

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

Katedra zemědělských strojů



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Technická
fakulta**

Možnosti měření tahových odporů strojů pro zpracování půdy

.....
Bakalářská práce

Autor: **Jakub Zígler**

Vedoucí práce: **Prof. Dr. Ing. František Kumhála**

Praha 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Možnosti měření tahových odporů strojů pro zpracování půdy“ vypracoval samostatně. Všechny literární zdroje použité v této práci jsou uvedeny v seznamu literatury a citovány dle citační normy ČSN ISO 690 a dle požadavků Technické fakulty ČZU v Praze. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom a souhlasím, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Dále deklaruji, že reprodukce a publikování této práce a jejích částí nepoškodí žádná práva třetích osob.

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval panu prof. Dr. Ing. Františku Kumhálovi za odbornou pomoc a vedení při zpracování bakalářské práce na dané téma. Dále bych rád vyjádřil poděkování Ing. Evě Kudrnáčové Ph.D. za velmi cenné připomínky a jazykovou korekci.

Vděčnost za spolupráci je vyjádřena také následujícím osobám a firmám:

Rodině a přátelům za trpělivost a podporu.

Firmě Bednar FMT s. r. o. za léta praxe a shovívavost v průběhu studia.

Možnosti měření tahových odporů strojů pro zpracování půdy

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá různými způsoby měření tahových odporů a odporu půdy, v závislosti na pojezdové rychlosti, vlhkosti půdy, typu stroje, nebo pracovního orgánu. Práce se také zaměřuje na porovnání rozdílů statických a vibračních slupic a jejich vlivem na tahový odpor a pojednává o univerzálních i jednoúčelových dynamometrech.

Na základě vyhledaných vědeckých publikací lze konstatovat že většina měření byla provedena za použití tenzometrického členu typu S o kapacitě 20 kN, při snímací frekvenci 10 Hz. Pojezdová rychlost souprav nebo orgánu byla nejčastěji 3 km/h. Bylo zjištěno že na měření tahových odporů má významný vliv zejména tvar pracovních orgánů, vlhkost půdy a pojezdová rychlost. Z hlediska tvaru pracovního orgánu vykazuje největší nárůst tahového odporu použití křídel na podrývacích slupicích. Vlhkost půdy 32 % se ukázala jako hraniční hodnota, do které prudce vzrůstá koeficient tření a tím i tahový odpor. Naopak po překonání této hranice hodnoty obou parametrů prudce klesají. Dále se prokázalo, že při zvyšování pojezdové rychlosti významně vzrůstá i tahový odpor. Mnoho autorů se shoduje na tom, že je výhodné zkombinovat měření se záznamem informace o poloze GPS nebo DGPS.

Tomuto tématu se v poslední době věnuje stále více autorů a výsledky této práce tak poskytují užitečný základ pro další výzkum v této oblasti.

Klíčová slova: tahová síla, tenzometr, měření síly

The possibilities of soil tillage machines draught force measurement

Summary

This bachelor thesis deals with different ways of draught force measurement and soil resistance, depending on the traveling speed, soil moisture content, type of machine or individual machine parts. The work also focuses on the comparison of the differences between static and vibrating tines and their effects on the draught force, and further deals with universal and single-purpose dynamometers.

Based on the scientific publications, it can be stated that most measurements were performed using a strain gauge type S with a capacity of 20 kN, at a scanning frequency of 10 Hz. The traveling speed of the machines or machine parts was mostly 3 km/h. It was found that the shape of working bodies, soil moisture content and traveling speed have a significant effect on the measurement of draught force. In terms of the shape of the working body, the use of wings on the subsoiler tines shows the greatest increase in draught force. Soil moisture content of 32% proved to be the limit value, to which the coefficient of friction and thus the draught force increases sharply. On the contrary, after exceeding this limit, the values of both parameters fall sharply. Furthermore, it was shown that as the travel speed increases, the draught force increases as well. Many authors agree that it is advantageous to combine measurement with recording GPS or DGPS position information.

More authors have been working on this topic recently, and the results of this work provide a useful basis for further research in this area.

Keywords: draught force, strane gage, force measurement

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| 1. ÚVOD | 1 |
| 2. CÍL PRÁCE | 3 |
| 3. METODIKA PRÁCE | 4 |
| 3.1 Teoretická definice a stanovení tahového odporu | 4 |
| 3.2 Praktické měření hodnot k určení tahových odporů | 4 |
| 4. TEORETICKÁ VÝCHODISKA | 5 |
| 4.1 Teoretické zjišťování tahové síly | 5 |
| 4.2 Stroje pro zpracování půdy | 5 |
| 4.3 Zpracování půdy | 6 |
| 4.3.1 Práce třístranného klínu v půdě | 8 |
| 4.3.2 Stanovení kritické hloubky | 9 |
| 4.3.3 Působení orebního tělesa v půdě | 11 |
| 4.3.4 Orební odpor | 12 |
| 4.3.5 Vlastnosti půdy | 15 |
| 4.4 Způsoby měření síly | 18 |
| 4.4.1 Pružinové siloměry (Mincíře) | 18 |
| 4.4.2 Odporové snímače síly | 19 |
| 4.4.3 Snímače tlaku v hydraulickém okruhu | 22 |
| 5. PŘEHLED ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY | 23 |
| 5.1 Měření odporu půdy | 25 |
| 5.2 Měření odporu orebních těles | 28 |
| 5.3 Měření celkového tahového odporu stroje | 33 |
| 6. VÝSLEDKY A DISKUZE | 78 |
| 7. ZÁVĚR A DOPORUČENÍ | 82 |
| 8. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 84 |
| 9. SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ | 92 |

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ANFIS: adaptivní neurofúzní odvozovací systém (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)

ANSI: Americký národní standardizační institut (American National Standards Institute)

API: Americký ropný institut (American Petroleum Institute)

ASABE: Americká společnost zemědělských a biologických inženýrů (American Society of Agricultural and Biological Engineers)

ČSN: česká technická norma

DDP: Diskový pluh/Diskový podmítač/Přesný secí stroj (Disc plow/ Disc harrow /Planter)

DEM: metoda diskrétních prvků (Discrete Element Method)

DGPS: diferenciální globální polohový systém (Differential Global Positioning System)

FEM: metoda konečných prvků (Final Element Method)

GPS: globální polohový systém (Global Positioning System)

CHDP: Radličkový pluh/Diskový podmítač/Přesný secí stroj (Chisel plow/Disc harrow/Planter)

MČB 1: Tenzometrické měřicí zařízení

NT: bezorebné setí (No-Tillage)

1. ÚVOD

V technické praxi je potřeba zjišťovat tahové odpory strojů na zpracování půdy, a to jak celých strojů, nebo jejich soustav, tak i jednotlivých pracovních orgánů. Tyto informace slouží jako vstupní parametry pro návrh strojních součástí, výpočtů jisticích mechanismů, rámových konstrukcí a pro výpočty tažných prostředků jejich výkonové charakteristiky, nutné výkonové rezervy a v neposlední řadě jako nástroj pro určení spotřeby pohonných hmot. Také tyto hodnoty lze využít v nastupujících trendech, jako je proměnlivé nastavení stroje podle půdních podmínek, nebo výnosových map, kdy se stroj automaticky nastavuje dle výstupů z měřicího zařízení, nebo podle dat vnesených do map trajektorií na daném pozemku.

V minulosti byly ustaveny pomocí empirických testů a polních měření některé výpočtové vzorce pro určení této hodnoty. Bohužel tyto výsledky nespĺňují dnešní požadavky technické praxe, zejména pro velkou variabilitu vstupních koeficientů, která se pohybuje v řádu stovek procent. Zároveň vychází z některých předpokladů o chování půdy i vlastního nářadí během práce, které jsou zde z pochopitelných důvodů zjednodušeny, nebo úplně zanedbány. Většina nejrozšířenějších vzorců např. od Vasilije Prochoroviče Gorjačkina (1868–1935) (**Obr. 1**) pochází z 20. let 20. století, souborně vydáno roku 1919 jako *Fundamentals of the Theory of Agricultural Mechanes and Implements*. Tato publikace byla vydána na základě zkušeností a testů, které prováděl od roku 1910, kdy poprvé publikoval své teze v *Moldboard of Ploughs*. Stejně tak postupy, které nalezneme např. v *Thesis: A Study of the Plow-Bottom and Its Action on the Furrow-slide* od Earla Archibalda Whita (*1883) z roku 1917, který vychází z poznatků poloviny 19. století, jsou používány dodnes. Od té doby však prošla technika značným vývojem, a tak jak se změnily nástroje a postupy vývoje, tak se i změnily nároky na vstupní parametry pro vývoj půdozpracujících strojů. Dnes se upřednostňuje počítačová simulace FEM (Final Element Method – metoda konečných prvků), DEM (Discrete Element Method – metoda diskretních prvků) a topologická optimalizace oproti výrobě prototypů, jejich testování a úpravy v reálném světě. Také došlo k významné změně tažných prostředků, od zvířecích potahů, k traktorům o síle několik set koní.

V současné době je také kladen velký důraz na kvalitu zpracování půdy, na trhu je stále větší konkurence, ale změna nastává i ze strany očekávání farmářů a agronomů, kteří mají vyšší nároky na kvalitu a inovaci technologií. A v neposlední řadě jde i o ceny těchto strojů. Proto je neustálá snaha výrobců zemědělské techniky a univerzit o vlastní vyšetření provozních podmínek, velikosti a směry působících sil a silových dvojic na pracovní tělesa, nosné rámy a závěs tažného prostředku. Tyto parametry budou co možná nejpřesněji reprezentovat jimi používané zařízení a jeho geometrie, za reálných pracovních podmínek konkrétní cílové oblasti

s danou pedologickou situací a tím zefektivnit návrh a konstrukci co možná nejrealističtějším požadavkům dané kombinace faktorů. Díky tomu může být aplikován i stochastický přístup a návrh na časovanou životnost a další moderní vývojové nástroje, které zefektivňují a zlevňují cílové produkty, v tomto případě půdozpracující stroje a jejich části. V opačném případě nastává problém se vstupními hodnotami na úplném začátku vývojového procesu a výsledné stroje jsou poddimenzované nebo předimenzované, případně nepracují s půdou tak, jak bylo zamýšleno.

Jelikož jde o velmi důležitá data, tak jejich sběr a vyhodnocení s rostoucí přesností a šíří testovaných podmínek roste exponenciálně jak na straně použitých nástrojů a zařízení, tak i finančních investic a časové náročnosti. Tato data jsou pak velmi často vedena jako tajné vnitropodnikové informace a k širší veřejnosti se tak dostávají jen prostřednictvím vědeckých článků a pouze v omezeném rozsahu.

2. CÍL PRÁCE

Na základě literární rešerše popsat možnosti měření tahových odporů zemědělských strojů a zhodnotit jejich výhody a nevýhody.

Výzkumná otázka

Existují významné rozdíly mezi jednotlivými způsoby zjišťování tahových odporů?

Vedlejší výzkumné otázky

1. Lze při zjišťování tahového odporu měřit jednotlivé pracovní orgány separátně?
2. Má na výsledky vliv rychlost pojezdu měřeného stroje (orgánu)?
3. Má vlhkost půdy vliv, na výslednou hodnotu tahového odporu?
4. Reprezentuje výsledná zjištěná hodnota kompletní zatížení nosného rámu?

Výzkumné předpoklady – hypotézy

H1: Při zjišťování tahového odporu lze měřit jednotlivé pracovní orgány separátně.

H2: Pojezdová rychlost má vliv na velikost tahového odporu.

H3: Vlhkost půdy má vliv na velikost tahového odporu.

H4: Z měření lze plně vyhodnotit zatížení rámu stroje.

3. METODIKA PRÁCE

3.1 Teoretická definice a stanovení tahového odporu

Pro teoretické stanovení tahového odporu je nutné určit a vymežit vstupní parametry pro jednotlivé výpočtové vzorce. Pro zpřesnění výsledků je dále nutné zohlednit další faktory, které výsledky ovlivňují. Bez tohoto zpřesnění bývá výpočet zatížen odchylkou vzniklou idealizací reálného stavu, nebo rozdílnou hodnotou mezi aktuálním stavem půdy a stavem, kdy byly empiricky určeny vstupní koeficienty. Na základě těchto skutečností byly sumarizovány výpočtové vzorce a opsány parametry, které mají na výsledek vliv, s cílem definovat okrajové podmínky.

3.2 Praktické měření hodnot k určení tahových odporů

Byly popsány různé studie měření sil v závislosti na různých vlastnostech půdy, nebo s různým nastavením měřících zařízení. Byl sledován a popsán vliv těchto parametrů na výslednou tažnou sílu, s cílem eliminovat nejvýraznější vlivy na výsledné hodnoty.

4. TEORETICKÁ VÝCHODISKA

Poznatky o současném stavu problematiky plynoucí ze studia odborné literatury, které mají vztah k řešenému tématu; porovnání teoretických východisek a různých názorů autorů zabývajících se danou problematikou.

4.1 Teoretické zjišťování tahové síly

Všeobecně se prezentuje a pro orientační výpočty používá teoretický výpočet tahové síly vycházející z empiricky zjištěných tabulkových hodnot a jiných koeficientů, případně z naměřených hodnot v závislosti na zvoleném vzorci. Většina těchto vztahů byla stanovena na orebním tělese typu pluhu, jelikož v době jejich vzniku velká část současných typů těles neexistovala. Kromě vláčení různých typů bran a smyků, které nevyžadovaly velkou tahovou sílu, později přibyly vztahy pro talířové brány a radlice, případně krojidla apod. Vše je však postaveno na původní teorii vzešlé z práce plužní radlice s půdou a jejich vzájemných interakcí. Jak krojidlo, tak radlice ve formě tzv. předradlice je součástí radličného pluhu.



Obr. 1: V. P. Gorjačkin (1868–1935).

(Zdroj: Chinenova, 2016)

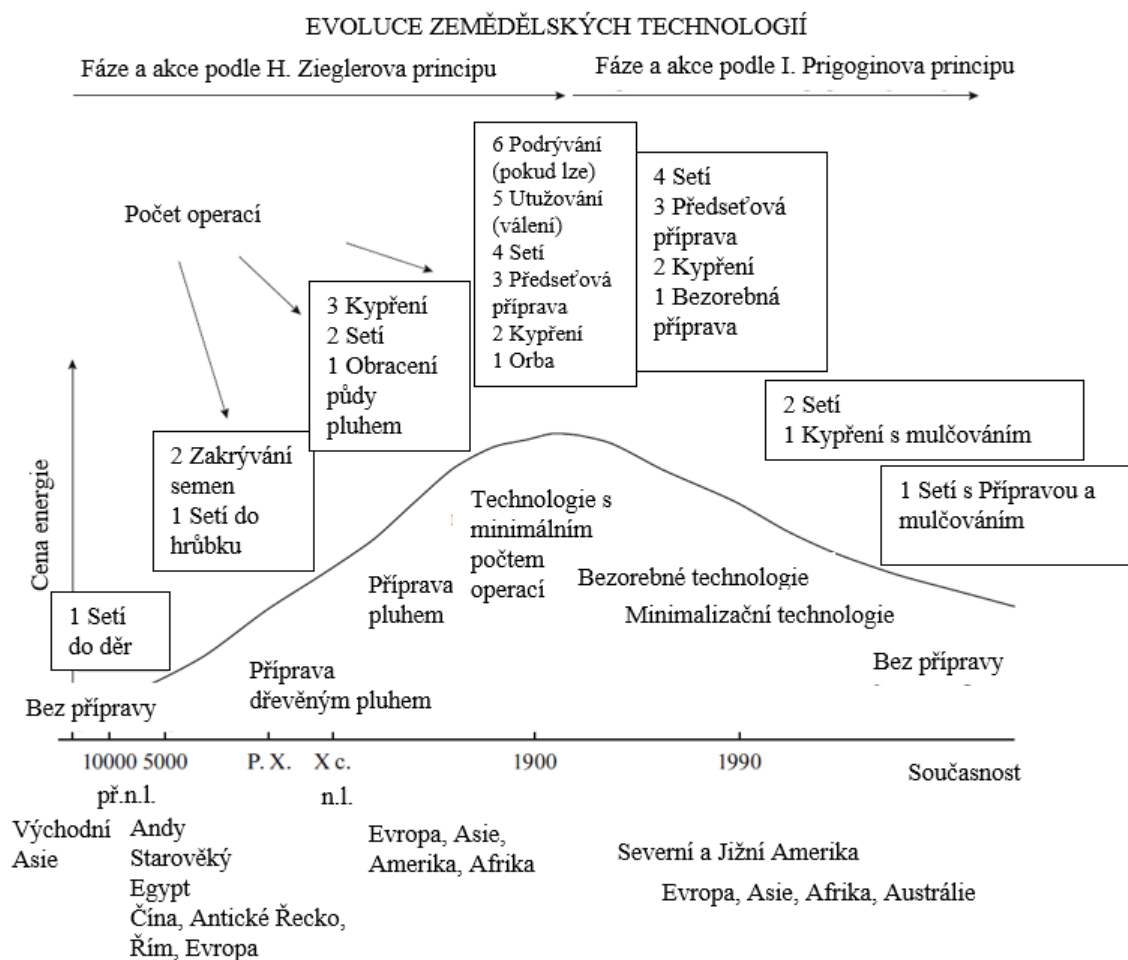
4.2 Stroje pro zpracování půdy

Pokud výběr omezíme jen na zemědělství a vyloučíme stroje, které také pracují s půdou, jako jsou důlní či stavební stroje, lze takové stroje definovat jako stroje, nebo zařízení, které plní různé agronomické požadavky, protože každá operace s půdou je prováděna s nějakým záměrem. Výsledným produktem je pak v konečném důsledku sklizená plodina. Většina dnešních strojů takových operací provádí hned několik najednou. Z hlediska tahových odporů

je můžeme vyšetřovat jak jednotlivě, tak i souborně, pokud budeme vyšetřovat tahový odpor na závěsu stroje.

4.3 Zpracování půdy

Technika i samo zemědělství prošlo výraznými změnami, jak je znázorněno na grafu evoluce technologie v zemědělství (**Obr. 2**). Stroje i prováděné operace se za posledních sto let diametrálně změnily.



Obr. 2: Schéma evoluce technologií zpracování půdy.

(Zdroj: Gusev, 2020 - upraveno)

Pod pojmem zpracování půdy se dnes rozumí čtyři základní způsoby zpracování:

Konvenční

Sled operací: celoplošná podmítka, orba, předseťová příprava (smykování, vláčení, kypření, válení), setí.

Redukované (minimalizační)

Sled operací: celoplošná podmítka, orba, předseťová příprava, setí.

Redukce spočívá zejména ve slučování operací a redukcii přejezdů techniky. Při orbě se používají přídatné válce, které drtí hroudy a utužují půdu. Předseťová příprava se provádí pomocí kombinátorů, které spojují operace kypření a urovnání povrchu, drtí hroudy případně částečně vytváří předseťové lože. Pro setí se používají secí stroje s přípravou, nebo secí kombinace s aktivním nářadím, jako jsou vířivé brány a jiné.

Konzervační

Sled operací 1: podmítka, mělké kypření, setí.

Sled operací 2: podmítka, aplikace herbicidů, mělké zpracování a setí.

Sled operací 3: podmítka, střední kypření, mělké zpracování s urovnáním a setí (Fríd, 2013).

Také známe pod termínem „Strip till“, nebo pásové zpracování. Dle dané legislativy standardu DZES (Dobrého zemědělského a environmentálního stavu půdy), by mělo zůstat minimálně 30 % povrchu nenarušeno. Jedním z hlavních důvodů vzniku je vodní a větrná eroze (MZe 2021).

Setí do nezpracované půdy

Sled operací: regulace výdrolu a plevelů, setí.

Také známé pod termínem „No Till“, nebo bezorebné zpracování. Zde se neprovádí žádné mechanické zpracování půdy po sklizni, pouze případná likvidace výdrolu a plevelů pomocí herbicidů.

Trend v růstu výnosu jarní pšenice při přechodu od tradiční technologie směrem k minimalizační a bezorebné je znázorněn v **Tab. 1**. Podobné studie se objevují čím dál častěji a jde o nastupující trend způsobu zpracování zejména v Severní Americe, Austrálii a jižní Africe, kde je cílem udržení vlhkosti půdy a každá pracovní operace otevírající půdu vede ke ztrátě vlhkosti. V ostatních regionech je sledován spíše ekonomický záměr, kdy minimalizační technologie redukuje vstupní náklady, proto se tyto postupy úspěšně etablovaly v Jižní Americe, Anglii a Skandinávii. Zejména ve skandinávských zemích a Anglii je pak jedním z vedlejších faktorů velká kamenitost pozemků.

Tab. 1: Výnos jarní pšenice při použití minimalizačních technologií.

| Tradiční technologie | | Minimalizační technologie | | Bezorebné technologie | |
|----------------------|-----|---------------------------|-----|-----------------------|-----|
| 1991-1995 | | 1996-2000 | | 2004-2009 | |
| t/ha | % | t/ha | % | t/ha | % |
| 1,28 | 100 | 1,95 | 152 | 2,87 | 224 |

(Zdroj: Gusev, 2020 – upraveno)

Podle hloubky zpracování ornice lze rozdělit na:

podmítku 5 až 12 cm,

mělkou orbu 10 až 18 cm,

střední orbu 18 až 24 cm,

hlubokou orbu 24 až 30 cm,

velmi hlubokou orbu nad 30 cm,

rigolování 50 až 60 cm (Fríd, 2013).

Půda vzhledem k jejímu vrstevnatému charakteru má pro různé hloubky zpracování odlišné vlastnosti, protože se pracovní orgán dostává obvykle do více vrstev (souvrství) půdy s rozdílnými vlastnostmi jednotlivých horizontů.

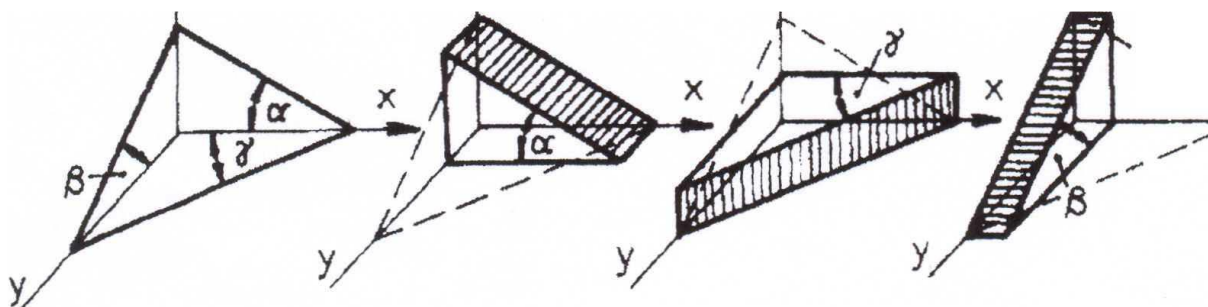
4.3.1 Práce třístranného klínu v půdě

Velká část pracovních orgánů strojů na zpracování půdy přicházejících do styku s půdou má tvar klínu. Mohou to být klíny s rovnou, nebo zakřivenou pracovní plochou. Klín s rovnou pracovní plochou je například čepel orebního tělesa, se zakřivenou pracovní plochou je pak například u talířového orebního tělesa.

Pokud bychom chtěli toto chování popsat představme si, že je umístěn třístranný klín velmi malých rozměrů v souřadnicové soustavě x, y, z (**Obr 3.**). Pohybuje-li se tímto klínem ve směru osy "x" vykonává v půdě určitou práci. Stejnou práci mohou však vykonat za stejných podmínek i tři samostatné dvoustranné klíny.

První klín, jehož pracovní plocha svírá s horizontální rovinou úhel α , bude oddělovat půdní skývu od vodorovné roviny a bude ji nadzvedávat. Pracovní plocha druhého klínu svírá s vertikální rovinou, rovnoběžnou se směrem pohybu, úhel γ , bude půdu oddělovat od svislé roviny a posunovat ji na stranu. Třetí klín, jehož pracovní plocha svírá s horizontální rovinou úhel β , bude odříznutou skývu zvedat a natáčet ve svislé rovině, kolmé na směr pohybu.

Třístranný klín si tedy lze představit tak, jako kdyby byl složený ze tří elementárních dvoustranných klínů.



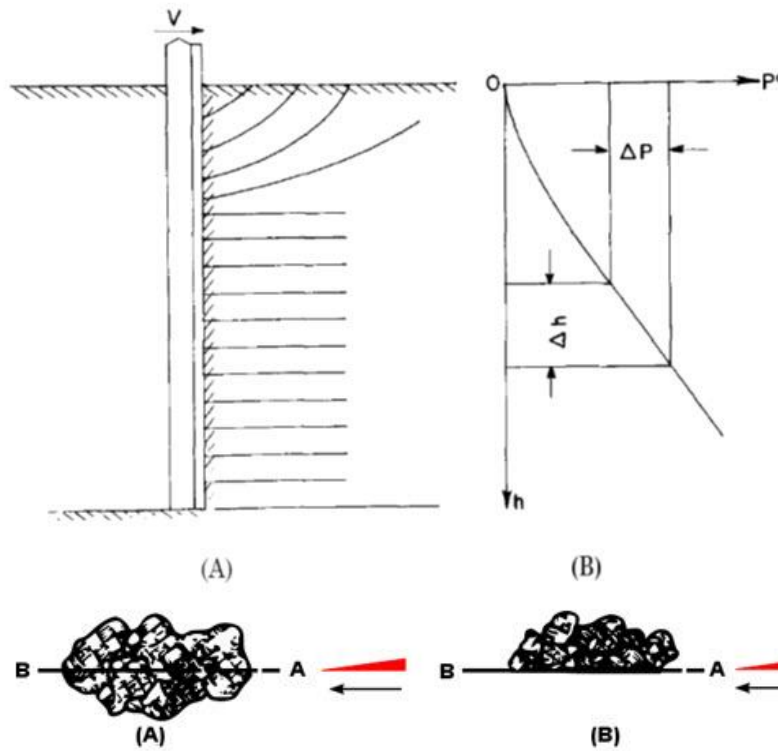
Obr.3: Nahrazení třístranného klínu třemi dvoustrannými klíny.

(Zdroj: Neubauer, 1989)

Technologické působení dvoustranného klínu v půdě je přirozeně různé, podle toho, o jakou půdu a s jakými fyzikálními vlastnostmi jde. Nesoudržná půda se může velice snadno hrnout před klínem. Velmi vazká půda se nebude působením klínu drobit, bude se jen ohýbat a postupovat na horní ploše klínu jako celistvý pás. Mají-li klíny pracovat v půdě tak, aby nehrnuly půdu před sebou, je třeba volit úhel co nejpříjemnější k dané struktuře půdy (Bílek a Biedermann, 1988).

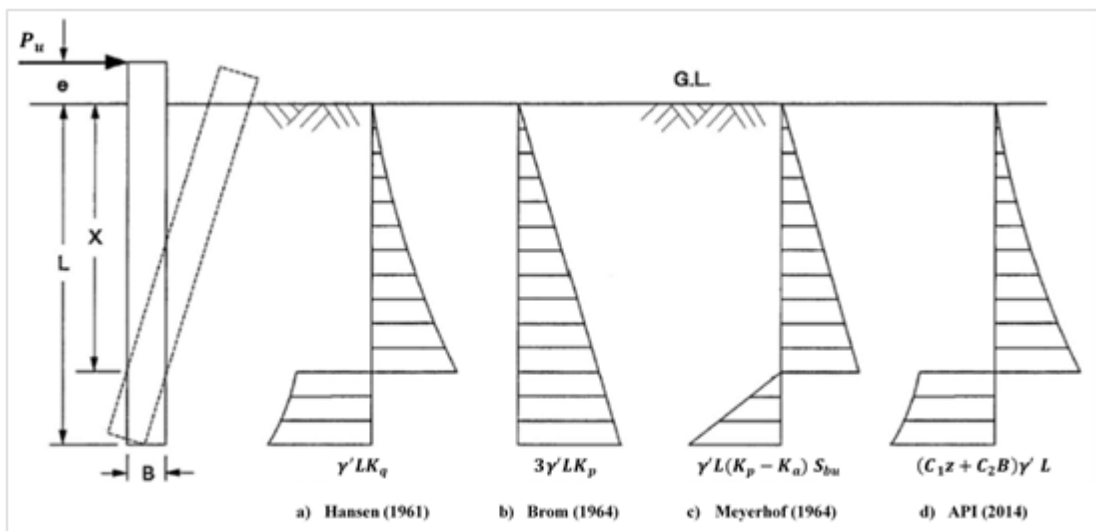
4.3.2 Stanovení kritické hloubky

Při zjišťování vlastností půdy byl sledován efekt tzv. mezní, nebo kritické hloubky (**Obr. 4**), kdy se od určité hloubky začíná jinak homogenně vypadající půda chovat rozdílně. Jde o mechanismus dělení částic půdy, kdy od určité hloubky nedochází k dělení těchto částic, ale k jejich posunutí (Kostrisyn, 1956). K tomuto jevu je přidružený ještě další jev související s deformací zkušební tyče, vymezením její mezní délky a uchycení na zkušební zařízení. Touto problematikou se zabýval Hansen a Christensen (1961), Brom (1964), Meyerhof et al., (1981), a API (2014), všichni autoři však s rozdílnou hypotézou. Jejich porovnání provedl Azeez et al. (2019) s výsledným rozdílem (**Obr. 5**) relativní hustoty v porovnání s pískem od 121 do 599 %. Zde lze opět pozorovat procesní problémy a nepřesnosti zjišťovaných hodnot do teoretických výpočtových vzorců, což komplikuje vyhodnocení naměřených dat, a pokud jsou tato data podkladem pro výpočty, vnáší se tato chyba dále a celkový efekt se násobí.



Obr. 4: Schéma kritické hloubky pozorované O'Callaghanem a Farrelym (1964).

(Zdroj: <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=2689>)



Obr. 5: Porovnání hypotéz.

(Zdroj: Azeez et al., 2019)

4.3.3 Působení orebního tělesa v půdě

Rozhodujícím činitelem, který ovlivňuje převážné množství vlastností orané vrstvy a energetické náročnosti, je pohyb skývy po orebním tělese. Jde o pohyb půdních částic způsobený tělesem pronikajícím půdou. Při posunu po tomto tělese vzniká ve zpracovávané vrstvě různě velké napětí, které se mění v závislost i na vzájemné poloze obdělávané vrstvy a orebního tělesa. Napětí je výrazně ovlivňováno vlastnostmi půdy, zejména vlhkostí a soudržností, jež mají zásadní význam pro nové uspořádání zpracovávané půdy. Průběh jednotlivých fází orby též výrazně mění tvar odhrnovačky a rychlost jízdní soupravy.

Proces orby se rozděluje do následujících čtyř fází:

1. Pohyb ostří čepele v půdě

Pronikání ostří čepele homogenní orniční vrstvou je spojitým a ustáleným procesem s neměnnými působícími silami. Odpor proti řezání závisí na rozměru ostří, případně na poli napětí, jež se před ostřím vytváří. To je příčinou zhutňování půdy a spolupodílí se na vytvoření tzv. orniční podlahy v podloží orniční vrstvy. Zhutnění roste s velikostí řezné plochy, tj. otupováním čepele a zvyšující se rychlostí orby. Maximální rychlost pohybu ostří v půdě pak závisí na stavu půdy a musí se stanovovat experimentálně.

2. Pohyb orané vrstvy půdy po čepeli a na čele (hrudi) orebního tělesa

Tento pohyb nastává stlačením orané vrstvy čepelí. Relativní rychlost částic ve druhé fázi je podmíněna druhem a stavem půdy a pohyb částic půdy je určen geometrickými rozměry orané vrstvy. V optimálním stavu kultivace (asi 40 % plné vodní kapacity) vzniká na čepeli orebního tělesa plastická deformace. Tlak vyvolaný čepelí způsobuje narůstání kontaktu půdních částic a dochází k částečnému vytěsnění vody a vzduchu z půdní hmoty.

3. Pohyb orané vrstvy půdy po odhrnovacím tělese

Tento pohyb je určen působícími silami (tíhou, třením, setrvačností) a soudržností orané vrstvy půdy. Vlivem posunu a další deformace na styčných plochách narůstá tlak. Voda působí všemi směry na půdní částice a v uzavřeném vzduchu se akumuluje potenciální energie. Před plužním tělesem se vytvoří maximální pole napětí. Jeho hodnota je přímo závislá, mimo fyzikálních vlastností půdy, na tvaru pracovního povrchu plužního tělesa i na rychlosti orby a šířce záběru.

4. Pohyb orané vrstvy po ukončení působení orebního tělesa

Začíná okamžikem, kdy oraná vrstva opustí orební těleso a tím dojde k uvolnění napětí (relaxaci) vytvořeného třením a hmotností zeminy. Oraná vrstva se láme a drobí. Stlačený vzduch, při deformaci zaujímající nejmenší objem se náhle uvolňuje, odděluje půdní částice a půda se drobí. Drobení skývy je také závislé na rychlosti orby, kdy získanou pohybovou energií naráží oraná vrstva na předcházející skývu a drobí se. Drobení je podmíněno vlhkostí půdy, zhutněním, případně prokořeněním orané vrstvy.

Při orbě za nepříznivého poměru vody a vzduchu v půdě nejsou dány vhodné podmínky pro rozpad skývy. Za sucha se vytvářejí hroudy a za mokra se skýva odklápí v souvislém nerozpadlém pásu (Webinger, 1994).

4.3.4 Orební odpor

Orební odpor F se nejčastěji počítá z rovnice N. G. Dombrovského (1985):

$$F = k \cdot h \cdot B \text{ [kN]} \quad (1)$$

kde: k – měrný orební odpor [kPa]

h – hloubka orby [m]

B – záběr pluhu [m]

Velikost měrného orebního odporu se liší podle druhu půdy a jejího stavu a dále podle tvaru nástroje od 20 do 150 kPa. Rovnici pro výpočet navrhl Vasilij Prochorovič Gorjačkin. Tato rovnice je v praxi velmi rozšířená, i přes svou nepřesnost. Pro svou jednoduchost je však výhodná při orientačních výpočtech. navrhl tuto rovnici (**Obr. 6**):

$$F = f \cdot G + k \cdot h \cdot B \cdot n + \varepsilon \cdot v_2 \cdot h \cdot B \cdot n \text{ [kN]} \quad (2)$$

kde: G – tíha pluhu [N]

f – koeficient vleku [1]

k – měrný odpor půdy [kPa]

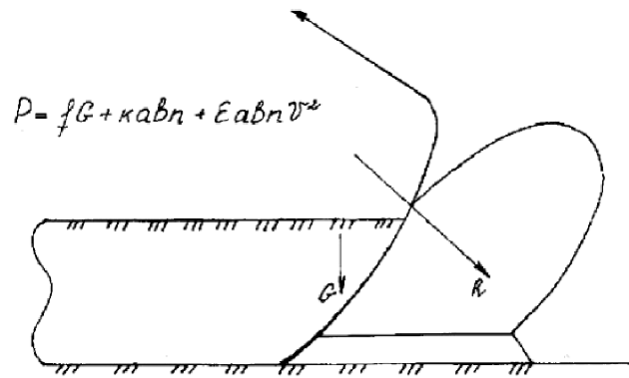
h – hloubka orby [m]

B – záběr jednoho orebního tělesa [m]

n – počet orebních těles [1]

ε – koeficient závislý na tvaru pracovního povrchu orebního tělesa, vlastnostech půdy a na pracovní rychlosti [$\text{N} \cdot \text{s}_2 \cdot \text{m}^{-4}$]

v – rychlost orby [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]



Obr. 6: Originál Gorjačkinovy rovnice z *Fundamentals of the Theory of Agricultural Mechanics and Implements*.

