



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# ANALÝZA SILOVÝCH ÚČINKŮ V TŘÍBODOVÉM ZÁVĚSU NA VÝSTUPNÍ PARAMETRY TRAKTORU

ANALYSIS OF THE FORCE EFFECTS IN THE THREE-POINT HITCH ON THE OUTPUT PARAMETERS OF THE TRACTOR

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Rendek

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. František Bauer, CSc.

BRNO 2018

## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Bc. Marek Rendek**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství  
Vedoucí práce: **prof. Ing. František Bauer, CSc.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Analýza silových účinků v třibodovém závěsu na výstupní parametry traktoru**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce je zaměřena na rozbor silových účinků v táhlech třibodového závěsu se zaměřením na adhezní zatížení hnacích kol traktoru, jeho tahové vlastnosti a s tím spojené energetické a výkonnostní parametry.

#### **Cíle diplomové práce:**

Sestavení matematického modelu traktoru včetně třibodového závěsu v software ADAMS.  
Analýza vlivu parametrů třibodového závěsu na silové účinky působící na traktor.

#### **Seznam doporučené literatury:**

BAUER, František, SEDLÁK, Pavel, ČUPERA, Jiří, POLCAR, Adam, FAJMAN, Martin, ŠMERDA, Tomáš a KATRENČÍK, Jakub. Traktory a jejich využití. 2. Praha: Profi Press, 2013. ISBN 978-80-86726-52-6.

BAUER, František, PORTEŠ, Petr, SLIMARÍK, Dušan, ČUPERA, Jiří a FAJMAN, Martin. Analýza silových účinků neseného pluhu působících na půdu. Připravuje se

PORTEŠ, Petr, BAUER, František a ČUPERA, Jiří. Laboratory-experimental verification of calculation of force effects in tractor's three-point hitch acting on driving wheels. Soil and Tillage Research. 2013, 128(april), 81-90. DOI: 10.1016/j.still.2012.10.007. ISSN 01671987. 12. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198712002279>.

GOERING, Carroll E. a HANSON, Alan C. Engine and tractor power. 4th ed. St. Joseph, Mich.: American Society of Agricultural Engineers, c2004. ISBN 18-927-6942-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 25. 10. 2017



---

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

V diplomovej práci je rozoberaná problematika silových účinkov v tiahloch trojbodového závesu v prostredí multi-body, v závislosti na silách vyvedených na pluh počas orby. Prostredníctvom simulácií sú ďalej identifikované silové reakcie pod traktorovými kolesami pre rôzne podmienky. V práci je taktiež analyzovaný vplyv uchytenia horného tiahla vzhľadom ku výstupným parametrom traktoru.

## KLÍČOVÁ SLOVA

trojbodový záves, traktor, multi-body, MSC Adams, silové účinky, simulácia

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with the issue of force effects in the three-point hitch links in the multi-body environment depending on the forces ejected to the plow during the plowing. Through simulations, force responses under the tractor wheels are also identified for various conditions. The work is also analyzed for the impact of the upper link attachment relative to the tractor output parameters.

## KEYWORDS

three-point hitch, tractor, multi-body, MSC Adams, force effects, simulation

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RENDEK, M. *Analýza silových účinků v třibodovém závěsu na výstupní parametry traktoru*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 63 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. František Bauer, CSc.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Františka Bauera, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23. května 2018

.....

Bc. Marek Rendek

## PODĚKOVÁNÍ

Týmto by som rád poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi prof. Ing. Františkovi Bauerovi, CSc. za odborné rady a pripomienky poskytnuté behom vypracovávania. Ďalej by som rád poďakoval pánovi doc. Ing. Petrovi Portešovi, Ph.D. za užitočné rady v oblasti multi-body simulácií. V neposlednej rade by som rád poďakoval svojej rodine a priateľke za vytvorenie zázemia, dôležitého pri písaní práce.

## OBSAH

Úvod .....	9
1 Súčasný stav poznania .....	10
1.1 Závesné zariadenia traktoru - trojbodový záves .....	10
1.2 Regulačná hydraulika traktorov .....	12
1.3 Elektrohydraulické systémy regulácie .....	14
1.3.1 Silová regulácia .....	17
1.3.2 Polohová regulácia .....	18
1.3.3 Zmiešaná regulácia .....	19
1.3.4 Tlaková regulácia .....	19
1.3.5 Tlmenie kmitov .....	20
1.3.6 Regulácia na medzný preklz .....	21
1.3.7 Neutrálna poloha .....	21
1.4 Zásady zostavovania orebných súprav .....	22
2 Ciele práce .....	23
3 Virtuálny model .....	24
3.1 Tvorba modelov - ADAMS/View .....	24
3.2 Tvorba modelu traktoru .....	25
3.2.1 Telo a predná náprava .....	25
3.2.2 Trojbodový záves .....	28
3.2.3 Pluh .....	31
3.3 Snímanie síl v trojbodovom závese .....	31
3.4 Snímanie síl pod kolesami traktoru .....	33
3.5 Aplikácia silových účinkov na pluh .....	33
4 Výsledné silové účinky .....	36
4.1 Zmena odporu pôdy a jej dopad na silové účinky .....	36
4.2 Zvislé silové reakcie pod kolesami traktoru .....	42
4.3 Uchytenie horného tiahla v stojane pluhu .....	45
4.3.1 Závislosť dot'aženia náprav na sile v hornom tiahle .....	51
5 Vplyv uchytenia horného tiahla na hnaciu silu traktoru .....	54
6 Ostatné možnosti využitia modelu .....	57
Záver .....	58
Seznam použitých zkratok a symbolů .....	62



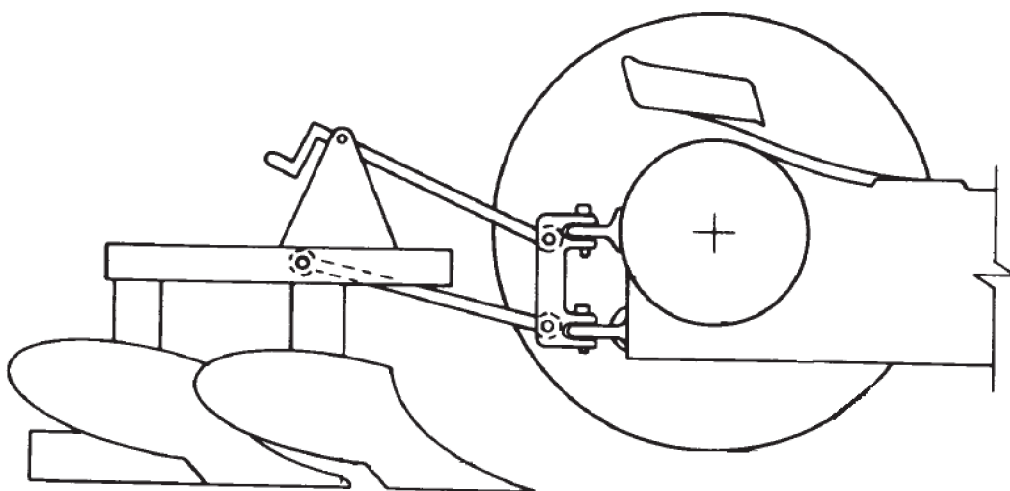
## ÚVOD

V poľnohospodárstve rovnako ako v priemysle dochádza k neustálemu pokroku a vylepšeniam. Traktory ako neoddeliteľná súčasť tohto odvetvia je využívaná k rozličným druhom úkonov. Jedným z nich je i spracovanie pôdy. V našich končinách prevláda už dlhé roky klasický spôsob obhospodarovania pôdy, ktorým je tradičná orba. Tento proces je energeticky jedným z najnáročnejších, preto dochádza k snahám ho určitými spôsobmi zefektívniť. Spôsob akým je tento proces vykonávaný, má dopad na mnoho faktorov, napr. na ekonomiku práce. Konvenčná orba, vykonávaná nesenými pluhmi pripojených k traktoru trojbodovým závesom je rozoberaná práve v tejto diplomovej práci. Silové účinky vyvedené pri poľných operáciách majú výrazný vplyv i na dotíženie jednotlivých traktorových náprav. I preto je uváženia hodné zamerať sa na identifikáciu vyvedenia silových účinkov v závislosti na určitých parametroch. Následná optimalizácia môže mať priaznivý vplyv na produktivitu práce traktoru a pripojeného náradia. V dobe kedy sa do popredia stále viac a viac dostáva problematika virtuálneho modelovania je možné túto oblasť využiť i u traktorov. Vytvorené modely je možno podrobne analyzovať, simulovať rôzne záťažové stavy, ktoré môžu vo veľkej miere prispieť k zvýšeniu efektívnosti reálnych súprav. Virtuálne modely tak môžu významne šetriť čas, financie a môžu v značnej miere aplikované práve aj v oblasti poľnohospodárstva.

# 1 SÚČASNÝ STAV POZNANIA

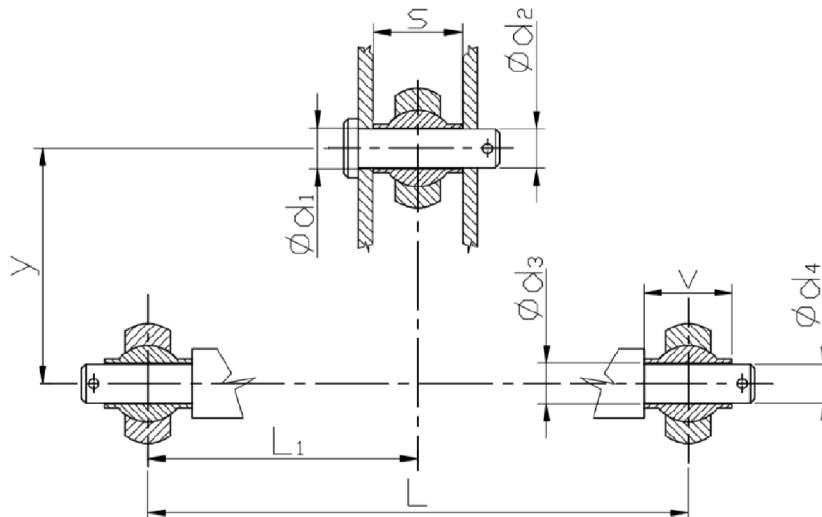
## 1.1 ZÁVESNÉ ZARIADENIA TRAKTORU - TROJBODOVÝ ZÁVES

Trojbodový záves (TBZ), ako zariadenie slúžiace na vzájomné spojenie traktoru s nesenými resp. návesnými strojmi používajú výrobcovia na celom svete. Počiatočným míľnikom v konštrukcii trojbodového závesu sa považujú dvadsiate roky dvadsiateho storočia. Tento typ závesu, vyvinutý pre pluh Ferguson-Sherman (obr. 1), však obsahoval radu nedokonalostí, ktoré boli postupom času odstraňované. Jeho nesporným prínosom však bolo možné zabránenie nehôd, pri ktorých dochádzalo k prevráteniu traktoru z dôvodu nárazu pripojeného náradia do statickej prekážky počas orby. V niektorých prípadoch dochádzalo až k smrteľným incidentom. [1], [2]



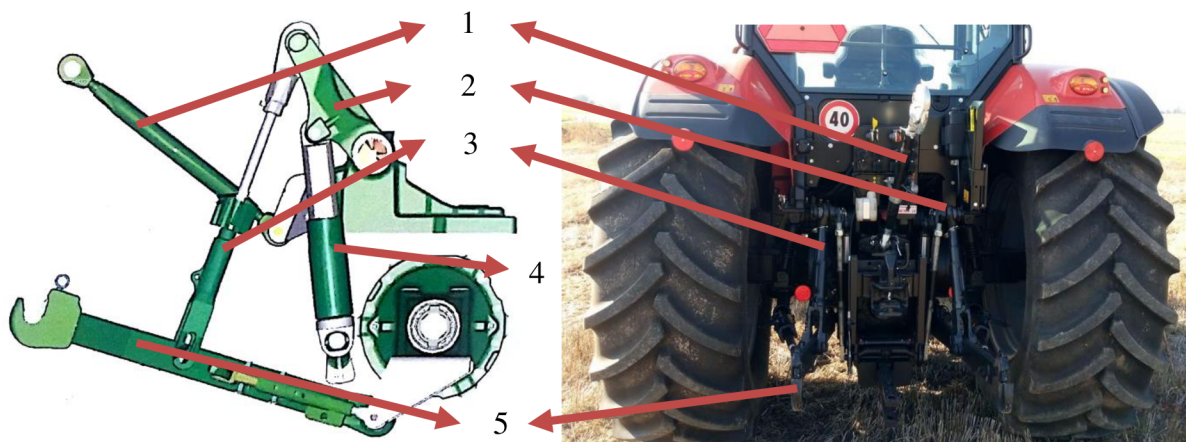
Obr. 1 Schéma trojbodového závesu a pluhu Ferguson-Sherman [2]

System trojbodového závesu prešiel ďalšími rokmi úpravami a vylepšeniami, pričom v súčasnej dobe možno tvrdiť, že sa jedná o systém štandardne dodávaný pre takmer všetky typy traktorov. U hlavných rozmerov trojbodových závesov (obr. 2), akými sú napr. priemer otvoru horného tiahla ( $d_1$ ), priemer čapu horného tiahla ( $d_2$ ), priemer otvoru gule dolných tiahel ( $d_3$ ), resp. priemer čapu lišty ( $d_4$ ), je nutné rešpektovať medzinárodnú normu ISO 789-1. Táto norma klasifikuje rozmery prípojných bodov traktorov a iných poľnohospodárskych strojov. Podľa jednotlivých typov rozmerov sú trojbodové závesy rozdelené do štyroch kategórií (1 – 4) pričom posledná z kategórií je rozdelená do dvoch skupín 4L a 4H. Tieto parametre sú definované normou ISO 730-1. Do ktorej z kategórií spadajú jednotlivé traktory určuje výkon motoru meraný na vývodovom hriadeli (udávaný v kW), kde napríklad do kategórie č. 1 patria stroje <48 kW a do kat. č. 4 stroje do 350 kW. [1], [2]



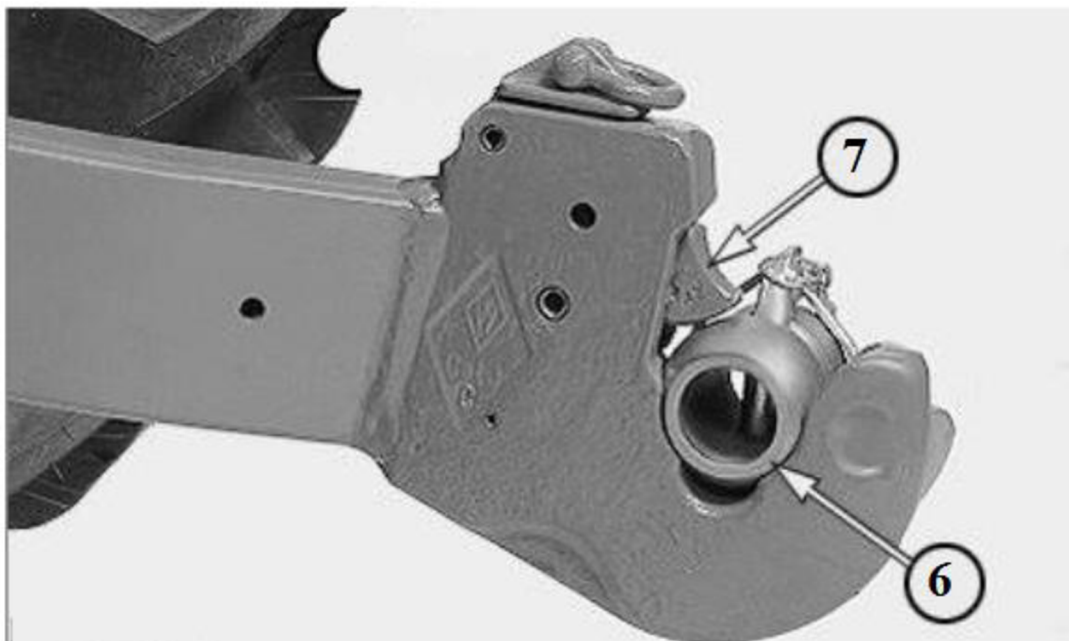
Obr. 2 Hlavné rozmery trojbodového závesu [1]

Klasický trojbodový záves (obr. 3) sa skladá z horného tiahla (1), z ramien zdvíhacieho ústrojenstva (2), zdvíhacích tiahli (3), zdvíhacích valcov (4) a dolných tiahli (5). Tieto súčasti sú k traktoru uchytené pomocou rôznych kinematických väzieb, čo znamená, že sa záves môže v určitom rozsahu priestorovo pohybovať.



Obr. 3 Hlavné prvky trojbodového závesu traktoru [1], [9]

Dĺžka horného tiahla je v určitom rozmedzí variabilná, vďaka osadenému závitú v stredovej časti. Skracovaním a predĺžovaním horného tiahla možno pozdĺžne nastaviť nesený stroj. Tiahlo je k traktoru upnuté na zadnom moste, ktorý obsahuje niekoľko otvorov pre jeho pripojenie. Jeho zmenou možno ovplyvniť kinematiku trojbodového závesu. Zdvíhacie tiahla sú taktiež rozmerovo nastaviteľné a sú pripojené k tiahlam dolným. Jednotlivými možnosťami pripojení je možné meniť silu v dolných tiahloch. Dolné tiahla sú na koncoch osadené automatickými hákmi, ktoré dovoľujú rýchlo pripojiť alebo odpojiť nesené náradie. Priamo v nich sú osadené gule s vodítkami (6) pre jednoduchosť pripojenia. K zaisteniu pripojeného stroja slúžia samovoľné západky (7). [1]



Obr. 4 Automatický hák dolného tiahla [4]

## 1.2 REGULAČNÁ HYDRAULIKA TRAKTOROV

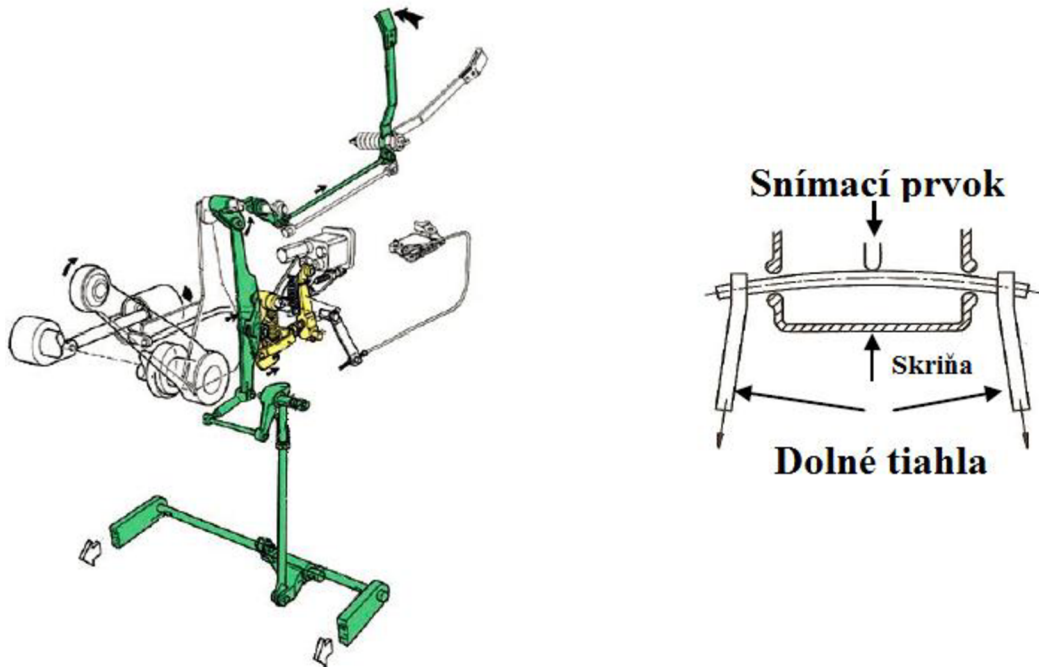
Regulačná hydraulika slúži k ovládaniu (regulácii) trojbodového závesu traktoru. I prvý trojbodový záves formy Massey-Ferguson bol ovládaný hydraulicky. Bolo tak učené práve z dôvodu energetickej náročnosti procesu obhospodarovania pôdy. Vychádzajúc z predpokladu, že náradie na orbu nesmie byť pripojené pevne voči traktoru, kôli nerovnostiam pracovného povrchu a nerovnomernému odporu pôdy, bola regulačná hydraulika ideálna voľba. Medzi vstupné veličiny systému regulácie patrili veľkosti ťahových síl v tiahloch závesu, krútiaci moment hnacej nápravy a tlak hydromotoru. V súčasnosti sa regulačná hydraulika delí do dvoch základných skupín. Pre traktory nižších výkonnostných parametrov sú to systémy s mechanickou väzbou. Traktory vyšších výkonnostných kategórií používajú hydraulické systémy regulované elektronikou. Zaznamenávané veličiny sú napríklad poloha, resp. sily a tlaky vznikajúce v hydromotore. Elektrohydraulické systémy (EHS) patria v súčasnosti medzi najrozšírenejšie možnosti v ovládaní trojbodových závesov, pričom je možné, že prevládne i u traktorov nižších výkonnostných tried. [1], [3], [5]

Hydraulický okruh, ktorým je ovládaný trojbodový záves sa o. i. označuje ako okruh vnútorný. Záves je ovládaný z miesta vodiča, čo dáva osobe obsluhujúcej stroj výhodu nepotrebnosti na konci úvrate vystúpiť, pluh odpojiť a po otočení traktoru znova pripojiť do pracovnej polohy. Možno skonštatovať, že takmer každý traktor obsahuje systém regulácie TBZ : [1], [6]

- a) polohový – regulácia na konšt. polohu
- b) silový – regulácia na konšt. silu
- c) zmiešaný – kombinácia a) , b)

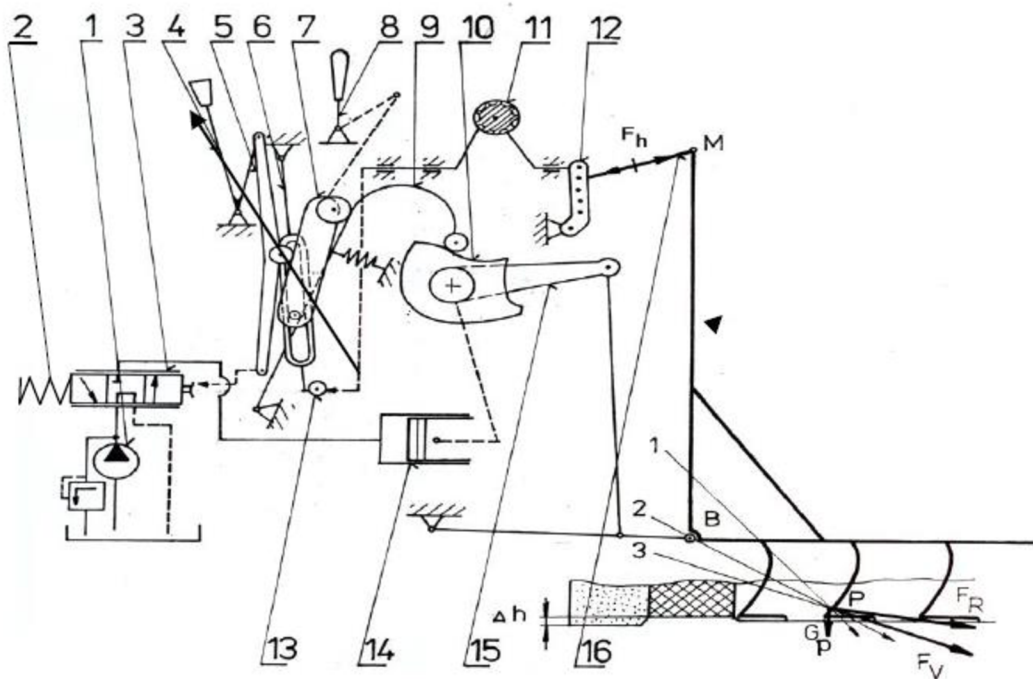
Uvedomelé užívanie prvkov regulačnej hydrauliky je úmerné množstvu spotrebovaného paliva, výkonnosti a efektivity odvedenej práce. V prípade mechanického regulačného systému (obr. 5) je ovládanie zabezpečované pomocou šúpatkového rozvádzača, riadiaci pohyb ramien trojbodového závesu vo vertikálnom smere. Variabilitou silového pôsobenia dolného tiahla dochádza k javu, kedy sa pomocou pákového prevodu táto zmena prevádza na vnútorný okruh.

