

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Prognóza přípustných limitů zatížení zemědělských pneumatik

Diplomová práce

Autor práce: Andrej Strach

Vedoucí práce: Ing. Patrik Prikner, Ph.D.

PRAHA 2016

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Andrej Strach

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Prognóza přípustných limitů zatížení zemědělských pneumatik

Název anglicky

Prediction of permitted load limits for agricultural tyres

Cíle práce

Hlavním cílem práce je vytvořit ucelený přehled zemědělských pneumatik určených pro zemědělské traktory nejvyšší výkonové třídy. Dílčí cíl práce je sofistikovaně zhodnotit zásadní parametry pro výpočet styčné plochy pneumatiky s ohledem na individuální kombinaci tlaku huštění a zatížení.

Metodika

1. Vypracování literární rešerše na základě doporučené vědecké literatury a dalších technických podkladů.
2. V rámci metodiky bude představen současný trend v oblasti stanovení rozsahu poškození půdního profilu vlivem pojezdu těžké mechanizace podle nejnovější dostupné literatury, zahrnující detailní specifikace a důkladný rozbor všech parametrů.
3. Na základě metodiky budou vybrány konkrétní terénní pneumatiky u nichž budou přehodnoceny provozní parametry s ohledem na zobecnění vztahu pro stanovení styčné plochy pneumatiky s odkazem na platné zásady v oboru terramechanika.
4. Laboratorní činnost bude testování vybraných zemědělských pneumatik v daných podmínkách a poskytnou výsledky pro vyčíslení charakteristické deformace pneumatiky v závislosti na změně velikosti styčné plochy pneumatiky.
5. V diskuzi bude proveden rozbor a zhodnocení získaných podkladů v kontextu současné technické úrovně zemědělských vozidel.
6. Závěrečná část práce bude obsahovat možná doporučení autora.

Doporučený rozsah práce

45-50 stran

Klíčová slova

kompakce půdy, styčná plocha pneumatiky, kontaktní tlak

Doporučené zdroje informací

Crolla D.A. Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body. 1th. Ed. 850s.

Butterworth-Heinemann 2009. ISBN: 978-3895783715.

Grečenko A. Vlastnosti Terénních Vozidel. 118s. VŠZ 1994. ISBN: 80-213-0190-2.

Karafiath L.L., Nowatzki E.A. Soil Mechanics for Off-Road Vehicle Engineering. 1th Ed. 516s. Trans Tech Publications 1978. ISBN: 0-87849-020-5.

Wong J.Y. Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering, 2nd Ed: Terrain Behaviour, Off-Road Vehicle Performance and Design. 488s. Wiley 2009. ISBN: 978-0750685610.

Wong J.Y. Theory of Ground Vehicles. 4th Ed. 592s. Wiley 2008. ISBN: 978-0470170380.

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Patrik Prikner, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 30. 3. 2015

doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 4. 2015

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Patrika Priknera, Ph.D. a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Abstrakt:

Hlavním cílem této diplomové práce je vytvoření uceleného přehledu zemědělských pneumatik určených pro zemědělské traktory nejvyšší výkonové třídy a jejich porovnání. Dílčí část práce se zabývá popisem a zhodnocením zásadních parametrů pro výpočet styčné plochy pneumatik. V první části práce byla vypracována literární rešerše dané problematiky. Poté byl zpracován přehled a porovnání zemědělských pneumatik, následován laboratorním testováním zaměřeným na stanovení styčné plochy pneumatiky s ohledem na individuální kombinaci tlaku huštění a zatížení. První část testovací procedury byla zaměřena na ověření funkčnosti a přesnosti plantografu. Druhá část testovací procedury zahrnovala odhad vztahu mezi zatížením kola a rozložením tlaku v kontaktní ploše dezénu pneumatiky při statickém zatížení. Poslední část testovací procedury spočívala v porovnání statického a dynamického zatížení pneumatiky. Naměřené a vypočítané hodnoty byly zpracovány do příslušných tabulek a grafů.

Klíčová slova: kompakce půdy, kontaktní tlak, styčná plocha pneumatiky

Summary:

The main objective of this thesis is the analysis and comprehensive review of agricultural tires designed for agricultural tractors highest performance class. Another part deals with the description and evaluation of major parameters for calculating the contact surfaces of tires with respect to an individual combination of inflation pressures and loads. The first part was prepared by literature review. Followed by laboratory testing focused mainly on determining the tire contact area with respect to an individual combination of inflation pressures and loads. The first part of the testing procedure was aimed at verifying the functionality and accuracy of the Plantograf. The second part of the test procedure included the estimate of the relationship between the wheel load and pressure distribution in the contact area of the tread of the tire under static loading. The last part of the test procedure consists in comparison of static and dynamic load tires. The measured and calculated values were processed into the relevant tables and graphs.