(Zdroj: Gorjackin, 1968)

Měrným odporem se rozumí síla potřebná k obdělání jednotky plochy půdy, měřená ve svislé rovině kolmé na směr jízdy. Je třeba zdůraznit, že měrný odpor nezávisí jen na složení a stavu půdy, ale i na tvaru nástroje, kterým se půda zpracovává. Ovlivňuje ho řada činitelů, jako okamžitá vlhkost, zaplevelenost, předplodina, předešlé zpracování, velikost a tvar odříznuté skývy, v nemalé míře i tvar břitu, rychlost působení nástroje na půdu atd. Vlivy těchto faktorů jsou složité a nejsou ještě zcela podrobně prozkoumány.

Při malých pracovních rychlostech nedosáhne třetí člen rovnice takové velikosti, aby byl orební odpor značně ovlivněn. Při malých rychlostech dosahuje $v = 1,2$ až $1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ asi jen 4 až 5 % z celkového orebního odporu.

Pracné a složité vyčíslování koeficientů odporu půdy z dynamometrických měření vedlo mnohé autory k navržení jiných a jednodušších vzorců pro orební odpor. Jejich použití se však v praxi neujalo (Neubauer, 1989).

Dále byla zavedena tzv. maximální (F_{max}) a rozpočtová tahová síla (F_{roz}), protože tahový odpor podle Gorjačkina (1968) vyjadřuje průměrný tahový odpor. Při návrhu jednotlivých částí strojů, ale musí být vycházeno ze skutečných, i když krátkodobých přetížení, které musí tahová síla překonat. Určuje se zde součinitel dynamického odporu d :

$$F_{max} = d \cdot F \text{ [N]} \quad (3)$$

Na základě měření byla stanovena velikosti dynamického součinitele odporu d pro pluh:

$d = 2,5$ pro jednoradličné pluh

$d = 2,1$ pro dvouradličné pluh
 $d = 1,9$ pro trojradličné pluh
 $d = 1,8$ pro čtyř a pětiradličné pluh

Z maximálního tahové odporu může být stanovena rozpočtová tahová síla (F_{roz}). Při tomto návrhu je zahrnut i požadavek na míru bezpečnosti n :

$$F_{roz} = n \cdot F_{max} [N] \quad (4)$$

n = míra bezpečnosti, obvykle $n = 1,5$
(Friedman et al., 1973)

Další teoretické vztahy zpracovali Vetrov a Stanevsky (1969) pro obecný rypný odpor.

$$F_r = F_R + F_T + F_P [N] \quad (5)$$

kde: F_R – čelní odpor nože [N]
 F_T – odpor bočních rozšíření [N]
 F_P – odpor řezu na bočních hranách [N]

$$F_R = k_R \cdot S_R [N] \quad (6)$$

kde: k_R – merný rozpojovací odpor zeminy [N/m]
 S_R – čelní boční plocha řezu [m²]

$$F_T = k_T \cdot S_T [N] \quad (7)$$

kde: k_f – merný rozpojovací odpor zeminy [N/m]
 S_T – čelní boční plocha řezu [m²]

$$F_P = k_T \cdot S_T [N] \quad (8)$$

kde: k_p – merný řezný odpor na bočních hranách [N/m]
 L_p – délka řezu boční hranou [m]

4.3.5 Vlastnosti půdy

Půda se skládá ze tří frakcí – pevné, kapalně a plynné. Pevná frakce obsahuje neústrojný podíl, složený z úlomků a zvětralin matečních hornin, ústrojný podíl tvořený humusem, kořeny rostlin a živými organismy a minerálními úlomky různé velikosti (kamen, písek, prach) a různého tvaru, které mají na opotřebení pracovních částí mechanizačních prostředků. Kapalná frakce je složena z půdní a podzemní vody v různých formách. Její obsah ovlivňuje činnost a kvalitu práce mechanizačního prostředku. Plynnou část tvoří půdní vzduch, který se liší od nadzemního hlavně mnohem vyšším obsahem oxidu uhličitého.

Při zpracování půdy působením pracovních nástrojů strojů a nářadí dochází k řezání, drobení, stlačování, kypření, přemísťování a obracení. Zpracováním půdy se mění její nakypření tj. pórovitost a objemová hmotnost. Z praktického hlediska mají základní význam vlastnosti půdy, které ovlivňují kvalitu zpracování a odpor pracovních nástrojů. Jsou to následující vlastnosti: mechanické složení, vlhkost, šterkovitost, struktura, vnější a vnitřní tření, pevnost, přilnavost a abrazivní vlastnosti. Mechanické složení ovlivňuje obtížnost zpracování půdy. Se vzrůstajícím podílem částic menších než 0,01 mm (jílnaté částice) vzrůstá měrný odpor pracovních nástrojů a zmenšuje se intenzita drobení. Podle procentuálního obsahu jílnatých částic se rozeznává sedm druhů půd uvedených v **Tabulce 2** (Procházka et al., 1986).

Tab. 2: Druhy půd a jejich měrné odpory.

| Praktické označení půdy | Druhy půd | Obsah zrn menších než 0,01 mm [%] | Číselné značení podle ČSN | Měrný odpor půdy ko [kN/m ²] |
|-------------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------------|--|
| Velmi těžká | jíl | nad 75 | 1 | 90÷150 |
| | jílovitá | 60÷75 | 2 | |
| Těžká | jílovito-hlinití | 40÷60 | 3 | 60÷90 |
| Střední | hlinitá | 30÷45 | 4 | 40÷60 |
| | písčito-hlinité | 20÷30 | 5 | |
| Lehká až velmi lehká | hlinito-písčítá | 10÷20 | 6 | 20÷40 |
| | písčítá | 0÷10 | 7 | |

(Zdroj: ČSN 46 5302, 1982)

Vlhkost půdy je velice proměnlivá, a proto na stejném pozemku mnohdy kolísá orební odpor a drobení půdy. Nejmenší orební odpor mají různé druhy půd při vlhkosti:

písčítá 8÷10 %,

hlinito-písčítá 11÷12 %,

hlinitá 16÷17 %,

jílovitá 18÷21 %.

Orební odpor roste při nižší a vyšší vlhkosti, nejmenší je při optimální vlhkosti. Při vyšší vlhkosti se výrazně projevuje přilnavost, kdy se půda vlivem molekulárních sil nalepuje na pracovní nástroje.

Štěrkovitost je vlastně také abrazivní vlastnost projevující se zvýšeným opotřebením pracovních nástrojů. Na štěrkovitých půdách se rychleji opotřebovávají břity půduzpracujících nástrojů. Štěrka a kamení mohou způsobit mimo opotřebení také ohnutí nebo vylomení nástrojů. Struktura půdy ovlivňuje podstatnou měrou orební odpor. Na strukturních půdách je orební odpor menší a drobení půdy větší, než na půdách nestrukturních.

Tření lze rozdělit na vnější, kdy se vůči sobě pohybují částice půdy a na vnitřní, kdy se půda pohybuje po pracovním povrchu nástroje. Vnější tření závisí na kolmé síle F_N , kterou působí půdní skýva na nástroj součiniteli tření f ($f = \operatorname{tg}\varphi$, kde φ je třecí úhel mezi půdou a materiálem nástroje). Součinitel tření závisí na mechanickém složení půdy, vlhkosti půdy, drsnosti pracovního povrchu a materiálu nástroje a rychlosti pohybu. U písčitéch půd je součinitel tření $f = 0,25$ až $0,35$; u těžkých jílovito-hlinitých půd $f = 0,6$ až $0,9$; třecí síla je rovna $F_T = F_N \cdot f$. Vnitřní tření (půda-půda) pak vzniká jednak při přemístování půdy před, nebo stranou pracovních nástrojů, a dále pak po nalepení ornice na povrch pracovních nástrojů.

Pevnost půdy v tlaku je mnohonásobně větší než pevnost v tahu. Lze tak vysvětlit, proč půda stále odolává, i když po ní během roku přejezdě mnoho strojů o hmotnosti několika tun. Pro drobení půdy má význam pevnost ve smyku. Vysoká pevnost půdy v tlaku má za následek, že většina deformací vznikajících působením pracovních nástrojů, je doprovázena tečným napětím v půdě, které po překročení meze pevnosti ve smyku vede k rozrušení (drobení) půdy.

Přilnavost (adheze) půdy se projevuje nalepováním půdy na povrch pracovních ústrojí a je výsledkem působením molekulárních sil mezi půdními částicemi a pracovním ústrojím. Přilnavost vzrůstá, zvětšuje-li se disperzita půdy a měrný tlak na půdu. Zvětšuje-li se vlhkost, přilnavost vzrůstá, potom klesá. Zvětšení drsnosti pracovního povrchu nástroje má za následek zvětšení přilnavosti. nalepování půdy na kola a pásy nastává tehdy, když je adhezní síla větší než okamžitá mez pevnosti půdy v tahu. Při pohybu pracovních nástrojů dochází k nalepování, když je součet síly tření a adhezní síly větší než okamžitá mez pevnosti půdy ve smyku.

Abrazivní vlastnosti půdy ovlivňují opotřebení ostří a jiných částí pracovních nástrojů. Opotřebení je výsledkem obrušování kovů ostrými hranami tvrdých půdních částic (křemen). Abrazivní vlastnosti půdy jsou přímo úměrné obsahu částic křemene větších než $0,01$ mm.

V technické praxi se také používá pro rychlou detekci a klasifikaci metodika dle ČSN 73 3050, tzv. třídění podle těžitelnosti, které primárně souží k výběru meachnizačního prostředku pro odebrání horniny.


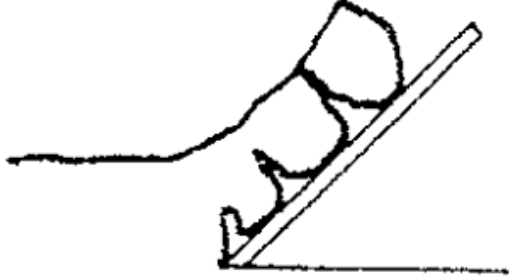
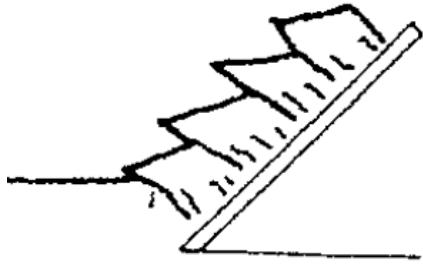
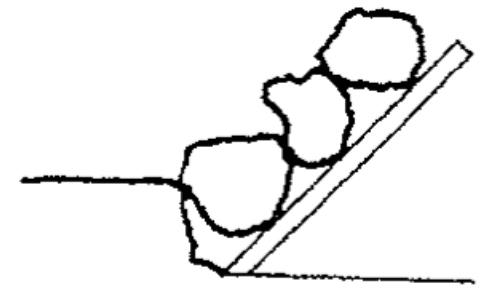
Třídění hornin dle ČSN 73 3050 podle těžitelnosti:

1. Třída – Sypké zeminy – (dají se nabrat lopatou)
2. Třída – Horniny lehce rozpojitelné – (rozpojitelné rýčem, nakladačem)
3. Třída – Kopné horniny – (rozpojitelné rýčem, rýpadlem)
4. Třída – Drobivé, pevné horniny – (rozpojitelné rýpadlem, klínem)
5. Třída – Lehce trhatelné horniny – (rozpojitelné rozrývačem, těžkým rýpadlem, trhavinami)
6. Třída – Těžko trhatelné horniny – (těžce trhatelné těžkým rozrývačem, trhavinami)
7. Třída – Velmi těžko trhatelné horniny – (rozpojitelné trhavinami)

(Zdroj: ČSN 73 3050, 1987)

Dalším způsobem třídění je podle tvaru třísky (**Tab. 3**), obdobně jako u třískového obrábění ocele, tak i při úpravě půdního reliéfu, zejména ve stavebnictví, lze sledovat různé chování půdní „třísky“, v zemědělství častěji označovaná jako skýva. V písčitých půdách dochází k plynulému přesunu materiálu bez narušení toku materiálu, u pevnějších půd dochází také k plynulému odvádění materiálu, ten se ale na spodní straně trhá a vytváří hroudy. Měkčí půdy o vyšší vlhkosti mají tendenci vytvářet usmýkavou třísku, kde dochází k vytvoření smykových rovin a ztrátě vnitřní integrity. Velmi pevné jílovité půdy a půdy o menší vlhkosti mají tendenci k velkému lámání, při průjezdu nástroje profilem půdy dochází k vytrhávání hrud.

Tab. 3: Závislost tvaru třísky na druhu rozpojované zeminy.

| Písčítá | Plynulá |
|--|---|
|  |  |
| Usmýkávaná | Vylamovaná |
|  |  |

(Zdroj: Jeřábek 1996 - upraveno)

4.4 Způsoby měření síly

Tahový odpor strojů pro zpracování půdy, se dá jinými slovy definovat, jako síla potřebná k tažení stroje. Proto součástí většiny měřících zařízení jsou různé prvky, prostřednictvím kterých je přímo nebo nepřímo zjišťována tato síla.

4.4.1 Pružinové siloměry (Mincíře)

Jedním z nejstarších měřidel síly je pružinový siloměr (**Obr. 7**), obecně nazývaný také mincíř. Jde o jednoduché zařízení, kde je využíváno známého vztahu mezi tuhostí pružiny a její deformací. Skládá se z nosného těla vybaveného okem, nebo hákem pro uchycení, do něhož je vložena pružina známé tuhosti. Tuto pružinu pak stlačuje, nebo roztahuje dřík s okem, nebo hákem, dle daného typu siloměru. Na dříku, nebo na těle je uvedena stupnice, kde je síla přímo odečítána.

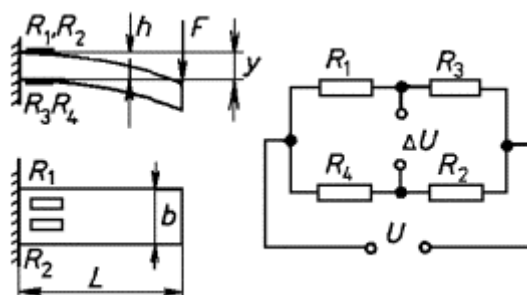


Obr. 7: Pružinový siloměr.

(Zdroj: <https://somet.cz/cz/pruzinovy-silomer-ultra-macro-line-500-n-5-n>)

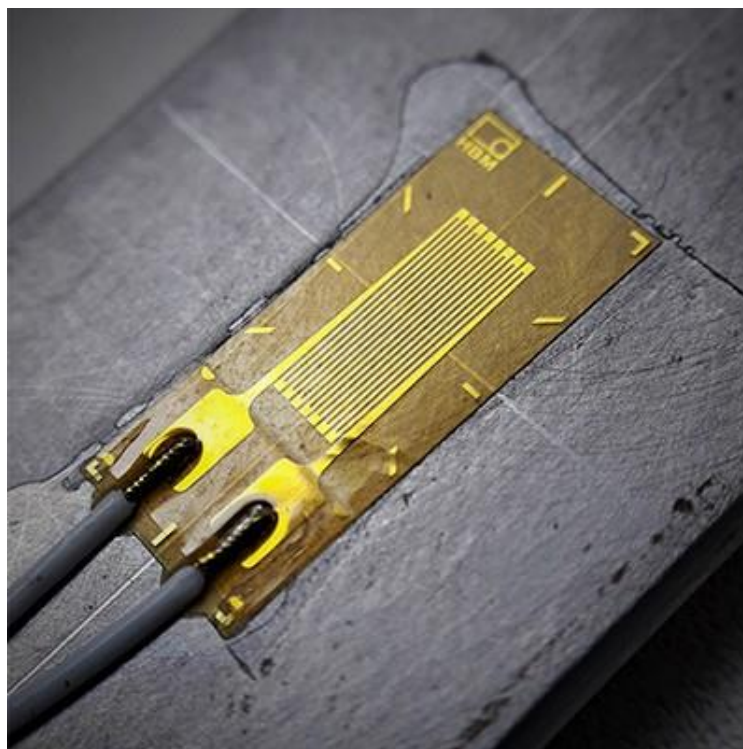
4.4.2 Odporové snímače síly

Jde o nepřímé měření síly založené na znalosti deformačních vlastností oceli a změny odporu ve vodiči v závislosti na průřezu. Při zatížení se deformuje část těla snímače (**Obr. 8**), většinou se ohýbá, tím dochází na jedné straně profilu k prodloužení plochy a na opačné straně ke stlačení plochy. Na těchto plochách je nalepen tenzometr (**Obr. 9**). Dnes jsou nejběžněji používány tenzometry fóliové. Jde vlastně o plošný spoj nanesený na tenkou fólii, které umožní deformaci aplikované cívky. Vyrábí se v různých provedeních, hlavní dělení je dáno počtem cívek. Pokud je osazena jedna cívka jde o tenzometr, který vyhodnocuje deformaci a tedy i sílu v jedné ose, pokud je požadováno vyhodnocovat více složek, je na tenzometr vedle sebe, nebo v několika vrstvách aplikováno cívek více. Podle vzájemného úhlu natočení jde vyhodnocovat různé definované směry nebo plošné reakce, kde nelze definovat jejich směr. Těchto složitějších tenzometrů se používá spíše při vyhodnocování napětí v konstrukcích, nebo dílech. Stavba odporového snímače bývá vytvořena tak, aby šlo vyhodnocovat právě jednu složku. Toto uspořádání vede k přesnějším výsledkům. Tenzometry se pro vyhodnocení zapojují do různých můstků, například do Wheastonova můstku **Obr. 8**. Dále pak $1/4$, dvojnásobný $1/4$, $1/2$ a plný můstek.



Obr. 8: Princip tenzometrického členu zatíženého ohybem a schéma můstku.

(Zdroj: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/sila/sila_odporove_snimace.htm)



Obr. 9: Detail nalepeného tenzometru.

(Zdroj: <https://encardio.medium.com/strain-gauge-principle-types-features-and-applications-357f6fed86a5>)

Podle různého druhu deformace lze odporové snímače rozdělit na:

Tah a tlak – tyto snímače jsou většinou zapojeny úplným Wheatstnovým můstkem se čtyřmi jednoosými tenzometry zatíženými tlakem. Velmi často mají tvar písmene S, proto se často označují jako snímače typu S (**Obr. 10**).



Obr. 10: Tenzometrický snímač typu S.

(Zdroj: <https://www.variohm.com/news-media/technical-blog-archive/what-is-an-s-type-load-cell->)

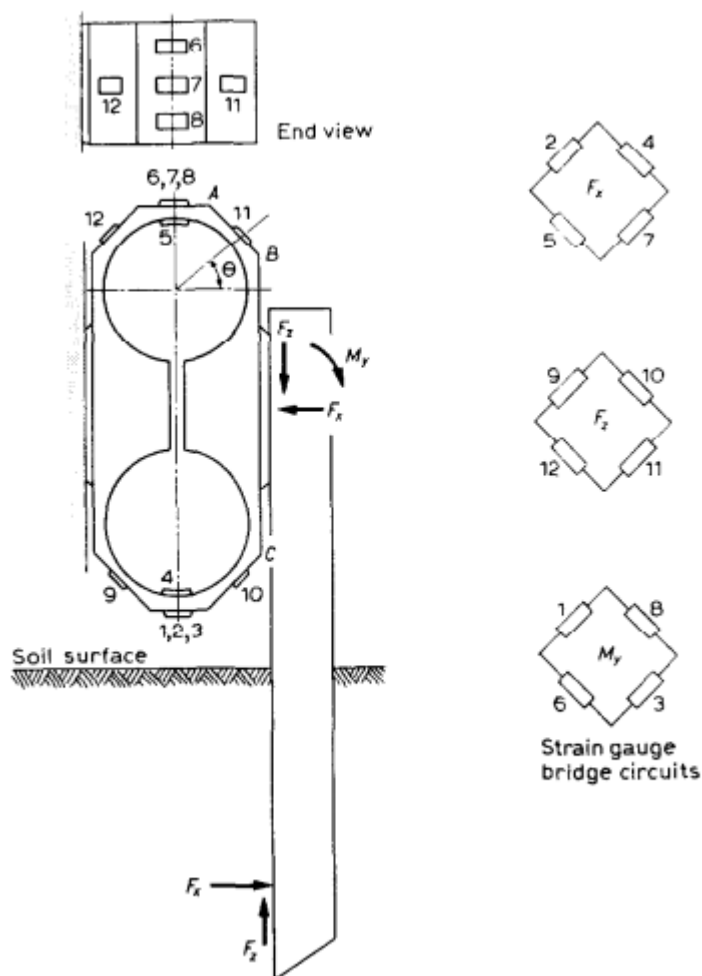
Ohyb – Tento typ snímače je nejčastěji používán pro váhové systémy, kde je použito více snímačů najednou. Jako jsou různé váhové plošiny, zásobníky apod.

Krut – Tento typ snímače se používá například pro vyhodnocování kroutícího momentu.

Smyk – Tento typ snímače se používá k vyhodnocení smykové deformace, což je důležité zejména u vyhodnocení napětí konstrukcí namáhané kombinovaným namáháním, zde je strukturálně nejdůležitější smykové napětí. Jeho měření a zajištění hodnot v povoleném pásmu slouží jako bezpečnostní prvek proti destrukci zařízení.

Dalším v oblasti zjišťování tahových odporů častým typem je snímač typu osmihranu, respektive osmistěnu. Ten je navržen tak, aby snímal dvě složky síly a moment v rovině těchto sil. Uspořádání tenzometrů je v úhlu 90° a 50° od vodorovné roviny (Godwin, 1975).

Studie od Cooka a Rabinowicze (1963), tento návrh rozšířila o konkrétní způsob osazení tenzometry (**Obr. 11**) a matematický popis pro vyhodnocení, v této konfiguraci je schopný člen měřit v rozsahu F_x 0–2445 N, F_z 0–668 N. Studie od Pila et al. (2009), kdy byl osmihran validován pro nařezávací disk v rozsahu 0,890 do 10,66 kN pro F_x a od 0,890 do 6,286 kN pro F_y .



Obr. 11: Schéma umístění tenzometrů na těleso osmihranného snímače pro měření tahového odporu.

(Zdroj: Cook et al., 1963)

4.4.3 Snímače tlaku v hydraulickém okruhu

Jde o nepřímé měření hodnoty tlaku, například v lineárních motorech pomocí manometrů, nebo jiných čidel tlaku. Síla se přepočítává z hodnot tlaku a působící činné plochy.

5. PŘEHLED ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Přehled článků zabývajících se tématem měření tahové síly, jednak jako primární cíl práce, ale i jako dílčí část nutná pro naplnění primárního cíle. Při hledání klíčových slov „soil“, „tillage“, „draught force“, „draft force“ na Web of Science, bylo nalezeno od roku 1949 do roku 2021 celkem 2907 výsledků. Vzhledem k velkému množství článků byl jako hlavní podklad této rešerše zvolen výběr článků z posledních dvou let. Výběr byl dále rozšířen o další studie (**Tab. 4**).

Tab. 4: Přehledová tabulka měřících prostředků z jednotlivých studií.

| Článek | GPS modul | Typ tenzometru a kapacita [kN] | Frekvence snímání [Hz] | Vyhodnoc. síly a hodnoty [kN] | Vyhodnoc. momenty a hodnoty [kNm] | Typ orgánu | Rychlost pojezdu [km/h] ([m/s]) | Pracovní hloubka [m] |
|---------------------------------|-----------|--------------------------------|------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|------------|---------------------------------|------------------------------|
| Abbaspour-Giledeh et al. (2013) | NE | 2x osmihrany [20] | | F_x, F_y, F_z | M_x, M_y, M_z | Radlice | | |
| Abbaspour-Giledeh et al. (2018) | NE | typ S [20] | | F_t | | | | |
| Abbaspour-Giledeh et al. (2020) | NE | 3x osmihran [20] | | F_x, F_y, F_z [0,2967] | M_y | Radlička | 3,82 (1,06) | |
| Alimardani et al. (2008) | NE | FLA-3-11-IL [560, 450] | 0,33 | F_x, F_y, F_z [2,6–5,6] | | Pluh | 2,2 (0,61) | 0,24; 0,34 |
| AL-Jalil et al. (2001) | NE | 3x tenzometr [35] | | F_t [12,8] | | Radlice | 1,5–5 (0,42–1,38) | 0,1; 0,2; 0,3 |
| Askari et al. (2017) | NE | 3x osmihran [20] | | F_t [30] | | Radlice | 1,8–3,5 (0,5–0,97) | 0,3; 0,4; 0,5 |
| Askari et al. (2019) | NE | 3x osmihran [20] | | F_x, F_y, F_z | | Radlice | 1,8–3,5 (0,5–0,97) | 0,3; 0,4; 0,5 |
| Azimi-Nejdian et al. (2019) | NE | typ S (DEE/DEF) [50] | 10 | F_t [9] | | Pluh | 3,6–7,2 (1–2) | 0,15; 0,2; 0,25 |
| Bentaher et al. (2008) | NE | HBM-U2B [200] | 1 | F_x, F_y, F_z [4,105, 0,04, -0,295] | | Pluh | 1 (0,28) | 0,2 |
| Čipliené et al. (2019) | NE | PCE-FB 50k [50] | 5–300 | F_t [18,1] | | Disk | 2,95 (0,82) | |
| Frasconi et al. (2019) | NE | TLP-100KNB | 1 | F_x, F_y [1,14–3,37, 0,15–0,57] | | Dláto | | 0,13; 0,16; 0,19; 0,22; 0,25 |

| Článek | GPS modul | Typ tenzometru a kapacita [kN] | Frekvence snímání [Hz] | Vyhodnoc. síly a hodnoty [kN] | Vyhodnoc. momenty a hodnoty [kNm] | Typ orgánu | Rychlost pojezdu [km/h] ([m/s]) | Pracovní hloubka [m] |
|-------------------------------|-----------|---|------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------|---------------------------------|-------------------------|
| Guillén-Sánchez et al. (2018) | NE | KFG-5-350-C1-11 | | F_x | M_y | Slupice | | |
| Gupta et al. (2019) | | F12-Z3963 | 10 | F_t [8,8-10,8] | | Disk | 2,88–4,32 (0,8–1,2) | 0,16–0,18 |
| Hemmat et al. (2014) | NE | 3x typ S (DBBP série 50) [4,9] | 10 | | | Slupice | | 0,1; 0,2; 0,3 |
| Chen et al. (2004) | NE | DEOR | 100 | | | Různé | 6,12 (1,7) | |
| Kim et al. (2020) | ANO | 6x typ S, UU-T2 [19,61] | | F_x, F_y, F_z [14,5, 5, 9,7] | | Pluh | | 0–0,15, 0,1–0,3 |
| López-Vázquez et al. (2019) | NE | 3x osmihran | 20 | F_t [29,66] | | Disk | (1,1 - 1,27) | 0,25; 0,3 |
| Lysych et al. (2019) | NE | typ S [6,5] | | F_t [5,77] | | Radlička | 3 (0,83) | 0,12 |
| Machado a Lanças (2016) | ANO | typ S | 5 | F_x | | | | 0,4 |
| Malasli a Celik (2019) | NE | typ S [19,62] | | F_x, F_y [0,373, 0,131] | | Disk | 3,6 (1) | 0,05 |
| Mamkagh (2019) | ANO | 50-204 [20] | 1 | | | Pluh | | |
| Manikandan et al. (2019) | | 6x typ S [4,9–19,62] | | F_x, F_y [3,97, 0,67] | | | 3–7 (0,83–1,94) | 0,15; 0,2; 0,25 |
| Md-Tahir et al. (2019) | NE | BK-5 [30] | 1 | F_t [25,54] | | Pluh | | 0,22 |
| Musil a Červinka (2004) | NE | typ S [50] | 10 | F_t [12,9] | | Kypřič | | 0; 0,08; 0,1; 0,12 |
| Okyere et al. (2018) | NE | | | | | Disky | 0,72–1,44 (0,2–0,4) | 0,05–0,095 |
| Porteš et al. (2013) | NE | U2B-100; tenzometry ramen horizontální / vertikální [100, 60 /20] | | F_t [35] | | Pluh | | 0,17; 0,175; 0,25; 0,27 |
| Roca et al. (2019) | ANO | LB 214, LB 216 [100] | 10 | F_x, F_y, F_z [38, 6, 20] | M_x, M_y, M_z [5,2, -20, 12] | Radlice | 7 (1,94) | 0,18 |
| Roeber et al. (2017) | NE | EA-06-125TQ-350 [4,45–135] | 50 | F_t [80] | | | 4,95–12,8 (1,37–3,56) | |
| Sirjacobs et al. (2002) | ANO | osmihran | 500 | F_x, F_y | M_y | Slupice | 5 (1,39) | 0,3 |

| Článek | GPS modul | Typ tenzometru a kapacita [kN] | Frekvence snímání [Hz] | Vyhodnoc. síly a hodnoty [kN] | Vyhodnoc. momenty a hodnoty [kNm] | Typ orgánu | Rychlost pojezdu [km/h] ([m/s]) | Pracovní hloubka [m] |
|--------------------------|-----------|--------------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Tekeste et al. (2019) | NE | TRD-A-5k [22,241] | 100 | F_x, F_y [0,078, 0,057] | | Radlička | 5; 6,8; 9 (1,4; 1,9; 2,5) | 0,05; 0,1 |
| Topakci et al. (2010) | ANO | typ S, H3-C3 [4,905] | 20 | F_x | | Slupice | | |
| Ucgul a Saunders (2019) | NE | 2x osmihran | 103 | F_x, F_y [5,664, 0,802] | | Pluh | 4,5–10 (1,257–2,778) | 0,125; 0,175; 0,225 |
| Upadhyay et al. (2017) | NE | typ S [19,62] | 50 | F_t [2,01] | | Rotační disk | 3,69–6,55 (1,02–1,82) | 0,12 |
| Upadhyay et al. (2019) | NE | typ S [19,62] | 50 | F_t [1,5-5] | | Disk | 1,2–3,2 (1,2–0,89) | 0,1; 0,12; 0,14 |
| Usaborisut et al. (2019) | NE | typ S | 200 | | | Slupice, rotační brána | 1,79–3,33 (0,5–0,92) | 0,2; 0,4 |
| Podpěra et al. (2009) | NE | | | F_x, F_y, F_z | M_x, M_y, M_z | | | |
| Wang et al. (2019) | NE | | | F_x, F_y | | Radlice | 3 (0,83) | 0,3 |
| Wang et al. (2020) | NE | | 4,2; 5,8; 7,5 | F_x, F_y | | Radlice | 3 (0,83) | 0,3 |

(Zdroj: Autor)

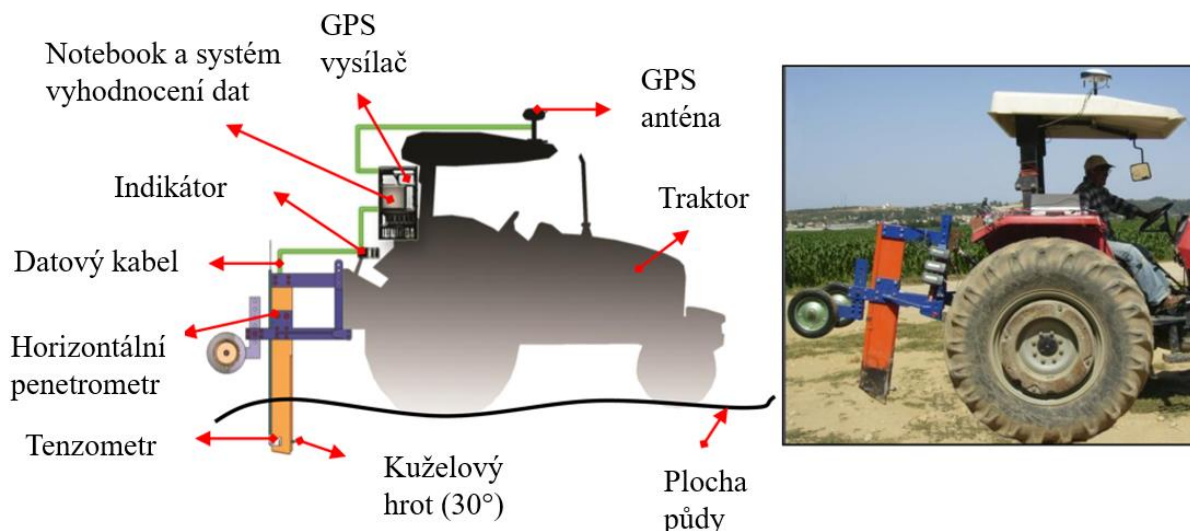
5.1 Měření odporu půdy

Hlavním cílem studie Topakci et al. (2010) bylo měřit horizontální odolnost půdy a vytvořit mapu půdního odporu. Systém (**Obr. 12**) je složen ze tří hlavních částí:

Mechanický systém (**Obr. 13**) – skládá se z třibodového závěsu, měřicí slupice (horizontálního penetrometru) a podpěrných kol pro nastavení hloubky, celková hmotnost je 310 kg

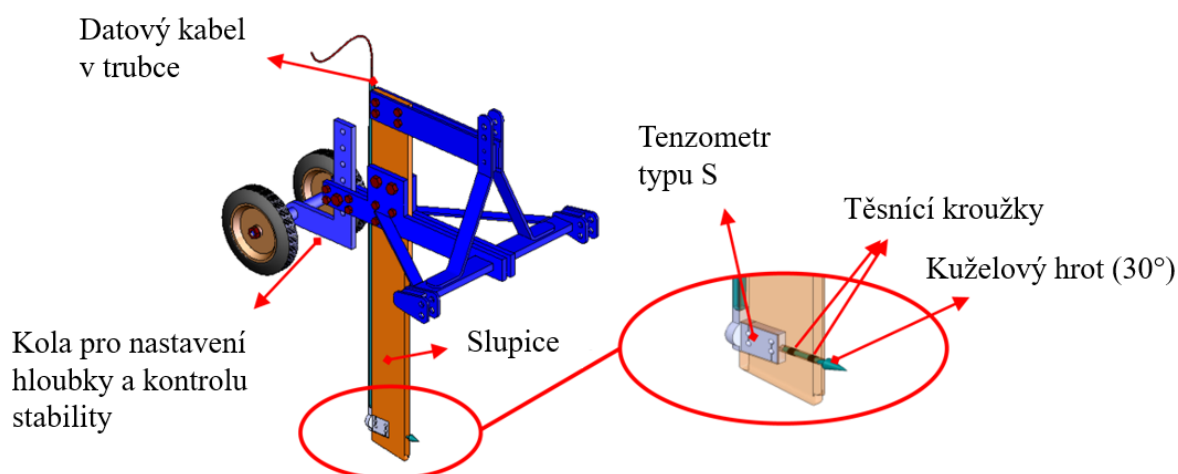
Systém sběru dat – skládá se z přijímače GPS, tenzometrického členu typu S s kapacitou 500 kg, H3-C3 od firmy Zemic Europe B.V., Leerlooierstraat, NL.

Software – zpracovává a převádí data do GIS (Geographical Information Systems – geografický informační systém), frekvence měření 20 Hz. Penetrometr je sestaven z kuželové špičky o vrcholovém úhlu 30° s povrchem 706,5 mm².



Obr. 12: Popis částí horizontálního penetrometru.