Zmena silového pôsobenia a polohy na vnútorný rozvádzač má najvýraznejší dopad na akosť regulácie. V neposlednom rade na správnom fungovaní systému závisí aj umiestnenie horného tiahla a jeho dĺžkové nastavenie. [1]



Obr. 5 Schematické znázornenie mechanickej regulácie [1]

V prípade mechanického regulačného systému Zetormatic (obr. 6) sa jedná o reguláciu zmiešanú. Hlavným činiteľom sústavy možno považovať horné tiahlo, ktorého silové pôsobenie  $F_h$  pôsobí cez páku (12) na torznú pružinu (11), a pomocou kladky (13) má vplyv na páku regulácie (6). Prostredníctvom voliča impulzov je prenesená sila až ku šúpatku v hydraulickom okruhu, ktoré pohybuje závesom nahor-nadol. V praxi to znamená stav, kedy sa dostáva pluh do pôdy s vyšším odporom, že sa šúpatko vychýli z východzej polohy do stavu zdvíhania orného náradia. Oproti čisto silovej regulácii sa však vracia do polohy „neutrál“ podstatne rýchlejšie. V silovom prípade by bol pluh vyhlbovaný až do okamihu vrátenia sa torznej pružiny do pôvodnej polohy. [6], [7]



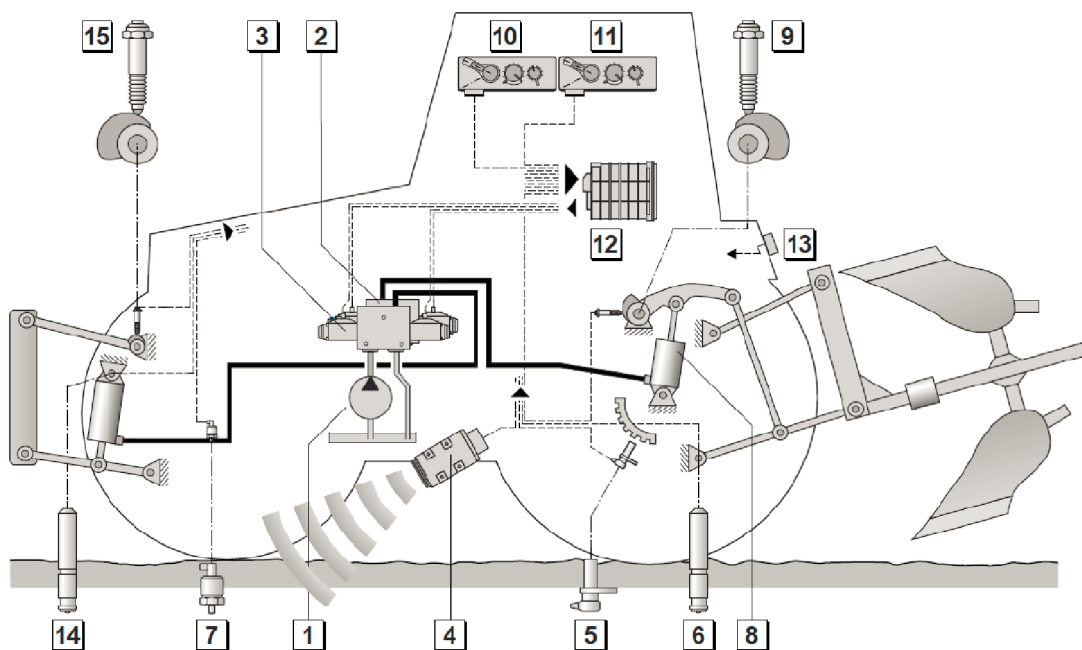
Obr. 6 Mechanická regulácia Zetormatic - schéma [6]

### 1.3 ELEKTROHYDRAULICKÉ SYSTÉMY REGULÁCIE

Jednou z inovácií do regulačnej hydrauliky traktorov vniesla regulácia elektrohydraulická. Míľníkom v tejto oblasti bol elektronický analógový systém od firmy Bosch pod kódovým označením EHR 2 ( Electronic Hydraulic Control) z roku 1979. Postupom času došlo i v tejto oblasti k značnému pokroku. [1]

Súčasnú elektrohydraulickú reguláciu TBZ môže doťažovať každé z kolies hnacej nápravy traktoru bez toho aby sa to negatívne prejavilo na agrotechnické požiadavky pripojeného náradia k traktoru. Činnosť regulačných systémov markantným spôsobom ovplyvňuje hodnoty doťaženia t. j. i ťahové vlastnosti stroja. Obecné by malo platiť, že čím vyšší výkon motoru, tým viac by mal byť bráný ohľad na jednotlivé regulačné systémy. Je to dané najmä faktom, že každý stratený kilowatt má negatívny dopad na finančné hľadisko. Samotný systém EHR prináša možnosti samostatne nastaviť niektorý z regulačných systémov: [1], [6]

- polohová regulácia – udržiavanie náradia v konštantnej polohe
- silová regulácia – udržateľnosť konštantnej sily medzi traktorom a pripojeným strojom
- zmiešaná regulácia – súbežná činnosť regulácie silovej a polohovej
- regulácia na medzný prekáž – po jej prekročení dochádza k pridvihnutiu náradia
- tlaková regulácia – vo valcoch zdvihových ramien je udržiavaný nastavený tlak



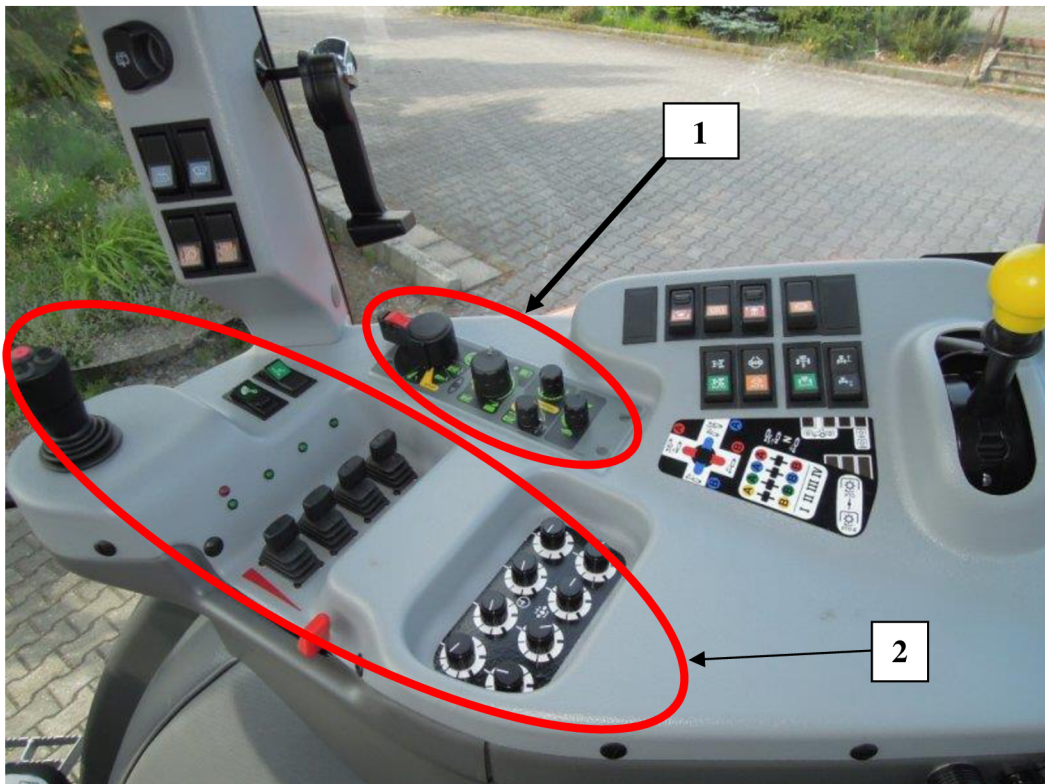
Obr. 7 Schéma elektrohydraulickej regulácie Bosch [8]

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| 1. Hydraulické čerpadlo      | 9. Snímač polohy trojbodového závesu      |
| 2. Kontrolný ventil - zadný  | 10. Ovládanie zadného trojbodového závesu |
| 3. Kontrolný ventil - predný | 11. Ovládanie predného závesu             |
| 4. Rýchlostný snímač         | 12. Elektronická riadiaca jednotka        |
| 5. Senzor otáčok kolies      | 13. Vonkajšie ovládanie závesu            |
| 6. Snímač ťahovej sily       | 14. Snímač ťahovej sily                   |
| 7. Tlakový snímač            | 15. Senzor polohy trojbodového závesu     |
| 8. Hydromotor                |   |

Podstatnou časťou elektrohydraulickej regulácie vid' obr. 7 je hlavný okruh ktorého prevádzkovou kvapalinou je olej. Čerpadlo z nej napája hl. ventily ktoré ovládajú predný/zadný záves. Snímanie polohy náradia zase zabezpečujú indukčné senzory polohy. Pri pojazde sú v činnosti i snímače otáčok kolies (teoretická rýchlosť) a rýchlostný snímač, ktorého účelom je monitorovať okamžitú rýchlosť traktoru. Z týchto veličín následne elektronická jednotka vypočíta preklz kolies. Táto informácia je následne použitá v elektrohydraulickej regulácii. Najpodstatnejšou súčasťou systému je čerpadlo hydrauliky ovládané elektromagnetickým ventilom, ktorý mimo iné ovláda aj hydromotor. Ten umožňuje trojbodový záves nastaviť do požadovanej polohy. Tento systém regulácie je nastavovaný podľa reálnych hodnôt snímaných parametrov, a je ním možno záves nastaviť až do ôsmich rôznych polôh. [1], [8], [10]

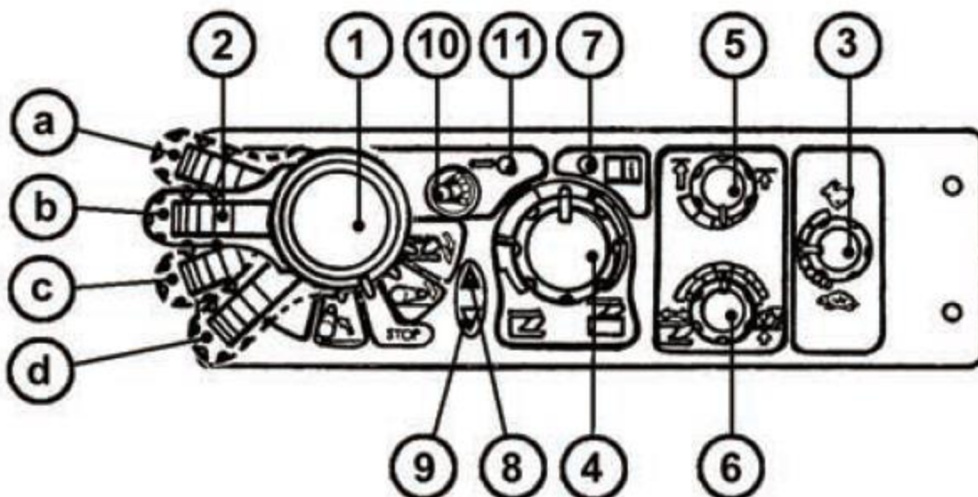
Na každý z úkonov regulačných systémov je v kabíne traktoru umiestnený ovládací panel vid' obr. 8. Obvykle býva umiestnený na pravej strane kabíny pričom ovládacie prvky možno

rozdeliť dvoch základných kategórií a to na ovládanie vnútorného okruhu hydrauliky (1) a ovládanie vonkajšieho okruhu hydrauliky (2). [11]



Obr. 8 Ovládací panel traktoru Zetor Forterra HD [12]

U každého z traktorov sa ovládanie regulačnej hydrauliky líši, avšak podstata fungovania je rovnaká.



Obr. 9 Ovládanie vnútorného okruhu regulačnej hydrauliky [11]

Obrázok č. 9 znázorňuje ovládanie elektrohydrauliky traktoru Zetor Forterra HD. Ovládač (1) slúži ako hlavná ovládacia páka – štvorpolohová s príslušnými polohami a – d. Slúži k polohovaniu náradia, pričom tlačidlo STOP náradie zafixuje v danej polohe. Tlačidlo (3)

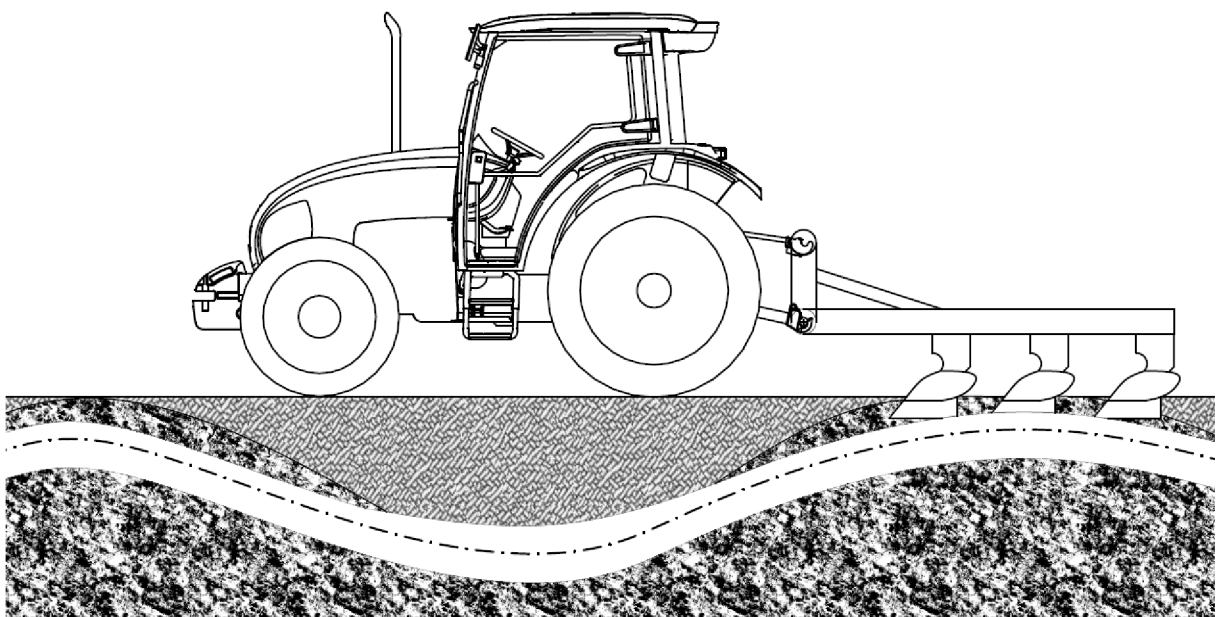


udáva rýchlosť spúšťania/ zdvíhania náradia. Ovládače (5) a (6) slúžia k voľbe regulácie systému – podľa natočenia udáva percentuálny podiel použitia silovej a polohovej regulácie (napr. 80% polohová a 20% silová). Tlačidlá 7 – 11 sú signalizačné diódy, slúžiace k indikácii zdvíhania, spúšťania resp. k upozorneniu zapnutia tlmenia kmitania.

### 1.3.1 SILOVÁ REGULÁCIA

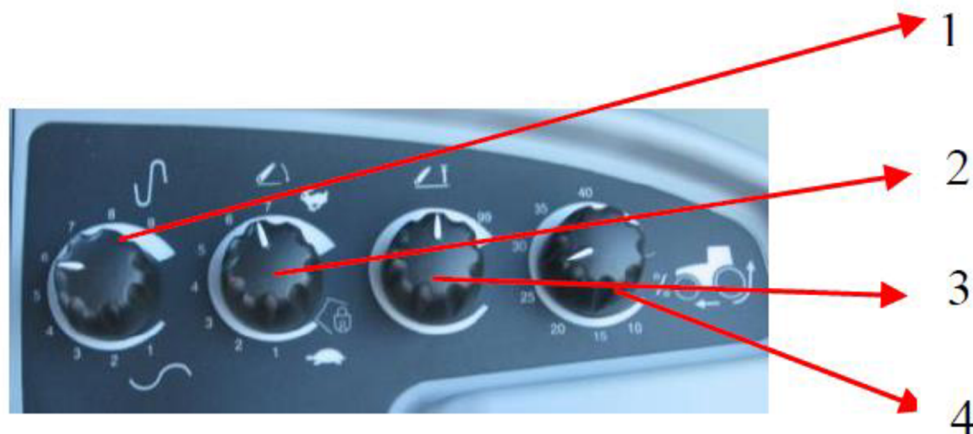
V prípade otočenia ovládača (1) do krajnej ľavej polohy proti smeru hodinových ručičiek (obr. 9) a otočením potenciometru (4) do krajnej polohy proti smeru hodinových ručičiek, nastáva chod silovej regulácie. V prípade modelovej situácie, pri ktorej je skúmaným prvkom pluh, je snaha silovej regulácie udržať odpor pluhu na konštantnej hodnote. A to i za cenu čiastočného vyhlbenia / zahĺbenia pluhu. Ak pluh narazí na pôdu vyššieho odporu, sila v dolných tiahloch sa navýši. Zmena sily snímača je prevedená na elektrickú hodnotu, následne prevedená do riadiacej jednotky rozvádzača. Ak je odpor pluhu značne navýšený, šúpatko rozvádzača sa presunie na zdvíhanie. Týmto úkonom sa začne za pomoci hydrauliky zdvíhať i samotný pluh. Proces prebieha tak dlho, až pokým v dolných tiahloch nie je hodnota sily na úrovni pôvodne nastavenej. [1], [10]

Snímače síl v dolných tiahloch TBZ, umiestnené v silomerných čapoch fungujú na princípe induktancie. K týmto čapom bývajú tiahla pripevňované. Snímanie síl vychádza zo zmeny magnetického toku v závislosti na zmenách siločiar v čape. Pulzujúce magnetické pole vytvárané primárnou cievkou je snímané cievkou sekundárnou. Napätie indukované sekundárnou cievkou sa mení v dôsledku silových účinkov v tiahloch závesu. Symetrické magnetické pole vzniká vtedy, keď je čap zaťažený konštantnou silou. V prípade, že sa sila zmení, pole začína vykazovať znaky nesymetrie. Zóna merania sa nachádza v rovine kolmej na os čapu, a vďaka minimálnym deformáciám jadra je hysterézia na nízkej úrovni – citlivosť je podstatne vyššia. [1]



Obr. 10 Princíp silovej regulácie pri práci (prevzaté a upravené z [1])

V prípade vykonávania orby so silovou reguláciou sa môže v prípade pôdy, ktorá je z hľadiska homogenity nekonzistentná stávať, že dôjde k vyhlbovaniu resp. zahlbovaniu pluhu. K zabráneniu tohto javu slúži ovládač č. 1 vid'. obr. 11, ktorým možno dodatočne nastaviť citlivosť snímačov síl.

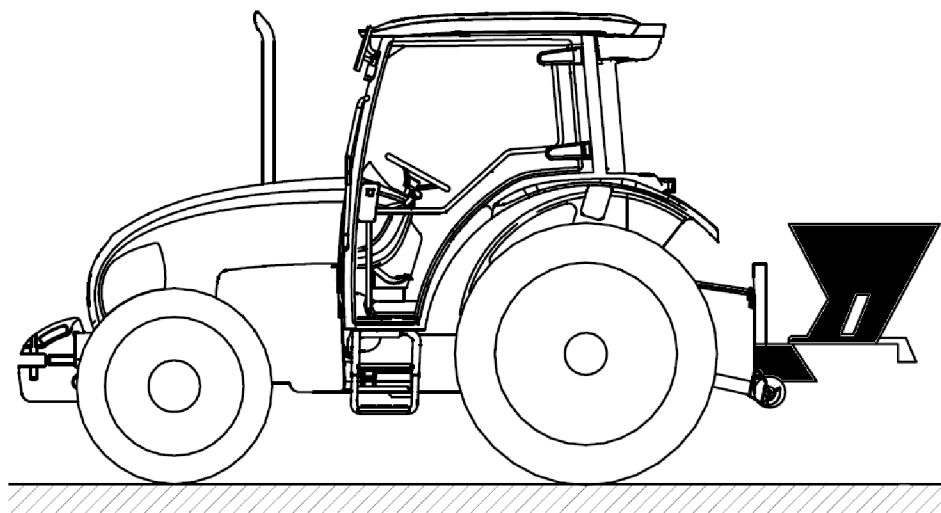


Obr. 11 Ovládacie prvky nastavenia TBZ [1]

Činnosť spomínaného systému ovplyvňuje i nerovnosť poľa. Pri vyšších pozjazdových rýchlostiach (nad 10 km/h) môže dochádzať k vertikálnemu kolísaniu súpravy a tým nedodržanie stanovenej hĺbky.

### 1.3.2 POLOHOVÁ REGULÁCIA

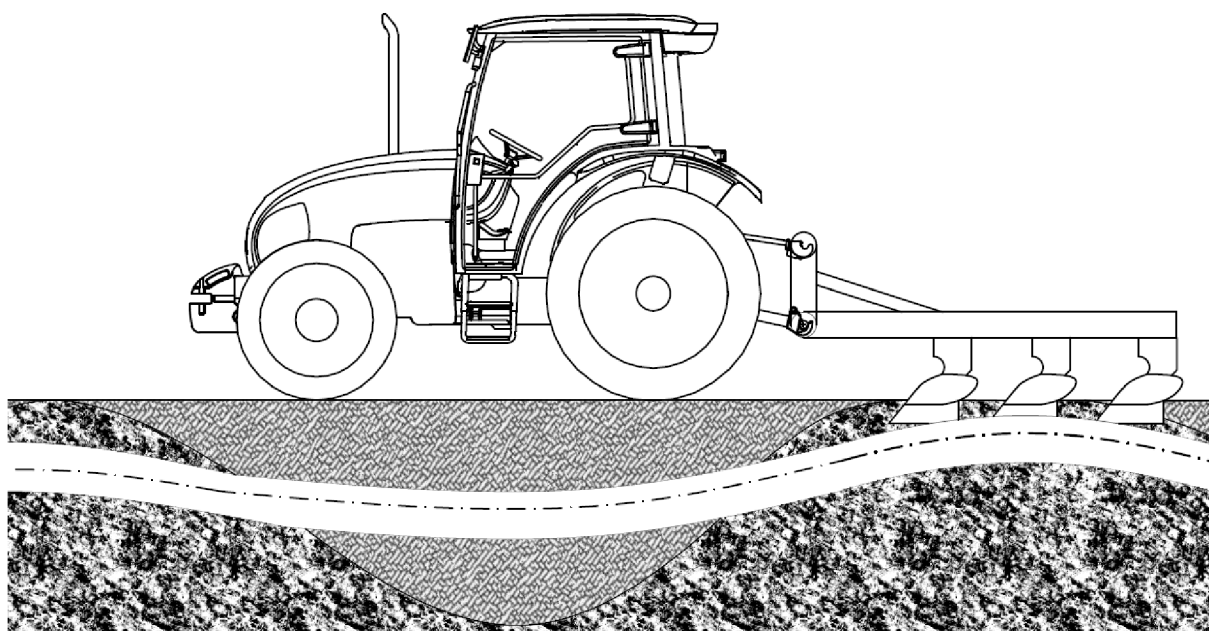
Po otočení ovládača (1) do krajnej polohy proti smeru hodinových ručičiek vid'. obr. 9 a otočením potenciometru (4) do medznej polohy po smere hodinových ručičiek nastáva činnosť polohového regulačného systému. V tejto situácii zasahuje do procesu iba snímač polohy ramien zdvíhacieho ústrojenstva. Snímač sily je vypnutý. Pri poklese ramien ústrojenstva je za pomoci hydrogenerátoru dopravené adekvátne množstvo oleja do zdvihového valca, ktorý pridvihne náradie späť do polohy definovanej obsluhou stroja.



Obr. 12 Polohová regulácia traktoru (prevzaté a upravené z [1])

### 1.3.3 ZMIEŠANÁ REGULÁCIA

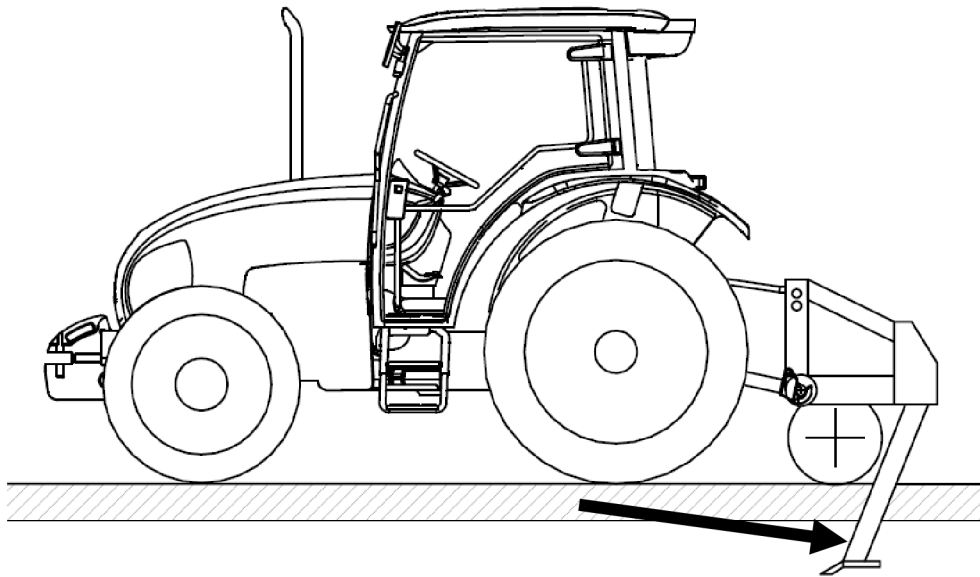
Princíp zmiešanej regulácie možno pochopiť z obrázku č. 13. V tomto prípade sú v činnosti dva systémy zároveň – regulácia silová a polohová. V prípade že sa pluh dostane do pôdy s vyšším odporom, zvýši sa sila v tiahloch a za pomoci silovej regulácie sa začne pluh vyhlbovať. V činnosti je aj regulácia polohová, ktorá túto činnosť usmerňuje. Výsledkom činnosti oboch systémov je, že sa pluh vyhlbí o menšiu hodnotu. Podobná situácia nastane v prípade, ak sa pluh dostane do pôdy z nižším odporom, kde práve naopak, nedôjde k tak veľkému zahĺbeniu pluhu. Z hľadiska nastavenia v kabíne (obr. 9), je nastavený ovládač (1) do krajnej polohy proti smeru hodinových ručičiek a otočením potenciometru (4) do ľubovoľne zvolenej polohy. Pri použití zmiešanej regulácie sa ujímajú činnosti zároveň snímače polohové i silové.



