihamsyah a Humphries, 1991).

Metoda zasunutí u typu stop-and-go používaná pro sběr penetračních dat není dostatečně rychlá k získání platných údajů v situacích intenzivního odběru vzorků (Raper a kol., 1999). Mulqueen a kol. (1977) si povšimli, že hodnoty penetračního odporu jsou pro srovnání platné pouze tehdy, pokud byla měření provedena za podobných půdních podmínek. Výzkumní pracovníci vyvinuli také intruzivní způsoby pro měření penetračního odporu za jízdy (Young a kol., 1988; Alihamsyah a kol., 1990; Smith a kol., 1994).

2.3.4 Horizontální penetrometry

Snaha po odstranění výše uvedených nedostatků vertikálních penetrometrů (především zvýšení rychlosti sběru penetračních dat a možnost jejich kontinuálního sběru) vedla výzkumníky k vývoji penetrometrů horizontálních.

Horizontální penetrometry jsou vhodné pro zaznamenávání plošného rozložení zhutnění půdy s následným mapováním pozemku. Horizontální penetrometry jsou dobrými pomocníky pro nepřetržité mapování variability pozemků. Existuje velké množství typů horizontálních penetrometrů, které ne vždy používají pro proniknutí do půdy kužel.

Například Varga a kol. (2014) použili jednoduchý horizontální penetrometr se dvěma hroty, kde je siloměr umístěn na rámu s třibodovým závěsem. Zajímavé měření provedli Hall a Raper (2005), kdy snímací prvek byl ve tvaru 30° klínu. Tito také uvádí, že penetrační měření jsou značně ovlivněna vlhkostí půdy.

Alihamsyah a kol. (1990) vyvinuli a otestovali horizontálně pracující čepel s hrotem snímajícím impedanci. Tento prototyp testoval dvě provedení hrotu: standardní 30° kužel a 30° klín. Obě provedení hrotu byla testována proti standardnímu vertikálně pracujícímu

kuželovému penetrometru. Bylo zjištěno, že 30° klín nejlépe koreluje se standardním kuželovým penetrometrem. Při polních testech (Alihamsyah a Humphries, 1991) určili, že horizontální čepel s 30° klínem byla nevhodnější pro horizontální určení pevnosti půdy.

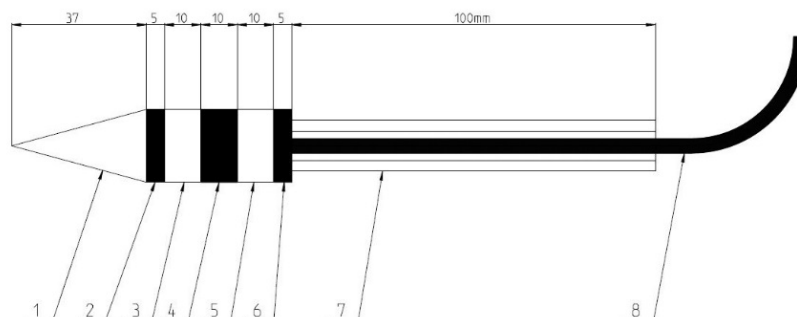
Kombinované měření penetračního odporu horizontálním penetrometrem a obsahu půdní vlhkosti ukázali Schulze Lammers a kol. (2007) a Naderi-Boldaji a kol. (2011). Oba týmy navrhly a zkonstruovaly kuželový horizontální penetrometr, kde kužel již obsahuje kapacitní snímač vlhkosti. Tyto kombinované snímače „během jízdy“ potvrdily významný vliv obsahu půdní vlhkosti na měření penetračního odporu.

Nepřetržité a souběžné měření půdní vlhkosti je nutné k tomu, aby se vykompenzoval její vliv při používání penetrometru při experimentech.

Chukwu a Bowers (1997) vyvinuli penetrometr s horizontální čepelí s několika sondami a s 30° klínem pro zkušební sondy. Tato jednotka byla schopna detekovat hodnoty penetračního odporu půdy ve třech různých hloubkách. Další podobné návrhy pro určování pevnosti půdy v několika samostatných hloubkách také vyvíjeli (Weissbach a Wilde, 1997; Adamchuk a kol., 2001).

Záměr některých výzkumníků spočíval ve vytvoření systému měření horizontální pevnosti půdy způsobem on-the-go vertikální oscilací snímacího prvku nahoru a dolů, jak se pohybujeme vpřed napříč půdou. Tento způsob vedl k americkému patentu (Raper a Hall, 2003).

Schulze Lammers a kol. (2007) použili pro kombinovaný snímač pro mapování odporové síly půdy a půdní vlhkosti penetrometr vybavený snímačem vlhkosti, který by měl zajistit sběr signálu podobného rozlišení pro oba snímače. Začlenění snímače půdní vlhkosti do vertikálního penetrometru již bylo popsáno (Schulze Lammers, P., Sun, Y., Ma, D., 2007). Obsah půdní vlhkosti byl měřen kapacitním snímačem začleněným do tyče horizontálního penetrometru (viz Obrázek 6).



Obrázek 6: Hlavní části horizontálního kombinovaného penetrometru a provedení elektrod. 1 Hrot, úhel hrotu 30°, průměr 20 mm; 2, 4, 6 Izolační kroužek o průměru 20 mm; 3, 5 Ocelové kroužky (elektrody) o průměru 20 mm; 7 Ochranná část kabelu průměr 17 mm; 8 Koaxiální kabel

Jsou-li závěry ohledně zhutnění vyvozovány z MOP, který se měří jako síla, je nutno zvážit silný nelineární vztah s obsahem půdní vody. Vědečtí pracovníci měřili vliv odporu půdy při různých úrovních vlhkosti pomocí nově navrženého typu měřicího přístroje – horizontálního penetrometru. Měření byla provedena za polních podmínek, kdy průměrná půdní vlhkost byla 8,47 % a 14,24 %, na základě dvouparametrové srovnávací metody pomocí horizontálního penetrometru. Navrhovaný měřicí přístroj měřil odpor půdy ve stopě pneumatiky a mimo ni po pěti přejezdech traktoru. Byly také navrženy měřicí a záznamové přístroje pro zachycení naměřených hodnot. Výsledky naznačily, že se odpor půdy po každém přejetí zvyšuje, a bylo také zjištěno, že po prvním přejetí se odpor půdy zvýšil asi o 48,1 % ve srovnání s počáteční hodnotou odporu půdy. Průměrná objemová hmotnost půdy odpovídá úměrně přírůstkům odporu půdy, jak v absolutních, tak v relativních hodnotách, v závislosti na počtu přejezdů traktoru. Je možné vyvodit závěr, že nově vyvinutý měřicí přístroj funguje správně a může být použit pro všechny typy traktorů vybavených tříbodovým závěsem s šířkou vzorku pneumatiky 1000 – 2000 mm. Výsledky měření lze využít při mapování aktuálních podmínek půdního prostředí (Varga a kol., 2014).

2.4 Výhody a nevýhody jednotlivých metod zjišťování fyzikálních vlastností půdy

Na základě porovnání jednotlivých metod zjišťování fyzikálních vlastností půdy lze vyvodit, že pro účely této práce připadá v úvahu především použití horizontálního penetrometru. Ten jediný je schopen pracovat kontinuálně současně s měřením tahové síly. Další dvě metody, tedy metodu odběru Kopeckého válečků a měření pomocí vertikálního penetrometru lze doporučit jako metody kontrolní. Odběr neporušených vzorků půdy (Kopeckého válečky) je metoda nejpřesnější, ale také nejpracnější. Z tohoto důvodu by měla být doplněna také metodou měření ručním vertikálním penetrem, který popíše detailněji odpor půdy v jejím hloubkovém profilu.

Na základě těchto poznatků bude navržen horizontální penetrometr, který by měl být součástí měřicího zařízení tahové síly. Fyzikální vlastnosti půdy pozemku, na kterém budou probíhat vlastní měření, lze pak charakterizovat kombinací odběru a vyhodnocení Kopeckého válečků a penetračního odporu v hloubkovém profilu měřeném pomocí ručního vertikálního penetrometru.

3 Měření tahových odporů strojů

Jedním z měřitelných parametrů MOP je měření tahové síly. Tahová síla je ovlivněna hlavně půdními podmínkami (půdní typ, zhutnění, reliéf, atd.) (Arvidsson a kol., 2004; Schutte a Kutzbach, 2003) a parametry strojů na zpracování půdy (typ pracovního nástroje, pracovní záběr, pracovní hloubka, atd.).

Tyto faktory jsou zásadně řešeny a vyhodnocovány v procesu konstrukce a výroby zemědělských strojů na zpracování půdy. Současně se znalostí tahové síly by mohly být užitečným nástrojem v mnoha ohledech. Výsledky mohou být použity v běžné praxi pro srovnání energetické náročnosti technologií pro zpracování půdy, k prověření technických změn na pracovním nástroji, optimalizaci pracovních nástrojů a ověření agronomických opatření (Kroulík, 2013). Druhou oblastí faktorů, které ovlivňují tahovou sílu, jsou faktory závislé na daném místě, jako jsou typ půdy, objemová hmotnost půdy, vlhkost půdy (Arvidsson a kol., 2004) a reliéf (Schutte a Kutzbach, 2003). Další faktory, které ovlivňují finální hodnotu tahové síly, jsou stav a nastavení nástrojů.

3.1 Metody měření, požadavky na měřicí zařízení

Znalosti variability lokální pevnosti půdy resp. MOP proti vnikání cizího tělesa lze také využít k jejímu mapování za účelem stanovení vlivu struktury půdy na vývoj rostlin a výnos (Sirjacobs a kol., 2002), koncipovali pokusný senzor pevnosti půdy následovně: úzké ostří radličky při pohybu nosného prostředku vniká do půdy v požadované hloubce. Rameno přenáší sílu z ostří radličky na osmihranný kruhový převodník připevněný na nosném prostředku. Deformace kruhu jsou převáděny napět'ovým členem na tři elektrické signály, které vyjadřují horizontální (F_x) a vertikální (F_z) síly a celkový moment (M_y). Hodnoty F_x , F_z a M_y jsou funkcí fyzikálních vlastností půdy (obsahu jílovitých částic, ale i geometrie radličky, hloubky a pracovní rychlosti). Sirjacobs a kol. (2002) doporučili pro senzor pevnosti půdy následující parametry: délka ostří radličky 270 mm, šířka 45 mm, horizontální umístění na rámu se sklonem 10° směrem dopředu. Měření prováděl na fixovaném třibodovém závěsu traktoru. Ostří radličky je nastaveno do hloubky 0,3 m, aby byly získány informace z nejnižší vrstvy půdy. Pracovní rychlost by měla být $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, která je charakteristická pro většinu prací souvisejících se zpracováním půdy.

Jiným způsobem měření pevnosti půdy je zjišťování tahového odporu celého stroje pro zpracování půdy. Experimentální práce s touto aparaturou byly prováděny na Katedře zemědělských strojů ČZU Praha. Nejčastěji to bývá radličkový kypřič s úzkými dlátovými nebo nožovými radličkami. Měření tahového odporu provedl Kroulík (2013) na Katedře zemědělských strojů ČZU Praha. K měření byl použit radličkový kypřič o záběru 2 m. Pro sledování tahového odporu byl použit tříbodový měřicí rám vložený mezi traktor a kypřič. Rám umožňuje připojení jakéhokoliv neseného stroje a je osazen tenzometrickými můstky ve všech třech bodech závěsu. Naměřené výsledky lze prostorově umístit pomocí koordinátů snímaných v průběhu pokusu přijímačem signálu GPS nebo DGPS do obrysové mapy pozemku. Výsledkem jsou mapy hodnot naměřených senzorem na ploše sledovaného pozemku.

Paul (1992) provedl mapování tahové síly na zkušebním pozemku Federálního zemědělského výzkumného ústavu v Braunschweigu. Datová ústředna zaznamenávala signál z tenzometrických čepů traktoru a rychlost měřenou radarem. Kromě výše uvedeného zaznamenával autor také celkový prokluz. Výsledek naměřených hodnot byl v souladu se závislostí tahové síly na různých typech půdy v rámci zkušebního pozemku. Na základě výsledků Paul (1992) vyvodil závěr, že vlhkost půdy významně ovlivnila celkový prokluz traktoru.

Dalšími, kdo se zabýval měřením tahových sil, byl Van Bergeijk a Goense (1996), kteří připojili na upravené radličné pluhu čidla, která snímala pracovní šířku a hloubku. Tahová síla byla měřena pomocí tenzometrických čepů připojených na spodní táhlo tříbodového závěsu a pomocí doplňkového měřicího rámu mezi traktorem a radličným pluhem. GPS přijímačem byla zaznamenávána okamžitá poloha. Tahová síla při kypření byla v rozmezí 30 – 50 kN·m⁻². Van Bergeijk a Goense (2001) zopakovali měření na stejném poli, aby zjistili vliv obsahu jílu v půdě na tahovou sílu. Po dvouletém experimentu ukázaly hodnoty tahové síly a mapy připravené pomocí metody Krigingu vysokou závislost tahové síly na obsahu jílu.

Droll (1999) odhadl hlavní zdroje chyb během měření, jako např.: drsnost půdy, vibrace traktoru a nástrojů, rychlostní rozdíly, rozdíly v obsahu vlhkosti v půdě, nestálost pozemku, atd., McLaughin a kol. (2000) došli k podobným závěrům.

Kheiralla a kol. (2004) použil tři ocelové osmihranné snímací kroužky k měření tahu na tříbodovém závěsu. Během experimentu na písčité, jílovitohlinité půdě byly srovnávány následující druhy zařízení: radličný pluh, diskový pluh, diskové brány a rotační kultivátor.

Podobný experiment provedl Chen a kol. (2013). Chen provedl experiment se 180 mm širokou šípovou radličkou pod úhlem 80°. Experimenty byly provedeny při pracovní rychlosti 3,19 km.h⁻¹ ve třech různých typech půdy: hrubý písek, hlinitý písek a písčité hlína. Výsledky ukázaly, že nejnižší hodnoty tahové síly byly zjištěny u hrubé písčité půdy (0,292 kN), pak u hlinitopísčité půdy (0,430 kN) a nejvyšší hodnoty byly zjištěny u písčitohlinité půdy (0,585 kN). Tyto výsledky byly použity pro samostatný model elementu pro interakci půda - šípová radlička. Podobná měření provedl dokonce před rokem 1996 Glancey a kol. (1996).

3.2 Stávající dostupné metody měření

Podpěra a kol. (2009, 2013) patentovali zařízení na měření tahových sil, které lze připojit mezi traktor a připojený stroj na tříbodový závěs traktoru. Zařízení označené jako TH 300 (viz Obrázek 7) slouží ke stanovení silového působení ve všech hlavních osách mezi energetickým prostředkem (traktorem) a připojeným strojem. Zařízení se využívá ve VÚZT Praha zejména ke stanovení tahové síly (až 100 kN) při experimentálních měřeních a to především v rámci řešení výzkumných úkolů, ale i v rámci služeb nabízených ostatním podnikům.

Zařízení obsahuje šest tenzometrických snímačů síly HBM U9B (50 kN), které umožňují stanovit silové působení mezi strojem a traktorem ve všech třech osách včetně působících momentů sil. Oproti dříve používanému způsobu měření tahových sil pomocí siloměrné tyče mezi dvěma traktory lze pomocí jednoho traktoru komplexně zjistit silové účinky daného stroje.

Jedná se o sofistikované zařízení, které je však poměrně komplikované a vhodné především ke vědeckým účelům. Navíc u moderních strojů na zpracování půdy tahová síla dnes již běžně přesahuje 100 kN.



Obrázek 7: Praktické provedení zařízení na měření tahových sil označené jako TH 300.

Pražan a Podpěra (2011) používali měření tahové síly traktoru k posouzení vlivu tahového odporu pluhu na zatížení pneumatik hnacích kol traktoru. K měření byl autory použit tenzometrický snímač tahové síly U 10 M, který byl vložen mezi tažný traktor a tyč, na kterou byl připojen traktor tažený (viz Obrázek 8). Takto měřená síla dosahovala maximálních hodnot do 45 kN.



Obrázek 8: Tenzometrický snímač k měření tahové síly U 10 M (Pražan a Podpěra, 2011).

Preč a kol. (2008) porovnávali tahové vlastnosti traktorů s různou konstrukcí podvozku za pomoci tenzometrického snímače HBM Z4, umístěného v ochranné ocelové kleci (viz

Obrázek 9). Tento tenzometr má rozsah měření do 500 kN, což by mělo být pro současné potřeby dostačující. Opět je nutná tažná tyč, do které je tenzometr vestavěn.



Obrázek 9: Tenzometrický snímač HBM ZA vestavěný v ochranné kovové kleci (Preč a kol., 2008).

Jak je z předchozího zřejmé, pro měření tahových sil nad 50 kN se používají tenzometrické snímače tahové síly, které bývají připojeny mezi tažný a tažený prostředek pomocí tyče. Těchto poznatků je využito při návrhu měřicího zařízení.

3.3 Výhody a nevýhody jednotlivých metod z praktického hlediska

Stávající metody měření tahové síly se pro současnou praxi vývoje a konstrukce strojů na zpracování půdy jeví jako nedostačující. Moderní stroje na zpracování půdy jsou z důvodu jak ekonomických tak agronomických konstruovány tak, aby byla maximálně využita tahová síla tažných prostředků (traktorů). Výkony největších současných traktorů se pohybuje nad hranicí 350 kW. Pracovní rychlost těchto souprav se prakticky pohybuje v rozmezí 8 – 12 km.h⁻¹ a v současné době jsou požadavky na možnost pracovní rychlosti až 15 km.h⁻¹. Moderní běžně vyráběné široko-záběrové stroje na zpracování půdy mají hmotnost převyšující i 16 000 kg jako například talířový kypřič BEDNAR ATLAS AM 12 000 (viz Obrázek 10) nebo předset'ový kombinátor BEDNAR SWIFTER SM 18 000 (viz Obrázek 11). Pro tyto stroje jsou doporučovány traktory s výkonem 330 – 410 kW. V historii již bylo provedeno několik experimentálních měření tahových sil pohybující se

na hranici 500 kN, ale bylo to pouze na zpevněné ploše a souprava dvou traktorů bez pracovního stroje (Preč a kol., 2008).

Při měření tahových sil v praxi, kdy jsou požadavky zemědělské praxe na mapování celých pozemků, se souprava dvou traktorů spřažená přes měřicí tahovou tyč s tenzometrem ukazuje jako velmi problematická. Problematické je otáčení na úvratích, koordinovanost obsluh tažných prostředků, ekonomická náročnost.



Obrázek 10: Talířový kypřič BEDNAR ATLAS AM 12 000.

Z konstrukčních důvodů je potřeba taktéž měřit a vyhodnocovat potřebnou tahovou sílu u nově konstruovaných strojů a to v průběžném měření v dlouhodobějším režimu testování. V tomto je požadavek zemědělské praxe a konstrukčních zadání pro vývoj strojů na zpracování půdy jednotný. Jak vyplývá z literární rešerše na hodnotu tahové síly mají vliv fyzikální vlastnosti půdy, hmotnost samotného stroje, půdní odpor jednotlivých pracovních orgánů a další vlivy jako např. valivé odpory přepravních i opěrných kol stroje a dalších přídatných zařízení apod. Jak je z výše uvedeného patrné je potřeba vyvinout

takové měřicí zařízení, které bude vyhovovat současným trendům moderního zemědělství a požadavkům konstrukce strojů na zpracování půdy.



Obrázek 11: Předseťový kombinátor BEDNAR SWIFTER SM 18 000.

4 Cíl práce

Cílem předložené práce bylo navrhnout a vyrobit měřicí zařízení, které by bylo schopno měřit tahový odpor strojů na zpracování půdy v rozsahu do 200 kN sofistikovanějším způsobem než doposud dostupnými metodami. Důraz byl kladen na relativní jednoduchost tohoto zařízení a možnost jeho použití při dlouhodobějším testování strojů na zpracování půdy. Při měření tahové síly by zařízení mělo umožnit i kontinuální měření fyzikálních vlastností půdy a zahloubení stroje.

Ověřovaná výzkumná hypotéza zní, že nově vyvinuté měřicí zařízení měří tahové odpory se stejnou nebo alespoň velmi podobnou přesností, jako stávající užívané metody měření založené na použití tahové tyče.

5 Materiály a metody

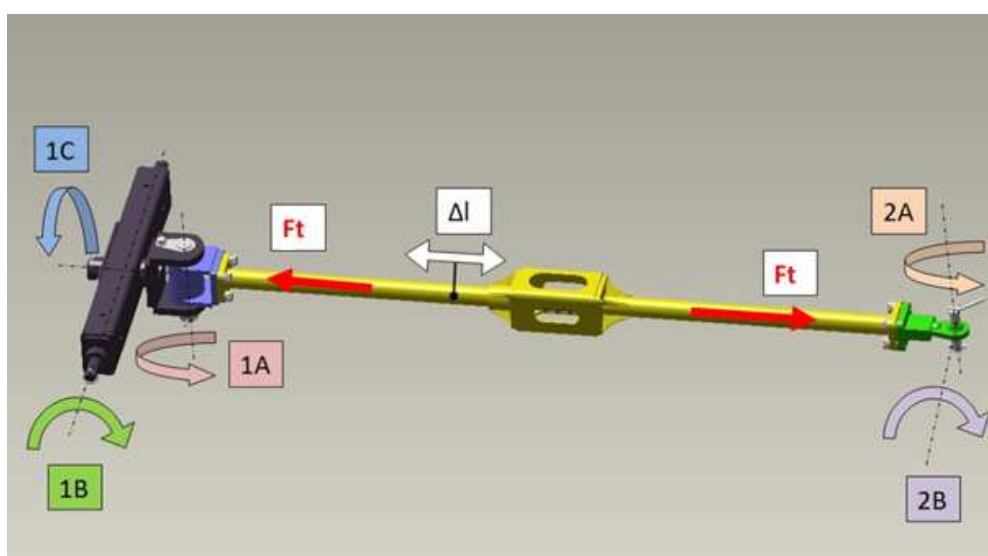
Měřicí zařízení musí být schopno měřit tahový odpor moderních širokozáběrových strojů, které jsou taženy tažnými prostředky o výkonu až 370 KW. Měření by mělo být kontinuální bez zásadních provozních omezení. Měřicí zařízení musí mít možnost agregace se stroji připojenými jak do ok třibodového závěsu kategorie 3 a 4 konstruovaných dle platných norem, tak i pro kulový závěs K 80.

5.1 Tyč pro měření tahového odporu

Nejjednodušším zařízením sloužícím k měření tahového odporu je měřicí tahová tyč, která umožňuje měřit tahovou sílu mezi dvěma traktory pomocí na ní umístěného snímače tahové síly. Pro vlastní měření tahové síly byla použita tahová tyč (viz. Obrázek 12) vyvinutá ve spolupráci ČZU v Praze a firmy BEDNAR FMT s.r.o. (dříve Strom Export s.r.o.), s tenzometrickým snímačem LUKAS S-38 který umožňuje měřit stroje s tahovým odporem až 200 kN a měřicím jmenovitým signálem $1,569 \text{ mV} \cdot \text{V}^{-1}$ při napájení 5 V. Pracuje se sloučenou chybou 0,2 % FS v kompenzovaném teplotním rozsahu od -10 do 50 °C. Zpracování signálu probíhá pomocí měřicí ústředny National Instruments NI cDAQ 9178 s nainstalovaným tenzometrickým modulem National Instruments NI 9237. Tato ústředna se k počítači připojuje přes sběrnici USB. Tento tenzometrický modul pracuje se vzorkovací frekvencí až 500 Hz simultánně s rozlišením 24 bit. Tento modul má možnost měřit v plném tenzometrickém mostu, tak i půlmostu a čtvrtmostu.

Během měření první traktor táhne přes měřicí tyč druhý traktor s připojeným měřeným strojem (druhý traktor slouží pouze jako nosič nářadí). Spojení mezi prvním traktorem a měřicí tyčí je provedeno rotačními vazbami *1A*, *1B*, *1C* (viz Obrázek 12). Spojení mezi druhým taženým traktorem a měřicí tyčí je provedeno rotačními vazbami *2A*, *2B* (viz Obrázek 12). Měřicí zařízení obsahuje posuvnou vazbu *Δl*. Rotační vazby *1A*, *1B*, *1C*, *2A*, *2B* zajišťují, aby měřicí zařízení bylo zatěžované pouze tahovou silou *F_t*. Rotační vazba *1A* umožňuje otočení maximálně $\pm 90^\circ$. Rotační vazba *2B* umožňuje otočení maximálně $\pm 10^\circ$. Aby bylo zabráněno jinému, než axiálnímu namáhání tahového čidla, což by znamenalo jeho zničení, je k měřicí tyči doplněna svařenou klecí a posuvná vazba *Δl*, která chrání vlastní tenzometrický snímač umístěný v kleci před ohybovou složkou namáhání přenesenou některou s rotačních vazeb, vlivem překročení uhlu.

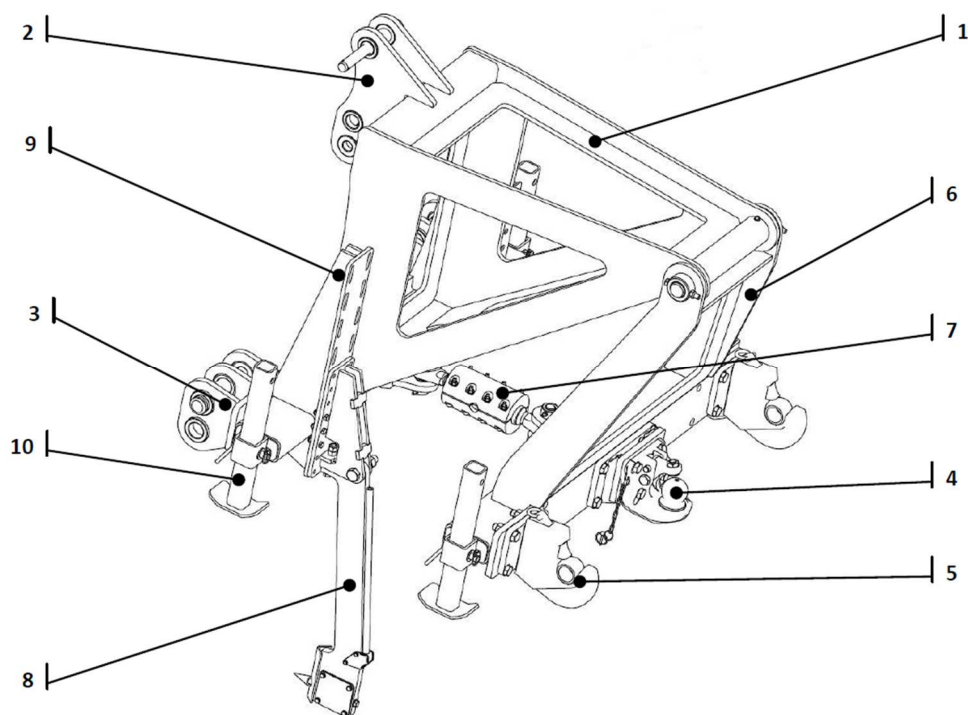
Ochrannou klecí bylo měřicí zařízení dovybaveno na základě zkušeností, kdy během měření došlo z důvodu nekoordinovanosti obsluh obou tažných prostředků k poškození tenzometrického snímače tahové síly. Metoda měření s tahovou tyčí je komplikovanější, protože je potřeba použití druhého, taženého traktoru. Výsledky měření tahové síly jsou zatíženy chybou měření danou tahovým odporem druhého, taženého traktoru. Tu je třeba eliminovat tažením samotného taženého traktoru a takto zjištěnou sílu od síly zjištěné při měření se strojem pro zpracování půdy odečíst.



Obrázek 12: Měřicí tahová tyč pro měření tahového odporu strojů pro zpracování půdy.

5.2 Rám pro měření tahového odporu

Výše uvedené hlavní nedostatky měřicí tahové tyče by měl do značné míry odstranit nově vyvinutý měřicí rám pro měření tahového odporu.



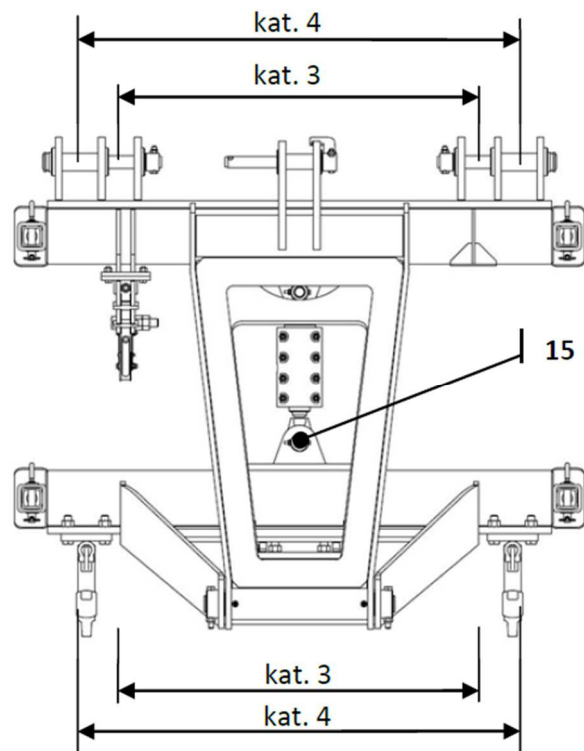
Obrázek 13: Celkový pohled na návrh měřicího rámu. 1 - Pevná část rámu. 2 - Třetí bod tříbodového závěsu kategorie 3 a 4. 3 - Spodní body tříbodového závěsu kategorie 3 a 4. 4 - Kulový závěs K80. 5 - Závěsné háky tříbodového závěsu kategorie 3 a 4. 6 - Závěsná část rámu. 7 - Tenzometrické táhlo pro měření tahové síly. 8 - Penetrometr. 9 - Konzola pro připevnění penetrometru. 10 - Odstavné nohy.

Na Obrázku 13 je celkový pohled na návrh měřicího rámu tahové síly pro návěsné a přívěsné stroje na zpracování půdy. Pevná část rámu (poz. 1) se pomocí oka tříbodového závěsu (poz. 2 a 3) připojí k traktoru či k jinému tažnému stroji s tříbodovým závěsem. K závěsným hákům nebo variantně s kulovým závěsem velikosti K80 (poz. 4 a 5) na závěsné části rámu (poz. 6) se pak připojí tažený stroj; pro připojení stroje k závěsným hákům je třeba kulový závěs z rámu demontovat. Jak oka tříbodového závěsu na pevné části rámu, tak i závěsné háky na závěsné části rámu jsou navrženy pro připojení zařízení k závěsům kategorie 3 a 4 konstruovaných dle platných norem. K pevné části rámu jsou přivařena universální závěsná oka ve dvou různých roztečích. Pro změnu rozteče závěsných háků na závěsné části rámu je potřeba je demontovat a posunout do druhé

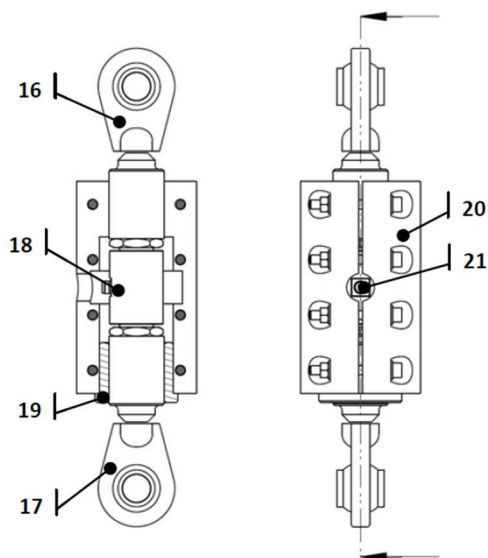
polohy (poz. 5). Měřicí rám je také vybaven odstavnými nohami (poz. 10) pro odstavení stroje.

Pro měření tahové síly slouží tenzometrické táhlo (poz. 7) silový snímač tahové síly LUKAS S-38. Technická specifikace již byla blíže popsána v kapitole 5.1. Dále je stroj vybaven penetrometrem (poz. 8), který je připevněn ke konzole (poz. 9) na pevné části rámu. Ve spodní části rámu je umístěn silový snímač penetrometru (ZEMIC B3G-C3-1.0t-6B -1 t), s měřicím rozsahem 1,0 t. Tento snímač byl kalibrován při tíhovém zrychlení $9,7934 \text{ m.s}^{-2}$. U tohoto snímače je jmenovitý měřicí signál $3,0072 \text{ mV.V}^{-1}$ a napájený 5 V až 12 V. Snímač je zapojený přes plný tenzometrický most a sloučená chyba je udávána 0,02 % FS. Snímač pracuje spolehlivě v teplotním rozsahu -10 až 40 °C a s bezpečnostním přetížením 1,5 t.

Na Obrázku 15 je uvedeno již zmíněné tenzometrické táhlo. Táhlo je ve stroji umístěno kloubově mezi pevnou a závěsnou částí rámu (viz Obrázek 14). K oběma ráům je táhlo připevněno pomocí střižných čepů (poz. 15) a ok s kulovými kluznými pouzdry (poz. 16, 17). Střižné čepy slouží jako bezpečnostní prvek proti přetížení tenzometru (poz. 18) tahovou silou a v případě překročení dovoleného zatížení dojde k jejich přestřižení. Oka s kulovými kluznými pouzdry pak zamezují namáhání tenzometru případným ohybovým momentem. Pro případ, kdy by například vlivem přidření kulových ložisek nebo jakýmkoliv jiným způsobem došlo k výskytu ohybového momentu a hrozilo by poničení či destrukce tenzometru, je snímač (poz. 18) chráněn objímkovou spojkou (poz. 20). Spojka je na jedné straně tenzometrického táhla pevně sevřená k tažnému oku (poz. 16), na druhé straně táhla objímka svírá průchozí pouzdro (poz. 19). Skrz pouzdro prochází druhé tažné oko (poz. 17) uložené s vůlí. Při působení tahové síly tak může docházet ke vzájemnému pohybu a tím k deformaci tenzometru; měření tahové síly. Použitý snímač je možné zatížit silou až 200 kN (= cca 20 t).



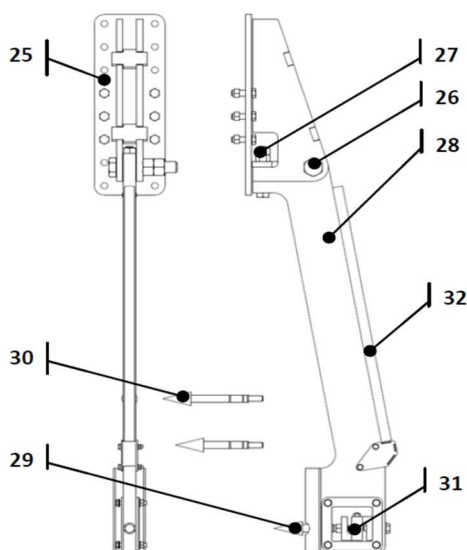
Obrázek 14: Horní pohled na měřicí rám s vyznačenou pozicí/roztečí ok pro závěs kategorie 3 a 4.



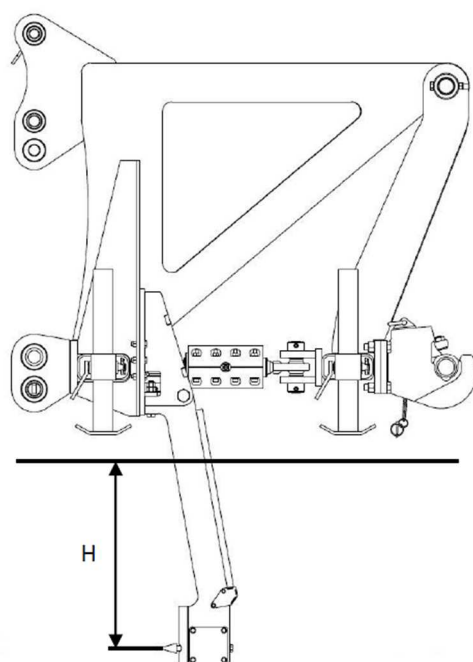
Obrázek 15: Tenzometrické táhlo. 11, 12 - Tažná oka. 13 - Tenzometrický snímač. 14 - Průchozí pouzdro. 15 - Korýtková objímka. 16 - Připojovací konektor.

Pro zjišťování penetračního odporu půdy je ke konzole na pevné části rámu (poz. 9) připevněn horizontální penetrometr (poz. 8), který byl vyvinut a navrhnut na základě poznatků zjištěných z předchozí literární rešerše (Schulze Lamers a kol. 2007). Detail

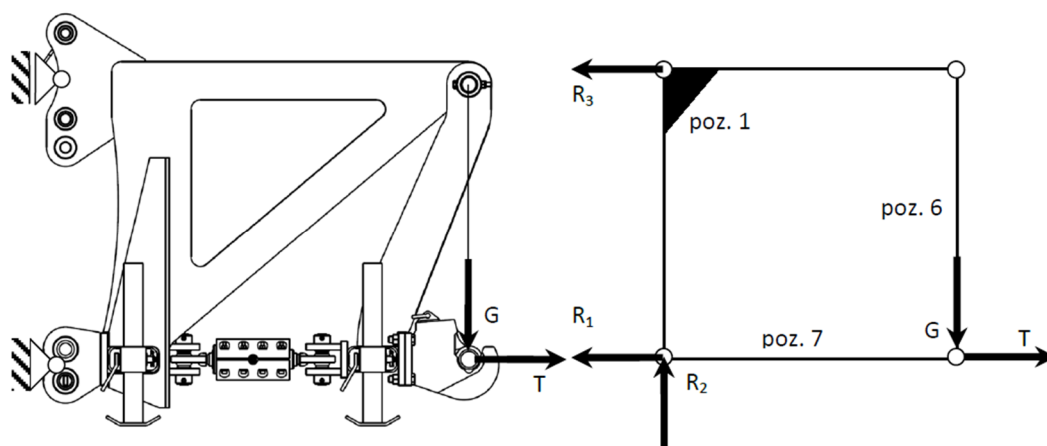
penetrometru je uveden na Obrázku 16. Penetrometr je k měřicímu rámu připojen pomocí konzole (poz. 25), ke které je pomocí šroubu (poz. 26) a trhacího šroubu (poz. 27) připojena slupice penetrometru (poz. 28). Trhací šroub slouží jako bezpečnostní prvek proti přetížení slupice/penetrometru. V případě nárazu slupice do pevné překážky ukryté v zemi dojde k přetržení trhacího šroubu a ke "zhoupnutí"/vychýlení slupice okolo šroubu (poz. 26). Síla potřebná k přetržení trhacího šroubu je cca 20 kN (=cca 2 t) působící při maximálním zahloubení penetrometru (H) v ose hrotu (viz Obrázek 17). Velikost odporu půdy je měřena/vyhodnocována na základě zjišťování velikosti síly potřebné pro vnikání měřicího hrotu (poz. 29) do půdy. Síla je měřena tenzometrickým snímačem (poz. 31) zatížitelným silou až 10 kN (= cca 1 t). Snímač je umístěn v dutině ve spodní části slupice, kde je pomocí krytů chráněn proti vnikání nečistot (kryty v obrázku zobrazeny nejsou). Přívodní kabel je ke snímači přiveden ze zadní strany slupice v krycím vedení (poz. 32). Hloubka penetrometru při měření je dána výškovým nastavením ramen traktoru s měřicím rámem a polohou penetrometru na konzole (lze nastavit v rozsahu 0,3 m, viz Obrázek 17).