(Zdroj: Topakci et al., 2010 - upraveno)



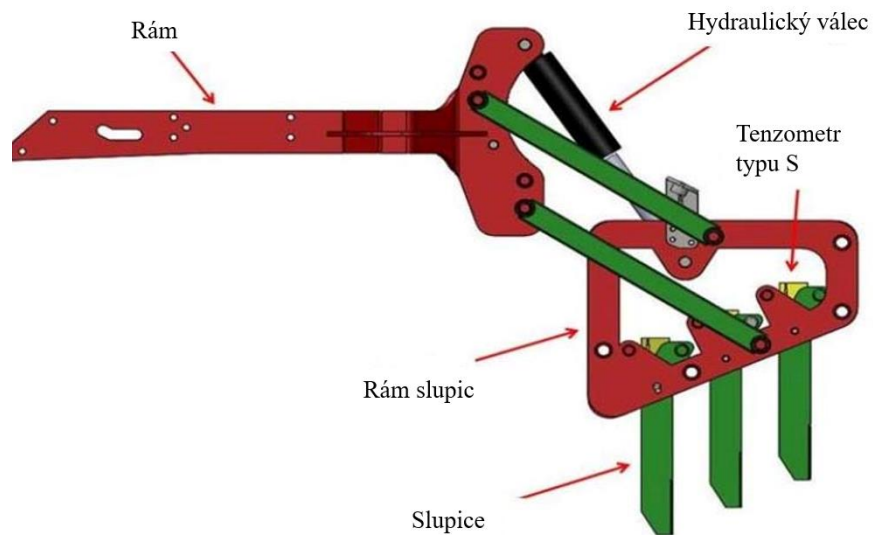
Obr. 13: Hlavní části horizontálního penetrometru.

(Zdroj: Topakci et al., 2010 - upraveno)

Cílem článku Machado a Lanças (2016) bylo vyhodnotit prototyp penetrometru složeného z postupných tyčí (**Obr. 14**) a porovnat výsledky s konvenčním systémem měření v hloubce 0,35 m. Byly vyhodnocovány parametry jako hodinová spotřeba paliva, provozní spotřeba paliva, tahový odpor, průměrný výkon, průměrná rychlost, prokluz, doba odezvy. Test ukázal že postupné tyče měly v porovnání s konvenčním systémem o 26 % nižší spotřebu paliva a o 14 % vyšší efektivitu.

Měřicí zařízení se skládá z nosného rámu, konzole měřících tyčí zavěšené na paralelogramu a hydraulického válce pro nastavení hloubky maření. Měřicí tyče, byly

s konzolou propojeny tenzometrickým členem. Poloha byla vyhodnocována GPS modulem Novatel 701GG s pracovní frekvencí 5 Hz. Data z penetrometru byla přenášena do řídicí jednotky (**Obr. 15**), odkud se řídila hloubka zpracování dlátového pluhu tak, aby byla o 5 cm větší než spodní vrstva utužené vrstvy.



Obr. 14: Schéma zařízení postupného horizontálního penetrometru.

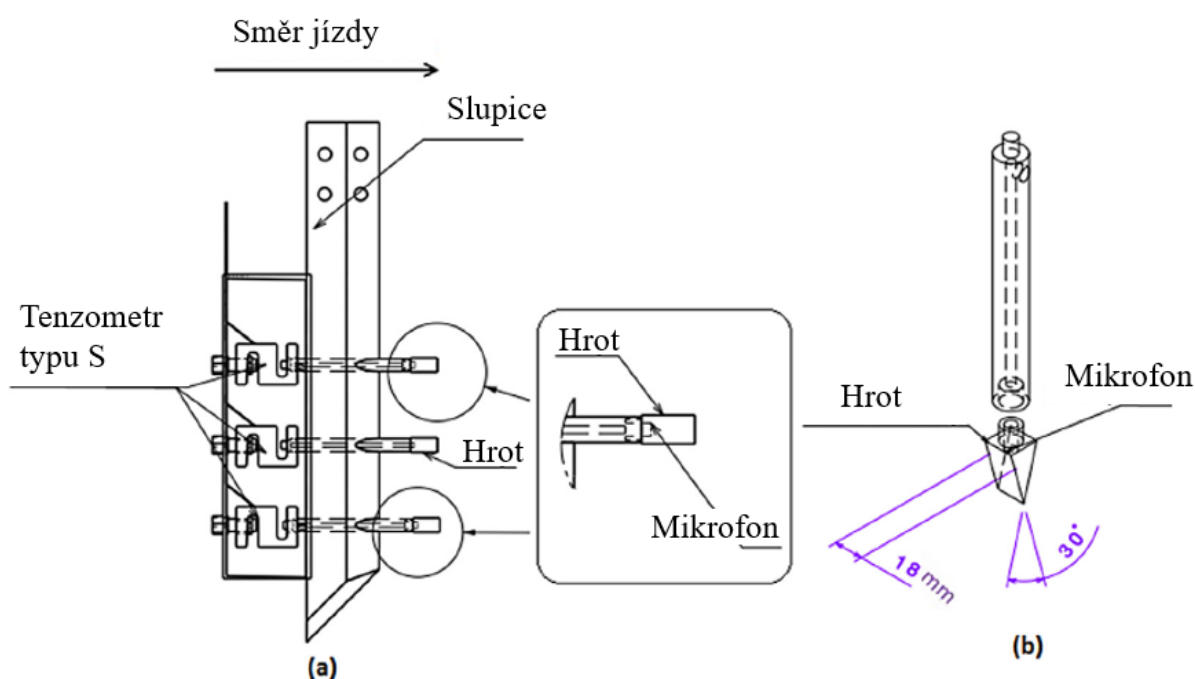
(Zdroj: Machado a Lanças, 2016 – upraveno)



Obr. 15: Sestava zkušebního zařízení pro automatické nastavení pracovní hloubky implementu podle hloubky plužní pánve.

(Zdroj: Machado a Lanças, 2016 – upraveno)

Cílem článku Hemmat et al. (2014) bylo ověřit, zda u horizontálního penetrometru (**Obr. 16**) ovlivňuje naměřenou hodnotu utužení půdy průchod slupice během měření. Na slupici byly umístěny tři tenzometrické členy typu S, DBBP-Série 50 (Korea) s kapacitou 4,9 kN. Které měřily v hloubce 0,1, 0,2 a 0,3 m pod povrchem s frekvencí snímání 10 Hz. Za vrcholy měřících kuželů byl umístěn mikrofon, který měl odhalit narušení půdy. Pro vyhodnocení byl použit signál z hloubek 0,2 a 0,3 m, které byly pod kritickou hloubkou. Během testů byl zaznamenán zvukový signál, ten byl následně přefiltrován a upraven. Výsledky byly porovnávány s výsledky zjištěnými vertikálním penetremetrem. Závěrem bylo, že kombinovaný penetrometr je schopný odhalit případné selhání půdy přes průjezdem slupice a tím zpřesnit naměřené hodnoty.



Obr. 16: Horizontální penetrometr se třemi snímači.

(Zdroj: Hemmat et al., 2014 – upraveno)

5.2 Měření oporu orebních těles

Cílem výzkumu Okyere et al. (2018) bylo zjistit změnu chování talířových bran (**Obr. 17**) při různé vlhkosti půdy. Sledovány byly parametry jako poměr obrácené půdy, hloubka zpracování a poměr rozbití hrud. Bylo zjištěno, že nejvyšší poměr obrácené půdy byl dosažen, když rychlost stroje byla 0,2 m/s, s roztečí disků 0,2 m a vlhkosti půdy 16,5 %. Při rychlosti stroje 0,4 m/s a roztečí disků 0,3 m bylo nejvyššího poměru rozbití hrud dosaženo při vlhkosti 26,5 %. Nejvyšší hloubky zpracování bylo dosaženo při rychlosti stroje 0,2 m/s, s roztečí disků 0,2 m a vlhkosti půdy 16,5 %. Byl vyvozen závěr, že změny parametrů pracovních

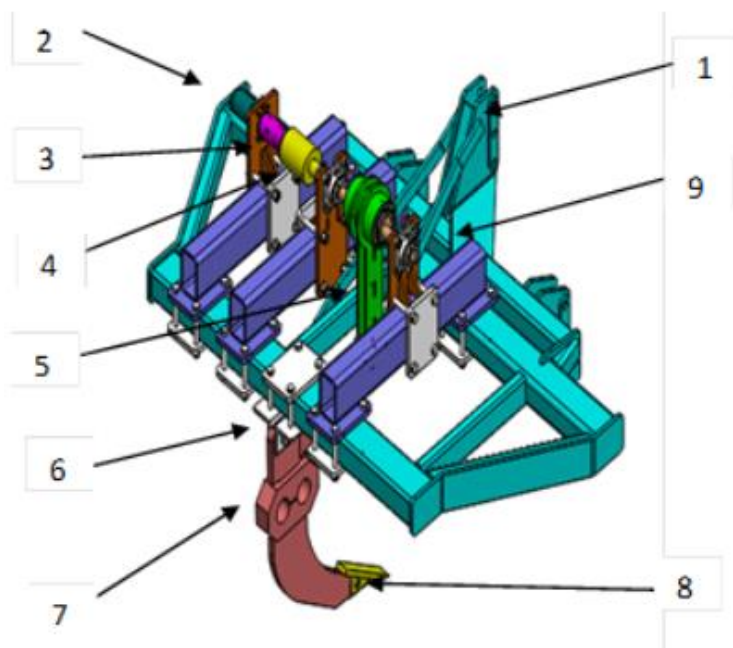
orgánů stroje, jako je rozteč disků a rychlost stroje, by mohly významně ovlivnit schopnost obracet půdní profil a schopnost rozbíjení hrud; neměla však významný dopad na hloubku zpracování.



Obr. 17: Měřící zařízení.

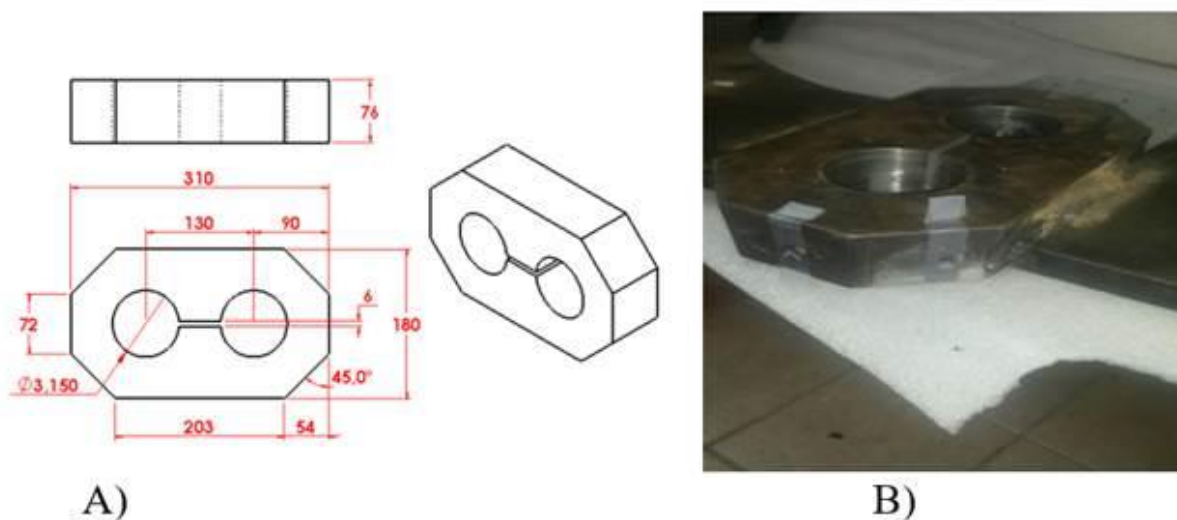
(Zdroj: Okyere et al., 2018 – upraveno)

Zařízení na vyhodnocování spotřeby energie podrýváku s vertikální vibrací (**Obr. 18**) umožňuje měřit vertikální a horizontální sílu. Toto zařízení se skládá z rámu s tříbodovým závěsem kategorie 2, oscilačního systému poháněného vývodovým hřídelem traktoru. Pro měření síly byl použit osmiúhelníkový snímač (**Obr. 19**) osazený tenzometry Kyowa (typ KFG-5-350-C1-11, Japonsko). Podle navrhovaných cílů bylo možné stanovit kalibraci snímačů vibračního multikultivátoru pro stanovení vodorovných a vertikálních sil v reálném čase, které jsou vyvíjeny na kormidlo během práce. Stejným způsobem byl kalibrován i použitý senzor. Byl změřen kmitočet oscilace kormidla a nakonec byl kalibrován snímač kroutícího momentu. Při kalibraci snímačů pro svislou sílu byla stanovena kalibrační konstanta $75,00 \text{ N-mV}^{-1}$ s linearitou 99,8 %, pro vodorovnou sílu byla stanovena konstanta $47,74 \text{ N-mV}^{-1}$ s linearitou 99,7 % a pro snímač točivého momentu byla stanovena konstanta $0,4538 \text{ N-mV}^{-1}$ s linearitou 98,8 %, což zaručuje vysokou spolehlivost a přesnost měření síly, frekvence a točivého momentu v reálném čase během polních zkoušek (Guillén-Sánchez et al., 2018).



Obr. 18: Izometrický pohled na vibrační podrývák. 1) hlavní rám; 2) hydraulický motor; 3) spojka; 4) snímač kroutícího momentu; 5) ojnice; 6) kormidlo nebo dláto; 7) tenzometrický snímač; 8) slupice; 9) nastavitelná podpěra.

(Zdroj: Guillén-Sánchez et al., 2018)

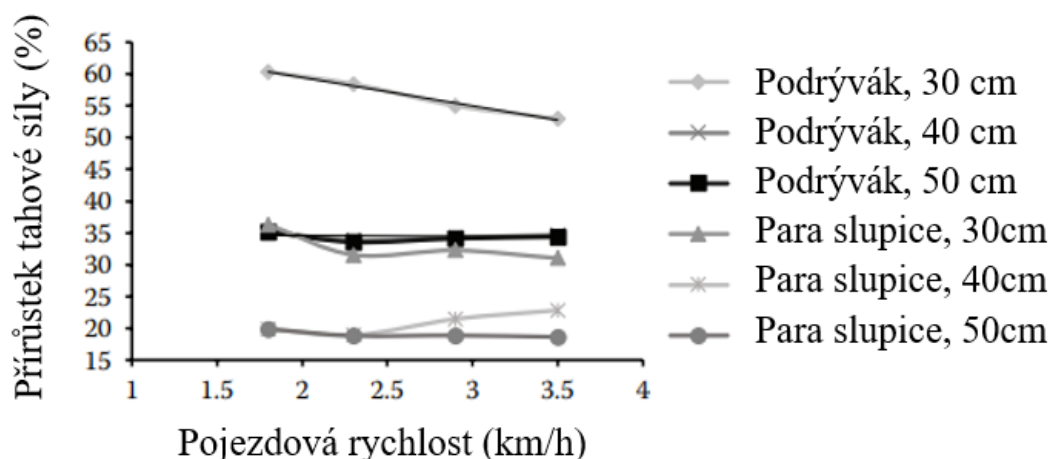


Obr. 19: Osmihranný tenzometrický člen. A) výkres, B) aplikace na zařízení

(Zdroj: Guillén-Sánchez et al., 2018)

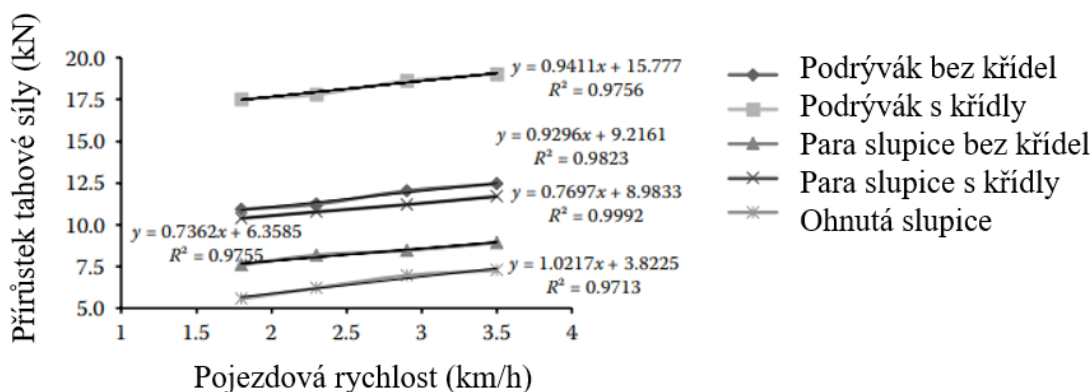
Pro tři typy slupic, (podrývák, para-pluh a ohnutá slupice), byly provedeny testy v rychlostech 1,8; 2,3; 2,9 a 3,5 km/h, pro hloubky 30, 40 a 50 cm v konfiguraci s křídly a bez křidel. Největší síly bylo dosaženo s křídly v hloubce 50 cm při rychlosti 3,5 km/h. Nejmenší hodnota byla

zjištěna s ohnutou slupicí, v hloubce 30 cm a rychlosti 1,8 km/h. Bylo zjištěno že ze sledovaných ukazatelů má statisticky nejvýznamnější vliv typ slupice a zda byla slupice osazena křídly (**Graf 2**) a již méně významný byl vliv pracovní rychlosti (**Graf 1**). Pro měření byl použit dynamometr vyvinutý Abbaspouring-Gilandeh a Khanramaki (2013), který dokáže měřit tahovou sílu do 35 kN. Měřící zařízení (**Obr. 20**) se skládá ze dvou osmiúhelníků pro měření sil umístěných na rámu, s třibodovým závěsem do traktoru. Hloubka zpracování byla měřena ultrazvukovým snímačem na rámu dynamometru. Rychlost pojezdu byla měřena na pátém kole instalovaném na traktoru (Askari et al., 2017).



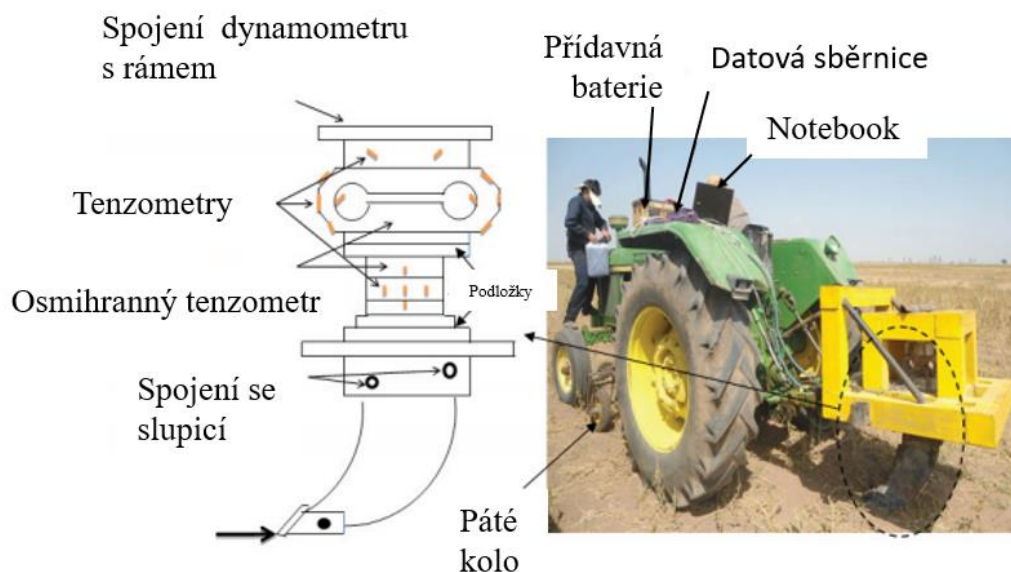
Graf 1: Graf závislosti přírůstku tahové síly na rychlosti pro různé pracovní hloubky.

(Zdroj: Askari et al., 2017 – upraveno)



Graf 2: Graf závislosti přírůstku tahové síly na rychlosti pro různé typy slupic.

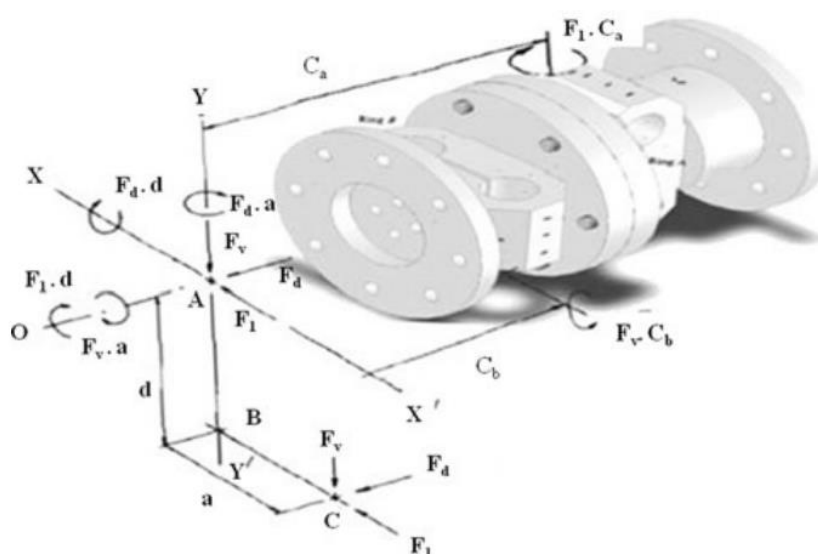
(Zdroj: Askari et al., 2017 – upraveno)



Obr. 20: Schéma měřícího zařízení a fotografie z polního testu.

(Zdroj: Askari et al., 2017 – upraveno)

V článku Abbaspour-Gilandeh et al. (2013) byl navržen dynamometr pro měření sil a momentů (**Obr. 21**), který je schopen měřit tři ortogonální síly působící na náradí a tři momenty působící kolem ortogonálních os až do maximální síly 20 kN a maximálního momentu 20 kNm. Síly jsou měřeny pomocí osmi tenzometrických můstků po čtyřech tenzometrech umístěných na dvou na sebe kolmých osmihranecht, mezi které byl vložen měřič točivého momentu.

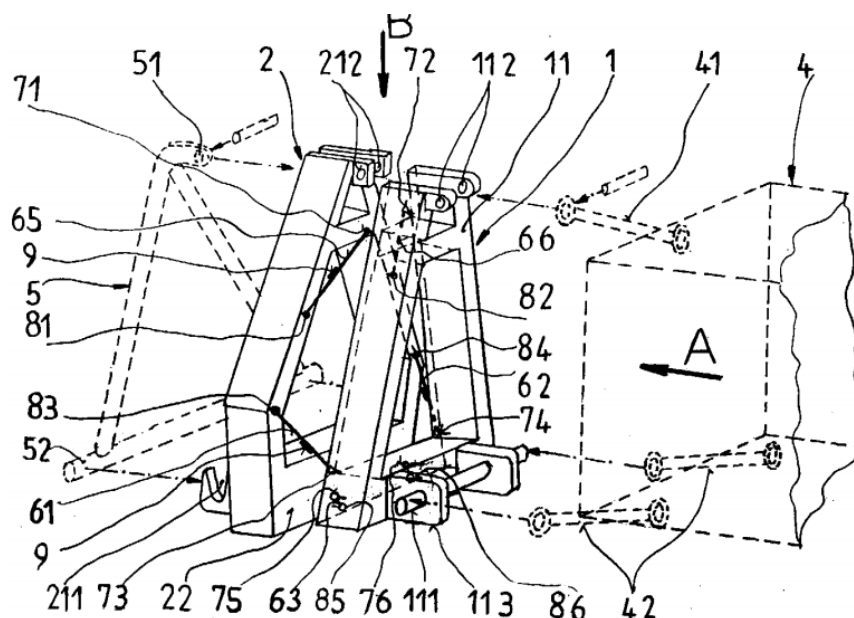


Obr. 21: Schéma vyhodnocovaných sil a momentů.

(Zdroj: Abbaspour-Gilandeh et al., 2013)

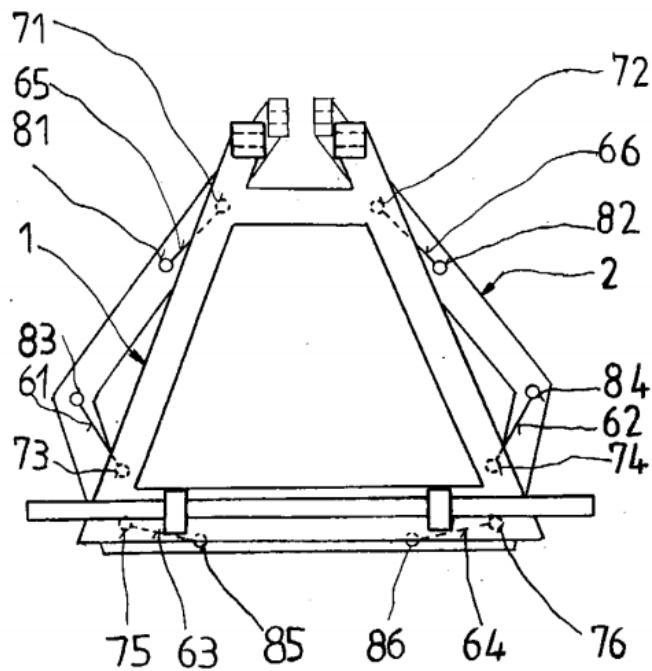
5.3 Měření celkového tahového odporu stroje

Měřicí zařízení popsáno v přihlášce vynálezu 2009-297 A3 od kolektivu Podpěra et al. (2009) z Výzkumného ústavu zemědělské techniky v. v. i. z Ruzyně, kde k výpočtu výsledných sil je použito šest jednoosých tenzometrických snímačů (**Obr. 23**). Jeden z nároků je funkcionalita jako univerzální nosič (**Obr. 22**), který umožňuje vícenásobné použití pro různé tažné prostředky i přípojné zařízení, oproti konvenčním způsobům, kdy je upravována vlastní konstrukce a přímo na nosné části konstrukcí jsou aplikovány tenzometry, nebo pouhá implementace například speciálních táhel třetích bodů. Kde je výsledná hodnota tažné síly reprezentována jen pomocí jedné složky síly, případně dvěma, ale reálné zatížení závěsu je prostorová síla.



Obr. 22: Schéma funkce testovacího zařízení.

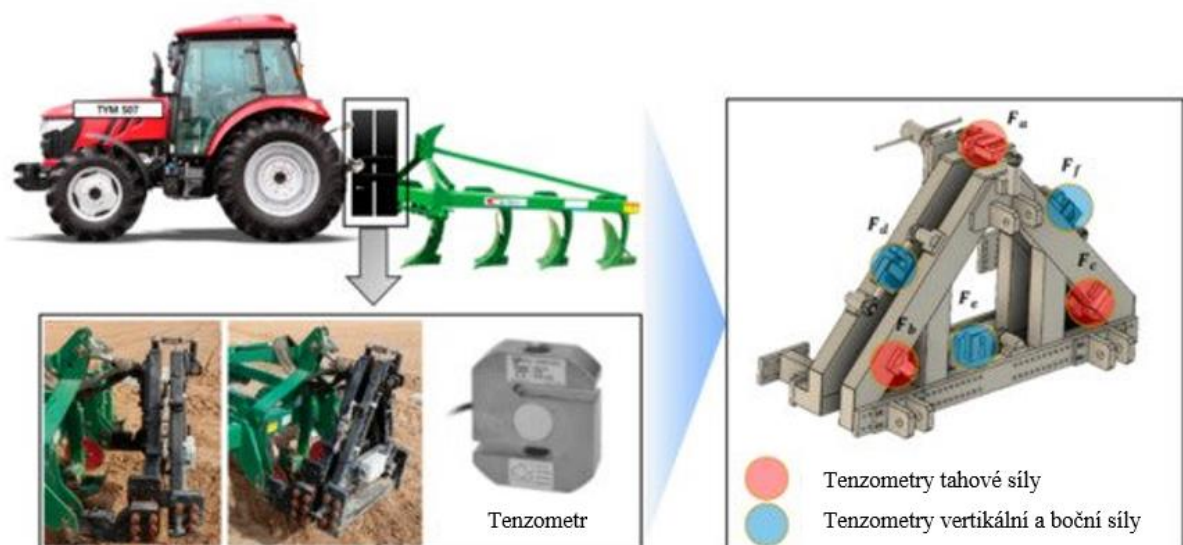
(Zdroj: Podpěra et al., 2009)



Obr. 23: Schéma zapojení tenzometrů, tenzometry pozice 61, 62, 63, 64, 65 a 66.

(Zdroj: Podpěra et al., 2009)

Tuto myšlenku zrealizovali rovněž na Korejské univerzitě Daejeon autoři Kim et al. (2020), kde tento univerzální nosič byl osazen šesti tenzometrickými členy typu S (**Obr. 24**). Rám byl testován na vibrační stoličce (**Obr. 25**), aby se validoval přepočtový vzorec a nakalibrovaly se tenzometry.

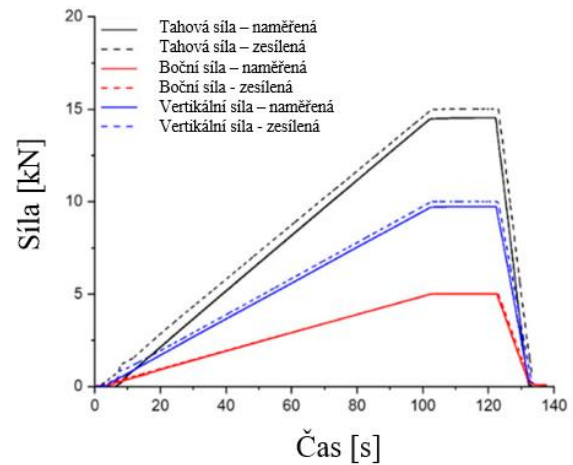


Obr. 24: Schéma měřícího zařízení.

(Zdroj: Kim et al. 2020 – upraveno)



(a)



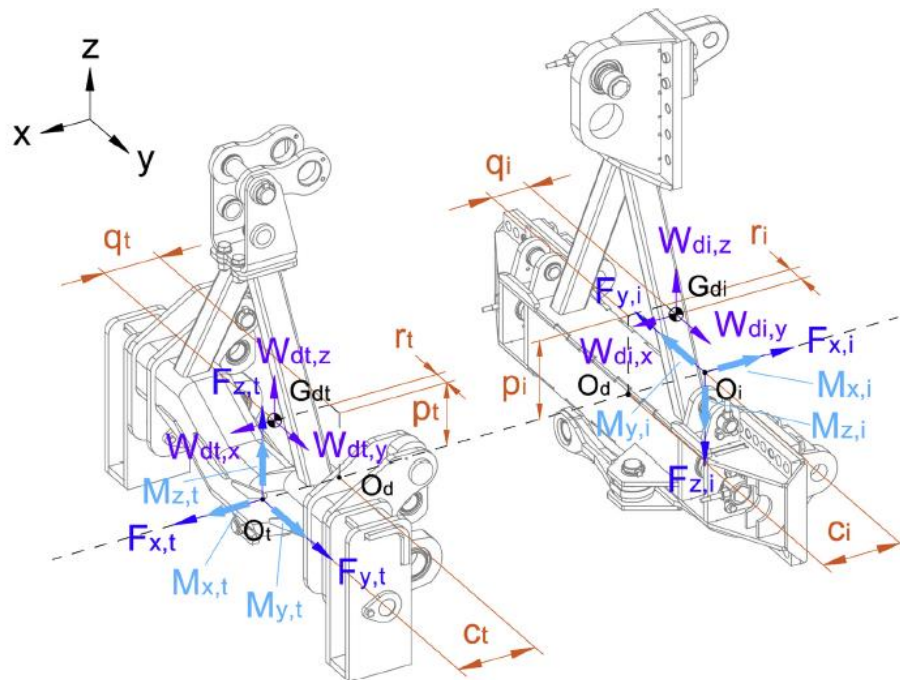
(b)

Obr. 25: Kalibrace měřícího zařízení. (a) ustavení na vibrační stolici, (b) zjištěné průběhy sil

(Zdroj: Kim et al. 2020 – upraveno)

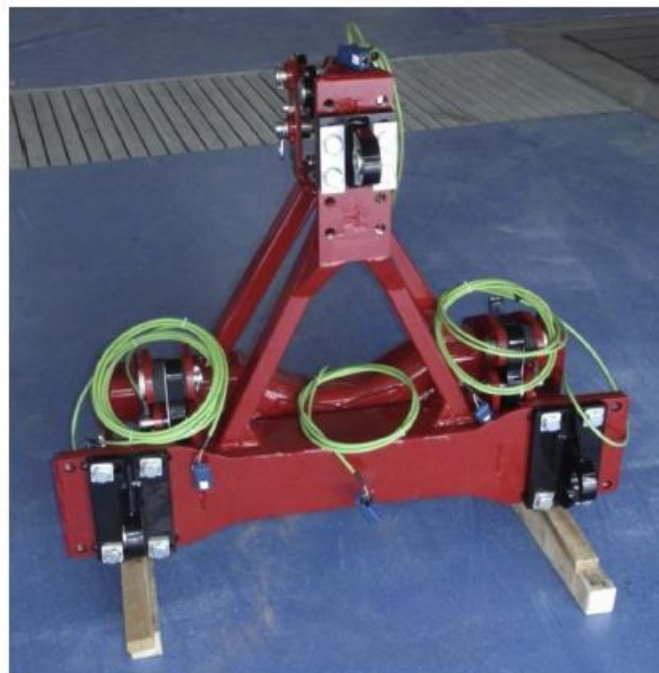
Dále byl systém doplněn pomocným kolečkem pro definici pracovní polohy. Když byl pluh v definované hloubce, píšť kolečka sepnul optickou bránu a měření začalo. Rám byl osazen šesti tenzometry typu S, UU-T2, DACELL, Cheongju, Korea) s rozsahem 0–19,61 kN. Dále byl stroj osazen GPS modulem (VBOX 3i, Vbox Automotive, Buckingham, UK).

V obdobné studii Roca et al. (2019) byl použit shodný koncept pro návrh měřícího mezirámu se šesti měřícími táhly, díky kterým lze vyhodnocovat všechny složky sil, i momenty okolo všech tří os (**Obr. 26**). Návrh byl primárně zaměřen na pevnostní optimalizaci tohoto zařízení, dále bylo zařízení rozšířeno o modul, který eliminoval chybu ve svažitém terénu. Celková konstrukce tak vyšla výrazně subtilnější (**Obr. 27**).



Obr. 26: Schéma vyhodnocovaných sil a momentů.

(Zdroj: Roca et al., 2019)

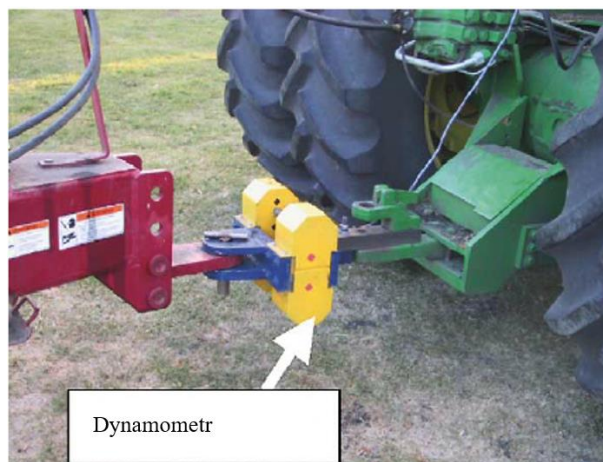


Obr. 27: Měřící zařízení.