Obr. 13 Princíp zmiešanej regulácie pri práci (prevzaté a upravené z [1])

### 1.3.4 TLAKOVÁ REGULÁCIA

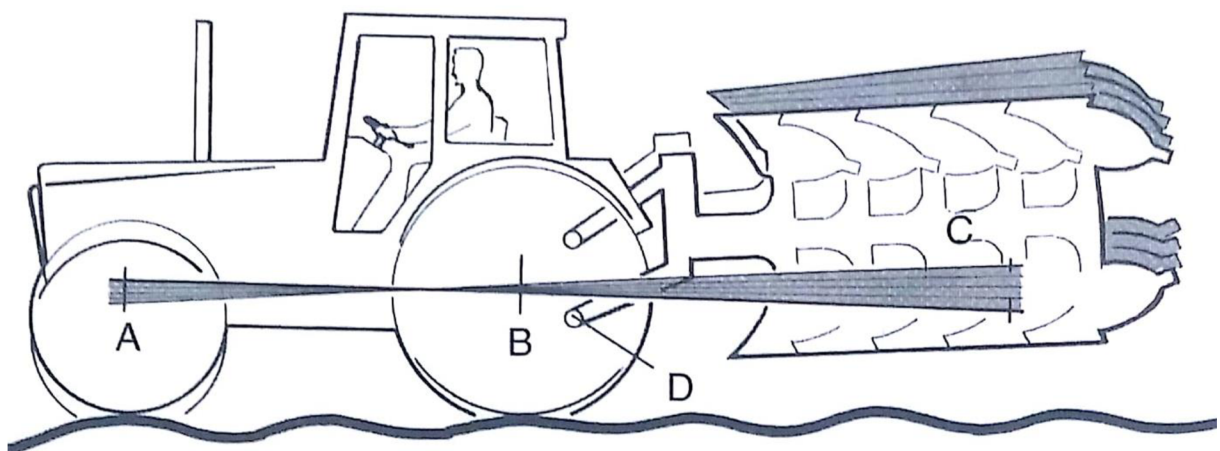
Využitie tlakovej regulácie má zmysel u strojov ktoré pri svojej práci používajú oporné kolesá. Ako príklad môže slúžiť hĺbkový kyprič (obr. 14) ktorý je pripojený k traktoru pomocou trojbodového závesu. Ten sa nachádza vo voľnej polohe. Oporné kolesá pripojeného stroja zachytávajú vertikálne sily, ktoré musia byť eliminované. Z dôvodu tohto faktu, nemôžu byť oporné kolesá využívané k doťaženiu hnacích kolies. Ťahová sila je definovaná iba ťahou traktoru, časťou tiaže stroja a stavom pôdy. Použitím tlakovej regulácie je možné časť silových účinkov preniesť na traktor, zvýšiť adhéziu, čím sa zníži preklz a zvýši sa ťahový výkon. Dochádza tu k zlepšeniu výkonnosti a úspore paliva.



Obr. 14 Tlaková regulácia traktoru (prevzaté a upravené z [1])

### 1.3.5 TLMENIE KMITOV

U traktorov s ťažkým neseným náradím môžu spôsobovať nerovnosti na vozovkách vznik nežiadúceho kmitania. Ich dôsledkom vznikajú nezanedbateľné dynamické výkyvy prednej nápravy. Tieto výkyvy spôsobujú jej odľahčovanie čo má za následok dočasnú stratu ovládateľnosti stroja. K odstráneniu týchto nežiadúcich javov slúži systém tlmenia kmitov. Jej cieľom je dodržanie ustálenej výšky pracovného náradia (vid' obr. 15). Tlmeniu kmitania slúži napr. elektrohydraulická regulácia. Po zapnutí kompenzátora kmitania, sa systém TBZ po prepnutí režimu do transportného zastaví pred hornou medznou polohou. Po uvedení traktoru do pohybu systém tlmenia podľa potreby buďto pridvihuje alebo spúšťa nesené náradie. Kmitanie zároveň vyvodzuje dynamické napätie na čapoch snímajúcich silu v TBZ. Signály z čapov sú následne vyhodnocované a za pomoci ovládacieho okruhu sa mení poloha závesu.



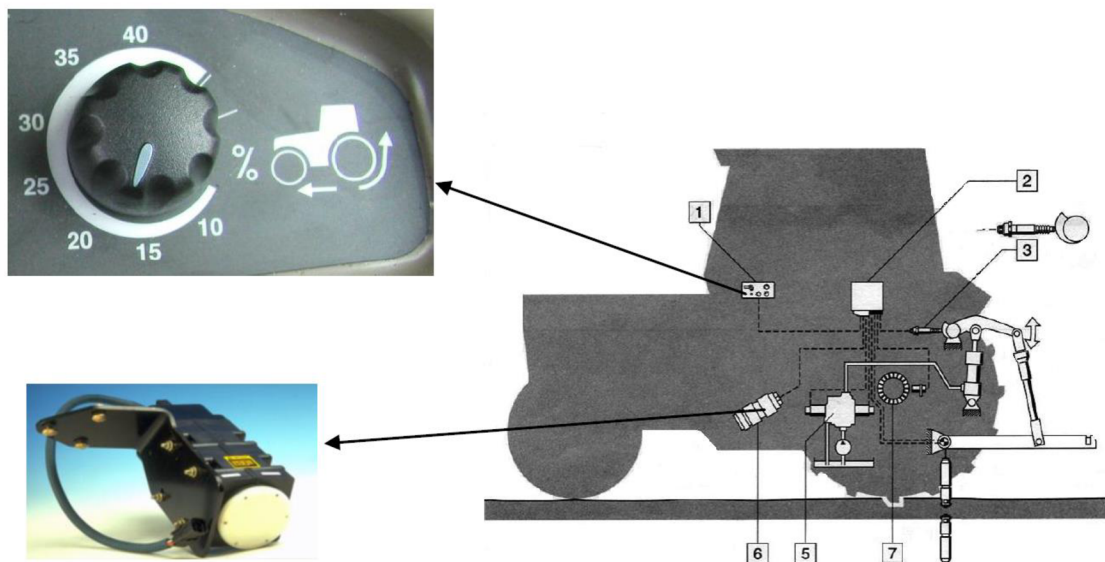
Obr. 15 Tlaková regulácia traktoru [1]

Výhody, ktoré systém tlmenia kmitov poskytuje:

- vyššia bezpečnosť jazdy
- vyššia pojazdová rýchlosť
- zvýšený komfort jazdy pre vodiča
- nižšie dynamické namáhanie traktoru
- stabilizácia absolútnej výšky náradia

### 1.3.6 REGULÁCIA NA MEDZNÝ PREKLZ

Jedným z možných negatívnych javov, objavujúcich sa pri práci na poli je zvýšený preklz hnacích kolies traktoru. Môže sa vyskytnúť v prípade, keď sa traktor dostane do mokrých miest poľa. Sila medzi traktorom a náradím sa však ani v tomto prípade nemusí meniť. Silová regulácia nebude túto skutočnosť detekovať, okamžitá rýchlosť traktoru sa bude znižovať, až do jeho zastavenia. Regulácia na medzný preklz (obr. 16) má za účel reagovať na zmenu okamžitej rýchlosti súpravy. Tá sa meria pomocou snímača skutočnej rýchlosti (6). Rýchlosť teoretická je meraná pomocou snímača vid'. pozícia (7). Ten meria otáčky hnacích kolies traktoru. Z oboch signálov je vypočítaný preklz.



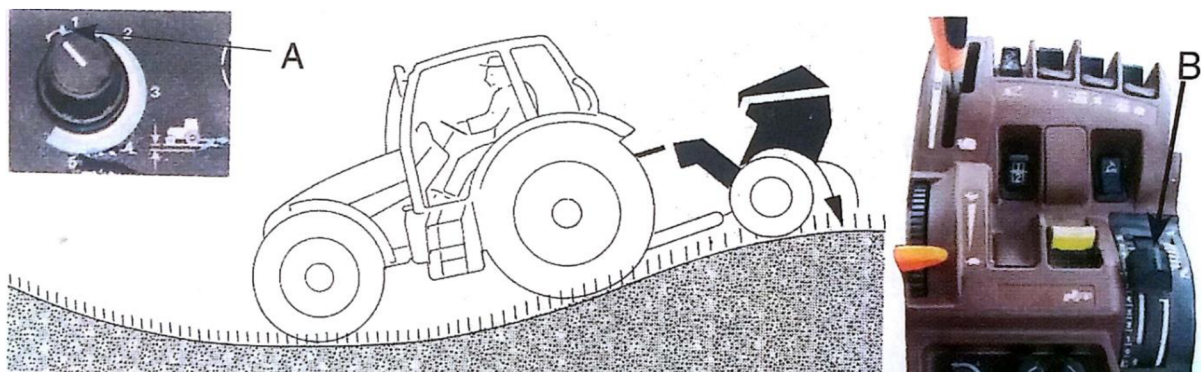
Obr. 16 Schematické zobrazenie regulácie medzného preklzu [1]

Princíp činnosti, podľa obr. 16 je nasledovný: Po nastavení medznej hodnoty na ovládacom paneli (1) a pri strate rýchlosti v dôsledku preklzu kolies, t. j. prekročení medznej hodnoty, dochádza k pridvihnutiu pluhu. Tento stav spôsobí priťaženie na hnacích kolesách, čo má za následok zníženie preklzu. Tento systém je regulovaný tým, že je prenášaná časť tiaže pripojeného stroja na traktor. Jednou z jeho výhod o. i . je, že je možné ho kombinovať s ostatnými systémami regulácie ako napr. so silovým a zmiešaným.

### 1.3.7 NEUTRÁLNA POLOHA

Vo voľnej polohe je trojbodový záves v celom rozsahu voľný a kolesá pripojeného náradia kopírujú terén. Ovládač A na obr. 17 je v ľavej krajnej polohe a pákou B je ovládaná poloha ramien zdvihového ústrojenstva. Aby bol voľný pohyb zaistený v celej škále zdvíhu, musí byť

páka B ovládajúca polohu ramien v krajnej polohe, čo znamená úplné spustenie náradia. V tomto prípade je vertikálny pohyb ramien voľný v celom rozsahu.



Obr. 17 Ovládanie neutrálnej polohy traktoru [1]

#### 1.4 ZÁSADY ZOSTAVOVANIA OREBNÝCH SÚPRAV

Prvou zo zásad pri tvorbe zostáv orebných súprav je, že celkový odpor pluhu bude konsolidovať s ťahovými schopnosťami traktoru, aby pracoval s maximálnou účinnosťou v ťahu. Je dôležité aby taktiež dodržiaval odporúčané rozmedzie orebnej rýchlosti. Pluh zároveň nesmie na traktor vyvodzovať sily v priečnom smere.

Traktor nemôže vybočovať z brázdy resp. byť udržiavaný v priamom smere pootáčaním kolies. Pri pluhoch u ktorých je možné meniť v priebehu orby záber, sa hydraulickým valcom nastavuje i ťahová línia. Ťahový odpor musí prechádzať stredom zadnej nápravy.

V prípade že nesené pluhy nemajú špeciálnu konštrukciu k nastaveniu ťahovej línie, musia byť voľné v priečnom smere. Dolné tiahla by sa počas orby taktiež nemali opierať o telo traktoru.

## 2 CIELE PRÁCE

Pri vykonávaní úkonov spojených s poľnohospodárskou činnosťou, akou je i orba, nemožno dospieť k názoru, že traktor je silovo zaťažovaný iba ťahovou silou, rovnobežnou so smerom jazdy. V skutočnosti sa jedná o sústavu síl pôsobiacich v priestore, o premennej veľkosti. Tieto sily, sú vyvolané interakciou medzi pôdou a pripojeným náradím. Prenosom prostredníctvom trojbodového závesu zároveň spôsobujú premenlivosť zaťaženia jednotlivých traktorových kolies. Týmto javom dochádza ku skutočnosti nevyužitia potenciálu spaľovacieho motoru, t. j. nemožnosti efektívneho využitia krútiaceho momentu na kolesá.

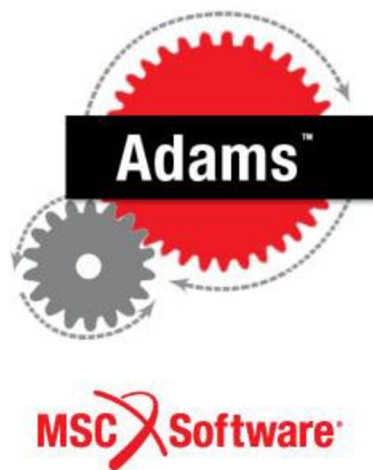
Jedným z cieľov diplomovej práce bolo podrobnejšie analyzovať silové účinky v tiahlach trojbodového závesu, resp. pod kolesami hnacej a hnanej nápravy v závislosti na druhu pôdy. Ďalším z vytýčených bodov bola identifikácia silových účinkov vo vybraných častiach závesu, t. j. určenie namáhania na ťah a tlak. Medzi posledné z rozoberaných problémov bola analýza uchytenia horného tiahla závesu do viacerých polôh stojanu pluhu. Skúmanou premennou bola v tomto prípade vyvolaná hnacia sila pod kolesami traktoru.

K analýze silových účinkov bol zostavený virtuálny model traktoru vrátane trojbodového závesu a pluhu v programe MSC.ADAMS. Vytvoreným modelom bude možné detekovať zmeny namáhania v zmysle ťah-tlak a vytvoriť ucelenejšiu predstavu o náraste resp. klesaní veľkosti silových reakcií vzhľadom k druhu pôdy.

### 3 VIRTUÁLNY MODEL

Hlavným z určených cieľov bolo vytvoriť virtuálny model pre stanovenie silových reakcií v tiahlach a pod kolesami traktoru. K tomuto účelu bol zvolený už vyššie spomínaný program MSC.ADAMS. Jedná sa o multi-body softvér vo vysokej miere používaný k tvorbe, analýze, resp. k optimalizovaniu mechanických sústav. Tie môžu byť tvorené tuhými, i poddajnými telesami, ktoré sú medzi sebou viazané kinematickými väzbami. Program je schopný vykonávať analýzy statické, kinematické a dynamické. V súčasnosti je využívaný u výrobcov napr. v automobilovom alebo leteckom priemysle k tvorbe a optimalizácii virtuálnych modelov.

K určitým špecifickým požiadavkám pri tvorbe modelov obsahuje softvér škálu nadstavbových modulov. Jedným z nich je modul ADAMS/View, použitý pre účely analýzy silových účinkov v trojbodovom zavesení i reakcií pod jednotlivými kolesami traktoru.



Obr. 18 MSC ADAMS logo [13]

#### 3.1 TVORBA MODELOV - ADAMS/VIEW

Medzi najvýznamnejšie z výhod použitia multi-body softvérov je ten, že z hľadiska tvorby geometrie modelu nie je nutná jej detailná znalosť. Pri vytváraní modelu stačí poznať tie, ktoré plnia úlohu kontaktu medzi viacerými súčasťami, resp. body dôležité z hľadiska aplikovania kinematických väzieb. V porovnaní s matematickým modelovaním (pomocou pohybových rovníc) je multi-body model tvorený jednoduchými geometrickými telesami, ktoré obsahujú príslušné vlastnosti akými sú napr. : určenie polohy, stanovenie hmotnosti telies, silových a momentových pôsobení, väzieb, atď. [14]

Niektoré zo základných pojmov užívaných v prostredí ADAMS/View, nutných k pochopeniu procesu vytvárania modelu traktoru a trojbodového zavesenia sú : [14]

- Model – mechanický systém pozostávajúci z telies, markerov, väzieb.
- Marker – definuje lokálny súradnicový systém telesa, je možné ho ľubovoľne umiestňovať a naráčať. Určuje stredy hmotností telies, pôsobiacich síl atď.
- Teleso (part) – pohyblivé objekty so zotrvačnými vlastnosťami, v prípade multi-body systémov sú tuhé, pružné alebo sú definované ako sústredené hmoty (majú hmotnosť bez momentov zotrvačnosti)



- Väzby, kĺby – určujú možnosť pohybu telesa voči okoliu resp. iným telesám (väzby translačné, rotačné sférické...)
- Predpísaný pohyb – ľubovoľným telesám možno predpísať pohyb v závislosti na čase
- Merače (measures) – výstup z riešiča; veličiny ako rýchlosť, zrýchlenie alebo silové reakcie

## 3.2 TVORBA MODELU TRAKTORU

Vytvorený virtuálny model traktoru pozostáva z viacerých podkategórií, pričom každá z nich reprezentuje určitý celok sústavy. Každý z podsystémov má svoj lokálny súradnicový systém, voči ktorému boli zadávané jednotlivé referenčné body. Sú to súradnicové systémy nasledovné:

- Body – telo traktoru, bez prednej nápravy
- Náprava – predná náprava traktoru
- Záves – trojbodový záves traktoru
- Pluh – náradie pripojené k trojbodovému závesu

Tieto body boli zvolené ako body definované v priestore. Pre lepšiu názornosť a priestorovú predstavivosť boli spojené jednoduchými geometrickými prvkami. Celkový model bol uvažovaný ako nehmotný, t. j. napríklad pod kolesami traktoru sú výsledné silové reakcie vyvolané iba silami pôsobiacimi na pluh.

### 3.2.1 TELO A PREDNÁ NÁPRAVA

Jednou z dôležitých vecí, na ktorú bolo treba pri tvorbe výpočtového modelu brať na zreteľ, bolo zadefinovanie počiatočného bodu, od ktorého budú zadávané významné traktorové body (body referenčné). Prostredie ADAMS/View udáva ako počiatok svojho globálneho súradnicového systému, voči ktorému sú vzťahované súradnicové systémy lokálne (akým je i systém Body) v mieste znázornenia pôsobenia tiažovej sily. Na rovnakej pozícii bol umiestnený i počiatok súradnicového systému Body.

Zadávaníu bodov v programe však predchádzal experimentálny proces získavania jednotlivých bodov. Bolo nutné obstaráť jednotlivé rozmery traktoru, ktorými sú rázvor prednej a zadnej nápravy, rozchod oboch náprav. K určení styku kolesa s podložíom bolo dôležité získať vonkajší priemer pneumatiky. U zadnej nápravy sú to body CTRL a CTRR. Súradnica ťažiska (T) bola určená vážením traktoru pomocou prenosných váh. Vážením v rovine boli získané súradnice v osách x a y. Pre určenie zložky v zvislom smere (os z) bol traktor umiestnený na naklonenú rovinu pod známym uhlom, pričom bola zameraná záťaž pripadajúca zadnej náprave. Pre potreby virtuálneho modelu nebola súradnica ťažiska podstatná, avšak pri potenciálnom využití modelu v budúcnosti bude možné aplikovať i tiaž traktoru. Miestom kontaktu tela traktoru a prednej nápravy sa nazýva aj ako bod kyvu nápravy (CF). Totožným spôsobom ako u zadnej nápravy, bolo určené miesto styku kolesa s podložkou pre prednú nápravu (CTFL a CTFR).

Tab. 1 Súradnice traktorových bodov pre s. systém Body

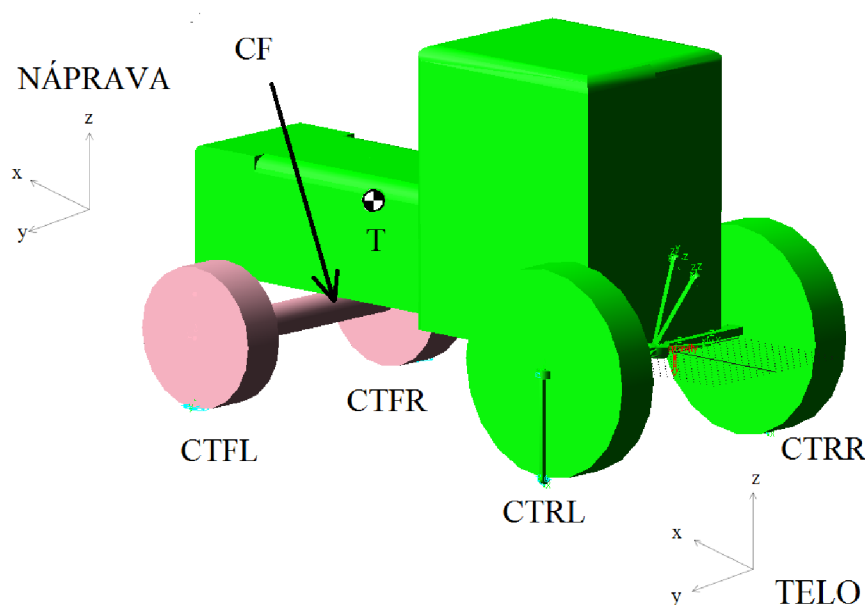
Bod	X [mm]	Y [mm]	Z[mm]
CF	2798	0	48
CTRL	150	900	-590
CTRR	150	-900	-590
T	1506,33	17,27	368,22
Stred – pravé zadné	150	-900	0
Stred – ľavé zadné	150	900	0
Stred zadnej nápravy	150	0	0

Poloha lokálneho súradnicového systému Náprava bola zvolená v mieste kyvu prednej nápravy traktoru. Od tohto bodu boli opäť zadané priestorové body, ktoré tento podsystém reprezentujú.

Tab. 2 Súradnice traktorových bodov pre s. systém Náprava

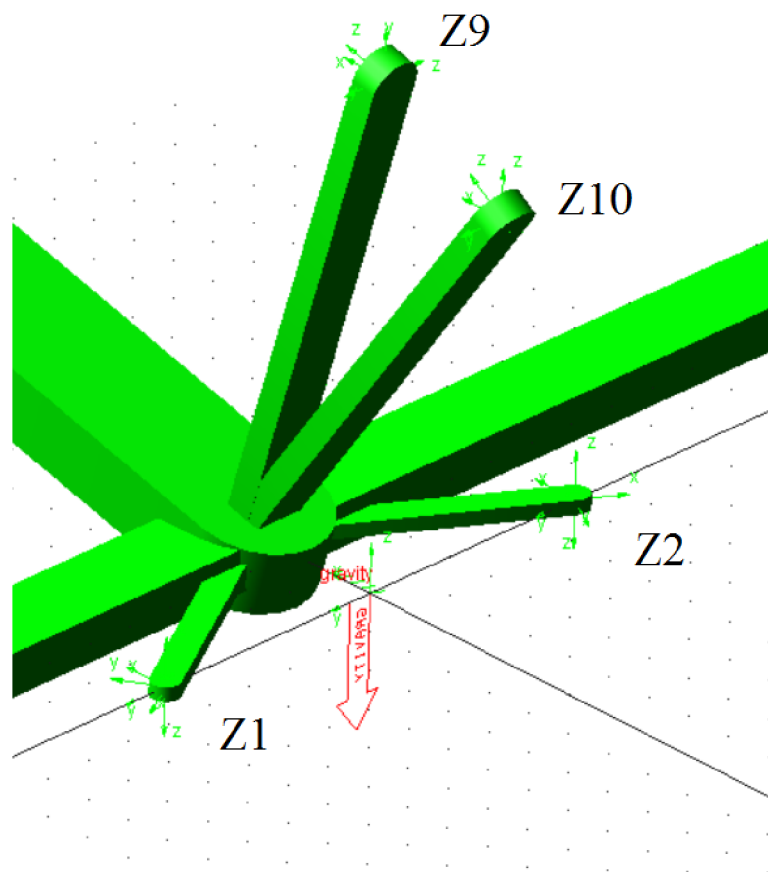
Bod	X [mm]	Y [mm]	Z[mm]
CTFL	0	880	-638
CTFR	0	-880	-638
Stred – pravé predné	0	-880	0
Stred – ľavé predné	0	880	0

Takto definovaný podsystém, spájaný geometrickými prvkami, ktorý reprezentuje časť celkového modelu spĺňa isté predpoklady ktorými sú: u tuhých telies sa predpokladá absolútna tuhosť a sú nehmotné. Kinematické väzby použité pri ich spájaní nevykazujú známky pasívnych odporov.