Obrázek 16: Detail horizontálního penetrometru. 25 – Konzola pro připevnění penetrometru. 26 – Osa rotace slupice. 27 – Trhací šroub. 28 – Slupice. 29 – Měřicí hrot. 30 – Náhradní měřicí hroty. 31 – Tenzometrický snímač. 32 – Vedení pro přívodní kabel.



Obrázek 17: Boční pohled na stroj s vyznačenou hloubkou penetrometru. H - Měřicí hloubka penetrometru (závisí na poloze ramen traktoru).



Obrázek 18: Silový rozbor měřicího rámu (vlevo reálná konstrukce, vpravo matematický model).

Na Obrázku 18 je proveden silový rozbor měřicího rámu. V levé části je uvedena reálná konstrukce rámu se zavedenými vnějšími silami a vazbami. V pravé části obrázku je pak uvedený zjednodušený matematický model po uvolnění. Síla G je síla od svislého zatížení oje stroje, síla T je tahová síla, R_1 , R_2 a R_3 jsou pak reakční síly nahrazující vazby po uvolnění. Reakční síly R_1 a R_3 uvedené v modelu svým směrem neodpovídají skutečnosti. Ve skutečnosti by měly být zakresleny skloněné do směrů táhel tříbodového závěsu.

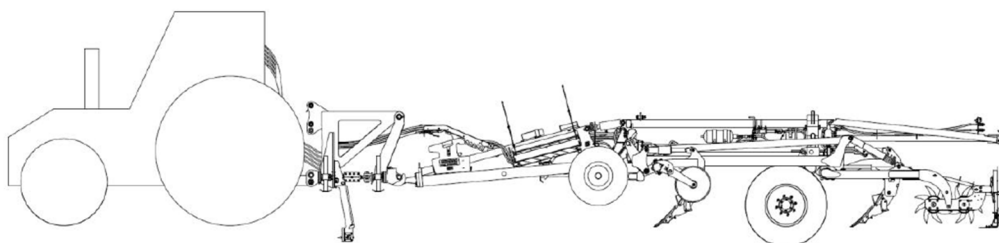
V modelu jsou uvedeny pouze pro ilustraci a na další řešení nemají vliv. Vzhledem ke konstrukci rámu, kdy jak tenzometrické táhlo (poz. 7), tak i závěsná část měřicího rámu (poz. 6), jsou k pevné části rámu (poz. 1) připevněny kloubově, je možné na tyto prvky (táhlo a závěsná část rámu) pohlížet jako na pruty, tedy na prvky, které přenáší zatížení pouze v osovém směru. Umístěním závěsného bodu pro připojení taženého stroje (působí síly G a T) svisle pod místo, kde je kloubově uchycena závěsná část rámu (poz. 6), je pak docíleno toho, že tenzometrické táhlo přenáší pouze zatížení způsobené tahem a závěsná část rámu přenáší pouze svislé zatížení od svislého zatížení oje. Případné parazitní zatížení táhla a závěsné části rámu způsobené vychýlením závěsného bodu (vlivem deformací) je vzhledem k robustnosti stroje a předpokládané velikosti zanedbatelné. Na Obrázku 19 je provedeno uvolnění závěsného bodu. V části a) obrázku je uvedeno uvolnění bodu bez uvažování deformací, v části b) obrázku je pak uveden případ, kdy vlivem deformací dojde k vychýlení závěsného bodu a vzniku parazitního zatížení. Symbolem S jsou značeny vnitřní síly v prutech.



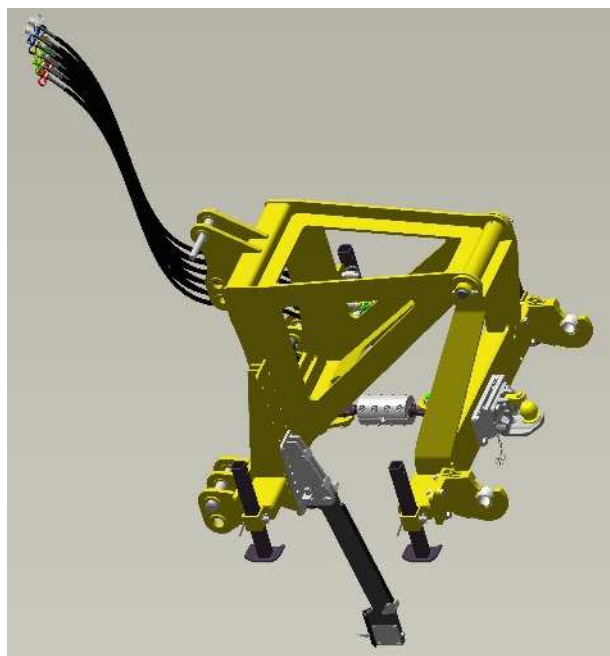
Obrázek 19: Uvolnění závěsného bodu. a) uvolnění bodu bez uvažování deformací táhla a závěsného rámu, b) provedeno uvolnění s uvažovanou deformací obou prutů.

Dále byl na kabině traktoru umístěn QUECTEL L16 přijímač k měření rychlosti a polohy stroje GPS, který pracuje v systémech GPS L1 a GLONASS L1 s rozsahem 32 kanálů při frekvenci až 5 Hz při určování polohy. Přijímač QUECTEL L16 určuje polohu s přesností 1,5 m. Pracovní hloubku a její změny lze měřit ultrazvukovým snímačem vzdálenosti umístěným UK1D-E1-0A s měřicím rozsahem 150 – 1600 mm a přesností 0,5 % na pracovní frekvenci 2 Hz a s teplotní kompenzací. Tento ultrazvukový snímač byl umístěn na měřicím rámu. Dále může být rám dovybaven zařízením k měření průtoku a tlaku oleje pohánějícího hydraulické mechanismy měřeného stroje mohou sloužit snímače Parker SCFT-300-22-07 a Parker SCP-250-34-06.

Na měřicím rámu je dále umístěn AD převodník National Instruments USB-6008 (12 bit, 10 kS.s⁻¹, 8x analog vstup +/- 10 V, 2x analog výstup 0-5 V, 12x digital IO 0-5 V), který zpracovává signály ze všech snímačů s výjimkou GPS přijímače (připojen k měřicímu počítači přímo sběrnici USB). Naměřená data jsou v reálném čase posílána do počítače (notebook) přes sběrnici USB, kde jsou dále zpracována, zobrazena a uložena na pevný disk pomocí aplikace naprogramované v prostředí National Instruments LabVIEW. Celková sestava měřicí aparatury s měřeným strojem je na Obrázku 20. Reálné a technické provedení měřicího rámu jsou na Obrázku 21 a 22.



Obrázek 20: Měřicí rám připojený do soupravy s traktorem a měřeným strojem.



Obrázek 21: Technický náčrt měřicího rámu.



Obrázek 22: Reálné provedení měřicího rámu.

5.3 Metodika měření fyzikálních vlastností půdy

Metodika testování vycházela z definice fyzikálních vlastností půdy na zkušebních pozemcích a následně na takto definovaných pozemcích proběhla měření fyzikálních vlastností a tahové zkoušky. Fyzikální vlastnosti půdy byly určovány dvěma metodami, měřením penetračního odporu (jak vertikálního tak horizontálního) a metodou Kopeckého válečků.

Za účelem vytvoření mapy fyzikálních vlastností pozemku je třeba odebrat minimálně 100 půdních vzorků.

Samotný odběr vzorků a penetrační měření probíhal před měřicími jízdami traktoru se strojem, takže lze hovořit od srovnatelných podmínek během měření.

Odběrné body fyzikálních vlastností půdy byly zaměřeny souřadnicemi získanými z DGPS systému určování polohy.

Vlhkost půdy byla určována z odebraných vzorků půdy graviometrickou metodou vysušováním při teplotě 105°C na sušinu (hmotnost vzorku se nemění).

5.3.1 Metodika penetračního měření

Pomocí vertikálního ručně ovládaného penetrometru byl zjišťován penetrační odpor půdy do maximální možné hloubky. Popis měření je dle normy ASAE S313.3 (viz Kapitola 2.3.3). Vertikální penetrační odpor půdy byl měřen pomocí penetrometru PN-10 (viz Obrázek 23), vyvinutém na ČZU v Praze. Tento penetrometr používá kužel s úhlem 30° a plochou 100 mm^2 . Během měření tedy vtlačování vertikálního penetrometru do půdy se zaznamenávají hodnoty odporu půdy do paměti penetrometru.



Obrázek 23: Ruční vertikální penetrometr PN – 10.

Dále byl penetrační odpor měřen průběžně během jízdy soupravy a to horizontálním penetrometrem umístěným na měřicím rámu, podrobný popis viz Kapitola. 5.2.

5.3.1.1 Penetrační měření - Písková Lhota dne 9. dubna 2013

V Pískové Lhotě dne 9. dubna 2013 nebyla provedena penetrační měření z důvodu poškození zařízení na měření tahových sil (viz dále v Kapitole 6.1). Ten den byla veškerá měření ukončena.

5.3.1.2 *Penetrační měření - Písková Lhota dne 10. října 2013*

Na vytýčeném pozemku dne 10. října 2013 bylo provedeno 160 měření vertikálního penetračního odporu v osách trajektorií měřicích jízd pro měření tahových sil. Samotné měření penetrometrem proběhlo před měřicími jízdami traktoru se strojem. Měření bylo koncipováno tak, že stroj pracoval ve dvou odlišných půdních typech (písčité, jílovité). 80 penetračních měření bylo uskutečněno v půdě písčité a dalších 80 v půdě jílovité, tak aby výsledky bylo možno mezi sebou porovnat. Penetrační měření byla prováděná po 10 m v osách trajektorií jízd. Hlavním účelem penetračních měření bylo v tomto případě objektivně porovnat rozdíl v penetračním odporu na písčité a jílovité půdě. Měření bylo prováděno do maximální možné hloubky zatlačení hrotu penetrometru. Všechny údaje byly zapsány do hloubky 0,32 m.

5.3.1.3 *Penetrační měření – Sloveč dne 30. října 2014*

Penetrační měření ve Slovči byla provedena jak vertikálním, tak horizontálním způsobem měření.

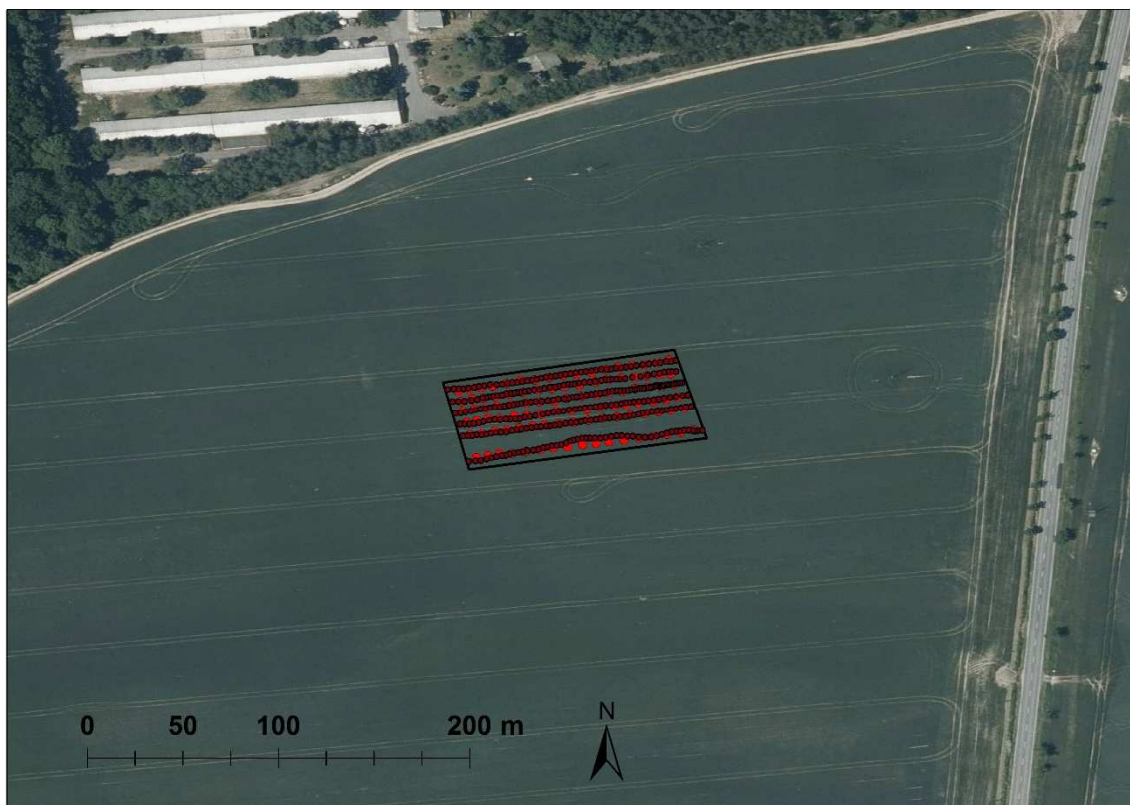
Měření ručním vertikálním penetrometrem byla provedena na 306 místech uvedené oblasti až do hloubky 0,32 m. Každá tři měření penetrometrem byla provedena v okruhu do 0,5 m kolem středu, jenž tvořilo místo kde byl odebrán vzorek pro měření metodou Kopeckého válečků. Měření horizontálním penetrometrem proběhla v trajektoriích jízd (viz Obrázek 25). Na měřicím rámu byl namontován penetrometr (viz Kapitola 5.2) a tímto byl snímán horizontální penetrační odpor v předem nastavené hloubce.

5.3.2 **Metodika měření pomocí metody odběru Kopeckého válečků**

Pro odběr neporušeného půdního vzorku se muselo volit místo kde půda, byla v pokud možno neporušeném stavu. K odběru neporušeného půdního vzorku byly použity Kopeckého válečky o průměru 53 mm a výšce 50 mm. Vzorky byly odebrány v budoucích trajektoriích měřicích jízd.

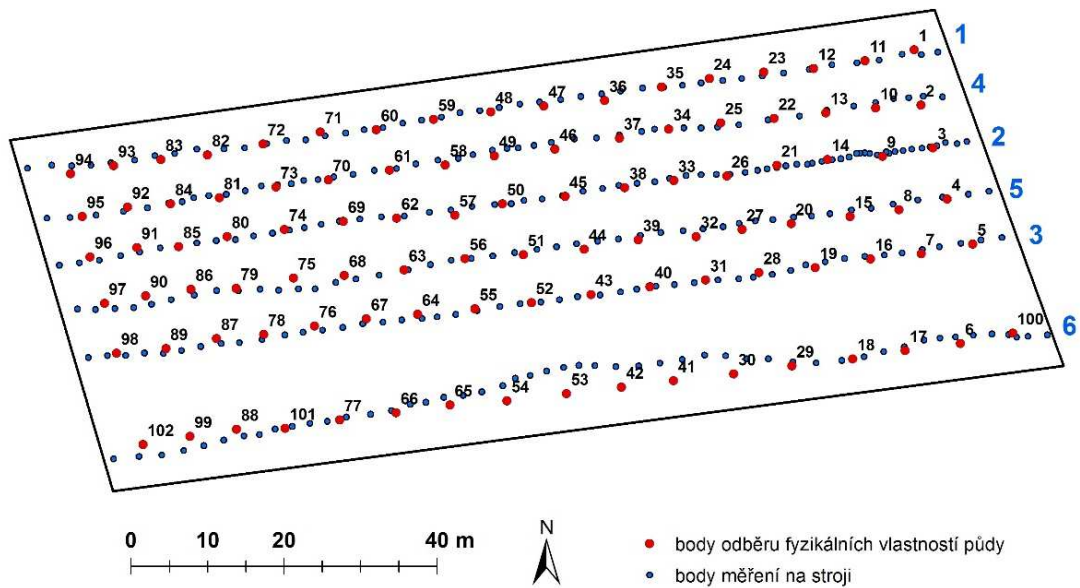
5.3.2.1 *Odběr Kopeckého válečků - Sloveč dne 30. října 2014*

Za účelem charakterizování fyzikálních vlastností půdy metodou Kopeckého válečků byla před experimentálním měřením na poli (viz Obrázek 24) vybrána plocha pokusného pozemku (viz Obrázek 25) o velikosti 48 x 100 m (cca 0,5 ha).



Obrázek 24: Letecký snímek pole s pokusným pozemkem (48 x 100 m) ve Slovči.

Na pokusném pozemku (viz Obrázek 25) bylo odebráno 102 vzorků pomocí Kopeckého válečků z hloubky 0,1 - 0,15 m, aby se co možná nejpřesněji charakterizovala objemová hmotnost půdy, pórovitost a vlhkosti půdy v nejdůležitějším profilu zpracování půdy. I když podzimní období není úplně vhodné pro daný typ měření, tak konkrétní půdní vlastnosti jsou v tomto případě druhořadé.



Obrázek 25: Mapa pokusného pozemku s odběrnými místy pro zjištění objemové hmotnosti půdy (červená kolečka) a trajektorie jednotlivých jízd (modrá kolečka), pořadí jednotlivých měřicích jízd a měřicích úseků – modrá čísla (1 - 6).

Při odběru neporušeného půdního vzorku bylo potřeba dodržet následovný postup. Byla odstraněna první vrstva zeminy přibližně 0,1 m a následně se zatloukla sonda Kopeckého válečku do hloubky 0,15 m. Poté co se sonda vytáhla, bylo nutno oboustranně nožem očistit a zarovnat přesahující zeminu přes okraj sondy a tu následně oboustranně zavíčkovat, aby nedocházelo k vysychání odebraného vzorku. Po popsání a zajištění gumičkou všech vzorků Kopeckého válečků se tyto válečky musely co nejdříve v laboratoři zvážit na hodinovém skle pro určení hmotnosti vzorku s přirozenou vlhkostí. Po odvíčkování a zvážení se Kopeckého válečky na filtračním papíru nasycovaly destilovanou vodou (viz Obrázek 26) a to minimálně 12 hod až do doby kdy povrch horní základny byl provlhčen v celém povrchu horní základny (lesk horní základny). Aby nedocházelo k odparu vody během nasycování, byla horní základna Kopeckého válečku zakryta hodinovým sklem. Po nasycení válečku destilovanou vodou se váleček sejmul a naklonil, tak aby přebytečná voda z uzavírajícího filtračního papíru odkapala, popřípadě se zbytek vody lehce setřel. Poté se vzorek znovu zvážil včetně hodinového skla.

Hmotnost vzorku nám určila vzorek s plně nasycenými kapilárami. Poté bylo nutno vzorek postavit na čtyřnásobně složený filtrační papír a zároveň se horní základna zakryla hodinovým sklem. Tím začalo odsávání vody ze vzorku a zapsal se čas, jako čas nula. Od tohoto času nula se měřila doba odsávání. Po 30 minutách se váleček na hodinovém skle zvážil a hmotnost se určila při třicetiminutové vlhkosti. Potom se váleček opět postavil na čtyřvrstvý filtrační papír horní strany vzorek zakrytý hodinovým sklem a další dvě hodiny od času nula se ze vzorku odsávala voda ze vzorku. Tímto byla zjištěna po následném zvážení hmotnost po 2 hodinách odsávání. Následně se vzorek opět položil s překrytým hodinovým sklem na čtyřvrstvý filtrační papír na dalších 22 hodin, tj. 24 hodin od času nula. Po následném zvážení byla zjištěna hmotnost po 24 hodinách odsávání. Následně se váleček s odebranou zeminou, kulatým filtračním papírem a zváženým hodinovým sklem sušil při teplotě 105°C v sušárně do konstantní hmotnosti, po jeho vychladnutí se opět zvážil. Tímto byla zjištěna hodnota hmotnosti vzorku po vysušení při 105°C (Valla a kol, 2002).



Obrázek 26: Kopeckého válečky na filtračním papíře s překrytou horní základnou hodinovým sklem.

5.4 Metodika měření tahových odporů

Měření tahových odporů probíhalo dvěma způsoby pro porovnání naměřených hodnot, a to měřením tahovou tyčí a za pomoci měřicího rámu.

Pro měření tahovou tyčí bylo potřeba dvou traktorů. Jeden tažný a druhý tažený, ke kterému byl připojen samotný kypřič. Pro měření s měřicím rámem byl využit pouze jeden traktor. Za účelem porovnání údajů získaných z tahové tyče a měřicího rámu bylo potřeba rovněž dvou traktorů. Tažný traktor byl vybaven měřicím rámem, ke kterému byla připojena tažná tyč a tažený traktor s připojeným kypřičem (viz dále Kapitola 5.4.3 a Obrázek 30). Naměřené výsledky těchto měřicích zařízení pak byly porovnány mezi sebou. Zkušební jízdy tyče s měřicím rámem a samotného rámu byly umístěny vedle sebe tak, aby výsledky byly pokud možno co nejméně ovlivněny případnou změnou fyzikálních vlastností půdy. Trajektorie jízd byly zaměřeny souřadnicemi získanými z DGPS systému určování polohy.

5.4.1 Experimentální měření - Písková Lhota dne 9. dubna 2013

První polní měření proběhlo v Pískové Lhotě ve středních Čechách dne 9. dubna 2013 na písčito-jílovité půdě. Měření probíhala na pozemku souřadnice $50^{\circ}13.80447'$, $15^{\circ}05.25999'$ na kterém byla v předešlém roce pěstována slunečnice o průměrném výnosu $2,45 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rostlinné zbytky byly během sklizně rozdrčeny a rozhozeny na povrch. Po sklizni byl pozemek v září předešlého roku podmítnut talířovými bránami firmy Strom Export (BEDNAR FMT) s.r.o. do hloubky 0,15 m. Dva týdny před měřením byl pozemek ošetřen postřikem totálního herbicidu (glyfosfát) za účelem likvidace plevelu.

K měření tahové síly byl použit traktor John Deere 8220 a radličkový kypřič Strom Export (BEDNAR FMT) s.r.o. Ecoland EO 4000. Pracovní záběr stroje byl 4 m. Pro vlastní měření tahové síly byla použita první verze tahové tyče bez ochranné klece. Jako tažný traktor posloužil traktor John Deere 8345R. Tažený traktor John Deere 8220 měl vyřazenou rychlost a sloužil pouze jako nosič kypřiče. Tahová síla byla zprostředkována pouze traktorem John Deere 8345R.

5.4.2 Experimentální měření - Písková Lhota dne 10. října 2013

V pořadí druhá polní měření se uskutečnila v Pískové Lhotě ve středních Čechách dne 10. října 2013 na písčito-jílovité půdě. Měření proběhla na pozemku o souřadnicích 50°13.38665', 15°07.42936' po sklizni jarního ječmene, který měl průměrný výnos 5.2 t·ha⁻¹. Sláma byla během sklizně rozdrčena a rozhozena na pozemek. Po sklizni byl pozemek v srpnu podmítnut talířovými branami firmy Strom Export (BEDNAR FMT) s.r.o. do hloubky 0,1 m. Tři týdny před měřením byl pozemek ošetřen postřikem totálního herbicidu (glyfosfát) za účelem likvidace výdrolu.

K měření tahové síly byl použit traktor John Deere 8220 a radličkový kypřič Strom Export (BEDNAR FMT) s.r.o. Ecoland EO 4000. Pracovní záběr stroje byl 4 m. Pro vlastní měření tahové síly byla použita tahová měřicí tyč opatřená ochrannou klecí tenzometrického snímače. Jako tažný traktor posloužil traktor John Deere 8345R (viz Obrázek 27). Traktor John Deere 8220 měl vyřazenou rychlost a sloužil pouze jako nosič kypřiče. Tahová síla byla zprostředkována pouze traktorem John Deere 8345R.



Obrázek 27: Měřicí sestava. Z prava: tažný traktor John Deere 8345R, tahová měřicí tyč, tažený traktor John Deere 8220 pro nesení a ovládání kypřiče, kypřič Ecoland EO 4000.

Základní částí měřicí aparatury byl tenzometrický snímač LUKAS S-38 umístěný na tahové měřicí tyči mezi dvěma traktory (viz Obrázek 28). Přesný popis byl uveden v Kapitole 5.1. Tenzometrický snímač musel být vložen do kovové klece, aby bylo zabráněno jeho případnému namáhání v ohybu a působila na něj tak pouze tahová síla. Ohyb snímače by způsobil jeho zničení. Snímač s měřicí aparaturou byl zkalibrován na stacionárním pracovišti pomocí trhacího stroje ZDM 50 t. Data ze snímače byla nahrávána každé 2 s do počítače (notebooku) umístěného v kabině traktoru.



Obrázek 28: Měřicí zařízení (měřicí tahová tyč) mezi oběma traktory.

První série měření se uskutečnila bez zahloubení kypřiče za účelem určení síly nutné na tažení samotného taženého traktoru a kypřiče. Pak byla hloubka zpracování půdy nastavena na 0,1 m. Se zahloubeným kypřičem pak proběhla měření při rychlosti 6, 8 a 10 km·h⁻¹. Měření byla provedena na písčité a následně na jílovité půdě na druhé straně pozemku. Poté byl stroj zahlouben na 0,15 m. Znovu byla zopakována měření pro 6, 8 a 10 km·h⁻¹ rovněž na obou druzích půdy. Dále byl na konci měření odkryt příčný profil půdy pro určení kvalitativních parametrů zpracování půdy (viz Obrázek 29).



Obrázek 29: Příčný profil zpracované půdy - Písková Lhota dne 10. října 2013.

5.4.3 Experimentální měření - Sloveč dne 30. října 2014

Polní měření se uskutečnilo na poli u Městce Králové v oblasti Středních Čech, N 50°10.88725', E 15°17.78900'. Měření proběhlo 30. října 2014. Půdní typ byl klasifikován jako jílovito-písčítá rendzina. Na poli byla před měřením pěstována cukrová řepa s průměrným výnosem 85 t·ha⁻¹ s obsahem cukru 16 %.

K měření tahové síly byl použit traktor New Holland T7050 a kypřič Köckerling Gruber Vario. Pracovní záběr kypřiče byl 5 m. K samotnému měření byla využita dvě měřidla tahové síly (tyč a rám) vyvinutá ve spolupráci s firmou BEDNAR FMT s.r.o. (dříve Strom Export) a Českou zemědělskou univerzitou v Praze. Jako tažný prostředek sloužil pásový traktor John Deere 8320RT (viz Obrázek 30). Traktor New Holland T7050 měl při měření vyřazený převodový stupeň, byl odbrzděný a sloužil pouze pro zvedání a spouštění kypřiče. Tahovou sílu poskytoval pouze traktor John Deere 8320RT.

Při experimentu byly měřeny dvě různé varianty zapojení traktorů a stroje:

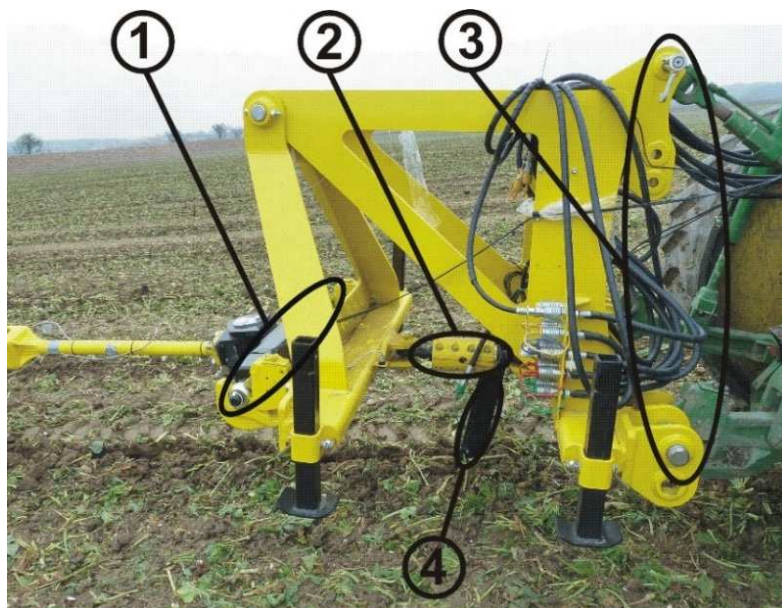
- Varianta dva traktory (JD 8320R, měřicí rám, tahová tyč, NH T7050, Köckerling Vario 5 m), (viz Obrázek 30) – vzdálenost mezi penetrometrem a prvním dlátem 11 m,

- Varianta jeden traktor (JD 8320R, měřicí rám, Köckerling Vario 5 m) – vzdálenost mezi penetrometrem a prvním dlátem 3 m.



Obrázek 30: Měřicí souprava. Zleva: tažný traktor John Deere 8320RT, měřicí rám, měřicí tyč, tažený traktor New Holland T7050 pro zvedání a spouštění kypřiče, kypřič Köckerling Gruber Vario s pracovním záběrem 5 m.

Základní součástí obou měřících přístrojů byl tenzometrický siloměr LUKAS S-38. Podrobný popis tahové tyče byl již uveden v Kapitole 5.1. Rám pro měření tahové síly byl nově vyvinutým přístrojem. Jeho reálnou podobu lze vidět na Obrázku 31. Měřicí rám byl připojen na třibodový závěs (3) tažného traktoru. Do rámu byl také zakomponován tenzometrický siloměr (2) a horizontální penetrometr (4). Dvoubodový závěs (1) sloužil k připojení tahové tyče při prvních třech jízdách a při dalších třech měřících jízdách sloužil dvoubodový závěs pro připojení kypřiče.



Obrázek 31: Rám pro měření tahové síly: (1) Dvoubodový závěs pro připojení tažné tyče nebo stroje na zpracování půdy, (2) Tenzometrický siloměr (200 kN), (3) Připojení na tříbodový závěs tažného traktoru, (4) Horizontální penetrometr.

Data ze siloměru v měřicím rámu byla zaznamenávána A/D převodníkem NI USB-6008 a ukládána do počítače (notebooku), který se nacházel v kabině traktoru. Tyto informace byly doplněny údaji o poloze stroje z DGPS přijímače Quectel L16 a signály z horizontálního penetrometru. Měřicí rám byl také vybaven ultrazvukovým snímačem vzdálenosti UK1D-E1-0A pro vlastní měření pracovní hloubky penetrometru. Signály všech snímačů z měřicího rámu byly vzorkovány a ukládány s frekvencí 6 Hz.

Hodnoty tahové síly ze siloměru v měřicí tyči byly do počítače zaznamenávány pomocí měřicí ústředny National Instruments NI cDAQ 9178 s nainstalovaným tenzometrickým modulem National Instruments NI 9237. Signál z toho snímače byl vzorkován a ukládán s frekvencí 500 Hz.

Na pokusném pozemku bylo vedle sebe vytýčeno šest měřicích úseků (viz Obrázek 25) o délce 100 m. Měřicím úsekem byla ta část celkové měřicí jízdy, která probíhala na vytýčeném pokusném pozemku se zahloubeným kypřičem. Tři vyznačené měřicí úseky (měřicí úseky č. 1, 2 a 3) sloužily k porovnání velikosti tahové síly zjištěné pomocí měřicí tyče a rámu. Na zbývajících třech měřicích úsecích (měřicí úseky č. 4, 5 a 6) probíhalo

měření pouze pomocí měřicího rámu (opět pouze se zahluobený kypřič). Pracovní hloubka stroje během všech měření v měřicích úsecích byla nastavena na 0,15 m.

Porovnání měřicí tyče a rámu probíhalo s následující pracovní soupravou:

- traktor John Deere 8320R (táhne celou soupravu),
- měřicí rám,
- měřicí tyč,
- traktor New Holland T7050 (tažený),
- stroj na zpracování půdy Köckerling Vario 5 m.

Pro určení tahového odporu samostatného stroje na zpracování půdy bylo provedeno také měření se zvednutým pracovním strojem, které umožnilo stanovit tahový odpor taženého traktoru New Holland T7050.

Měření tahového odporu stroje na zpracování půdy pomocí měřicího rámu probíhalo s následující pracovní soupravou:

- traktor John Deere 8320R (táhne celou soupravu),
- měřicí rám,
- stroj na zpracování půdy Köckerling Vario 5 m.

Při prvních třech jízdách měření (porovnávací) probíhaly současně nezávisle záznamy z měřicího rámu i z tahové tyče. Signál z měřicího rámu byl vzorkován frekvencí 6 Hz a záznam z GPS 1 Hz. Signál ze siloměrné tyče byl vzorkován frekvencí 500 Hz. V rámci vyhodnocování dat byly oba záznamy časově synchronizovány a záznam ze siloměrné tyče byl pomocí interpolačních funkcí vyhodnocovacího software Origin převzorkován také na 6 Hz. Při dalších třech měřeních (pouze měřicí rám) byly snímané veličiny vzorkovány s frekvencí 6 Hz spolu se záznamem z GPS (1 Hz).

Během měření tahových sil, byl snímán horizontálním penetračním odpor pro další hodnocení. Dále byl na konci měření odkryt příčný profil půdy pro určení kvalitativních parametrů zpracování půdy (viz Obrázek 32).



Obrázek 32: Příčný profil zpracované půdy - Sloveč dne 30. října 2014.

Popis měření - měřicích jízd

Před vlastním měřením proběhla měření přípravná, při kterých se ověřovala funkčnost měřicího zařízení rámu. Byla provedena tato měření:

- Měření 1 - stroj zvednutý, táhne jeden traktor JD,
- Měření 2 - stroj v zemi, táhne jeden traktor JD - na penetrometru se dvakrát přetrhl jisticí šroub, penetrometr vyřazen z činnosti,
- Měření 3 - stroj v zemi, táhne jeden traktor JD, snaha o rychlost 8 km.h⁻¹, maximální hloubka stroje,
- Měření 4 - stroj v zemi, táhne JD, snaha o rychlosti 4 km.h⁻¹, 6 km.h⁻¹ a 8 km.h⁻¹, maximální hloubka stroje,
- Měření 5 - stejné jako 4. měření, ale střední hloubka stroje, stroj zvednut až po chvíli jízdy dosažena rychlost 4 km.h⁻¹,
- Měření 6 - stejné jako 4. měření, ale nejmenší hloubka stroje, na konci 11 km.h⁻¹,
- Měření 7 - zkušební jízda po opravě penetrometru, max. hloubka stroje, rychlost 8 km.h⁻¹,

- Měření 8 - zkouška penetrometru cca 4 km.h⁻¹, stroj zvednutý,
- Měření 9 - stroj zvednutý, opětovná zkouška penetrometru, na konci opět přetržený jistící šroub,
- Měření 10 - opět zkouška penetrometru, tentokrát i se spuštěným strojem,
- Měření 11 - po ujezděné souvrati, penetrometr nahoře, stroj na max. hloubku,

První měřicí jízda (měření 12) – měřicí jízda byla jízda s vyhloubeným kypřičem k hranici pokusného pozemku (viz Obrázek 25), kde došlo k zahloubení kypřiče do maximální hloubky zpracování 0,15 m a na konci pokusného pozemku došlo opět k vyhloubení kypřiče. Měření probíhalo během celé měřicí jízdy.

- Měření 12 - první měřicí jízda, souprava dva traktory, rychlost 6 km.h⁻¹max. hloubka stroje,
- Měření 13 - druhá měřicí jízda, dva traktory, 6 km.h⁻¹, max. hloubka tažný traktor měl problém utáhnout soupravu,
- Měření 14 - třetí měřicí jízda, dva traktory, 6 km.h⁻¹, max. hloubka stroje,
- Měření 15 - čtvrtá měřicí jízda, jeden traktor JD, max. hloubka stroje, 6 km.h⁻¹, pouze měřicí rám,
- Měření 16 - pátá měřicí jízda, jeden traktor JD, max. hloubka stroje, 6 km.h⁻¹, pouze měřicí rám,
- Měření 17 - šestá měřicí jízda, jeden traktor JD, max. hloubka stroje, 6 km.h⁻¹, pouze měřicí rám.

Výsledky měření na pokusného pozemku (viz Obrázek 25) byly zpracovány do map, které byly vytvořeny v SW Arc GIS, v 10.3. Jako Interpolační metoda byl použit Kriging. Pro statistické vyhodnocení získaných výsledků byly použity počítačové programy Microsoft Excel a Statistica 12.

6 Výsledky měření a diskuse

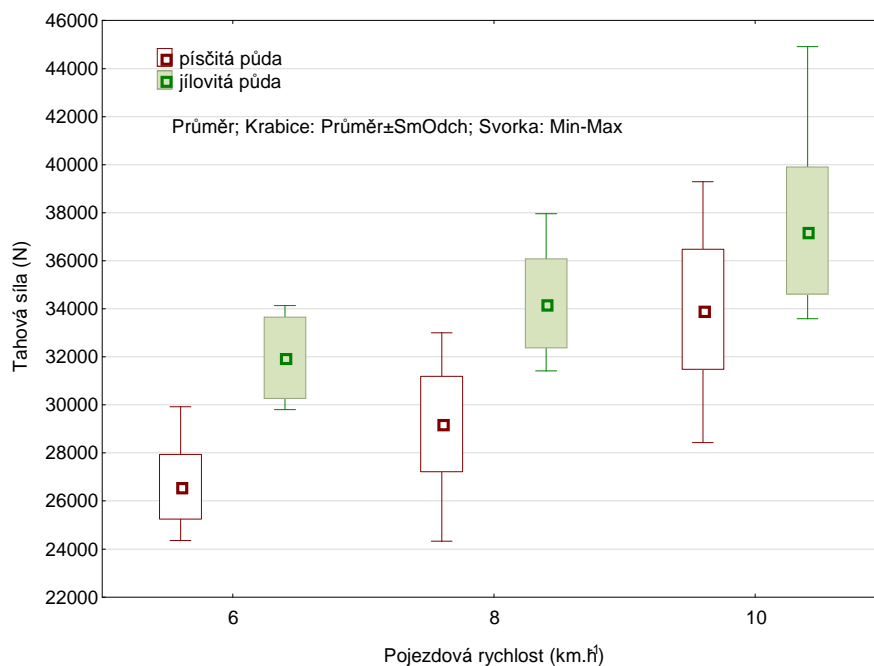
6.1 Výsledky měření - Písková Lhota dne 9. dubna 2013

Během první zkušební jízdy došlo ke zničení měřicího zařízení z důvodu nekoordinovanosti obou obsluh traktorů. Na konci první zkušební jízdy při otáčení na souvrati obsluha prvního traktoru „prudce sešlápla brzdový pedál“ a druhý traktor setrvačností zatlačil na měřicí zařízení právě v momentu otáčení. Tím došlo k poškození měřicího zařízení a tím ukončení možnosti dalšího měření. Bylo nutno opatřit tahovou tyč bezpečnostním zařízením v podobě ochranné klece, která by byla schopna eliminovat podobné nežádoucí případy během měření.

6.2 Výsledky měření - Písková Lhota dne 10. října 2013

Porovnání tahových sil z experimentálního měření v Pískové Lhotě ze dne 10. října 2013. Při měření v Pískové Lhotě 10. října 2013 byla porovnávána tahová síla na dvou typech půdy (písčítá a jílovitá) a pojezdových rychlostech 6, 8 a 10 ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) při zahloubení kypřiče na 0,1 m a 0,15 m (viz Kapitola 5.4.2).

V rámci průzkumové analýzy naměřených dat byly hodnoty jednotlivých souborů graficky zobrazeny pomocí krabicových grafů. Graf na Obrázku 33 ukazuje výsledky měření tahových sil při kypření půdy do hloubky 0,1 m. Půda byla intenzívně zpracovávána radličkami kypřiče. Pouze horní část půdního profilu byla odříznuta a zpracována, což se promítlo do naměřených hodnot tahových sil. Tento fakt dobře korespondoval s naměřenými výsledky. Výsledky měření ukázaly zvyšování tahové síly s pojezdovou rychlostí, což platilo jak pro písčitou, tak pro jílovitou půdu. Navíc výsledky jasně ukázaly vliv půdního druhu na tahovou sílu. Větší tahová síla byla naměřena na půdě jílovité (viz Obrázek 33).