(Zdroj: Roca et al., 2019)

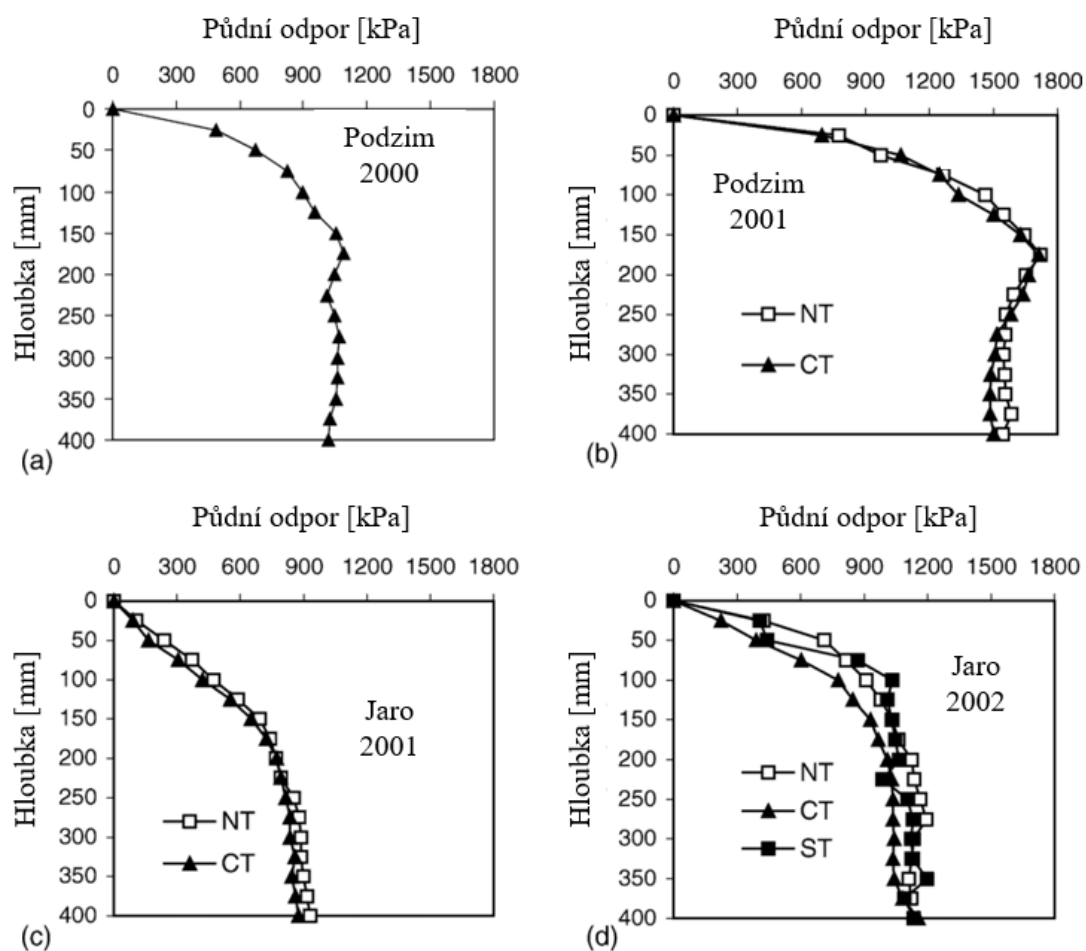
Cílem studie Chen et al. (2004) bylo sledovat vliv předchozí operace zpracování půdy na půdní odpor (**Graf 3**). V průběhu dvou let byl vyhodnocován výnos a poměr zapravení rostlinných zbytků. Byl použit dynamometr DEOR od firmy ST AgriTech (**Obr. 28**). Byl

nainstalován mezi traktor a implement. Pro všechny operace byla jezdová rychlost 1,7 m/s. Signál byl zaznamenáván frekvencí 100 Hz po dobu 40 s ve střední poloze pracovní dráhy.



Obr. 28: Měřicí zařízení.

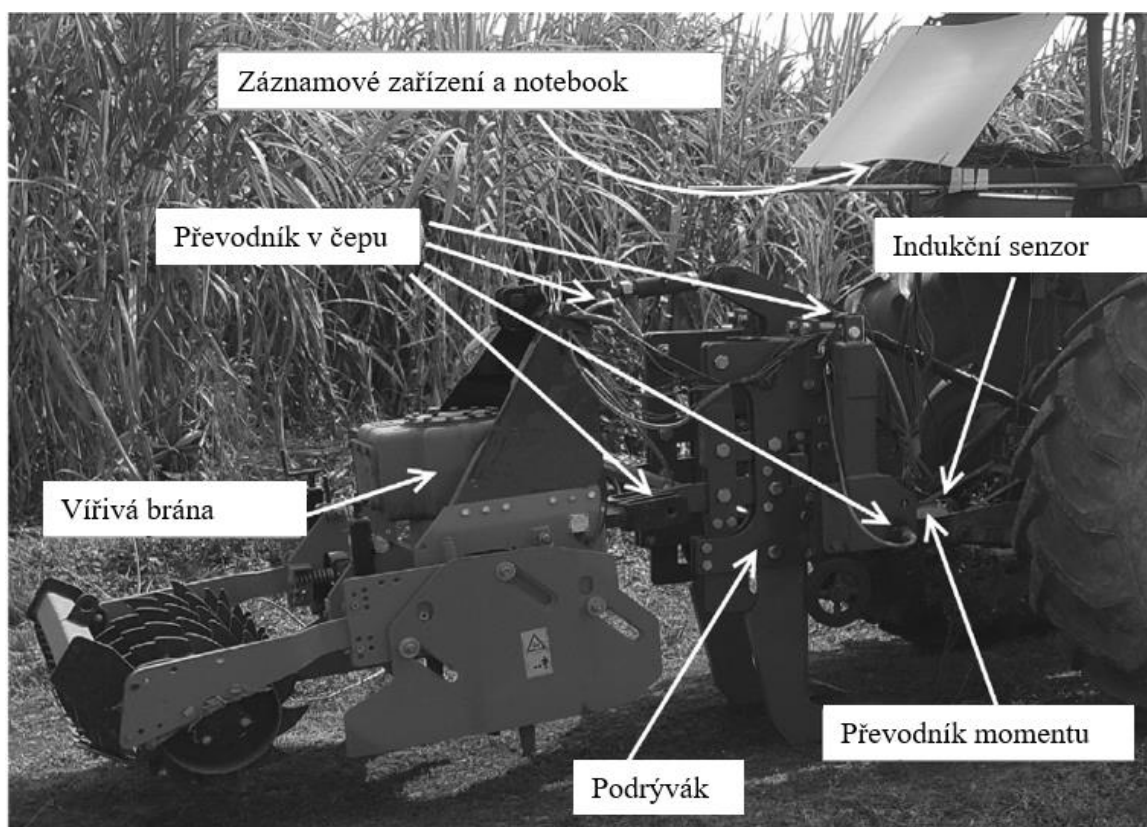
(Zdroj: Chen et al., 2004 – upraveno)



Graf 3: Půdní odpor v závislosti na hloubce a způsobu předchozího zpracování. NT – bezorebné zpracování, CT – radličkový kypřič, ST – diskový kypřič

(Zdroj: Chen et al., 2004 – upraveno)

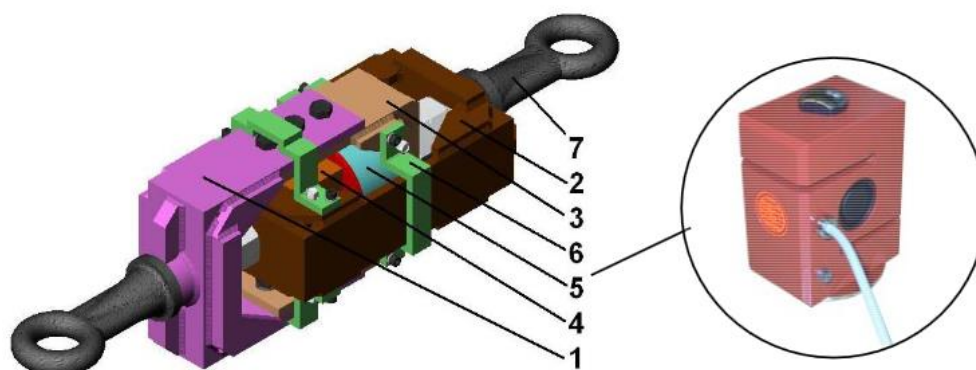
Cílem výzkumu Usaborisut et al. (2019) bylo zjistit, zda lze snížit energetické nároky obdělávání půdy, pomocí vibrační slupice. Test byl prováděn se zkušebním zařízením (**Obr. 29**) složeným z podrývaku a rotační brány. Stroj byl testován na dvou pozemcích, při dvou různých pojzdových rychlostech pro pozemek 1 (1,89 a 2,78 km/h), pro pozemek 2 (1,79 a 2,67 a 3,33 km/h), dvou hodnot otáček rotoru 299 a 526 ot./min., při dvou pracovních hloubkách 20 cm a 40 cm. Bylo zjištěno snížení spotřeby energie v porovnání s energetickou náročností samotné rotační brány o 10,4 až 21,1 %.



Obr. 29: Zkušební zařízení.

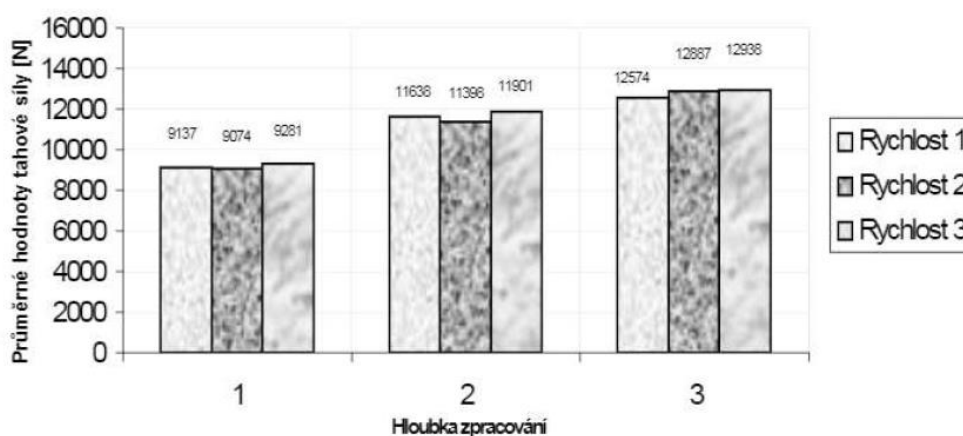
(Zdroj: Usaborisut et al., 2019 – upraveno)

Pro měření tahového odporu byl ve studii Musil a Červinka (2004) použit měřící člen MČB 1 (**Obr. 30**) zkonstruovaný na Ústavu zemědělské, potravinářské a enviromentální techniky na Mendelově zemědělské a lesnické univerzitě v Brně (MZLU v Brně). Hlavní část je tenzometrický blok. Měření bylo prováděno v časovém úseku 20 s, v intervalu 0,1 s. Pro tlumení rázů byl mezi táhla vložen silentblok. Zařízení bylo umístěno mezi dva traktory. Agregovaný kyprič byl nastaven do pracovních hloubek 0,08; 0,1; 0,12 m. Měření probíhalo při rychlostech od 2,67 do 4,83 m/s. Naměřené tahové odpory jsou v rozmezí od 9 do 12,9 kN (**Graf 4**).



Obr. 30: Tenzometrické zařízení MČB1.

(Zdroj: Musil a Červinka, 2004)



Graf 4: Graf porovnání tahové síly pro různé hloubky a rychlosti.

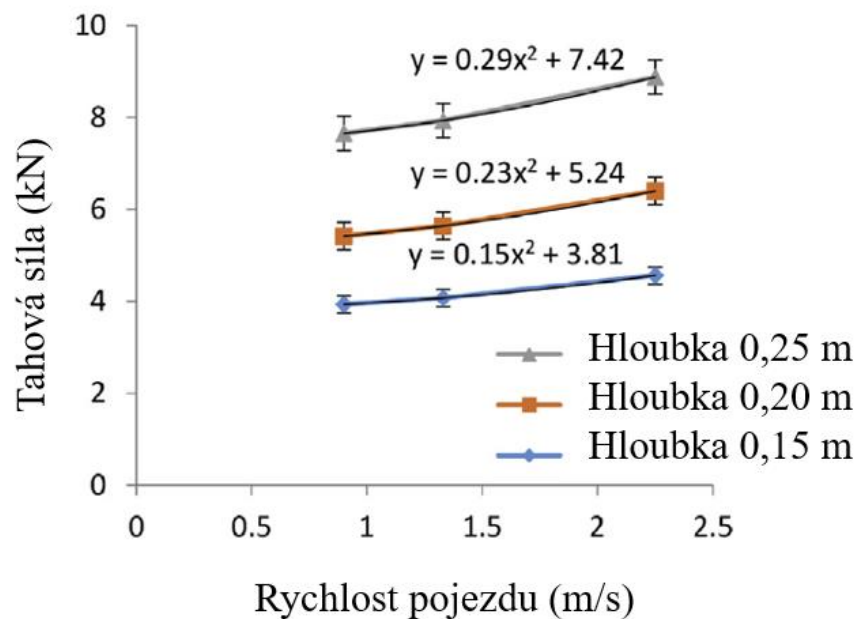
(Zdroj: Musil a Červinka, 2004)

Cílem studie Azimi-Nejadian et al. (2019) bylo získat vstupní data pro zatížení konstrukce stroje ve FEM analýze. Porovnáním reálného měření a simulací byl zjištěn rozdíl od 3 do 9,5 % u vertikální složky a 4–17 % u horizontální složky. Při polních testech (**Obr. 21**) byl pluh nastaven do pracovních hloubek 0,15; 0,2 a 0,25 m. Rychlost pojezdu byla 0,9 m/s. Pro měření tahové síly byl použit tenzometr typu S s kapacitou 50 kN, model DEE/DEF (Keli, China), s frekvencí snímání 10 Hz. Výsledný zjištěná tahová síla je v **Grafu 5**.



Obr. 31: Měření tahové síly soupravy. (a) umístění tenzometru, (b) použitý pluh, (c) detail tenzometru, (d) kolo snímající rychlost

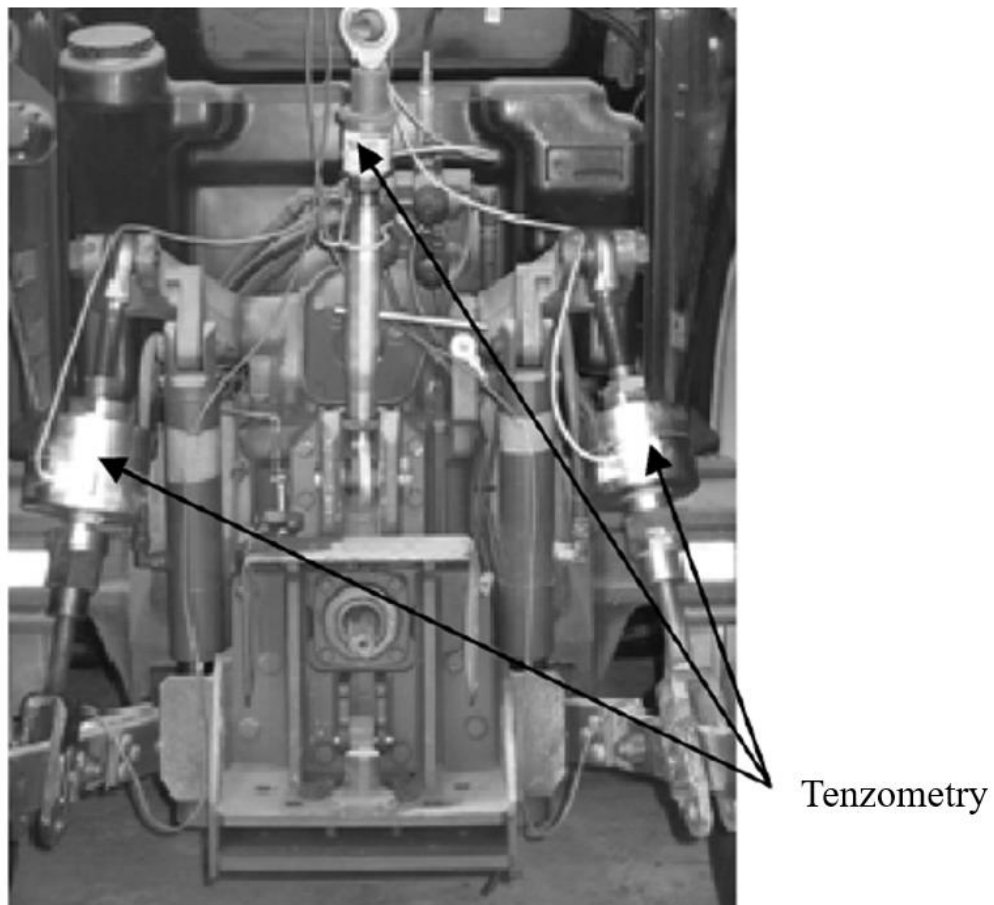
(Zdroj: Azimi-Nejadian et al., 2019 – upraveno)



Graf 5: Graf průběhu tahové síly na rychlosti a hloubce zpracování.

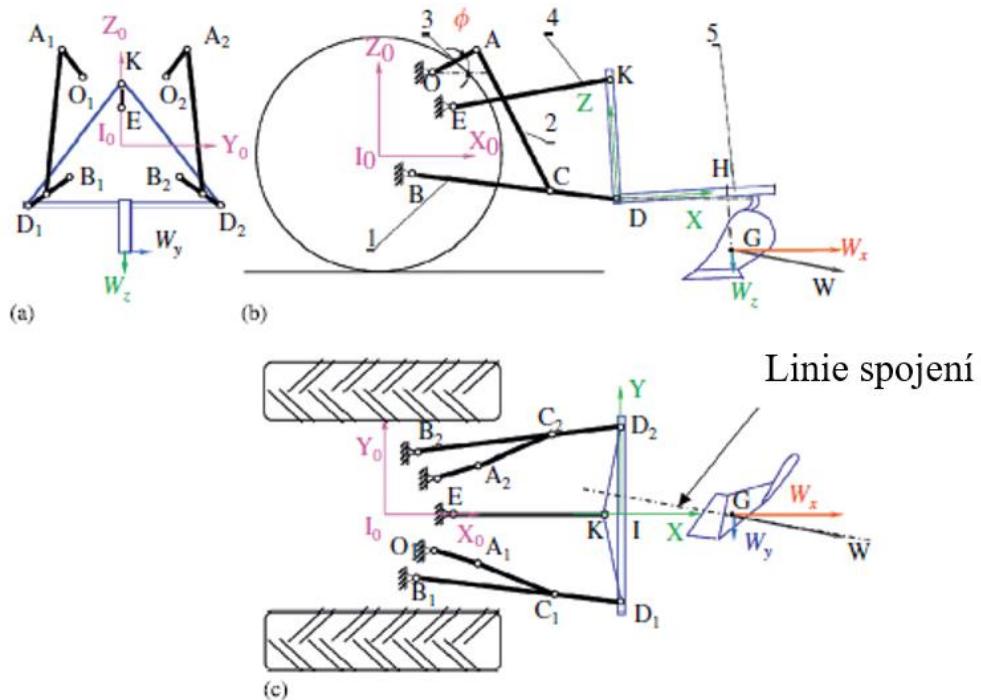
(Zdroj: Azimi-Nejadian et al., 2019 – upraveno)

Cílem práce Bentaher et al. (2008) bylo vyvinout systém pro měření síly v závěsu strojů pro zpracování půdy, které by sloužilo jako nástroj pro studium optimalizace výkonu těchto strojů. Pro získání těchto dat byl upraven tříbodový závěs traktoru a byl osazen třemi tenzometrickými členy (**Obr. 32**). Byly použity dva tenzometry HBM-U2B s kapacitou 200 kN na vertikálních táhlech a třetí tenzometr se shodnou kapacitou typ nebyl uveden. Naměřené hodnoty se zpětně přepočítávaly na reakce působící na orební těleso (**Obr. 33**). Polní testy prováděné s pluhem při rychlosti 1 km/h, nastavená hloubka 0,2m. Zjištěné hodnoty složek tahových sil jsou uvedeny v **Grafu 6**.



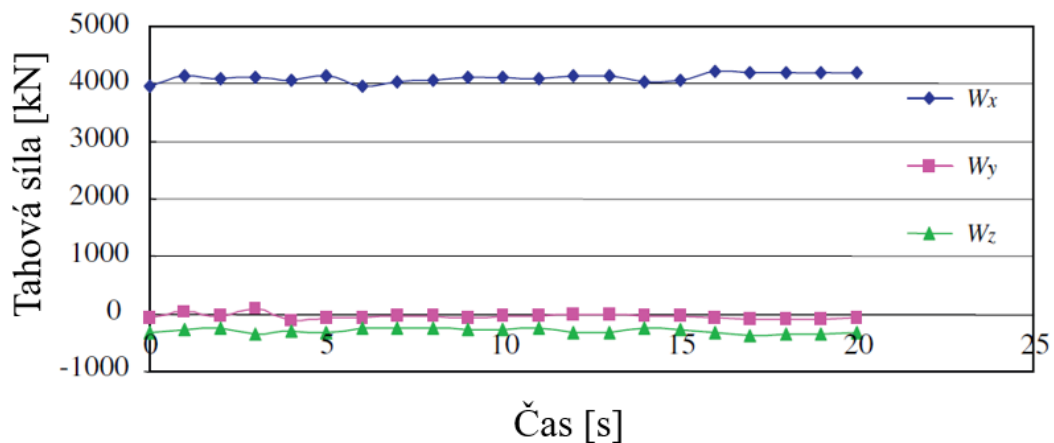
Obr. 32: Fotografie osazeného tříbodového závěsu.

(Zdroj: Bentaher et al., 2008 – upraveno)



Obr. 33 – Schéma systému, a) zadní pohled, b) boční pohled, c) horní pohled.

(Zdroj: Bentaher et al., 2008 – upraveno)

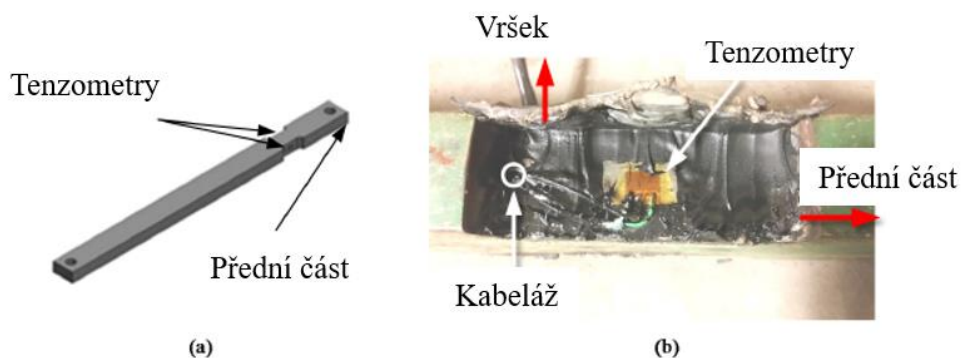


Graf 6: Graf naměřených složek sil, W_x, W_y, W_z pro radlici pluhu 50,8 cm (20“).

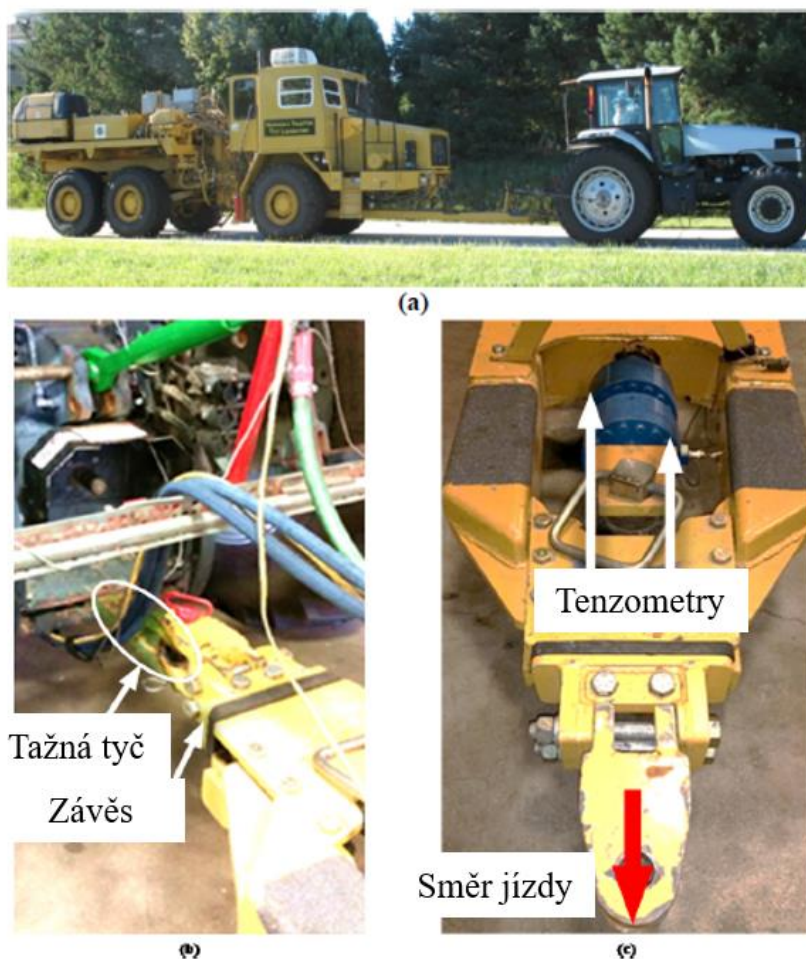
(Zdroj: Bentaher et al., 2008 – upraveno)

Cílem práce Roeber et al. (2017) bylo vyvinout měřicí zařízení, které bude sloužit pro optimalizaci výkonu traktoru, optimalizaci spotřeby a zaznamenávání tahové síly v terénu. Jako vhodný člen byla zvolena tažná tyč (**Obr. 34**). Měřicí zařízení obsahuje tenzometrickou ruznici 90° EA-06-125TQ-350 (Micro-Measurements, Vishay Precision Group, Inc., Wendell, N.C.). Zařízení bylo kalibrováno pro rozsah od 4,45 do 134 kN, snímací frekvence byla zvolena 50 Hz, rychlost soupravy byla v rozsahu 4,95 až 12,8 km/h. Zatížení bylo vyvozováno hydraulickým

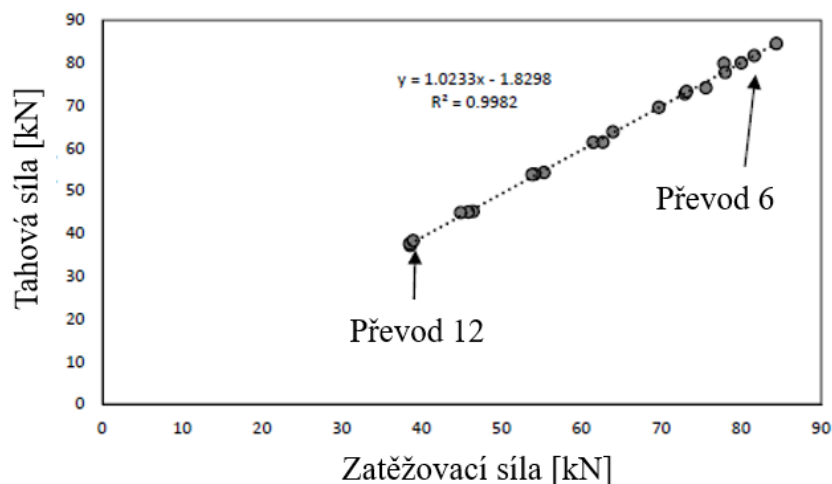
válcem umístěným v taženém prostředku (**Obr. 35**). Zjištěné hodnoty (**Graf 7**) mají lineární charakter, z čehož lze usuzovat shodnost, a tím i přesnost měřených sil.



Obr. 34: Tažná tyč (a), Detail aplikace tenzometru (b)
(Zdroj: Roeber et al., 2017 – upraveno)

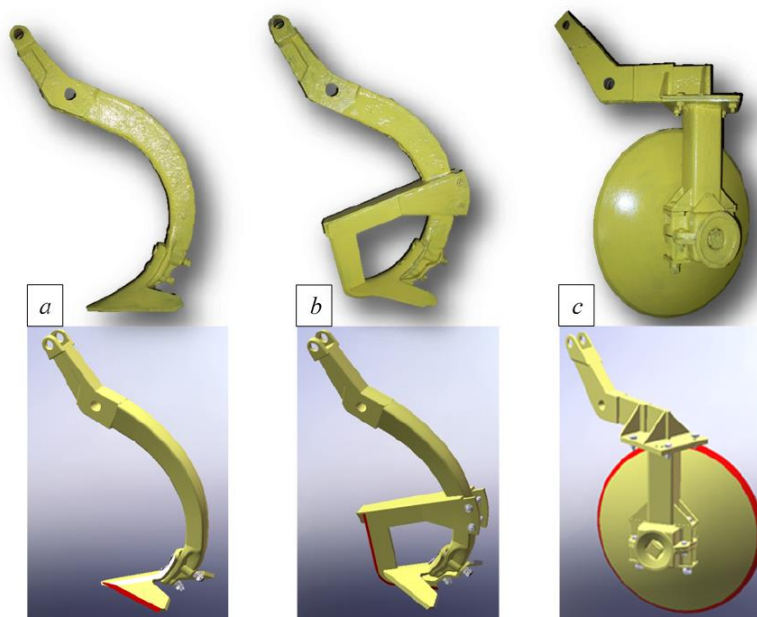


Obr. 35: Měřicí souprava (a), Spojení traktoru a zatěžovacího vozu (b), zátěžový systém (c)
(Zdroj: Roeber et al., 2017 – upraveno)

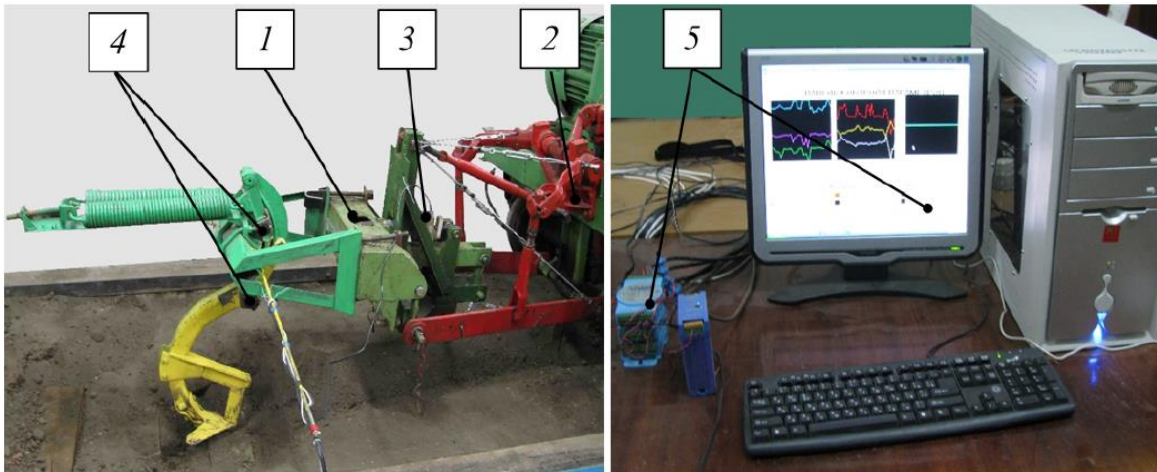


Graf 7: Graf porovnání zatěžovací síly a naměřené hodnoty tahnou tyčí.
 (Zdroj: Roeber et al., 2017 – upraveno)

Cílem práce Lysych et al. (2019) bylo zjistit interakci nástrojů (**Obr.36**) pro zpracování půdy s překážkou v lesních půdách. Pro simulaci reakcí byla použita metoda MBD (Multi Body Dynamics – metoda tuhých těles). Pro praktické ověření bylo zhotoveno shodné zkušební zařízení (**Obr. 37**). Rozdíl mezi simulací a měřením byl 3,9 % pro radličku a 1,7 % pro disk (**Graf 8**). Pro testování přejezdu 0, 5 a 10 cm vyčnívající překážky nad povrch, byla nastavena pracovní hloubka 0,12 m. Pojezdová rychlost byla zvolena 3 km/h.

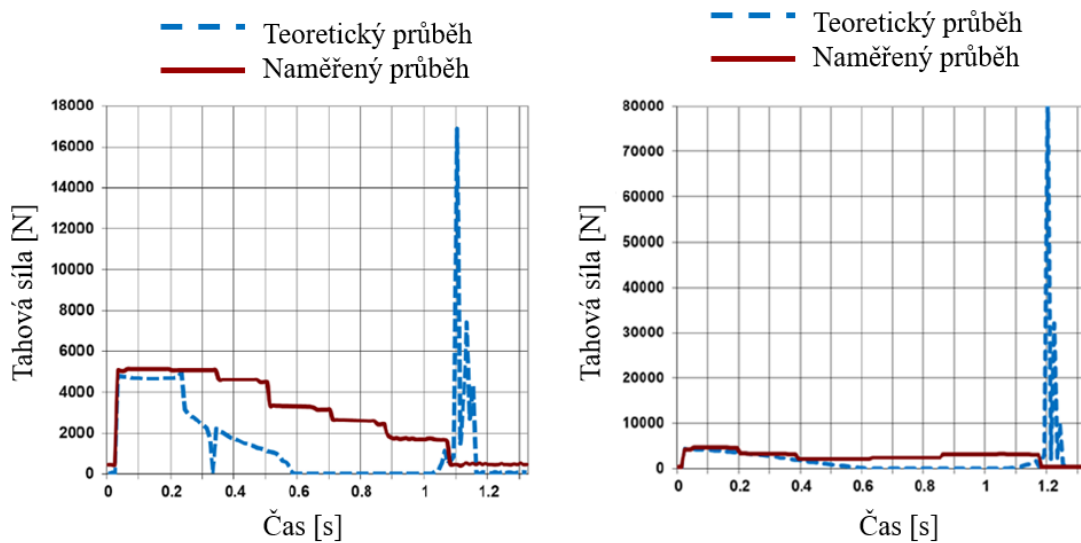


Obr. 36: Testované orgány. Nahoře skutečné exempláře, dole simulační modely. a) radlička, b) experimentální radlice, c) disk
 (Zdroj: Lysych et al., 2019)



Obr. 37: Měřicí zařízení. 1 – testovací rám, 2 – tažný vozík, 3 – tenzometr, 4 – úhlový senzor, 5 – záznamové zařízení

(Zdroj: Lysych et al., 2019)

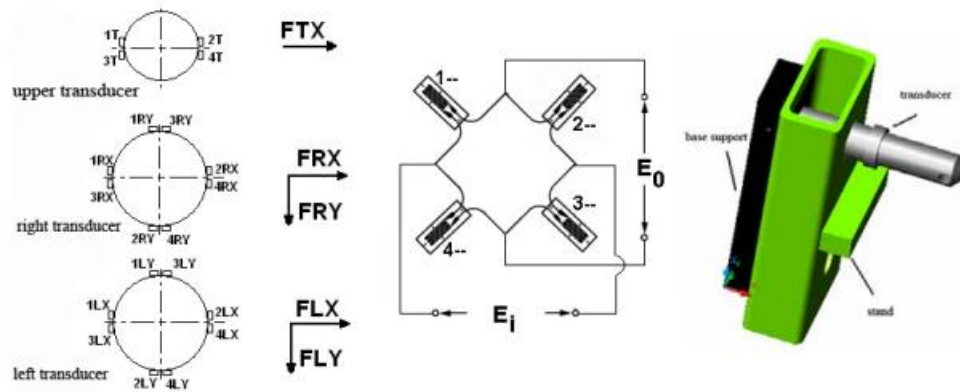


Graf 8: Průběh změny tahového odporu radličky vlevo a disku vpravo.