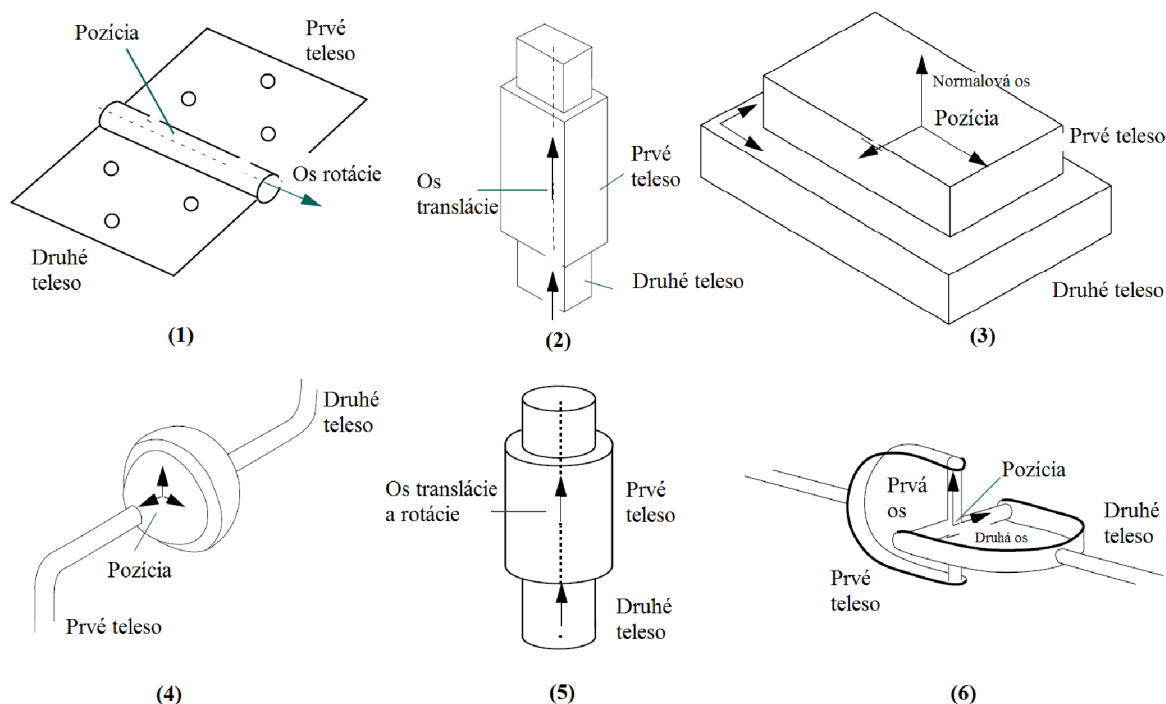
Obr. 19 Čiastočný model reprezentujúci telo traktoru a prednú nápravu

Na obrázku č. 20 je možné bližšie vidieť miesta uchytenia jednotlivých častí trojbodového závesu k traktoru. I keď jednotlivé referenčné body (Z1, Z2, Z9, Z10) nepatria k lokálnemu súradnicovému systému Body, je tu možné názorne ukázať, k čomu patria jednotlivé časti ako uchytenie horného tiahla, dolných tiahiel, a mechanizmu zdvihového ústrojenstva.



Obr. 20 Detail uchytenia závesu k traktoru

Popri ďalšom postupe boli aplikované kinematické väzby, buďto medzi nápravou a telom traktoru, resp. medzi telesom a podložkou. Pri prednej náprave uvažujeme iba o rotácii vzhľadom k vodorovnej zložke (osi x) t. j. modelová situácia popisuje traktor v myslenom pohybe priamym smerom. Kinematické väzby pod kolesami slúžia v ďalšom smerovaní diplomovej práce k určeniu zvislých reakcií pod každým z kolies a zároveň k uchyteniu modelu voči podložiu. Ako už bolo spomenuté, pri reálnom meraní pri vykonávaní orby nie je možné tieto zložky zmerať napr. tenzometrami. Poslednou z väzieb pôsobiacou medzi dvojicou Body-okolie je väzba translačná, umiestnená v mieste stredu zadného kolesa, zachytávajúca zložky síl pôsobiacich v smere osi y.



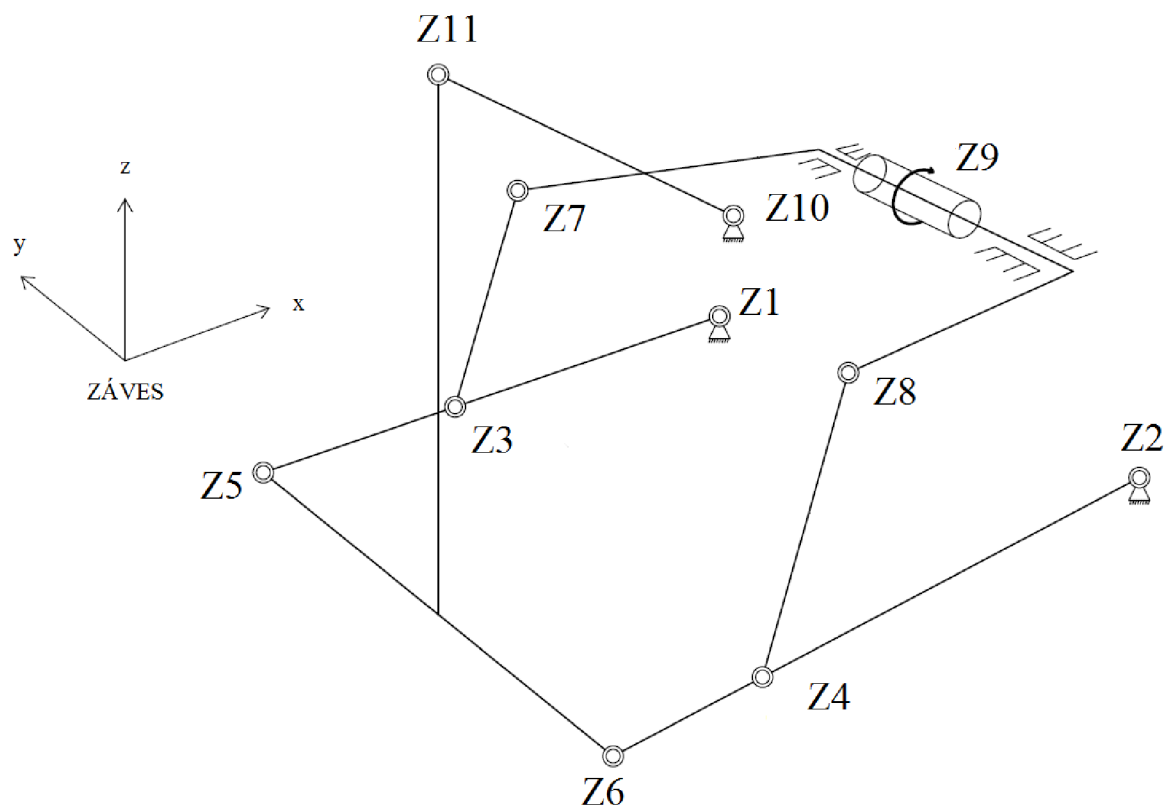
Obr. 21 Škála použitých väzieb výpočtového modelu: 1. rotačná, 2. translačná, 3. rovinná, 4. sférická, 5. cylindrická, 6. univerzálna [16]

Tab. 3 Kinematické väzby tela traktoru a prednej nápravy

Umiestnenie väzby	Typ väzby	Počet stupňov voľnosti
Bod kyvu prednej nápravy	Rotačná	1
Pravý + ľavý dotyk kolies zadnej nápravy a podložky	Sférická	3
Pravý + ľavý dotyk kolies prednej nápravy a podložky	Rovinná	3
Stred zadného kola + okolie	Translačná	1

### 3.2.2 TROJBODOVÝ ZÁVES

Geometria trojbodového závesu, rovnako ako predchádzajúce vstupy, vychádzala z empiricky získaných veličín. Pripojenie závesu k telu traktoru musí dodržiavať polohu umiestnenia u skutočného traktoru. Rozostavenie a polohovanie pripojených ťahiel má taktiež vplyv na proces orby. Z dôvodu pokusu o dosiahnutie reprezentatívnych výsledkov bolo nutné brať v ohľad i túto skutočnosť. Z obrázku č. 22 je zrejmé, že pripojenie pluhu bolo definované vzdialenosťou medzi bodmi Z5 a Z6 a zároveň uchytenie horného ťahla v bode Z11 reprezentuje zvolené pripojenie do stojanu pluhu.



Obr. 22 Schéma závesu vrátane významných bodov

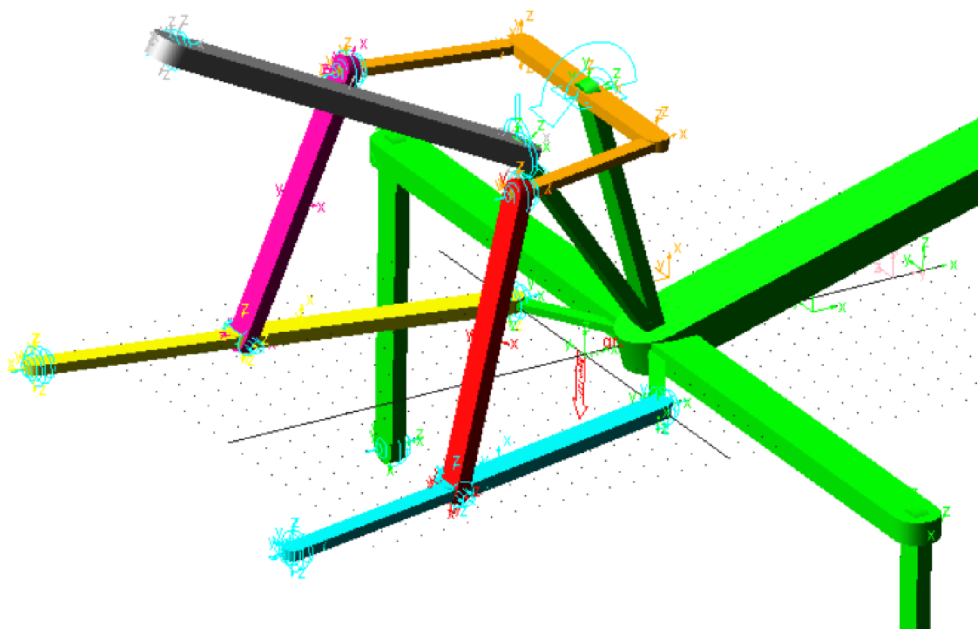
V prípade tvorby podsystemu trojbodového závesu bol zvolený ako východiskový bod v súradnicovom systéme Záves stred vzdialenosti medzi bodmi Z5 a Z6. Od nej sa odvíjajú súradnice všetkých bodov. Rozmery jednotlivých častí podliehajú norme, preto i ich dĺžka reprezentuje skutočné hodnoty.

Tab. 4 Súradnice traktorových bodov pre s. systém Záves

Bod	X [mm]	Y [mm]	Z[mm]
Z1	886	255	0
Z2	886	-255	0
Z3	390	365	0
Z4	390	-365	0
Z5	0	445	0
Z6	0	-445	0
Z7	-330	297	0
Z8	-330	-297	0
Z9	886	0	520
Z10	736	0	440
Z11	0	0	715

V každom z bodov (Z1 – Z11) bolo uvažované umiestnenie kinematickej väzby podľa skutočne vykonávaného pohybu tiahla. Je dôležité aby virtuálny model po aplikácii silového zaťaženia vykonával pohyb rešpektujúci skutočný stav. Verifikácia bola uskutočnená pridaním rotačného

pohybu v mieste uloženia (viď obr. 23). Tento prvok zostal v modeli naďalej obsiahnutý z dôvodu nutnosti udržania závesu v definovanej polohe. Nastavením nulovej hodnoty otáčania v čase bol zamedzený nežiadúci stav poklesu závesu.



Obr. 23 Znáznornenie závesu v MSC.ADAMS

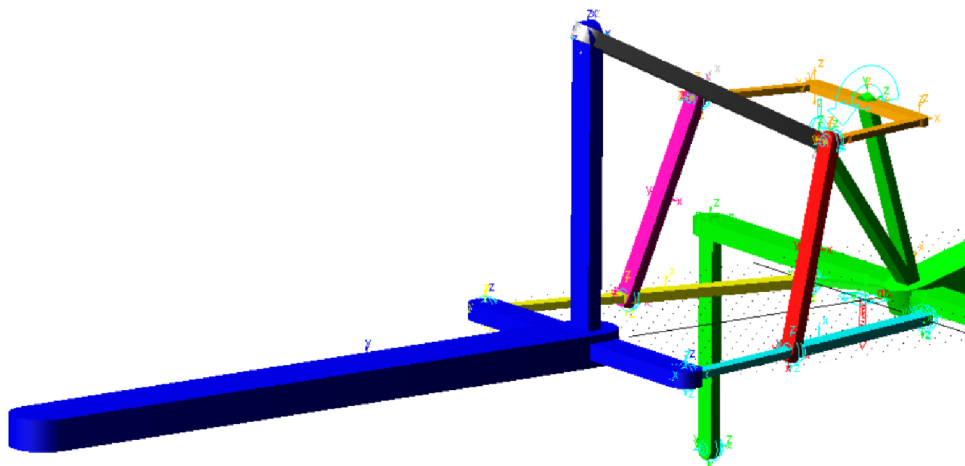
Zelená farba modelu predstavuje skelet tela traktoru, pričom žltou a modrou sú znázornené dolné tiahla traktoru. Oranžovo znázornené ramená zdvihového ústrojenstva, sú sférickými väzbami spojené k fialovému a červenému zdvihovému tiahlu. Posledným z prvkov závesu je šedou farbou znázornené horné tiahlo. Opäť, ako v prípade modelovania ostatných podsystémov i tento je spájaný geometriou jednoduchých prvkov.

Tab. 5 Kinematické väzby tela traktoru a prednej nápravy

Umiestnenie väzby	Typ väzby	Počet stupňov voľnosti
Z1	Sférická	3
Z2	Sférická	3
Z3	Cylindrická	2
Z4	Cylindrická	2
Z5	Sférická	3
Z6	Sférická	3
Z7	Sférická	3
Z8	Sférická	3
Z9	Rotačná	1
Z10	Univerzálna	2
Z11	Sférická	3

### 3.2.3 PLUH

Z hľadiska začlenenia pluhu do zostavy virtuálneho modelu nie je nutné definovať množstvo bodov z dôvodu možnosti pripojenia všetkých troch uchycovaných bodov už do predpripravených miest trojbodového závesu. Jediným významným miestom na pluhu je miesto pôsobenia tiaže pluhu. Keďže je tento model symetrický vzhľadom k osi y, nie je treba aplikovať vyosenie bodu. Dôvod tohto výrazného zjednodušenia bol aplikovaný k overeniu predpokladov popísaných v nasledujúcich podkapitolách. V ďalších častiach diplomovej práce budú skúmané modely s odpovedajúcimi reálnymi parametrami pluhov.

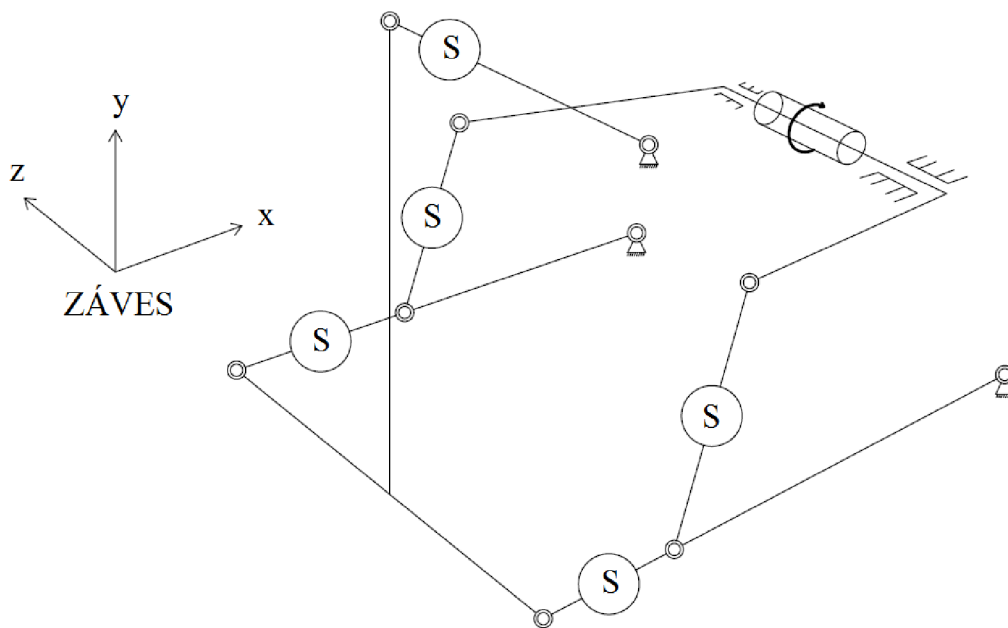


Obr. 24 Znáznornenie zjednodušeného virtuálneho modelu pluhu

### 3.3 SNÍMANIE SÍL V TROJBODOVOM ZÁVESE

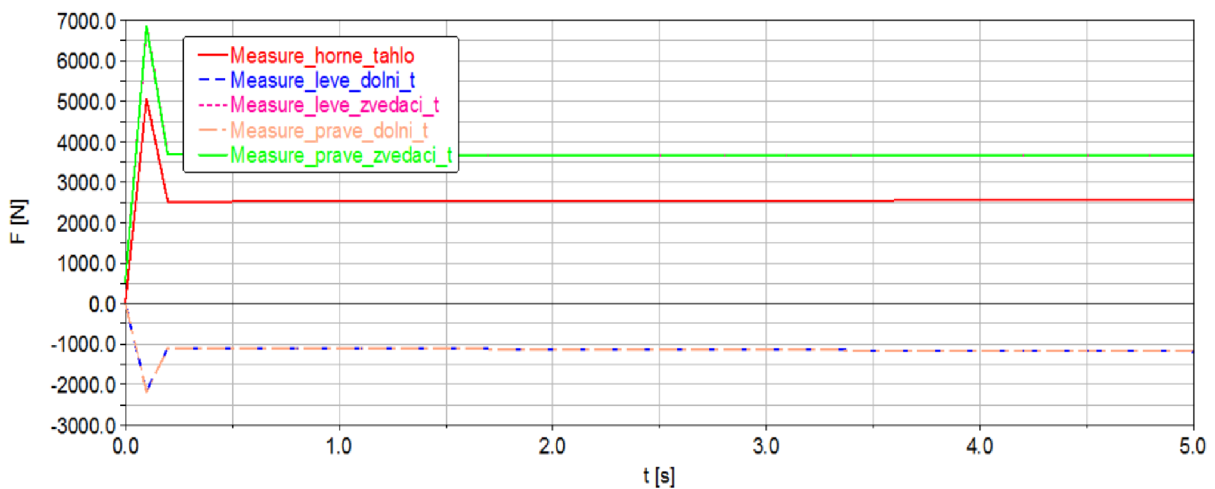
Pri meraní síl počas orbe na poli sú veľmi často využívané tenzometry umiestnené v dolných, zdvíhacích a v hornom tiahle závesu. Obdobné meranie je možné použiť i vo virtuálnom modeli, kde k príslušným tiahlam umiestnime tzv. merače. Táto funkcia ADAMS/View nám umožňuje snímať silové reakcie v určitých miestach. V porovnaní so skutočným meraním sa nejedná priamo o snímanie v telese tiahla. Snímanie síl sa uskutočňovalo v kinematických väzbách medzi dvojicami horné/dolné tiahlo + pluh a zároveň v zdvíhacích tiahlach.

Pri meraní silových účinkov v tiahlach bola ako smerodajná hodnota stanovená sila v osi jednotlivých častí. Preto bolo dôležité zdefinovať vzťažný marker, ktorého jedna zo súradníc smerovala práve v smere osi súčasti. K získaniu výslednej sily pôsobiacej vo väzbe si bolo treba mimo iné uvedomiť poradie markerov zadávaných do výpočtov merača. Tento fakt bolo dôležité naplniť z dôvodu určenia ťahu-tlaku v tiahlach.



Obr. 25 Schematické znázornenie miest s aplikovanými meračmi skutočného traktoru

Pre overenie správneho zadenovovania meračov bol na vyššie spomínané ramená zdvihového ústrojenstva aplikovaný pohyb simulujúci zdvih ramien a pripojeného pluhu. Za predpokladu idealizácie v zmysle vynechania pôsobiacich síl mimo vlastnej tiaže náradia boli namerané sily vid' obr. 26.



Obr. 26 Výsledné silové účinky v Adams/Postprocessor

Z dôvodu symetrie vykazujú silové účinky v pravom a ľavom zdvíhacom tiahle a zároveň v ľavom a pravom dolnom tiahle rovnakú hodnotu. Po aplikovaní reálnych parametrov pluhu i s odpovedajúcim silovým zaťažením budú tieto hodnoty vykazovať nezhodné výsledky, avšak tento postup bol zvolený k overeniu správnosti smerovania riešenia.

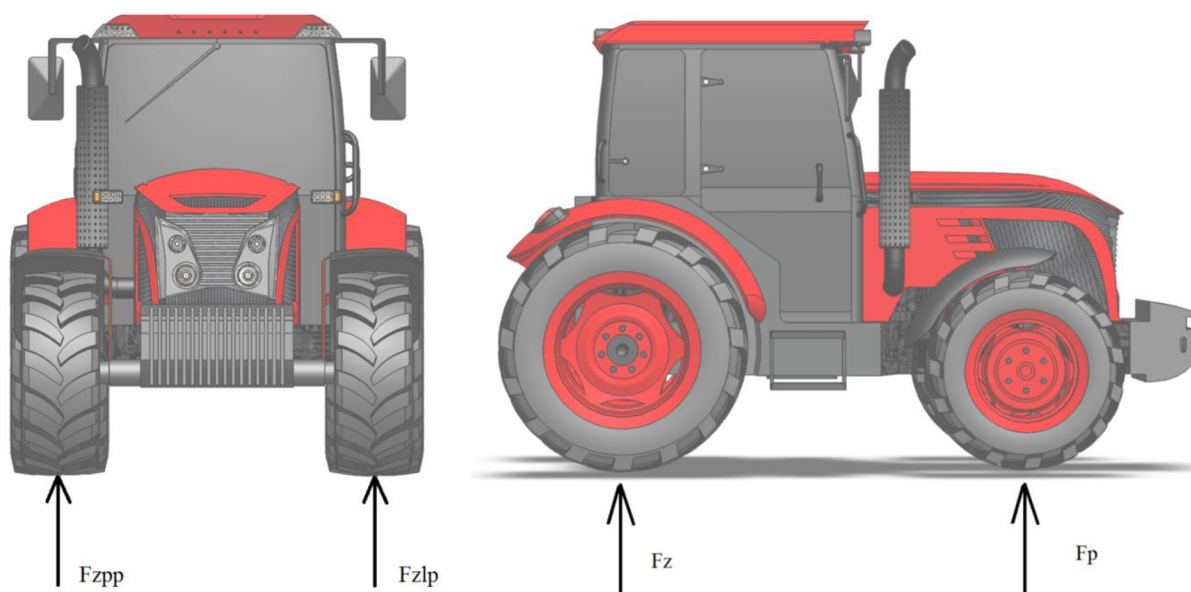


Tab. 6 Identifikácia namáhania tiahiel modelu závesu na ťah-tlak

Tiahlo	Ťah (+) / Tlak (-)
Horné	+
Ľavé dolné	-
Pravé dolné	-
Ľavé zdvíhacie	+
Pravé zdvíhacie	+

### 3.4 SNÍMANIE SÍL POD KOLESAMI TRAKTORU

Vyvedené silové účinky pod kolesami traktoru nie je možné získať komerčne dostupnými snímačmi. Toto silové pôsobenie pod každým z kolies možno rozdeliť v smere x, y a z. Suma všetkých síl smerujúcich v osi x (v smere pohybu traktoru) je nazývaná aj ako ťahová sila traktoru. Pre potreby diplomovej práce sú však dôležitejšie silové reakcie medzi podložím a kolesom v smere kolmom na podložie (v smere osi z). Obdobne ako u trojbodového závesu boli analogicky zavedené merače pod všetkými kolesami. Z výsledkov priebehov týchto silových pôsobení možno určiť ako veľmi je každá z náprav doťažovaná resp. odľahčovaná. V prípade simulovania orby s pluhom oplývajúcimi reálnymi parametrami sa budú navzájom líšiť i hodnoty doťažovania (odľahčovania) každého z kolies nápravy.



Obr. 27 Znáozornenie zvislých síl pôsobiacich pod kolesami traktoru

### 3.5 APLIKÁCIA SILOVÝCH ÚČINKOV NA PLUH

Sústavu síl vyvedenú pri orbe možno opäť rozdeliť do zložiek odpovedajúcich každej z osí súradnicového systému. Sila v zápornom smere osi x je nazývaná i ako sila orebného odporu –  $F_p$ . Sila vyvedená v zápornom smere osi z predstavuje tiaž pluhu –  $F_{tp}$ . Sila v smere osi y bude nazývaná ako sila bočná –  $F_b$ . Každá zo síl je do virtuálneho modelu zakomponovaná ako sila vonkajšia, aplikovaná na pluh v príslušných smeroch.

Keďže pri simulácii s predpokladanými výsledkami, ktoré majú aspoň čiastočne reprezentovať reálne podmienky, nie je vhodné uvažovať ako pripojené náradie – pluh – osovo symetrický. Zvolený pluh – viacradličný a zároveň reprezentujúci orbu vpravo má zákonite posunutý bod ťažiska v priečnom smere. Nositeľka tiažovej sily slúži ako východzia priamka na ktorej môžeme umiestniť druhú zo síl. Podľa [15] platí, že ak sa orebné teleso nachádza v zvolenej hĺbke  $h$ , je možné umiestniť silu orebného odporu do  $1/3$  danej hĺbky  $h$ . Veľkosť tiažovej sily pluhu je možné dohľadať v informačných zdrojoch udávaných výrobcom, avšak sila vyvozená odporom pôdy je špecifická, ovplyvniteľná mnohými faktormi.