Obrázek 33: Krabicové grafy výsledků měření tahové síly v (N) při jezdové rychlosti 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) pro písčitou a jílovitou půdu při pracovní hloubce 0,1 m.

Pro otestování středních hodnot souborů naměřených dat, bylo nejdříve nutno ověřit shodu ve variabilitě a normalitě rozdělení (podmínky pro aplikaci parametrického testu ANOVA).

Leveneovým testem byla prokázána homogenita rozptylů naměřených hodnot souborů tahové síly (N), (měřeno při různých jezdových rychlostech a to 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) při hloubce zpracování 0,1 m, viz Tabulka 2). Tímto testem byla také prokázána homogenita rozptylů testovaných souborů tahové síly (N) při práci kypřiče v půdě písčité a půdě jílovité při stejné hloubce zpracování 0,1 m (viz Tabulka 3).

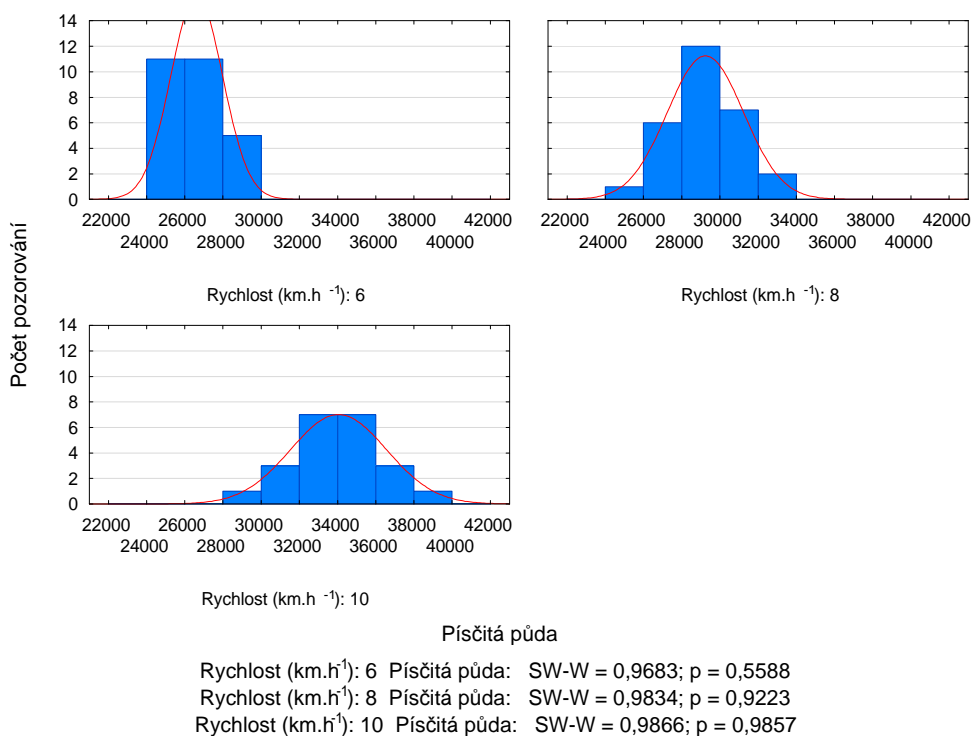
Tabulka 2: Leveneův test homogenity rozptylů souborů hodnot tahových sil (N) při rychlosti 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) a hloubce zpracování 0,1 m.

Leveneův test homogenity rozptylů (Tabulka - srovnání tahových sil Písková Lhota)				
Efekt: rychlost (km.hod-1)				
Stupně volnosti pro všechna F: 2, 124				
	PČ Efekt	PČ Chyba	F	p
tahová síla (N)	2201263	2989871	0,736240	0,480993

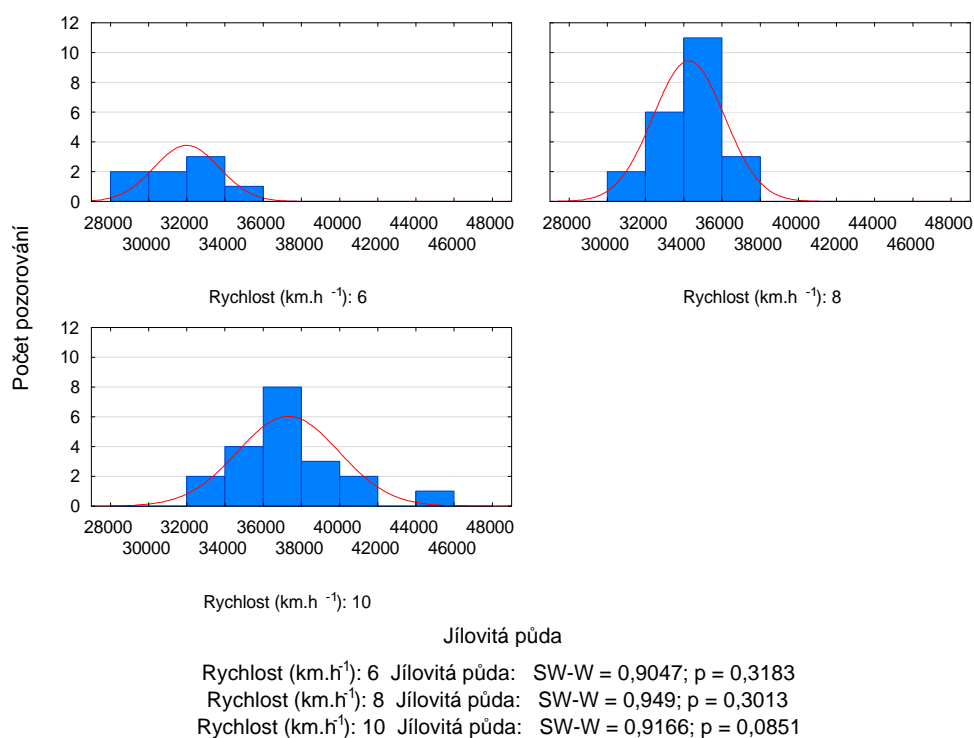
Tabulka 3: Leveneův test homogenity rozptylů naměřených hodnot tahových sil (N) v různých půdách (písčítá, jílovitá) a hloubce zpracování 0,1 m.

Leveneův test homogenity rozptylů (Tabulka - srovnání tahových sil Písková Lhota)				
Efekt: půda (písčítá, jílovitá)				
Stupně volnosti pro všechna F: 1, 125				
	PČ Efekt	PČ Chyba	F	p
tahová síla (N)	11629440	3646925	3,188834	0,076568

Pro ověření normality byly naměřené hodnoty souborů testovány Shapiro-Wilksovým testem (viz Obrázek 34 a Obrázek 35).



Obrázek 34: Shapiro-Wilkův test normality tahových sil při pracovní rychlost 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) v písčité půdě a hloubce zpracování 0,1 m.



Obrázek 35: Shapiro-Wilksův test normality tahových sil při pracovní rychlosti 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) v jílovité půdě a hloubce zpracování 0,1 m.

Tímto testem byla prokázána normalita rozdělení testovaných souborů a společně s prokázáním homogenity rozptylů byly splněny podmínky pro aplikaci analýzy rozptylu dvojnásobného třídění. Tento test (viz Tabulka 4) prokázal rozdíl ve středních hodnotách tahových sil (N) při jednotlivých jezdových rychlostech 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) a zároveň tímto testem byl prokázán rozdíl ve středních hodnotách testovaných souborů naměřených tahových sil (N) na obou typech půdy (písečná, jílovitá).

Tabulka 4: Výsledky analýzy rozptylu dvojnásobného třídění naměřených souborů tahové síly (N) při jezdové rychlosti 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) a typu půdy (písečná, jílovitá) při hloubce zpracování 0,1 m.

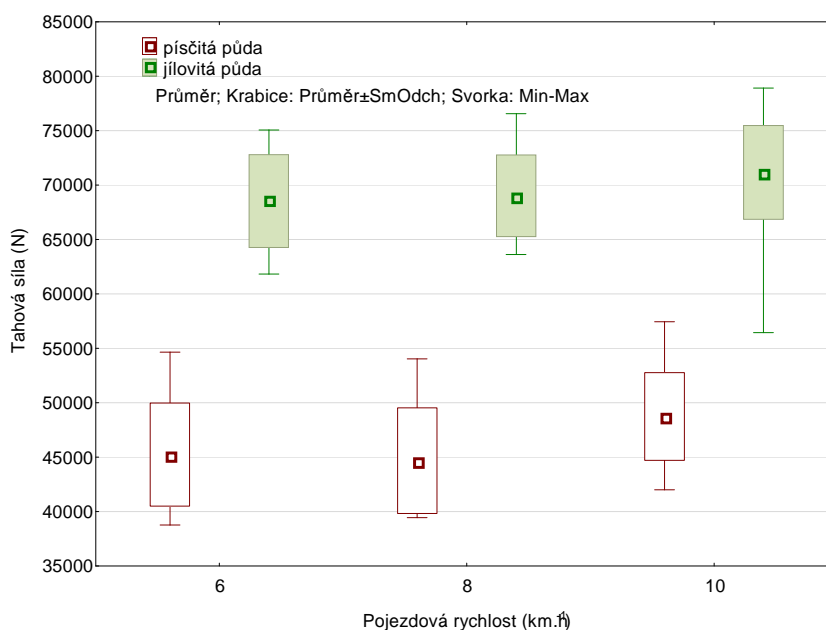
Efekt	Jednorozměrné testy významnosti pro tahová síla (Tabulka - srovnání tahových sil Písková Lhota, Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	1,210347E+11	1	1,210347E+11	27837,47	0,00
rychlost	8,352258E+08	2	4,176129E+08	96,05	0,00
půda	5,783563E+08	1	5,783563E+08	133,02	0,00
Chyba	5,347925E+08	123	4,347906E+06		

Podrobnějším vyhodnocením pomocí Scheffeho metody (viz Tabulka 5) bylo prokázáno, že je statisticky průkazný rozdíl ve středních hodnotách u všech testovaných souborů naměřených tahových sil (N) při jezdových rychlostech 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) při práci stroje do hloubky zpracování 0,1 m.

Tabulka 5: Scheffeho test rozdílu středních hodnot tahové síly (N) při rychlosti 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) a hloubce zpracování 0,1 m.

Scheffeho test; proměnná tahová síla (Tabulka - srovnání tahových sil Písková Lhota) Pravděpodobnosti pro post-hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 4348E3, sv = 123,00				
Č. buňky	rychlost	{1} 27825,	{2} 31416,	{3} 35545,
1	6		0,000000	0,000000
2	8	0,000000		0,000000
3	10	0,000000	0,000000	

Na Obrázku 36 jsou výsledky měření tahové síly při zahloubení kypřiče 0,15 m. Kypřič pracoval na horní hranici své výkonnosti. Se změnou pracovní hloubky začal stroj půdu zpracovávat ještě o mnoho intenzivněji. Půda byla vynášena a intenzivně promíchávána s rostlinnými zbytky. Kvalita zpracování půdy byla vyšší (lepší prokypření půdy, příznivější rozměry hrud, lepší profil zpracování).



Obrázek 36: Krabicové grafy výsledků měření tahové síly v (N) při jezdové rychlosti 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) pro písčitou a jílovitou půdu při pracovní hloubce stroje 0,15 m.

Průběh tahové síly byl v tomto případě dost odlišný od měření do hloubky 0,1 m. Korelace mezi tahovou silou a pojezdovou rychlostí stroje v tomto případě nebyla potvrzena. Naproti tomu byl zjištěn větší vliv druhu půdy. Pravděpodobně to bylo způsobeno průchodem zpracovávané půdy strojem a jeho okolím. Během práce se začala objevovat vrstva půdy, která se pohybovala s radličkami vpřed. Hmotnost tohoto materiálu pravděpodobně zvyšovala tahovou sílu. Z tohoto důvodu se patrně tahová síla tolik nesnižovala při nižší pracovní rychlosti stroje.

Pro porovnání středních hodnot naměřených souborů bylo nutno ověřit předpoklady pro použití parametrického testu (ANOVA), tedy homoskedasticitu a normalitu rozdělení. Levenelovým testem (viz Tabulka 6) a (viz Tabulka 7) bylo prokázáno, že se porovnávané soubory průkazně statisticky neliší svou variabilitou. Normalita rozdělení testovaných souborů tahových sil (N) při pracovní rychlosti 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) v půdě písčité i půdě jílovité při zachování stejné pracovní hloubky 0,15 m byla rovněž prokázána. Tímto byly splněny podmínky pro aplikaci analýzy rozptylu dvojného třídění.

Tabulka 6: Leveneův test homogenity rozptylů souborů hodnot tahových sil (N) při pojezdové rychlosti 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) a při hloubce zpracování 0,15 m.

Leveneův test homogenity rozptylů (Tabulka - srovnání tahových sil Písková Lhota)				
Efekt: rychlost				
Stupně volnosti pro všechna F: 2, 127				
	PČ Efekt	PČ Chyba	F	p
tahová síla (N)	7974828	17649705	0,451839	0,637476

Tabulka 7: Leveneův test homogenity rozptylů naměřených hodnot tahových sil (N) v různých půdách (písčítá, jílovitá) při hloubce zpracování 0,15 m.

Leveneův test homogenity rozptylů (Tabulka - srovnání tahových sil Písková Lhota)				
Efekt: půda				
Stupně volnosti pro všechna F: 1, 128				
	PČ Efekt	PČ Chyba	F	p
tahová síla (N)	13010925	6762551	1,923967	0,167831

Test (viz Tabulka 8), prokázal, že střední hodnoty testovaných souborů tahové síly v obou typech půdy se průkazně statisticky liší a dále rovněž prokázal, že se od sebe významně statisticky liší minimálně jedna dvojice testovaných pojezdových rychlostí.

Tabulka 8: Výsledky analýzy rozptylu dvojnásobného třídění naměřených souborů tahové síly (N) při jezdové rychlosti 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) a na rozdílném typu půdy (písečná, jílovitá) při hloubce zpracování 0,15 m.

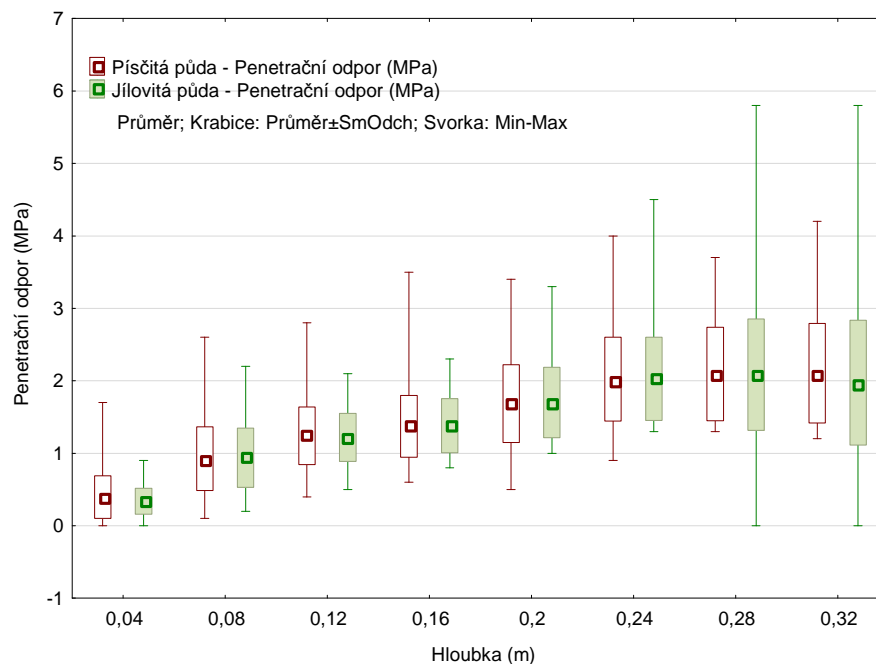
Efekt	Jednorozměrné testy významnosti pro tahová síla (Tabulka - srovnání tahových sil Písková Lhota) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy				
	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
Abs. člen	3,897519E+11	1	3,897519E+11	21085,22	0,000000
rychlost	3,058765E+08	2	1,529383E+08	8,27	0,000421
půda	1,720766E+10	1	1,720766E+10	930,92	0,000000
Chyba	2,329061E+09	126	1,848461E+07		

Aplikací metody mnohonásobného porovnání, konkrétně Scheffeho metody byl prokázán statisticky významný rozdíl středních hodnot mezi jezdovými rychlostmi 10 a 6; 10 a 8 (km.h⁻¹), (viz Tabulka 9).

Tabulka 9: Výsledky Scheffeho test rozdílu středních hodnot tahové síly (N) při jezdové rychlosti 6, 8 a 10 (km.h⁻¹) a hloubce zpracování 0,15 m.

Č. buňky	rychlost	Scheffeho test; proměnná tahová síla (Tabulka - srovnání tahových sil Písková Lhota) Pravděpodobnosti pro post-hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 1848E4, sv = 126,00		
		{1}	{2}	{3}
		55217,	56846,	60463,
1	6		0,316804	0,000000
2	8	0,316804		0,001034
3	10	0,000000	0,001034	

Výsledky měření penetračního odporu půdy, měřeno ručním penetrem PN – 10, jsou zobrazeny na Obrázku 37. Penetrační odpor půdy je vyjádřen pro 8 hloubek (0,04 m; 0,08 m; 0,12 m; 0,2 m; 0,24 m; 0,28 m a 0,32 m). Z Obrázku 37 je zřejmé, že vyšší obsah jílovitých částic v půdě ovlivňoval její penetrační odpor. To je patrně možné vysvětlit rozdíly ve vlhkosti půdy. Například povrchová vrstva písčité půdy měla vlhkost pod 8,7 %. Penetrační odpor se významně zvyšoval s narůstající hloubkou, což bylo u tohoto druhu půdy možné očekávat. Také byl jasný dopad technologie zpracování půdy. V tomto případě byl pozemek několik předchozích let obděláván v systému redukováného zpracování půdy. Nebyla zde nalezena vrstva půdy, která by byla významně utužena např. technogenním utužením (v případě orebných technologií se zpravidla jedná o podorničí). Penetrační měření ukázala, že půda byla z hlediska jejích fyzikálních vlastností v dobrém stavu. Jak je patrné z grafu na Obrázku 37, průměrné hodnoty penetračního odporu se s narůstající hloubkou zvyšují a zvyšuje se jejich variabilita.



Obrázek 37: Krabicové grafy výsledků penetračního měření penetrometrem PN-10 v (MPa) pro různé sledované hloubky v (m) pro písčitou a jílovitou půdu.

Výsledky potvrdily závěry z měření tahových sil získané při zpracování půdy ostatními autory (Chen, 2013; Glancey, 1996; Paul, 1992; Arvidsson a kol., 2004; Schutte & Kutzbach, 2003).

6.2.1 Dílčí závěr z měření v Pískové Lhotě 10. října 2013

Měření potvrdilo vliv druhu půdy na výslednou tahovou sílu při zpracování radličkovým kypřičem. Naproti tomu závislost tahové síly na pracovní rychlosti jednoznačně nebyla potvrzena. Nicméně lze předpokládat, že v těchto půdních podmínkách by se jiný typ kypřiče s odlišnou geometrií radliček mohl chovat rozdílně v závislosti na hloubce zpracování půdy a pracovní rychlosti. Při výběru kypřiče lze doporučit jeho praktické vyzkoušení v podmínkách, ve kterých bude následně pracovat. Tak lze následně uspořít náklady na pohonné hmoty, optimalizovat opotřebení radliček a lépe sladit dobu zpracování půdy s agrotechnickými termíny.

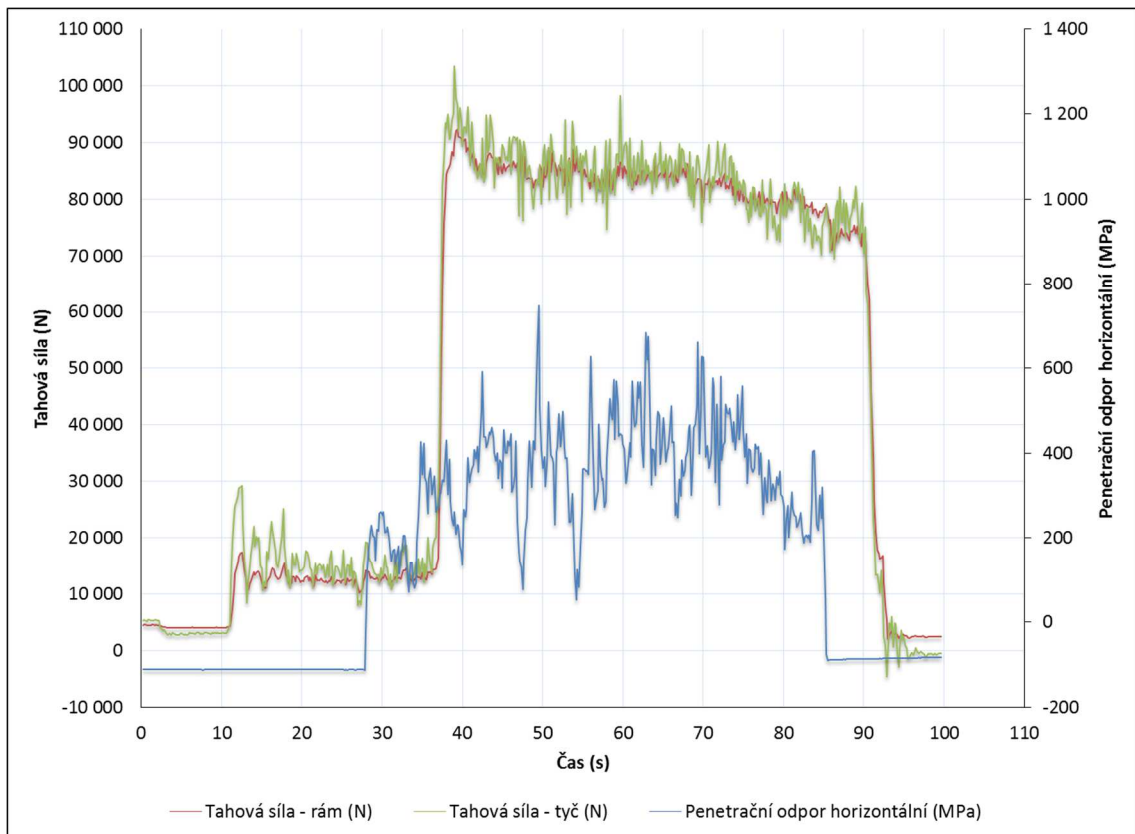
6.3 Výsledky měření – Sloveč 30. října 2014

Porovnání tahových sil naměřených z prvních třech měřicích jízd (měření 12, 13 a 14, viz Kapitola 5.4.3), hodnoty byly zaznamenávány z průběhu celé jízdy traktoru tedy i před zahloubením kypřiče a následném zahloubení na hranici pokusného pozemku (viz Obrázek 25) a vyhloubení kypřiče na konci pokusného pozemku. Během těchto měřicích jízd byly zaznamenávány hodnoty tahových sil naměřených tahovou tyčí a současně měřicím rámem a taktéž hodnoty horizontálního odporu měřeného penetrometrem namontovaném na měřicím rámu.

6.3.1 Statistická analýza dat z 1. měřicí jízdy (měření 12)

Průběh hodnot tahových sil a horizontálního odporu půdy 1. měřicí jízdy (měření 12) byl zaznamenán v celém průběhu měřicí jízdy (viz Obrázek 38). V první části jízdy je vidět průběh tahového odporu samotného taženého traktoru a nezahloubeného kypřiče. Po necelých 40 sekundách byl kyprič zahlouben což bylo na hranici 1. měřicího úseku pokusného pozemku (viz Obrázek 25) a došlo k okamžitému nárůstu tahových sil. Před koncem měření došlo k opětovnému vyhloubení kypřiče na konci pokusného pozemku.

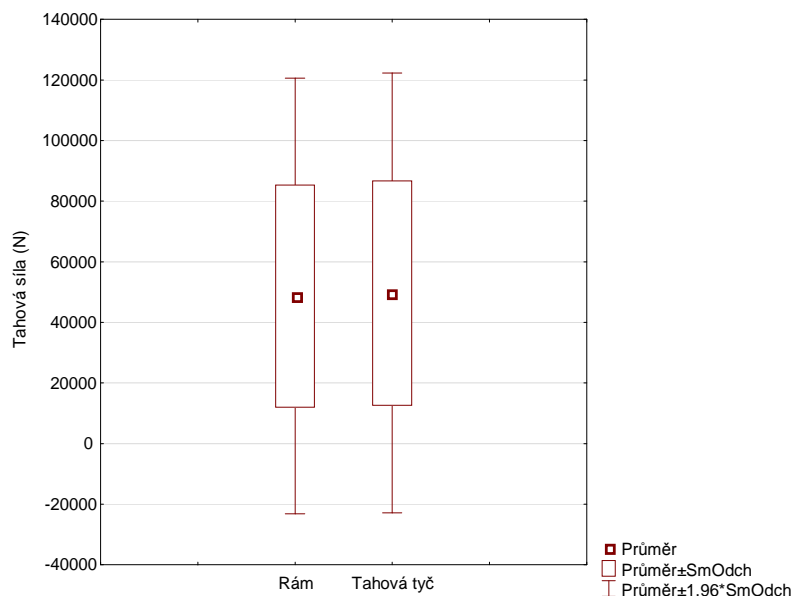
Obrázek 38 ukazuje podobný průběh naměřených hodnot jak pro měřicí rám, tak pro tahovou tyč. Obě křivky mohou být považovány za skutečný průběh tahové síly způsobené odporem kypřiče. Malý rozdíl v průběžích hodnot může být vysvětlen citlivostí snímače a jeho kalibrací. Kromě toho je měřicí rám vybaven připojovacím mechanismem, v protikladu k ryze dynamometrickému tahovému systému (tahová tyč). Další rozbor korelace hodnot zjištěných oběma způsoby měření tahových sil rovněž variabilita naměřených hodnot budou dále vyhodnocovány.



Obrázek 38: Graf průběhů tahových sil (N) měřených na tahové tyči a měřicím rámem a horizontálního penetračního odporu (MPa) 1. měřicí jízdy.

Z grafu na Obrázku 38 je zřejmý průběh měření pomocí horizontálního penetrometru, jako doplňkového měření k měření tahové síly. Je také nutné zmínit skutečnost, že křivka horizontálního penetračního odporu má časový posun vůči křivkám tahových sil. To bylo způsobeno posunutím horizontálního penetračního odporu vůči kypřiči, jak bylo uvedeno v kapitole 5.4.3. Průběh hodnot v počátečních fázích je také ovlivněn nastavením měřicího rámu na pracovní hloubku ve vztahu k zahloubení kypřiče. Z průběhu hodnot penetračního odporu lze předpokládat soulad (korelaci) s tahovými silami během měření. S růstem penetračního odporu rostou i hodnoty tahových sil. Ačkoliv hodnoty penetračního odporu a tahové síly nelze jednoduše srovnávat, penetrační odpor je nepochybně jedním z parametrů, které tahovou sílu do jisté míry predikují.

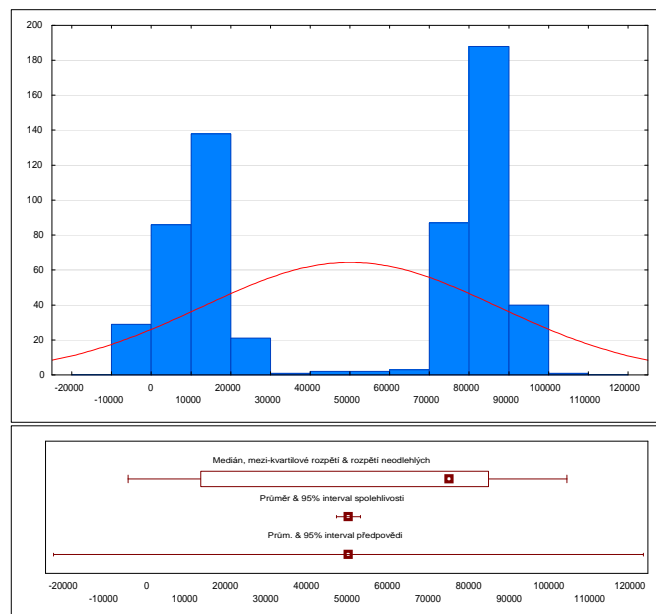
Z krabicového grafu na Obrázku 39, kde jsou porovnány naměřené hodnoty tahových sil 1. měřicí jízdy není patrný rozdíl ve středních hodnotách (střední hodnota měřena průměrem) díky velkému rozptylu hodnot, který je způsoben měřením tahových sil před a po zahloubení kypřiče (viz Tabulka 11 - konkrétně hodnoty variačních koeficientů).



Obrázek 39: Krabicový graf výsledků měření tahové síly (N) - měřeno tahovou tyčí a měřícím rámem 1. měřicí jízdy.

Pro použití párového t-testu k otestování průkazného statistického rozdílu mezi průměrnými hodnotami tahových sil bylo potřeba ověřit normální rozdělení obou testovaných souborů (rám, tyč).

Shapiro-Wilksovým testem nebyla prokázána normalita rozdělení u naměřených hodnot tahové síly tahovou tyčí (viz Obrázek 40) a taktéž nebyla prokázána normalita rozdělení hodnot naměřená měřícím rámem (viz Obrázek 41).



Shapiro-Wilk p: < 0,00001

Průměr: 49690
 Sm.odch.: 37014
 Rozptyl: 1,37e+009
 Sm.Ch.průměru 1514
 Šikmost: -0,165

N platných: 598

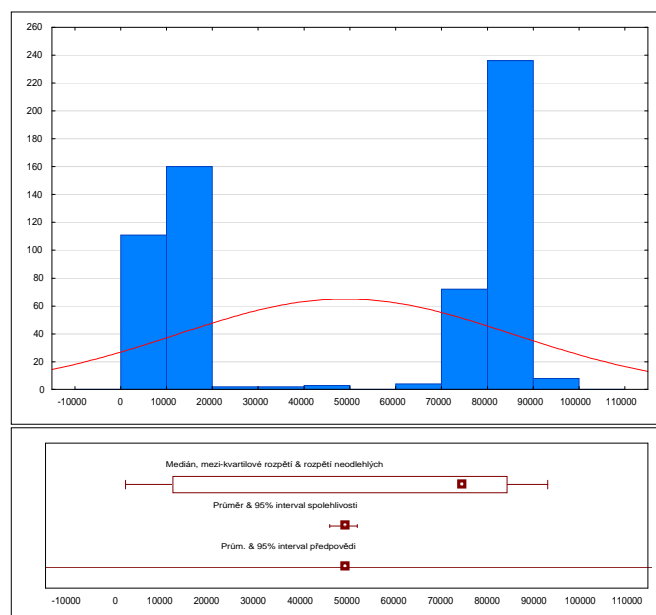
Minimum: -4666
 Dolní kvartil 13221
 Medián: 74267
 Horní kvartil 84258
 Maximum: 103528

95% spolehl. pro Sm.Odch.
 Dolní 35028
 Horní 39240

95% spolehl. pro průměr
 Dolní 46718
 Horní 52663

95% int. předpovědi pozorování
 Dolní -23063
 Horní 122444

Obrázek 40: Shapiro-Wilksův test a elementární statistické charakteristiky o rozdělení a vlastnostech naměřených dat tahových sil v souboru měřených tahovou tyčí 1. měřicí jízdy.



Shapiro-Wilk p: < 0,00001

Průměr: 48678
 Sm.odch.: 36659
 Rozptyl: 1,34e+009
 Sm.Ch.průměru 1499
 Šikmost: -0,157

N platných: 598

Minimum: 2051
 Dolní kvartil 12227
 Medián: 74073
 Horní kvartil 83598
 Maximum: 92275

95% spolehl. pro Sm.Odch.
 Dolní 34692
 Horní 38864

95% spolehl. pro průměr
 Dolní 45734
 Horní 51622

95% int. předpovědi pozorování
 Dolní -23378
 Horní 120734

Obrázek 41: Shapiro-Wilksův test a elementární statistické charakteristiky o rozdělení a vlastnostech naměřených dat tahových sil v souboru měřených měřicím rámem 1. měřicí jízdy.

Zároveň je potřeba si při aplikaci t-testu uvědomit, že při dostatečně velkých rozsazích náhodných výběrů i malý rozdíl ve výběrových průměrech způsobí zamítnutí nulové

hypotézy na hladině významnosti α , i když z věcného hlediska tak malý rozdíl nemá význam.

Protože nebyly splněny předpoklady pro aplikaci parametrického testu, byl použit test neparametrický, konkrétně Wilcoxonův párový test (viz Tabulka 10). Tento test s 95% pravděpodobností prokázal statisticky významný rozdíl středních hodnot (mediánu) tahových sil měřených tahovou tyčí a měřicím rámem.

Tabulka 10: Wilcoxonův párový test rozdílnosti středních hodnot tahové síly (N) měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem 1. měřicí jízdy.

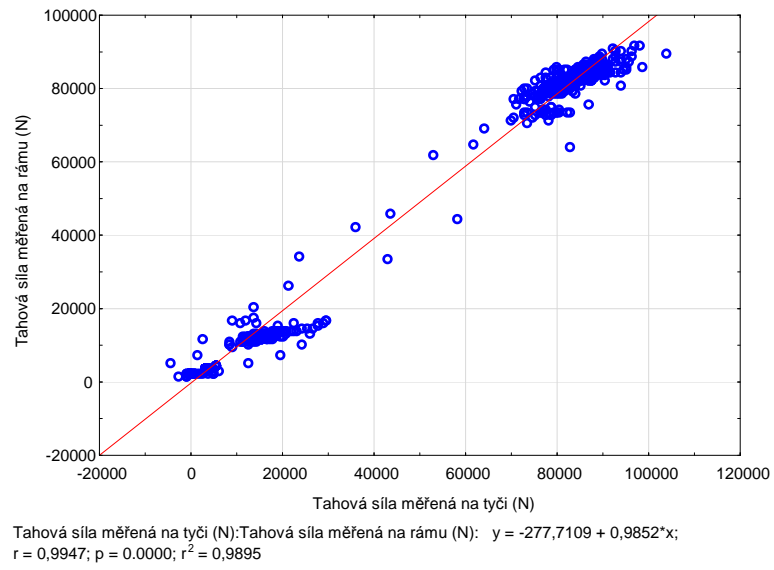
Dvojice proměnných	Wilcoxonův párový test (1 měřicí jízda) Označené testy jsou významné na hladině $p < ,05000$			
	Počet platných	T	Z	p-hodn.
Tahová síla - rám (N) & Tahová síla - tyč (N)	598	62897,00	6,305925	0,000000

Z Tabulky 11 popisné statistiky 1. měřicí jízdy je patrné, že střední hodnoty tahových sil měřených tahovou tyčí jsou vyšší než střední hodnoty zaznamenané měřicím rámem (rozdíl byl potvrzen i Wilcoxonovým párovým testem) a variabilita hodnot v obou souborech je téměř shodná.

Tabulka 11: Hodnoty popisné statistiky 1. měřicí jízdy.

Proměnná	Popisné statistiky (1 měřicí jízda)						
	N platných	Průměr	Medián	Sm.odch.	Spolehlivost Sm.Odch. -95,000%	Spolehlivost Sm.Odch. +95,000%	Var.koef.
Tahová síla - rám (N)	598	48677,92	74073,30	36658,98	34692,46	38863,61	75,30924
Tahová síla - tyč (N)	598	49690,36	74267,11	37013,56	35028,02	39239,52	74,48842

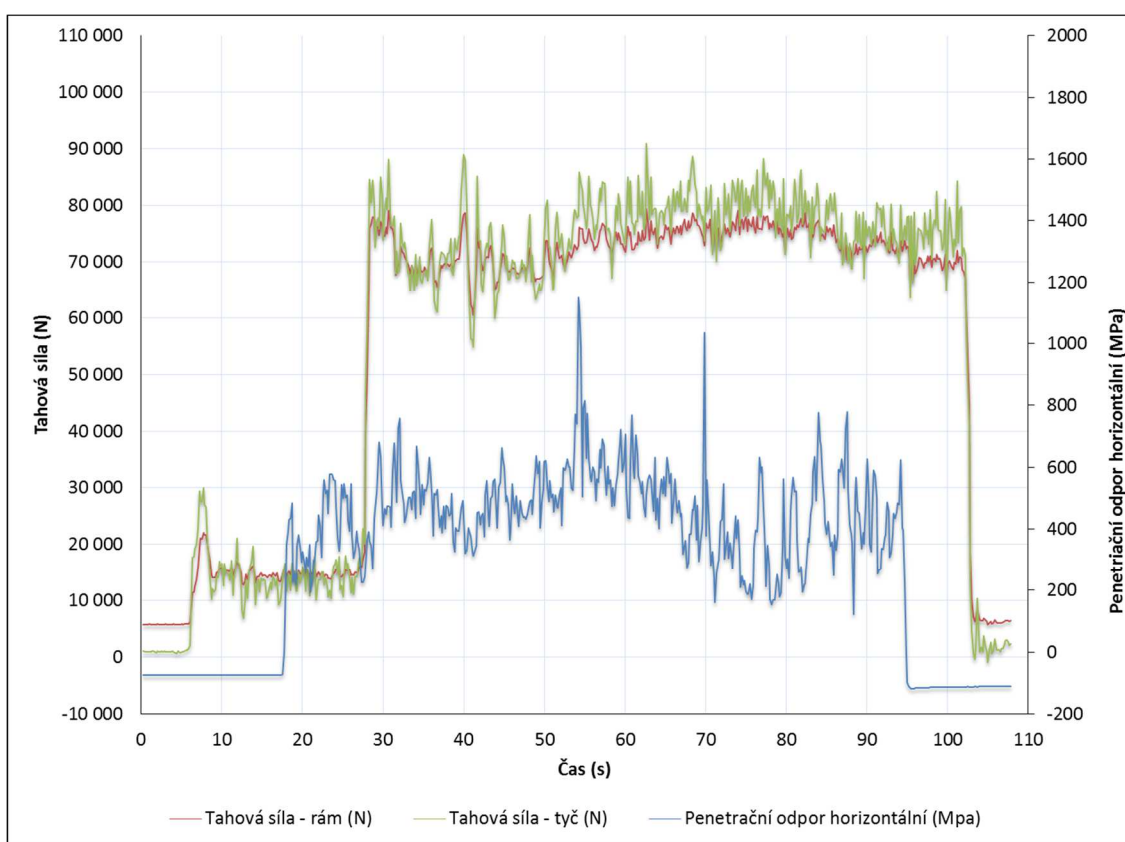
Dále byla testovaná korelace souborů naměřených dat tahových sil měřených na rámu a tahovou tyčí. Jak je patrné z Obrázku 42 závislost je statisticky významná a velmi těsná ($r = 0,9947$). Závislost lze popsat lineární regresní funkcí ve tvaru $y = -277,7109 + 0,9852x$. Z hodnot regresního koeficientu 0,9852 vyplývá, že pokud se změní tahová síla naměřená tahovou tyčí o jednotku - 1 N, hodnota tahové síly měřená na rámu se změní o 0,9852 N.



Obrázek 42: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) a tahové síly měřené na tyči (N) 1. měřicí jízdy.