Key words: soil compaction, contact pressure, tyre contact area

Obsah

1.	Úvod	1
1.1	Cíl práce	2
1.2	Metodika práce	2
2.	Kompakce půdy	3
2.1	Měření kompakce půdy	4
2.2	Negativní vlivy zemědělských strojů na půdu	7
2.3	Minimalizace účinků zhutnění	8
2.4	Kontaktní tlaky	9
2.4.1	Empirické modely pro výpočet kontaktního tlaku	10
2.5	Styčná plocha pneumatiky	11
2.5.1	Zásadní parametry pro výpočet styčné plochy pneumatik	13
2.6	Normálové napětí	16
2.6.1	Měření normálového napětí v půdě pomocí senzorů	20
2.7	Smykové napětí	21
2.8	Analytické modely kompakce půdy	23
2.8.1	Metoda Simplified	24
2.8.2	Model SOCOMO	26
2.8.3	Model SoilFlex	28
2.8.4	Model FRIDA	29
2.9	3D otisk pneumatiky	30
3.	Zemědělské pneumatiky	33
3.1	Konstrukce a typy pneumatik	33
3.1.1	Radiální a diagonální pneumatika	33
3.1.2	Flotační a terra pneumatiky	34
3.2	Moderní zemědělské pneumatiky	34
3.3	Centrální systémy huštění pneumatik	35

3.3.1	Integrovaný systém centrálního huštění pneumatik	36
3.3.2	Dodatečně instalované systémy centrálního huštění pneumatik	37
3.4	Dvoumontáže a zatěžování kapalinou	37
3.5	CC rating.....	39
4.	Přehled zemědělských pneumatik a jejich porovnání.....	41
5.	Laboratorní testování.....	49
5.1	Materiály a metody	49
5.2	Výsledky a diskuze	52
6.	Závěr.....	63
	Seznam použité literatury	65
	Seznam symbolů.....	70
	Seznam grafů	71
	Seznam obrázků.....	71
	Seznam tabulek.....	73
	Seznam příloh.....	73

1. Úvod

Poškození půdního profilu je celosvětově rozšířený problém. Hrozba zhutňování půdy je dnes větší než v minulosti díky stále se zvyšujícím výkonům a hmotnostem zemědělských strojů a techniky. Používáním těžkých zemědělských strojů dochází k negativnímu zhutnění půdního profilu. V odvětví ochrany zemědělské půdy před nežádoucím zhutněním platí obecný trend snížit limitní kontaktní tlak na minimální hodnotu.

Terramechanika je vědecko-technický obor, který sleduje a objasňuje vztah mezi vozidlem a půdou při pohybu vozidla v terénu. V užším smyslu se terramechanika zabývá studiem a výkladem jevů, ke kterým dochází při styku pojezdového ústrojí vozidel s půdou. Obchod se zemědělskými pneumatikami poskytuje rozsáhlý výběr velikostí a typů s ohledem na požadavky zemědělské techniky. Pro nejvyšší výkonovou třídu traktorů jsou určeny především moderní radiální pneumatiky, které vynikají vysokou nosností a také velmi dobrými trakčními a záběrovými vlastnostmi. Konstrukce zemědělských pneumatik se neustále zdokonaluje a přizpůsobuje požadavkům moderních strojů, umožňuje pracovat při velmi nízkém tlaku huštění, který má vliv na snížení středního kontaktního tlaku a tím dochází ke zmírnění nežádoucí kompakce půdního profilu. Zemědělské pneumatiky s větší styčnou plochou dosahují lepších trakčních a tahových vlastností s nižším prokluzem.

Diplomová práce je rozdělena do několika hlavních kapitol. První kapitola pojednává o kompakci půdy a možnostech jejího měření. Jaký negativní vliv mají zemědělské stroje na půdu a jaké kontaktní tlaky působí mezi pneumatikou a půdou. Dále pak práce obsahuje zásadní parametry pro výpočet styčné plochy pneumatiky, popis normálového napětí, smykového napětí a analytické modely kompakce půdy. Praktická část se věnuje přehledu a porovnání zemědělských pneumatik pro nejvyšší výkonové třídy. Poslední kapitoly zahrnují měření zásadních parametrů pro výpočet styčné plochy pneumatiky, výsledky a diskuze. Z provedeného laboratorního měření by mělo být patrné jaký vliv má tlak huštění a zatížení pneumatik na vytváření styčné plochy pneumatiky a kontaktního tlaku. Diplomová práce obsahuje i návrh souboru opatření ke snížení nežádoucí kompakce půdy.