(Zdroj: Lysych et al., 2019 – upraveno)

Cílem studie Alimardani et al. (2008) bylo vytvořit měřicí zařízení pro zjišťování tahového odporu. Pomocí zjištěných dat následně optimalizovat a snížit výrobní náklady malých traktorů kategorie 0 a 1 pro využití v rozvojových zemích. Měřicí zařízení je navrženo jako pevný rám tvaru U (**Obr. 39**) o hmotnosti 49 kg, které se agreguje do tříbodového závěsu. Tvar umožňuje využít vývodový hřídel traktoru. Ve všech třech připojovacích bodech je umístěn tenzometrický člen (**Obr. 38**), tyto tři členy jsou osazeny celkem dvaceti tenzometry

FLA-3-11-IL (TML comp.). Kapacita zařízení je 650 kN pro spodní závěsy a 450 kN pro horní závěs. Zařízení je schopné vyhodnocovat reakce (**Obr. 40**). Zařízení bylo testováno s pluhem, při pojezdové rychlosti 2,2 km/h a nastavenou pracovní hloubkou 0,24 a 0,34 m, se snímací frekvencí 0,33 Hz. Naměřené hodnoty tahové síly byly v rozmezí 2,6–5,6 kN.



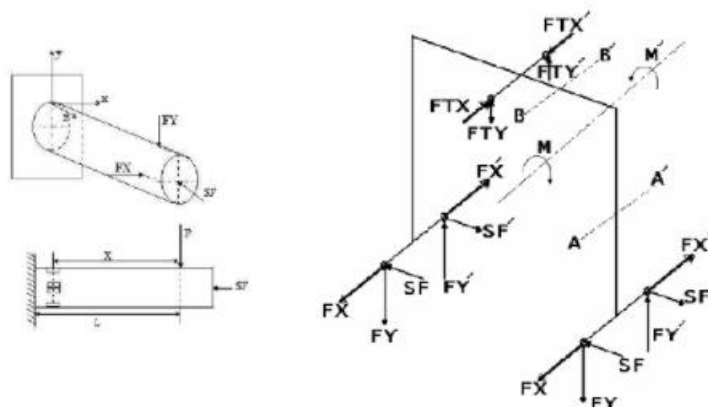
Obr. 38: Schéma rozmístění tenzometrů, schéma zapojení můstku a uložení.

(Zdroj: Alimardani et al., 2008)



Obr. 39: Měřicí zařízení.

(Zdroj: Alimardani et al., 2008)

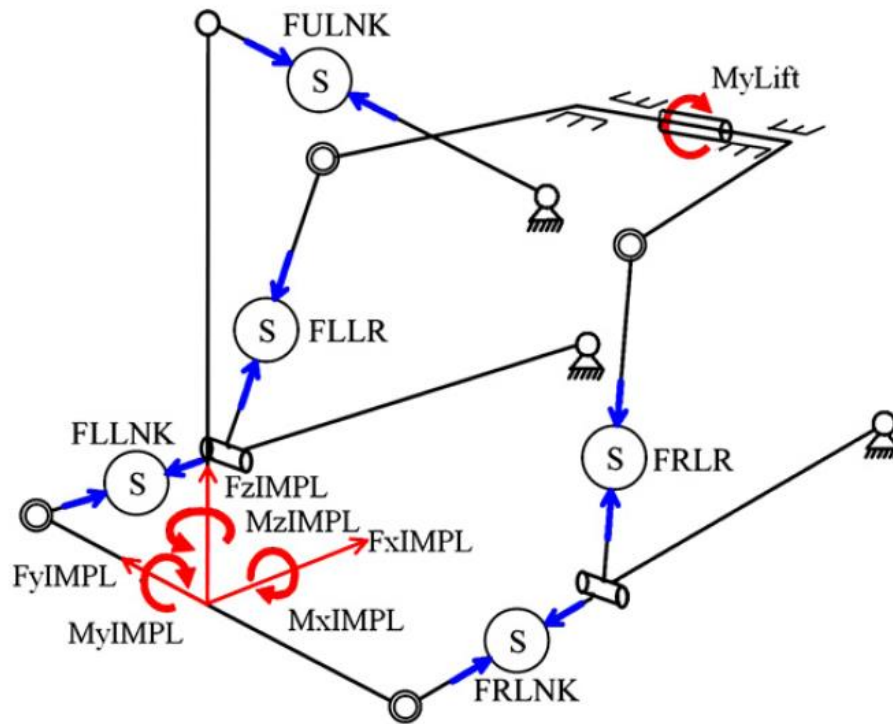


Obr. 40: Schéma působících sil.

(Zdroj: Alimardani et al., 2008)

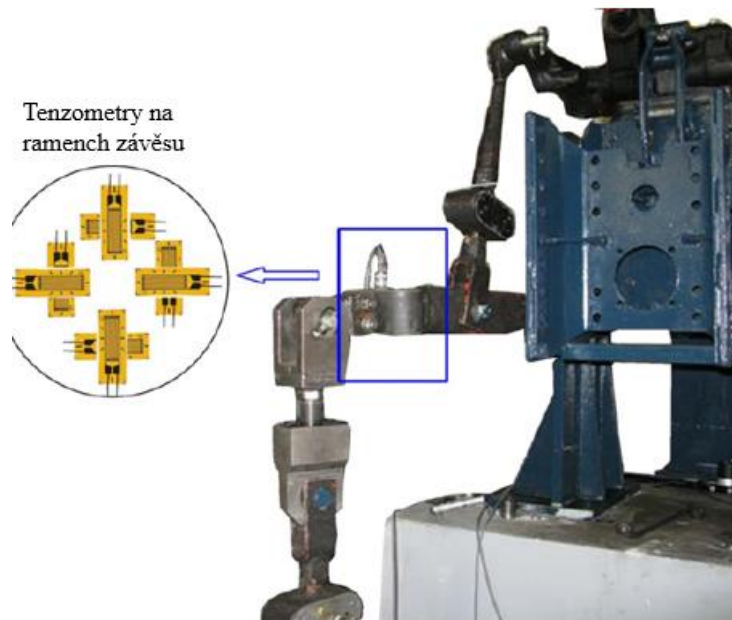
Cílem výzkumu Porteš et al. (2013) bylo zjistit přírůstek vertikálního zatížení náprav traktoru při zpracování půdy. Byl postaven matematický model (**Obr. 41**), který byl následně validován polními testy. Před polními testy bylo měřicí zařízení testováno na laboratorním zařízení (**Obr. 42**) v laboratořích Katedry techniky a automobilové dopravy na Mendelově univerzitě v Brně. Shodný test byl také proveden v laboratořích vývojového centra společnosti Zetor. Kdy byl systém zatěžován tenzometrem U2B-100 s kapacitou 100 kN. Stejný tenzometr byl následně využit i při polním testu pro měření tahové síly soupravy (**Obr. 43**). Polní test byl prováděn s pluhem pro zátěžové stavy:

- I pluh vlevo, hloubka 17 cm
- II pluh vpravo, hloubka 17,5 cm
- III pluh vpravo, hloubka 25 cm
- IV pluh vlevo, hloubka 27 cm



Obr.41: Schéma umístění tenzometrů (S) a mechanismus tříbodového závěsu.

(Zdroj: Porteš et al., 2013)



Obr. 42: Fotografie měřícího zařízení a aplikace tenzometrů na ramenu tříbodového závěsu.

(Zdroj: Porteš et al., 2013 – upraveno)



Obr. 43: Referenční měření soupravy pro validaci měřícího zařízení.

(Zdroj: Porteš et al., 2013)

Cílem studie López-Vázquez et al. (2019) bylo porovnání specifického energetického výdaje, a zjistit jaký je vliv půdy na výnos kukuřice pro tři systémy obdělávání.

Schéma 1: Diskový pluh, diskový podmítač, přesný secí stroj (DDP)

Schéma 2: Dlátový pluh, diskový podmítač, přesný secí stroj (CHDP)

Schéma 3: Bezorebné zpracování (NT)

Test byl prováděn v letních sezónách 2013, 2016 a 2017. Výsledné množství spotřebované energie vycházelo pro DDP v průměru 379,75 MJ, CHDP 135,01 MJ a NT 26,43 MJ. Energetická účinnost byla 18,23 % pro DDP, 6,88 % pro CHDP a pro NT 4,77 %. Použitý dynamometr (Obr. 44) byl agregován mezi traktor a přípojný stroj. Data byla vyhodnocována při frekvenci 20 Hz a jejich přenos byl sprostředkován převodníkem Daq Book 2000 (IOtech, MCC Corporation, North, MA, USA). Pro vyhodnocování byla použita norma ASABE D497,7, očekávaný rozsah tahové síly byl $\pm 35\%$, naměřené hodnoty pro diskové brány byly až v rozsahu $\pm 50\%$, též dlátový pluh byl v rozsahu $\pm 50\%$ (**Tab. 5**). Konkrétní hodnoty pracovních hloubek jsou uvedeny v **Tab. 6**.



Obr. 44: Měřicí zařízení.

(Zdroj: López-Vázquez et al., 2019)

Tab. 5: Tabulka naměřených tahových sil.

| Rok | 2013 | 2016 | 2017 | Průměr | Odhad ANSI/ASABE standard S623 |
|---------------------|--------------------|-------|-------|--------|--------------------------------------|
| Implement | Tahová síla [kN/m] | | | | |
| Diskový pluh | 29,89 | 27,99 | 31,10 | 29,66 | - |
| Radličkový pluh | 11,28 | 5,32 | 8,16 | 8,25 | 12,60 |
| Diskový podmítač | 5,56 | 5,18 | 4,92 | 5,22 | 7,60 |
| Přesný secí stroj | 2,81 | 1,81 | 1,95 | 2,19 | 2,64 |

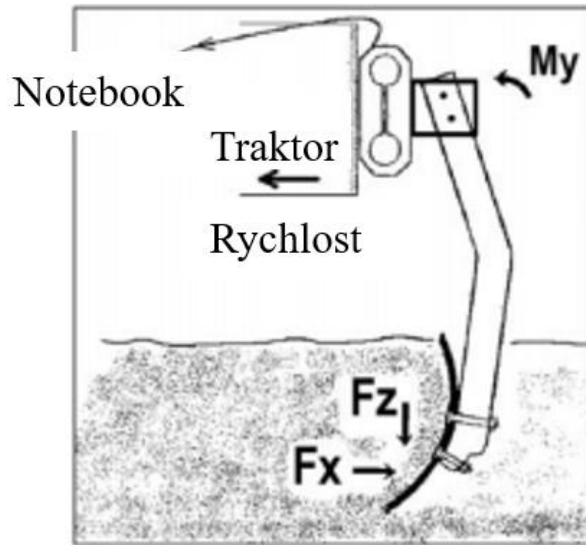
(Zdroj: López-Vázquez et al., 2019 – upraveno)

Tab. 6: Tabulka hloubek zpracování.

| Rok | 2013 | 2016 | 2017 | Průměr |
|-------------------|-------------------------|------|------|--------|
| Způsob obdělávání | Hloubka zpracování [mm] | | | |
| DDP | | | | |
| Diskový pluh | 279 | 169 | 263 | 237 |
| Diskový podmítač | 100 | 130 | 148 | 126 |
| Přesný secí stroj | 50 | 50 | 50 | 50 |
| CHDP | | | | |
| Radličkový pluh | 148 | 119 | 231 | 166 |
| Diskový podmítač | 100 | 130 | 150 | 127 |
| Přesný secí stroj | 50 | 50 | 50 | 50 |
| NT | | | | |
| Přesný secí stroj | 50 | 50 | 50 | 50 |

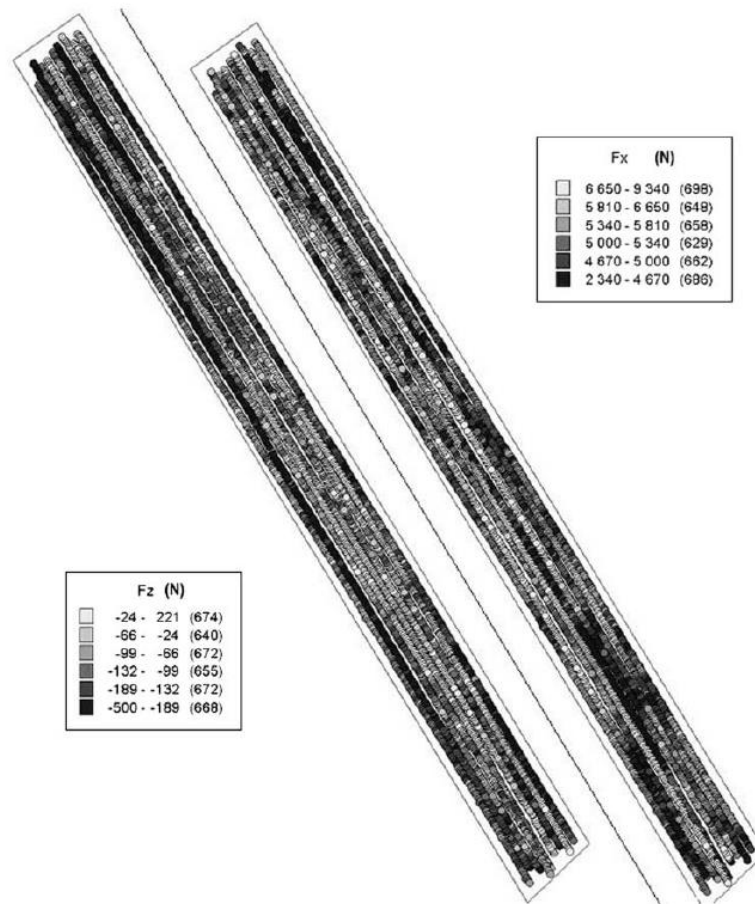
(Zdroj: López-Vázquez et al., 2019 – upraveno)

Cílem studie autorů Sirjacobs et al. (2002) bylo vytvořit mapu půdního odporu v reálném čase (**Obr. 46**). Která by sloužila jako podklad k využití v technologiích precizního zemědělství. Za tímto účelem bylo zhotoveno měřicí zařízení, založené na principu měření odporu radlice v konstantní hloubce. Pro měření byl použit polohový senzor DGPS (Omnistar, 3000 LR8) s frekvencí záznamu polohy 1 Hz. Použití osmihranu jako snímače síly a momentu (**Obr.45**), osazený CS-2043-GS princip osmihranu je postavený na teorii dle (Godwina, 1975), zapojení a osazení tenzometrů dle Cooka a Rabinowicze (1963), s frekvencí vyhodnocování 500 Hz a rychlostí pojezdu 5 km/h. Nastavená hloubka dláta byla 30 cm. Měření bylo validováno konvenčním měřením vertikálním penetremetrem, s použitím pedologických map. Z měření vychází statisticky významný vztah mezi horizontální silou F_x a momentem M_y a globálním indexem penetrometrie (IP25 – Index Penetrometry), který vyjadřuje sumu hodnot kuželového penetrometru o vrcholovém úhlu 30° zjištěných pro hloubkou mezi 0 a 25 cm. Také byl vysledován vztah mezi vertikální silou F_z a vlhkostí půdy.



Obr. 45: Schéma měřícího zařízení (F_x – horizontální síla, F_z – vertikální síla, M_y – moment)

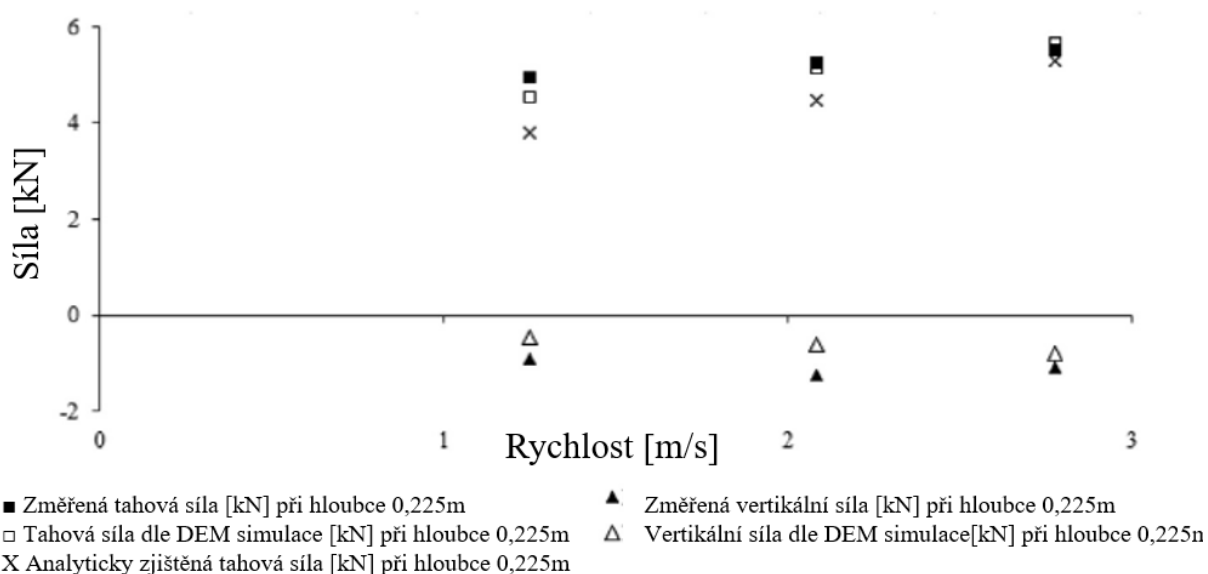
(Zdroj: Sirjacobs et al., 2002 - upraveno)



Obr. 46: Záznam naměřených hodnot složek tahové síly zanesený do mapy.

(Zdroj: Sirjacobs et al., 2002)

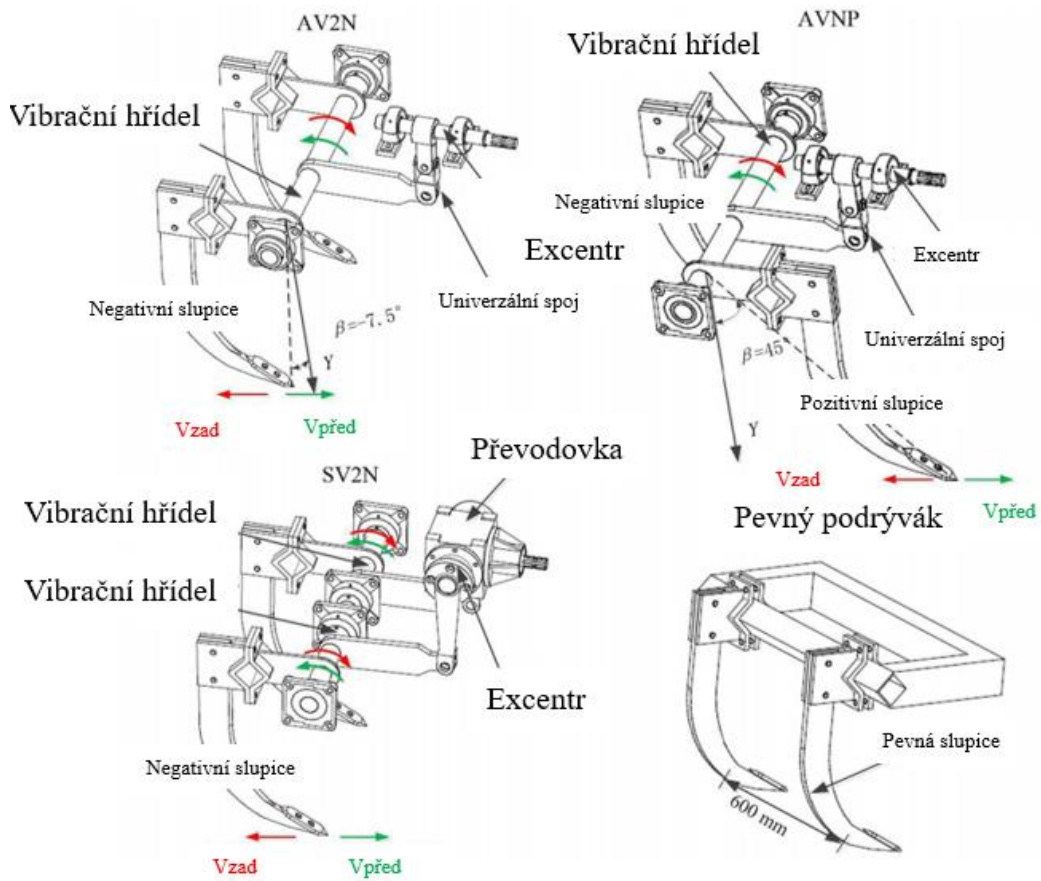
Článek autorů Ucgul a Saunders (2019) pojednává o tom, zda lze nahradit empirické metody validace orebního tělesa simulací a validací DEM modelu půdy po projetí radlice pluhu a porovnání přemístění půdy v líše a silové účinky. Bylo zjištěno že odchylka simulace a reálného měření přemístění půdy se pohybuje v rozmezí 0,8–16 %. Bylo zjištěno že DEM metoda dokáže předpovědět v rozmezí od 1,9–16,6 % vertikální složku síly a v rozmezí 0,3–21,5 % celkovou řeznou sílu. Na rozdíl od analytických metod, které dokáží predikovat vertikální sílu v rozmezí 3,6–44,4 %. Chování bylo sledováno u pluhu s nastavenou pracovní hloubka 0,125; 0,175 a 0,225 m, při rychlosti od 1,250 m/s do 2,778 m/s (**Graf 9**).



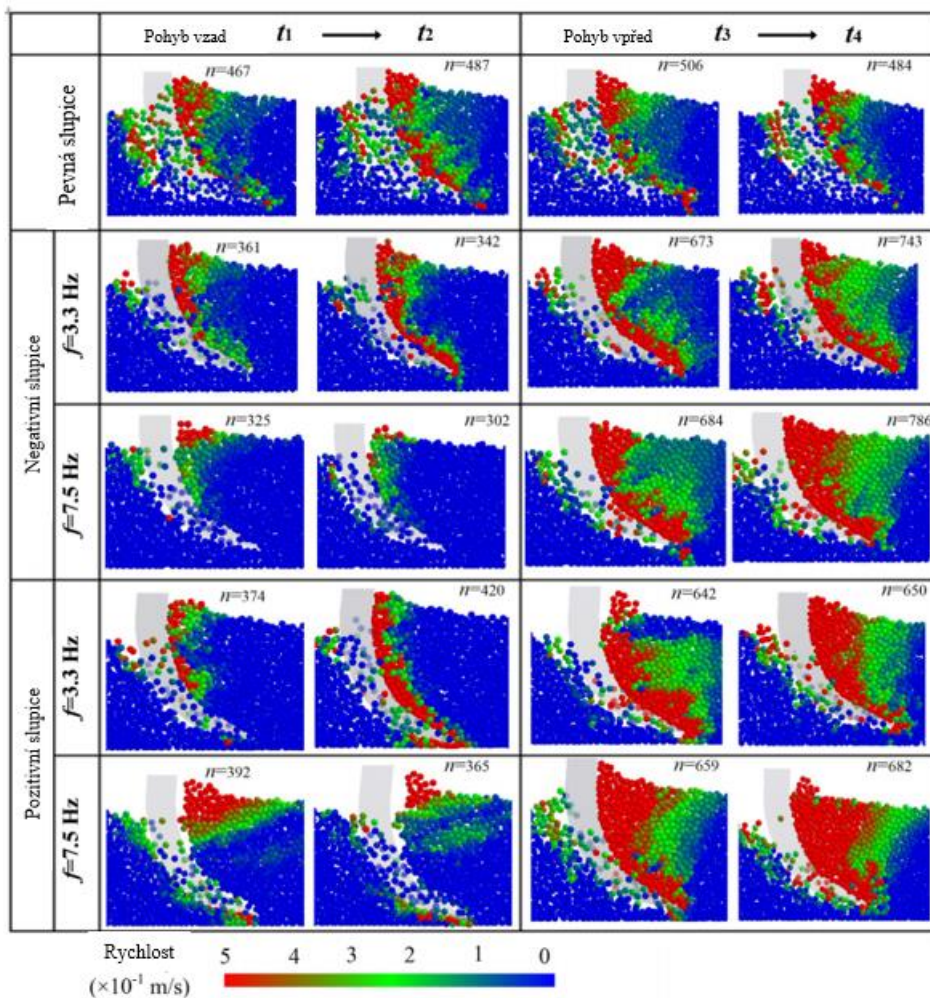
Graf 9: Graf naměřených tahových sil pro různé rychlosti v porovnání s DEM simulací.

(Zdroj: Ucgul a Saunders, 2019 – upraveno)

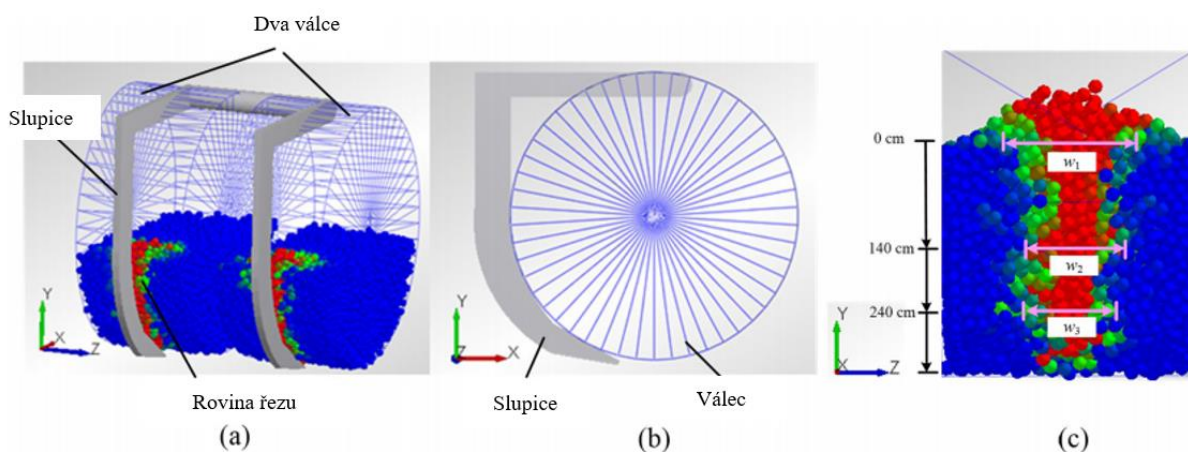
Cílem studie Wang et al. (2020) bylo porovnat potřebnou sílu pro různé koncepty vibračních radlic. Teoretický základ zkoumání mechaniky půdy v interakci s vibračním tělesem nejsou schopny definovat dynamickou sílu na nástroj. Proto byla slupice testována na reálném zkušebním zařízení (**Obr. 47**) a na základě těchto měření byl validován DEM model (**Obr. 48 a Obr. 49**), kdy se dále prováděla optimalizace zařízení (**Obr. 50**). Výsledné chyby simulačního modelu oproti reálnému měření byly 13,32 % (**Tab. 7**). Zvolená pojezdová rychlost nástrojů byla 3 km/h, pracovní hloubka byla nastavena na 30 cm.



Obr. 47: Schéma zkušebního zařízení.
 (Zdroj: Wang et al., 2020 – upraveno)



Obr. 48: Porovnání simulací působení DEM na radlici při různých frekvencích kmitání.
(Zdroj: Wang et al., 2020 – upraveno)

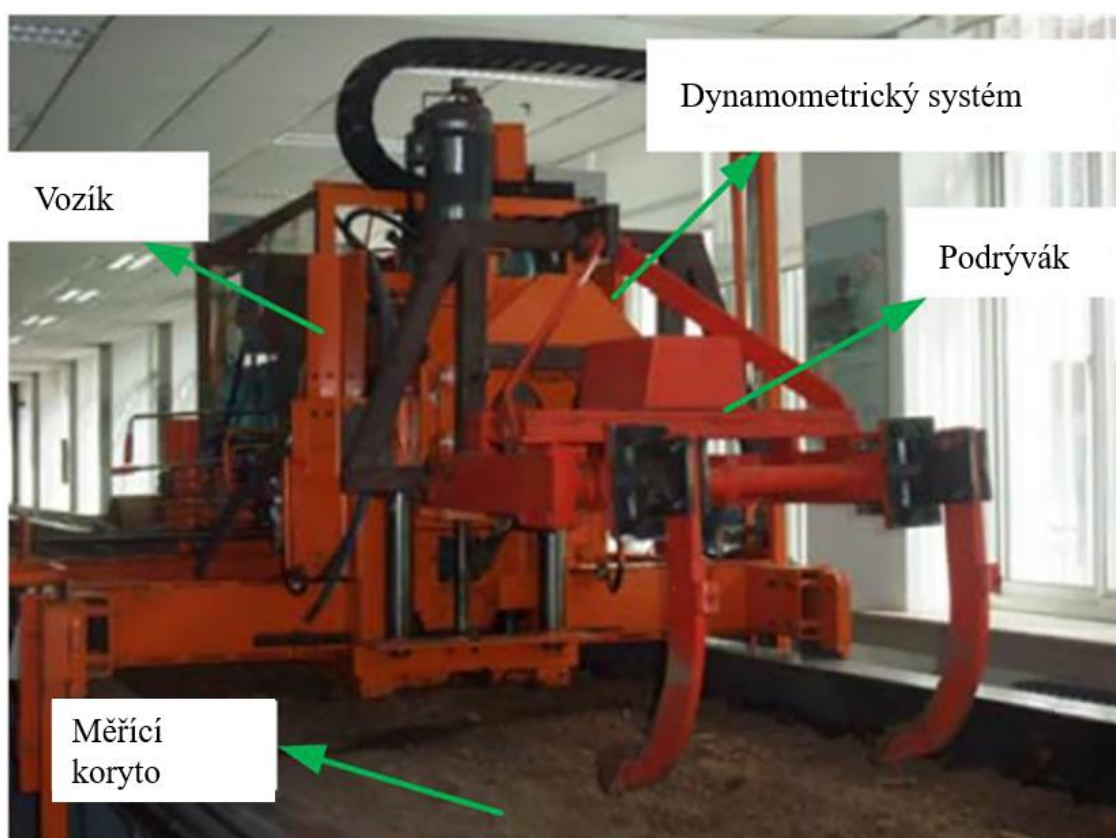


Obr. 49: Simulace působení DEM na radlici metoda válce. (a) izometrický pohled (b) boční pohled, (c) řez
(Zdroj: Wang et al., 2020 – upraveno)

Tab. 7: Tabulka závislosti tahové síly na frekvenci kmitání.

| Frekvence [Hz] | Tahová síla [N] | | | Vertikální síla [N] | | |
|----------------|-----------------|---------------|-----------|---------------------|---------------|-----------|
| | DEM simulace | Reálné měření | Chyba [%] | DEM simulace | Reálné měření | Chyba [%] |
| 3,3 | 923,80 | 986,00 | 6,31 | 324,90 | 351,40 | 7,55 |
| 4,2 | 858,20 | 913,90 | 6,09 | 378,00 | 398,50 | 5,03 |
| 5,8 | 841,10 | 923,60 | 8,93 | 394,20 | 417,90 | 5,71 |
| 7,5 | 734,70 | 802,70 | 8,47 | 429,30 | 475,20 | 9,65 |

(Zdroj: Wang et al., 2020 – upraveno)



Obr. 50: Zkušební zařízení.

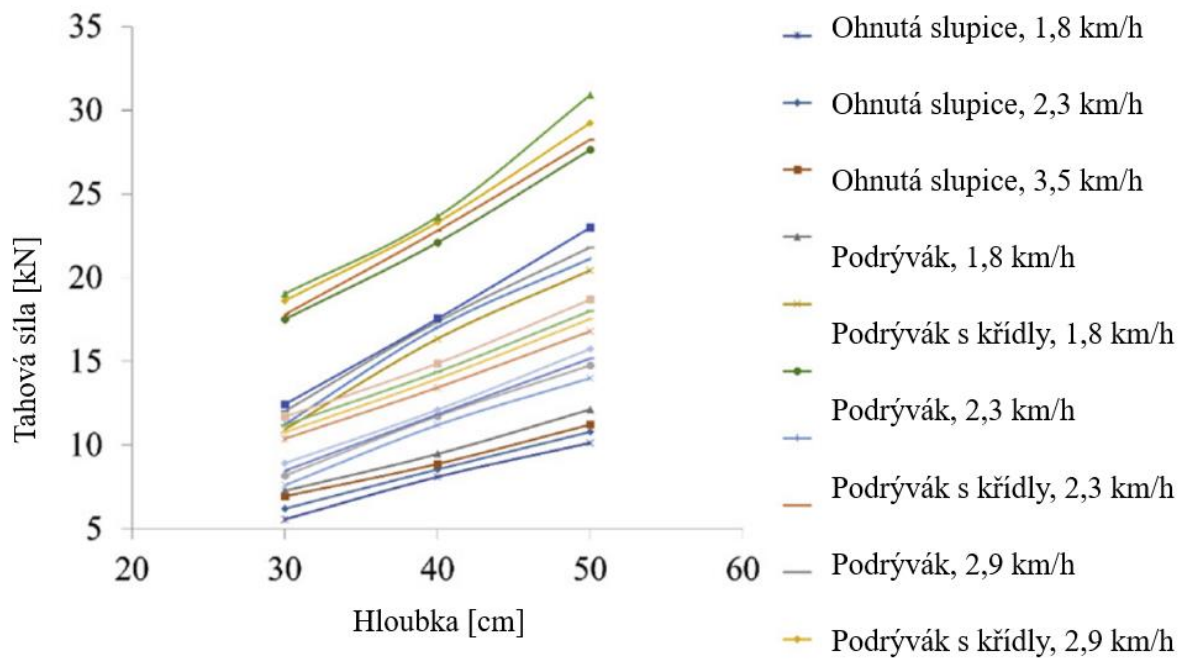
(Zdroj: Wang et al., 2020 – upraveno)

Cílem studie Askari et al. (2019) bylo nastavit metodiku pro predikci tažné síly pomocí adaptivního neurofúzního odvozovacího systému (ANFIS – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) (**Obr. 52**), pro rychlosti 1,8; 2,3; 2,9 a 3,5 km/h, hloubky 30; 40 a 50 cm a slupice s křídly a bez byl vyhodnocován orební odpor. Výsledky měření (**Graf 10**) byly porovnávány s regresivními modely. Z měření vyšlo že predikované tažné síly pro hloubku 35,19 cm při rychlosti 1,9 km/h a šířce křídla 26,97 cm je roven 4,22 kN. Pro měření bylo použito měřící zařízení Abbaspour–Gilandeh et al (2013) (**Obr. 51**).