Medzi jeden z najvýznamnejších faktorov ovplyvňujúci výslednú odporovú silu je pôdny druh. Jeho mechanické zloženie ovplyvňuje uskutočniteľnosť jej spracovania. Podľa obsahu ílových častíc v pôde sa podľa normy ČSN 46 5302 delia pôdy na: [1]

Tab. 7 Druhy pôd s mernými odpormi – podľa ČSN 46 5302 [1]

Označenie pôdy	Druh pôdy	Obsah zrn <0,01 mm [%]	Merný odpor pôdy – $k_o$ [kN.m <sup>-2</sup> ]
Veľmi ťažká	ílovitá	60-75	90-150
Ťažká	ílovito-hlinitá	40-60	60-90
Stredná	hlinitá	20-45	40-60
Lahká / veľmi ľahká	hlinito-piesčitá/piesčitá	0-20	20-40

Silu  $F_p$  potrebnú k tiahnutiu pluhu vyjadruje rovnica: [15]

$$F_p = F_1 + F_2 + F_3 \quad [N] \quad (1)$$

Pričom:  $F_1$  – odpor pluhu vlečeného vo vyoranej brázde [N]

$F_2$  – odpor pluhu vynaložený na odrezávanie a deformáciu skyvy [N]

$F_3$  – odpor pluhu na uvedenie skyvy do pohybu a jej preklápanie [N]

Pre účely diplomovej práce bude používaný zjednodušený tvar rovnice, ktorý je používaný i pre potreby praxe. [15]

$$F_p = k_o * h * b * n \quad [N] \quad (2)$$

Kde:

$k_o$  – merný odpor pôdy [N.m<sup>-2</sup>]

$h$  – hĺbka orby [m]

$b$  – šírka brázdy, záber orebného telesa [m]

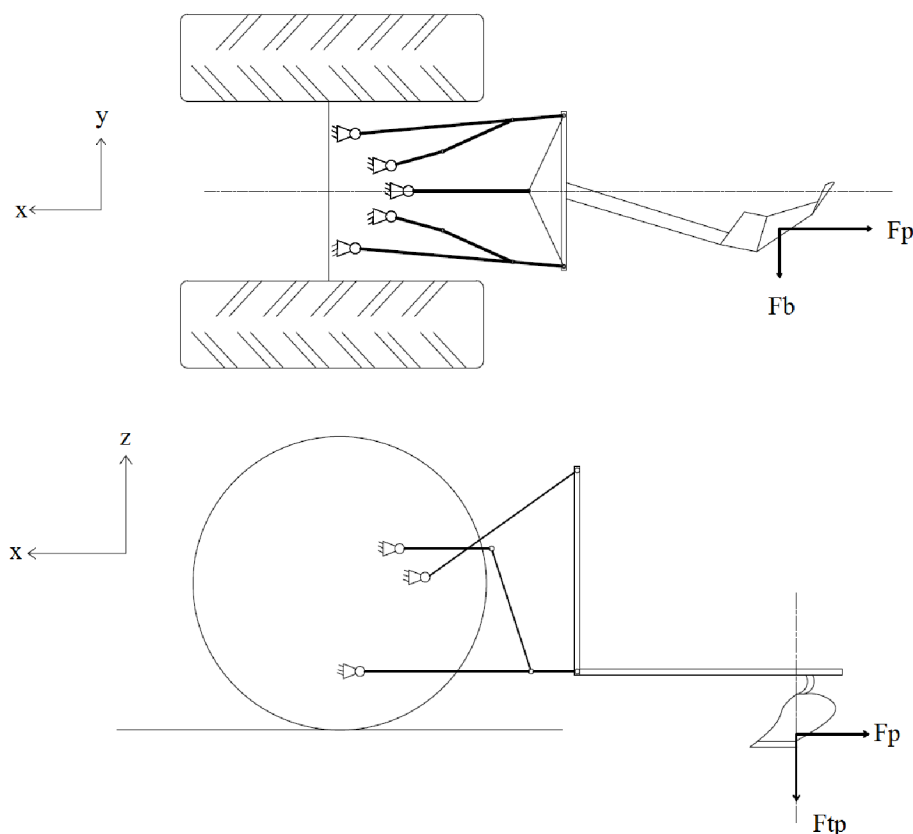
$n$  – počet orebných telies [-]

Pri obhospodarovaní pôdy radličným pluhom, vystupujúcim v ďalších z kapitol práce, je možné ustanoviť rozpätie hĺbok spracovania ornice na: [1]

Tab. 8 Hĺbka spracovania ornice radličným pluhom

Typ orby	Hĺbka spracovania [cm]
Podmietka	5 – 12
Plytká	10 – 18
Stredná	18 – 25
Hlboká	25 – 30

Pre účely simulácie (viď. obr. 28) bola zvolená ako východzia hraničná hodnota strednej hĺbky spracovania – 25 cm. V prostredí ADAMS/View bolo silové pôsobenie zakomponované ako sila vyjadrená tromi zložkami – prislúchajúce telesu Pluh s nastavením konštantnej hodnoty. Pri reálnych meraniach je však nemožné dosiahnuť takúto štandardizáciu z dôvodu pôdnej nekonzistentnosti, ako i variability vlhkostí – čo má za následok kolísanie orebného odporu.



Obr. 28 Aplikácia síl na radličný pluh – schéma

## 4 VÝSLEDNÉ SILOVÉ ÚČINKY

Ako referenčný pluh vstupujúci do simulácie bol nesený otočný pluh Pöttinger SERVO 25 s mechanicky meniteľným pracovným záberom. Jedná sa o konfiguráciu štyroch radlíc, pre traktory s maximálnym výkonom do 120 koní – tejto konfigurácii odpovedá i virtuálny model vyššie spomínaného traktoru.

Tab. 9 Technická špecifikácia pluhu Pöttinger [19]

Model	SERVO 25 – 4 radlice
Variant pripojenia	Zadný trojbodový
Hmotnosť	995 kg
Požadovaný príkon	50 - 120 k
	85 (32-36-40-43)
Rozteč telies / pracovný záber telesa	95 (33-37-41-45)
	102 (35-40-44-48)
Výška rámu	80 cm
Profil rámu	100 x 100 mm
Počet orebných telies	4

### 4.1 ZMENA ODPORU PÔDY A JEJ DOPAD NA SILOVÉ ÚČINKY

Prvým z analyzovaných faktorov bola zmena merného odporu pôdy a následná analýza silových účinkov v predom definovaných miestach trojbodového závesu a zároveň skúmanie reakcií pod každým z kolies. Ako je zrejmé z rovnice (2), merný odpor má podstatný vplyv na výslednú silu. Ďalšie z konfigurovaných parametrov boli: Hĺbka orby – definovaná na 25 cm, záber orebného telesa 33 cm, pri celkovom počte štyroch orebných telies. Vypočítaná sila  $F_p$  je následne dosadzovaná do virtuálneho modelu spolu so silou  $F_{tp}$  predstavujúcou tiaž pluhu. Ich veľkosť výslednice je následne vyčíslená v tabuľke č. 10. Bočná sila  $F_b$ , schopná priestorového natočenia výslednice nebola v uvažovanom prípade zahrnutá.

Tab. 10 Výsledné veľkosti síl  $F_p$  pre rôzne druhy pôd

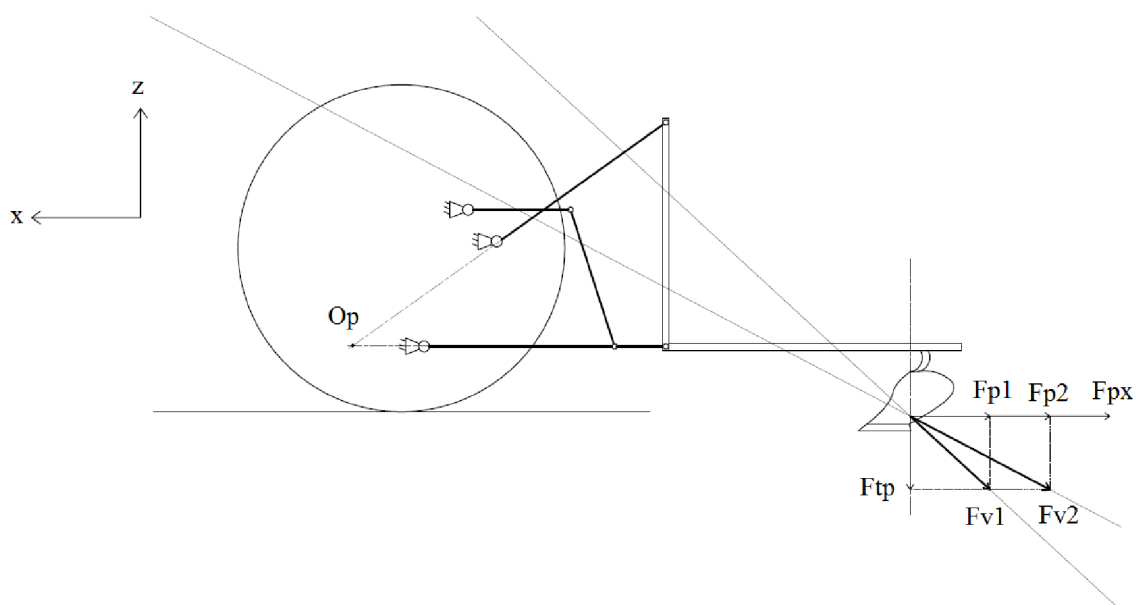
Simulácia č.	Merný odpor pôdy – $k_o$ [kN.m <sup>-2</sup> ]	$F_p$ [kN]
1.	20	6,6
2.	30	9,9
3.	50	16,5
4.	70	23,1
5.	90	29,7
6.	120	39,6

Každé z meraní bolo vykonané o dĺžke meraného intervalu 5 sekúnd a počte krokov 500. Za pomoci Adams/PostProcessor boli následne vykreslené grafy v závislosti výsledná sila – čas. Z grafov boli odčítané minimá / maximá hodnôt síl a zároveň spriemerovaná hodnota síl v meranom úseku. Za pomoci vopred nastavených meračov bolo detekované i namáhanie na ťah a tlak u tiahiel trojbodového závesu.

Pre simuláciu č. 1 – 6 boli výsledné hodnoty nasledovné:

Tab. 11 Veľkosti silových reakcií v tialach pre rôzne druhy pôd

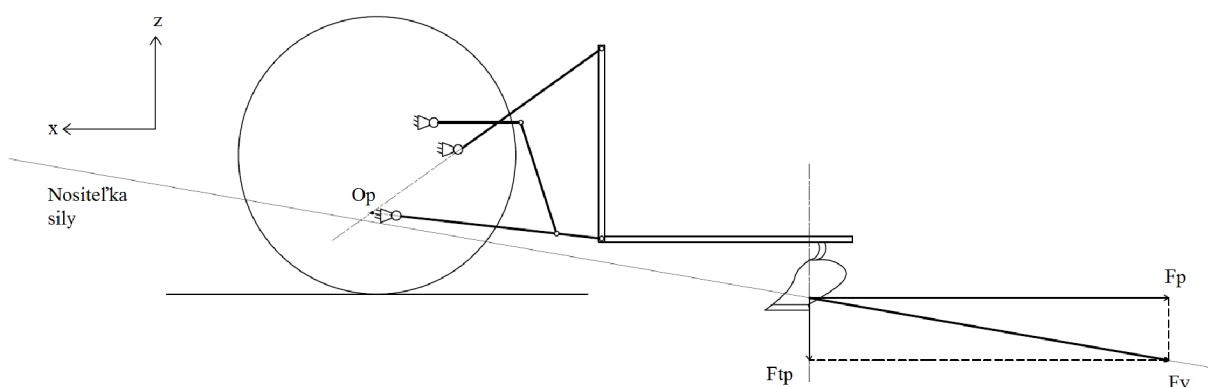
<b>Horné tiahlo (F<sub>h</sub>)</b>				
Simulácia č.	F <sub>min</sub> [kN]	F <sub>max</sub> [kN]	F <sub>v_priemer</sub> [kN]	Ťah (+) / Tlak (-)
1.	17,53	26,02	23,40	+
2.	15,41	21,93	17,01	+
3.	11,03	17,97	13,72	+
4.	6,69	11,99	11,08	+
5.	1,98	7,86	4,51	+
6.	-0,07	-5,12	-3,61	-
<b>Ľavé dolné tiahlo (F<sub>ld</sub>)</b>				
1.	-2,33	-6,40	-5,19	-
2.	-1,24	4,41	2,59	striedavé
3.	6,75	11,15	9,15	+
4.	8,99	16,85	11,66	+
5.	21,93	24,69	23,17	+
6.	25,83	36,13	29,48	+
<b>Pravé dolné tiahlo (F<sub>pd</sub>)</b>				
1.	-6,47	-10,98	-8,26	-
2.	-5,25	-7,83	-5,67	-
3.	-1,28	-4,62	-2,44	-
4.	-1,77	3,18	2,16	striedavé
5.	2,48	3,91	3,14	+
6.	7,89	11,83	10,13	+
<b>Ľavé zdvíhacie tiahlo (F<sub>lz</sub>)</b>				
1.	25,64	29,44	26,92	+
2.	24,88	27,17	26,15	+
3.	22,97	27,56	24,10	+
4.	17,23	26,65	21,47	+
5.	17,58	19,21	18,64	+
6.	9,55	23,18	13,98	+
<b>Pravé zdvíhacie tiahlo (F<sub>pz</sub>)</b>				
1.	8,80	11,16	9,83	+
2.	5,84	9,94	8,72	+
3.	4,11	10,94	6,92	+
4.	3,55	9,01	5,51	+
5.	1,79	7,38	4,39	+
6.	2,39	7,90	3,13	+



Obr. 29 Schéma silových pôsobení rôznych orebných odporov

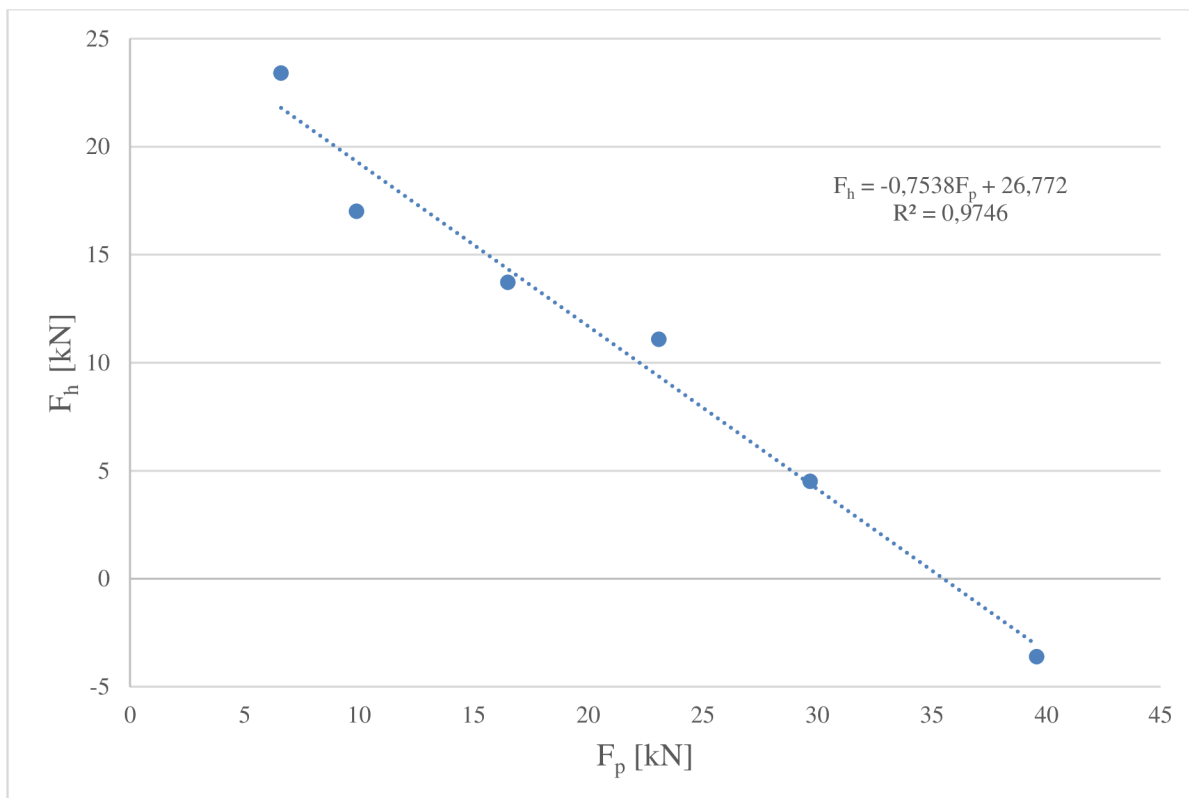
Tiaž pluhu bola po celú dobu uvažovaná ako konštantná hodnota. Sila, ktorá pohybovala s výslednicou bola výlučne sila odporu pôdy. Z obr. 29 vyplýva, že zväčšovaním tejto sily sa následne mení uhol medzi silou odporu pluhu a výslednicou. Nositeľka silovej výslednice má tendenciu sa približovať k bodu  $O_p$  zvaným aj ako okamžitým pólom otáčania. Silová výslednica  $F_{v1}$  má u nízkeho pôdneho odporu sklon sa pohybovať v okolí bodu horného uchytenia závesu a pluhu. V dolných tiahloch sa zvyšovaním odporu mení zmysel síl. Silová výslednica u vysokého orebného odporu má za následok sa pohybovať okolo dolného bodu uchytenia (uchytenie dolných tiahel a pluhu).

Výnimočná situácia sa môže vyskytnúť v prípade relatívne malého uhlu ktorý zvierá silová výslednica so silou orebného odporu. Nositeľka sily tak prechádza pod okamžitý pól otáčania  $O_p$  a má za následok zmenu zmyslu síl v zdvíhacích tiahloch. Ťah tu strieda tlak, avšak tento jav v praxi eliminuje regulačná hydraulika a nenastáva. Moment vyvedený silovou výslednicou mení svoj zmysel, čo má za následok potencionálny pohyb pluhu v zvislom smere nahor.



Obr. 30 Schéma prípadu zmeny zmyslu namáhania zdvíhacích tiahel

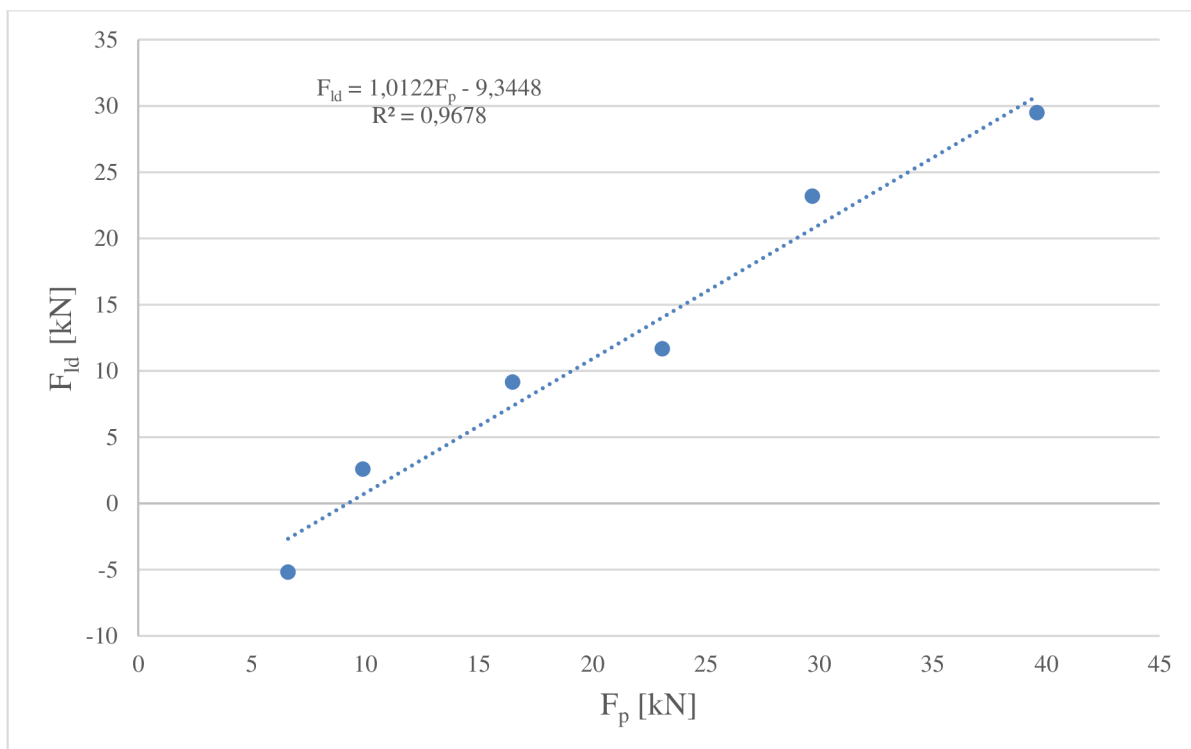
Z výsledkov zobrazených v tabuľke č. 11 je zrejmé, že na sily v jednotlivých tiahloch má sila pôdneho odporu významný vplyv. Jej zmenou sa podstatne menia priebehy síl. Pri zmene orebného odporu  $F_p$  mení svoj zmysel sila v hornom tiahle -  $F_h$ . V prípade nízkeho orebného odporu, má prioritný vplyv na vyvedené silové účinky tiaha tiaž pluhu. Jej pôsobením je pluh v nerovnovážnom stave. So zvyšovaním orebného odporu sa ťahové silové účinky znižujú. Pri mernom odpore vyššom ako  $90 \text{ kN.m}^{-2}$  jeho ďalším zvyšovaním nastáva stav kedy sa silová výslednica dostane do bodu keď v hornom tiahle nebude pôsobiť žiadna sila – stav rovnováhy. Opätovným zvýšením nastáva jav zmeny zmyslu pôsobiacich síl. To znamená že ťah vystrieda tlak. Tlak bude ďalej úmerne narastať so zvyšujúcim sa merným odporom.



Obr. 31 Zmena silového pôsobenia v hornom tiahle v závislosti na orebnom odpore

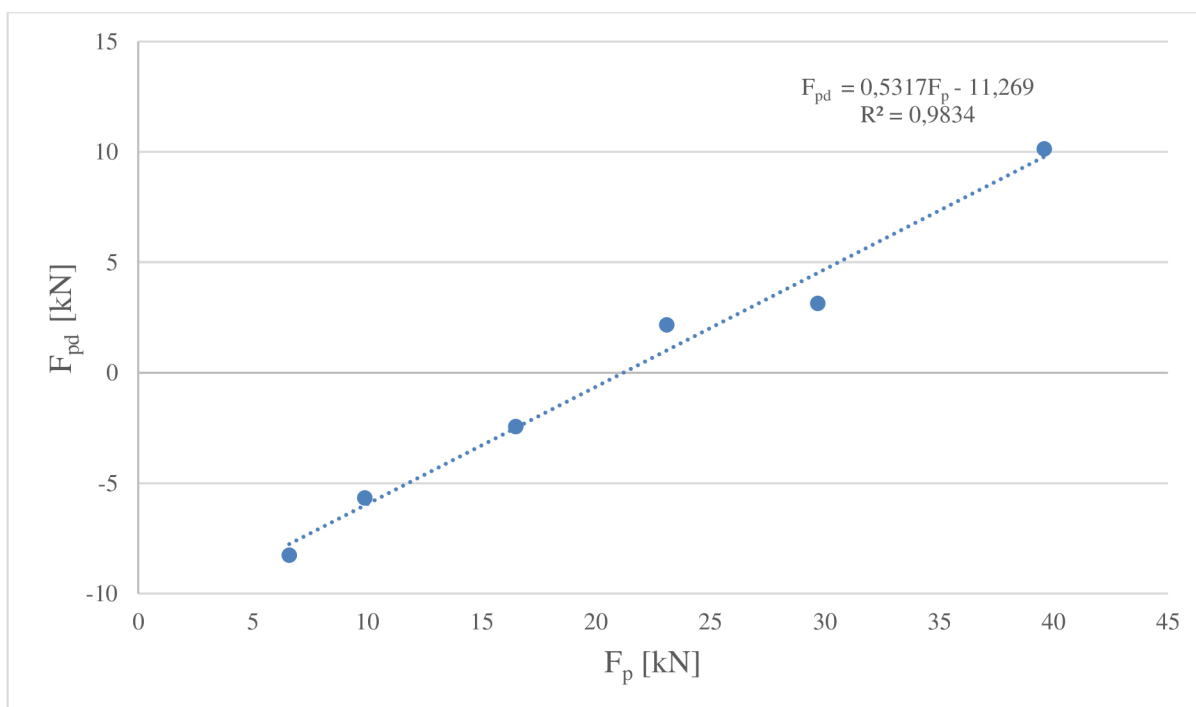
V zdvíhacích tiahloch sa zmena zmyslu síl v skúmanej konfigurácii neuskutočňuje. V každom z nich pôsobí po celú dobu simulovania ťah. V prípade týchto simulácií (orba vpravo) dochádza k znižovaniu nameraných a spriemerovaných síl v závislosti na zvyšovaní orebného odporu. Dôvodom tohto javu je vyššia veľkosť odporu pôdy voči tiaži pluhu čo má za následok odľahčovanie tiahiel.

V oboch dolných tiahloch sa so zvyšujúcim pôdnym odporom mení zmysel síl. Ku vyvedeniu tlaku dochádza pri nízkych pôdných odporoch. Silové pôsobenie tiaže, ktoré je v pomere k pôdnemu odporu nízke, spôsobuje tlaky v tiahloch. Navyšovaním pôdneho odporu, je prekročená limitná hodnota významnosti tiažovej sily pluhu. V dôsledku nesymetrie pluhu a miesta pôsobiska vstupných síl sú i vyvedené silové účinky rozdielne. V ľavom dolnom tiahle sú tým pádom rádovo vyššie.