1.1 Cíl práce

Práce *Prognóza přípustných limitů zatížení zemědělských pneumatik* si klade za cíl vytvořit ucelený přehled zemědělských pneumatik určených pro zemědělské tahače nejvyšší výkonové třídy. Mezi další cíle patří sofistikovaně zhodnotit zásadní parametry pro výpočet styčné plochy pneumatiky s ohledem na individuální kombinaci tlaku huštění a zatížení.

1.2 Metodika práce

Mezi hlavní metody využitě při zpracování diplomové práce patří vypracování literární rešerše na základě doporučené vědecké literatury a dalších technických podkladů. V rámci pracovního postupu bude představen současný trend v oblasti stanovení rozsahu poškození půdního profilu vlivem pojezdu těžké mechanizace podle nejnovější dostupné literatury, která zahrnuje detailní specifikaci a důkladný rozbor všech parametrů. Na základě metodiky bude dále vybrána konkrétní terénní pneumatika, u které budou přehodnoceny provozní parametry s ohledem na zobecnění vztahu pro stanovení styčné plochy pneumatiky s odkazem na platné zásady v oboru terramechanika. Laboratorní činnost bude zahrnovat testování vybrané zemědělské pneumatiky v daných podmínkách a poskytne výsledek pro vyčíslení charakteristické deformace pneumatiky v závislosti na změně velikosti styčné plochy pneumatiky. Dále pak bude v diskuzi proveden rozbor a zhodnocení získaných podkladů v kontextu současné technické úrovně zemědělských vozidel.

2. Kompakce půdy

Kompakce neboli zhutnění půdy je proces, při kterém dochází ke stlačování půdy, tvorbě krust na povrchu a tím i k degradaci fyzikálních vlastností půdy. Zhutnění půdy negativně působí na produkční schopnost půdy, jelikož zhutněná půda obsahuje méně vody a je narušen vzdušný, vodní a teplotní režim půdy. Zhutnění půdy je způsobeno koly nebo pásy těžké moderní zemědělské techniky, ale také pasoucím se dobyt看em nebo těžkými vrstvami sněhu a ledu. Na našem území je zhutněním ohroženo 45 % zemědělské půdy, (LHOTSKÝ, 2000).

Hlavními příčinami kompakce půdy je působení tlaků pojezdového ústrojí zemědělské techniky a strojů na půdu. Mezi půdy náchylnější k utužení patří vlhké a mokré půdy, a také půda uvolněná orbou. Tyto půdy ztrácí vlastní pevnost a tudíž i schopnost vydržet tlakové síly, jimiž působí zemědělská technika. Nicméně určité zatížení půdy může vyvolávat rozdílné reakce na půdu na daném místě v průběhu roku, jelikož proces zhutnění půdy závisí na momentální vlhkosti a stupni utužení půdy. Další parametry používané pro určení míry zhutnění půdy jsou objemová hmotnost a hustota, pórovitost, minimální vzdušná kapacita atd. Například písčité půdy mají vyšší objemovou hmotnost než půdy jílovité, které obsahují mnoho malých pórů. Hodnoty objemové hmotnosti jílovitých hlín a naplavenin se pohybují v rozmezí od 1000 do 1600 kg.m⁻³ v závislosti na jejich stavu a historii. Písky a písčité hlíny nabývají hodnot od 1200 do 1800 kg.m⁻³ a půdy ohrožené zhutněním mohou vykazovat hodnoty objemové hmotnosti převyšující 2000 kg.m⁻³, (BRADY, 1974; RAPER, 2005).

Zemědělství je v současnosti naprosto závislé na provozu vozidel a zemědělské techniky jako jsou traktory a kombajny, bez kterých by moderní pracovní postupy neexistovaly. Nicméně tato vozidla a technika postupně nabývá na rozměrech a hmotnostech a tím se zvyšuje stupeň kompakce půd. V důsledku zvýšeného či opakovaného zatížení může docházet k povrchovým, ale i podpovrchovým deformacím, které mohou setrvat i několik let, (RAPER, 2005).

Zhutňování půd je globální problém, který ohrožuje nejen úrodnost půd, ale také pracovní výkonnost, spotřebu pohonných hmot a mnoho dalších elementů. Zatěžování kol zemědělské techniky se za posledních 20 let zvýšilo u nejtěžších strojů z 5 na 15 a více tun. Díky tomu dochází ke zhutňování půdy v hloubce až 60 cm pod povrchem, tudíž následné opatření či návrat do předchozího stavu je značně komplikovanější. Hlavními faktory, kterými

lze ovlivnit stlačování půdy v hloubce jsou: střední kontaktní tlak q_s , styčná plocha S_o , stav půdy (vlhkost, struktura, typ) a celkové zatížení F_z .