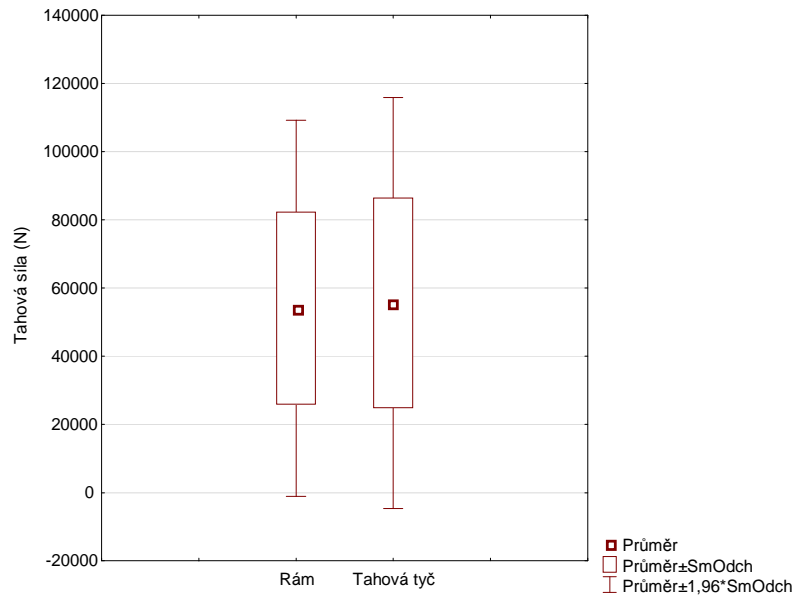
6.3.2 Statistická analýza dat ze 2. měřicí jízdy (měření 13)

Na Obrázku 43 je zaznamenán průběh hodnot tahových sil a horizontálního penetračního odporu 2. měřicí jízdy (měření 13). Hodnoty byly zaznamenávány v celém průběhu měřicí jízdy. Průběh tahového odporu 2. měřicí jízdy je obdobný jako u měření prvního, tedy průběh tahového odporu samotného taženého traktoru a nezahluobeného kypříče a po najetí s kypříčem na hranici vytyčeného pozemku došlo k zahluobení a tím nárůstu tahové síly.



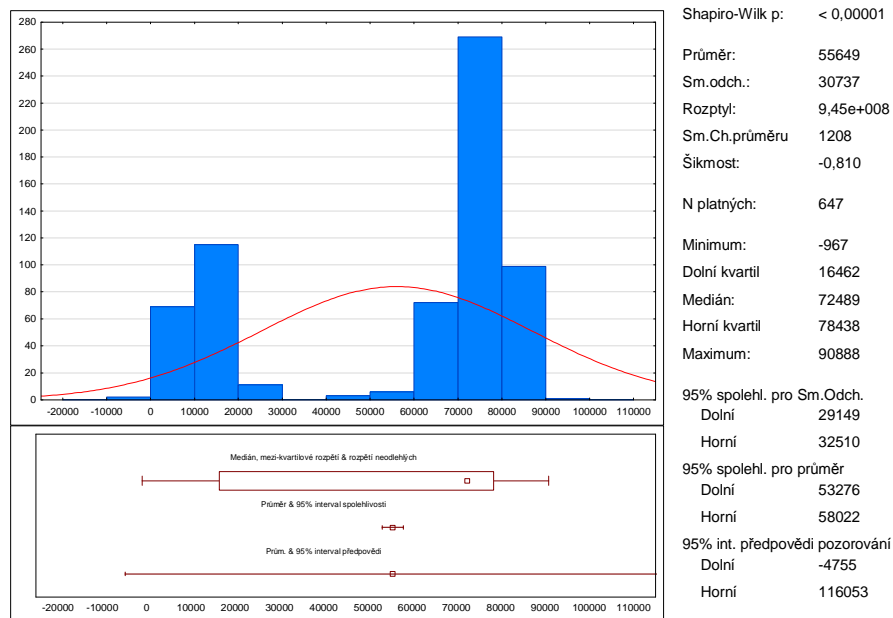
Obrázek 43: Graf průběhů tahových sil (N) měřených na tahové tyči a měřicím rámem a horizontálního penetračního odporu (MPa) 2. měřicí jízdy.

Pro analýzu tahových sil byly využity vybrané metody statistické indukce. Z krabicových grafů na Obrázku 44 není patrný významný rozdíl ve středních hodnotách, nicméně variabilita hodnot naměřená na tyči je vyšší.

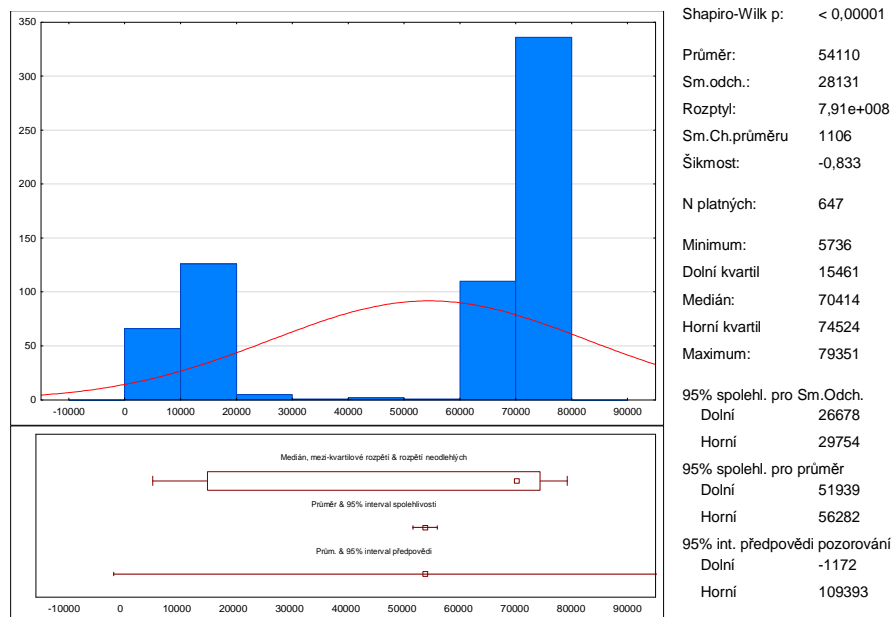


Obrázek 44: Krabicový graf průměrných hodnot tahové síly měřena tahovou tyčí a měřícím rámem 2. měřicí jízdy.

Jelikož byly do analýzy zprvu zahrnuty výsledky měření před a po zahloubení, Shapiro-Wilksův test opět neprokázal normalitu rozdělení porovnávaných souborů (viz Obrázek 45) a proto nemohl být pro otestování průměrných diferencí použit test parametrický.



Obrázek 45: Shapiro-Wilksův test a elementární statistické charakteristiky o rozdělení a vlastnostech naměřených dat tahových sil v souboru měřených tahovou tyčí 2. měřicí jízdy.



Obrázek 46: Shapiro-Wilksův test a elementární statistické charakteristiky o rozdělení a vlastnostech naměřených dat tahových sil v souboru měřených měřicím rámem 2. měřicí jízdy.

Rozdíly ve středních hodnotách (mediánech) byly testovány Wilcoxonovým párovým testem (viz. Tabulka 12), který zamítl nulovou hypotézu o shodě mediánů. Rozdíl ve středních hodnotách tahových sil naměřených tahovou tyčí a měřicím rámem jsou proto s 95% spolehlivostí průkazné.

Tabulka 12: Wilcoxonův párový test rozdílnosti středních hodnot tahové síly (N) měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem 2. měřicí jízdy.

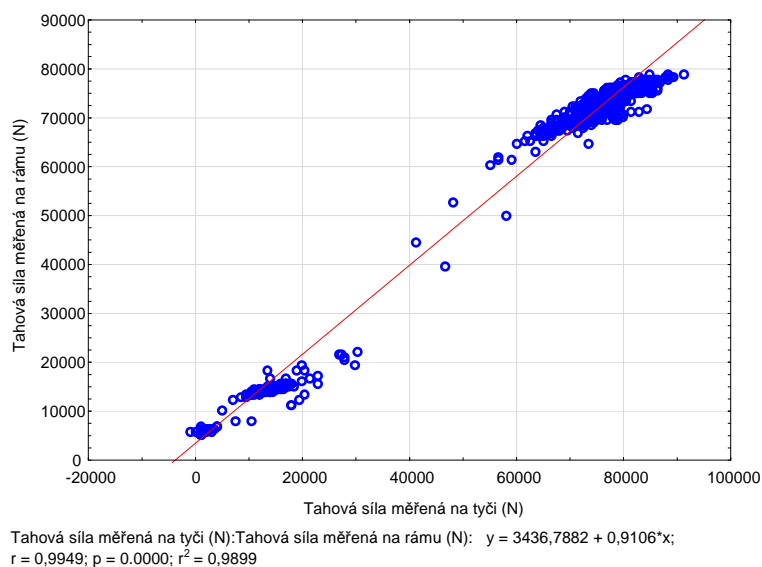
Dvojice proměnných	Wilcoxonův párový test (2 měřicí jízda)			
	Počet platných	T	Z	p-hodn.
Tahová síla - rám (N) & Tahová síla - tyč (N)	647	62795,00	8,834395	0,000000

Z Tabulky 13 popisné statistiky 2. měřicí jízdy je patrné, že střední hodnoty tahových sil měřených tahovou tyčí jsou vyšší než střední hodnoty zaznamenané měřicím rámem, podobně i variabilita naměřených hodnot.

Tabulka 13: Hodnoty popisné statistiky 2. měřicí jízdy.

Proměnná	Popisné statistiky (2 měřicí jízda)						
	N platných	Průměr	Medián	Sm.odch.	Spolehlivost Sm.Odch. -95,000%	Spolehlivost Sm.Odch. +95,000%	Var.koef.
Tahová síla - rám (N)	647	54110,37	70413,77	28131,42	26677,65	29754,03	51,98897
Tahová síla - tyč (N)	647	55649,09	72489,38	30737,38	29148,94	32510,29	55,23429

Závislost obou výsledků měření (viz Obrázek 47) se ukázala jako statisticky významná a velmi těsná, hodnota korelačního koeficientu $r = 0,9949$.

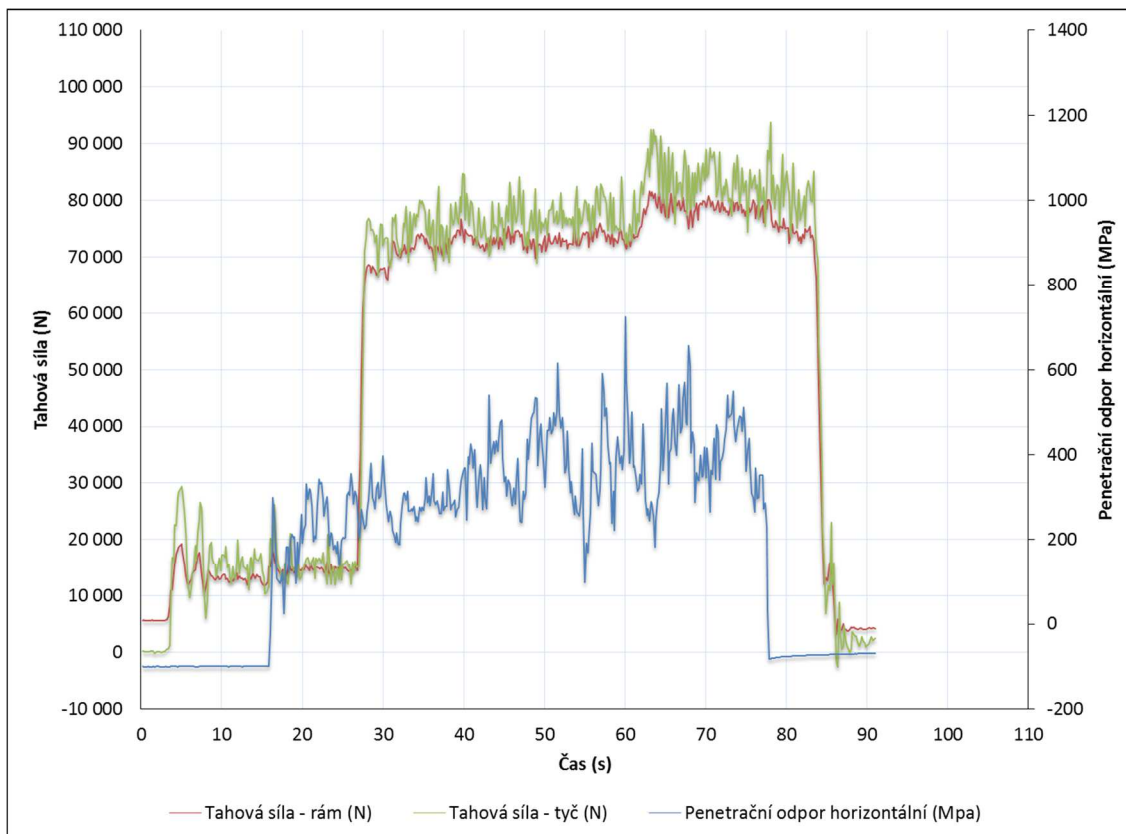


Obrázek 47: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) a tahové síly měřené na tyči (N) 2. měřicí jízdy.

Jak je patrné z Obrázku 47 závislost tahových sil lze popsat lineární regresní funkcí ve tvaru $y' = 3436,7882 + 0,9106x$; z hodnoty regresního koeficientu vyplývá, že pokud se změní tahová síla na měřená na rámu o 1 N, hodnota tahové síly měřená na rámu se změní o 0,9106 N.

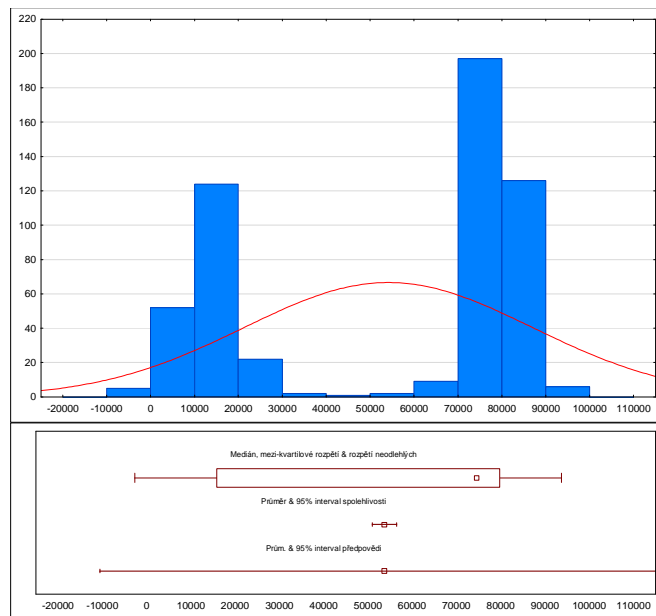
6.3.3 Statistická analýza dat ze 3. měřicí jízdy (měření 14)

Průběh hodnot tahových sil a horizontálního odporu 3. měřicí jízdy (měření 14) byl taktéž zaznamenáván v celém průběhu měřicí jízdy (viz Obrázek 48). Průběh tahového odporu 3. měřicí jízdy je obdobný jako u předešlých dvou měření a ukazuje podobný průběh naměřených hodnot jak pro měřicí rám, tak pro tahovou tyč.



Obrázek 48: Graf průběhů tahových sil (N) měřených na tahové tyči a měřicím rámem a horizontálního penetračního odporu (MPa) 3. měřicí jízdy.

Podobně jako v předchozích měřeních, nebyl pro otestování rozdílů středních hodnot tahových sil (rám versus tyč) splněny podmínky pro aplikaci párového t-testu (viz Obrázky 49 a 50) a bylo přistoupeno k neparametrickému testování.



Shapiro-Wilk p: < 0,00001

Průměr: 53758
 Sm.odch.: 32691
 Rozptyl: 1,07e+009
 Sm.Ch.průměru 1399
 Šikmost: -0,525

N platných: 546

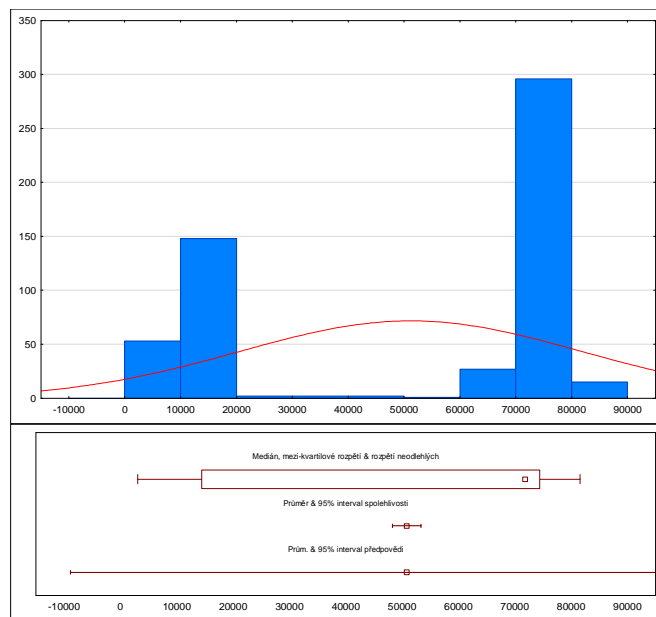
Minimum: -2584
 Dolní kvartil 15895
 Medián: 74567
 Horní kvartil 79813
 Maximum: 93720

95% spolehl. pro Sm.Odch.
 Dolní 30860
 Horní 34755

95% spolehl. pro průměr
 Dolní 51010
 Horní 56506

95% int. předpovědi pozorování
 Dolní -10517
 Horní 118033

Obrázek 49: Shapiro-Wilksův test a elementární statistické charakteristiky o rozdělení a vlastnostech naměřených dat tahových sil v souboru měřených tahovou tyčí 3. měřicí jízdy.



Shapiro-Wilk p: < 0,00001

Průměr: 50856
 Sm.odch.: 30376
 Rozptyl: 9,23e+008
 Sm.Ch.průměru 1300
 Šikmost: -0,515

N platných: 546

Minimum: 3118
 Dolní kvartil 14460
 Medián: 71862
 Horní kvartil 74471
 Maximum: 81617

95% spolehl. pro Sm.Odch.
 Dolní 28675
 Horní 32294

95% spolehl. pro průměr
 Dolní 48302
 Horní 53409

95% int. předpovědi pozorování
 Dolní -8868
 Horní 110580

Obrázek 50: Shapiro-Wilksův test a elementární statistické charakteristiky o rozdělení a vlastnostech naměřených dat tahových sil v souboru měřených měřicím rámem 3. měřicí jízdy.

Párový Wilcoxonův test (viz Tabulka 14) opět zamítl nulovou hypotézu o shodě mediánů a prokázal s 95% spolehlivostí statisticky průkazný rozdíl v úrovni tahových sil naměřených na rámu a na tyči.

Tabulka 14: Wilcoxonův párový test rozdílnosti středních hodnot tahové síly (N) měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem 3. měřicí jízdy.

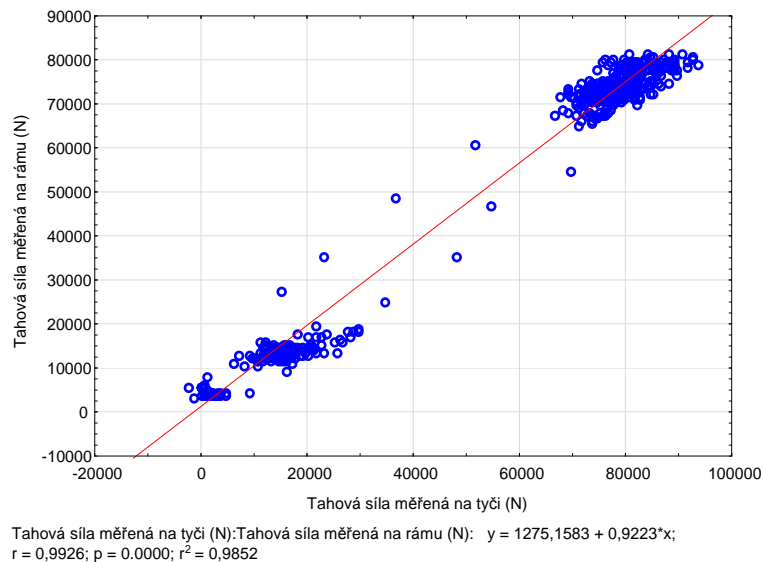
Dvojice proměnných	Wilcoxonův párový test (3 měřicí jízda) Označené testy jsou významné na hladině $p < ,05000$			
	Počet platných	T	Z	p-hodn.
Tahová síla - rám (N) & Tahová síla - tyč (N)	546	26448,00	13,07405	0,00

Z Tabulky 15 - popisné statistiky 3. měřicí jízdy je patrné, že střední hodnoty tahových sil měřených tahovou tyčí jsou vyšší než střední hodnoty zaznamenaná měřicím rámem.

Tabulka 15: Hodnoty popisné statistiky 3. měřicí jízdy.

Proměnná	Popisné statistiky (3 měřicí jízda)						
	N platných	Průměr	Medián	Sm.odch.	Spolehlivost Sm.Odch.	Spolehlivost Sm.Odch.	Var.koef.
Tahová síla - rám (N)	546	50855,88	71861,52	30376,40	28675,26	32293,73	59,73036
Tahová síla - tyč (N)	546	53757,99	74567,50	32691,16	30860,39	34754,59	60,81172

Dále byla testována míra závislosti (viz Obrázek 51) souborů naměřených hodnot tahových sil naměřených tahovou tyčí a měřicím rámem 3. měřicí jízdy.



Obrázek 51: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) a tahové síly měřené na tyči (N) 3. měřicí jízdy.

Z Obrázku 51 je patrná velmi vysoká míra závislost tahových sil (N) měřených tahovou tyčí a měřicím rámem. Závislost je popsána regresní funkcí ve tvaru $y' = 1275,1583 + 0,9223x$. Z hodnot regresního koeficientu 0,9223 vyplývá, že pokud se změní tahová síla na měřená tahovou tyčí o jednotku – 1 N, hodnota tahové síly měřená na rámu se změní o 0,9223 N.

6.3.4 Dílčí závěry z měření tahových sil ve Slovči, 30. října 2014 (1. - 3. měřicí jízdy)

Porovnáním středních hodnot souborů naměřených dat je patrné, že střední hodnoty tahových odporů u tahové tyče jsou vyšší než střední hodnoty u měřicího rámu. Tento rozdíl se dá vysvětlit nastavením kalibrace měřicího zařízení na rámu. Taktéž variabilita hodnot naměřených tahovou tyčí je vyšší než u hodnot naměřených měřicím rámem (vysoké hodnoty variability jsou dány charakterem měření - před a po zahloubení kypřiče), avšak z praktického hlediska rozdíl ve variabilitě (měřené variačním koeficientem) je velmi nízký pohybující se do 3,4 %. Dále testy závislosti tahových sil (N) měřené měřicím rámem a tahovou tyčí (1 - 3 měřicí jízda, měření 12 - 14), jednoznačně prokázaly velmi vysokou vzájemnou korelaci (viz hodnoty korelačního koeficientu, Obrázek 42, 47 a 51) a dále jak vyplývá z těchto obrázků, míra závislosti změny hodnot tahové síly (N) naměřené měřicím rámem jsou závislé na změnách hodnot naměřených tahovou tyčí (N) u 1. měřicí jízdy z 98,95 %, u 2. měřicí jízdy z 98,99 % a u 3. měřicí jízdy z 98,52 %.

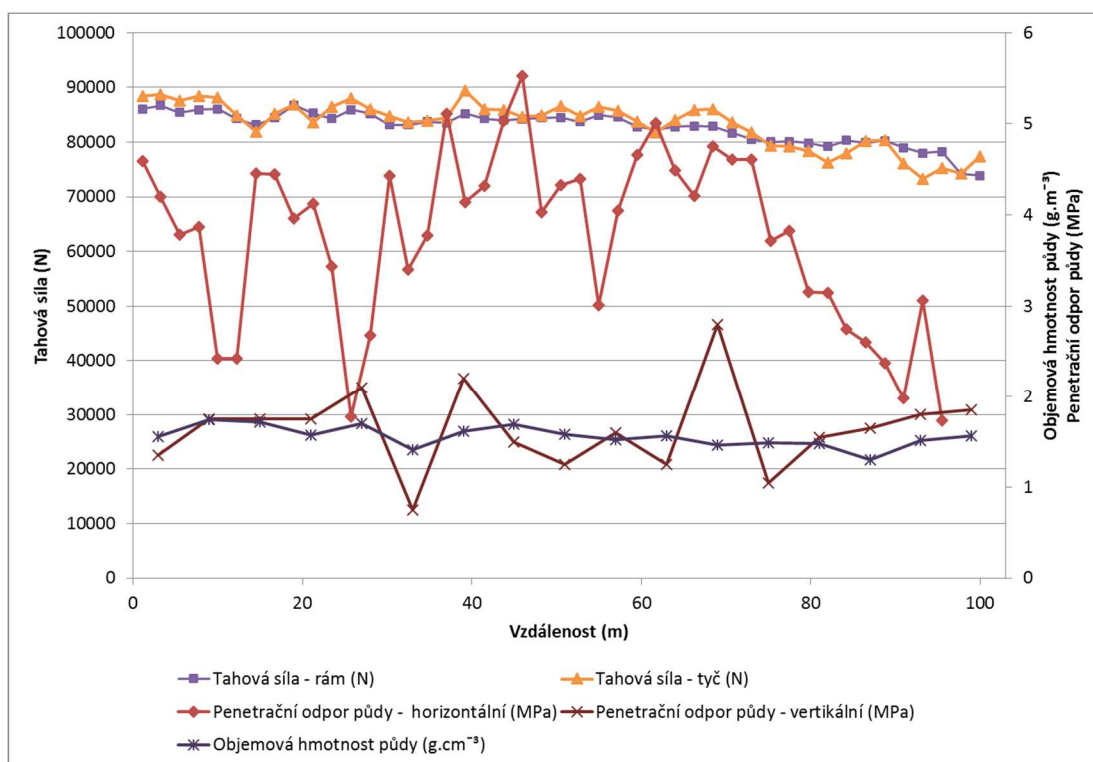
6.4 Statistická analýza dat tahových sil se zahloubeným kypřiče a fyzikálních vlastností na jednotlivých měřicích úsecích pokusného pozemku ve Slovči.

Pomocí vybraných metod statistické indukce byly vyhodnocovány rozdíly a závislosti naměřených dat na pokusném pozemku (viz Obrázek 25) se zahloubeným kypřičem. Na měřicích úsecích 1 – 3 pokusného pozemku byly testovány rozdíly hodnot tahových sil naměřených tahovou tyčí a měřicím rámem (viz Obrázek 27). Na měřicím úseku 4 - 6 byly měřeny tahové síly pouze měřicím rámem (viz Obrázek 30), kdy oproti měřicí jízdě 1 - 3 byl vyřazen tažený traktor s tahovou tyčí. Dále byly vyhodnocovány závislosti

vybraných souborů fyzikálních vlastností a závislosti tahových sil na fyzikálních vlastnostech půdy. Pro další analýzu závislosti tahové síly a fyzikálních vlastností půdy byly měřené hodnoty testovány korelační a regresní analýzou závislosti. Hodnoty tahových sil a hodnoty horizontálního penetračního odporu bylo nutno zprůměrovat na počet hodnot odběrů fyzikálních vlastností půdy na jednom měřicím úseku.

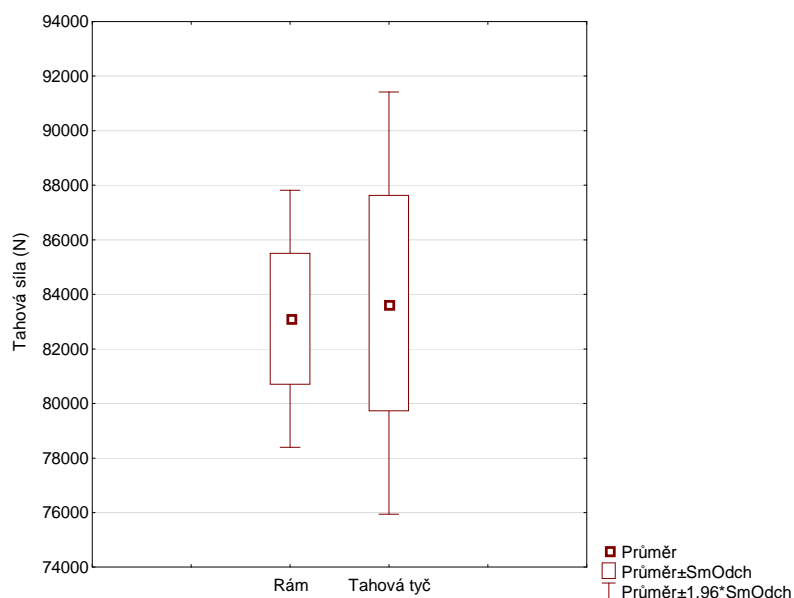
6.4.1 Statistická analýza naměřených dat 1. měřicího úseku

Na Obrázku 52 jsou zaznamenány výsledky měření vybraných veličin v 1. měřicím úseku. Dále jsou zde zaznamenány výsledky měření objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) a vertikálního penetračního odporu půdy (MPa) na prvním měřicím úseku.



Obrázek 52: Graf výsledků měření sledovaných veličin v 1. měřicím úseku - průběhu tahových sil (N) měřených tahovou tyčí a měřicím rámem, průběhu horizontálního penetračního odporu (MPa). Naměřené hodnoty objemových hmotností ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) a hodnoty vertikálního penetračního odporu (MPa).

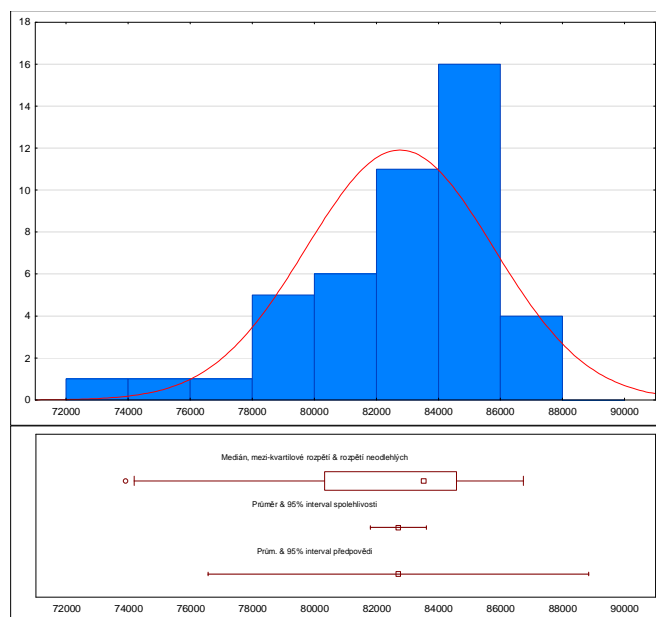
Z krabicových grafů na Obrázku 53 je patrný rozdíl ve variabilitě tahových sil naměřených tahovou tyčí a měřicím rámem. Průměrná hodnota naměřená tahovou tyčí je vyšší než průměrná hodnota naměřená měřicím rámem (viz Obrázky 53, 54, 55 a Tabulka 17).



Obrázek 53: Krabicové grafy naměřených hodnot tahových sil měřených tahovou tyčí a měřicím rámem 1. měřicího úseku.

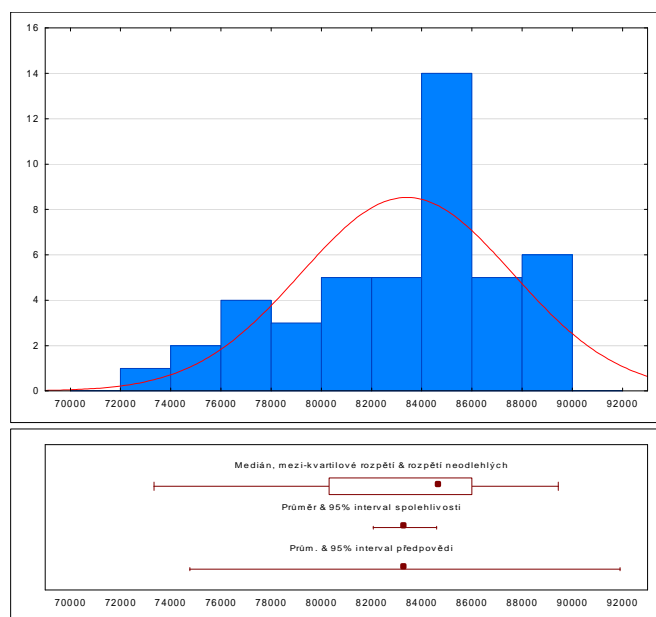
Pro potřeby statistického porovnání souborů tahových sil (měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem) bylo nejdříve nutné otestovat získaná data na normalitu rozdělení. Shapiro-Wilksovým testem nebyla prokázána normalita rozdělení naměřených hodnot tahové síly měřeno tahovou tyčí (viz Obrázek 54) a taktéž nebyla prokázána normalita rozdělení hodnot naměřených dat měřicím rámem (viz Obrázek 55).

Pro verifikaci rozdílů mezi soubory tahových sil naměřených tahovou tyčí a měřicím rámem byl použit neparametrický test, protože nebyla splněna podmínka normality dat (viz Obrázky 54 a 55) a v souboru naměřených měřicím rámem se nacházelo rovněž odlehlé pozorování.



Shapiro-Wilk p:	0,00107
Průměr:	82704
Sm.odch.:	3014
Rozptyl:	9086817
Sm.Ch.průměru	449
Šikmost:	-1,144
N platných:	45,00
Minimum:	73901
Dolní kvartil	80320
Medián:	83519
Horní kvartil	84582
Maximum:	86742
95% spolehl. pro Sm.Odch.	
Dolní	2496
Horní	3808
95% spolehl. pro průměr	
Dolní	81798
Horní	83610
95% int. předpovědi pozorování	
Dolní	76562
Horní	88846

Obrázek 54: Shapiro-Wilksův W-test a elementární statistické charakteristiky souboru naměřených dat tahových sil měřicím rámem v 1. měřicím úseku.



Shapiro-Wilk p:	0,00435
Průměr:	83332
Sm.odch.:	4207
Rozptyl:	1,77e+007
Sm.Ch.průměru	627
Šikmost:	-0,805
N platných:	45,00
Minimum:	73332
Dolní kvartil	80312
Medián:	84670
Horní kvartil	85992
Maximum:	89441
95% spolehl. pro Sm.Odch.	
Dolní	3483
Horní	5315
95% spolehl. pro průměr	
Dolní	82068
Horní	84596
95% int. předpovědi pozorování	
Dolní	74759
Horní	91905

Obrázek 55: Shapiro-Wilksův W-test a elementární statistické charakteristiky souboru naměřených dat tahových sil v souboru měřených tahovou tyčí v 1. měřicím úseku.

Wilcoxonův párový test prokázal s 95% pravděpodobností průkazný statistický rozdíl v mediánech obou testovaných souborů (viz Tabulka 16).

Tabulka 16: Wilcoxonův párový test rozdílnosti středních hodnot tahové síly (N) měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem. 1. měřicího úseku.

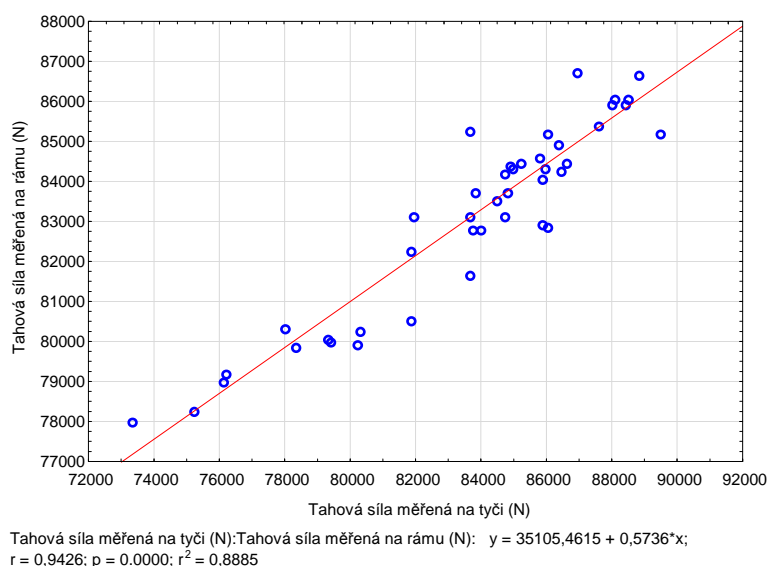
Dvojice proměnných	Wilcoxonův párový test (1 měřicí úsek) Označené testy jsou významné na hladině $p < ,05000$			
	Počet platných	T	Z	p-hodn.
Tahová síla měřena na rámu (N) & Tahová síla měřena na tyči (N)	45	297,0000	2,488905	0,012814

Jak vyplývá z Tabulky 17, střední hodnoty tahových sil měřených tahovou tyčí jsou vyšší než střední hodnoty zaznamenané měřicím rámem. Taktéž variabilita měřena variačním koeficientem je u hodnot naměřených tahovou tyčí vyšší, nicméně obě měření vykazují velmi nízkou variabilitu.

Tabulka 17: Hodnoty popisné statistiky 1. měřicího úseku.

Proměnná	Popisné statistiky (1 měřicí úsek)						
	N platných	Průměr	Medián	Sm.odch.	Spolehlivost Sm.Odch. -95,000%	Spolehlivost Sm.Odch. +95,000%	Var.koef.
Tahová síla měřena na rámu (N)	45	82703,90	83519,07	3014,435	2495,513	3807,833	3,644852
Tahová síla měřena na tyči (N)	45	83332,35	84670,20	4207,336	3483,061	5314,706	5,048863

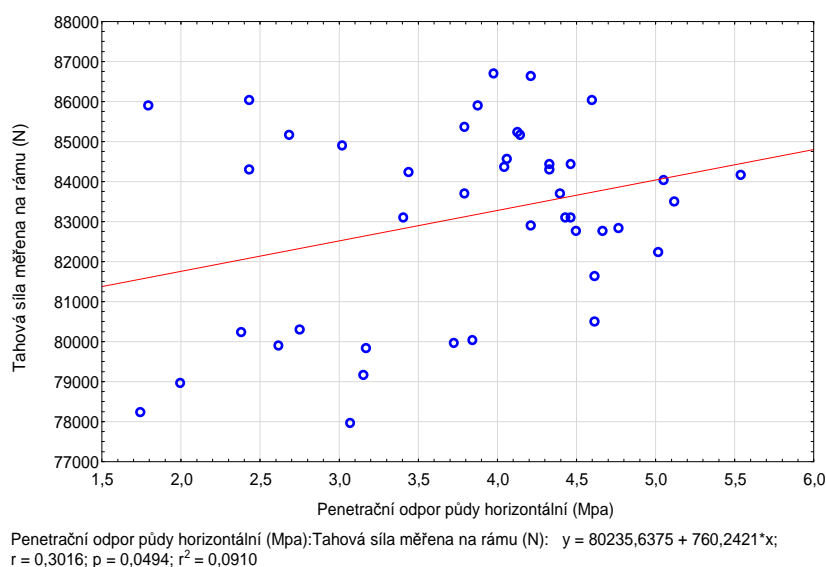
Dále byla analyzována závislost obou výsledků měření.



Obrázek 56: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) a tahové síly měřené tahovou tyčí (N) 1. měřicího úseku.