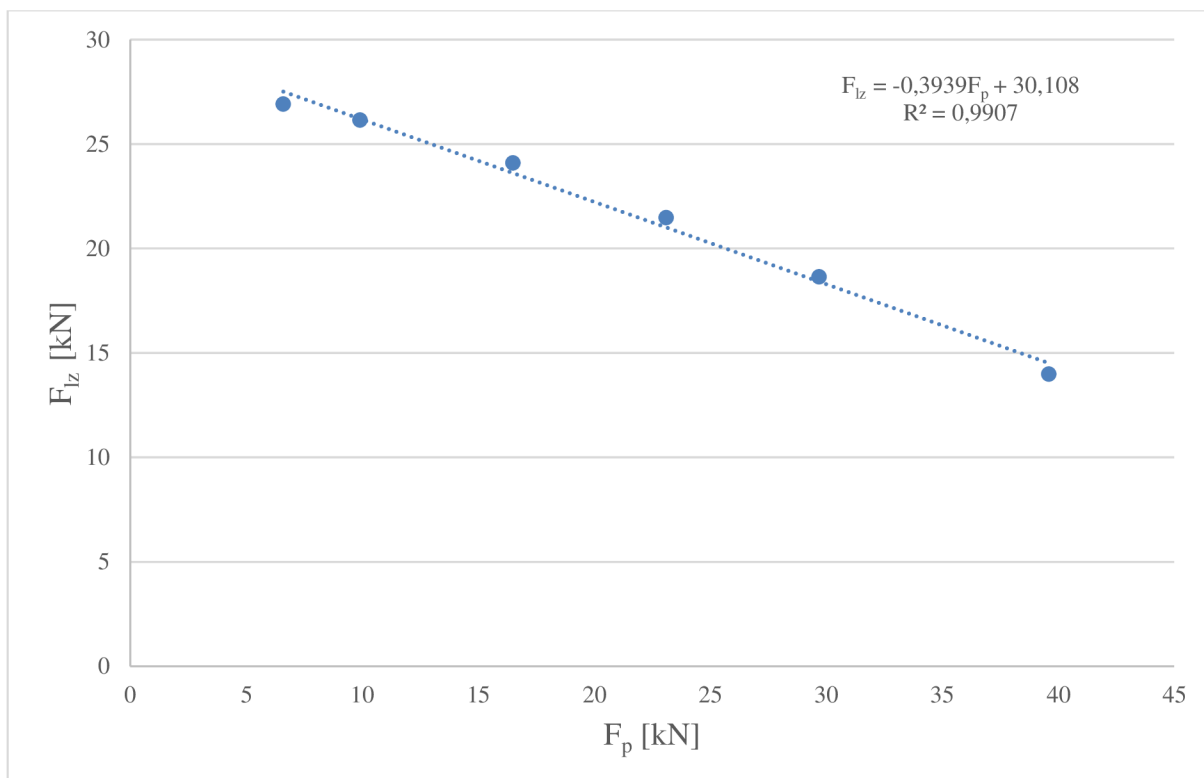
Obr. 32 Zmena zmyslu síl – ľavé dolné tiahlo, v závislosti na orebnom odpore

Priebehmi simulácií nastáva zmena zmyslu síl v pravom dolnom tiahle (obr. 33) až na rozmedzí prechodu od ľahkého po stredne ťažký druh pôdy. V porovnaní s ľavým dolným tiahom je rozsah limitných hodnôt silového pôsobenia cca polovičný.



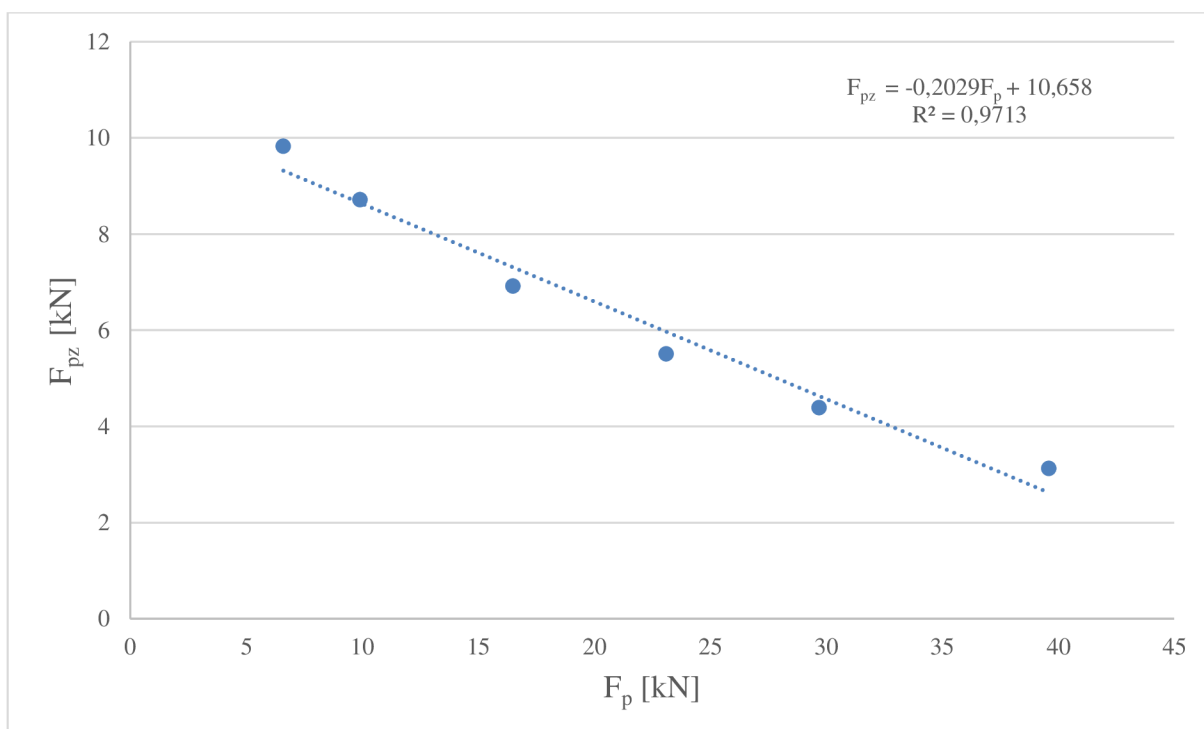
Obr. 33 Zmena zmyslu síl – pravé dolné tiahlo, v závislosti na orebnom odpore





Obr. 34 Silové účinky v ľavom zdvíhacom tiahle

Zvyšovanie orebného odporu má za účinnok odľahčovanie oboch zdvíhacích tiahel závesu. Silové účinky v ľavom z nich sú vyššie opäť z dôvodu nesymetrie pripojeného pluhu.



Obr. 35 Silové účinky v pravom zdvíhacom tiahle

## 4.2 ZVISLÉ SILOVÉ REAKCIE POD KOLESAMI TRAKTORU

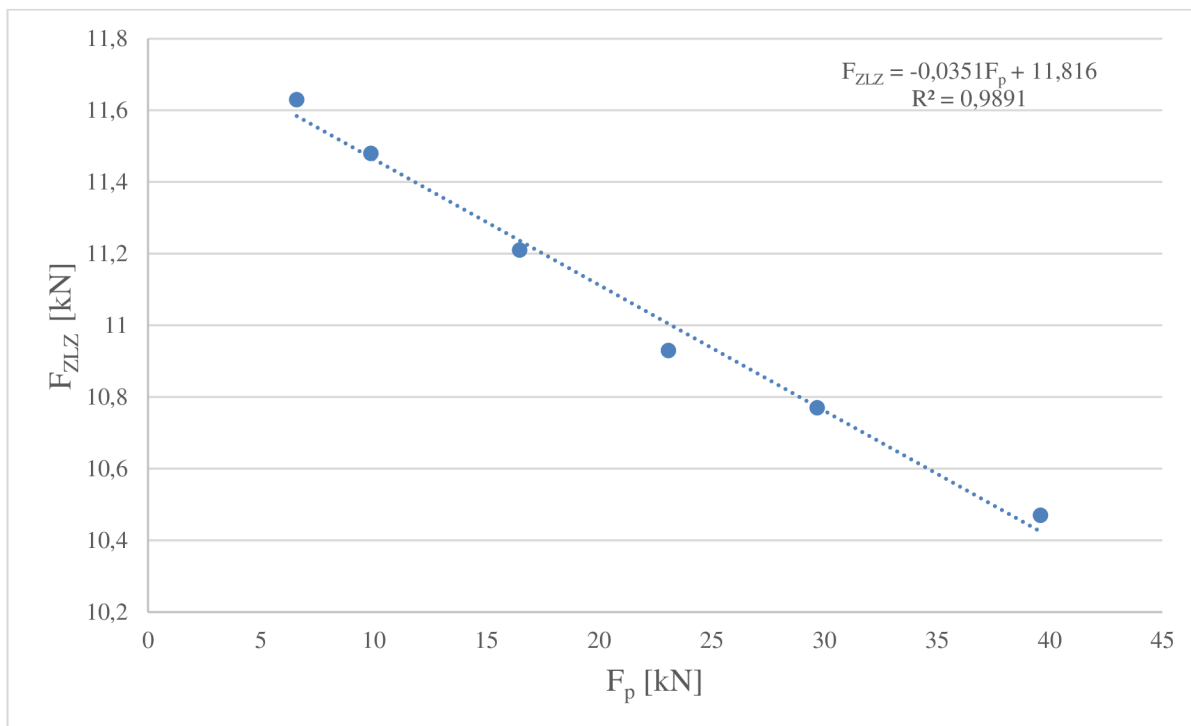
Vertikálne sily pod kolesami traktoru, tzv. normálové reakcie od podložky sú ďalšími z dôležitých parametrov skúmaných v diplomovej práci. Pre prednastavenú konfiguráciu trojbodového závesu bude opäť menená sila predstavujúca orebný odpor a budú skúmané silové reakcie medzi kolesom a podložkou. Grafické znázornenie pôsobiacich síl bolo objasnené už na obr. č. 27. Sila označovaná ako  $F_{ZPP}$  pôsobí pod pravým predným kolesom traktoru, sila  $F_{ZLP}$  pod ľavým predným kolesom. Sily pod zadnou nápravou sú značené ako  $F_{ZPZ}$  (pravé zadné koleso) a  $F_{ZLZ}$  (ľavé zadné koleso).

Tab. 12 Veľkosti silových reakcií pod kolesami pre rôzne druhy pôd

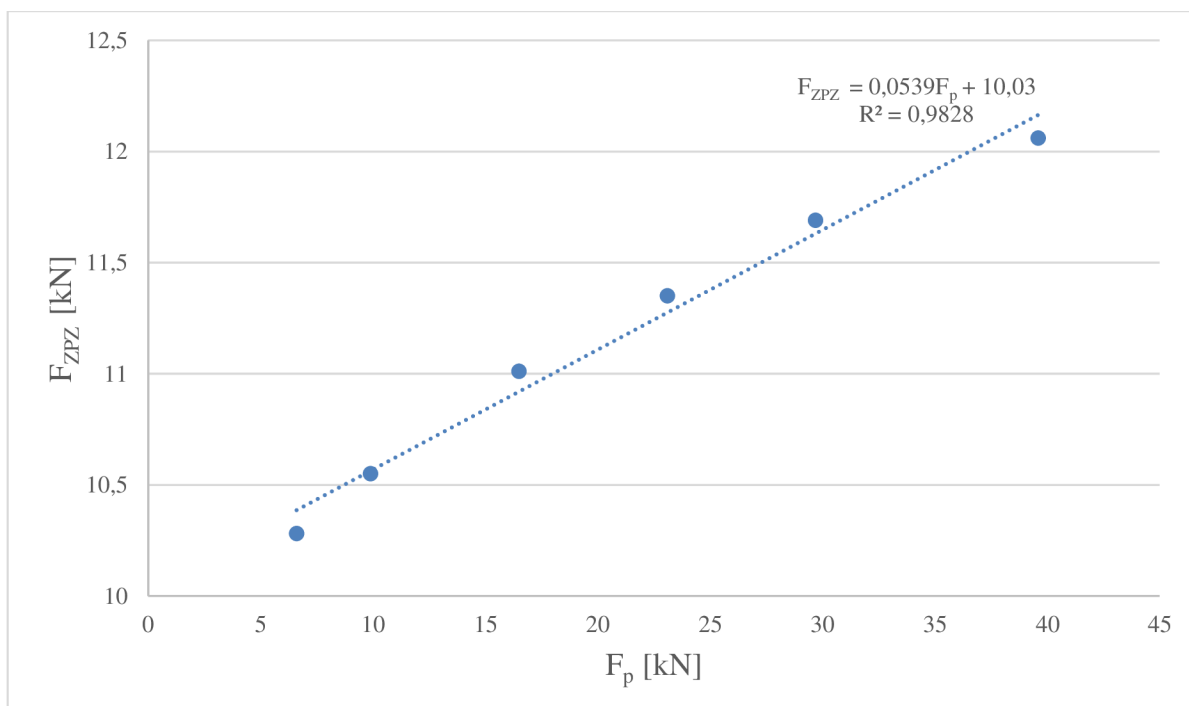
<b>Predná náprava (<math>F_{ZLP}+F_{ZPP}</math>)</b>			
Simulácia č.	$F_{\min}$ [kN]	$F_{\max}$ [kN]	$F_{v\_priemer}$ [kN]
1.	4,24	6,14	5,56
2.	4,37	6,08	5,61
3.	4,72	6,71	5,71
4.	4,87	6,34	5,87
5.	4,64	6,45	5,91
6.	4,33	7,16	6,06
<b>Pravé zadné koleso (<math>F_{ZPZ}</math>)</b>			
1.	8,89	16,49	10,28
2.	8,73	13,40	10,55
3.	8,24	15,76	11,01
4.	7,95	15,80	11,35
5.	7,66	17,96	11,69
6.	6,70	17,60	12,06
<b>Ľavé zadné koleso (<math>F_{ZLZ}</math>)</b>			
1.	7,66	13,02	11,63
2.	8,20	12,12	11,48
3.	6,70	13,89	11,21
4.	5,82	14,60	10,93
5.	5,27	14,71	10,77
6.	3,65	16,31	10,47

Analyzovaním silového zaťaženia v zmysle kolmom na podložku pod kolesami traktoru zvyšovaním orebného odporu, s následkom zmeny smeru a veľkosti výslednice možno konštatovať nasledovné: Výsledné reakčné účinky pod hnacími kolesami traktoru majú rozdielne zaťaženia z dôvodu vyosenia ťažiska pluhu. Priezom meraniami sa zvyšujú hodnoty silových účinkov pod pravým zadným kolesom s relatívne priamočiarym nárastom. Naproti tomu u ľavého zadného kolesa s počiatočnou hodnotou sily vyššou ako pod pravým kolesom sa postupne znižovala. Priemerná hodnota rozdielu zaťaženia dosahovala 0,9 kN.

Hlavným z dôvodov nárastu zaťaženia pod pravým kolesom a odľahčením pod ľavým kolesom bol nárast hodnoty sily v osi x (orebný odpor). Kritickým zhodnotením výsledkov je možné predpokladať u skutočného traktoru pri orbe, kde je jedno koleso v brázde a druhé na záhone bude rozdiel síl o niečo vyšší.

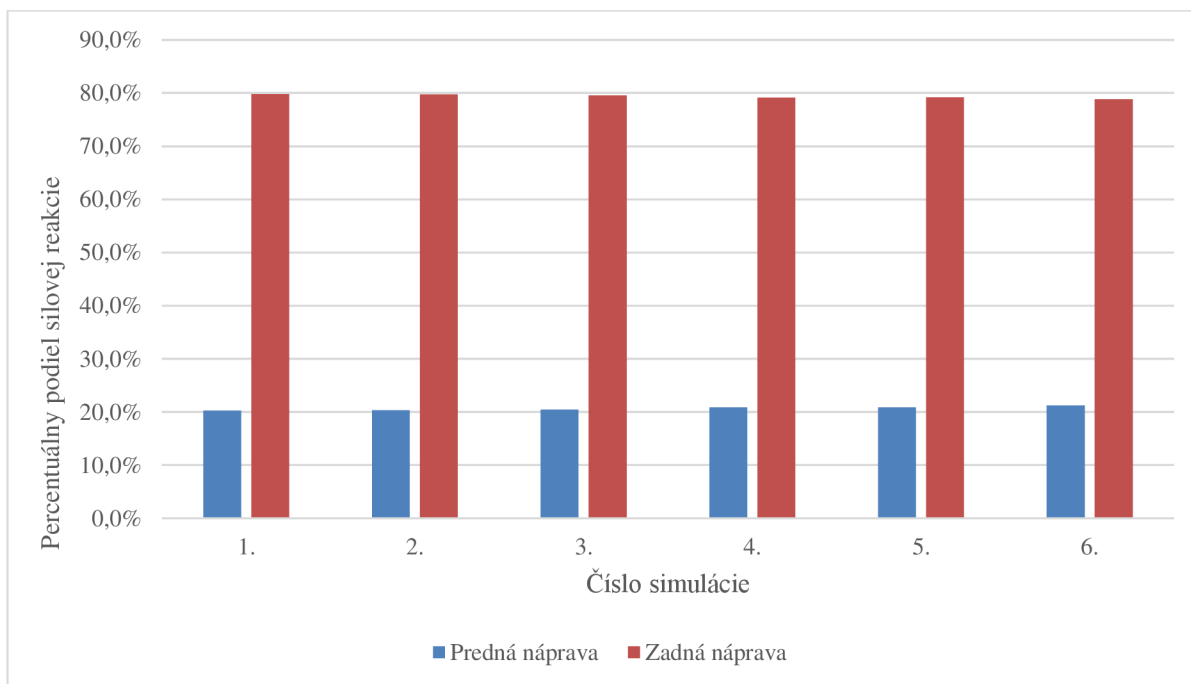


Obr. 36 Silové reakcie pod ľavým kolesom traktoru so zvyšujúcim sa orebným odporom



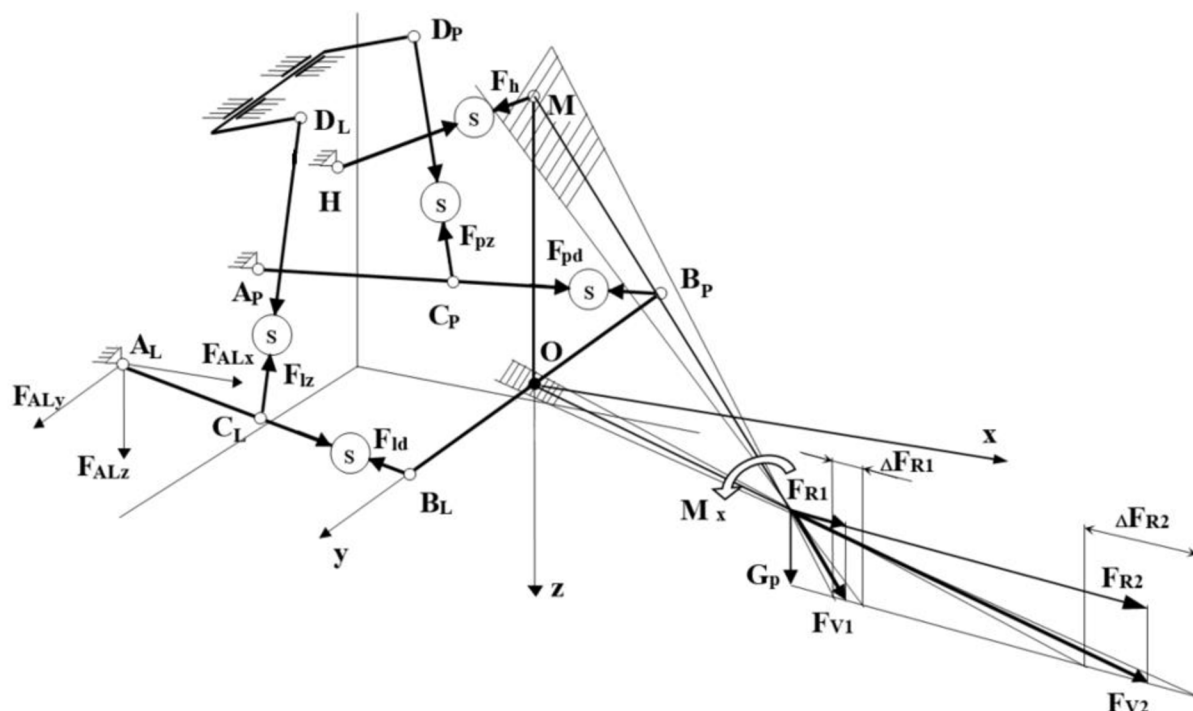
Obr. 37 Silové reakcie pod pravým kolesom traktoru pri zvyšovaní orebného odporu

Percentuálne vyjadrenie zaťaženia hnacej a hnanej nápravy vyjadruje graf na obr. č. 38. Pri orbe vo veľmi ľahkej pôde činí percentuálny podiel doťaženia hnanej nápravy 20,2 %. Navyšovaním orebného odporu až po krajnú hodnotu intervalu narástol podiel o 1,1 %. O rovnakú hodnotu zároveň klesol podiel zaťaženia na hnacej náprave. Z pôvodných 79,8 % klesla hodnota na 78,7 %. Omnoho podstatnejší vplyv bude mať však na zaťaženie hnacej nápravy nastavenie trojbodového závesu – obzvlášť dĺžka horného tiahla. Možno však konštatovať že i tento skúmaný fakt má čiastkový vplyv na energetické a výkonnostné parametre z toho vyplývajúce.



Obr. 38 Percentuálne vyjadrenie zaťaženia náprav

Odľahčovanie zadnej nápravy má pozitívny vplyv na zhutňovanie pôdy avšak negatívny na veľkosť vyvodenej hnacej sily. Simulovaný model traktoru je uvažovaný ako stroj s jednou hnanou nápravou. Prenos váhy medzi nápravami je spôsobený vysokou hodnotou pôdneho odporu. Zvyšovaním tejto pozdĺžnej sily dochádza k tomuto čiastočne nežiadúcemu javu – i keď iba v zanedbateľných hodnotách.