Výzkumy dokázaly, že kompakce neboli zhutnění půdy má za následek snížení pórovitosti půdy, zvýšení objemové hmotnosti půdy a při vyšším stupni kompakce dochází k deformaci půdy v hlubších vrstvách. To vše vede ke zhoršování fyzikálních vlastností půdy, např. k omezené propustnosti vody a vzduchu. Limitní hodnoty některých fyzikálních vlastností zhutnělé půdy znázorňuje tabulka č. 1. Při překročení těchto kritických hodnot dochází ke škodlivému působení na rostliny a půdní agregáty, (JAVŮREK, 2008).

Tabulka č. 1 Limitní hodnoty některých fyzikálních vlastností zhutnělé půdy

Fyzikální vlastnost	Půdní druh (obsah částic pod 0,01 mm v %)					
	J > 75	JV - JH 75-46	H 45 - 39	PH 30 - 21	HP 20 - 11	P < 10
Objemová hmotnost po vysoušení (g.cm^{-3})	> 1,35	> 1,40	> 1,45	> 1,55	> 1,60	> 1,70
Pórovitost (% objem)	< 48	< 47	< 45	< 42	< 40	< 38
Penetrační odpor půdy (MPa)	2,8 - 3,2	3,3 - 3,7	3,8 - 4,2	4,5 - 5,0	5,5	> 6,0
Při vlhkosti % hmot.	28 - 24	24 - 20	18 - 16	15 - 13	12	10

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

Zdroj: Vlastní zpracování dostupné z Lhotský, J.: Zhutňování půd a opatření proti němu. Stud. inform. ÚZPI Praha, ř. Rostl. Výr., 2000, č.7, 61 s.

Některé vlastnosti půd mají stálou charakteristiku a významně se nemění jak při pojezdu, tak i při suchu, mokru či zhutněné a nakypřené půdě. Patří sem především velikost a tvar částic, minerální složení, konzistentní limity a měrná hmotnost. Pomocí těchto vlastností lze identifikovat různé typy půd v přírodě. K odhadu potencionálního chování zeminy, tedy skutečného půdního chování a jeho reakce na určité akce, se využívají takzvané přechodové charakteristiky půdy, které naznačují proměnlivost a to zejména na povrchu za daných podmínek pro prostředí a zatížení. Jedná se především o fyzikální vlastnosti zmíněné v tabulce č. 1, ale také o soudružnost, plasticitu, kohezi a další, (KARAFIATH, 1978; LHOTSKÝ, 2000).

2.1 Měření kompakce půdy

Prímá metoda měření zhutnění půdy spočívá v odebrání půdních vzorků do Kopeckého fyzikálních válečků a následném laboratorním zkoumání, kde dochází

ke zvážení vzorku v původním stavu, k vysušení vzorku v peci při 105 °C po dobu 24 hodin a ke stanovení základních fyzikálních vlastností půdy, jako je objemová hmotnost, vlhkost, pórovitost, plasticita, soudržnost atd., (POKORNÝ, 2007).

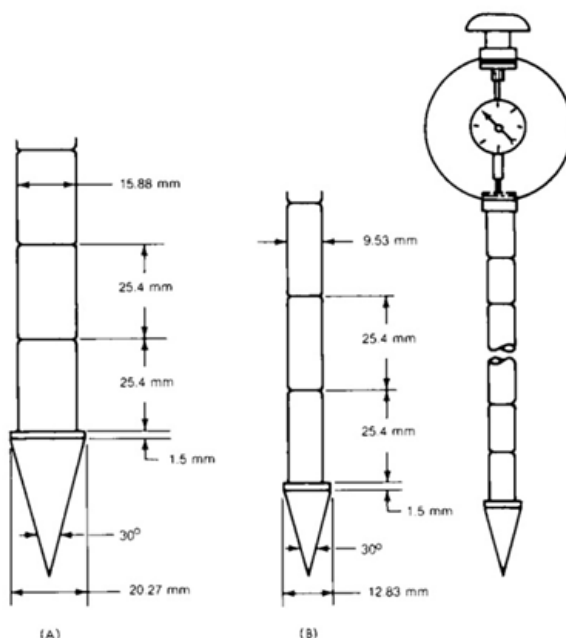
Objemová hmotnost půdy udává hmotnost objemové jednotky půdy v neporušeném, přirozeném stavu a lze ji vyjádřit podílem hmotnosti půdní hmoty a celkového objemu. Mění se v závislosti na vlhkostních podmínkách v půdě během roku. Hodnota objemové hmotnosti půdy je vždy nižší než hodnota měrné hmotnosti půdy jelikož obsahuje póry, resp. volná místa vyplněna vodou a vzduchem. Rozděluje se na redukovanou a neredukovanou objemovou hmotnost a měří se v g.cm^{-3} , kg.m^{-3} nebo Mg.m^{-3} , (ASAE, 1999).