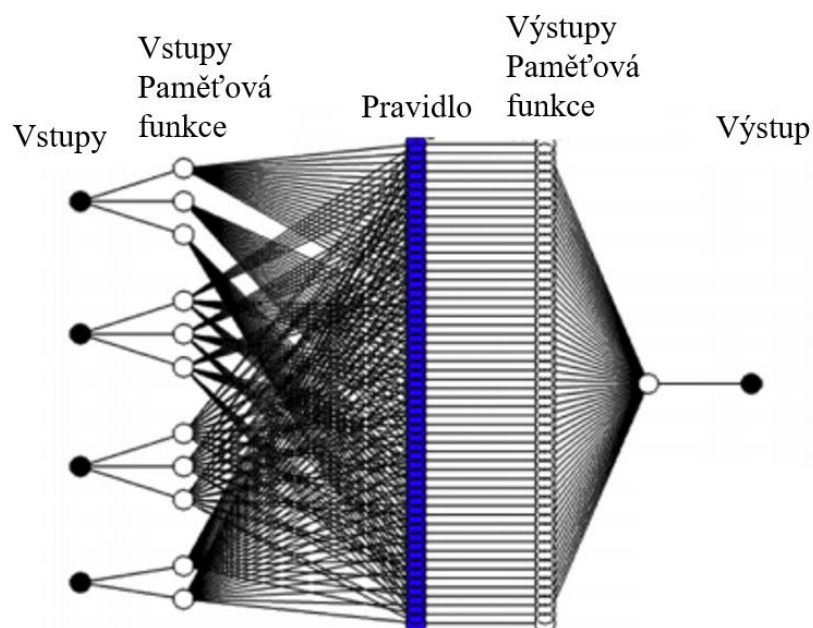
Obr. 51: Měřicí souprava.

(Zdroj: Askari et al., 2019 – upraveno)



Graf 10: Graf zjištěných tahových sil pro různé typy slupic v různé délce.

(Zdroj: Askari et al., 2019 – upraveno)



Obr. 52: Schéma fungování ANFIS.

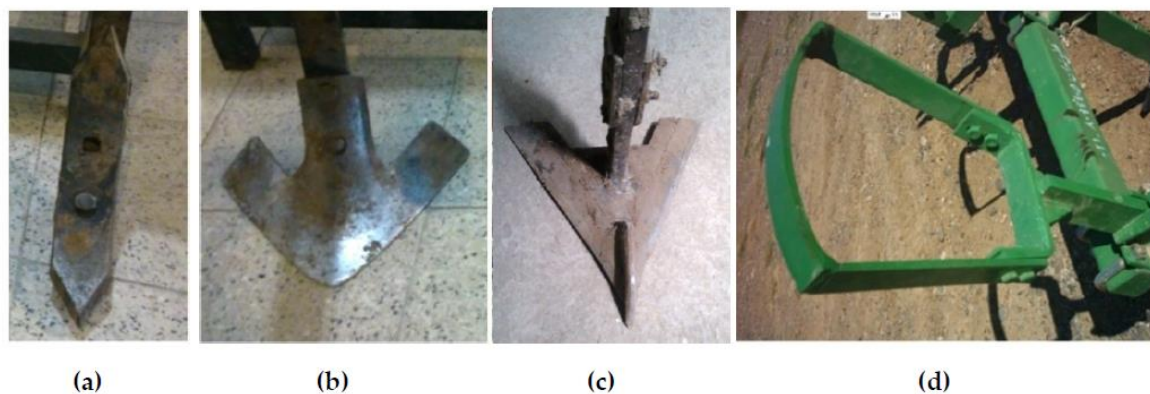
(Zdroj: Askari et al., 2019 – upraveno)

Článek Abbaspour-Gilandeh et al. (2020) se zabývá vlivem hloubky zpracování, rychlosti a vlhkosti půdy na tahovou sílu u pěti různých kultivátorů (**Obr. 54**) (**Tab. 8**). Byl použit univerzální měřicí rám (**Obr. 53**). (Měření probíhalo při rychlostech 1,16; 1,61; 1,97 a 3,82 km/h, pro hloubky 0–10 a 10–20 cm. Vlhkost půdy byla v rozmezí 5–16 % pro suché půdy a 17–35 % pro mokré půdy. Nejvyšší hodnota tahové síly byla naměřena při rychlosti 3,82 km/h a to 296,7 N. Hlavní účinek na tahovou sílu byl rostoucí s dopřednou rychlostí (**Graf 11**) a šířkou orgánu, naopak tahová síla klesala s rostoucí vlhkostí půdy (**Graf 12**).



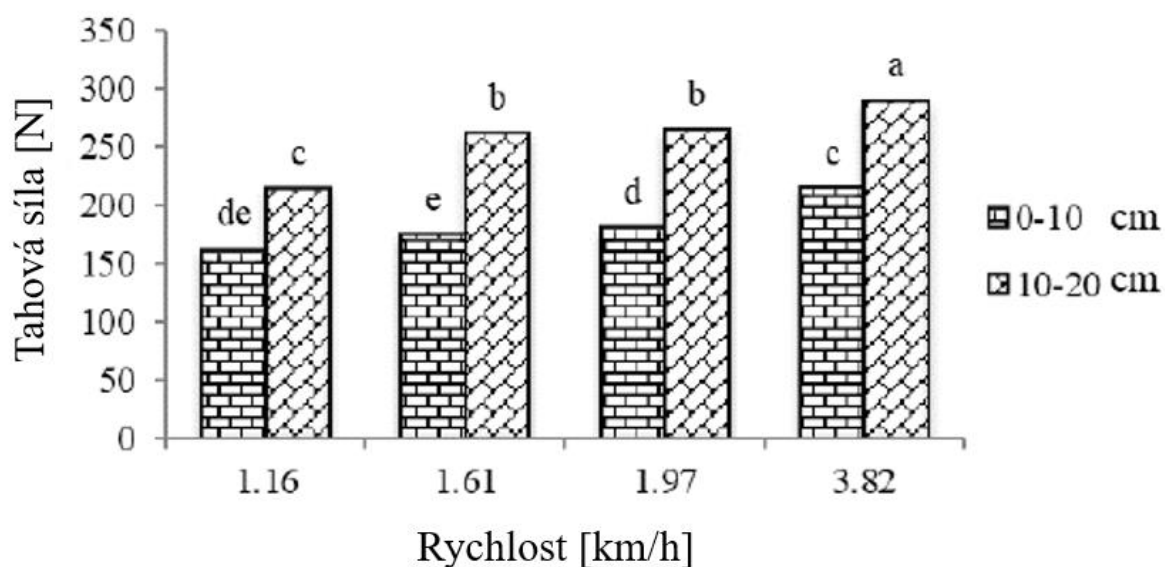
Obr. 53: Měřicí zařízení.

(Zdroj: Abbaspour-Gilandeh et al., 2020)

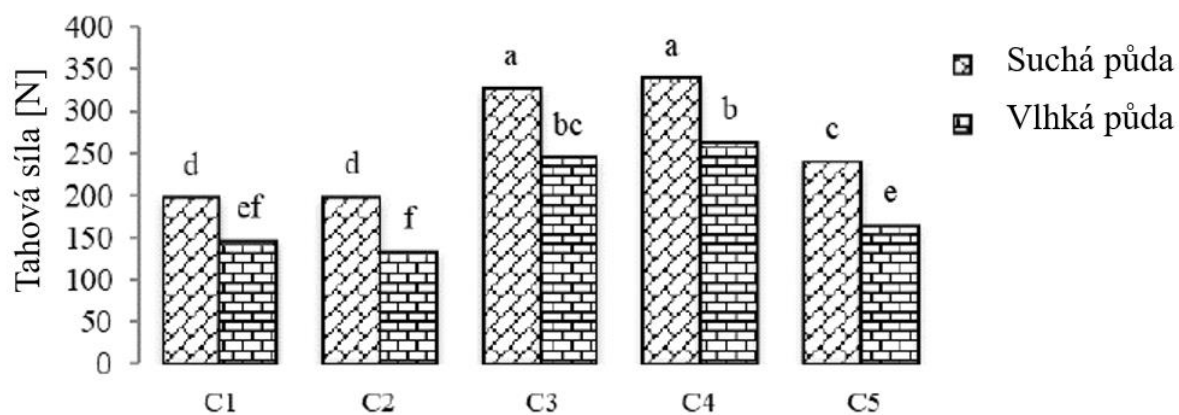


Obr. 54: Porovnávané orgány. (a) Radlička, (b) Radlička, (c) Radlička vysokorychlostního kultivátoru, (d) Plecí břit

(Zdroj: Abbaspour-Gilandeh et al., 2020)



Graf 11: Efekt rychlosti a hloubky zpracování na tahovou sílu. Typ kultivátoru C1-C5 viz Tab. 8 (písmena a-e označují statistickou významnost)
 (Zdroj: Abbaspour-Gilandeh et al., 2020 – upraveno)



Graf 12: Efekt vlhkosti půdy a typu orgánu na tahovou sílu. Typ kultivátoru C1-C5 viz Tab. 8 (písmena a-f označují statistickou významnost)
 (Zdroj: Abbaspour-Gilandeh et al., 2020 – upraveno)

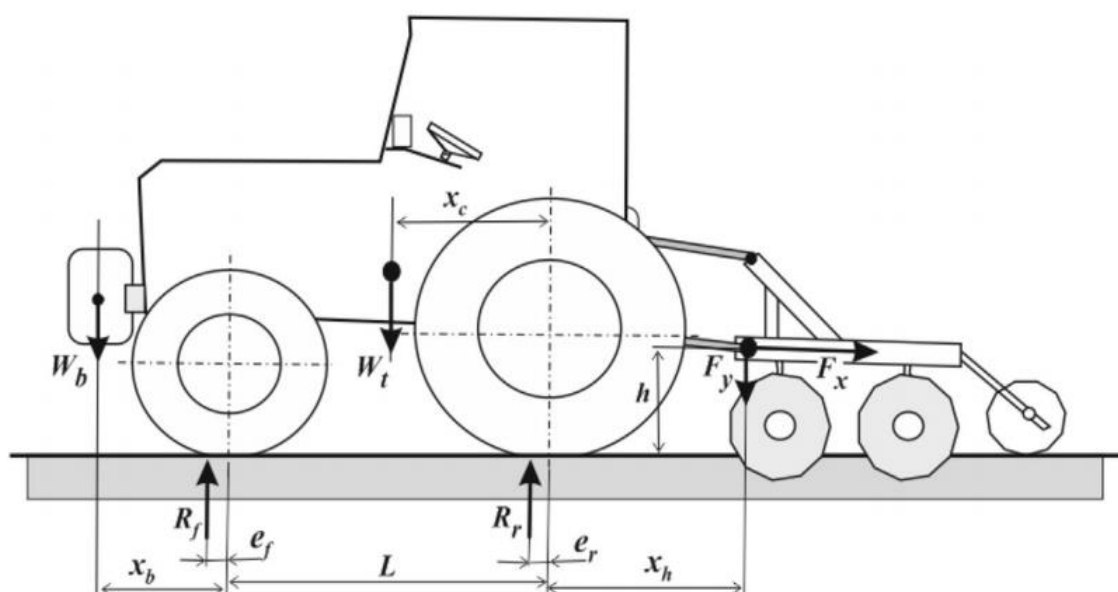
Tab. 8: Legenda k grafům naměřených hodnot.

| Typ kultivátoru | Typ slupice | Typ orgánu |
|-----------------|-----------------|------------|
| C1 | Tvar C – pružná | Radlička |
| C2 | Tvar C – pružná | Dláto |
| C3* | Přímá – pevná | Radlička |
| C4 | Přímá – pevná | Plečí břit |
| C5 | Tvar L – pevná | Dláto |

*Vysokorychlostní kultivátor.

(Zdroj: Autor)

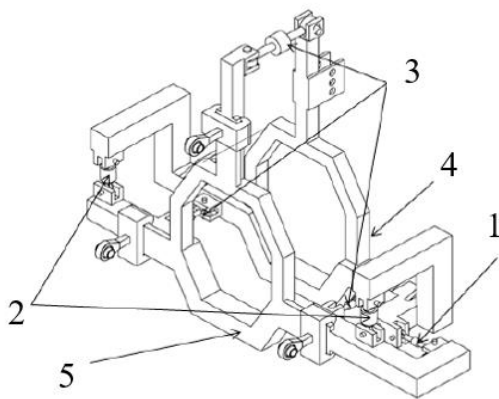
Cílem výzkumu Čipliené et al. (2019) bylo vytvořit matematickou metodu pro výpočet kombinací hustího tlaku. Důvodem je vliv systémů řízení prokluzu na tahový odpor, jelikož tyto systémy upravují přítláčnou sílu a polohu stroje, nízkoprofilové pneumatiky se zvýšeným, nebo sníženým poměrem stran a úprava tlaku v pneumatikách. Každé z těchto řešení ovlivňuje náhon předních kol traktoru. To může mít za následek změny odporu proti pohybu a spotřebu paliva. Změna hustího tlaku v zadních a předních pneumatikách snížily spotřebu paliva o 2,5 až 3 %. Pro měření byl použit tenzometr PCE-FB 50k s kapacitou 1–50 kN a rychlosti pojezdu 2,95 m/s a frekvenci snímání 5 až 300 s. Když byl traktor s předním závažím 520 kg v klidu, byl poměr vertikální síly 52,4 % na zadní nápravě a 47,6 % na přední nápravě. Při tahové síly 18,1 kN se distribuce změnila na 64,5 % na zadní nápravě a 35,5 % na přední nápravě (**Obr. 55**).



Obr. 55: Schéma silových účinků na soupravu.

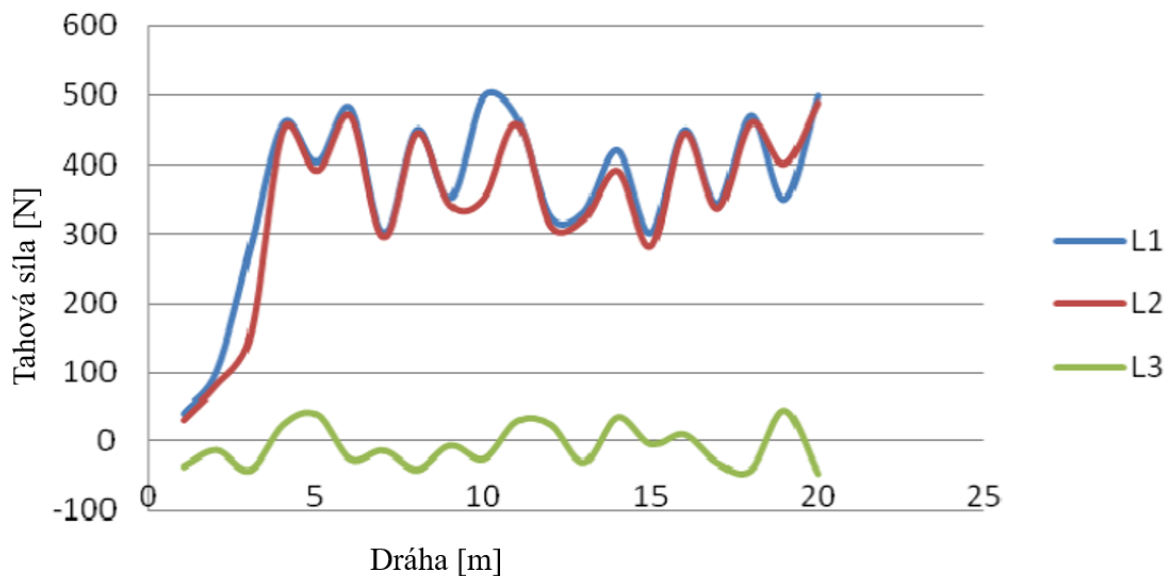
(Zdroj: Čiplieté et al., 2019)

Cílem studie Manikandan et al. (2019) bylo zjištění tahových odporů pětiradličného kypříče. Byl zkoumán vliv vlhkosti půdy (10–13 %; 14–16 % a 17–20 %), pracovní hloubky (15; 20 a 25 mm) a rychlosti (3; 5 a 7 km/h) pomocí speciálního rámu navrženého v roce 2009 (hmotnost 130 kg) (**Obr. 56**) s dynamometry NI WSN-3214, strain nodes, NI 9792 WSN real-time, gateway. Konstrukce dovoluje středem vést vývodový hřídel. Celkem rám obsahuje šest siloměrů, tři pro podélný směr, dva pro vertikální a jeden siloměr pro boční směr. Rozsah siloměrů je od 500 do 2000 kg. Naměřené vodorovné síly 405 kg a svislé síly 68 kg dávají hodnotu výsledné tahové síly 408 kg. Tahová síla roste s vlhkostí pro všechny rychlosti. Maximální síla byla pozorována pro vlhkost 17–20 % při rychlosti 7 km/h. Velikost tahové síly také přímo souvisí s pracovní hloubkou. Maximální hodnota byla zjištěna při 25 cm a rychlosti 7 km/h (**Graf 13 a 14**).



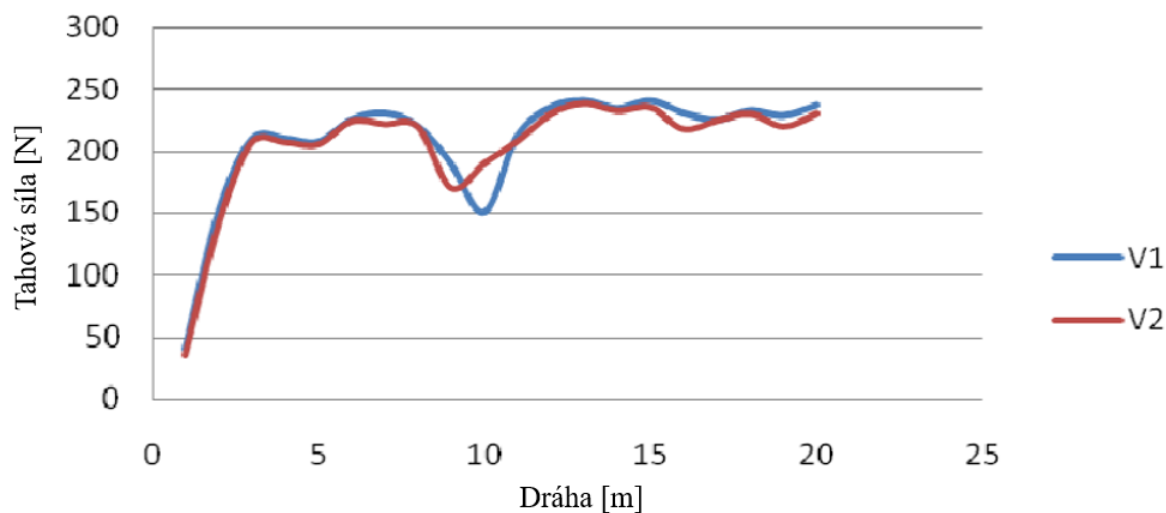
Obr. 56: Měřicí zařízení. 1 – laterální tenzometry, 2 – vertikální tenzometry, 3 – horizontální tenzometry, 4 – traktorový rám, 5 – rám implementu

(Zdroj: Manikandan et al., 2019)



Graf 13: Horizontální složka tahové síly. L1, L2, L3 – měření

(Zdroj: Manikandan et al., 2019 – upraveno)

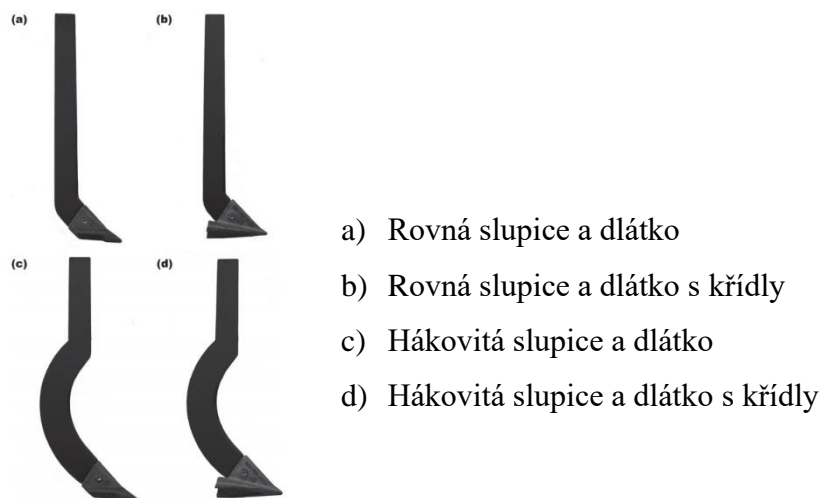


Graf 14: Vertikální složka tahové síly. V1, V2 – měření

(Zdroj: Manikandan et al., 2019 – upraveno)

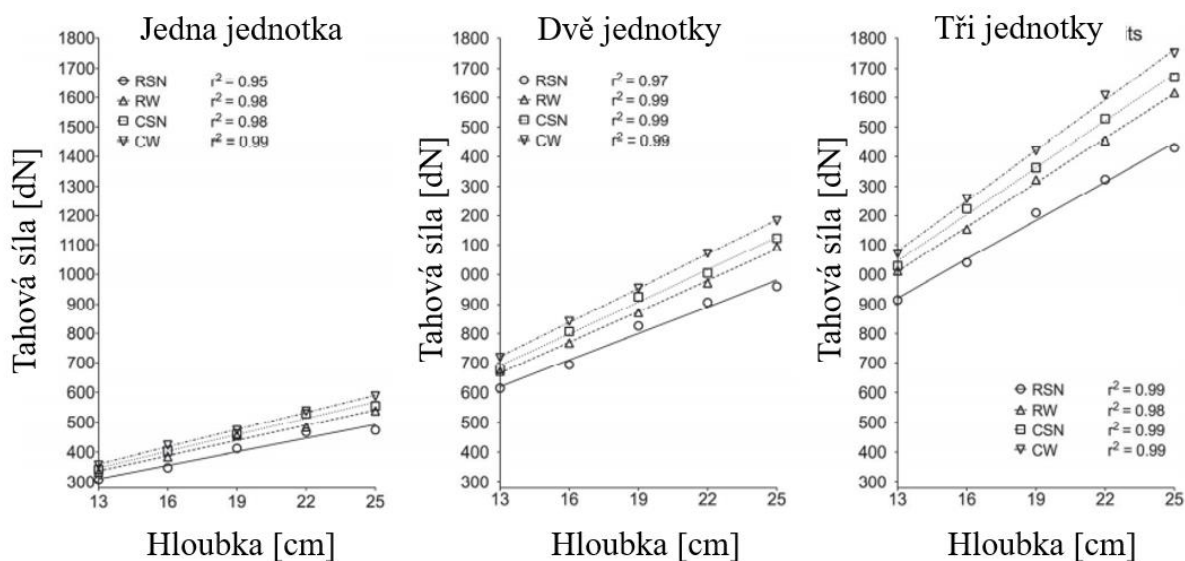
Cílem článku Frascioni et al (2019) bylo vyhodnotit výkon sazeče zeleniny a velikosti tahné síly při použití různých pracovních orgánů (Obr. 57) a v různých minimalizačních pěstebních systémech. Pojezdová rychlost byla 1 km/h, pracovní hloubka dlátka byla 13; 16; 19; 22 a 25 cm a pracovní hloubka krojidla před dlátkem byla 10 cm. Tahová síla byla vyhodnocována dynamometrem TLP-100KNB, (Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd, Tokyo,

Japan) se snímací frekvencí 1 Hz. Dynamometr byl umístěn mezi dvěma traktory. Výsledky měření viz Graf 15.



Obr. 57: Použité zkušební slupice.

(Zdroj: Frasconi et al, 2019)

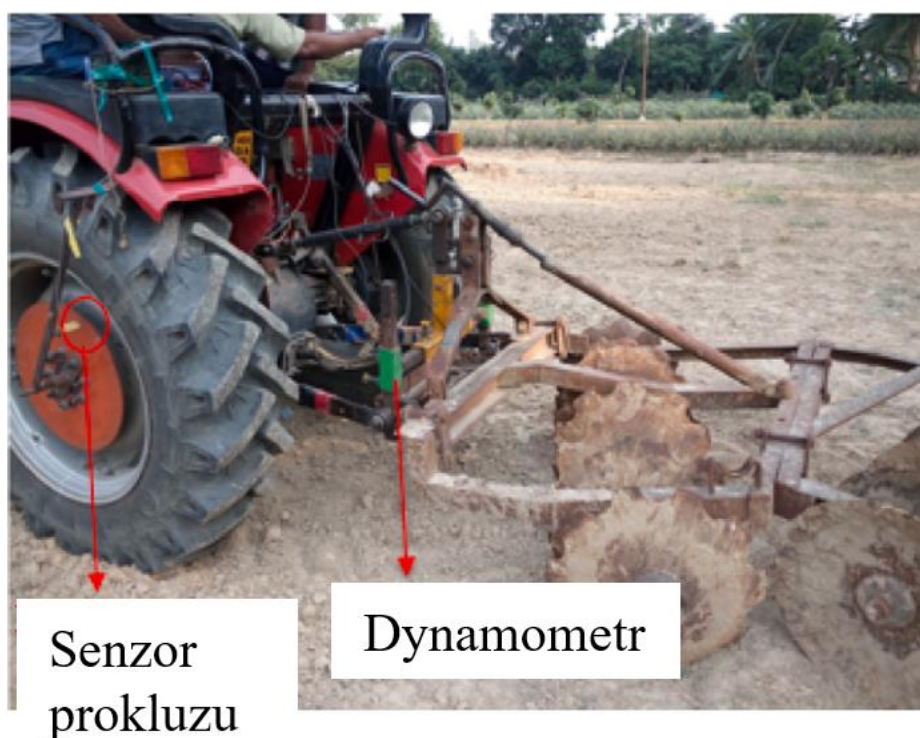


Graf 15: Grafy tažné síly sazeče s různými radlicemi.

(Zdroj: Frasconi et al, 2019 – upraveno)

Cílem autorů Gupta et al. (2019) byl vývoj systému pro eliminaci prokluzu traktoru prostřednictvím synchronního měření tahového odporu a řízení. Tahový odpor byl zjišťován pomocí třibodového závěsu osazeného dynamometrem (**Obr. 58**). Test prokázal zlepšení trakčního výkonu soupravy o 9,17 %. Měřící zařízení bylo osazeno tenzometry F12-Z3963

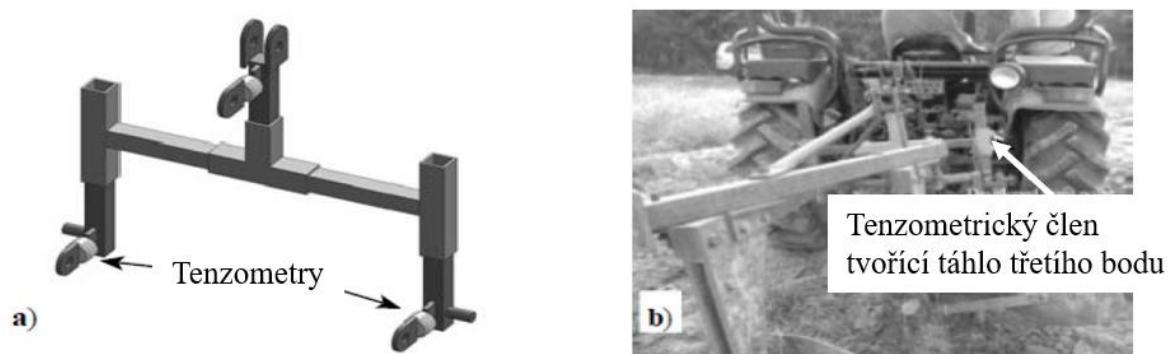
(Novatel ltd, UK). Frekvence měření a vyhodnocování byla 10 Hz, pojezdová rychlost byla 0,8 až 1,2 m/s a hloubka zpracování od 0,16 do 0,18 m. Zjištěné hodnoty tahové síly byly v rozmezí 900 až 1100 kg.



Obr. 58: Měřicí zařízení.

(Zdroj: Gupta et al., 2019 – upraveno)

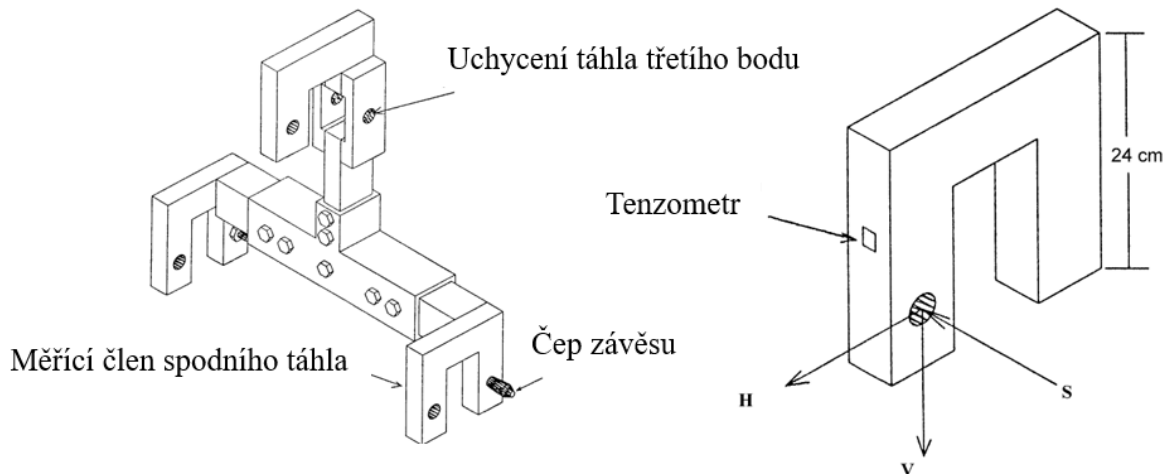
Cílem studie Mamkagh (2019) bylo osadit a otestovat kombinovaný systém pro měření tahové síly (Obr. 59), měření rychlosti a spotřeby traktoru, za účelem zlepšení hospodárnosti. Použitý tenzometr s kapacitou 20 kN a 15 kN, Novatech 50-204 při snímací frekvenci 1 Hz.



Obr. 59: Měřicí zařízení a) měřicí rám, b) polní test

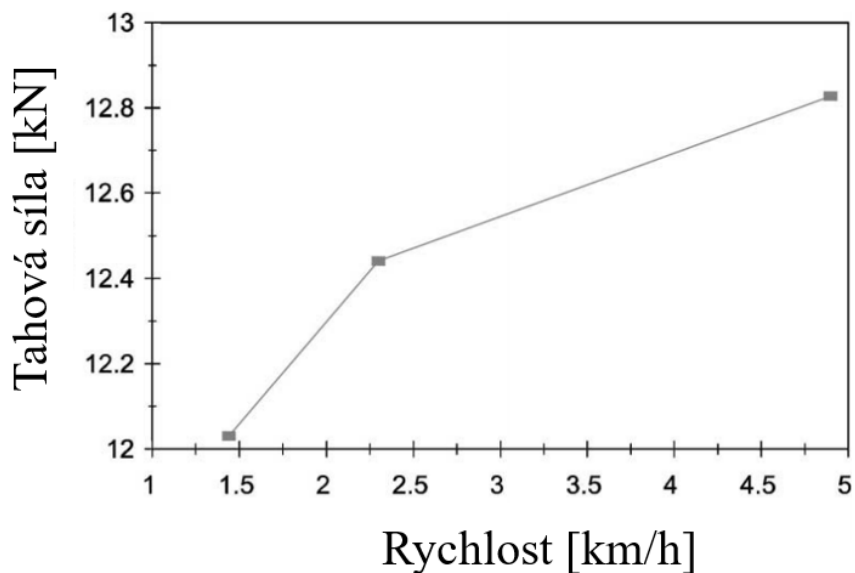
(Zdroj: Mamkagh, 2019)

Bylo navrženo měřicí zařízení pro měření tahového odporu složené ze tří teleskopických členů osazených trojicí tenzometrických členů (**Obr. 60**). Umožňující agregaci do traktorového závěsu kategorie 1 a 2. Kapacita měřicího zařízení je 35 kN. Provedl tým Al-Jalil et al. 2001. Bylo zjištěno že s rostoucí rychlostí tahová síla roste (**Graf 16**). Dále bylo zjištěno že síla roste i s rostoucí hloubkou zpracování (**Graf 17**).



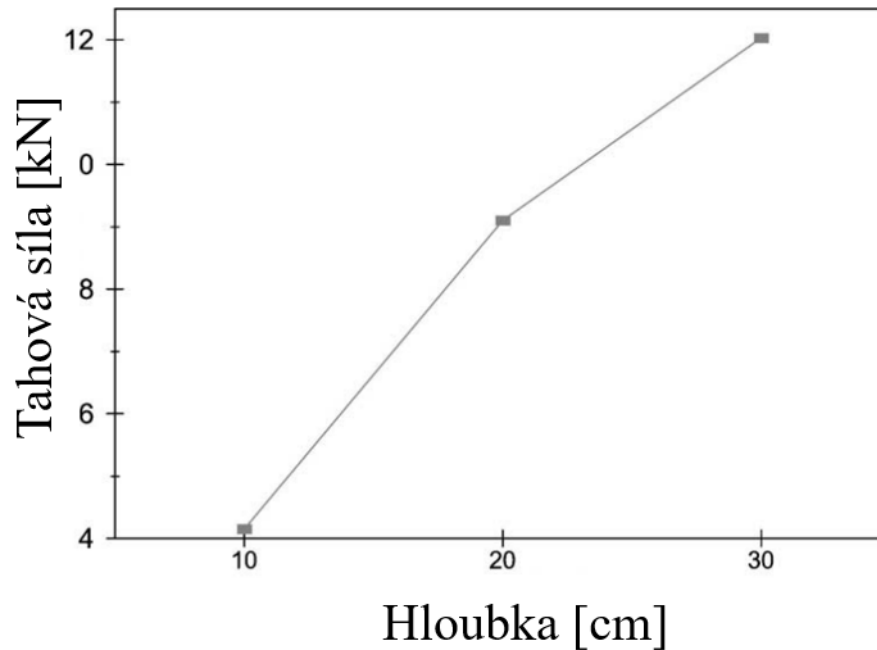
Obr. 60: Schéma měřicího zařízení.

(Zdroj: Al-Jalil et al. 2001 – upraveno)



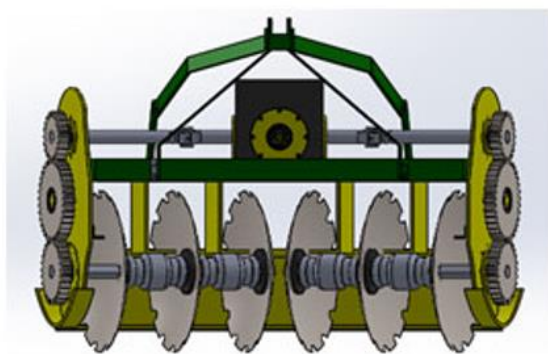
Graf 16: Graf průběhu tahové síly na rychlosti, při hloubce 30 cm.