Obr. 39 Komplexná schéma silového pôsobenia pri orbe [1]

### 4.3 UCHYTENIE HORNÉHO TIAHLA V STOJANE PLUHU

Ďalším zo skúmaných parametrov týkajúci sa nastavenia trojbodového závesu je systém uchytenia horného tiahla k pluhu. Používa sa tzv. uchytenie do stojanu pluhu. Ten obsahuje viacero otvorov, do ktorých je možné tiahlo umiestniť. Samotné uchytenie pluhu je dané jeho konštrukčným riešením, regulačnou hydraulikou a taktiež požiadavkou na kvalitu práce v daných geografických podmienkach. Toto nastavenie ovplyvňuje i preklz kolies, stabilitu a ovládateľnosť traktoru počas orby. [3]

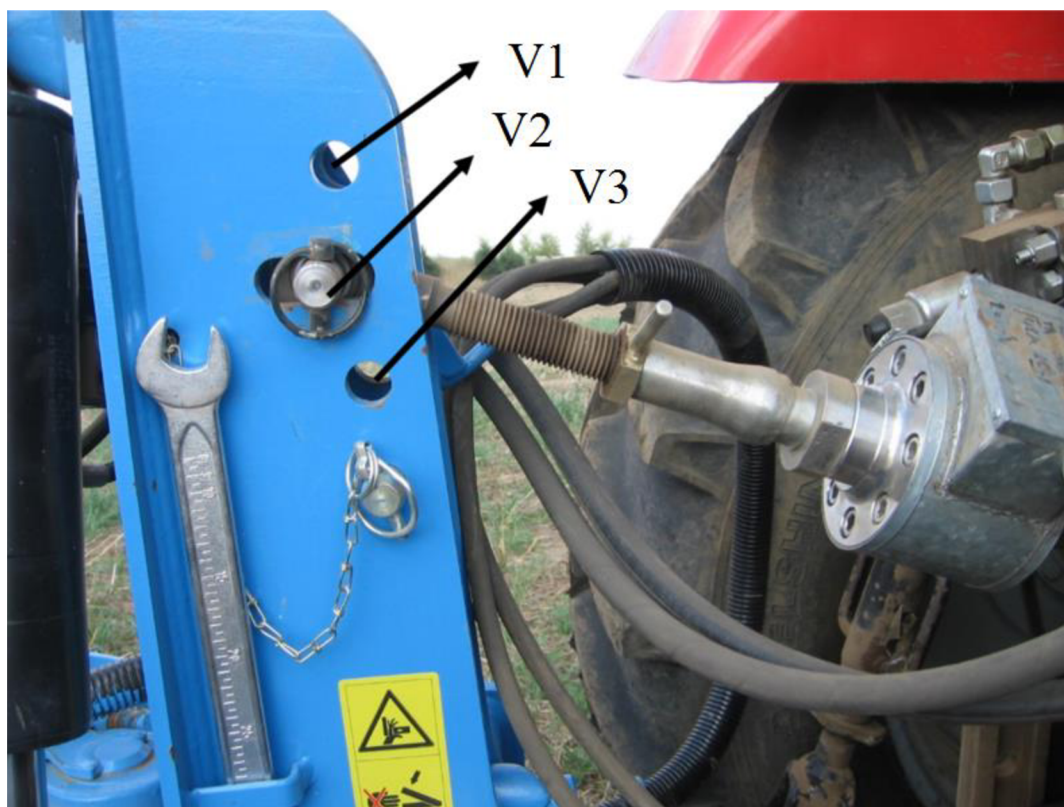
Veľkosť zahlbovacieho momentu  $M_z$  je závislá na uchytení tiahla v stojane. Jeho presúvaním možno zvýšiť resp. znížiť jeho veľkosť. Zmenou uchytenia dochádza k zmene dĺžky ramena vytvárajúceho tento moment. Je daný veľkosťou silovej výslednice a ramenom, ktoré vytvára kolmá vzdialenosť medzi okamžitým pólom otáčania a nositeľkou silovej výslednice.

$$M_z = F_v * a \text{ [Nm]} \quad (3)$$

Kde:

$F_v$  – veľkosť silovej výslednice [N]

$a$  – rameno [m]

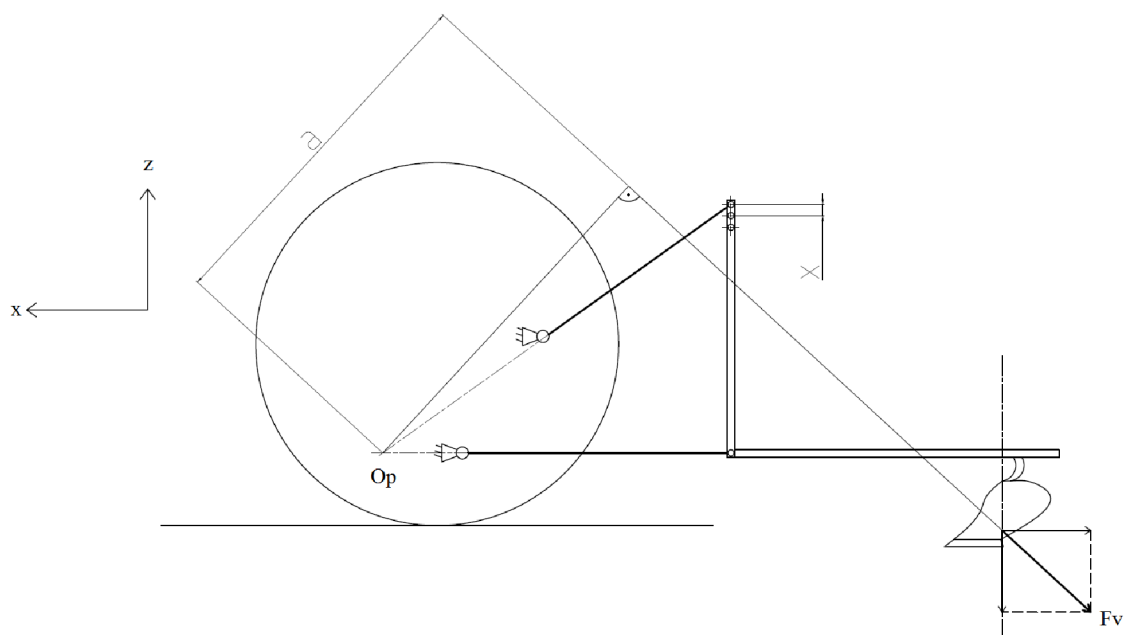


Obr. 40 Uchytenie horného tiahla do stojanu pluhu [1]

Pre potreby diplomovej práce budú skúmané tri rôzne modifikácie uchytenia. V žiadnom z nastavení nebude uvažované voľné umiestnenie horného tiahla. Toto uchytenie má za následok nulové hodnoty síl vo väzbe. Rozostupy medzi otvormi (x) vid' obrázok č. 41 boli stanovené na hodnotu 60 mm.

Tab. 13 Výsledné veľkosti síl  $F_p$  pre rôzne druhy pôd

Varianta pripojenia	Výška stojanu pluhu [mm]
1.	815
2.	755
3.	695



Obr. 41 Schéma variant pripojení v stojane pluhu

Zmenou konfigurácie nastavenia trojbodového závesu dochádza k zmene výstupných silových účinkov v meraných bodoch, avšak analógia zmeny zmyslov silových účinkov je rovnaká. Prípojným zariadením bol opäť nesený otočný pluh Pottinger SERVO 25 z ktorého boli prevzaté potrebné parametre. Zmenou uchytenia v stojane pluhu sa bude meniť i poloha okamžitého stredu otáčania pozdĺž osi  $x$ . Postupným premiestňovaním horného tiahla sa bude tento bod vzdäľovať smerom k hnanej náprave traktoru. U každého z uchytení bude opäť skúmaná veľkosť silových reakcií v tiahloch trojbodového závesu, i pod kolesami traktoru. Pre simulácie 1 – 6 budú opäť navyšované veľkosti orebných odporov vid' tab. číslo 14. Záporné hodnoty v tabuľke predstavujú vyvođený tlak v tiahle.

Tab. 14 Veľkosti síl v tiahloch pre rôzne varianty nastavenia

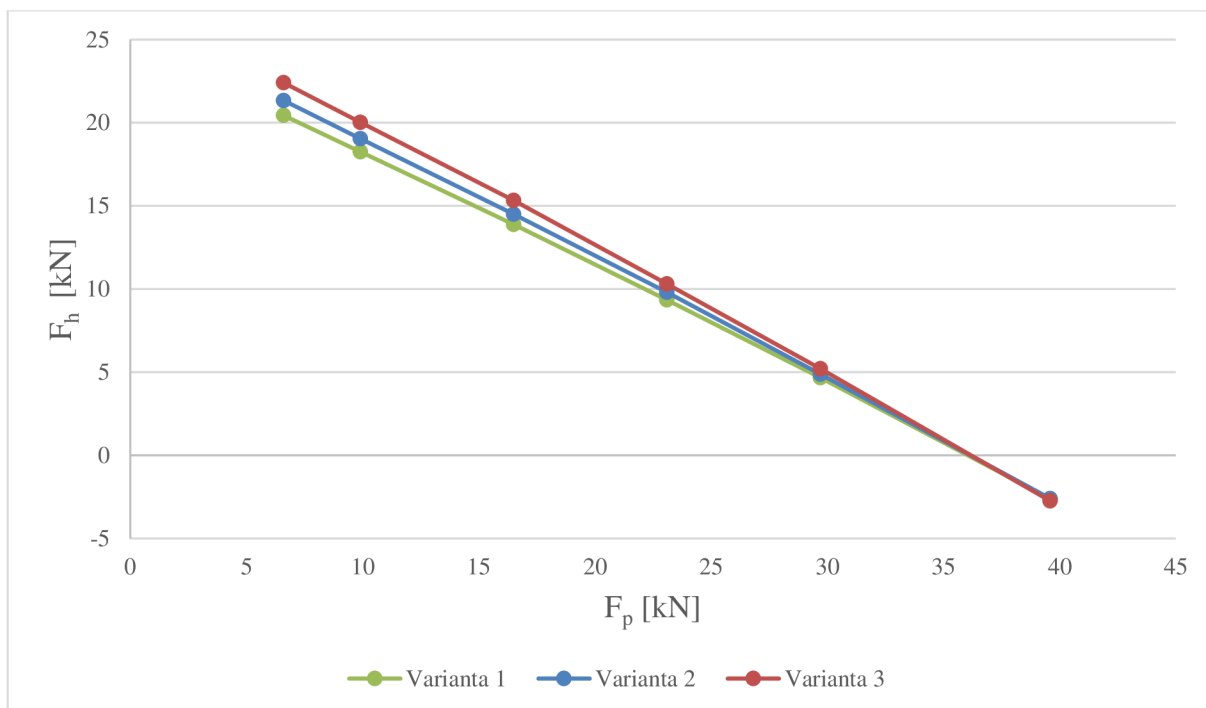
<b>Horné tiahlo (<math>F_h</math>)</b>	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Simulácia č.	$F_{v\_priemer}$ [kN]	$F_{v\_priemer}$ [kN]	$F_{v\_priemer}$ [kN]
1.	20,44	21,34	22,41
2.	18,25	19,04	20,03
3.	13,88	14,50	15,34
4.	9,35	9,81	10,31
5.	4,68	4,88	5,22
6.	-2,61	-2,60	-2,74
<b>Ľavé dolné tiahlo (<math>F_{ld}</math>)</b>			
1.	-6,75	-7,52	-8,44
2.	-4,56	-5,28	-6,11
3.	-0,36	-0,68	-1,40
4.	4,45	4,01	3,57
5.	9,15	8,92	8,73
6.	16,57	16,88	16,75

<b>Pravé dolné tiahlo (<math>F_{pd}</math>)</b>			
1.	-4,52	-5,27	-6,12
2.	-1,27	-1,91	-2,66
3.	5,27	4,78	4,27
4.	11,79	11,48	11,11
5.	18,24	18,09	18,09
6.	28,04	28,61	28,37
<b>Ľavé zdvíhacie tiahlo (<math>F_{lz}</math>)</b>			
1.	20,25	19,29	18,23
2.	17,71	16,77	15,84
3.	13,84	13,20	12,36
4.	11,12	10,51	10,06
5.	9,06	8,69	8,74
6.	7,43	8,36	7,76
<b>Pravé zdvíhacie tiahlo (<math>F_{pz}</math>)</b>			
1.	18,65	18,82	19,02
2.	17,4	17,72	17,51
3.	17,28	17,4	17,01
4.	17,05	16,74	16,42
5.	15,22	15,05	15,14
6.	11,23	11,66	11,86

Zmenou uchytenia horného tiahla bolo u každej zo simulácií dosiahnutý nárast silových účinkov. Pribeh nárastu má lineárny charakter. Z hľadiska vplyvu na zmeny zmyslu silového pôsobenia nebol odhalený vplyv uchytenia. Zmeny zmyslu síl boli vyvedené v dolných tiahloch podľa vzoru predošlých simulácií. Jedna z možných zmien by mohla nastať (a to i v predošlých prípadoch) zmenou hĺbky orby. To by malo za následok posuv silovej výslednice v zvislom smere (v smere osi z). Tým by sa táto poloha menila voči okamžitému pólu otáčania a mohla by mať opäť následok na zmeny síl v zdvíhacích tiahloch. Zvyšovanie orebného odporu má v neposlednom rade zásadný vplyv na veľkosti silových reakcií v dolných tiahloch, ktoré pri jeho zvyšovaní menia zmysel vychádzajúc zo stredne ťažkej až do ťažkej pôdy. Sily v týchto tiahloch rastú v porovnaní s pôdami ľahkými až násobne. V týchto prípadoch opäť zohrávajú roly počty orebných telies, hĺbka orby atď.

Podľa simulácií je možné pre skúmanú konfiguráciu tvrdiť, že z vybranej analýzy vyplýva nasledovné: Sily v hornom tiahle sa premiestňovaním horného tiahla do nižších otvorov stojanu pluhu menia v každej z variant. So zvyšovaním orebného odporu sa opäť analogicky ako v predchádzajúcej podkapitole lineárne znižujú. Podľa obr. č. 42 je patrné, že v najvyššom skúmanom orebnom odpore sú rozdiely silových účinkov horného tiahla medzi variantami minimálne.





Obr. 42 Závislosť sily v hornom tiahle na orebnom odpore pre rôzne varianty pripojenia

Tab. 15 Veľkosti silových účinkov pod kolesami traktoru pre rôzne varianty pripojenia

<b>Predná náprava (<math>F_{ZLP}+F_{ZPP}</math>)</b>	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Simulácia č.	$F_{v\_priemer}$ [kN]	$F_{v\_priemer}$ [kN]	$F_{v\_priemer}$ [kN]
1.	5,55	5,46	5,40
2.	5,50	5,47	5,46
3.	5,51	5,51	5,46
4.	5,53	5,53	5,50
5.	5,58	5,54	5,49
6.	5,61	5,56	5,57
<b>Pravé zadné koleso (<math>F_{ZPZ}</math>)</b>			
1.	7,72	7,76	8,09
2.	7,79	7,82	8,15
3.	7,88	7,93	8,74
4.	8,07	8,18	8,33
5.	8,22	8,36	8,66
6.	8,49	8,65	8,87

<b>Ľavé zadné koleso (F<sub>ZLZ</sub>)</b>			
1.	13,38	13,64	13,71
2.	13,36	13,57	13,76
3.	13,33	13,45	13,65
4.	13,03	13,29	13,48
5.	12,91	13,07	13,24
6.	12,13	12,51	12,78

I keď sa zaťaženia kolies menia v závislosti na uchytení horného tiahla, analógia doťažovania náprav sa stúpajúcim pôdnym odporom nemení. Znamená to, že pri každej z variant sa so stúpajúcou silou orebného odporu predná náprava doťažuje a zadná odľahčuje. Iná situácia ale nastáva čiastkovým rozborom ľubovoľnej varianty. Ako príklad bude uvedená simulácia č. 1 – ľahká pôda.

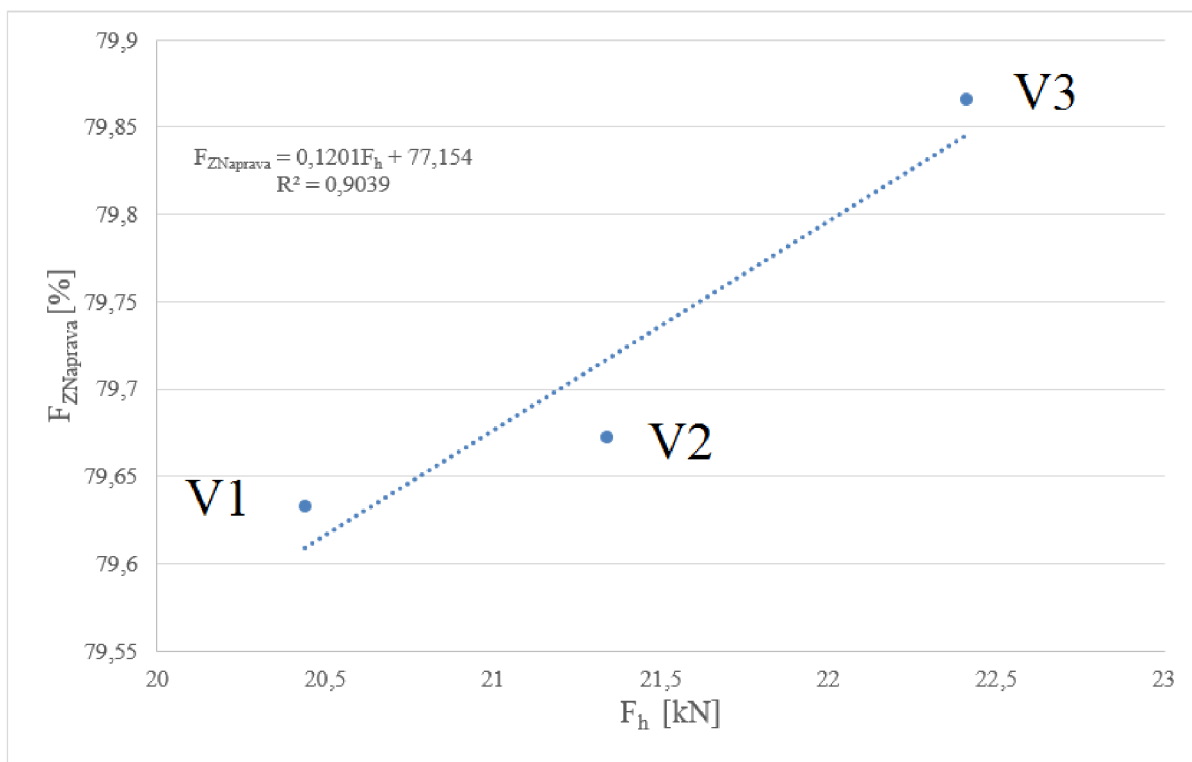
U tejto simulácie je braná sila odporu pôdy ako konštantná hodnota (6,6 kN). Premennou veličinou je výška stojanu pluhu. Skúmané parametre, ovplyvňujúce výstupné parametre traktoru sú práve doťažovania náprav.

*Tab. 16 Percentuálne zaťaženie náprav u ľahkej pôdy*

Varianta	<b>Predná náprava (F<sub>ZLP</sub>+F<sub>ZZP</sub>) [%]</b>	<b>Zadná náprava (F<sub>ZLP</sub>+F<sub>ZZP</sub>) [%]</b>
	1.	20,33
2.	20,33	79,67
3.	20,14	79,86

Z percentuálnej analýzy plynie, že konfigurovaním uchytenia závesu dochádza k žiadúcemu doťaženiu hnacej nápravy traktoru u vybranej simulácie. Analogicky dochádza k tomuto javu u každej vybranej simulácie.

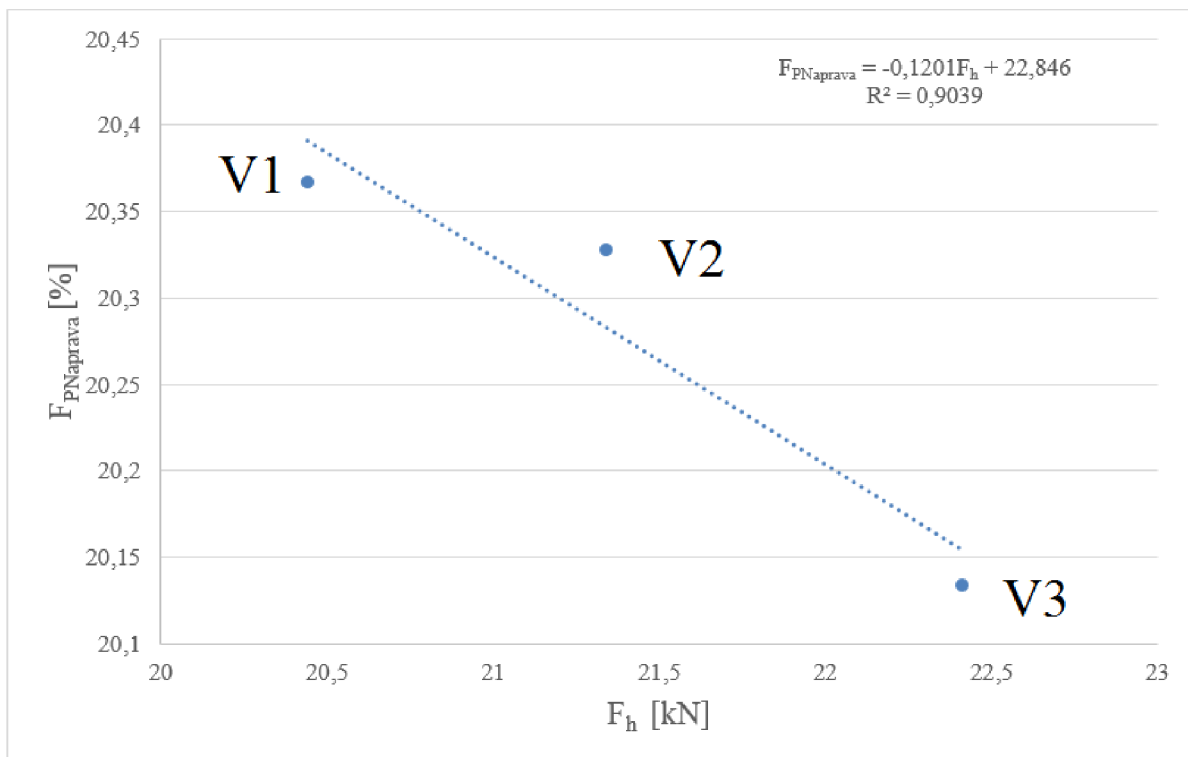
## 4.3.1 ZÁVISLOSŤ DOŤAŽENIA NÁPRAV NA SILE V HORNOM TIAHLE



Obr. 43 Závislosť zaťaženia hnacej nápravy na sile v hornom tiahle

Ako príklad závislosti zaťaženia hnacej nápravy a sily v hornom tiahle bol použitý prípad simulácie v ľahkej pôde (simulácia č. 1). Pri prvej konfigurácii upnutia horného tiahla (V1) závesu boli silové účinky vyvolané v kinematickej väzbe hlavne od sily tiaže pluhu ktorá bola násobne vyššia ako sila odporu pôdy. Následným upravovaním uchytenia v stojane pluhu má za následok čiastkové zvyšovanie podielu zaťaženia hnacej nápravy.

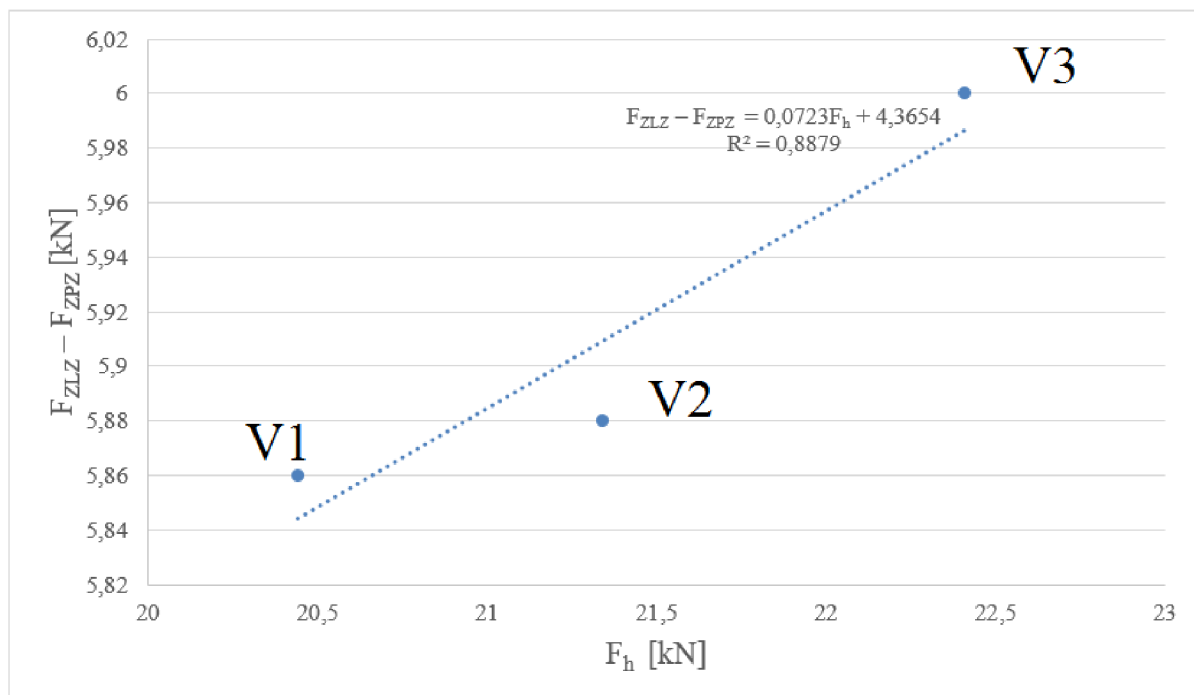
V druhej z konfigurácií uchytenia (V2) nastal nárast silových účinkov v hornom tiahle vyvolaný priestorovou sústavou síl pôsobiacich na pluh o cca 1 kN. Vyšší nárast podielu zaťaženia nápravy mal prechod medzi druhou a treťou variantou uchytenia. Obecne sú tieto nárasty zanedbateľné v porovnaní s inými parametrami – ako napr. predopnutím pluhu. [1] Doťažovanie zadnej nápravy je totožné s odľahčovaním nápravy prednej. Jej závislosť je ďalej skúmaná na obr. číslo 44.



Obr. 44 Závislosť zaťaženia hnanej nápravy na sile v hornom tiahle

Pri uchytení vo variante č. 1 je generovaná sila v hornom tiahle odpovedajúca výslednici síl aplikovaných na pluh totožná so silou v grafe obrázku č. 43. Vyvodené percentuálne vyjadrenie silových účinkov predstavuje odľahčenie nápravy. Toto vertikálne silové pôsobenie je tvorené výlučne tiažou pluhu a odporom pôdy. Postupným premiestnením horného tiahla do druhej a tretej varianty stojanu pluhu malo za následok zmenšenie odľahčovania tejto nápravy. Je zrejmé, že o percentuálnu hodnotu odľahčenia prednej nápravy pre daný prípad je doťažovaná náprava zadná. Postupným narastaním orebného odporu (sily pôsobiacej v horizontálnom smere) klesá i odľahčovanie hnanej nápravy – podobne ako manipuláciou s nastavením upnutia horného tiahla ku pluhu.

Tento jav má priaznivý vplyv na doťaženie zadných kolies traktoru. V skutočnosti by obecné malo pripadať na prednú nápravu traktoru vyššie statické zaťaženie. Z hľadiska dosiahnutia vyšších hodnôt ťahovej sily a nízkeho preklzu je tento stav uspokojivý. Avšak pri braní ohľadu na požiadavky zhutňovania pôdy (minimalizácia) je tento efekt nežiadúci.



Obr. 45 Závislosť rozdielu zaťaženia kolies hnacej nápravy na sile v hornom tiahle

Závislosť rozdielu síl pod kolesami zadnej nápravy je zobrazená na obrázku č. 45. Zmenou uchytenia horného tiahla nastávajú iba rádovo malé zmeny v rozdieloch medzi doťažením pravého a ľavého kolesa traktoru. Omnoho vyšší vplyv má potenciálne zvyšovanie sily odporu pluhu. Narastaním sily v smere  $x$  dochádza k nárastu doťaženia pravého zadného kolesa. V prípade posudzovania traktoru s pripojeným náradím a aplikovanými silami predstavujúcimi tiaž traktoru by boli výsledné hodnoty podstatne rozdielne. Keďže preddefinované ťažisko pre daný typ traktoru je voči osi  $x$  nesymetrické (vyosené smerom vpravo), bolo by po aplikovaní tiažovej sily do bodu ťažiska rádovo zvýšená hodnota vertikálnej reakcie medzi kolesom a podložíom.