Půdní vlhkost vyjadřuje množství vody v půdě. Rozděluje se na hmotnostní a objemovou vlhkost. Hmotnostní vlhkost znázorňuje podíl hmotnosti vody a hmotnosti vysušeného vzorku v hmotnostních procentech. Objemová vlhkost vyjadřuje poměr objemu vody k celkovému objemu půdy v objemových procentech. Vlhkost půdy je z vlastností půdy ovlivněna zejména pórovitostí, texturou a obsahem humusu v půdě. S rostoucí vlhkostí půdy při nezměněné pórovitosti klesá provzdušnění půdy. Voda je jednou z nejdůležitějších složek půdy a její obsah je závislý především na meteorologických podmínkách a na struktuře a stavu půdy, (JANDÁK, 2007). S půdní vlhkostí souvisí i retenční křivka, což je v podstatě graf znázorňující závislost sacího tlaku půdy nebo tlakové výšky na objemové vlhkosti půdy. Popisuje schopnost půdy zadržovat vodu při různé vlhkosti a bývá označována jako retenční čára vlhkosti, popřípadě s logaritmickou osou potenciálu jako pF-křivka. Rozdíl mezi průběhem křivky při ovlhčování a odvodňování půdy se nazývá hystereze, (YANG, 2015).

Pórovitost vyjadřuje celkové procentuální množství pórů neboli volného prostoru v půdě, který není vyplněn pevnou fází. Póry jsou rozdílného tvaru a velikosti a jsou různě propojeny. Umožňují nejen proudění vzduchu a vody v půdě, ale také v nich probíhají látkové přeměny a reakce mezi mikroorganismy a kořínky rostlin. Pórovitost zemědělských půd se pohybuje v rozmezí 40 - 50 %, lze jí však významně ovlivnit zpracováním půdy. Hodnoty pórovitosti půd umožňují objektivně posoudit kyprost či ulehlost půdy. Metody stanovení půdní pórovitosti vycházejí buďto z objemu pórů a celkového objemu půdy v přirozeném uložení nebo z objemové a měrné hmotnosti půdy. (NIMMO, 2004; POKORNÝ, 2007).

Nepřímá metoda využívá jeden z hlavních indikátorů zhutnění, penetrační odpor, který signalizuje stupeň obtížnosti zpracování půdy. Penetrační odpor je měřen pomocí půdního

kuželového penetrometru (viz. obrázek č. 1), který umožňuje stanovit vertikální zhutnění půdy. Hlavní částí penetrometru je jehla s kuželovou hlavicí, která se zatlačuje do půdy, dále je vybaven měřidlem zahloubení, siloměrem a vyhodnocovacím softwarem. Tlak vyvinutý při zatlačování hrotu přístroje do půdy je v jednotlivých hloubkách snímán a přepočítáván na penetrační odpor, který se vyjadřuje v kilopaselech. Mezi odporem půdy a stupněm utužení je přímá závislost, která je však ovlivněna okamžitou vlhkostí půdy. Zvyšováním půdní vlhkosti se snižuje penetrační odpor. Tato metoda je řízena normou ASAE, která určuje úhel kužele a plochy základny používané pro lehké a těžké půdy. Úhel kužele je pro oba typy půdy stejný a to 30° , plocha základny pro lehké půdy je $3,23 \text{ cm}^2$ (viz. obrázek č. 1 A) a pro těžké půdy $1,29 \text{ cm}^2$ (viz. obrázek č. 1 B), (ASAE, 1999). Jedním z hlavních důvodů zavedení penetrometrického měření, byl stále se zvyšující požadavek pro určení a měření objemové hmotnosti půdy.



Obrázek č. 1. Schéma kuželového penetrometru

Zdroj: ASAE. 1999. ASAE Standards 4E. EP291.2: terminology and definitions for soil tillage and soil-tool relationships. ASAE, Str. 114. (upraveno).

Penetrometrické měření mechanických vlastností terénu, a to nejen pro zemědělské činnosti, ale také pro zkoumání pohybu vozidla v terénu, se v poslední době využívají nejvíce. Výběr metody závisí na zvoleném přístupu zkoumání interakce vozidla s terénem. Penetrometr využívá empirických vztahů k určení terénních podmínek pro zkoumání mobility vozidla, (WONG, 2009). V současnosti se však nejvíce využívá kuželová penetrační zkouška (CPT - Cone Penetration Tests) založena na použití hydraulické jednotky. Tato jednotka vtlačuje sondážní hrot kužele do půdy v pravidelných intervalech. Sílu podloží vyjadřuje síla,

kteřou je nutné vyvolat na zatlačení kuželu do půdy, neboli odpor proti vnikání kužele. Síla, která působí na kovovou sondovací tyč, vyjadřuje hodnotu celkového tření. Při používání mechanického kuželového penetrometru je sondážní hrot kužele zatlačován v intervalech 20 centimetrů, zatímco elektrický kuželový penetrometr měří v intervalu 2 centimetrů. Metodu CPT lze vylepšit například piezometrem k získání dat o pórovitosti půdy a tlaku vody nebo se také využívá akustické vrtání při neprůchodnosti půdy, označováno SoniCPT, (KARAFIATH, 1978; GARCIANO et.al., 2007).