(Zdroj: Al-Jalil et al. 2001 – upraveno)

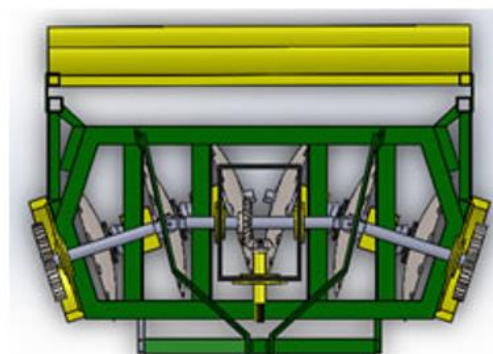


Graf 17: Graf průběhu tahové síly na hloubce při rychlosti 1,44 km/h
(Zdroj: Al-Jalil et al. 2001 – upraveno)

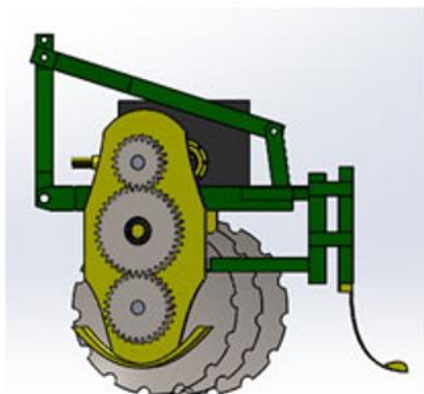
Cílem studie Upadhyay et al. (2017) bylo vyvinout optimální zařízení pro podmínku **(Obr. 61)** na základě FEM analýz a to tak, aby zařízení mělo minimální pravděpodobnost selhání, vzhledem k tomu že rázy působící na stroje během práce nelze přesně predikovat, proto bylo pro návrh prováděno zjišťování vstupních parametrů při polním testování zařízení pomocí univerzálního dynamometru **(Obr. 62)**, výsledné hodnoty viz **Graf 18**. Pracovní hloubka byla nastavena na 12 cm, pracovní rychlost během testování se pohybovala od 3,69 do 6,55 km/h, a snímací frekvence byla 50 Hz. Během testování se ověřilo, že poháněná disková brána má vyšší výkonnost oproti pasivně poháněnému disku, a to od 0,37 do 0,57 ha/h. Také byla sledována nižší spotřeba paliva, a to od 4,95 do 6,42 l/h.



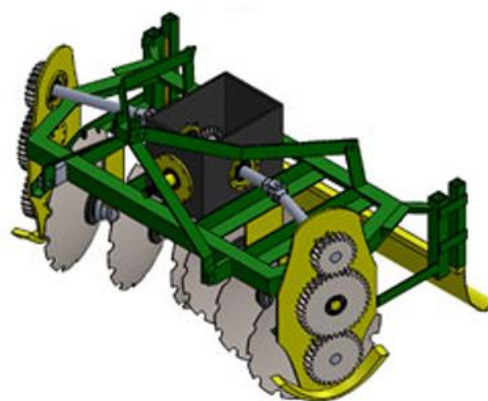
Nárys



Půdorys



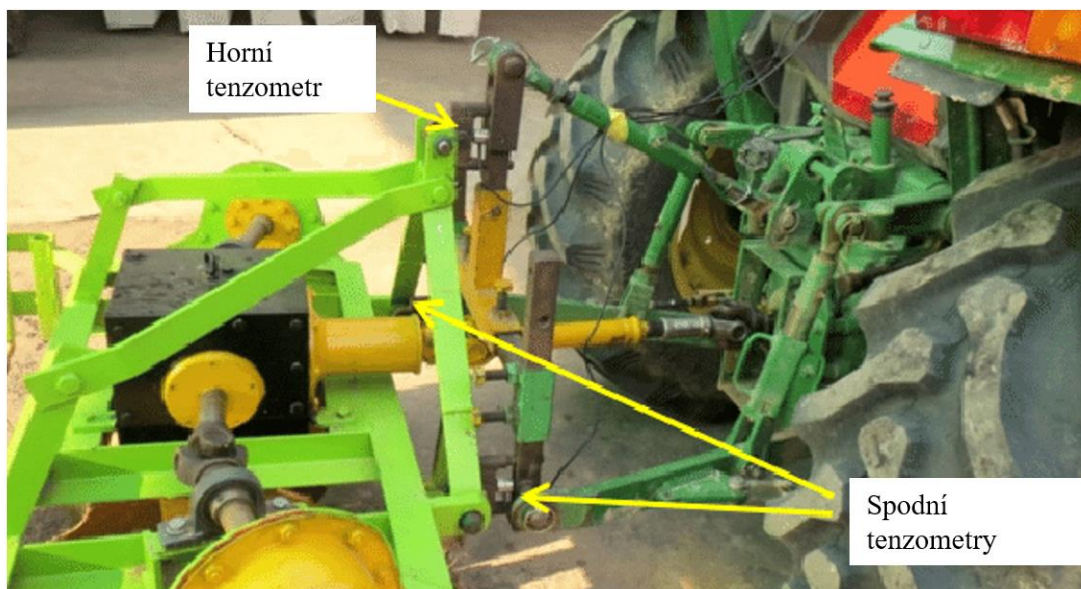
Bokorys



Izometrický pohled

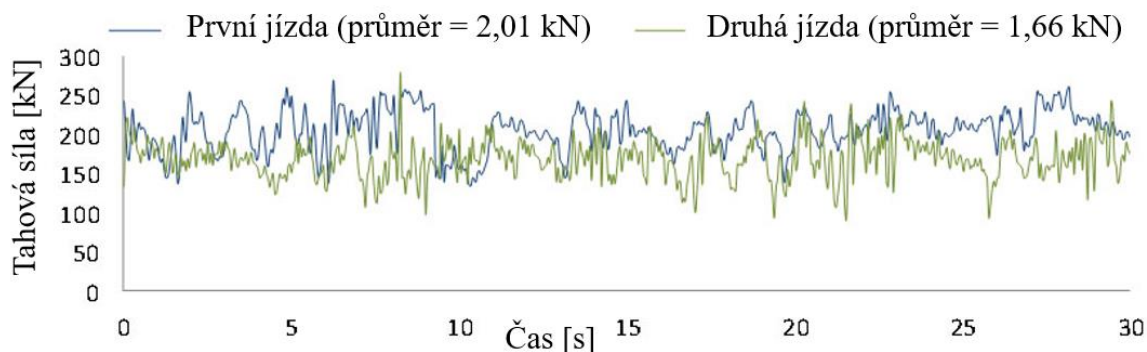
Obr. 61: Vibrační disková brána.

(Zdroj: Upadhyay et al. 2017 – upraveno)



Obr. 62: Měřící zařízení.

(Zdroj: Upadhyay et al. 2017 – upraveno)



Graf 18: Průběh tahové síly na čase, při práci vibračního diskové brány v hloubce 12 cm.

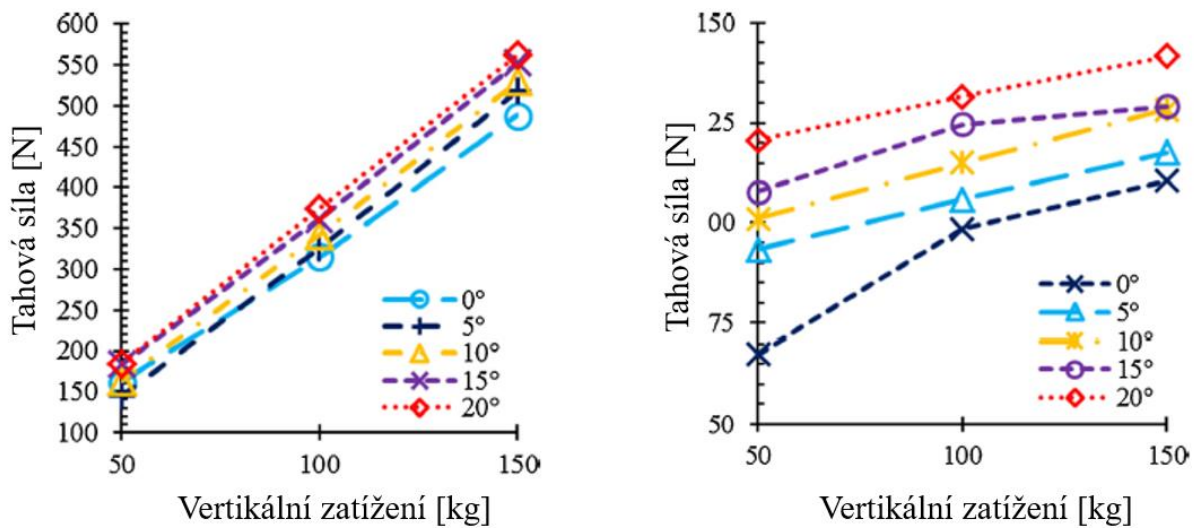
(Zdroj: Upadhyay et al. 2017 – upraveno)

Studie Malasli a Celik (2019) vyhodnocuje, jaký vliv mají různé parametry síly působící na disk o rozměru 460 mm a tloušťce plechu 4 mm, při různém úhlu natočení 0,5; 5; 10; 15 a 20°, dále při různém úhlu náklonu 0; 2,5; 5; 7,5 a 10° a vertikálním zatížení 50; 100 a 150 kg. Dále byl sledován vliv rostlinných zbytků. Měřící zařízení (**Obr. 63**) bylo osazeno šesti tenzometry typu S s kapacitou 2 t. Rychlost byla 1 m/s a hloubka byla nastavena na 5 cm, pro vyšetření vertikální, tahové a stranové síly disku. Zvětšení úhlu natočení od 0° do 20° vedlo ke zvýšení vertikální složky síly v rozsahu 321,5–373,4 N, i ke zvýšení horizontální složky síly v rozsahu 92,2–131,3 N. Naopak zvětšení úhlu náklonu horizontální složka klesala z hodnoty 122,7 na 103,7 N. Vertikální síly se pohybovaly v rozsahu 335,1 až 360,6 N. (**Graf 19 a Graf 20**). Bylo zjištěno, že nejlepší výsledky poskytoval náklon v rozsahu 7,5–10°. Vliv rostlinných zbytků na tahovou sílu viz **Graf 20**. Zvýšení vertikálního zatížení disku pomáhá disku pronikat lépe do půdy, ale zároveň s rostoucím zatížením vzrostly i všechny složky síly (**Graf 21**).



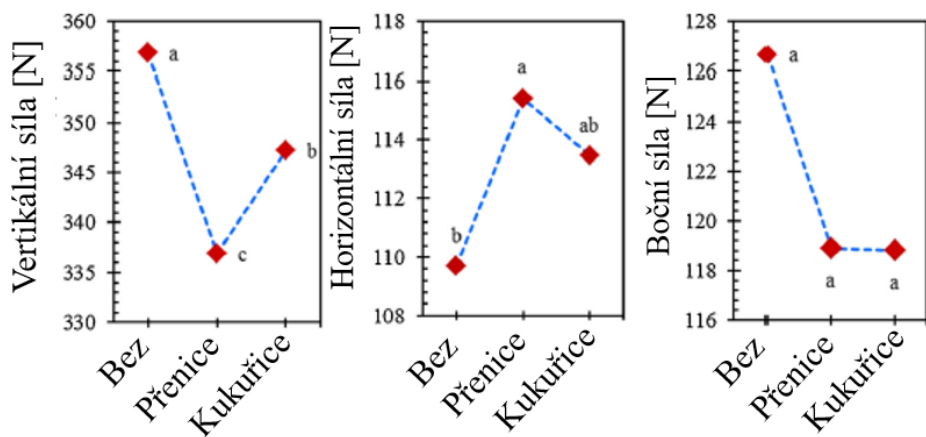
Obr. 63: Měřící zařízení.

(Zdroj: Malasli a Celik, 2019)



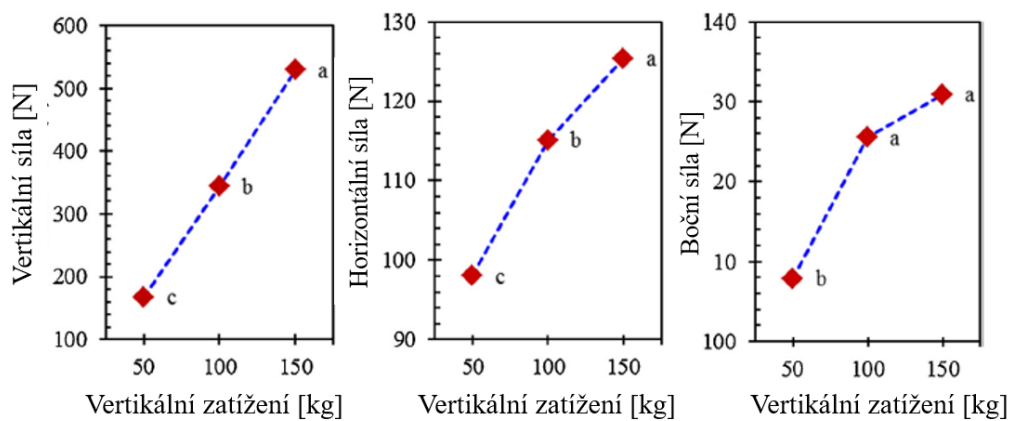
Graf 19: Průběh sil v závislosti na vertikálním zatížení a úhlu natočení disku.

(Zdroj: Malasli a Celik, 2019 – upraveno)



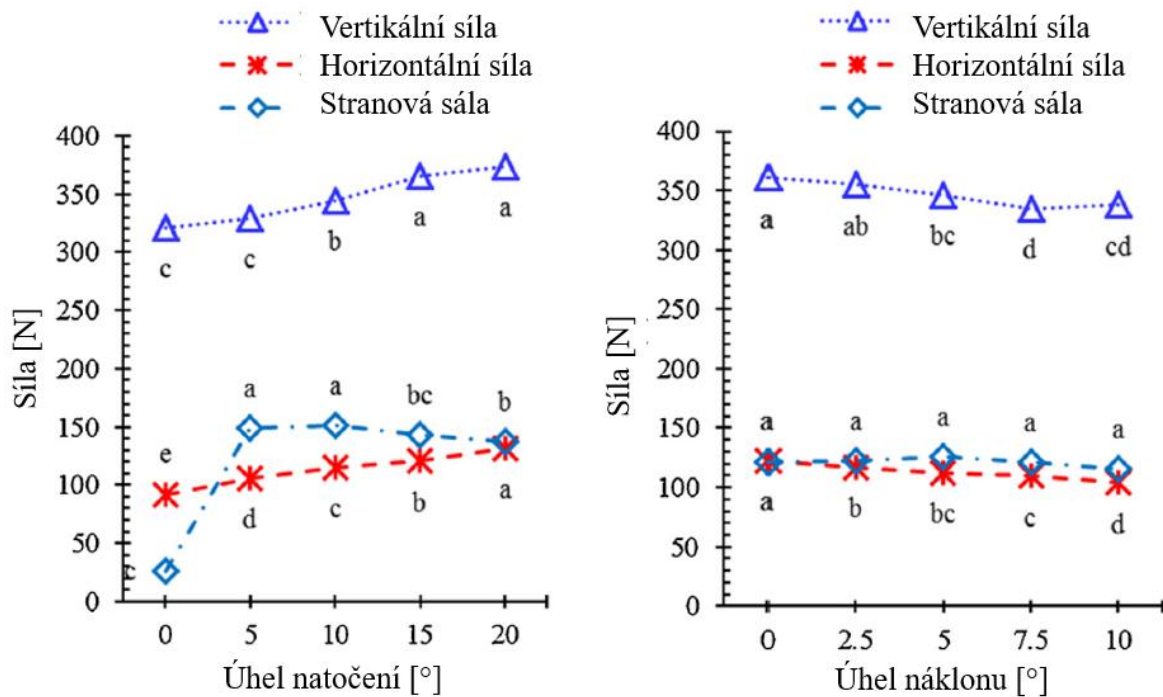
Graf 20: Vliv rostlinných zbytků na složky tahové síly.

(Zdroj: Malasli a Celik, 2019 – upraveno)



Graf 21: Vlivu vertikálního zatížení na složky síly.

(Zdroj: Malasli a Celik, 2019 – upraveno)



Graf 22: Vliv úhlů disku na složky síly.

(Zdroj: Malasli a Celik, 2019 – upraveno)

Kolektiv autorů Md-Tahir et al. (2019) se zabýval konstrukcí kol traktorů a jejího vlivu na prokluz s cílem optimalizovat výkonnost tažných prostředků a redukci utužení půdy. Byly použity snímače BK-5 vyvinuté Čínskou Akademií pro vesmír a Aerodynamiku v Pekingu. Měřicí zařízení nazvané „Field mechanical and dynamic parameters telemetry instrument“ (Obr. 64) od společnosti Harbin Bona Technology se skládá ze tří hlavních částí.

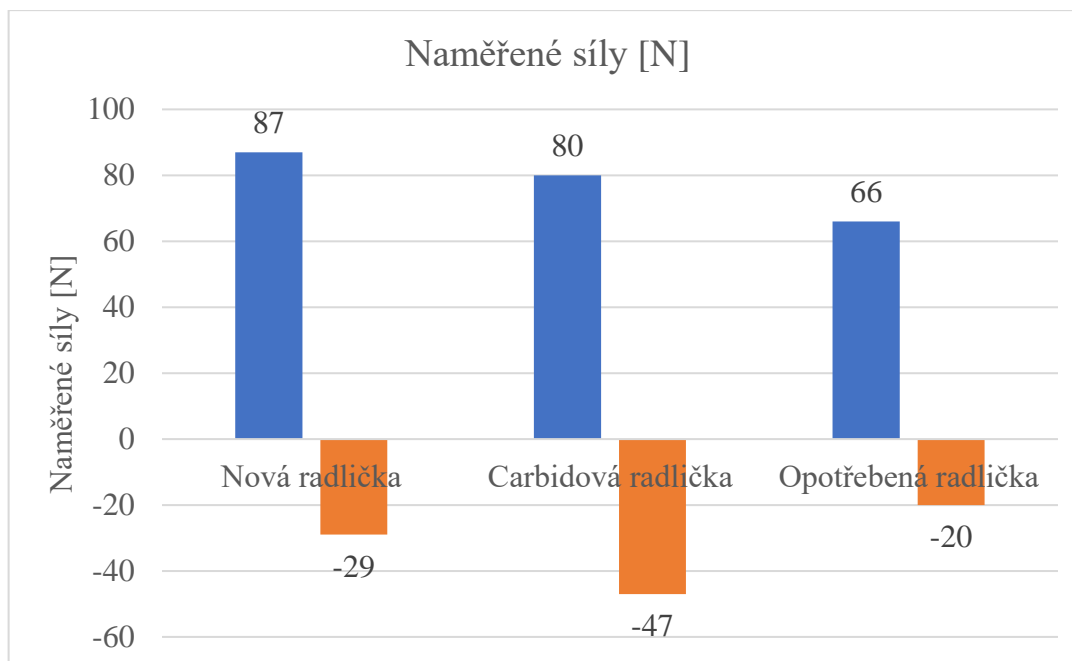
- A) táhlo třetího bodu se snímačem síly a úhlu
- B) datová směrnice, řadič a bezdrátový vysílač
- C) bezdrátový přijímač dat a data logger.



Obr. 64: Měřicí zařízení.

(Zdroj: Md-Tahir et al., 2019 – upraveno)

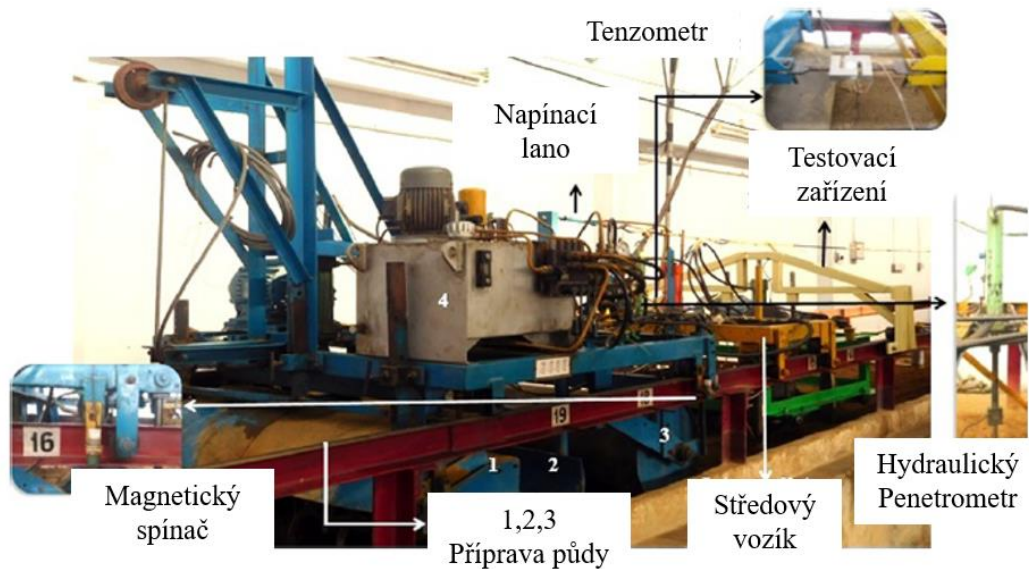
Studie Tekeste et al. (2019) se zabývá interakcí mezi radličkou a půdou pomocí DEM analýzy, s cílem optimalizovat životnost radličky. Pomocí 3D skenování bylo zaznamenáváno opotřebení. Použit byl tříosý tenzometrický člen model TRD-A-5k (Michigan Scientific) s kapacitou 22,241 kN, snímací frekvence 100 Hz. Výsledky tahové síly (**Graf 23**) a vytvořeného profilu se lišily u simulace od reálného testu od 7 % do 24 %.



Graf 23: Graf naměřených tahových sil pro různé opotřebení radličky.

(Zdroj: Tekeste et al., 2019 – upraveno)

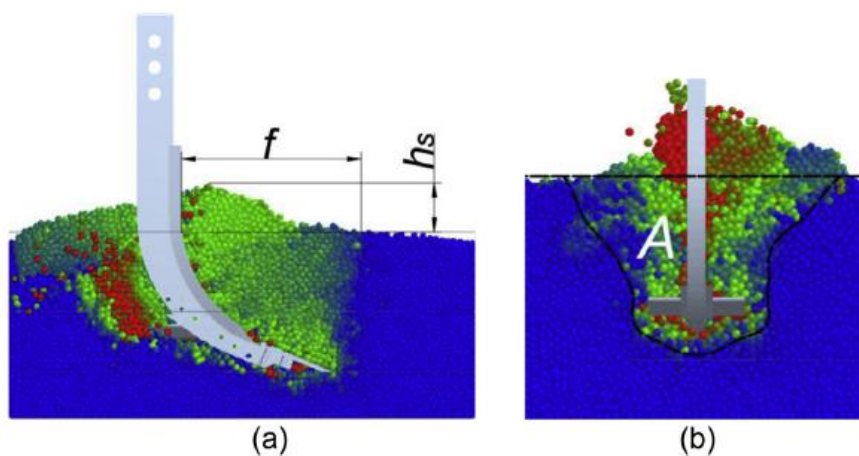
Studie autorů Upadhyay et al. (2019) se zabývá vytvořením nástrojů pro předpověď tahové síly pro potřeby návrhu půdozpracujících strojů. Testováno bylo různé nastavení úhlů disků diskového podmičáče, utužení půdy, rychlost a hloubka. Byly měřeny hodnoty tahového odporu 3 × 3 disků ve dvou řadách, s natočením 25°; 30°; 35° a 40° pro hloubky 10; 12 a 14 cm, při rychlosti 0,8; 1,2; 2,2; 3,2 km/h, utužení půdy definovaný hodnotou odporu kuželu penetrometru 500±30, 800±30, 1100±30 kPa. Pro snímání horizontální síly byl použit tenzometr typu S s kapacitou 2000 kg (**Obr. 65**). Byla sledovaná významná statistická závislost všech sledovaných parametrů. Výsledky oproti očekávané předpovědi dle ASABE se lišily o 50,18 %.



Obr. 65: Měřicí zařízení.

(Zdroj: Upadhyay et al., 2019 – upraveno)

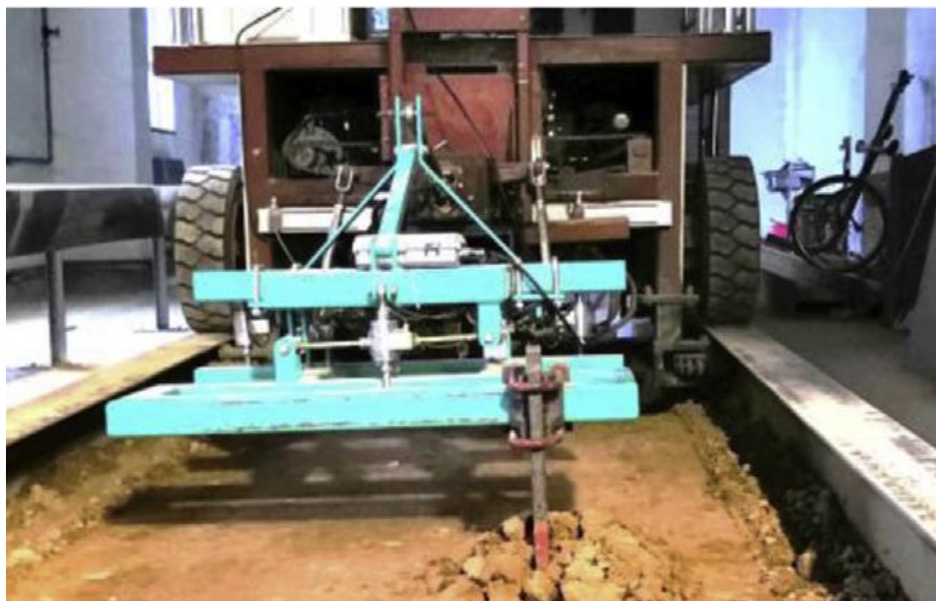
Článek autorů Wang et al. (2019) se zabývá vývojem DEM elementů půdy od 3 do 19 mm a jejich interakcí a vnitřních sil. Pro validaci byly vyšetřovány parametry jako poměr vzdálenosti prasknutí půdy, výška akumulované půdy, oblast narušení půdy, rychlost změny hustoty půdy a index fragmentace (**Obr. 66**). Odchylna výsledků oblasti narušení byla s chybou do 12 %. Doba řešení výpočtů byla přibližně 500 hodin. Chyba simulované a měřené síly byla do 13 %. Výsledkem výzkumu bylo, že velikost elementu je důležitá a byl doporučen rozměr částice 7 mm pro Hertz-Mindlingův model vazeb.



Obr. 66: Sledované parametry pro validaci simulace, (a) boční pohled, (b) řez, f – vzdálenost narušení půdy, h_s – výška vyhrnutého materiálu, A – narušená plocha

(Zdroj: Wang et al., 2019)

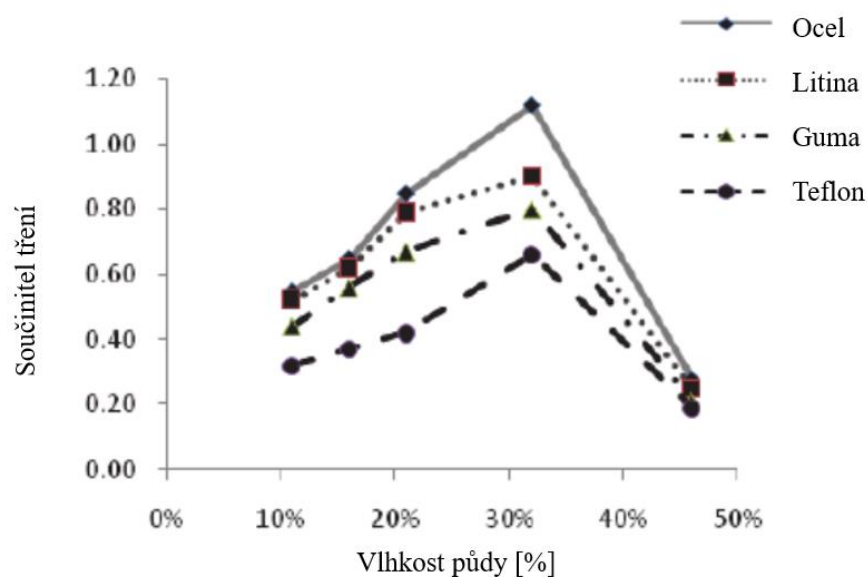
Zařízení s radlicí při rychlosti 3 km/h v pracovní hloubce 300 mm. Tahová a vertikální síla měřená bezdrátovým snímačem (**Obr. 67**).



Obr. 67: Zkušební zařízení.

(Zdroj: Wang et al., 2019)

Studie Abbaspour-Gilandeh et al. (2018) se zabývá zkoumáním efektu obsahu půdní vlhkosti na třecí síly mezi půdou a ocelí, litinou, gumou a teflonem, pro tři typy půdy písčitou (78,5 % písku, 14,5 % hlíny a 7 % jílu), hlinitou (45,66 % písku, 29,33 % hlíny, 25 % jílu) a hlinitopísčitou (64,5 % písku, 20,8 % hlíny a 14,5 % jílu). Zvyšováním vlhkosti do hranice 11-32 % pro hlinitou půdu tažná síla vzrostla v průměru o 244 %. Po překonání vlhkosti 39 % síla výrazně klesla na 67 %. Podobné chování bylo sledováno pro písčitou půdu od 6-29 % a pro hlinitopísčitou půdu od 7–32 % (**Graf 24**).



Graf 24: Vliv vlhkosti půdy na součinitel tření.

(Zdroj: Abbaspour-Gilandeh et al., 2018 – upraveno)

Z výsledků studií Okyer et al. (2018), Guillien-Sánchez et al. (2018), Askari et al. (2017), Askari et al. (2019), Sirjacob et al. (2002), Wang et al. (2020), Abbaspour-Gilandeh et al. (2020), Tekeste et al. (2019), Wang et al. (2019) lze vyvodit, že **H1: Při zjišťování tahového odporu lze měřit jednotlivé pracovní orgány separátně**, byla potvrzena.

Z výsledků studií Guillien-Sánchez et al. (2018), Azimi-Nejadian et al. (2019), Askari et al. (2019), Abbaspour-Gilandeh et al. (2018), Abbaspour-Gilandeh et al. (2020), Al-Jalil et al. (2001), Upadhyay et al. (2019) lze vyvodit, že **H2: Pojezdová rychlost má vliv na velikost tahového odporu**, byla potvrzena.

Z výsledků studií Okyer et al. (2018), Malasli a Celik (2019) lze vyvodit, že **H3: Vlhkost půdy má vliv na velikost tahového odporu**, byla potvrzena.

Z výsledků studií Guillien-Sánchez et al. (2018), Askari et al. (2017), Abbaspour-Gilandeh et al. (2013), Abbaspour-Gilandeh et al. (2020), Podpěra et al. (2009), Kim et al. (2020), Roca et al. (2019), Lysych et al. (2017), Sirjacob et al. (2002), Upadhyay et al. (2017), lze vyvodit, že **H4: Z měření lze plně vyhodnotit zatížení rámců stroje**, byla potvrzena.

6. VÝSLEDKY A DISKUZE

Jako jeden z podkladů pro výpočty tahového odporu je měření odporu půdy různými typy penetrometrů, tedy zařízení měřící sílu (tlak) nutnou k průniku kontrolního tělíska půdou. Jako kontrolní tělíska se nejčastěji používají kužely o průměru 13 mm (1/2“), nebo 19 mm. Pro orientační měření se nejčastěji používá penetrometr ruční, kde se provádí po měřeného pozemku série vertikálních vpichů v definovaných roztečích a do definovaných hloubek. Z tohoto ručního mapování se pak odhaduje hodnota půdního odporu. Pro přesnější výpočet je lepší a rychlejší způsob použití horizontálního penetrometru. Tímto typem penetrometru lze snímat odpor půdy kontinuálně a při spojení s GPS modulem lze rovnou vytvářet mapy půdního odporu pozemku. Tento přístup byl použit autorem Topakci et al. (2010) při vývoji zařízení pro mapování půdního odporu pozemků. Nevýhodou tohoto konceptu je to, že dokáže v jednu chvíli vyhodnocovat půdní odpor pouze v jedné nastavené hloubce. Pokud chceme zjistit komplexnější informace, je nutné měření opakovat v různých hloubkách stejně jako u ručního penetrometru. Toto opakované měření je však zatíženo chybou vzniklou narušením půdního profilu měřícím zařízením. Proto byly vyvinuty postupné horizontální penetrometry jako například ve studii Machado a Lanças (2016), kde je měřící zařízení složeno z několika po sobě jdoucích horizontálních penetrometrů v různých hloubkách. Cílem této práce bylo vyvinout zařízení, které bude automaticky vyhodnocovat půdní odpory v různých hloubkách, díky těmto informacím hledat hloubku plužní pánve a pomocí řídicí jednotky nastavovat hloubku dlátového pluhu o 5 cm pod hloubku plužní pánve pro její odstranění. Zařízení bylo také vybaveno GPS modulem, který sloužil k vytváření vícevrstevných map půdního odporu pozemku. Vzhledem k faktu že horizontální penetrometr pracuje v půdě jako slupice, narušuje půdu a tím negativně ovlivňuje výsledky naměřených hodnot, Pro odstranění tohoto jevu lze doplnit penetrometr mikrofony a pomocí odstínění šumu najít kontrolní frekvenci, která toto narušení doprovází a upravit výstup tak, aby hodnoty nebyly ovlivněny tímto chováním (Hemmat et al., 2014).

Dalším způsobem, jak měřit tahový odpor je měření sil působících na jednotlivé pracovní orgány půdo-zpracujících strojů. Určení přesného směru působící síly je problematické, proto se při zjišťování přesného vektoru působící síly vyhodnocují složky působící síly ve směru tahu (horizontální, směr osy x), kolmém směru (laterální, směr osy y) a svislém směru (vertikální, směr osy z). A momenty okolo všech tří os M_x , M_y a M_z . Měření silových účinků ve všech směrech a momentů okolo všech os, bylo provedeno na podrývacím tělese s cílem porovnat reakce pro tři různé tvarové typy slupic (Abbaspouring-Gilandeh et al.,

2013). Jednodušší přístup byl zvolen při kombinaci myšlenky vyhodnocování síly působící na dláto, pracující v konstantní hloubce 0,3 m, kdy bylo použito jednoho osmihranného tenzometrického členu a byla měřena pouze tahová a vertikální složka a moment M_y v laterální rovině XY . Z těchto hodnot byl zpětně přepočítáván odpor půdy a společně se záznamovým zařízením byla vytvářena mapa půdního odporu. Během měření byla sledována statisticky významná vazba mezi vertikální složkou síly a obsahem vody v půdě, respektive vlhkosti půdy (Sirjacobs et al., 2002). Vliv vlhkosti půdy na tahový odpor talířových bran byl sledován při různých rychlostech, nastavení disků a pracovních hloubkách. Bylo zjištěno že nastavení pracovních úhlů a změna rychlosti má vliv na drobní schopnost a schopnost obracet půdní profil pro různou vlhkost půdy (Okyere et al., 2018). Také bylo prokázáno, že zásadní vliv má tvar slupice (Frasconi et al., 2019) a osazení orgánu kypřícími křídly (Askari et al., 2019). Pro tyto účely jsou vyvíjeny měřicí zařízení typu mezirámu do tříbodového závěsu (Al-Jalil et al., 2001).