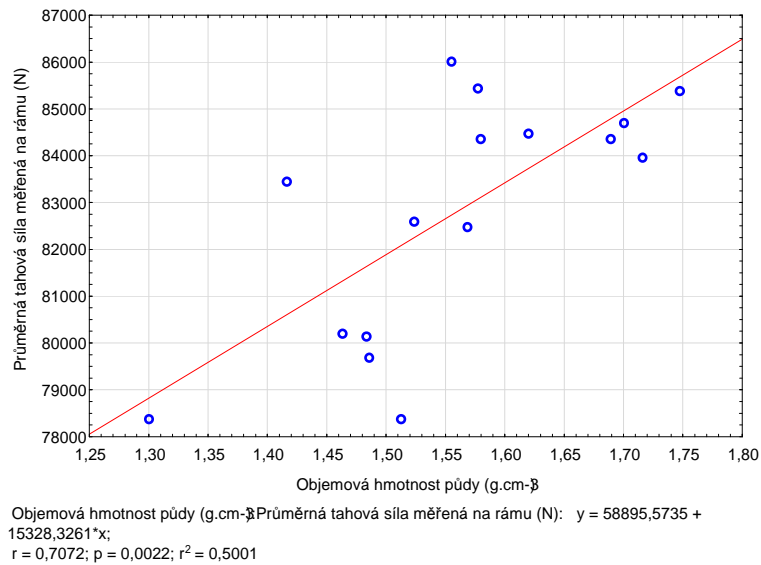
Jak vyplývá z grafu na Obrázku 56, závislost lze označit za statisticky významnou, přímou a velmi těsnou. Změny hodnot tahové síly (N) na rámu lze z 88,85 % vysvětlit změnami tahové síly na tyči (N).

Dále byla provedena regresní a korelační analýza tahové síly (N) měřené na rámu a horizontálního penetračního odporu (MPa). Z Obrázku 57 je patrné, že přestože regresní model vyšel jako statisticky významný přepočtená hladina významnosti $p = 0,0494$ se pohybuje na samé hranici adekvátnosti. Model je považován za adekvátní vzhledem k naměřeným hodnotám, když regresní funkce dobře vystihuje data. Závislost tahové síly (N) na horizontálním penetračním odporu (MPa) je velmi slabá a jak vyplývá z hodnoty koeficientu determinace, hodnoty tahové síly v (N) jsou pouze z 9,1 % vysvětlitelné změnou horizontálního penetračního odporu půdy (MPa).



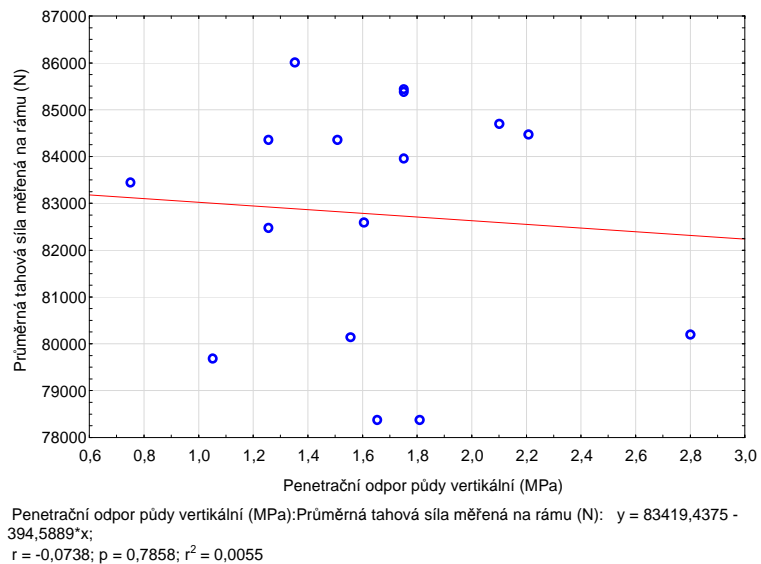
Obrázek 57: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na horizontálním penetračním odporu (MPa) 1. měřicího úseku.

Závislost tahové síly měřené na rámu (N) a objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) (viz graf na Obrázku 58) je statisticky významná a silná ($r = 0,7$). Změny tahové síly (N) jsou z 50 % vysvětlitelné změnami objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Závislost lze popsat lineární regresní funkcí ve tvaru: $y' = 58895,5735 + 15328,3261x$. Z hodnoty regresního koeficientu vyplývá, že nárůst objemové hmotnosti půdy o $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ vyvolá v průměru zvýšení průměrné tahové síly měřené na rámu o 15 328,3 N.



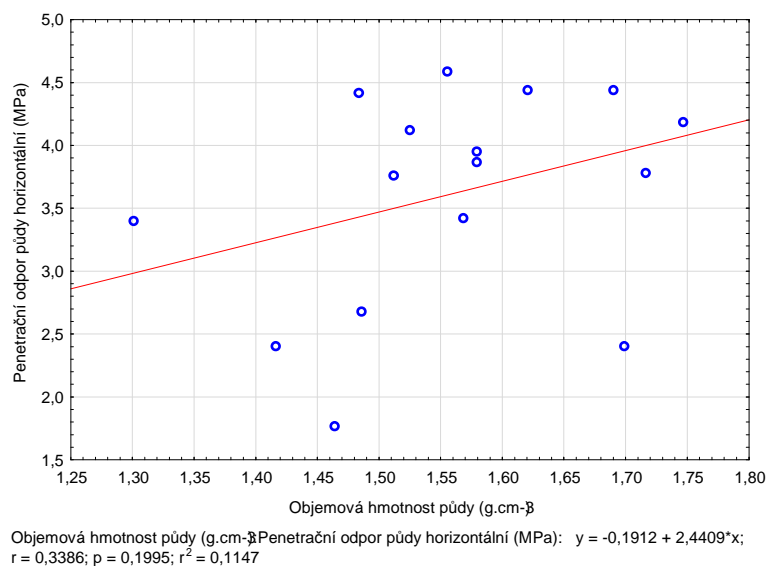
Obrázek 58: Graf závislost průměrné tahové síly měřené na rámu (N) a objemové hmotnosti půdy (g.cm⁻³) 1. měřicího úseku.

Statisticky významná závislost průměrné tahové síly (N) měřené na rámu a na vertikálním penetračním odporu (MPa) prokázána nebyla, jak vyplývá z Obrázku 59.



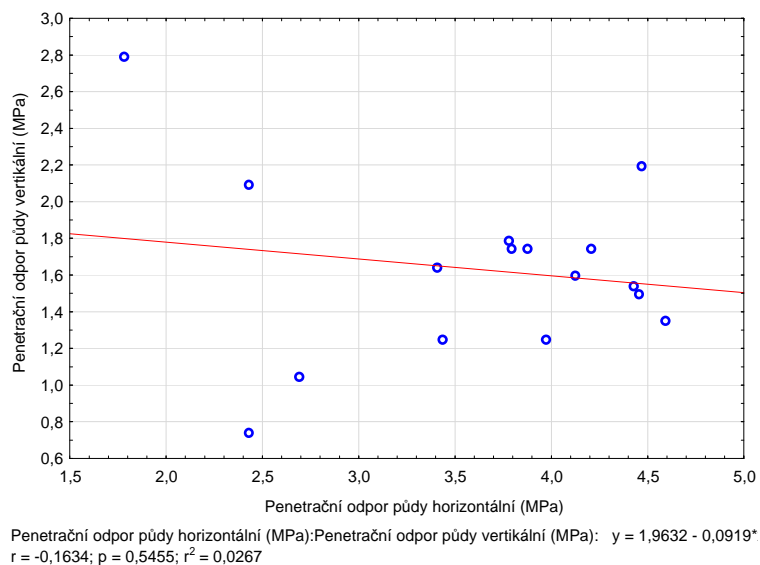
Obrázek 59: Graf závislost průměrné tahové síly měřené na rámu (N) na vertikálním penetračním odporu (MPa) 1. měřicího úseku.

Statisticky významná vzájemná závislost fyzikálních vlastností půdy a to horizontálního penetračního odporu (MPa) na objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) rovněž nebyla prokázána (viz Obrázek 60).



Obrázek 60: Graf závislost horizontálního penetračního odporu (MPa) na objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 1. měřicího úseku.

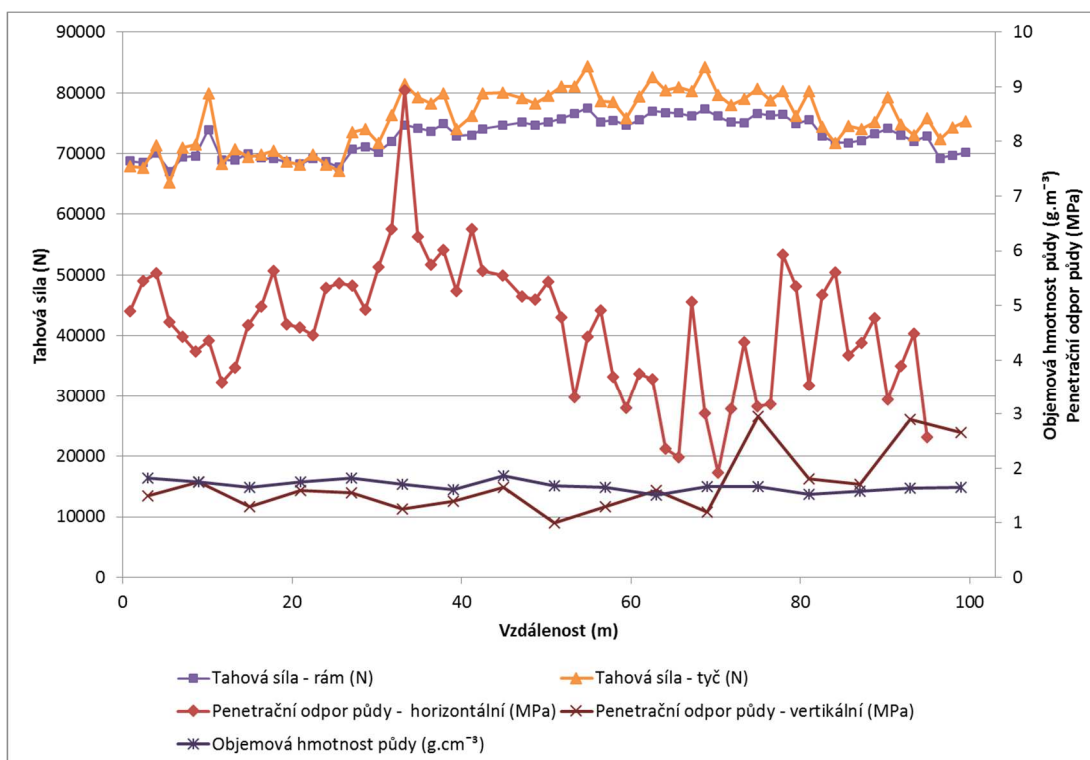
Prokázána nebyla ani statisticky významná závislost u vertikálního penetračního odporu (MPa) na horizontálním penetračním odporu (MPa), (viz Obrázek 61).



Obrázek 61: Graf závislost vertikálního penetračního odporu (MPa) na horizontálním penetračním odporu (MPa) 1. měřicího úseku.

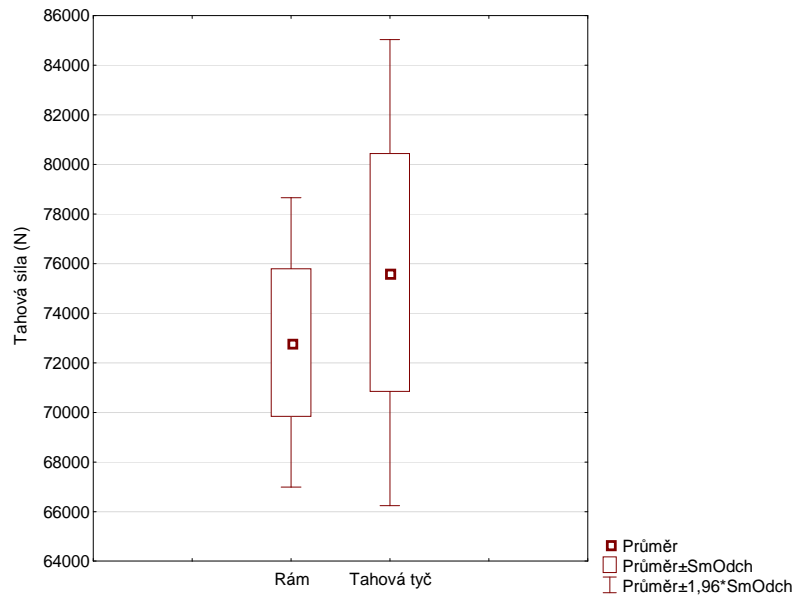
6.4.2 Statistická analýza naměřených dat 2. měřicího úseku

Na Obrázku 62 jsou zaznamenány výsledky měření z 2. měřicího úseku.

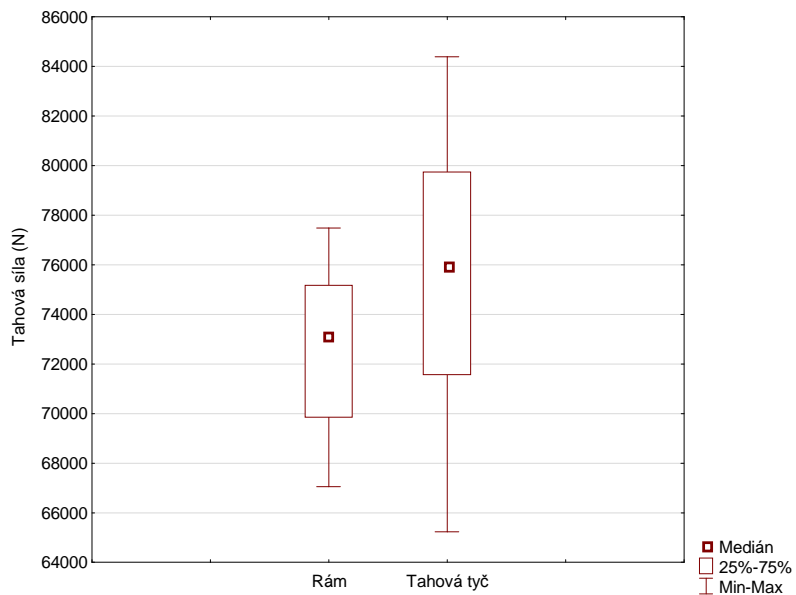


Obrázek 62: Graf výsledků měření sledovaných veličin ve 2. měřicím úseku - průběhu tahových sil (N) měřených tahovou tyčí a měřicím rámem, průběhu horizontálního penetračního odporu (MPa). Naměřené hodnoty objemových hmotností (g.cm⁻³) a hodnoty vertikálního penetračního odporu (MPa).

Z krabicových grafů na Obrázcích 63 a 64 vyplývají stejné závěry jako z měření předchozího 1. úseku. Ještě více je zde patrný rozdíl ve variabilitě naměřených hodnot. Hodnoty naměřené na rámu vykazují nižší variabilitu i nižší střední hodnoty (viz Tabulka 19) a (viz Obrázky 63 a 64).

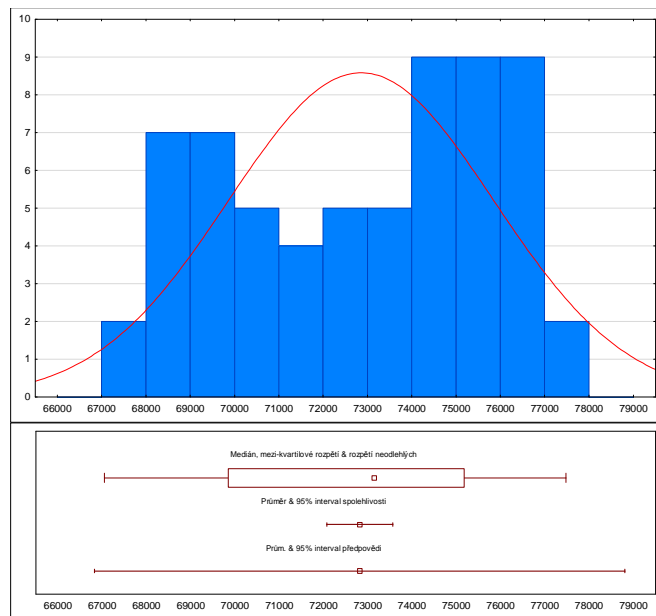


Obrázek 63: Krabicové grafy naměřených hodnot tahových sil měřených tahovou tyčí a měřicím rámem 2. měřicího úseku (střední hodnota měřena průměrem).



Obrázek 64: Krabicové grafy naměřených tahových sil měřených tahovou tyčí a měřicím rámem 2. měřicího úseku (střední hodnota měřena mediánem).

Jak vyplývá z Obrázku 65 a 66, nebyla prokázána normalita rozdělení náhodných veličin (testováno Shapiro-Wilksovým W-testem). Pokud při opakovaném měření těže veličiny hodnoty nemají normální rozdělení, pak to znamená, že zřejmě na tento proces působí nějaký nenáhodný vliv (fyzikální vlastnosti půdy, hloubka zpracování půdy).



Shapiro-Wilk p: 0.00151

Průměr: 72820
 Sm.odch.: 2974
 Rozptyl: 8846831
 Sm.Ch.průměru 372
 Šikmost: -0.234

N platných: 64.00

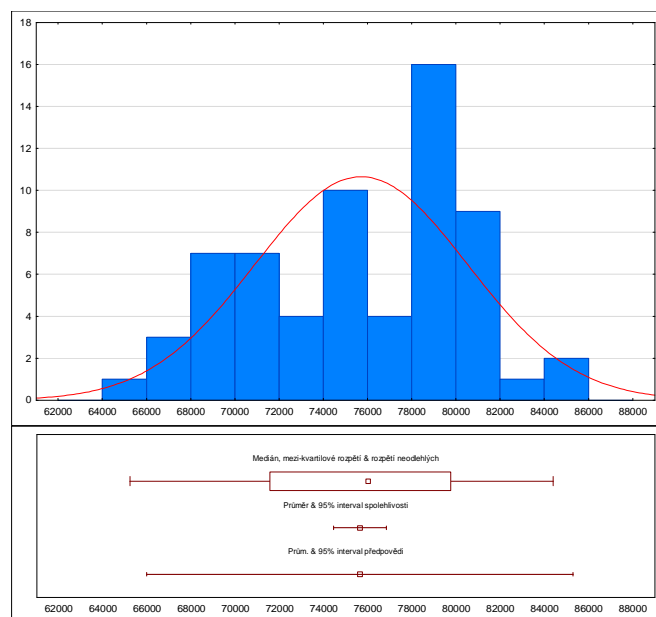
Minimum: 67050
 Dolní kvartil 69851
 Medián: 73147
 Horní kvartil 75178
 Maximum: 77477

95% spolehl. pro Sm.Odch.
 Dolní 2534
 Horní 3602

95% spolehl. pro průměr
 Dolní 72077
 Horní 73563

95% int. předpovědi pozorování
 Dolní 66830
 Horní 78810

Obrázek 65: Shapiro-Wilksův W-test a elementární statistické charakteristiky souboru naměřených dat tahových sil měřicím rámem ve 2. měřicím úseku.



Shapiro-Wilk p: 0.0154

Průměr: 75642
 Sm.odch.: 4795
 Rozptyl: 2.30e+007
 Sm.Ch.průměru 599
 Šikmost: -0.305

N platných: 64.00

Minimum: 65230
 Dolní kvartil 71570
 Medián: 76014
 Horní kvartil 79748
 Maximum: 84387

95% spolehl. pro Sm.Odch.
 Dolní 4084
 Horní 5807

95% spolehl. pro průměr
 Dolní 74444
 Horní 76839

95% int. předpovědi pozorování
 Dolní 65985
 Horní 85298

Obrázek 66: Shapiro-Wilksův W-test a elementární statistické charakteristiky souboru naměřených dat tahových sil tahovou tyčí ve 2. měřicího úseku.

Pro otestování rozdílu středních hodnot tahových sil naměřených oběma způsoby, byl použit Wilcoxonův párový - neparametrický test, který prokázal statisticky významný rozdíl v mediánech obou testovaných souborů (viz Tabulka 18).

Tabulka 18: Wilcoxonův párový test rozdílnosti středních hodnot tahové síly (N) měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem 2. měřicího úseku.

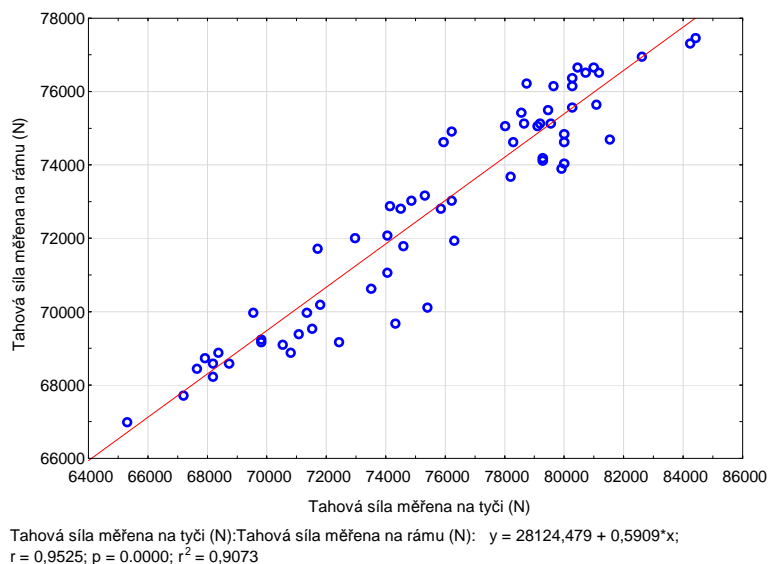
Dvojice proměnných	Wilcoxonův párový test (2 měřicí úsek) Označené testy jsou významné na hladině $p < ,05000$			
	Počet platných	T	Z	p-hodn.
Tahová síla měřena na rámu (N) & Tahová síla měřena na tyči (N)	64	78,00000	6,433380	0,000000

Taktéž variabilita naměřených hodnot je rozdílná, nicméně obě měření vykazují velmi nízkou variabilitu (viz Tabulka 19). Hodnota směrodatné odchylky v souboru hodnot naměřených tahovou tyčí je o cca 1 800 N vyšší než v souboru hodnot naměřených na rámu. V relativním vyjádření (měřeno variačním koeficientem) představuje rozdíl ve variabilitě hodnot obou souborů 2,25 % (viz Tabulka 19).

Tabulka 19: Hodnoty popisné statistiky 2. měřicího úseku.

Proměnná	Popisné statistiky (2 měřicí úsek)						
	N platných	Průměr	Medián	Sm.odch.	Spolehlivost Sm.Odch. -95,000%	Spolehlivost Sm.Odch. +95,000%	Var.koef.
Tahová síla měřena na rámu (N)	64	72820,01	73146,71	2974,362	2533,555	3602,311	4,084540
Tahová síla měřena na tyči (N)	64	75641,71	76013,59	4794,816	4084,213	5807,099	6,338852

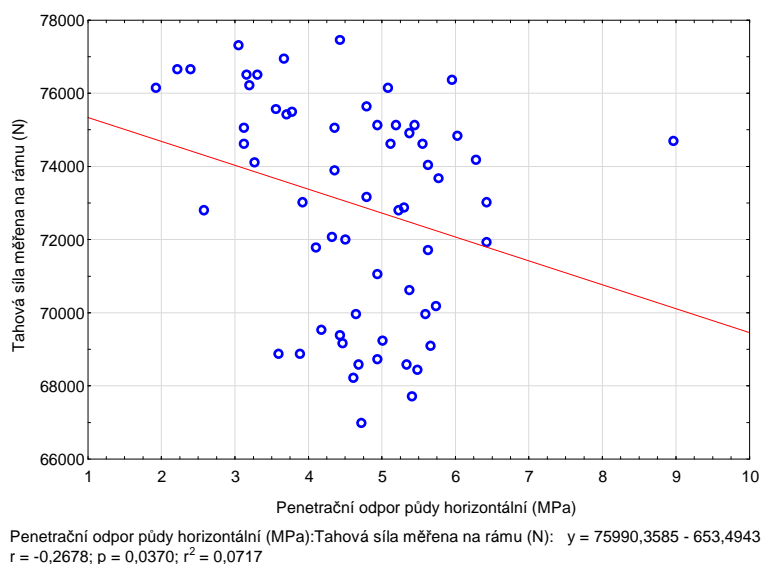
Výsledky obou měření byly velmi silně z Korelované (viz graf na Obrázku 67).



Obrázek 67: Graf závislosti tahové síly naměřené na rámu (N) a na tahové síle naměřené na tahové tyči (N) 2. měřicího úseku.

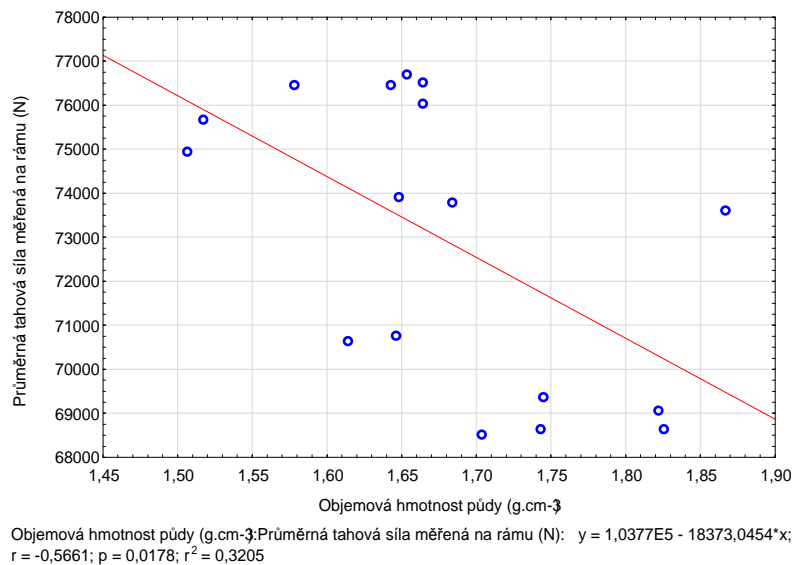
Závislost hodnot naměřených měřicím rámem na hodnotách naměřených tahovou tyčí ve 2. měřicím úseku je statisticky významná, velmi silná a lineární. Změny hodnot tahové síly měřicího rámu (N) jsou z 90,73 % vysvětlitelné změnou hodnot zaznamenaných z tahové tyče (N), (viz hodnota koeficientu determinace r^2 na Obrázku 67).

Dále byla analyzována závislost tahové síly (N) měřené na rámu a na horizontálním penetračním odporu (MPa). Z Obrázku 68 je patrné, že tato závislost je statisticky významná. Z hodnoty korelačního koeficientu lze usoudit na slabou nepřímou závislost. Tahová síla byla v tomto případě je ovlivňovaná dalšími faktory.



Obrázek 68: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na horizontálním penetračním odporu (MPa) 2. měřicího úseku.

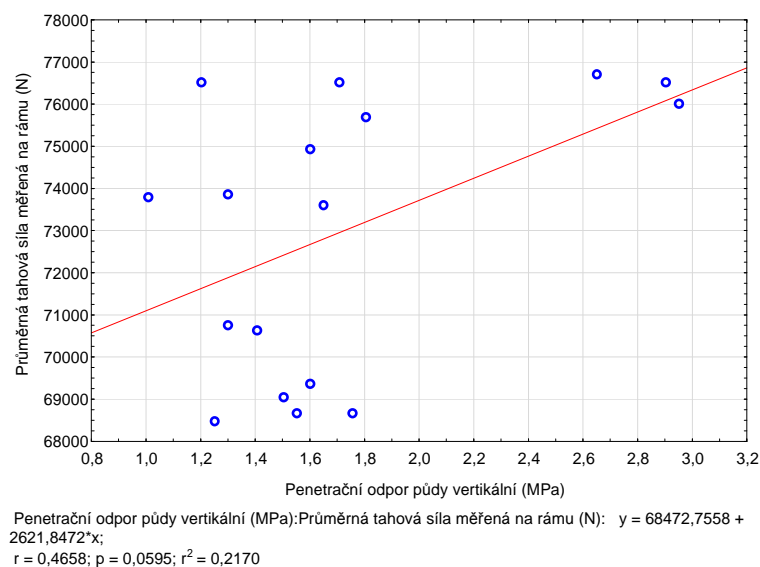
Jak vyplývá z Obrázku 69 grafu statisticky významná je rovněž závislosti průměrné tahové síly (N) a objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 2. měřicího úseku. Závislost lze označit za nepřímou a středně silnou.



Obrázek 69: Graf závislost průměrné tahové síly měřené na rámu (N) a objemové hmotnosti půdy (g.cm⁻³) 2. měřicího úseku.

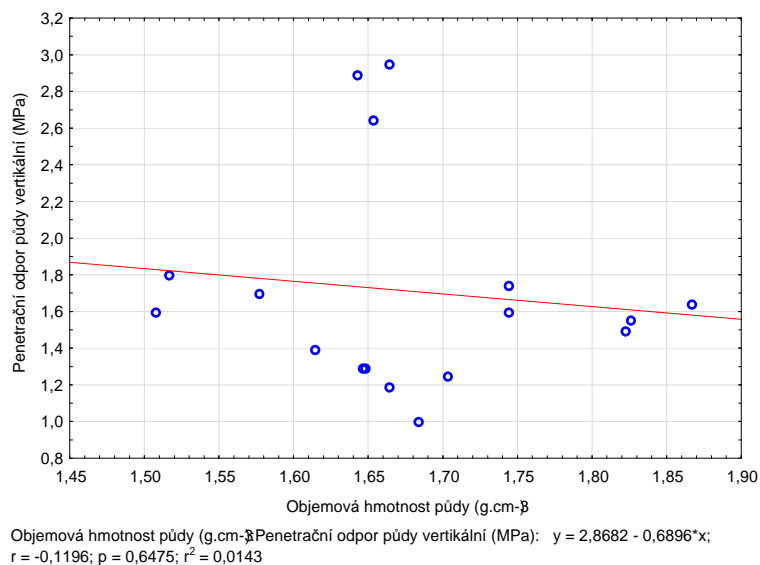
Ve druhém měřicím úseku byla zjištěna nepřímá závislost tahové síly jak na horizontální penetrační odpor, tak na objemovou hmotnost půdy. Nejpravděpodobnější vysvětlení tohoto výsledku nedodržení správné (konstantní) hloubky v průběhu měření.

Statisticky významná závislost průměrné tahové síly měřené na rámu (N) na vertikálním penetračním odporu (MPa) ve druhém měřicím úseku prokázána nebyla (viz graf na Obrázku 70).

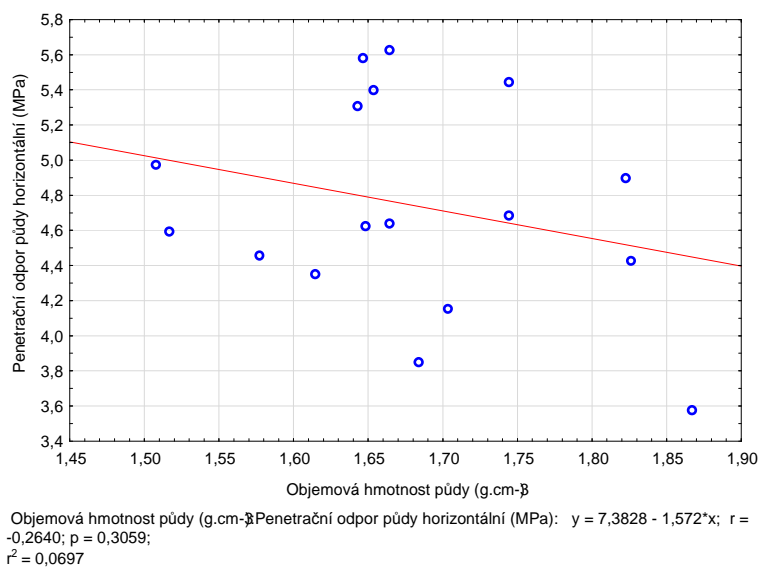


Obrázek 70: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na vertikálním penetračním odporu (MPa) ve 2. měřicím úseku.

Porovnáním vzájemných závislostí fyzikálních vlastností a to hodnot penetračních odporů půdy (MPa), jak vertikálního, tak horizontálního s objemovou hmotností půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) druhého měřicího úseku vyplývá, že penetrační odpory naměřeno vertikálním a horizontálním způsobem nevykazují statisticky významnou závislost na objemové hmotnosti půdy (viz Obrázky 71 a 72).

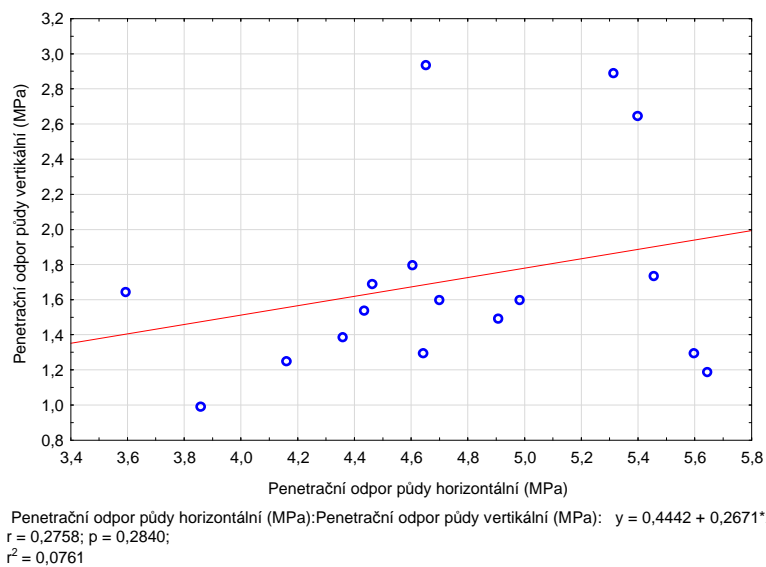


Obrázek 71: Graf závislost vertikálního odporu půdy (MPa) na objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 2. měřicího úseku.



Obrázek 72: Graf závislost horizontálního penetračního odporu půdy (MPa) na objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 2. měřicího úseku.

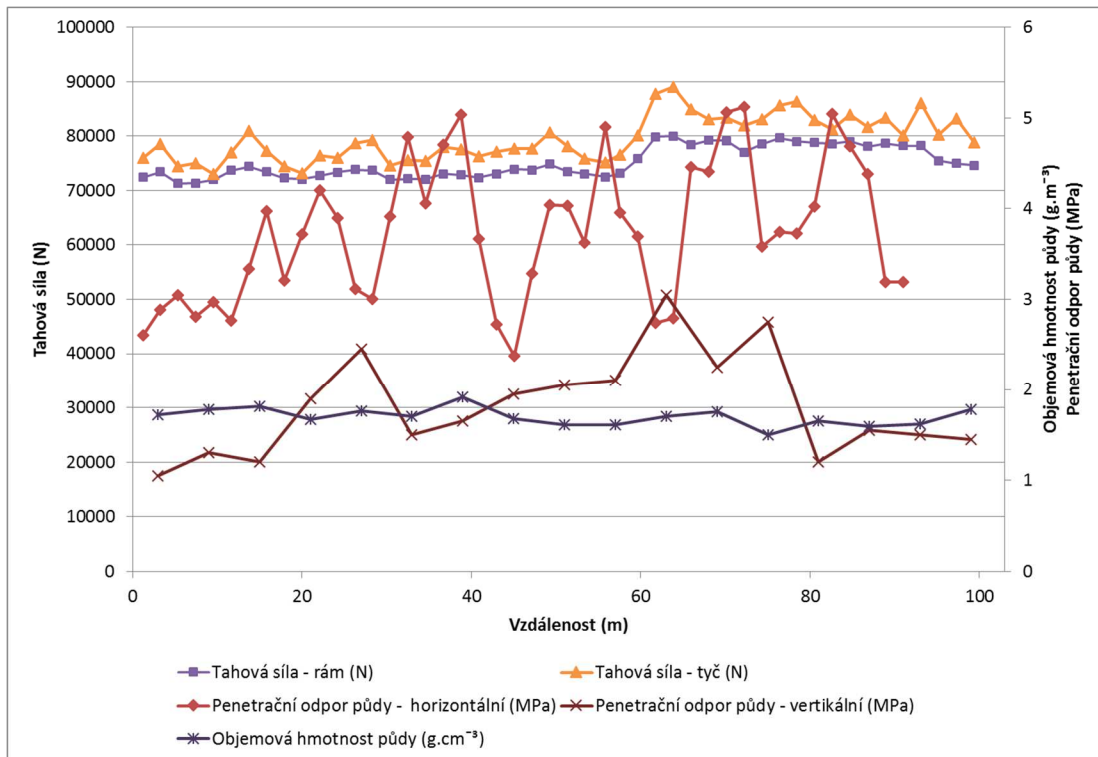
Rovněž nebyla prokázána statisticky významná závislost vertikálního a horizontálního penetračního odporu (viz graf na Obrázku 73).



Obrázek 73: Graf závislosti vertikálního penetračního odporu (MPa) na horizontálním penetračním odporu (MPa) 2. měřicího úseku.

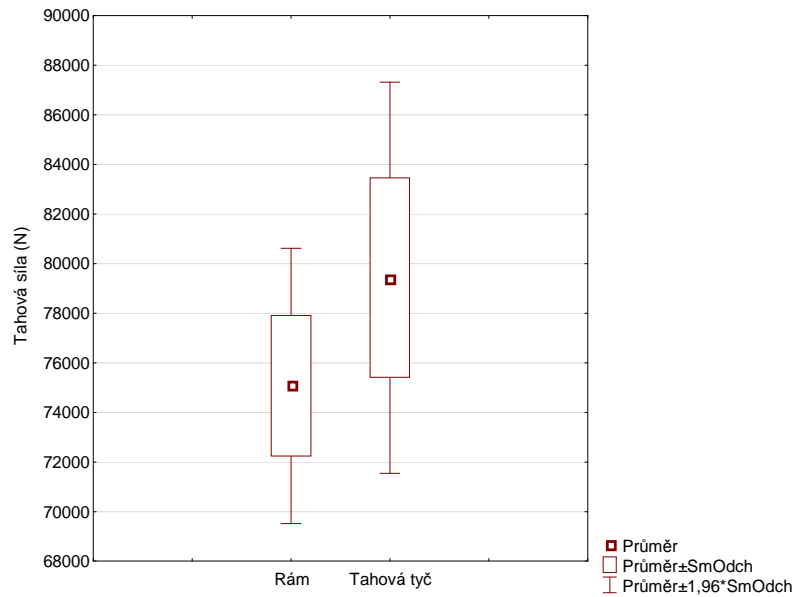
6.4.3 Statistická analýza naměřených dat 3. měřicího úseku

Výsledky měření vybraných veličin ve 3. měřicím úseku (viz Obrázek 74).