2.2 Negativní vlivy zemědělských strojů na půdu

Produkce zemědělské výroby je v dnešní době závislá zejména na dopravě. Vysoká hmotnost moderní zemědělské techniky a strojů způsobuje deformaci půdního profilu a změny přirozených vlastností půdy. Tyto deformace jsou značně viditelné na povrchu, ale působí i pod povrchem půdy v závislosti na zatížení stroje, stavu půdy, aktuální vlhkosti apod. Půda obsahuje hlavní tři složky: vzduch, vodu a minerály. Po přejetí půdy těžkou zemědělskou technikou se zmenší objem a prostor pro tyto tři složky, (BAUER, 2013). Dřívější studie prokázaly, že efekt zhutnění může přetrvat i několik let a mnohokrát nemůže být redukován ani orbou, mrznutím nebo táním, (VOORHEES, 1979). Mezi hlavní negativní vlivy zemědělských strojů na půdu patří zatížení náprav, opakované přejezdy a vytváření kolejových řádků nebo vliv hloubky stopy. Zatížení náprav, respektive hmotnost zemědělských vozidel a strojů působí na půdní systémy až do hloubky 50 - 60 cm. Traktory, rozmetadla, sklízecíky tak mohou způsobovat nadměrné zhutnění, (LHOTSKÝ, 2000).

V Evropské unii je zatížení náprav traktorů, samojízdných pracovních strojů a jejich přípojných vozidel dáno legislativou. Ta stanovuje největší povolenou hmotnost na nápravu vozidla, která se pohybuje v rozmezí 10 až 32 tun v závislosti na počtu náprav. Se zatížením náprav souvisí i hmotnost připadající na řízenou nápravu, která nesmí být menší než 20 % okamžité hmotnosti traktoru, a to v celém rozsahu od provozní až po největší přípustnou hmotnost, (EAGRI, 2015). Legislativně je ošetřena i nosnost podvozků a to za pomoci měrného tlaku mezi vozovkou a otiskem dezénu pneumatiky dané nápravy. Vyhláška č. 102/1995, vyplývající ze Zákona č. 38/1995 Sb. o technických podmínkách provozu silničních vozidel na pozemní komunikaci stanovuje, že měrný tlak mezi vozovkou a otiskem dezénu pneumatiky u nápravy se statickým zatížením do 10 tun včetně nesmí překročit hodnotu 1000 kPa a nápravy se statickým zatížením přesahujícím 10 tun nesmí překročit hodnotu 800 kPa, (CELJAK, 2013).

Nežádoucí zhutnění mohou způsobovat i opakované přejezdy lehčí zemědělské techniky a dalšího vybavení, pokud jsou použity opakovaně na stejném místě. Kolejové řádky jsou místa, ve kterých dochází k největšímu zhutnění. Většinou mají vyšší objemovou hmotnost než místa okolní nebo místa kypřena orbou. Pro pojezdové řádky a ostatní místa až do hloubky 30 cm byly naměřeny hodnoty objemové hmotnosti v rozmezí od 1100 do 1400 kg.m⁻³, (HAMLETT, 1990). V menších hloubkách do 15 cm byly naměřeny hodnoty 1400 až 1650 kg.m⁻³ pro místa vystavena pojezdovému ústrojí a hodnoty 1100 až 1400 kg.m⁻³ pro místa nevystavena pojezdům zemědělské techniky, (VOORHEES, 1984).

Vyjetá stopa způsobena pojezdovým ústrojím je prvním z viditelných znaků deformace půdního profilu. Na toto téma bylo provedeno několik studií v laboratorních podmínkách za pomoci testovacího kanálu s písčitou a jílovitohlinitou půdou. Tyto studie prokázaly, že nárůst zatížení na nápravu přiměřeně zvýší hodnotu kontaktního tlaku za současného prohloubení stopy pneumatiky, (RAPER, 1995; WAY, 1997). Obecně jsou vyjeté kolejové stopy vnímány jako následek působení zadních kol na půdu při provozu traktoru. Nicméně v případě použití stejného zatížení na přední i zadní pneumatiky spolu s menšími předními pneumatikami, má za následek zvýšení hloubky vyjeté stopy i větší poškození půdy pod předními koly, (PEARMAN et.al., 1996).