## 5 VPLYV UCHYTENIA HORNÉHO TIAHLA NA HNACIU SILU TRAKTORU

Z tabuľky č. 16 je zrejmé, že so zmenou uchytenia horného tiahla sa mení aj zvislá zložka síl pod kolesami traktoru resp. mení sa percentuálne zaťaženie hnacej a hnanej nápravy. Sila vyvedená pod hnacími kolesami nápravy má vplyv na ťahovú silu traktoru. Je však limitovaná utužovaním pôdy. [17]

Pri pohybe traktoru vytvárajú hnacie kolesá šmykové pôdne napätie, závislé od druhu pôdy, jej vlhkosti resp. od kontaktného tlaku medzi pneumatikou a pôdou. Coulombova rovnica, popisujúca maximálnu šmykovú pevnosť pre danú pôdu je nasledovná: [18]

$$\tau = c + q * tg \varphi \text{ [Pa]} \quad (4)$$

Pričom:

c – kohézia pôdy [Pa]

$\varphi$  – uhol vnútorného trenia pôdy [°]

q – kontaktný tlak [Pa]

Hodnoty kohézie a uhlu vnútorného trenia sú závislé na mernej hmotnosti a vlhkosti pôdy. Tieto parametre je dôležité považovať sústavy pôda – hnacie ústrojenstvo. Ako prevádzkové podmienky výpočtu boli zvolené: hlinitá pôda s kohéziou  $c = 30 \text{ kPa}$  a uhlom vnútorného trenia  $\varphi = 30^\circ$ .

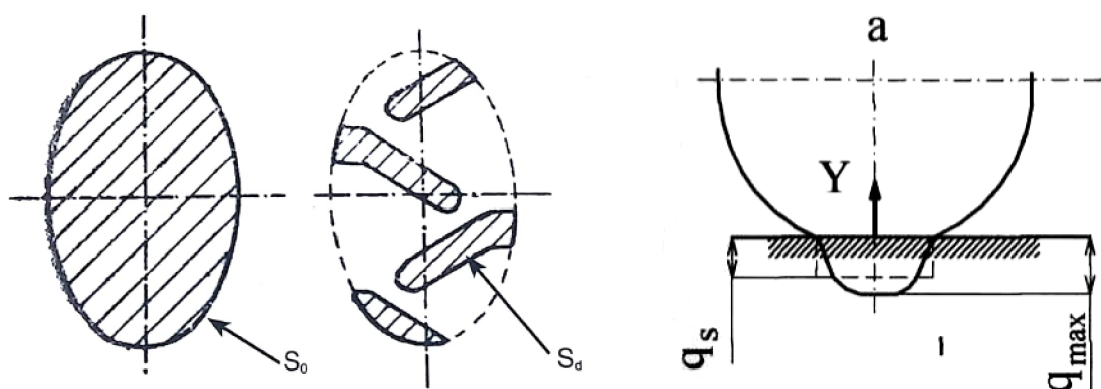
Tab. 17 Hodnoty kohézie a uhlu vnútorného trenia [18]

Druh pôdy	c [kPa]	$\varphi$ [°]
Ílovitá	60-100	20-25
Ílovo hlinitá	40-60	25-28
<b>Hlinitá</b>	<b>25-40</b>	<b>28-32</b>
Piesčito hlinitá	10-25	32-35
Piesčitá	0-10	34-36

Pomer normálovej reakcie (Y) a plochy odtlačku dostávame strednú hodnotu kontaktného tlaku ( $q_s$ ) určenú vzťahom:

$$q_s = \frac{Y}{S_o} \text{ [Pa]} \quad (5)$$

Pre šírku pneumatík 60 cm je ekvivalentná kontaktná plocha  $S_o$  o hodnote  $0,282 \text{ m}^2$ . Pomocou vyššie popísaných vzorcov bude počítaná hnacia sila traktorovej nápravy za rovnakých podmienok. Premennou vo výpočtoch bude nameraná sila v kontaktoch pneumatiky a podložia. Pohyb traktoru je vzhľadom k povahe virtuálneho modelu nepredpokladaný.



Obr. 46 Dosadacia plocha pneumatiky (vľavo) a priebeh kontaktného tlaku medzi pneumatikou a podložkou (vpravo) [1]

Hnacia sila vyvedená pod nápravou je vypočítaná podľa vzorca:

$$F_{hn} = S_o * \tau [N] \quad (6)$$

Pre simuláciu v ľahkej pôde boli pre 3 rôzne varianty vypočítané hnacie sily:

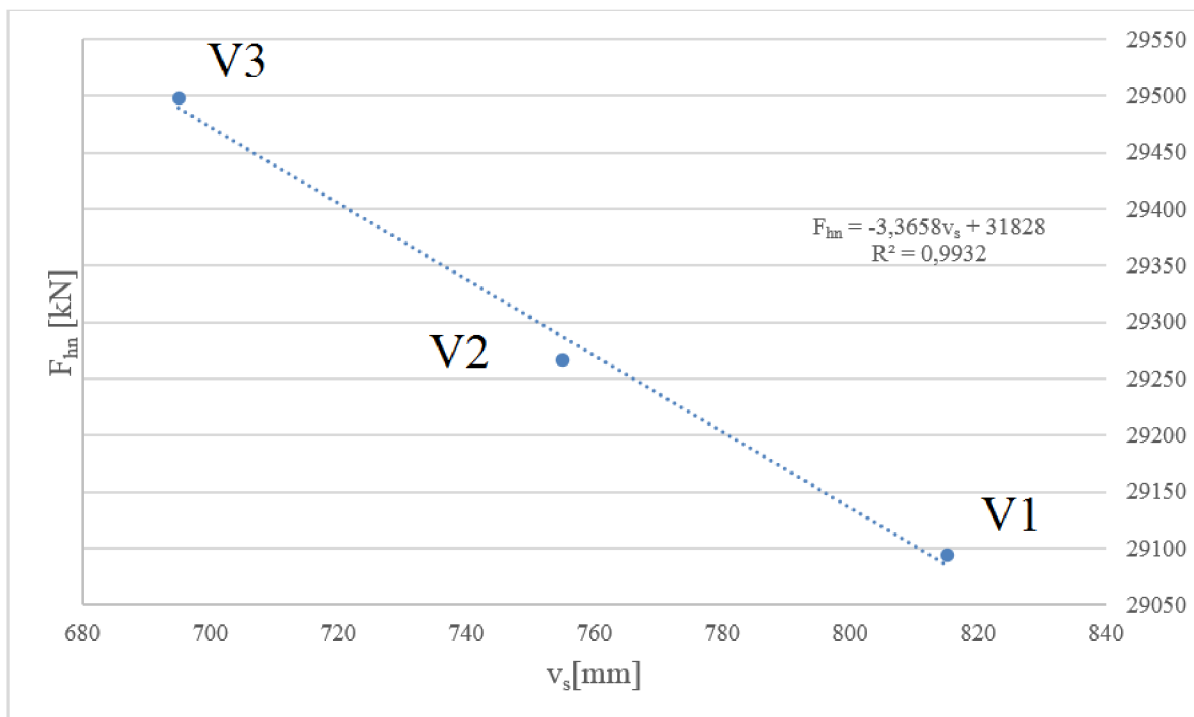
Tab. 18 Výsledné hodnoty hnacej sily pre rôzne varianty pripojenia

Varianta pripojenia	$F_{hn}$ [kN]
1.	29,09
2.	29,27
3.	29,51

Pre skúmané nastavenia sú výsledné hodnoty hnacích síl pod zadnou nápravou rastúce. Obdobný trend sa dá očakávať i pri inom zo zvolených simulácií. Zmenou upevnenia horného tiahla dochádza u každej veľkosti analyzovaného orebného odporu k relatívne malému navýšeniu podielu zaťaženia nápravy. Tento parameter má vplyv na ťahovú silu traktoru vyjadrený rovnicou [1] pre traktor na rovine :

$$F_{tah} = F_{hn} - F_{val} [N] \quad (7)$$

Rovnica (7) je uvažovaná pri pohybe traktoru po rovnom podloží. V skúmanom virtuálnom modeli sa však nepredpokladá pohyb celej sústavy.



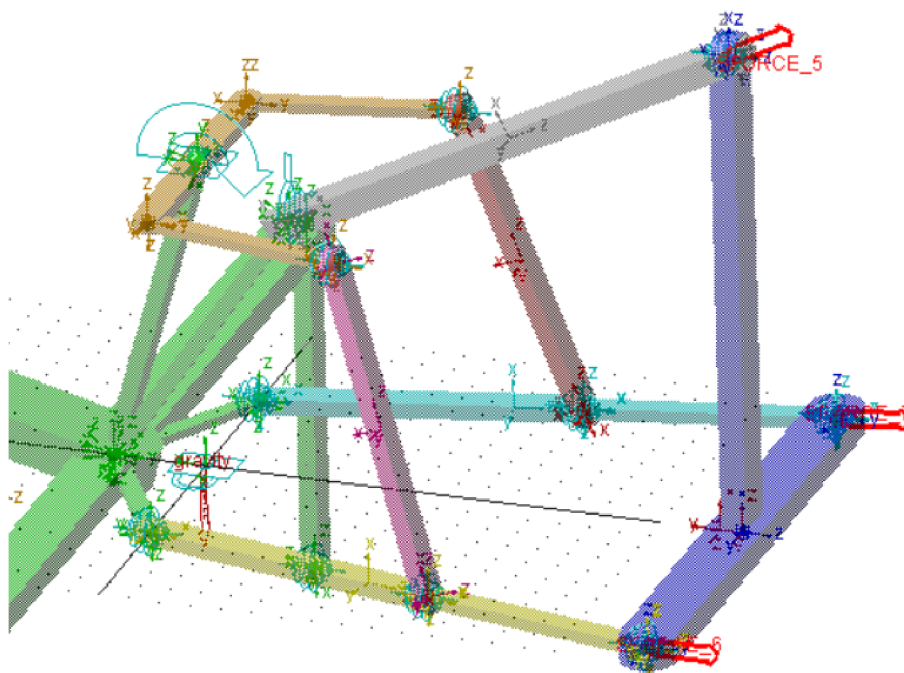
Obr. 47 Závislosť hnacej sily traktoru na spôsobe uchytenia v stojane pluhu



## 6 OSTATNÉ MOŽNOSTI VYUŽITIA MODELU

V prípade rozdielneho prístupu k využitiu virtuálneho modelu v softvéri MSC.ADAMS je možné určiť výsledné sily pod kolesami traktoru aj iným spôsobom. Keďže je model v základe tvorený významnými bodmi traktoru je pôvodná konfigurácia obmeniteľná manuálnym prepisom súradníc bodov či už v prostredí Adams/View alebo v exportovanom príkazovom súbore v textovej forme. Možno tak simulovať podmienky rozdielneho typu traktoru, pluhu resp. predefinovaním základných parametrov orby.

Zdrojové údaje o silách napr. v tiahloch závesu je možné získať terénnym meraním za pomoci aplikovaných tenzometrických snímačov. Tieto hodnoty síl môžu byť ďalej aplikované ako vonkajšie sily priamo v osiach tiahiel závesu. Odpadá tak nutnosť vyvedenia síl na pluh traktoru. Nestálou premennou je v tomto prípade hlavne kolísanie odporu pôdy, ktorý už ako bolo spomínané môže byť spôsobený nekonzistentnosťou zorávanej pôdy, variabilitou vlhkosti atď. I takto vytvorený model však môže poskytnúť spresnenú predstavu o traktorových parametroch.



Obr. 48 Aplikácia síl na tiahla závesu v prostredí ADAMS/View

## ZÁVER

Východiskom pre diplomovú prácu bol návrh implementácie traktoru s pripojeným náradím do prostredia virtuálneho simulovania. Referenčný model vytvorený podľa parametrov skutočného traktoru spolu s trojbodovým závesom a pluhom bol osadený kinematickými väzbami predstavujúcimi skutočné možné pohyby jednotlivých častí.

V prvom prípade bol zisťovaný zmysel a veľkosť silových účinkov v každom z ťahiel traktoru. Ako vstupné parametre z ktorých bolo vychádzané bola tiaž pluhu a veľkosť pôdneho odporu ktorý bol navyšovaný v rozmedzí 6,6 – 39,6 kN. Ako pluh bol zvolený štvorradičný nesený. Zvyšovaním hodnoty odporu pôdy bol dosiahnutý pohyb so silovou výslednicou sústavy síl. Tento jav mal za následok nasledovné: So zvyšovaním pôdneho odporu dochádzalo k zmene zmyslu síl v hornom ťahle. Z pôvodného ťahu sa úmerným navyšovaním dostávalo do bodu, keď už v ťahle pôsobil tlak. Silová výslednica sa dostávala do stavu bližšieho k rovnobežnosti so silou pôdneho odporu. V dolných ťahlach prevládal pri nižšom pôdnom odpore tlak (vyvolaný najmä tiažou pluhu), ktorý sa so zvyšovaním odporu menil na trvalý ťah. V skúmanej konfigurácii sa v oboch horných ťahlach napriek nesymetrickosti pluhu vyskytoval ťah. Špecifickým prípadom, ktorý by potenciálne mohol nastať je prípad výskytu silovej výslednice pod okamžitým pólom otáčania. Zmeny zmyslu síl sú práve u mechanických regulačných systémov nežiadúce a môžu mať vplyv na ich citlivosť.

Z hľadiska silových reakcií pod kolesami traktoru pre skúmaný prípad platí: Vyvedené silové reakcie pod ľavým kolesom hnacej nápravy sú vyššie opäť z dôvodu nesymetrie pluhu. Kontinuálnym zvyšovaním pôdneho odporu sa následne doťahuje predná (hnaná) náprava a zadná (hnacia) odľahčuje – o rovnakú hodnotu. Daný jav sa v simulácii deje v rádovo percentách.

Posledným z analyzovaných stavov bola poloha uchytenia horného ťahla v stojane pluhu. Skúmané boli tri rôzne varianty. Zmenou uchytenia ťahla dochádzalo k navýšeniu sily v hornom ťahle. I ostatné ťahla závesu vykazovali zmeny silových reakcií. Dôležitejším zistením však boli vyvolané zmeny percentuálneho doťaženia hnacej nápravy traktoru. Doťaženie nápravy so zmenou uchytenia narastalo – dochádzalo k čiastočnému presunu záťaže vyvolanej na prednú nápravu.

Z vyjadrení grafických závislostí vyplýva že so zmenou uchytenia v stojane dochádzalo k navyšovaniu sily v hornom ťahle o cca 2 kN a zároveň bola priťažovaná hnacia náprava. Tento výsledok bol ďalej rozoberaný v závislosti na hnacej sile traktoru, ktorá má vplyv na ťahovú silu. Pomocou výpočtov bolo následne dokázané, že vplyv uchytenia horného ťahla má svojím spôsobom vplyv na veľkosť hnacej sily. Jej nárast však nebol markantný. Medzi krajnými bodmi pripojenia dochádzalo k nárastu pod oboma kolesami v stovkách kN.

Ako posledné boli vyslovené závery o možnom využití vytvoreného modelu v budúcnosti. Nadobudnuté poznatky by mohli byť využité v oblasti konštrukcie regulácie trojbodových závesov. Hlavným z nedostatkov pri simuláciách poľných operácií môže byť nepredikovateľnosť charakteru pôdy. Jej možné lokálne zmeny vlhkosti, zloženia, atď. majú nezanedbateľný vplyv na vyvolané silové účinky.

Obecne možno vysloviť tvrdenie že na silové účinky traktoru počas orby pôsobí enormné množstvo faktorov. V publikácii [1] možno nadobudnúť informácie o rôznych vplyvoch. Hustenie pneumatík, dĺžka horného ťahla konštrukcia podvozku, typ prevodového ústrojenstva

sú ďalšími z faktorov vplývajúcimi na výstupné parametre. Dosiahnutie ideálnych výsledkov však predovšetkým závisí na vodičovi traktoru a spôsobe akým nastaví trojbodový záves, resp. akým spôsobom bude používať prvky regulácie.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BAUER, František. *Traktory a jejich využití*. 2. vyd. Praha: Profi Press, 2013. ISBN 978-80-86726-52-6.
- [2] LILJEDAHL, John B., Paul K. TURNQUIST a David W. SMITH. *Tractors and Their Power Units*. Fourth Edition. 1996. ISBN 978-0929355726.
- [3] PÁLTIK, J. a kol. *Stroje pre rastlinnú výrobu, obrábanie pôdy, sejba*. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, 2005. ISBN 80-8069-200-9.
- [4] JAKSCH, Andreas. Schnittstelle Heckhydraulik. In: *Oekl.at* [online]. 2014 [cit. 2018-02-14]. Dostupné z: <http://oekl.at/wp-content/uploads/2014/12/Pr%C3%A4sentation-Jaksch-John-Deere-Lagerhaus.pdf>
- [5] BROWN, Candace. *Harry Ferguson and the Three-Point Hitch* [online]. In: . 2015 [cit. 2018-02-14]. Dostupné z: <https://www.antiquepower.com/normal-blog/2015/8/3/harry-ferguson-and-the-three-point-hitch>
- [6] BAUER, František. *Hydraulické systémy zemědělských strojů*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. ISBN 80-7157-079-6.
- [7] BAUER, František a Igor RYŠAVÝ. *Hydraulické systémy mechanizačních prostředků*. VŠZ, 1980.
- [8] KOVAČEV, Igor. *Impact of Electronic-Hydraulic Hitch Control on Rational Exploitation of Tractor in Ploughing* [online]. , 287-293 [cit. 2018-02-14]. ISSN 0562-1887. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/86a3/3d32df7a5f0666cfd0805e8f744038fbb98e.pdf>
- [9] Zetor Forterra HD 150. In: *Landwirt.com* [online]. [cit. 2018-02-14]. Dostupné z: <https://www.landwirt.com/en/used-farm-machinery,1880293,Zetor-Forterra-HD-150.html>
- [10] Electronic-hydraulic hitch control for tractors. In: *Airlinehyd.com* [online]. [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: [https://www.airlinehyd.com/pdfs/Hydraulic/RexrothBosch/Bosch\\_PDF/Moble%20hydraulics/Electronic-hydraulic%20hitch%20control%20for%20tractors%201\\_0.pdf](https://www.airlinehyd.com/pdfs/Hydraulic/RexrothBosch/Bosch_PDF/Moble%20hydraulics/Electronic-hydraulic%20hitch%20control%20for%20tractors%201_0.pdf)
- [11] Forterra HD. In: *Cals.cz* [online]. 2014 [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: [http://www.cals.cz/zetorservice/files/1/Forterra\\_HD\\_1\\_2014\\_CZ.pdf/zetorservice/files/1/Forterra\\_HD\\_1\\_2014\\_CZ.pdf](http://www.cals.cz/zetorservice/files/1/Forterra_HD_1_2014_CZ.pdf/zetorservice/files/1/Forterra_HD_1_2014_CZ.pdf)
- [12] Forterra HD Cabin view. In: *Technikboerse* [online]. [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: [https://www.technikboerse.com/thumbnails/49022453/4827924/e0f4d988a496af8e705faea3695ea9b\\_800x600.jpg](https://www.technikboerse.com/thumbnails/49022453/4827924/e0f4d988a496af8e705faea3695ea9b_800x600.jpg)
- [13] Msc Adams Logo. In: *Gasimli* [online]. 2016 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.gasimli.info/msc-adams-logo.html>
- [14] HAJŽMAN, Michal. Využití systému MSC.ADAMS. In: *Kme.zcu.cz* [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://www.kme.zcu.cz/download/artattach/37-teorie-4-5.pdf>

- [15] Gorjatschkin W. 1927: *Theorie des Pfluges – Grundlagen zu einer systematischen Berechnung der Pflüge*, Industrie-Verlag, Moscov.
- [16] *Supplemental Adams Tutorial Kit for Design of Machinery Course Curriculum* [online]. In: . 2017 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: [http://www.mscsoftware.com/sites/default/files/Book\\_Adams-Tutorial-ex17-w.pdf](http://www.mscsoftware.com/sites/default/files/Book_Adams-Tutorial-ex17-w.pdf)
- [17] PAVEL SEDLÁK a FRANTIŠEK BAUER. Effect of contact surface of tyres on tractor pulling properties. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* [online]. Mendel University Press, 2004, **52**(1), 209-216 [cit. 2018-05-16]. DOI: 10.11118/actaun200452010209. ISSN 1211-8516
- [18] Grečenko, A.: *Kolové a pásové traktory*, SZN Praha, 1963, 402s.
- [19] Nesené pluhy SERVO 25. In: *Poettinger.at* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://www.poettinger.at/cs\\_cz/Produkte/Detail/510/nesene-pluhyservo-25](https://www.poettinger.at/cs_cz/Produkte/Detail/510/nesene-pluhyservo-25)
- [20] PORTEŠ, Petr, BAUER, František a ČUPERA, Jiří. Laboratory-experimental verification of calculation of force effects in tractor's three-point hitch acting on driving wheels. *Soil and Tillage Research*. 2013, 128(april), 81-90. DOI: 10.1016/j.still.2012.10.007. ISSN 01671987. 12. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198712002279>.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

b	[m]	Šírka brázdy, záber orebného telesa
c	[Pa]	Kohézia pôdy
CF	[-]	Bod kyvu nápravy
CTFL	[-]	Miesto kontaktu ľavého predného kolesa a podložia
CTFR	[-]	Miesto kontaktu pravého predného kolesa a podložia
CTRL	[-]	Miesto kontaktu ľavého zadného kolesa a podložia
CTRR	[-]	Miesto kontaktu pravého zadného kolesa a podložia
d <sub>1</sub>	[mm]	Priemer otvoru dolného tiahla
d <sub>2</sub>	[mm]	Priemer čapu horného tiahla
d <sub>3</sub>	[mm]	Priemer otvoru gule dolného tiahla
d <sub>4</sub>	[mm]	Priemer čapu lišty
EHS		Elektrohydraulické systémy
F <sub>1</sub>	[N]	Odpor pluhu vlečeného vo vyoranej brázde
F <sub>2</sub>	[N]	Odpor pluhu vynaložený na odrezávanie a deformáciu skyvy
F <sub>3</sub>	[N]	Odpor pluhu na uvedenie skyvy do pohybu a jej preklápanie
F <sub>b</sub>	[N]	Bočná sila pluhu
F <sub>h</sub>	[N]	Silové účinky v hornom tiahle
F <sub>hn</sub>	[N]	Hnacia sila
F <sub>ld</sub>	[N]	Silové účinky v ľavom dolnom tiahle
F <sub>lz</sub>	[N]	Silové účinky v ľavom zdvíhacom tiahle
F <sub>max</sub>	[N]	Maximálna hodnota sily pre daný priebeh
F <sub>min</sub>	[N]	Minimálna hodnota sily pre daný priebeh
F <sub>p</sub>	[N]	Sila orebného odporu
F <sub>pd</sub>	[N]	Silové účinky v pravom dolnom tiahle
F <sub>pz</sub>	[N]	Silové účinky v pravom zdvíhacom tiahle
F <sub>tp</sub>	[N]	Tiaž pluhu
F <sub>v</sub>	[N]	Silová výslednica
F <sub>v_priemer</sub>	[N]	Priemerná hodnota silovej výslednice
F <sub>ZLP</sub>	[N]	Zvislý silový účinok pod ľavým predným kolesom traktoru
F <sub>ZLZ</sub>	[N]	Zvislý silový účinok pod ľavým zadným kolesom traktoru
F <sub>ZPP</sub>	[N]	Zvislý silový účinok pod pravým predným kolesom traktoru
F <sub>ZPZ</sub>	[N]	Zvislý silový účinok pod pravým zadným kolesom traktoru

h	[m]	Hĺbka orby
$k_o$	[N.m <sup>-2</sup> ]	Merný odpor pôdy
MBS		Multi body system
n	[-]	Počet orebných telies
$q_s$	[Pa]	Stredná hodnota kontaktného tlaku
$S_o$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha odtlačku
T	[-]	Ťažisko traktoru
$v_s$	[mm]	Výška stojanu pluhu
TBZ		Trojbodový záves
Y	[N]	Normálová silová reakcia
Z1	[-]	Označenie pripojenia ľavého dolného tiahla k telu traktoru
Z10	[-]	Označenie pripojenia horného tiahla a tela traktoru
Z11	[-]	Označenie pripojenia horného tiahla a pluhu
Z2	[-]	Označenie pripojenia pravého dolného tiahla k telu traktoru
Z3	[-]	Označenie pripojenia ľavého dolného a zdvíhacieho tiahla
Z4	[-]	Označenie pripojenia pravého dolného a zdvíhacieho tiahla
Z5	[-]	Označenie pripojenia ľavého dolného tiahla a pluhu
Z6	[-]	Označenie pripojenia pravého dolného tiahla a pluhu
Z7	[-]	Označenie pripojenia ľavého zdvíhacieho tiahla s ramenami zdvíhacieho ústrojenstva
Z8	[-]	Označenie pripojenia pravého zdvíhacieho tiahla s ramenami zdvíhacieho ústrojenstva
Z9	[-]	Označenie pripojenia ramien zdvíhacieho ústrojenstva a tela traktoru
$\tau$	[Pa]	Šmyková pevnosť
$\varphi$	[°]	Uhol vnútorného trenia pôdy