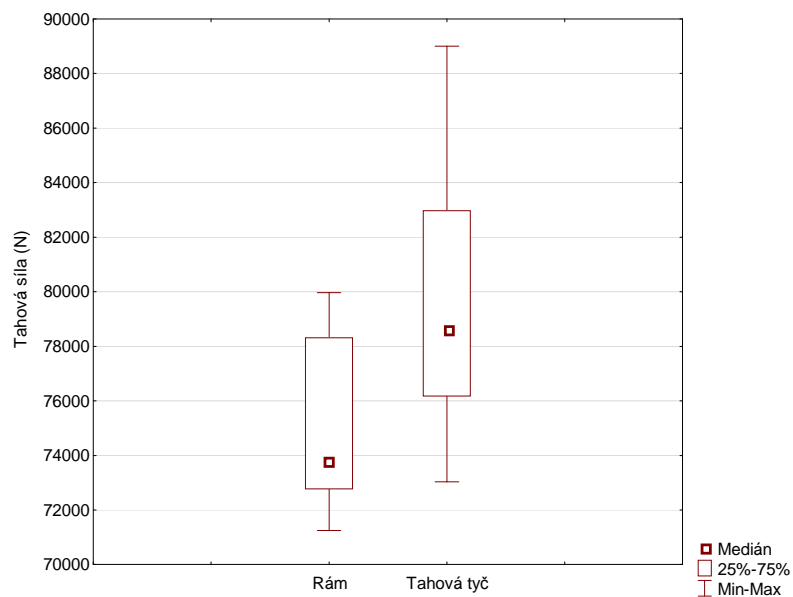


Obrázek 74: Graf výsledků měření sledovaných veličin ve 3. měřicím úseku - průběhu tahových sil (N) měřených tahovou tyčí a měřicím rámem, průběhu horizontálního penetračního odporu (MPa). Naměřené hodnoty objemových hmotností (g.cm^{-3}) a hodnoty vertikálního penetračního odporu (MPa).

Z krabicových grafů, které umožňují posoudit rozložení dat naměřených tahovou tyčí a měřicím rámem (viz Obrázky 75 a 76) je patrný rozdíl ve variabilitě i středních hodnotách tahových sil. Nižší střední hodnoty (aritmetický průměr a medián) a rovněž menší variabilitu vykazují hodnoty tahových sil naměřených měřicím rámem (viz Tabulka 21).

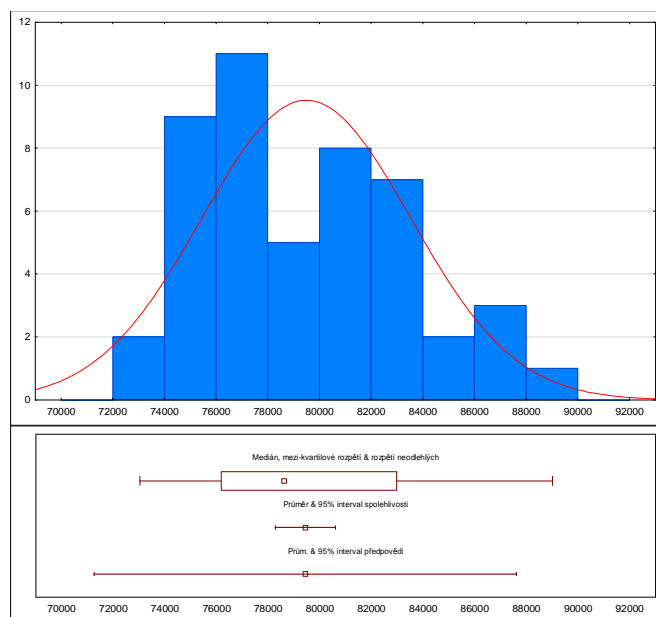


Obrázek 75: Krabicové grafy naměřených hodnot tahových sil měřených tahovou tyčí a měřicím rámem 3. měřicího úseku.



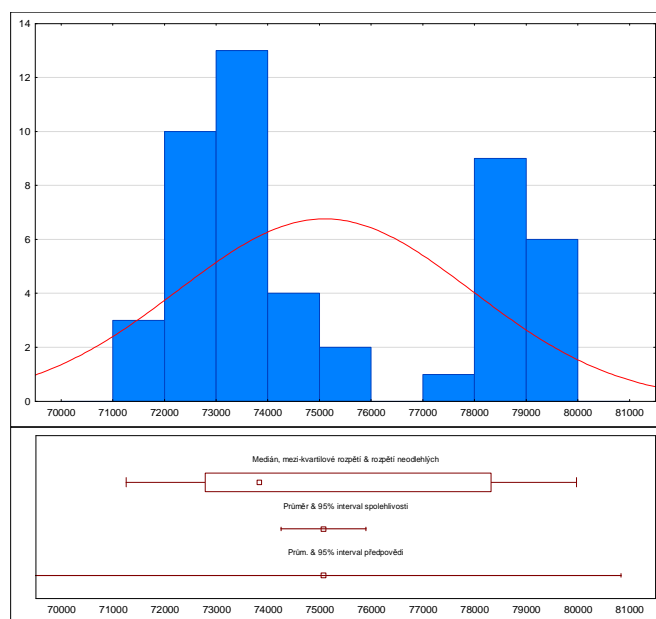
Obrázek 76: Krabicové grafy naměřených tahových sil měřených tahovou tyčí a měřicím rámem 3. měřicího úseku.

Pro verifikaci rozdílů mezi soubory tahových sil naměřených tahovou tyčí a měřicím rámem byl použit neparanetrický test, protože nebyla splněna podmínka normality rozložení dat (viz Obrázky 77 a 78 – Shapiro-Wilksův W-test).



Shapiro-Wilk p:	0,0899
Průměr:	79439
Sm.odch.:	4023
Rozptyl:	1,62e+007
Sm.Ch.průměru	581
Šikmost:	0,502
N platných:	48,00
Minimum:	73038
Dolní kvartil	76181
Medián:	78623
Horní kvartil	82972
Maximum:	89009
95% spolehl. pro Sm.Odch.	
Dolní	3349
Horní	5040
95% spolehl. pro průměr	
Dolní	78271
Horní	80607
95% int. předpovědi pozorování	
Dolní	71261
Horní	87617

Obrázek 77: Shapiro-Wilksův W-test a elementární statistické charakteristiky souboru naměřených dat tahových sil tahovou tyčí ve 3. měřicím úseku.



Shapiro-Wilk p:	0,00007
Průměr:	75071
Sm.odch.:	2833
Rozptyl:	8025038
Sm.Ch.průměru	409
Šikmost:	0,484
N platných:	48,00
Minimum:	71252
Dolní kvartil	72783
Medián:	73821
Horní kvartil	78312
Maximum:	79972
95% spolehl. pro Sm.Odch.	
Dolní	2358
Horní	3548
95% spolehl. pro průměr	
Dolní	74249
Horní	75894
95% int. předpovědi pozorování	
Dolní	69313
Horní	80829

Obrázek 78: Shapiro-Wilksův W-test a elementární statistické charakteristiky naměřených dat tahových sil měřicím rámem ve 3. měřicího úseku.

Wilcoxonův párový test (viz Tabulka 20), prokázal statisticky významný rozdíl ve středních hodnotách testovaných souborů.

Tabulka 20: Wilcoxonův párový test rozdílnosti středních hodnot tahové síly (N) měřeno tahovou tyčí a měřicím rámem 3. měřicího úseku.

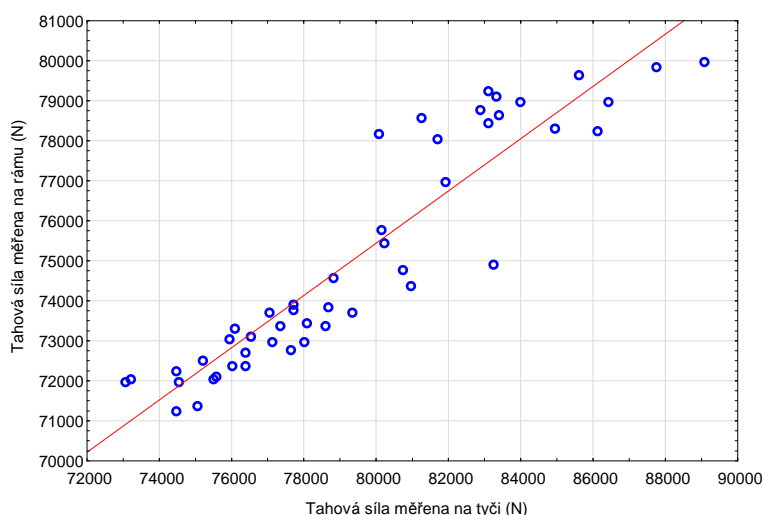
Dvojice proměnných	Wilcoxonův párový test (3 měřicí úsek) Označené testy jsou významné na hladině $p < ,05000$			
	Počet platných	T	Z	p-hodn.
Tahová síla měřena na rámu (N) & Tahová síla měřena na tyči (N)	48	0,00	6,030849	0,000000

Rozdíl středních hodnot porovnávaných souborů je patrný i z výsledků uvedených v Tabulce 21. Střední hodnoty tahové síly naměřené tahovou tyčí (aritmetický průměr, medián) jsou průkazně statisticky vyšší než střední hodnoty naměřené měřicím rámem. Rovněž variabilita hodnot naměřených tahovou tyčí je vyšší, v relativním vyjádření o 1,2 % (viz variační koeficient v Tabulce 21). Nicméně obě měření vykazují nízkou variabilitu naměřených hodnot.

Tabulka 21: Hodnoty popisné statistiky 3. měřicího úseku.

Proměnná	Popisné statistiky (3 měřicí úsek)						
	N platných	Průměr	Medián	Sm.odch.	Spolehlivost Sm.Odch. -95,000%	Spolehlivost Sm.Odch. +95,000%	Var.koef.
Tahová síla měřena na rámu (N)	48	75071,42	73821,25	2832,850	2358,259	3548,372	3,773540
Tahová síla měřena na tyči (N)	48	79438,79	78622,96	4023,399	3349,354	5039,631	5,064779

Dále byla opět podrobně analyzována vzájemná korelace výsledků obou způsobů měření tahových sil (viz Obrázek 79).

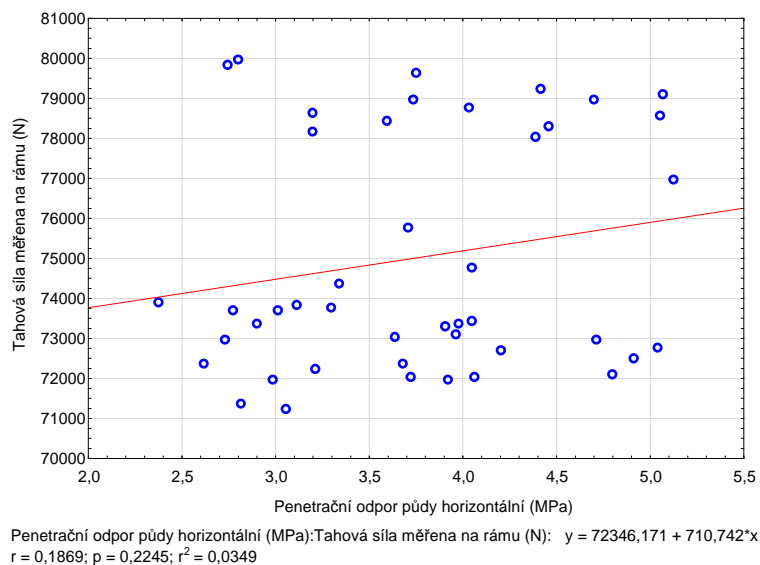


Tahová síla měřena na tyči (N):Tahová síla měřena na rámu (N): $y = 23213,5354 + 0,6528 \cdot x$;
 $r = 0,9272$; $p = 0,0000$; $r^2 = 0,8596$

Obrázek 79: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na tahové síle měřené tahovou tyčí (N) ve 3. měřicího úseku.

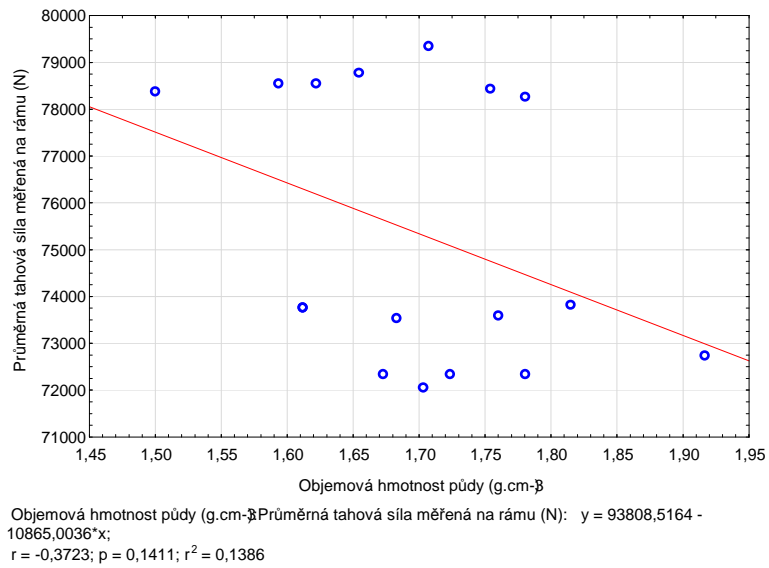
Jak vyplývá z grafu na Obrázku 79, závislost lze označit za statisticky významnou, přímou a velmi těsnou ($r = 0,9272$). Změny hodnot tahové síly (N) naměřené měřicím rámem v jsou z 85,96 % vysvětlitelné změnami hodnot naměřenými tahovou tyčí (N).

Dále byla provedena regresní a korelační analýza tahové síly (N) měřené na rámu a horizontálního penetračního odporu (MPa). Z Obrázku 80 je patrné, že statisticky průkazná závislost prokázána nebyla.



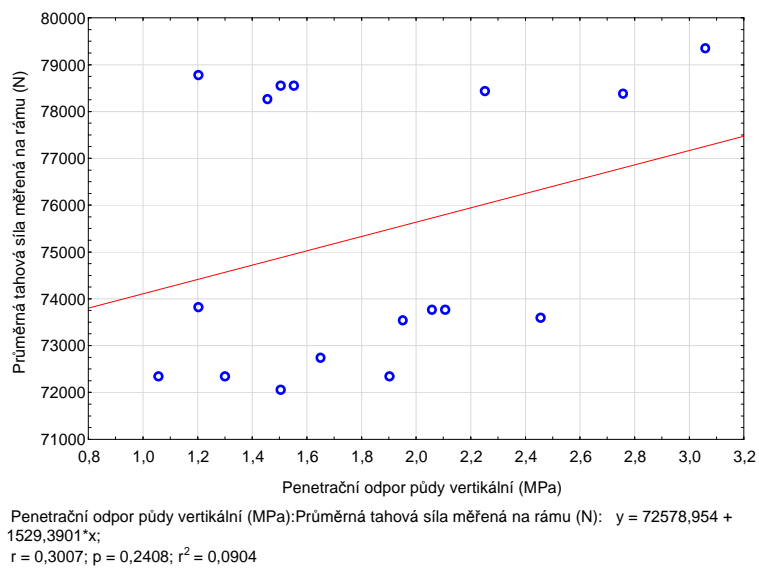
Obrázek 80: Graf závislost tahové síly měřené na rámu (N) a horizontálního penetračního odporu (MPa) 3. měřicího úseku.

Závislost průměrné tahové síly (N) na objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) ve 3. měřicím úseku, jak vyplývá z Obrázku 81, je rovněž statisticky nevýznamná. Je zjevné, že hodnoty tahových sil jsou ovlivňovány i jinými významnými faktory, jejichž analýzou se bude tato disertační práce ještě zabývat (např. hloubka zpracování půdy).



Obrázek 81: Graf závislosti průměrné tahové síly měřené na rámu (N) na objemové hmotnosti půdy (g.cm⁻³) ve 3. úseku měření.

Stejný závěr vyplývá i z grafu na Obrázku 82, kde nebyla prokázána závislost tahové síly (N) na vertikálním penetračním odporu (MPa).

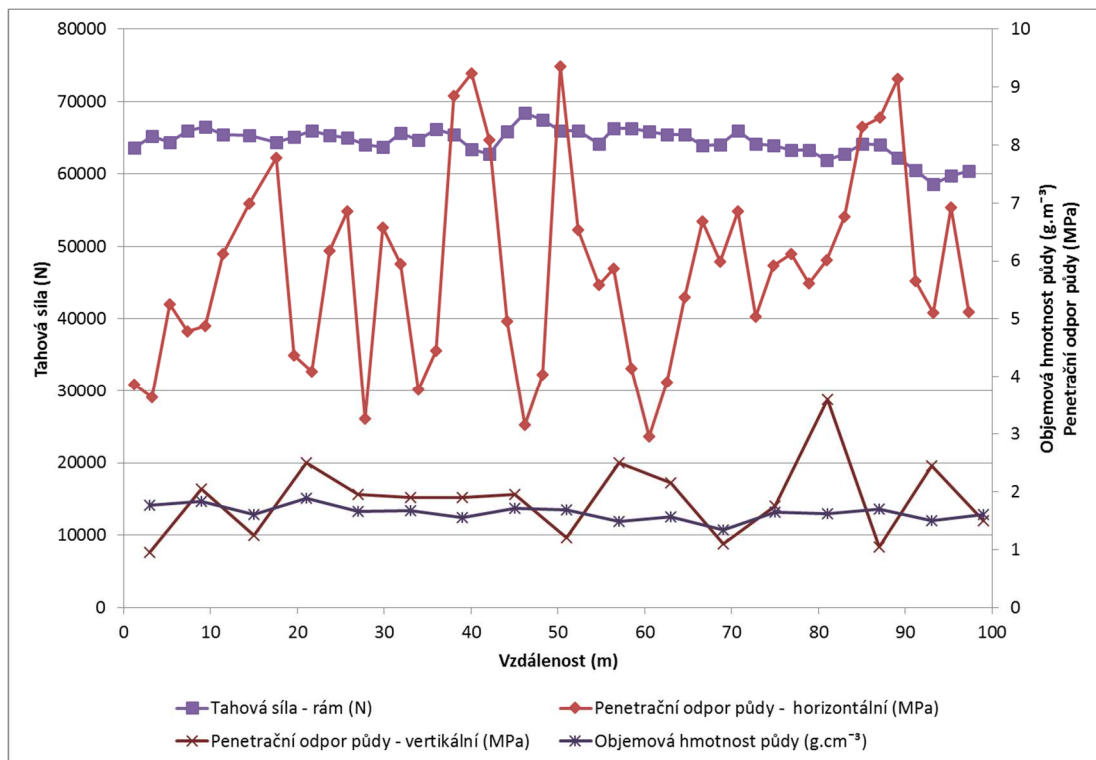


Obrázek 82: Graf závislosti průměrné tahové síly měřené na rámu (N) na vertikálním penetračním odporu (MPa) ve 3. měřicím úseku.

6.4.4 Statistická analýza naměřených dat 4. měřicího úseku

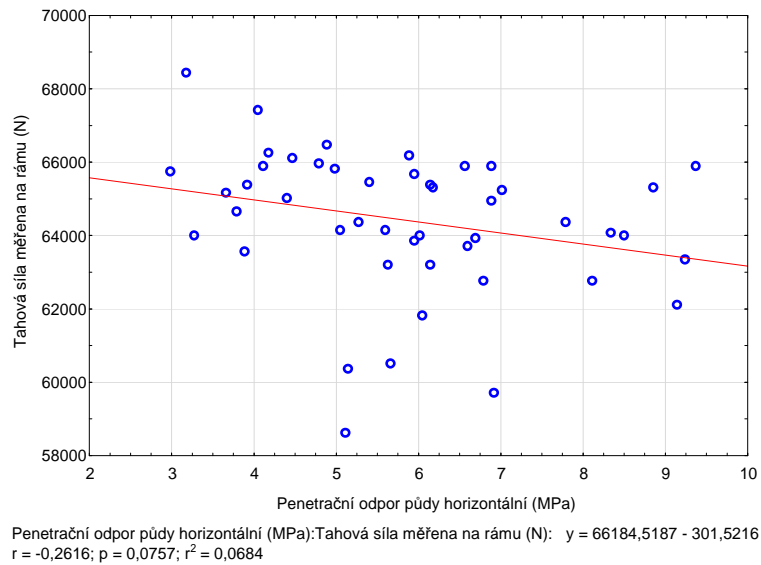
Pro další statistické analýzy naměřených dat byly porovnávány pouze závislosti tahových sil naměřených na rámu na fyzikálních vlastnostech půdy.

Výsledky měření vybraných veličin ve 4. měřicím úseku (viz Obrázek 83).



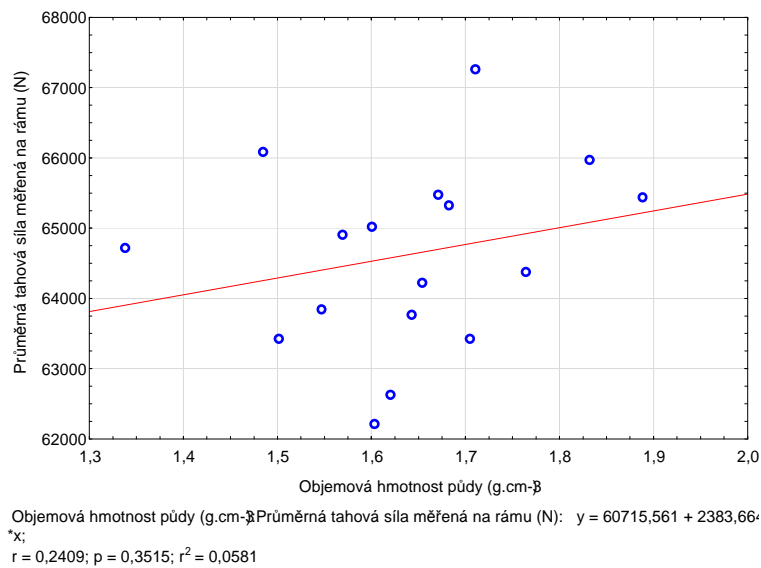
Obrázek 83: Graf zaznamenaných hodnot 4. měřicího úseku - průběhu tahových sil (N) měřených měřicím rámem, průběhu horizontálního penetračního odporu (MPa). Naměřené hodnoty objemových hmotností (g.cm⁻³) a hodnoty vertikálního penetračního odporu (MPa).

Podrobněji byla analyzovaná korelace tahové síly (N) měřené na rámu a horizontálního penetračního odporu (MPa). Z grafu na Obrázku 84 je patrné, že je s 95% spolehlivostí statisticky nevýznamná.



Obrázek 84: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na horizontálním penetračním odporu (MPa) ve 4. měřicím úseku.

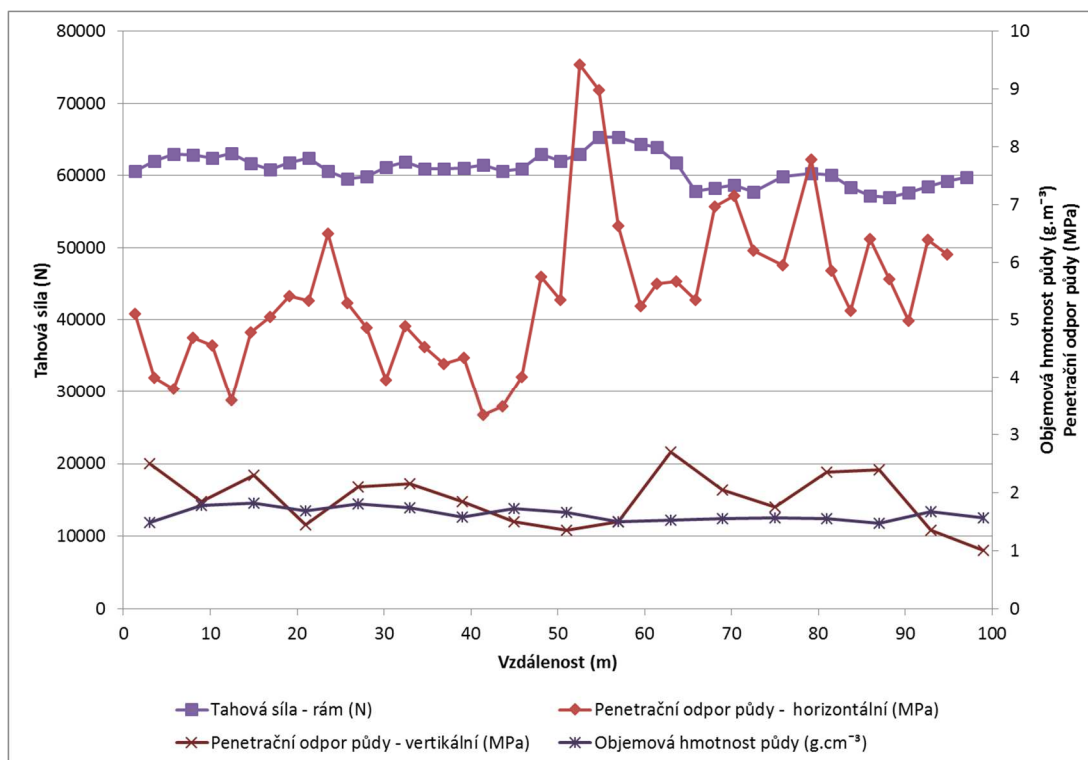
Také závislost průměrné tahové síly (N) a objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) je statisticky nevýznamná (viz graf na Obrázku 85).



Obrázek 85: Graf závislosti průměrné tahové síly měřené na rámu (N) na objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) ve 4. měřicím úseku.

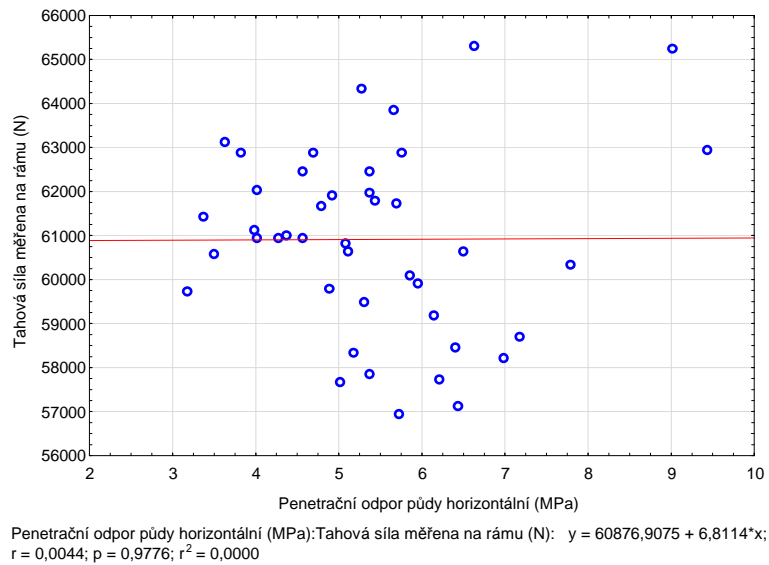
6.4.5 Statistická analýza naměřených dat 5. měřicího úseku

V grafu na Obrázku 86 jsou zaznamenány průběhy měření sledovaných veličin na 5. měřicím úseku.

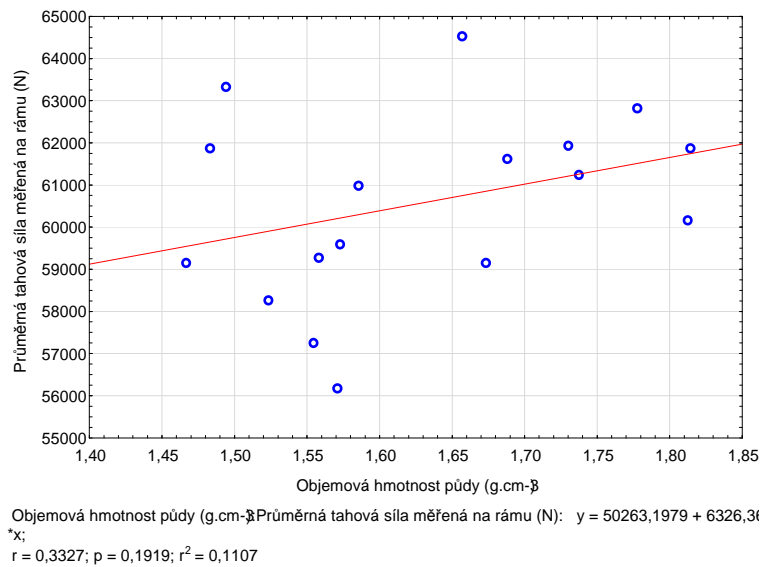


Obrázek 86: Graf zaznamenaných hodnot 5. měřicího úseku - průběhu tahových sil (N) měřených měřicím rámem, průběhu horizontálního penetračního odporu (MPa). Naměřené hodnoty objemových hmotností (g.cm⁻³) a hodnoty vertikálního penetračního odporu (MPa).

Byla provedena regresní a korelační analýza závislosti tahové síly (N) měřené pomocí rámu na horizontálním penetračním odporu (MPa) (viz graf na Obrázku 87) a na objemové hmotnosti půdy (g.cm⁻³) (viz graf na Obrázku 88). Statisticky významné závislosti prokázány nebyly.



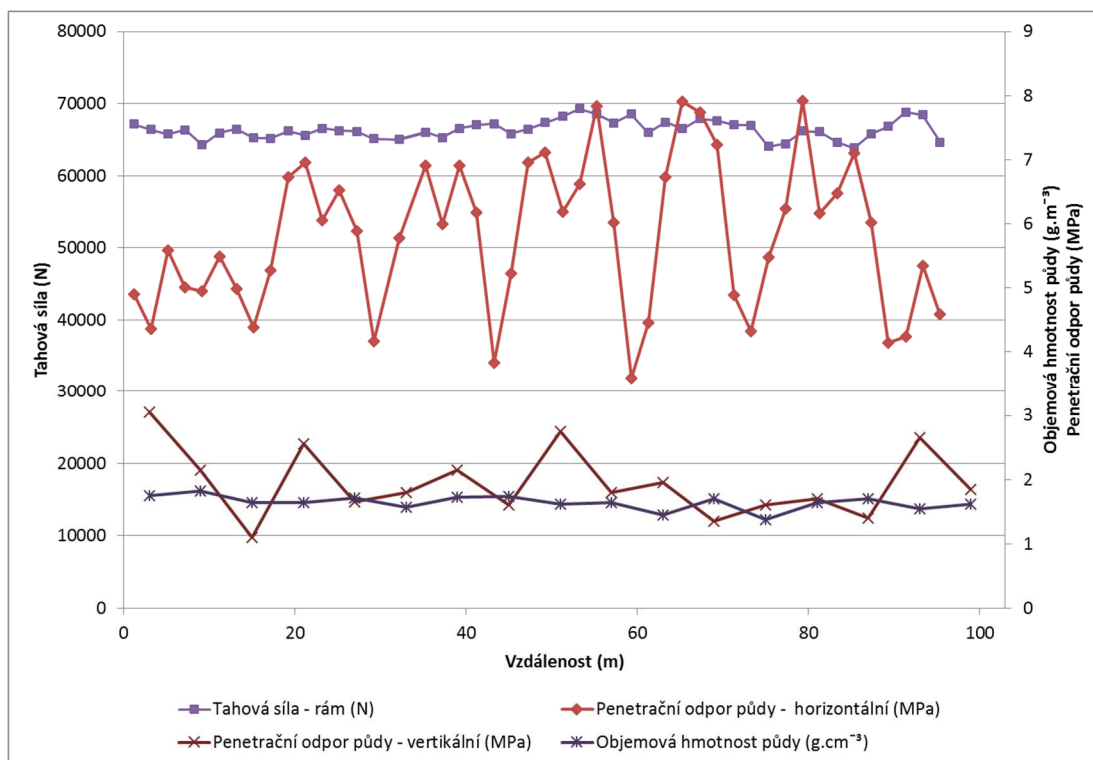
Obrázek 87: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na horizontálním penetračním odporu (MPa) na 5. měřicím úseku.



Obrázek 88: Graf závislosti průměrné tahové síly měřené na rámu (N) na objemové hmotnosti půdy (g.cm⁻³) na 5. měřicím úseku.

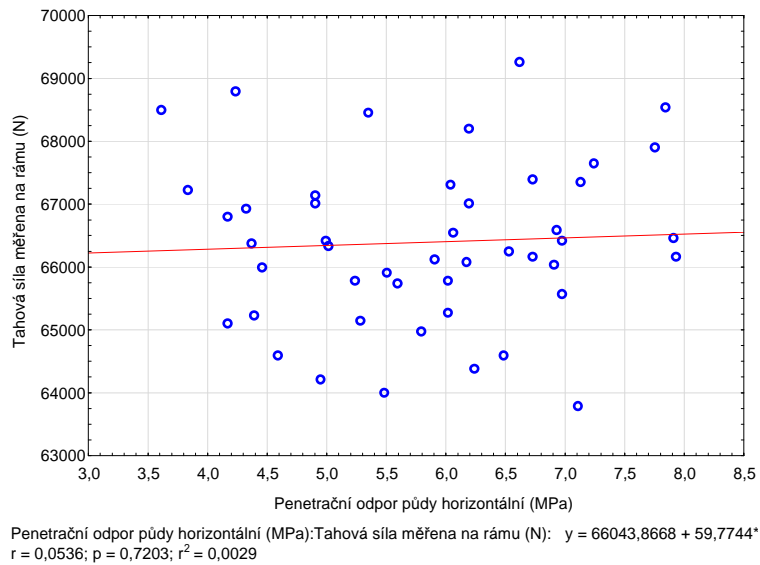
6.4.6 Statistická analýza naměřených dat 6. měřicího úseku

Na Obrázku 89 jsou zaznamenány průběhy měření vybraných veličin na 6. měřicím úseku.

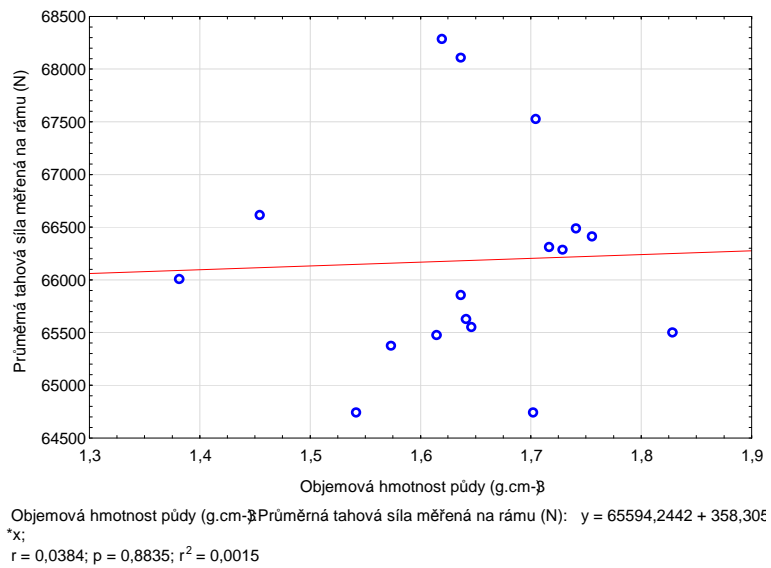


Obrázek 89: Graf zaznamenaných hodnot 6. měřicího úseku - průběhu tahových sil (N) měřených měřicím rámem, průběhu horizontálního penetračního odporu (MPa). Naměřené hodnoty objemových hmotností (g.cm⁻³) a hodnoty vertikálního penetračního odporu (MPa).

Opět byla provedena regresní a korelační analýza závislosti tahové síly (N) měřené pomocí rámu na horizontálním penetračním odporu (MPa) (viz graf na Obrázku 90) a na objemové hmotnosti půdy (g.cm⁻³) (viz graf na Obrázku 91). Výsledky analýzy pro 5. měřený úsek byly v souladu s výsledky měření z předchozích úseků. Statisticky významná závislost s 95% spolehlivostí prokázána nebyla.



Obrázek 90: Graf závislosti tahové síly měřené na rámu (N) na horizontálním penetračním odporu (MPa) v 6. měřicím úseku.



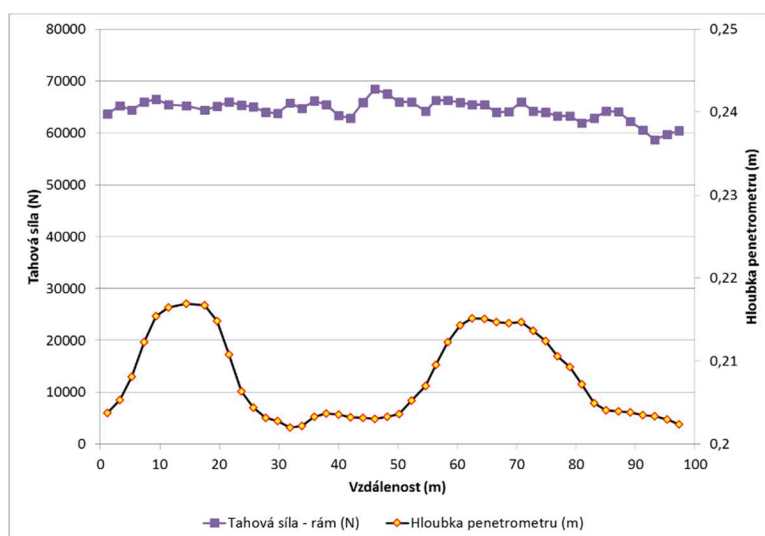
Obrázek 91: Graf závislosti průměrné tahové síly měřené na rámu (N) na objemové hmotnosti půdy (g.cm⁻³) v 6. měřicím úseku.

6.5 Statistická analýza závislosti tahových sil na hloubce zpracování půdy

Z důvodu neprokázaných závislostí tahové síly na vybraných (měřených) fyzikálních vlastnostech půdy byla dále podrobněji zkoumána závislost tahové síly na hloubce zpracování. Tyto analýzy bylo možné provést pouze na 4., 5. a 6. měřicím úseku z důvodu zapojení kypřiče přímo do měřicího rámu, na kterém byl umístěn ultrazvukový snímač vzdálenosti. Hloubka zpracování byla přepočtena hodnota vzdálenosti měřená z ultrazvukového snímače a k této hodnotě byla připočtena hloubka nastavená na horizontálním penetrometru, která byla totožná s hloubkou zpracování půdy kypřičem.

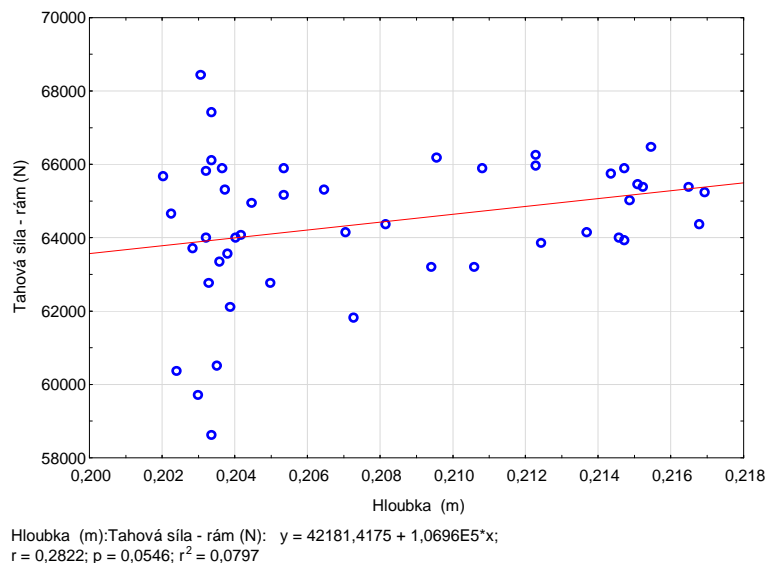
6.5.1 Statistická analýza závislosti velikosti tahových sil na hloubce zpracování půdy na 4. měřicím úseku

Průběh tahové síly (N) a hloubky zpracování (m) na čtvrtém měřicím úseku je zobrazen na Obrázku 92.



Obrázek 92: Graf průběhu naměřených hodnot tahových sil (N) a hloubky zpracování - hloubka penetrometru (m) na 4. měřicím úseku.