2.3 Minimalizace účinků zhutnění

Stanovení přímého vztahu příčiny a následku mezi provozem vozidla a reakcí půdy je vzhledem k existujícím různým podmínkám velmi složité. Za různé podmínky jsou považovány například rozdílné klimatické podmínky, rozdíly ve srážkách, odlišné složení půd, užití různých typů dopravních vozidel či zemědělské techniky a další. Přesto existují obecná doporučení, dle kterých lze proces zhutnění půdy minimalizovat, (RAPER, 2005):

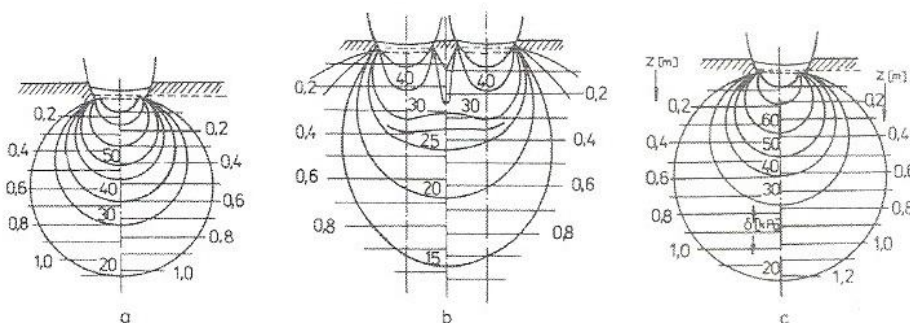
- Používání zemědělské techniky a vozidel pouze při vlhkosti půdy nepřevyšující 60 % polní kapacity
- Obdělávací systém půdy, který minimalizuje počet přejezdů
- Kontrolovaný dopravní systém, který omezuje provoz vozidel v určitých oblastech a snižuje náhodný provoz (CTF - Controlled Traffic Farming)
- Snižování zatížení náprav a velikost vozidla
- Užívání radiálních pneumatik, které využíváním maximální velikosti stopy pneumatik snižují zhutnění půdy a zvyšují tažnou sílu
- Používání minimálního doporučeného tlaku vzduchu pneumatik

- Snižování kontaktního tlaku pomocí dvoumontáže
- Zvážit využití pásových vozidel
- Při zjištění zhutnění půdy použít kypřiče půdy

V některých oblastech se zkoumaly i přírodní metody minimalizace účinků zhutnění jako je mrznutí a tání. Při těchto procesech dochází ke změně objemové hmotnosti a penetračního odporu, nicméně jsou tyto změny velmi malé a ve většině případů se půda po tání vrátila do původního stavu. Veškeré výzkumy prováděné těmito přírodními metodami, poukazují na neefektivnost přírodních vlivů na zhutnění způsobené zemědělskou dopravou, (RAPER, 2005).

2.4 Kontaktní tlaky

Při pohybu stroje po terénu dochází vlivem zatížení k vytváření tlaků ve styčné ploše pneumatiky s půdou. Tyto tlaky mají za následek plastickou deformaci půdy a vytváření stopy, jejíž hloubka má přímý vliv na jízdní vlastnosti. Zatížení půdy v určité hloubce závisí na styčné ploše, středním kontaktním tlaku, na stavu půdy a působícím zatížení. Průběh tlaků, resp. napětí v půdě pod pneumatikou při stejném zatížení, je znázorněn na obrázku č. 2.



Obrázek č. 2. Průběh napětí v půdě pod pneumatikou 11-28 při stejném zatížení

a) tlak v pneumatice 80 kPa, b) tlak v pneumatice 80 kPa (dvoumontáž), c) tlak v pneumatice 120 kPa

Zdroj: SEMETKO, J. a kol.: Mobilné energetické prostriedky 3, Príroda, Bratislava 1986, 453 s. (upraveno).

Velikost kontaktního tlaku na vozovku či půdu závisí na hmotnosti připadající na nápravu a svislé síle působící na konkrétní kolo. Při jízdě se však, díky nerovnostem vozovky, náklonu vozidla, příčnému a podélnému sklonu vozovky, pohybu nákladu na korbě atd., může velikost této síly měnit. Mezi nejdůležitější faktory, kterými lze tuto sílu ovlivnit nebo změnit její velikost patří rychlost jízdy, tlumení výkyvů náprav a odpružení vozidel, zda se jedná o systém s vinutými pružinami a plyno-kapalinovými tlumiči nebo pneumatické pružení s adaptivním tlumícím efektem. Kromě svislé síly působí na vozovku či půdu také síly horizontální, vznikající přenosem tažné nebo brzdné síly na povrchu vozovky či půdy

ve směru pohybu vozidla. Tyto síly mohou působit i kolmo ke směru pohybu vozidla a to při jízdě v oblouku. Jejich velikost závisí především na součiniteli smykového tření, konstrukci vozidla a způsobu jízdy, (CELJAK, 2013).