Dalším způsobem, jak zjišťovat tahový odpor, je měření v místě mezi půdozpracujícím strojem a tažným prostředkem. Tímto způsobem přímo zjišťujeme celkovou tahovou potřebu, která je nutná pro tažení daného stroje. U tažených nebo polo-nesených strojů se snímač zapojuje do tažné tyče mezi oko závěsu tažného prostředku a tažné oko prostředku. Tímto způsobem byla vyhodnocována potřebná tahová síla vzhledem k předchozí pracovní operaci (Chen et al., 2004). Podobným způsobem probíhalo vyhodnocení prokluzu soupravy s kypřičem (Musil a Červinka, 2004). Pro vyhodnocení okrajových podmínek pro DEM simulaci byl vyhodnocován tahový odpor neseného pluhu. U traktoru s agregovaným pluhem byl vyřazen rychlostní stupeň a byl tažen pomocí tažného lana, na kterém byl nainstalován měřicí člen. Pohon celé soupravy byl prováděn pomocí druhého traktoru (Azimi-Nejadian et al., 2019). Při vyhodnocování přírůstku vertikální síly na nápravu během pracovního zatížení pluhu, byla pro zjišťování tahového odporu osazena spodní ramena tříbodového závěsu, vertikální stabilizátory a táhlo třetího bodu. Hodnoty byly následně validovány tenzometrickým členem na tažném lanu mezi traktory (Porteš et al., 2013). Při vývoji systému pro měření tahových odporů pro potřeby optimalizace výkonu soupravy byl obdobným způsobem osazen tříbodový závěs traktoru (Bentaher et al., 2008). Pro lepší vyhodnocování směrů působících sil byl vyvinut univerzální nosný rám osazený šesti binárními členy (Podpěra et al. (2009), otestován ve studii Kim et al. (2020)., Optimalizace rámu byla provedeny ve studii Roca et al. (2019).. Pro minimalizaci zásahů do konstrukce traktoru i implementu byly vloženy tenzometrické prvky do míst uchycení, pomocí mezikusku nastavující čep, poté bylo vytvořeno speciální táhlo třetího bodu (Md-Tahir et al., 2019). Při zjišťování energetického výdeje při

pěstování kukuřice v různých způsobech obdělávání, byla tahová síla zjišťována pomocí mezirámu mezi tříbodový závěs traktoru a implementu osazeného třemi osmihrannými tenzometrickými snímači (López-Vázquez et al., 2019). Měřicí rámy, které jsou zapojeny mezi tříbodový závěs traktoru a přípojně zařízení, jsou často konstruovány tak, že nosné prvky prochází prostorem, kde se nachází výstup vývodového hřídele. Při zjišťování tahového odporu za účelem optimalizace a snižování výrobní ceny malých traktorů kategorie 0 a 1 byl vytvořen rám tvaru U, který zapojení vývodového hřídele umožňuje. Toto měřicí zařízení vyhodnocuje tahovou i vertikální složku síly a moment v rovině závěsu (Alimardai et al., 2008). Obdobné měřicí zařízení, které umožňuje použití vývodového hřídele traktoru bylo vyvinuto pro zkoumání vlivu vlhkosti půdy, hloubky a rychlosti na tahovou sílu u kypřiče (Manikandan et al., 2019).

Jako další běžný způsob spojení traktoru a implementu je tažná tyč. V případech, kdy traktor nemá tříbodový závěs, nebo se jedná o tažený, nebo polonesený implement, je tažná tyč jediné místo spojení strojů. Na tento způsob spojení se zaměřila studie (Roeber et al., 2017), věnující se optimalizaci výkonu a spotřeby. U místa spojení tažné tyče do rámu traktoru bylo vytvořeno vybrání, které bylo osazeno tenzometry.

Jako další motivací pro měření pracovních orgánů, je změna chování během průchodu orgánu půdou. Zajímavé je sledovat vliv vertikálních vibrací podrývacího tělesa na tahový odpor. Předpoklad je, že vlivem vibračního pohybu se sníží energetická spotřeba nutná pro pohyb orgánu půdou. Pro toto měření byl zhotoven a kalibrován měřicí přípravek měřící sílu ve třech směrech a momenty okolo všech tří os (Guillén Sánchez et al., 2018). Obdobná studie s vibrační slupicí byla prováděna na kombinovaném podrýváku s rotační bránou, kde došlo ke snížení energetické potřeby až o 21,1 % (Usaborisut et al., 2019). Byl prováděn výzkum chování hnaných diskových bran, kde bylo dosaženo snížení spotřeby až 6,42 l/h a zvýšení výkonu až o 0,57 ha/h oproti nehnané variantě (Upadhyay et al., 2017). Tyto výzkumy jsou velmi aktuální v rozvojových zemích, kde je snaha o zefektivnění provozu nižších řad traktorů, například osazením systému pro kontroly tahové síly, rychlosti a spotřeby paliva (Mamkagh, 2019).

Chování diskových orgánů v půdě je závislé na mnoha parametrech, proto byl v laboratorních podmínkách sledován vliv úhlu natočení disku, pracovní hloubky, rychlosti a odporu půdy. Byla zjištěna významná statistická závislost všech sledovaných parametrů. Výsledky oproti očekávané předpovědi dle ASABE se lišily o 50,18 % (Upadhyay et al., 2019). Velký vliv má také samotná geometrie a přítlak na disk, a v neposlední řadě také přítomnost rostlinných zbytků (Malasli a Celik, 2019).

Při zjišťování interakce mezi pracovním orgánem a překážkou v lesních půdách byl zkušební rám umístěn v třibodovém závěsu vybaven kromě tenzometru i úhlovými snímači pro lepší vyhodnocování vektoru síly a zjištění zrychlení orgánu a tím i získání dat pro návrh rámu a jisticího systému orgánu (Lysych et al., 2019).

Zjišťování tahového odporu orebního tělesa pomocí DEM simulací, vykazuje chybu 0,3–21,5 %, pro vertikální složku 1,9–16,6 %, na rozdíl od analytických metod, kde se chyba pohybuje v rozsahu 3,6–44,4 % (Ucgul a Saunders, 2019). Zjišťováním tahového odporu radliček pomocí DEM simulací se zabývala studie Tekeste et al. (2019), která porovnávala různé fáze opotřebení. Výsledek simulace se lišil od reálného testu s chybou od 7 do 24 %.

Při zjišťování tahové síly vibračních slupic byl také použit DEM model půdy a zjištěné odchylky od reálně naměřených hodnot byly 13,32 % (Wang et al., 2020). Při porovnávání průjezdu pevné slupice bylo stejným materiálovým modelem dosaženo chyby do 13 % (Wang et al., 2019).

Pokud chceme efektivně v krátkém čase získat výstup z naměřených dat, při měření tahového odporu vhodných pro řízení dalších funkcí soupravy, nelze pomocí konvenčních nástrojů tato data získat. Pro složitější soustavy, které vyhodnocují více složek sil a momentů. Množství signálů z velkého množství tenzometrů zatíží jak přenosovou soustavu, tak výpočetní výkon postprocesoru. Jako řešení tohoto problému se nabízí využití umělé inteligence, například ANFIS. Tento přístup byl testován pro měřicí rám umístěný do třibodového závěsu autory Askati et al. (2019). Stejným měřicím zařízením bylo provedeno porovnání tahové síly pro pět kultivačních orgánů ve studii Abbaspour-Gilandeh et al. (2020). Pomocí takto získaných dat se dá například řídit tlak v pneumatikách pro optimalizaci tahového výkonu vlivem prokluzu a tím snižovat spotřebu paliva soupravy o 2,5 až 3 % Čipliené et al. (2019). Další studie uvádí zlepšení prokluzu o 9,17 % (Gupta et al., 2019).

Existuje limitní hranice vlhkosti půdy, která výrazně ovlivňuje tahový odpor. Byla sledována závislost mezi vlhkostí a typem půdy a součinitel tření a v rozsahu od 6 do 39 %. V závislosti na typu půdy roste součinitel tření až na 244 % (Abbaspour-Gilandeh et al., 2020). Pro součinitel tření mezi ocelí a půdou je limitní hranice vlhkosti půdy 32 %, od této hodnoty tření výrazně klesá (Abbaspour-Gilandeh et al., 2018).

7. ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Zjišťování tahových odporů jednotlivých těles je zatíženo chybou interakce dvou a více orgánů, například pokud dochází k průniku zpracovaných profilů (například u radličných strojů), nebo k interakci stranové složky síly mezi jednotlivými orgány (například u diskových podmítačů). Výsledná hodnota zjištěné síly proto není plně vypovídající.

Žádná studie nebyla prováděna při rychlosti větší než 7,2 km/h. Velká většina měření byla provedena při rychlostech okolo 3 km/h, nicméně průměrná rychlost orby se pohybuje okolo 6 km/h, rychlost podrýváku 8 km/h, rychlost rotační brány 10 km/h a rychlost diskového podmítače 11 km/h. Hodnoty zjištěné v jednotlivých studiích se proto významně liší od skutečných pracovních podmínek.

Testování v laboratorních podmínkách bylo vždy prováděno s definovanou vlhkostí, utužením a v některých případech i s vytvořením vrstevnaté struktury půdního profilu. V jednom případě byl sledován i vliv přidaných rostlinných zbytků. Nezohledňuje však plně parametry reálné půdy, jako je náhodný výskyt kamenů či jiných překážek a rostlinných zbytků v celém profilu, zejména kořenové struktury v nižších vrstvách půdy. V jednom případě byla záměrně použita překážka v dráze orgánu. Proto se při pokusech v laboratorních podmínkách jedná o idealizovanou podobu půdního profilu.

Vliv vlhkosti půdy byl výrazný, a proto sledování tohoto parametru by mělo být jedním ze základních sledovaných hledisek. Výsledné odchylky naměřených hodnot byly v řádu stovek procent. Zásadním faktorem každého měření by proto mělo být uvedení hodnoty vlhkosti půdy.

Při použití zařízení, u kterého lze vyhodnotit síly i momenty ve všech směrech (respektive okolo všech os), lze přesně určit síly působící na rám stroje. V případech, kdy se vyhodnocuje jen celkový tahový odpor soupravy a nejsou známy jednotlivé vektory dílčích sil, zjišťuje se pouze celkový tahový odpor soupravy a nelze plně určit účinky jednotlivých dílčích sil, jejich působiště a směr. Ve velkém množství studií byly složky vyhodnocovány jen v jedné rovině, tím pádem zde však byl zanedbán účinek stranové síly.

Z výše uvedeného vyplývá, že dalším cílem zkoumání by mohlo být zjišťování tahových odporů zkoumaných těles v interakci s ostatními okolními orgány. Tyto hodnoty by mohly zpřesnit výsledky a odhalit, jak velká chyba vzniká používáním hodnot zjištěných z tahového odporu osamělého orgánu. Dále by mělo být předmětem dalšího zkoumání vyšetřování chování pracovních orgánů při vyšších rychlostech, které jsou blíže reálným pracovním podmínkám. Možnost zpřesnění laboratorních testů by mohlo přinést i zavedení náhodných periferních překážek do testovacích žlabů, jako například kameny, drny, kořeny apod. Stejně jako byl vyvinut testovací rám do tříbodového závěsu, který vyhodnocuje všechny složky sil a momenty

okolo všech os, měl by být cílem dalšího zkoumání vývoj podobného zařízení pro tažené a polonesené stroje, nebo pro jednotlivé orgány. Tímto způsobem by se mohla získat data potřebná k vyššímu stupni optimalizace rámu, či topologické optimalizaci, které by vedly k úspoře materiálu a vyšší hospodárnosti konstrukcí zemědělských strojů. Další cílová oblast výzkumu by mohla být zaměřena na zajištění podkladů DEM simulací za předpokladu odstranění vlivů vedoucích k nepřesnostem zjištěných hodnot sil, aby tyto testy v budoucnu mohly probíhat plně virtuálně a daly se rychleji a přesněji vyhodnocovat úpravy pracovních orgánů.

8. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ABBASPOUR-GILANDEH, Y., KHANRAMAKI, M. 2013. Design, Construction and Calibration of a Triaxial Dynamometer for Measuring Forces and Moments Applied on Tillage Implements in Field Conditions. *MAPAN*, č. **28**(2), s.119-127.
- [2] ABBASPOUR-GILANDEH, Y., HASANKHANI-GHAVAM, F., SHAHGOLI, G., SHRABIAN, V. R., ABBASPOUR-GILANDEH, M. 2018. Investigation of the Effect of Soil Moisture Content, Contact Surface Material and Soil Texture on Soil Friction and Soil Adhesion Coefficients. *Acta Technologica Agriculturae*, č. **21**(2), s. 44-50.
- [3] ABBASPOUR-GILANDEH, Y., FAZELI, M., ROSHANIANFARD, A., HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, M., GALLARDO-BERNAL, I., HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, J. L. 2020. Prediction of Draft Force of a Chisel Cultivator Using Artificial Neural Networks and Its Comparison with Regression Model. *Agronomy*, č. **10**(4).
- [4] ALIMARDANI, R., FAZEL, Z., AKRAM, A., MAHMOUDI, A., VARNAMKHASTI, M. G. 2008. Design and Development of three-point hitch dynamometer. *Jurnal of Agrichral Technology*, č. **37**, s. 37-52.
- [5] AL-JALIL, H. F., KHDAIR, A., MUKAHAL, W. 2001. Design and performance of an adjustable three-point hitch dynamometer. *Soil and Tillage Research*, č. **62**(3-4), s. 153-156.
- [6] American Petroleum Institute. 2014. Planning, designing, and constructing fixed offshore platforms - working stress design. USA: Dallas, Texas: API Publishing Services, 324 s.
- [7] ASKARI, M., SHAHGOLI, G., ABBASPOUR-GILANDEH Y. 2017. The effect of tine, wing, operating depth and speed on the draft requirement of subsoil tillage tines. *Research in Agricultural Engineering*, č. **63**(4), s. 160-167.
- [8] ASKARI, M., ABBASPOUR-GILANDEH, Y. 2019. Assessment of adaptive neuro-fuzzy inference system and response surface methodology approaches in draft force prediction of subsoiling tines. *Soil and Tillage Research*, č. **194**, s. 1-8.

- [9] AZEEZ, O., HUMMADI, R., HASAN, A. 2019. Effect of Embedded Length on Laterally Loaded Capacity of Pile Foundation. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, č. **56**(1), s. 182-192.
- [10] AZIMI-NEJADIAN, H., KARPARVARFARD, S. H., NADERI-BOLDAJI, M., RAHMANIAN-KOUSHKAKI, H. 2019. Combined finite element and statistical models for predicting force components on a cylindrical mouldboard plough. *Biosystems Engineering*, č. **186**, s. 168-181.
- [11] BENTAHER, H., HAMZA, E., KANTCHEV, G., MAALEJ, A., ARNOLD, W. 2008. Three-point hitch-mechanism instrumentation for tillage power optimization. *Biosystems Engineering*, č. **100**(1), s. 24-30.
- [12] BÍLEK, K., BIEDERMANN, I. 1988. *Zemědělské stroje 2*. Česká republika: Praha, SZN. 381 s.
- [13] BROMS, B. B. 1964. Lateral resistance of piles in cohesionless soils. *J. Soil Mech. Found. Div.*, č. **90**(3), s. 123–158.
- [14] COOK, N. H., RABINOWICZ, E. 1963. *Physical Measurement and Analysis*. USA: Palo Alto, Kalifornie: Addison-Wesley Publishing Company, 312 s. ISBN: 978-0-201-01210-1.
- [15] ČIPLIENĚ, A., GUREVIČIUS, P., JANULEVIČIUS A., DAMANAUSKAS, V. 2019. Experimental validation of tyre inflation pressure model to reduce fuel consumption during soil tillage. *Biosystems Engineering*, č. **186**, s. 45-59.
- [16] DOMBROVSKY, N. G., GALPERIN, M. I. 1985. *Baumaschine*. Rusko: Moskva, Maschinostrojenie, 224 s.
- [17] FRASCONI, C., MARTELLONI, L., RAFFAELLI, M., FONTANELLI, M., ABOU CHEHADE, L., PERUZZI, A., ANTICHI, D. 2019. A Field Vegetable Transplanter for Use in Both Tilled and No-Till Soils. *Transactions of the ASABE*, č. **62**(3), s. 593-602.

- [18] FRIEDMAN, M. a kol. 1973. *Zemědělské stroje I, teorie a výpočet*. Česká republika: Praha, SZN, 367 s. ISBN: 80-7157-511-9.
- [19] GODWIN, R. J. 1975. An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies. *Journal of Agricultural Engineering Research*, č. **20**(4), s. 347-352.
- [20] GORJACKIN, V. P. 1968. *Collected works*. Vyd. 3. Rusko: Moskva, Nakladatelství Kolos, 320 s.
- [21] GUILLÉN SÁNCHEZ, J., CAMPOS MAGAÑA, S. G., SÁNCHEZ LÓPEZ, C., GONZÁLEZ BRAMBILA, Ó. M. 2018. Calibración de sensores para la determinación de potencia aplicada a la labranza vertical vibratoria. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, č. **9**(21), s. 4370-4382.
- [22] GUPTA, C., TEWARI, V. K., ASHOK KUMAR, A., SHRIVASTAVA, P. 2019. Automatic tractor slip-draft embedded control system. *Computers and Electronics in Agriculture*, č. **165**, e:104947.
- [23] GUSEV, E. M. 2020. Evolution of Agricultural Technologies: from “Gray” to “Green.” *Arid Ecosystems*, č. **10**(1), s. 1-9.
- [24] HANSEN, J., CHRISTENSEN, N. 1961. *The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces; Model Tests with Transversally Loaded Rigid Piles in Sand*. Copenhagen: The Danish Geotechnical Institute, Bulletin No. 12, 16 s.
- [25] HEMMAT, A., RAHNAMA, T., VAHABI, Z. 2014. A horizontal multiple-tip penetrometer for on-the-go soil mechanical resistance and acoustic failure mode detection. *Soil and Tillage Research*, č. **138**, s. 17-25.
- [26] CHEN, Y., MONERO, F. V., LOBB, D., TESSIER S., CAVERS, C. 2004. Effects of six tillage methods on residue incorporation and crop performance in a heavy clay soil. *Transactions of the ASAE*, č. **47**(4), s. 1003-1010.

- [27] CHINENOVA, V. 2016. Goryachkin's agricultural mechanics. *Frontiers of Mechanical Engineering*, č. **11**(1), s. 87-94.
- [28] JEŘÁBEK, K. 1996. *Stroje pro zemní práci: Silniční stroje*. Vyd. 2. Ostrava: VŠB, Technická univerzita Ostrava, Katedra hornických strojů, 464 s. ISBN: 80-7078-389-3.
- [29] KIM, Y.-S., KIM, T.-J., KIM, Y.-J., LEE, S.-D., PARK, S.-U., KIM, W.-S. 2020. Development of a Real-Time Tillage Depth Measurement System for Agricultural Tractors: Application to the Effect Analysis of Tillage Depth on Draft Force during Plow Tillage. *Sensors*, č. **20**(3), s. 912-927.
- [30] KOSTRISYN, A. K. 1956. Cutting of a cohesive medium with knife and cones. *Vses. Akad. Sel'skokhoziaistvennykh Nauk. Zeml. Mekh. Sborn. Trudov* 3, s. 247-290.
- [31] KUSHWAHA, R. 1996. Draft-speed relationship of simple tillage tools at high operating speeds. *Soil and Tillage Research*, č. **39**(1-2), s. 61-73.
- [32] LÓPEZ-VÁZQUEZ, A., CADENA-ZAPATA, M., CAMPOS-MAGAÑA, S., ZERMEÑO-GONZALEZ, A., MENDEZ-DORADO, M. 2019. Comparison of Energy Used and Effects on Bulk Density and Yield by Tillage Systems in a Semiarid Condition of Mexico. *Agronomy*, č. **9**(4), s. 189-206.
- [33] LYSYCH, M. N., SHABANOV, M. L., BUKHTOYAROV, L. D. 2019. Research of process overcoming obstacles by tillage tools. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, č. **226**, e: 012045.
- [34] MACHADO, T. M., LANÇAS, K. P. 2016. Prototype for soil mechanical resistance measurement with chisel plow automated control. *Engenharia Agrícola*, č. **36**(4), s. 646-655.
- [35] MALASLI, M. Z., CELIK, A. 2019. Disc angle and tilt angle effects on forces acting on a single-disc type no-till seeder opener. *Soil and Tillage Research*, č. **194**, e: 104304.

- [36] MAMKAGH, A. M. 2019. Review of Fuel Consumption, Draft Force and Ground Speed Measurements of the Agricultural Tractor during Tillage Operations. *Asian Journal of Advanced Research and Reports*, č. 3(4), s. 1-9.
- [37] MANIKANDAN, G., SHRIDAR, B., MANOHAR JESUDAS, D. 2019. Draft measurement of five tyne duck foot cultivator. *International Journal of Agricultural Science and Research (IJASR)*, č. 9(6), s. 51–60.
- [38] MD-TAHIR, H., ZHANG, J., XIA, J., ZHANG, C., ZHOU, H., ZHU, Y. 2019. Rigid lugged wheel for conventional agricultural wheeled tractors – Optimising traction performance and wheel–soil interaction in field operations. *Biosystems Engineering*, č. 188, s. 14-23.
- [39] MEYERHOF, G. G., MATHUR, S. K., VALSANGKAR, A. J. 1981. *Lateral resistance and deflection of rigid walls and piles in layered soils*, *Can. Geotech. J.*, č. 18 (2), s. 159–170.
- [40] MUSIL, J., ČERVINKA, J. 2004. Zařízení pro měření tahového odporu mechanizačních prostředků. In: *MendelNet '04 Agro – sborník abstraktů z konference posluchačů postgraduálního doktorského studia*. CERKAL, R., RYANT, P., FRYŠČÁKOVÁ, E., STŘEDA, T. (Red.). Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 71 s. ISBN: 80-7157-813-4.
- [41] NEUBAUER, K. 1989. *Stroje pro rostlinnou výrobu: celostátní vysokoškolská učebnice pro vysoké školy zemědělské*. Praha: SZN, Mechanizace, výstavba a meliorace, 716 s. ISBN: 80-209-0075-6.
- [42] OKYERE, F. G., QASIM, W., BASAK, J. K., KHAN, F., MOON, B. E., KIM, H. T. 2018. Tillage operational analysis based on soil moisture content, machine speed, and disc space of compact disc harrow. *Journal of Biosystems Engineering*, č. 43(3), s. 161-172.
- [43] PITLA, S. K., WELLS, L. G., SHEARER, S. A. 2009. Integration of an Extended Octagonal Ring Transducer and Soil Coulterometer for Identifying Soil Compaction. *Applied Engineering in Agriculture*, č. 25(5), s. 647-652.

- [44] PODPĚRA, V., SYROVÝ, Z., VOTÍPKA, F. 2009. Zařízení pro měření sil. Česká republika: Úřad průmyslového vlastnictví ČR. CZ 2009-267.
- [45] PORTEŠ, P., BAUER, F., ČUPERA, J. 2013. Laboratory-experimental verification of calculation of force effects in tractor's three-point hitch acting on driving wheels. *Soil and Tillage Research*, č. **128**, s. 81-90.
- [46] PROCHÁZKA, B., KONUPČÍK, J., TURČEK J., VELDA, K., 1986. *Mechanizácia rastlinnej výroby*. Vyd 1. Slovensko: Bratislava, Vydavateľstvo Príroda, 527 s.
- [47] ROCA, J., COMELLAS, M., PIJUAN, J., NOGUÉS, M. 2019. Development of an easily adaptable three-point hitch dynamometer for agricultural tractors. Analysis of the disruptive effects on the measurements. *Soil and Tillage Research*, č. **194**, e: 104323.
- [48] ROEBER, J. B. W., PITLA, S. K., HOY, R. M., LUCK, J. D., KOCHER, M. F. 2017. Development and Validation of a Tractor Drawbar Force Measurement and Data Acquisition System (DAQ). *Applied Engineering in Agriculture*, č. **33**(6), s. 781-789.
- [49] 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*, č. **64**(3-4), s. 231-242.
- [50] TEKESTE, M. Z., BALVANZ, L. R., HATFIELD, J. L., GHORBANI, S. 2019. Discrete element modeling of cultivator sweep-to-soil interaction: Worn and hardened edges effects on soil-tool forces and soil flow. *Journal of Terramechanics*, č. **82**, s. 1-11.
- [51] TOPAKCI, M., UNAL, I., CANAKCI, M., CELIK, H. K., KARAYEL, D. 2010. Design of a Horizontal Penetrometer for Measuring On-the-Go Soil Resistance. *Sensors*, č. **10**(10), s. 9337-9348.
- [52] UCGUL, M., SAUNDERS, C. 2020. Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling. *Biosystems Engineering*, č. **190**, s. 58-70.

- [53] UPADHYAY, G., RAHEMAN, H., RASOOL, S. 2017. Three Dimensional Modelling and Stress Analysis of a Powered Single Acting Disc Harrow Using FEA. *Current Agriculture Research Journal*, č. 5(2), s. 200-211.
- [54] UPADHYAY, G., RAHEMAN, H. 2019. Specific draft estimation model for offset disc harrows. *Soil and Tillage Research*, č. 191, s. 75-84.
- [55] USABORISUT, P., PRASERTKAN, K. 2019. Specific energy requirements and soil pulverization of a combined tillage implement. *Heliyon*, č. 5(11), e: 02757.
- [56] VETROV, Y. A., STANEVSKY, V. P. 1969. The investigation of the factors of the speed of cutting soils. *Mining, Construction and Highway Machines*, č. 8, s. 21-26. Přeložil GILL, W. R. 1972. USA: Auburn, AL, National Tillage Machinery Laboratory.
- [57] WANG, X., ZHANG, S., PAN, H., ZHENG, Z., HUANG, Y., ZHU, R. 2019. Effect of soil particle size on soil-subsoiler interactions using the discrete element method simulations. *Biosystems Engineering*, č. 182, s. 138-150.
- [58] WANG, Y., ZHANG, D., YANG, L., CUI, T., JING, H., ZHONG, X. 2020. Modeling the interaction of soil and a vibrating subsoiler using the discrete element method. *Computers and Electronics in Agriculture*, č. 174, e: 105518.
- [59] WEBINGER, R. 1994. *Příprava na soutěž v orbě a pravidla dle WPO [Water Programs Office]*. Praha: Ministerstvo zemědělství ČR, 96 s. ISBN 80-7084-105-2.
- [60] ČSN 73 3050. 1987. *Zemní práce*. Praha: Český normalizační institut, 36 s.
- [61] ČSN 46 5302. 1982. *Značení charakteru půd zpracovávaných mechanizačními prostředky*. Praha: Český normalizační institut, 19 s.

Internetové zdroje

MZe. *Standardy Dobrého zemědělského a environmentálního stavu půdy DZES (GAEC)* [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/dotace/kontroly-podminenosti-cross-compliance/dobry-zemedelsky-a-environmentalni-stav/?fullArticle=1>

FRÍD M. 2013. *Zpracování půdy* [online]. Poslední revize 28. listopadu 2013 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: http://kzt.zf.jcu.cz/wp-content/uploads/2013/11/zpracovani_pudy.pdf

9. SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 1: <i>V. P. Gorjačkin (1868-1935).</i> | 5 |
| Obr. 2: <i>Schéma evoluce technologií zpracování půdy</i> | 6 |
| Obr. 3: <i>Nahrazení třístranného klínu třemi dvoustrannými klíny</i> | 9 |
| Obr. 4: <i>Porovnání hypotéz</i> | 10 |
| Obr. 5: <i>Schéma kritické hloubky pozorované</i> | 10 |
| Obr. 6: <i>Originál Gorjačkinovy rovnice</i> | 13 |
| Obr. 7: <i>Pružinový siloměr</i> | 19 |
| Obr. 8: <i>Princip tenzometrického členu zatíženého ohybem a schéma můstku</i> | 20 |
| Obr. 9: <i>Detail nalepeného tenzometru</i> | 20 |
| Obr. 10: <i>Tenzometrický snímač typu S</i> | 21 |
| Obr. 11: <i>Schéma umístění tenzometrů na těleso osmihranného snímače pro měření tahového odporu</i> | 22 |
| Obr. 12: <i>Popis částí horizontálního penetrometru</i> | 26 |
| Obr. 13: <i>Hlavní části horizontálního penetrometru</i> | 26 |
| Obr. 14: <i>Schéma zařízení postupného horizontálního penetrometru</i> | 27 |
| Obr. 15: <i>Sestava zkušebního zařízení pro automatické nastavení pracovní hloubky implementu podle hloubky plužní pánve</i> | 27 |
| Obr. 16: <i>Horizontální penetrometr se třemi snímači</i> | 28 |
| Obr. 17: <i>Měřicí zařízení</i> | 29 |
| Obr. 18: <i>Izometrický pohled na vibrační podrážák</i> | 30 |
| Obr. 19: <i>Osmihranný tenzometrický člen</i> | 30 |
| Obr. 20: <i>Schéma měřícího zařízení a fotografie z polního testu</i> | 32 |
| Obr. 21: <i>Schéma vyhodnocovaných sil a momentů</i> | 32 |
| Obr. 22: <i>Schéma funkce testovacího zařízení</i> | 33 |
| Obr. 23: <i>Schéma zapojení tenzometrů</i> | 34 |
| Obr. 24: <i>Schéma měřícího zařízení</i> | 34 |
| Obr. 25: <i>Kalibrace měřícího zařízení</i> | 35 |
| Obr. 26: <i>Schéma vyhodnocovaných sil a momentů</i> | 36 |
| Obr. 27: <i>Měřicí zařízení</i> | 36 |
| Obr. 28: <i>Měřicí zařízení</i> | 37 |
| Obr. 29: <i>Zkušební zařízení</i> | 38 |
| Obr. 30: <i>Tenzometrické zařízení MČBI</i> | 39 |
| Obr. 31: <i>Měření tahové síly soupravy</i> | 40 |

| | |
|---|----|
| Obr. 32: <i>Fotografie osazeného třibodového závěsu.</i> | 41 |
| Obr. 33: <i>Schéma systému</i> | 42 |
| Obr. 34: <i>Tažná tyč, Detail aplikace tenzometru.</i> | 43 |
| Obr. 35: <i>Měřicí souprava, Spojení traktoru a zatěžovacího vozu, Zátěžový systém</i> | 43 |
| Obr. 36: <i>Testované orgány</i> | 44 |
| Obr. 37: <i>Měřicí zařízení</i> | 45 |
| Obr. 38: <i>Schéma rozmístění tenzometrů, schéma zapojení můstku a uložení</i> | 46 |
| Obr. 39: <i>Měřicí zařízení</i> | 46 |
| Obr. 40: <i>Schéma působících sil</i> | 47 |
| Obr. 41: <i>Schéma umístění tenzometrů (S) a mechanismus třibodového závěsu</i> | 48 |
| Obr. 42: <i>Fotografie měřicího zařízení a aplikace tenzometrů na ramenu třibodového závěsu</i> | 48 |
| Obr. 43: <i>Referenční měření soupravy pro validaci měřicího zařízení</i> | 49 |
| Obr. 44: <i>Měřicí zařízení.</i> | 50 |
| Obr. 45: <i>Schéma měřicího zařízení</i> | 52 |
| Obr. 46: <i>Záznam naměřených hodnot složek tahové síly zanesený do mapy</i> | 52 |
| Obr. 47: <i>Schéma zkušebního zařízení</i> | 54 |
| Obr. 48: <i>Porovnání simulací působení DEM na radlici při různých frekvencích kmitání</i> | 55 |
| Obr. 49: <i>Simulace působení DEM na radlici metoda válce</i> | 55 |
| Obr. 50: <i>Zkušební zařízení</i> | 56 |
| Obr. 51: <i>Měřicí souprava</i> | 57 |
| Obr. 52: <i>Schéma fungování ANFIS</i> | 58 |
| Obr. 53: <i>Měřicí zařízení</i> | 59 |
| Obr. 54: <i>Porovnávané orgány</i> | 59 |
| Obr. 55: <i>Schéma silových účinků na soupravu</i> | 61 |
| Obr. 56: <i>Měřicí zařízení</i> | 62 |
| Obr. 57: <i>Použité zkušební slupice</i> | 64 |
| Obr. 58: <i>Měřicí zařízení</i> | 65 |
| Obr. 59: <i>Měřicí zařízení</i> | 65 |
| Obr. 60: <i>Schéma měřicího zařízení</i> | 66 |
| Obr. 61: <i>Vibrační disková brána</i> | 68 |
| Obr. 62: <i>Měřicí zařízení</i> | 68 |
| Obr. 63: <i>Měřicí zařízení</i> | 70 |

| | |
|--|----|
| Obr. 64: <i>Měřicí zařízení</i> | 73 |
| Obr. 65: <i>Měřicí zařízení</i> | 75 |
| Obr. 66: <i>Sledované parametry pro validaci simulace</i> | 75 |
| Obr. 67: <i>Zkušební zařízení</i> | 76 |
| | |
| Tab. 1: <i>Výnos jarní pšenice při použití minimalizačních technologií</i> | 8 |
| Tab. 2: <i>Druhy půd a jejich měrné odpory dle ČSN 46 5302</i> | 15 |
| Tab. 3: <i>Závislost tvaru třísky na druhu rozpojované zeminy</i> | 18 |
| Tab. 4: <i>Přehledová tabulka měřících prostředků z jednotlivých studií</i> | 23 |
| Tab. 5: <i>Tabulka naměřených tahových sil</i> | 50 |
| Tab. 6: <i>Tabulka hloubek zpracování</i> | 51 |
| Tab. 7: <i>Tabulka závislosti tahové síly na frekvenci kmitání</i> | 56 |
| Tab. 8: <i>Legenda k grafům naměřených hodnot</i> | 61 |
| | |
| Graf 1: <i>Graf závislosti přírůstku tahové síly na rychlosti pro různé pracovní hloubky</i> | 29 |
| Graf 2: <i>Graf závislosti přírůstku tahové síly na rychlosti pro různé typy slupic</i> | 29 |
| Graf 3: <i>Půdní podpor v závislosti na hloubce a způsobu předchozího zpracování</i> | 36 |
| Graf 4: <i>Graf porovnání tahové síly pro různé hloubky a rychlosti</i> | 38 |
| Graf 5: <i>Graf průběhu tahové síly na rychlosti a hloubce zpracování</i> | 39 |
| Graf 6: <i>Graf naměřených složek sil</i> | 41 |
| Graf 7: <i>Graf porovnání zatěžovací síly a naměřené hodnoty tažnou tyčí</i> | 43 |
| Graf 8: <i>Průběh změny tahového odporu radličky vlevo a disku vpravo</i> | 45 |
| Graf 9: <i>Graf naměřených tahových sil pro různé rychlosti v porovnání s DEM simulací</i> | 53 |
| | |
| Graf 10: <i>Graf zjištěných tahových sil pro různé typy slupic v různé délce</i> | 58 |
| Graf 11: <i>Efekt rychlosti a hloubky zpracování na tahovou sílu</i> | 61 |
| Graf 12: <i>Efekt vlhkosti půdy a typu orgánu na tahovou sílu</i> | 61 |
| Graf 13: <i>Horizontální složka tahové síly</i> | 63 |
| Graf 14: <i>Vertikální složka tahové síly</i> | 64 |
| Graf 15: <i>Grafy tažné síly sazeče s různými radlicemi</i> | 65 |
| Graf 16: <i>Graf průběhu tahové síly na rychlosti, při hloubce 30 cm</i> | 67 |
| Graf 17: <i>Graf průběhu tahové síly na hloubce při rychlosti 1,44 km/h</i> | 68 |
| Graf 18: <i>Průběh tahové síly na čase</i> | 70 |
| Graf 19: <i>Průběh sil v závislosti na vertikálním zatížení a úhlu natočení disku</i> | 71 |

| | |
|--|----|
| Graf 20: <i>Vliv rostlinných zbytků na složky tahové síly</i> | 72 |
| Graf 21: <i>Vlivu vertikálního zatížení na složky síly</i> | 72 |
| Graf 22: <i>Vliv úhlů disku na složky síly</i> | 73 |
| Graf 23: <i>Graf naměřených tahových sil pro různé opotřebení radličky</i> | 75 |
| Graf 23: <i>Vliv vlhkosti půdy na součinitel tření</i> | 78 |