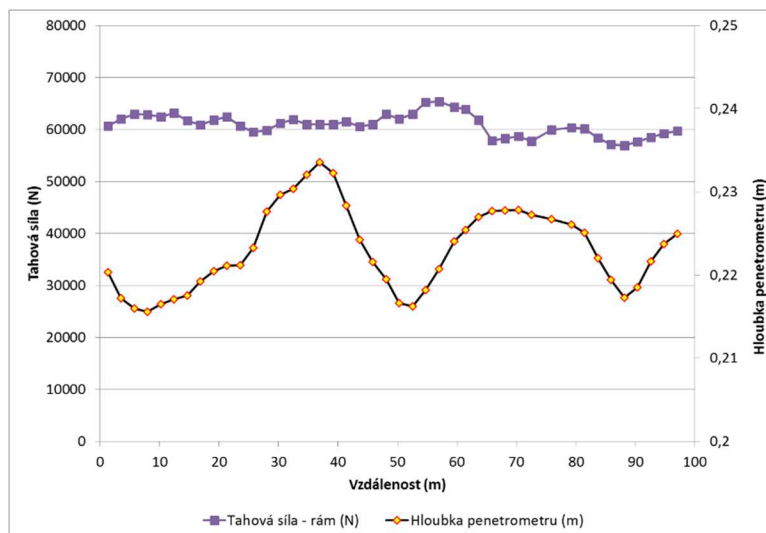
Z Obrázku 93 vyplývá, že závislost tahové síly na hloubce zpracování ve čtvrté měřicí úseku je na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ (95% spolehlivostí) statisticky nevýznamná a velmi slabá. Změny hodnot tahové síly v (N) jsou z necelých 8 % vysvětlitelné změnami hloubky zpracování (m).



Obrázek 93: Graf závislosti tahové síly (N) měřené měřicím rámem na hloubce zpracování (m) na 4. měřicím úseku.

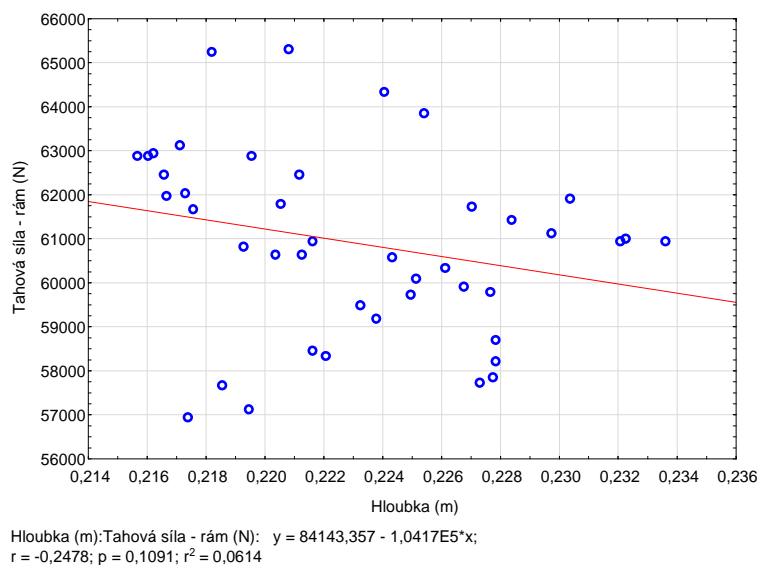
6.5.2 Statistická analýza závislosti velikosti tahových sil na hloubce zpracování půdy na 5. měřicím úseku

Průběh tahové síly (N) a hloubky zpracování (m) na 5. měřicím úseku popisuje graf na Obrázku 94.



Obrázek 94: Graf průběhu naměřených hodnot tahových sil (N) a hloubky zpracování - hloubka penetrometru (m) na 5. měřicím úseku.

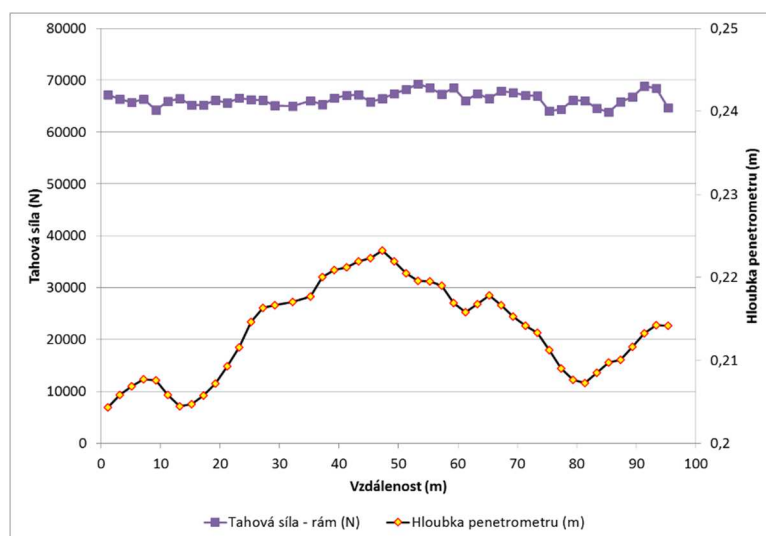
Z grafu Obrázku 95 vyplývá, že závislost tahové síly na hloubce zpracování v 5. měřicím úseku je taktéž statisticky nevýznamná.



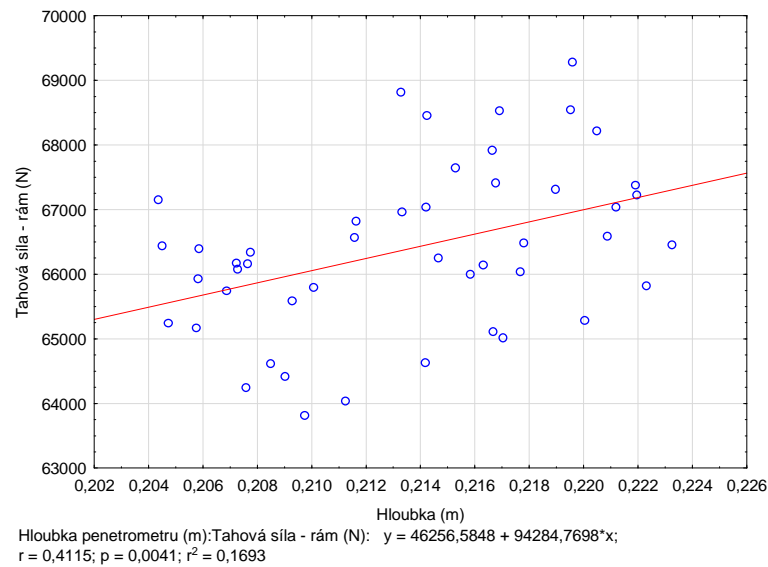
Obrázek 95: Závislosti tahové síly (N) měřené měřicím rámem na hloubce zpracování (m) na 5. měřicím úseku.

6.5.3 Statistická analýza závislosti velikosti tahových sil na hloubce zpracování půdy na 6. měřicím úseku

Průběh tahové síly (N) a hloubky zpracování (m) na 6. měřicím úseku je zobrazen grafem na Obrázku 96.



Obrázek 96: Graf průběhu naměřených hodnot tahových sil (N) a hloubky zpracování - hloubka penetrometru (m) na 6. měřicím úseku.



Obrázek 97: Závislost tahové síly (N) měřené měřicím rámem na hloubce zpracování (m) na 6. měřicím úseku.

Na 6. měřicím úseku byla prokázána statisticky významná závislost tahové síly měřené na rámu na hloubce zpracování. Závislost byla popsána lineární regresní funkcí (viz graf na Obrázku 97). Jak vyplývá z hodnoty koeficientu determinace, změny hodnot tahové síly (N) jsou pouze z 16,9 % vysvětlitelné změnami hloubky zpracování půdy. To znamená, že tahová síla je významně ovlivňována dalšími významnými faktory, na které zbývá 83 % nevysvětlené variability.

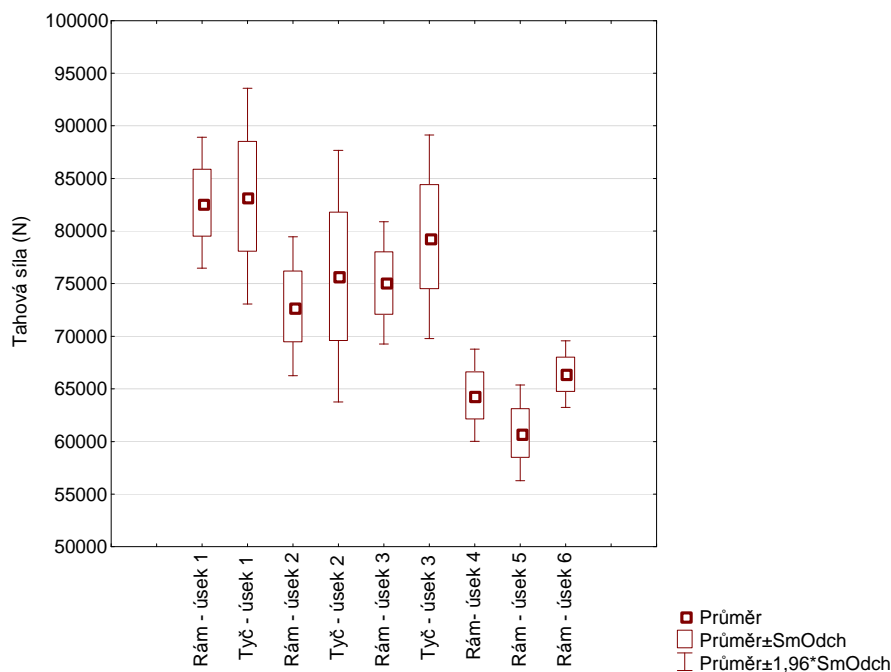
6.6 Celkové porovnání výsledků měření tahových sil na pokusném pozemku (6 měřicích úseků) ve Slovči

V Tabulce 22 jsou uvedeny základní statistické charakteristiky jednotlivých souborů naměřených hodnot tahových sil (N) na pokusném pozemku (zahloubený kypřič).

Tabulka 22: Vybrané základní statistické charakteristiky souborů naměřených hodnot tahových sil na pozemku ve Slovči, 30. října 2014.

Proměnná	Popisné statistiky -Tabulka celkový sumář tahových sil (N)						
	N platných	Průměr	Medián	Minimum	Maximum	Sm.odch.	Var.koef.
Rám - úsek 1	270	82701,54	83343,10	70999,30	89049,60	3175,669	3,839916
Tyč - úsek 1	270	83314,65	83774,70	69520,30	98215,60	5230,353	6,277831
Rám - úsek 2	390	72851,85	73158,95	60425,90	79351,20	3370,617	4,626674
Tyč - úsek 2	390	75718,84	76272,50	54863,20	90888,10	6100,507	8,056790
Rám - úsek 3	288	75077,79	74236,60	69521,60	81617,10	2972,496	3,959222
Tyč - úsek 3	288	79467,43	79053,25	67722,90	93720,30	4936,115	6,211495
Rám - úsek 4	289	64407,61	64605,50	53844,50	70590,70	2238,555	3,475606
Rám - úsek 5	268	60816,97	60909,45	50541,50	67116,40	2317,702	3,810947
Rám - úsek 6	287	66401,06	66299,90	62727,40	70842,20	1614,743	2,431804

Pro grafické zobrazení byly zvoleny krabicové diagramy (viz graf na Obrázku 98). Z grafu je patrný rozdíl středních hodnot. Výsledky z měření tahovou tyčí vykazují vyšší střední hodnoty. Taktéž naměřené hodnoty tahových sil (N) u 4., 5. a 6. měřicího úseku byly nižší než hodnoty z měření 1 - 3, kde pracovala souprava měřená včetně tahové tyče a taženého traktoru.



Obrázek 98: Krabicový graf tahových sil (N) jednotlivých měřicích jízd zaznamenaných z tahové tyče a měřicího rámu.

Dále je zřejmé, že variabilita hodnot tahové síly měřené tahovou tyčí je vyšší než u měřicího rámu. Pro verifikaci těchto závěrů byly použity vybrané metody statistické indukce, zejména z oblasti testování statistických hypotéz.

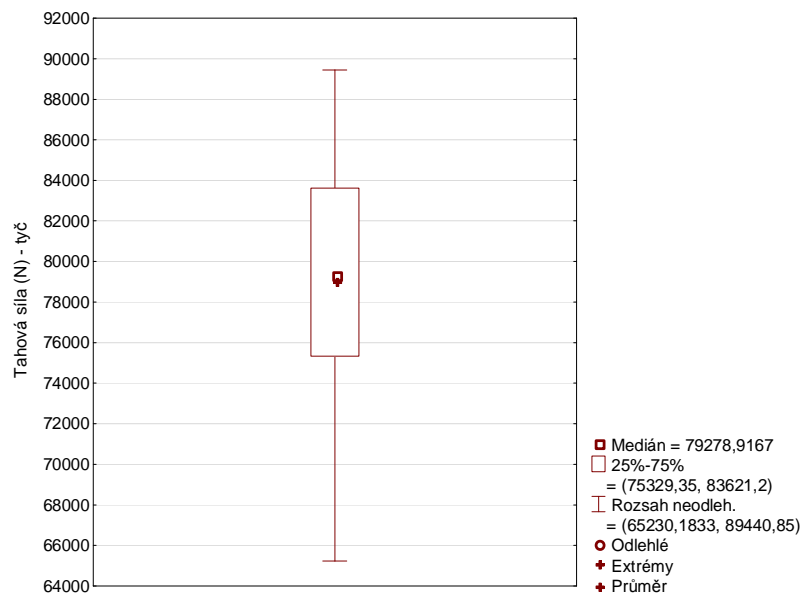
Leveneovým testem homogenity rozptylů (viz Tabulka 22) s 95% spolehlivostí byla prokázána heterogenita rozptylů, tzn., že variabilita naměřených hodnot se průkazně statisticky liší.

Tabulka 23: Leveneův test homogenity rozptylů naměřených hodnot tahových sil (N).

Proměnná	Leveneův test homogenity rozptylů (Tabulka celkový sumář tahových sil) Označ. efekty jsou význ. na hlad. $p < ,05000$							
	SČ efekt	SV efekt	PČ efekt	SČ chyba	SV chyba	PČ chyba	F	p
Tahová síla (N)	1,212488E+09	1	1,212488E+09	4,263993E+10	2738	15573387	77,85639	0,000000

Jak vyplývá z Tabulky 22 a Obrázku 98 variabilita naměřených hodnot naměřených na tahové tyči je průměrně dvojnásobná oproti variabilitě hodnot naměřených na měřicím rámu. Z výše uvedeného lze usuzovat, že měřicí rám je schopen měřit s menší variabilitou tzn. s menším rozkmitem naměřených hodnot. Z praktického hlediska se variabilita naměřených hodnot pohybuje na nízké úrovni a rozdíl ve variabilitě (měřeno variačním koeficientem) je pouze do výše 4 %.

Z grafu na Obrázku 99 vyplývá, že průměrná hodnota tahové síly z prvních třech měřicích úseků je prakticky shodná s hodnotou mediánu tahové síly z těchto úseků. Z čehož vyplývá rovnoměrné rozdělení naměřených hodnot a absence extrémních či odlehlých pozorování. Obdobný výsledek byl získán i z měření měřicím rámem.



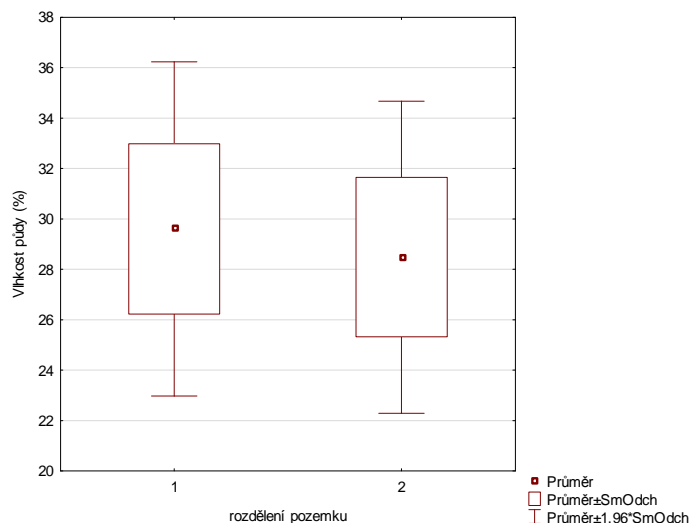
Obrázek 99: Porovnání středních hodnot tahové síly (N), (mediánu a průměru) z prvních třech měřicích úseků měřených tahovou tyčí.

6.7 Analýza fyzikálních vlastností na pokusném pozemku ve Slovči

Výsledky měření fyzikálních vlastností půdy na pokusném pozemku ve Slovči naznačovaly, že pozemek není z hlediska fyzikálních vlastností zcela homogenní. Na základě výsledků fyzikálních charakteristik půdy byl pokusný pozemek rozdělen do dvou částí (západní a východní). Soubory naměřených hodnot z těchto dvou částí pozemku byly dále mezi sebou statisticky testovány. Rozdělení bylo provedeno tak, že do první (východní) části byly zařazeny hodnoty naměřené z odměrných míst 1-51 a místa č. 100 a těmto místům odpovídající částí měřicích úseků. Do druhé (západní) části byly zařazeny naměřené hodnoty z odběrných míst 52 -102 mimo hodnoty z místa č. 100 a těmto místům odpovídající částí měřicích úseků (viz Obrázek 25).

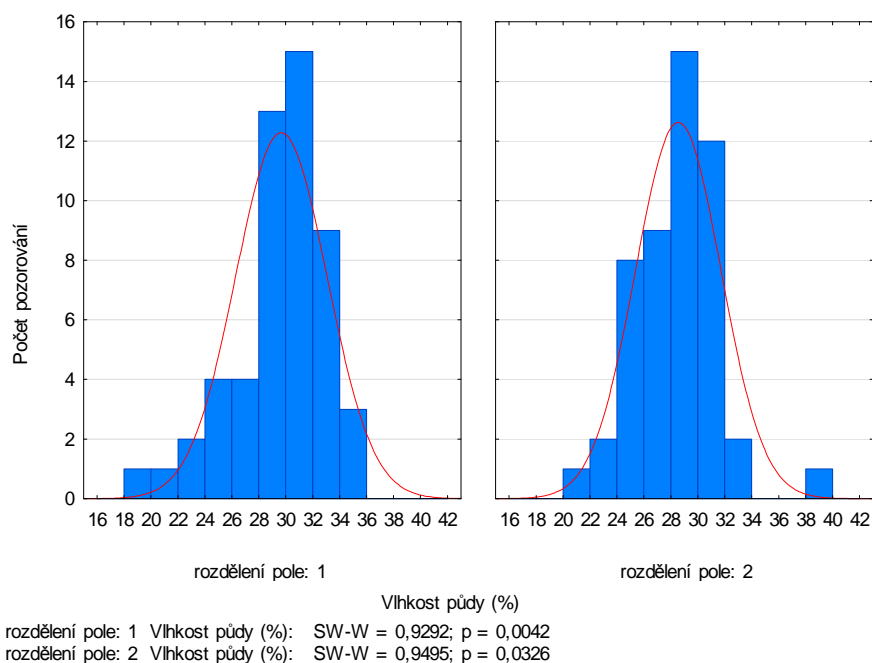
6.7.1 Testování hypotézy o rozdílu vlhkosti půdy na první a druhé části pokusného pozemku

Z odebraných vzorků Kopeckého válečků byla vyhodnocena půdní vlhkost (%). Na Obrázku 100 jsou pomocí krabicových grafů zobrazeny výsledky měření vlhkosti půdy (%). Průměrná vlhkost na první východní části pozemku byla vyšší než na druhé, západní části.



Obrázek 100: Krabicové grafy naměřených hodnot vlhkosti půdy (%) na první (východní) a druhé (západní) části pozemku.

Statistická významnost rozdílů ve vlhkosti pozemku byla otestována Mann-Whitneyovým U Testem, který je neparametrickou obdobou dvouvýběrového t-testu, který nemohl být použit z důvodu nesplnění podmínky normálního rozdělení obou testovaných souborů (viz Obrázek 101).



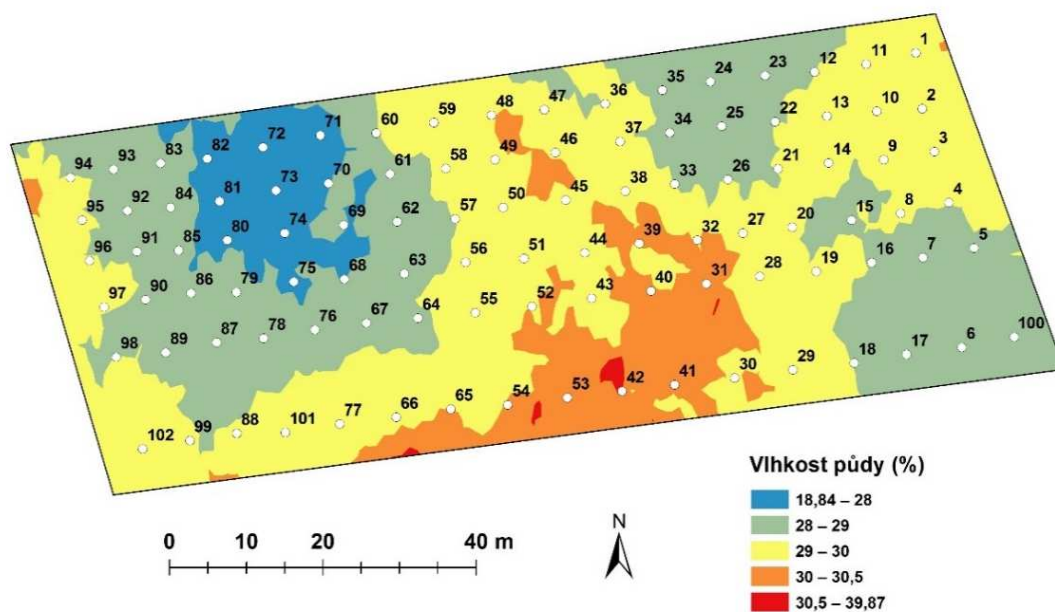
Obrázek 101: Rozdělení vlhkosti (%) na obou částech pozemku a Shapiro-Wilksův test normality.

Mann-Whitneyův test (viz Tabulka 23), prokázal statisticky významný rozdíl středních hodnot vlhkosti půdy mezi dvěma částmi pokusného pozemku.

Tabulka 24: Výsledky Mann-Whitneyova U Test vlhkostí půdy (%) na pozemku rozděleném do dvou částí.

Proměnná	Mann-Whitneyův U Test									
	Dle proměn. rozdělení pozemku (1 a 2 část pozemku) Označené testy jsou významné na hladině $p < 0,05000$									
	Sčet poř. skup. 1	Sčet poř. skup. 2	U	Z	p-hodn.	Z upravené	p-hodn.	N platn. skup. 1	N platn. skup. 2	2*1str. přesné p
Vlhkost půdy (%)	3031,000	2222,000	947,0000	2,359633	0,018294	2,359660	0,018292	52	50	0,017842

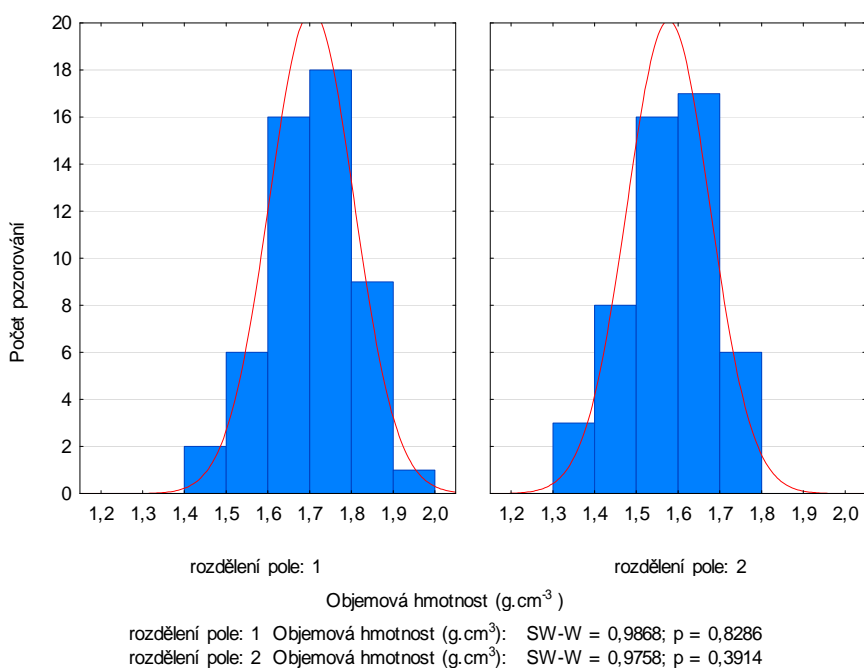
Tento rozdíl je možné rovněž posoudit z mapy pokusného pozemku - vlhkosti půdy (viz Obrázek 102), ze které je patrné, že první část pozemku (vzorky 1-51, 100) vykazuje oblasti s vyšší vlhkostí než část druhá (vzorky 52-102, bez 100).



Obrázek 102: Mapa znázornění vlhkostí půdy (%) pokusného pozemku ve Slovči.

6.7.2 Testování hypotézy o rozdílu objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) na první a druhé části pokusného pozemku

Rozdíl v průměrné objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) na dvou částech pokusného pozemku byl otestován dvouvýběrovým t-testem. Testované soubory vykázaly normální rozdělení dat (viz Obrázek 103). Prokázána byla s 95% spolehlivostí shoda ve variabilitě hodnot objemové hmotnosti půdy a průkazný statistický rozdíl (neshoda) v průměrné objemové hmotnosti naměřené na první (východní) a druhé (západní) části pozemku (viz Tabulka 24).

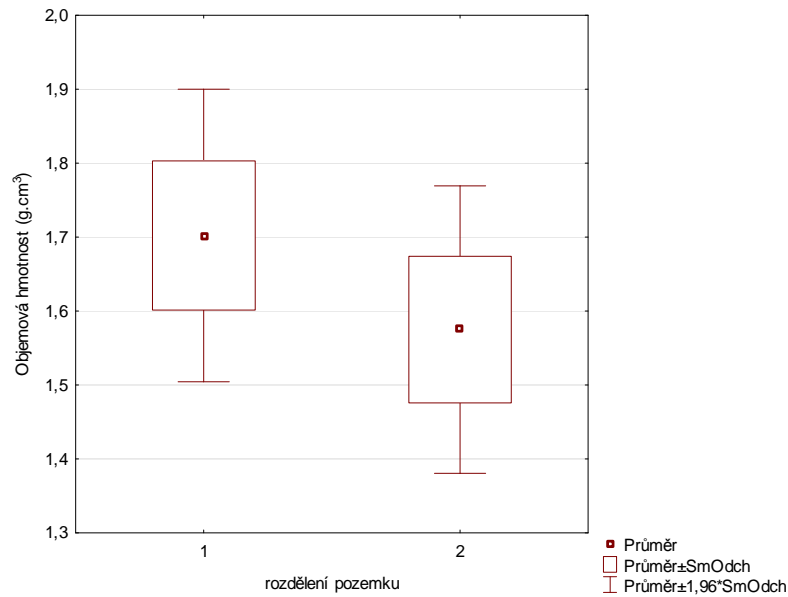


Obrázek 103: Rozložení hodnot objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) na obou částech pozemku a Shapiro-Wilksův test normality.

Tabulka 25: Parametrický dvouvýběrový t-test objemové hmotnosti půdy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) na pozemku rozděleném do dvou částí.

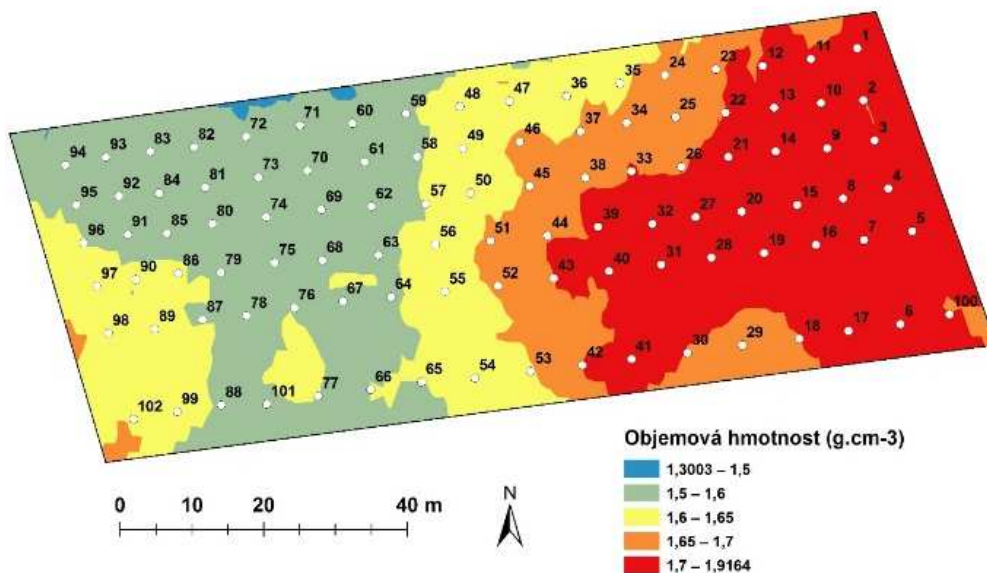
Proměnná	t-testy; grupováno:rozdělení pole (1 a 2 část pozemku)										
	Průměr 1	Průměr 2	t	sv	p	Poč.plat 1	Poč.plat. 2	Sm.odch. 1	Sm.odch. 2	F-poměr Rozptyly	p Rozptyly
Objemová hmotnost ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1,702254	1,574894	6,424700	100	0,000000	52	50	0,100952	0,099173	1,036189	0,902009

Výsledky dvouvýběrového t-testu (viz Tabulka 24) potvrzují i krabicové diagramy na Obrázku 104 a mapa na Obrázku 105.



Obrázek 104: Krabicové grafy naměřených hodnot objemové hmotnosti (g.cm^{-3}) v první (východní) a druhé (západní) části pokusného pozemku ve Slovči.

Rozdíl je možné rovněž posoudit z mapy pokusného pozemku – objemové hmotnosti půdy (viz Obrázek 105), ze které je patrné, že druhá (západní) část pozemku vykazuje nižší objemovou hmotnost půdy než část první (východní).



Obrázek 105: Mapa znázornění objemových hmotností půdy (g.cm^{-3}) pokusného pozemku ve Slovči.

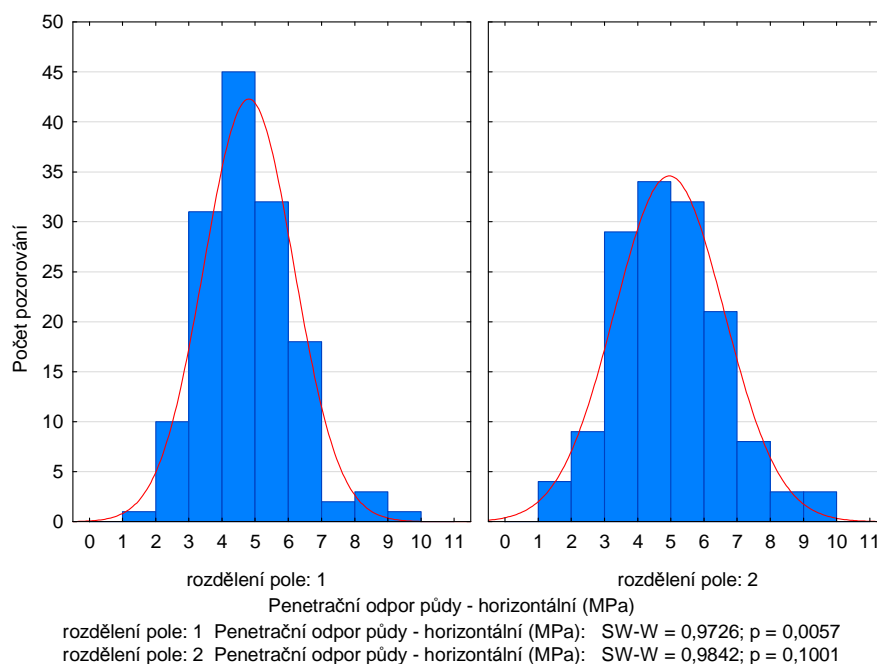
6.7.3 Testování hypotézy o rozdílu horizontálního penetračního odporu půdy (MPa) na první a druhé části pokusného pozemku

Pro ucelenou charakteristiku fyzikálních vlastností pokusného pozemku ve Slovči rozděleného do dvou částí byly porovnány střední hodnoty horizontálního penetračního odporu (MPa). Rozdíl byl testován Man-Whitneyovým U testem (viz Tabulka 25). Z výsledků je patrné, že nebyl prokázán s 95% spolehlivostí průkazný statistický rozdíl v horizontálním penetračním odporu mezi východní a západní částí pozemku.

Tabulka 26: Výsledky Mann-Whitneyova U Testu rozdílu horizontálního penetračního odporu (MPa) na pozemku ve Slovči rozděleném do dvou částí.

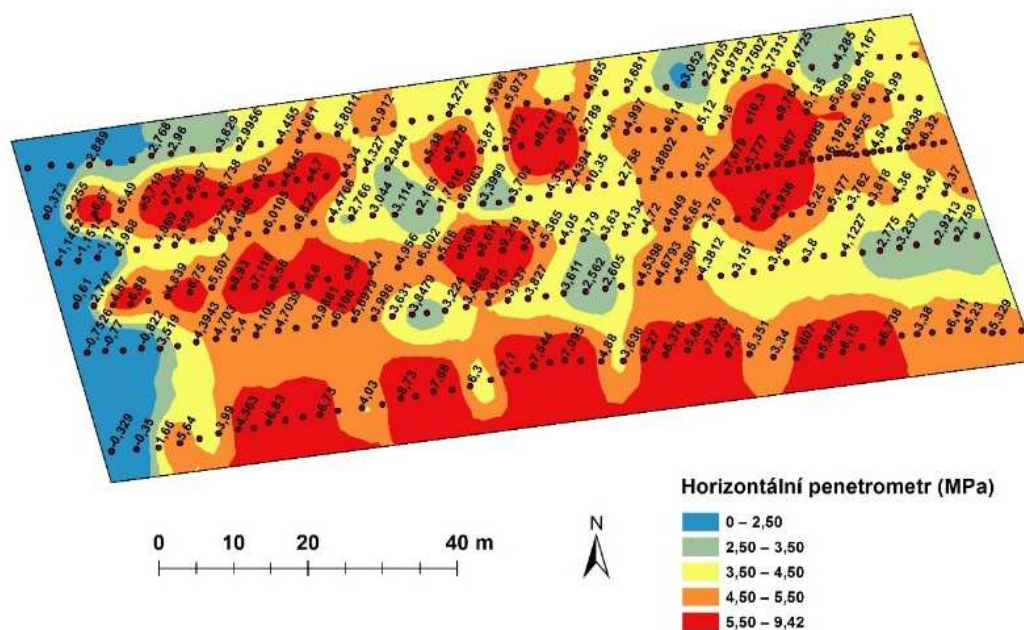
Mann-Whitneyův U Test									
Dle proměn. rozdělení pozemku (1 a 2 část pozemku)									
Označené testy jsou významné na hladině $p < ,05000$									
Proměnná	Sčet poř. skup. 1	Sčet poř. skup. 2	U	Z	p-hodn.	Z upravené	p-hodn.	N platn. skup. 1	N platn. skup. 2
Penetrační odpor půdy - horizontální (MPa)	20051,00	20990,00	9755,000	-0,670635	0,502453	-0,670635	0,502453	143	143

Shapiro-Wilksův test prokázal normalitu rozdělení pouze u hodnot naměřených na druhé (západní) části pozemku (viz Obrázek 106).



Obrázek 106: Rozložení hodnot horizontálního penetračního odporu půdy (MPa) na obou částech pozemku a Shapiro-Wilksův test normality.

Výsledky Mann-Whitneyova testu plně korespondují s vizualizační mapou na Obrázku 107.

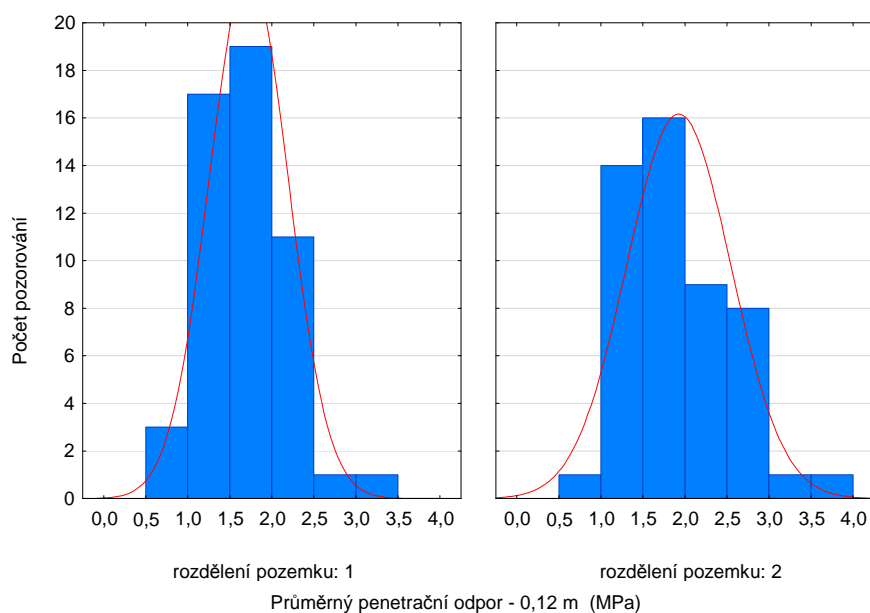


Obrázek 107: Mapa znázornění horizontálních penetračních odporů (MPa) pokusného pozemku ve Slovčí.

6.7.4 Testování hypotézy o rozdílu vertikálního penetračního odporu (MPa) v hloubce 0,12 m na první a druhé části pokusného pozemku

Průměrný penetrační odporu (MPa) v hloubce 0,12 m byl stanoven jako aritmetický průměr naměřených hodnot třech penetračních měření v hloubce 0,12 m v každém měřicím místě 1 - 102.

Z Obrázku 108 vyplývá, že hodnoty průměrného penetračního odporu (MPa) na druhé (západní) části pozemku nevykazují normální rozdělení.



rozdělení pozemku: 1 Průměrný penetrační odpor - 0,12 m (MPa): SW-W = 0,9858; p = 0,7885
 rozdělení pozemku: 2 Průměrný penetrační odpor - 0,12 m (MPa): SW-W = 0,947; p = 0,0257

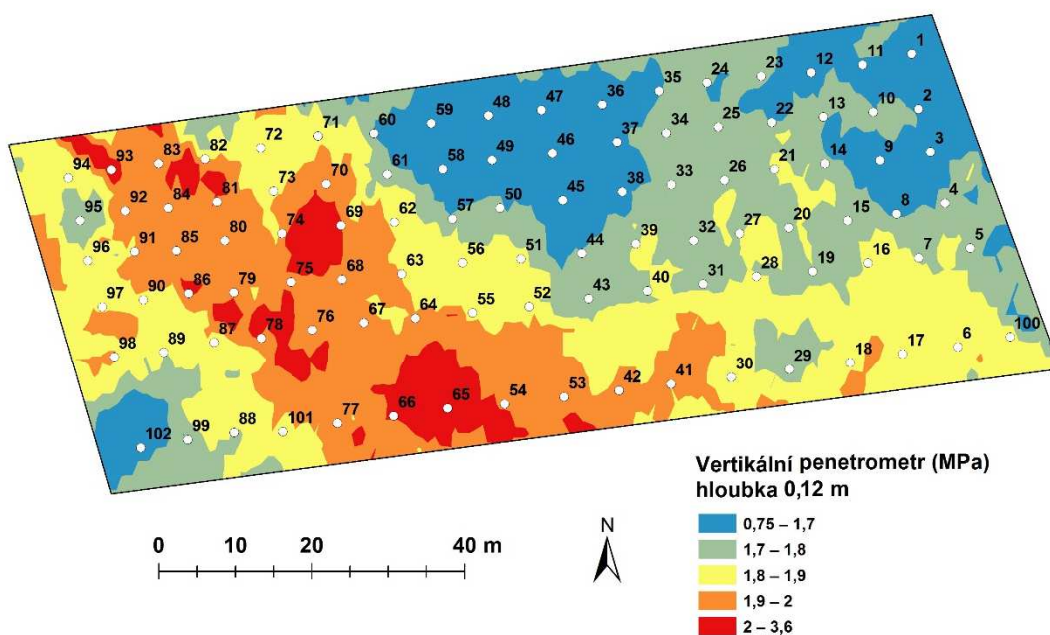
Obrázek 108: Rozložení hodnot průměrného vertikálního penetračního odporu (MPa) v hloubce 0,12 m na obou částech pozemku a Shapiro-Wilksův test normality.

Z tohoto důvodu byl pro otestování rozdílu středních hodnot průměrného penetračního odporu v hloubce 0,12 m zvolen opět neparametrický Mann-Whitneyův test (viz Tabulka 27). Tímto testem nebyl prokázán statisticky významný rozdíl v penetračním odporu měřeném v obou částech pozemku.

Tabulka 27: Výsledky Mann-Whitneyova U Testu rozdílu vertikálního penetračního odporu (MPa) v hloubce 0,12 m na rozděleném pozemku ve Slovinci.

Proměnná	Mann-Whitneyův U Test								
	Sčt. poř. skup. 1	Sčt. poř. skup. 2	U	Z	p-hodn. upravené	p-hodn.	N platn. skup. 1	N platn. skup. 2	
Průměrný penetrační odpor - 12 cm (MPa)	2480,000	2773,000	1102,000	-1,32206	0,186148	-1,32281	0,185900	52	50

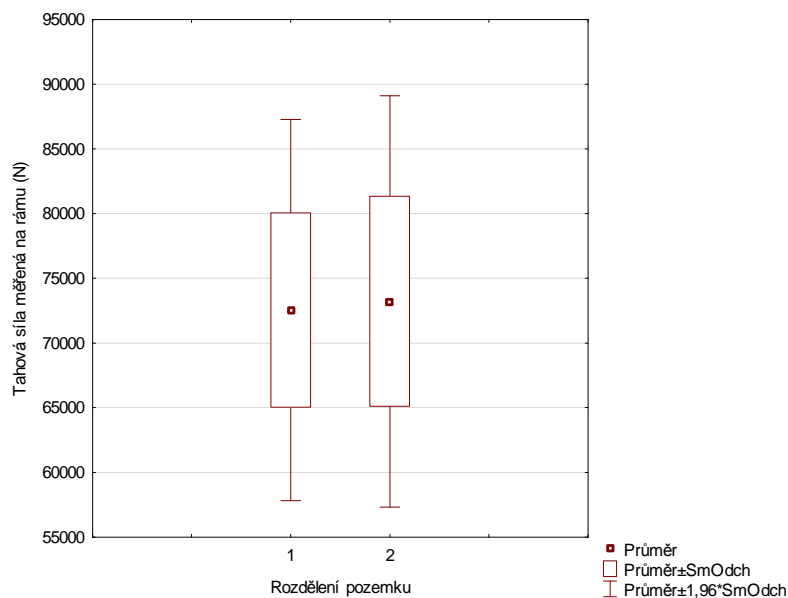
I když statisticky nebyl prokázán rozdíl v penetračním odporu měřeném v hloubce 0,12 m na první (východní) a druhé (západní) části pozemku, tak vizualizační mapa na Obrázku 109 naznačuje určitý rozdíl, kde na západní části pozemku převažují oblasti s vyššími hodnotami penetračního odporu než v části východní.



Obrázek 109: Mapa znázornění vertikálního penetračního odporu (MPa) měřeného v hloubce 0,12 m pokusného pozemku ve Slováči.

6.7.5 Testování hypotézy o rozdílu tahové síly (N) na první a druhé části pokusného pozemku

Výsledky měření tahových sil (N) na první a druhé části pokusného pozemku byly vizualizovány pomocí krabicových grafů (viz Obrázek 110).

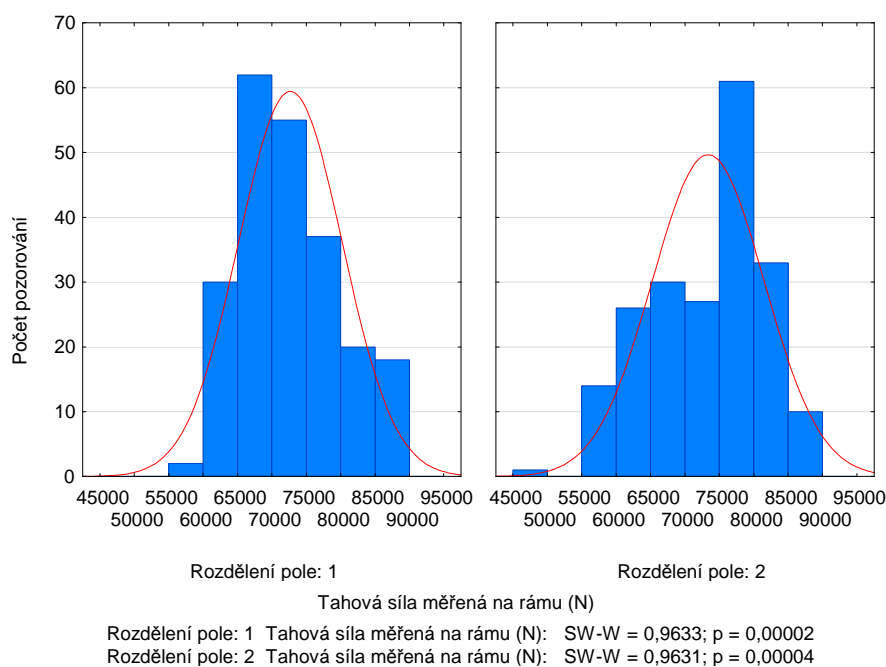


Obrázek 110: Krabicové grafy naměřených hodnot tahových sil (N) měřených měřicím rámem na první (východní) a druhé (západní) části pokusného pozemku.

Při pohledu na Krabicové grafy nebylo možno očekávat prokázání rozdílu ve středních hodnotách ani ve variabilitě naměřených hodnot. Rozdělení obou testovaných souborů se statisticky významně lišilo od normálního rozdělení (viz Obrázek 111).

Tabulka 28: Výsledky Mann-Whitneyova U Testu rozdílu tahové síly (N) měřené na rámu na rozděleném v pozemku ve Slovči.

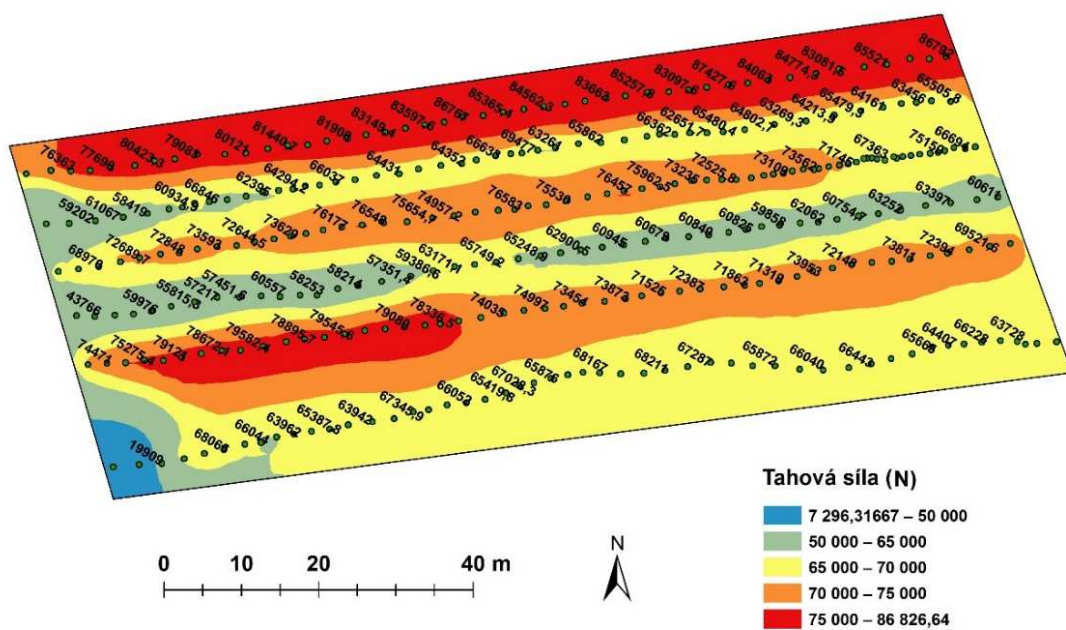
Proměnná	Mann-Whitneyův U Test						
	Sčt poř. skup. 1	Sčt poř. skup. 2	U	Z	p-hodn.	N platn. skup. 1	N platn. skup. 2
Tahová síla měřená na rámu (N)	45943,50	45007,50	20743,50	-1,48161	0,138444	224	202



Obrázek 111: Shapiro-Wilksův test normality naměřených hodnot tahové síly měřené na rámu (N) první a druhé části pokusného pozemku.

Man-Whitneyův test neprokázal statisticky významný rozdíl středních hodnot tahové síly na první a druhé části pozemku (viz Tabulka 28).

Mapa na Obrázku 112 znázorňuje oblasti s naměřenými hodnotami tahových sil (N). Z této mapy není jednoznačně patrný rozdíl v hodnotách tahových sil (N) ve východní nebo v západní části pokusného pozemku, jak bylo taktéž verifikováno výše uvedenými statistickými testy. Z mapy lze vyčíst oblasti v trajektoriích jízd na 1., 2. a 3. měřicím úseku s vyššími hodnotami tahové síly, kde pracovala souprava dvou traktorů (tahové síly jak samotného kypřiče, tak taženého traktoru).



Obrázek 112: Mapa znázornění tahových sil (N) měřených měřicím rámem pokusného pozemku ve Slováči.

7 Souhrnná diskuse k dosaženým výsledkům

Během prvního polního měření v Pískové Lhotě dne 9. dubna 2013 došlo po první měřicí jízdě ke zničení tenzometru, kterým byla osazena první námi použitá varianta tahové tyče. Jednalo se o fatální chybu při jejím návrhu. Na základě podobných dříve použitých měřicích zařízení (Pražan a Podpěra, 2011) jsme se rozhodli navrhnout a sestavit tu nejjednodušší variantu upevnění tahového tenzometrického čidla do měřicí tyče. Chybně jsme předpokládali, že jiná síla než ve směru osy tenzometrického čidla by se během polního měření při dodržení metodiky měření neměla objevit. Tak tomu i bylo během první měřicí jízdy. Podcenili jsme však nutnost otáčení měřicí soupravy na souvratích a problémy s koordinací obsluh obou traktorů. Výsledkem toho bylo rychlé zničení tahového čidla v důsledku jeho ohnutí.

Z tohoto důvodu bylo čidlo při dalších měřeních vestavěno do kovové ochranné klece tak, jak byla v minulosti také již použita autory Preč a kol. (2008). Při opakování tohoto měření v Pískové Lhotě dne 10. října 2013 se již podobná chyba neopakovala a měřicí aparatura pracovala odpovídajícím způsobem. Zařízení spolehlivě měřilo tahové síly 80 kN i více a při měření ve Slovci dne 30. října 2014 byly měřeny tahové síly lehce pod 100 kN, což znamenalo, že použité tenzometrické čidlo pracovalo přibližně v polovině svého měřicího rozsahu. Čidlo použité Pražanem a Podpěrou (2011) dokáže měřit pouze do 100 kN. Naproti tomu čidlo použité Prečem a kol. (2008) je schopné měřit až do 500 kN, což je ještě větší rozsah, než u čidla námi použitého. Zde je třeba zdůraznit, že jednoduchou úpravou námi použité tahové tyče, která by spočívala v přerezáni závitů a použití jiného tenzometrického čidla, bychom se mohli dostat i na vyšší hodnoty tahové síly. Pro účely této práce však tato úprava nebyla nutná.

Velkou nevýhodou použití tahové tyče se kromě její náchylnosti ke zničení při otáčení poměrně těžce manipulovatelné měřicí soupravy jevila také nutnost použití druhého, traktoru - prakticky pouze nosiče náradí. Nutnost odečítání valivého odporu samotného traktoru, stejně jako problematické otáčení celé soupravy vedlo k myšlence použití měřicího rámu.

Měřicí rám je také známé a v minulosti používané zařízení (např. Podpěra a kol., 2009). Tyto měřicí rámy však zpravidla měří síly ve všech třech bodech tříbodového závěsu, což je jistě přesnější, ale také komplikovanější. Pro rychlou orientaci firmy vyrábějící stroje

na zpracování půdy, zpravidla postačuje znalost celkové výslednice tahové síly. Proto námi navržený rám používá jednodušší konstrukci opět pouze s použitím jednoho tahového čidla. To vede k možnosti poměrně jednoduchého měření i vyšších tahových sil, než které je možno měřit rámem Podpěry a kol., (2013) (50 kN). Prokázalo se, že navržený rám bez problémů měřil síly kolem 100 kN s tím, že maximum je opět dáno typem použitého tenzometru (v našem případě opět 200 kN).

Z uvedených měření a výsledků v této práci je zřejmé, že nově vyvinutý měřicí rám je z hlediska přesnosti měření srovnatelnou alternativou s tahovou tyčí. Jeho nespornou výhodou je především to, že k měření tahových sil dostačuje pouze jeden traktor (tažený traktor odpadá) a také to, že manipulace se soupravou vybavenou měřicím rámem na pozemku při měření je podstatně jednodušší. Tím je měření operativnější, což je v praxi rovněž důležité.

Při měření v Pískové Lhotě ze dne 10. října 2013 byl zjištěn jednoznačný vliv druhu zpracovávané půdy na tahovou sílu, kterou je nutno vyvinout pro práci kypřiče. Při menším zahloubení kypřiče se vzrůstající pracovní rychlostí vzrůstala i tahová síla, což bylo zcela v souladu s obecně uznávanou Gorjačkinovou teorií (např. Kumhála a kol., 2007). Při větším zahloubení kypřiče však už tato závislost platit přestala a to jak pro písčitou, tak pro jílovitou půdu. Radličkové kypřiče se při práci podle našich měření z tohoto pohledu chovají jinak, než pluh, pro které patrně byla Gorjačkinova rovnice navržena.

Ostatní závěry z měření byly v souladu se zjištěními, které publikovali další autoři. Např. Chen a kol. (2013) při měřeních s jednou šípovou radličkou rovněž zjistil nejnižší potřebu tahové síly při zpracování hrubé písčité půdy a nejvyšší u půdy písčitohlinité, což je v dobrém souladu s našimi zjištěními při použití radličkového kypřiče. K podobným výsledkům došel i Paul (1992) s tím, že upozornil rovněž na vliv vlhkosti půdy. Na skutečnost, že tahová síla je ovlivněna hlavně půdními podmínkami (mj. půdním typem) upozornili Arvidsson a kol., (2004) a Schutte a Kutzbach, (2003). To je rovněž v souladu s naměřenými hodnotami uvedenými v této práci.

Experimenty ve Slovči dne 30. října 2014 byl především zaměřen na porovnání výsledků měření tahové síly potřebné k tažení strojů na zpracování půdy pomocí tahové tyče

a měřicího rámu s tím, že jsme se před vlastním měřením snažili charakterizovat co nejlépe fyzikální vlastnosti půdy před jejím zpracováním.

Výsledky měření prokázaly vhodnost použití měřicího rámu s tím, že získané výsledky nebyly úplně identické. Při vyhodnocení záznamů celé měřicí jízdy (včetně zahlubování a vyhlubování kypříče) dosahovaly koeficienty determinace závislosti údajů z tahové tyče a měřicího rámu hodnot vyšších než $r^2 = 0,98$. V případě porovnání výsledků měření tahových sil pouze při zahloubeném stroji již byla tato závislost nižší, stále však dosahoval koeficient determinace hodnot $r^2 = 0,85$ a vyšších.

Absolutní hodnoty tahových sil měřené tahovým rámem vycházely statisticky významně nižší než ty, které byly měřeny tahovou tyčí. To platilo jak pro vyhodnocení záznamů celé měřicí jízdy (rozdíl se pohyboval v rozmezí od 2,1 % do 5,4 %), tak pro vyhodnocení záznamů tahových sil pouze při zahloubení stroje (kdy hodnoty naměřené tahovou tyčí byly o 0,8 % až do 5,5 % vyšší než hodnoty naměřené měřicím rámem). Tento rozdíl se dá vysvětlit rozdílnou kalibrací jednotlivých měřicích zařízení.

Zajímavé jsou také rozdíly zjištěné v rozptylu naměřených hodnot. Nižší rozptyl naměřených hodnot tahové síly byl vždy pozorován při měření prostřednictvím měřicího rámu. Rozdíl ve variabilitě (měřené variačním koeficientem) je velmi nízký, pohybující se do 3,4 %. Což je z praktického hlediska zanedbatelné. Důvodem vyšší variability hodnot měřené tahovou tyčí může být přesnější měření a zaznamenávání naměřených hodnot, kdy s tahovou tyčí byly hodnoty zaznamenány se vzorkovací frekvencí až 500 Hz a simultánně poté přepočteny na 6 Hz s rozlišením 24 bit oproti měřicímu rámu, kdy byly hodnoty tahových sil zaznamenávány se vzorkovací frekvencí 6 Hz při rozlišení 12 bit. Tyto rozdíly mohly ovlivnit výsledky měření. Otázkou zůstává, zda pro tyto účely provozního měření je měření s tak velkou variabilitou naměřených hodnot žádoucí.

Přestože námi zjištěné rozdíly ve funkci obou porovnávaných zařízení jsou statisticky významné, z praktického pohledu rozdíl maximálně o 5,4 % v tahové síle a o 3,4 % ve variabilitě nehraje pro účely měření tahových sil výrobci strojů na zpracování půdy zásadní roli ve srovnání s relativní jednoduchostí a tím i operativností měření při použití měřicího rámu.

Při snahách o zjištění korelací mezi měřenou tahovou silou a sledovanými fyzikálními vlastnostmi půdy je nutno konstatovat, že žádné významné závislosti překvapivě nebyly

zjištěny. Faktorem, ovlivňujícím tyto výsledky měření, mohla být hloubka zpracování. Výsledky analýza závislosti tahové síly na hloubce zpracování neprokázaly významnější korelaci. Tyto naměřené výsledky lze odůvodnit velmi malým rozsahem změny hloubky a vstupu dalších možných faktorů, které mohly tahovou sílu dále ovlivnit. Taktéž fakt, že hloubka zpracování byla měřena laserovým paprskem od měřiče k povrchu půdy a dopočtena přes hloubku penetrometru nastaveného dle hloubky zpracování kypřiče, mohl částečně zkreslit měření hloubky zpracování, protože povrch pole nebyl ideálně rovný a rozsah povrchových nerovností popř. rostlinných zbytků může do značné míry ovlivnit takto naměřené hodnoty (rozdíl do 20 mm). Na měření hloubky zpracování je třeba se zaměřit a způsob měření hloubky zpracování půdy by mohl být cílem dalších výzkumů a odborných prací.

Velice zajímavé je například porovnání výsledků měření fyzikálních vlastností půdy pomocí měření penetračního odporu půdy a pomocí odběru neporušených půdních vzorků. Přestože byl prokázán statisticky významný rozdíl mezi objemovou hmotností půdy na západní (v průměru nižší objemová hmotnost půdy) a východní částí pozemku (vyšší), statisticky významný rozdíl v měření penetračního odporu půdy vertikálním penetrometrem ve hloubce 0,12 m prokázán nebyl, ba naopak, z vizualizace naměřených hodnot prostřednictvím map je patrný trend přesně opačný. Vertikální penetrometr měřil na západní části pozemku hodnoty spíše vyšší, než na části východní.

To lze vysvětlit výsledky měření vlhkosti půdy v této hloubce. V tomto případě byla na západní části pozemku zjištěna statisticky významně nižší vlhkost půdy, než na straně východní. Je obecně známým faktem, že měření penetračního odporu půdy jsou její okamžitou vlhkostí významně ovlivněna. Na tuto skutečnost upozorňují obě normy týkající se měření penetračního odporu půdy (ASAE S313.3 a ASAE EP542) a další autoři (např. Ayers a Perumpral, 1982; Vaz a kol. 2001; 2011). Z hlediska praktického použití je však překvapivé, jak malé rozdíly v půdní vlhkosti (při vyloučení odlehlých hodnot pouze v rozmezí 28 až 30,5 %, tedy rozdíl necelá 3 % půdní vlhkosti) mohou penetrační měření ovlivnit natolik výrazně, že vycházejí téměř obráceně ve srovnání s neporušenými půdními vzorky.

Z praktického hlediska použití neporušených půdních vzorků pro charakteristiku půdních vlastností nepřipadá vzhledem k jejich extrémně pracnému odběru a vyhodnocení

v úvahu. Zbývá tedy měření penetračního odporu půdy s tím, že pro získání objektivních výsledků je nutno měřit také vlhkost půdy, a to relativně velmi přesně. Je to znovu jedním z námětů pro další výzkum.

Nebyla sice prokázána statisticky významná závislost mezi penetračním odporem měřeným ručním vertikálním a horizontálním penetrometrem umístěným na měřicím rámu. Nicméně při porovnání map penetračního odporu půdy proti vnikání vertikálního penetrometru v hloubce 0,12 m (viz Obrázek 115) a proti vnikání horizontálního penetrometru v hloubce 0,15 m (viz Obrázek 111) lze zjistit, že jsou si vizuálně podobné. Jediným významnějším rozdílem jsou hodnoty v severovýchodní části pozemku, které lze vysvětlit větší hustotou naměřených bodů při druhé měřicí jízdě způsobené prokluzem tažného traktoru. Z tohoto faktu lze odvodit, že údaje získané z horizontálního a vertikálního penetrometru jsou podobné. Jinými slovy, obě zařízení pracují podobně. Horizontální penetrometr je přitom přístroj, který lze ke kontinuálnímu zjišťování fyzikálních vlastností půdy použít. V kombinaci s přesným měřením půdní vlhkosti by se mohlo jednat o přístroj, který by byl pro podobná měření vhodný. Podobný princip byl v minulosti použit i Sunem a kol. (2007). Na tak výrazný vliv vlhkosti na údaje o penetračním odporu půdy však autoři neupozornili.

8 Závěr

Na základě výsledků prezentovaných v této práci lze konstatovat, že námi použitou tahovou tyčí i nově vyvinutým rámem pro měření tahových sil strojů pro zpracování půdy lze měřit tahové síly až do 200 kN s tím, že jednoduchou úpravou obou zařízení lze tuto maximální hodnotu nadále zvyšovat až na hodnotu, která je dána pevností konstrukce těchto zařízení.

Hodnoty tahové síly měřené měřicím rámem byly z praktického hlediska srovnatelné s hodnotami měřenými tahovou tyčí. Velkou výhodou měřicího rámu je to, že pro měření není nutné použít druhý, tažený traktor, který slouží pouze k připojení a ovládání měřeného stroje na zpracování půdy. Také jednodušší manipulace s měřicí soupravou při měření je výhodou.

Problémem při měření tahové síly strojů na zpracování půdy je správné určení jejich okamžitého zahloubení. I změna zahloubení v desítkách milimetrů má na výslednou tahovou sílu zásadní vliv. Jedná se o jeden z námětů na další výzkum.

Byl prokázán značný vliv měnící se vlhkosti půdy v řádu jednotek procent na měření penetračního odporu půdy. Výsledky měření rovněž naznačily podobnost práce vertikálních a horizontálních penetrometrů. Měření penetračního odporu půdy proti vnikání horizontálního penetrometru je slibnou možností rychlé charakteristiky fyzikálních vlastností půdy. Musí však být doplněno přesnými údaji o vlhkosti půdy, což je dalším námětem pro další výzkum.

9 Seznam použité literatury

- ADAMCHUK, V. I., MORGAN, M. T., SUMALI, H. 2001. Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go. *Transactions of ASAE*, vol. 44, No. 6, s. 1377-1383.
- ADAMCHUK, V.I., HUMMEL, J.W. MORGAN, M.T., UPADHYAYA, S.K. 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.*, vol. 44, No. 9, s. 71– 91.
- ADAMCHUK, V.I., CHRISTENSON, P.T. 2005. *An integrated system for mapping soil physical properties on the- go: the mechanical sensing component*. In: Precision Agriculture '05, Wageningen Academic Publishers, s. 449-455.
- ALIHAMSYAH, T., HUMPHRIES E. G., BOWERS, C. G. 1990. A technique for horizontal measurement of soil mechanical impedance. *Transactions of ASAE*, vol. 33, No. 1, s. 73-77.
- ALIHAMSYAH, T., HUMPHRIES, E. G. 1991. *On-the-go soil mechanical impedance measurements*. In: Proc. Automated Agriculture for the 21st Century, s. 300- 306. St. Joseph, Michigan: ASAE., USA
- ARVIDSSON, J., KELLER, T., GUSTAFSSON, K. 2004. Specific draught for mouldboardplough, chisel plough and disc harrow at different water contents. *Soil and Tillage Research*, vol. 79, No. 12, s. 221–231.
- ASAE Standard EP542 Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer. 2013. St. Joseph, Michigan, ASAE.
- ASAE Standard S313.3 Soil cone penetrometer. 2004. St. Joseph, Michigan: ASAE, 49th Ed.
- AYERS, P., PERUMPRAL, J. 1982. Moisture and density effect on cone index. *Transactions of the ASAE*, vol. 25, s. 1169–1172.

- BADALÍKOVÁ, B., HRUBÝ, J. 2001. Sledování půdního prostředí při různých technologiích zakládání porostů pšenice ozimé a kukuřice na siláž. *Ekotech. magazín*, vol. 2, No. 4, s. 10–12.
- BALL, B. C., PARKER J. P., SCOTT A. 1999. Soil and residue management effects on cropping conditions and nitrous oxide fluxes under controlled traffic in Scotland. *Soil and Tillage Research*, vol. 52., No. 3-4, s. 191-201.
- BOWEN, H. D., COBLE, C. G. 1967. Environment requirement for germination and emergence. *Transactions of ASAE*, vol. 11, No. 12, s. 10-24.
- BRADFORD, J. M. 1986. *Penetrability*. In: *Methods of Soil Analysis: Part 1 — Physical and Mineralogical Methods*, 2d ed., A. Klute (Ed.), Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy. USA.
- CASSEL, D. K. 1982. *Predicting Tillage Effects on Soil Physical Properties and Processes*, In: 9th Conference of the International SoilTillage Research Organisation, Osijek, Madison, Wisconsin: ASA, SSSA. s. 45-65.
- DA SILVA, A.P. KAY, B.D. 1997. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 61, No. 3, s. 877–883.
- DEFOSSEZ P., RICHARD, G. 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil and Tillage Research*, vol. 67, No. 1, s. 41-64.
- DICKSON, J. W., RITCHIE, R. M. 1996. Zero and reduced ground pressure traffic systems in an arable rotation 2. Soil and crop responses. *Soil and Tillage Research*, vol. 38, No. 1, s. 89–113.
- DROLL, P. 1999. Erstellung von geokodierten Karten mit Bodenkennwerten. Msc, thesis (Diplomarbeit Hohenheim), unpublished (unveröffentlicht), (in German).

- GLANCEY, J.L., UPADHYAYA, S.K., CHANCELLOR, W.J., RUMSEY, J.W. 1996. Prediction of agricultural implement draft using an instrumented analog tillage tool. *Soil and Tillage Research*, vol. 37, No. 1, s. 47-65.
- HALL, E., RAPER, R. 2005. Development and concept evaluation of an on-the-go soil strength measurement system. *Transaction of ASAE*, vol. 48, No. 2, s. 469-477.
- HŮLA, J., KROULIK, M., KOVAŘIČEK, P. 2009. *Vliv opakovaných přejezdů po půdě na stupeň zhutnění půdy* [CD ROM]. In: GPS autopiloty v zemědělství. ČZU Praha, ISBN 978-80-213-1993-6.
- CHEN, Y., MUNKHOLM, L.J., NYORD, T. 2013. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils. *Soil and Tillage Research*, vol. 126, No. 1, s. 34-41.
- CHOROM, M., SADEGHZADE, F. 2005. The effect of soil compaction on movement, phosphorus and potassium in soil columns. *The Scientific Journal of Agriculture*, vol. 27, No. 2, s. 139-153.
- CHRISTENSEN, N. B., J. B. SISSON, BARNES, P. L. 1989. A method for analyzing penetration resistance data. *Soil and Tillage Research*, vol. 13, No. 1, s. 83-91.
- CHUKWU, E., BOWERS, C.G. 2005. Instantaneous multiple-depth soil mechanical impedance sensing from a moving vehicle. *Transactions of ASAE*, vol. 48, No. 2, s. 885-894.
- JAVADI, A., SPOOR, G. 2006. The effect of spacing in dual wheel arrangements on surface load support and soil compaction. *Journal of Agricultural Science and Technology*, vol. 8, No. 2, s. 119-131.
- JOHNSON, C. E., BAILEY, A. C. 2002. Soil Compaction. *Advances in Soil Dynamics*, vol. 2, s. 155-183, ISSN: 0254-9689.

- KAMGAR, S., MINAEI, S. 2001. Evaluation of the influence of a few effective parameters on soil compaction caused by disk and moaldboard plows. *Agricultural Sciences*, vol. 6, No. 4, s. 5–19.
- KHALEDIAN, M.R., MAILHOL, J.C., RUELLE, P. 2012. Impacts of direct seeding into mulch on the CO₂ mitigation. *Agronomy Research*, vol. 10, No. 1-2, s. 303–310.
- KHEIRALLA, A.F., YAHYA, A., ZOHADIE, M., ISHAK, W. 2004. Modelling of power and energy requirements for tillage implements operating in Serdang sandy clay loam, Malaysia. *Soil and Tillage Research*, vol. 78, No. 1, s. 21-34.
- KRIŠTOF, K., BOŽO, T., MISIEWICZ, P. 2010. *Influence of work implements on selected soil properties*. In: *Technics in agrisector technologies 2010: proceedings of scientific works*, Nitra, s. 86–92.
- KROULÍK, M. 2013. *Technika v technologii precizního zemědělství. Habilitační práce*, Praha, ČZU v Praze, 247 s.
- KUMHÁLA, F., HEŘMÁNEK, P., MAŠEK, J., KVÍZ Z., HONZÍK, I. 2007. *Zemědělská technika – stroje a technologie pro rostlinnou výrobu*. 1. vyd. Praha: ČZU v Praze, 426 s. ISBN 978-80-213-1701-7.
- LHOTSKÝ, J. 2000. *Zhutňování půd a opatření proti němu*. Studijní informace Úzpi. Praha, UZPI, vol. 7, 61 s.
- MANOR, G, CLARK, R.L, RADCLIFFE, D.E LANGDALE, G.W. 1991. Soil cone index variability under fixed traffic tillage systems. *Transactions of the ASAE*, vol. 34, No. 5, s. 1952-1956.
- MCGARRY, D. 1988. Quantification of the effects of zero and mechanical tillage on a Vertisol by using shrinkage curve indices. *Aust. J. Soil Res.*, vol. 26, s. 537– 542.

- MCLAUGHIN, N. B., BURTT, S. D. 2000. *Spatial Mapping of Tillage Energy*. In: Proceedings of the 5th Int. Conf. On Prec. Ag. (2000), Bloomington, Minnesota, USA.
- MORRISON, J. E., BARTEK, L. A. 1987. Design and field evaluation of a hand-pushed digital soil penetrometer with two cone materials. *Transactions of the ASAE*, vol.30, No. 3, s. 646-651.
- MULQUEEN, J., STAFFORD, J. V., TANNER, D. W. 1977. Evaluation of penetrometers for measuring soil strength. *J. Terra*, vol. 14, No. 3, s. 137-151.
- NADERI-BOLDAJI, M., SHARIFI, A., JAMSHIDI, B., YOUNESI-ALAMOUTI, M., MINAEE, S. 2011. A dielectric-based combined sensor for on-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance. *Sensor and Actuators A: Physical*, vol. 171, No. 2, 131–137.
- PAUL, W. 1992. Zugkraftmessungen zur Teilschlagkartierung. *Landtechnik*, vol. 47, s. 490–491.
- PETERSEN, R. G., CALVIN, L. D. 1986. *Sampling*. In: Methods of Soil Analysis Part 1 — Physical and Mineralogical Methods, 2d ed., A. Klute (Ed.), s. 33-52. Madison, American Society of Agronomy. USA.
- PODPĚRA, V., SYROVÝ, Z., VOTÍPKA, F. 2009. Zařízení pro měření sil. Užiténý vzor č. CZ 19926 U1. Úřad průmyslového vlastnictví ČR, přihlášeno 27. 4. 2009. zapsáno 17. 8. 2009.
- PODPĚRA, V., SYROVÝ, Z., VOTÍPKA, F. 2013. Zařízení pro měření sil. Patent č. CZ 304 215 U6. Úřad průmyslového vlastnictví ČR, přihlášeno 27. 4. 2009, uděleno 27. 11. 2013.
- PRAŽAN, R., PODPĚRA, V. 2011. Vliv tahového odporu pluhu na zatížení pneumatik hnacích kol traktoru. *Mechanizace zemědělství*, vol. 61, No. 6, s. 80-83.

- PREČ, M., SEDLÁK, P., BAUER, F., ČUPERA, J., ŠMERDA, T. 2008. *Porovnání tahových vlastností traktorů s různou konstrukcí podvozku*. In: Sborník z konference Mendelnet 08 Agro, Mendelova univerzita v Brně, 15 s.
- RANDALL, J. S. 2005. *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, 802 s.
- RAPER, R. L. 2005. Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics*, vol. 42, No. 3-4, s. 259–280, ISSN 0022-4898.
- RAPER, R. L., and H. E. HALL. 2003. Soil strength measurement for site-specific agriculture. U.S. Patent No. 6647799.
- RAPER, R. L., WASHINGTON, B. H., Jarrell, J. D. 1999. A tractor-mounted multiple-probe soil cone penetrometer. *Applied Eng. in Agric.*, vol. 15, No. 4, s. 287-290.
- SAVIN, L., NIKOLIĆ, R., SIMIKIĆ, M., FURMAN, T., TOMIĆ, M., GLIGORIĆ, R., JARAK, M., DURIĆ, S., SEKULIĆ, P., VASIN, J. 2009. The influence of soil compaction on changes in soil and sunflower yield. *Savremena poljoprivredna tehnika*, vol. 35, No. 1–2, s. 26–32.
- SCHAFER, R. L., YOUNG, S. C., HENDRICK, J. G., JOHNSON, C. E. 1981. Control concepts for tillage systems. ASAE Paper No. 811601., St. Joseph, Michigan: ASAE, .
- SCHULZE LAMMERS, P., SUN, Y., MA, D. 2007. Using a combined sensor for mapping soil resistance force and soil water content. *Landtechnik*, vol. 62, No. 5, s. 330- 331.
- SCHUTTE, B., KUTZBACH, H.D. 2003. *Evaluierung von ortsspezifischen Zugkraftmessungen bei der Bodenbearbeitung*. In: Agricultural Engineering 2003, Tagng Landtechnik, Hannover, s. 299–304.

- SIRJACOBS, D., HANQUET, B., LEBEAU, F., DESTAIN, M.F. 2002. On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture. *Soil and Tillage Research*, vol. 64, No. 3–4, s. 231–242.
- SMITH, B. E., SCHAFER, R. L., JOHNSON, C. E. 1994. Using coulter to quantify the soil physical condition. ASAE Paper No. 941040., St. Joseph, Michigan: ASAE, USA
- SNEDECOR, G. W., COCHRAN, W. G. 1967. *Statistical Methods*, 6th ed., 157-158. Ames, IA: The Iowa State University Press.
- SUN, Y., MA, D., LAMMERS, P.S., SCHMITTMANN, O., ROSE, M. 2006. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil and Tillage Research*, vol. 86, No. 2, s. 209–217.
- ŠIMA, T., DUBEŇOVÁ, M. 2013. Effect of crop residues on CO₂ flux in the CTF system during soil tillage by a disc harrow Lemken Rubin 9. *Res. Agr. Eng.*, vol. 59, No. Special Issue, s.15–S21.
- TAYLOR, H. M., GARDNER, H. R. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Sci*, vol. 96, No. 3, s. 153-156.
- TO, J., KAY, B.D. 2005. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. *Geoderma*, vol.126, No. 3–4, s. 261–276.
- TOLLNER, E. W., VERMA, B. P. 1984. Modified cone penetrometer for measuring soil mechanical impedance. *Transactions of the ASAE*, vol. 27, No. 2, s. 331-336.
- TOPAKCI, M., UNAL, I., CANAKCI, M., CELIK, H., KARAYEL, D. 2010. Design of a Horizontal Penetrometer for Measuring On-the-Go Soil Resistance. *Sensors*, vol. 10, No. 10, s. 9337-9348.

- VALLA, M., KOZÁK, J., NĚMEČEK, J., MATULA, S., BORŮVKA, L., DRÁBEK, O. 2000. Pedologicke praktikum. Praha: Česká Zemědělská Univerzita v Praze, 2011. – ISBN 978-80-213-0914-2.
- VAN BERGEIJK, J., GOENSE, D. 2001. Soil Tillage Restiance as a Tool to Map Soil Type Differences. *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 79, No. 4, s. 371- 387.
- VARGA, F., ABRAHÁM, R., JABLONICKÝ, J., BOĎO, T., CHRASTINA, J. 2010. Measurement of soil compaction with horizontal and vertical cone penetrometer. *Savremena poljoprivrednatehnika*, vol. 36, No. 3, s. 247–255.
- VARGA, F., JABLONICKÝ, J., MÜLLEROVÁ, D., ŽIKLA, A. 2009. Influence of soil resistance on ploughing depth. *Traktori i pogonske mašine*, vol. 14, No. 1, s. 49–58.
- VARGA, F., TKÁČ, Z., ŠIMA, T., HUJO, L., KOSIBA, J., UHRINOVÁ, D. 2014. Measurement of soil resistance by using a horizontal penetrometer working with the two-argument comparative method. *Agronomy Research*, vol. 12, No. 1, s. 187–196.
- VAZ, C., BASSOI, L., HOPMANS, J. 2001. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer–TDR probe. *Soil and Tillage Research*, vol. 60, s. 35–42.
- VAZ, C., MANIERI, J., DE MARIA, I., TULLER, M., 2011. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*, vol. 166, s. 92-101.
- WARRICK, A. W., NIELSON, D. R. 1980. Applications of Soil Physics. New York: Academic Press., vol. 13, s. 319–344.
- WHITE, R. E. 2006. Principles and practice of soil science. Oxford : Blackwell, ISBN 0- 632-06455-2.

YOUNG, S. C., JOHNSON, C. E., SCHAFER, R. L. 1988. Quantifying soil physical condition for tillage control applications. *Transactions of ASAE*, vol. 31, No. 3, s. 662-667.