Rovnice pro výpočet střední hodnoty kontaktního tlaku q_s vyjadřuje poměr normálové reakce, respektive celkového zatížení F_z působící na kolo a plochy otisku pneumatiky S_o :

$$q_s = \frac{F_z}{S_o} \quad (1)$$

Jak již bylo zmíněno velikost kontaktního tlaku závisí na hmotnosti připadající na nápravu a na zatížení, obecně lze však říci, že velikost kontaktního tlaku je ovlivněna všemi činiteli, které mají vliv na velikost normálové reakce a plochy otisku. Nejvyšší kontaktní tlak q_{\max} bývá na tvrdé podložce zhruba o 20 % vyšší, na měkké podložce o 50 až 100 % vyšší oproti střední hodnotě kontaktního tlaku, (GREČENKO, 1994). Snížení kontaktního tlaku lze dosáhnout vhodnou volbou hustíciho tlaku pneumatiky. Používání nízkých tlaků při provozování zemědělských strojů a vozidel má, z hlediska agrotechnického, za důsledek i snížení nežádoucí kompakce půdy. Nízkotlaké pneumatiky jsou také zpravidla širší, což vede k dalšímu zvýšení plochy styku s půdou a snížení měrného tlaku. Používání nízkého tlaku v pneumatice je vhodné pro práci traktoru na zemědělských pozemcích. Naopak používání nízkého tlaku v pneumatice u traktoru využívaného na zpevněných komunikacích v dopravě vede k nárůstu valivého odporu a zejména k rychlejšímu opotřebení dezénu, (BAUER, 2013).

2.4.1 Empirické modely pro výpočet kontaktního tlaku

Neexistuje žádný empirický model pro výpočet kontaktního tlaku mezi pneumatikou a půdou, který by mohl být prokázán za spolehlivý a platný pro všechny účely. Hlavní příčinou je, že průběh a rozložení kontaktního tlaku a napětí závisí na tvaru a struktuře zatížené plochy. Mnohé z modelů jsou také založeny na teoriích zvažujících pohyb pneumatiky po pevném, tvrdém povrchu, což je použitelné jen z teoretického hlediska. Průběh a rozložení kontaktního tlaku a napětí pod dynamickým zatížením na pružném povrchu se značně liší oproti statickému zatížení na pevném, tvrdém povrchu a výpočetní modely jsou značně složitější. Tyto modely však vyžadují více vstupních dat, adekvátní počítačové vybavení a programy, matematické a programovací zkušenosti a odpovídající znalosti o vlastnostech půdy.

Empirické modely pro stanovení kontaktního tlaku zemědělských pneumatik:

Steiner (1979) stanovil výpočty pro určení střední hodnoty kontaktního tlaku radiálních a diagonálních zemědělských pneumatik.

$$\text{Radiální pneumatiky} - q_s = 267,7 + 0,575 \cdot p_i + 1,1 \cdot F_z - 16 \cdot d \quad (2)$$

$$\text{Diagonální pneumatiky} - q_s = 112,8 + 0,665 \cdot p_i + 0,88 \cdot F_z - 40 \cdot d \quad (3)$$

Výpočet pro stanovení kontaktního tlaku zatížených pneumatik dle Schwangharta (1990):

$$q = 45 + 0,32 \cdot p_i \quad (4)$$

Koolen (1992) dospěl k závěru, že kontaktní tlak se rovná dvojnásobku tlaku huštění pneumatik.

$$q = 2 \cdot p_i \quad (5)$$

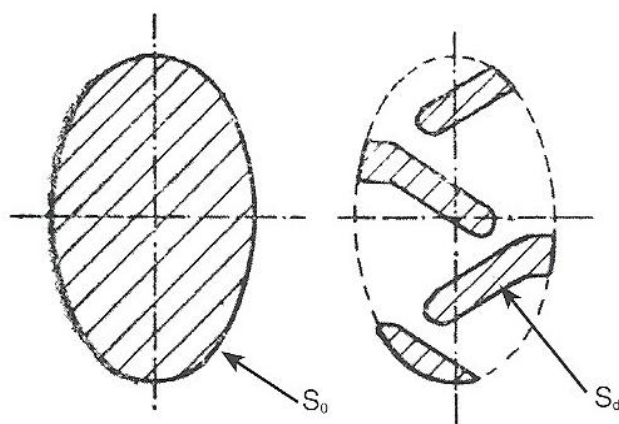
Z výše uvedeného je zřejmé, že velikost kontaktního tlaku mezi pneumatikou a půdou závisí především na působícím zatížení, tlaku huštění a rozměrech pneumatiky, a z toho vyplývající styčné plochy pneumatiky.

2.5 Styčná plocha pneumatiky

Výzkumy v oblasti vyhodnocování nepříznivé kompakce půdního profilu se v posledních letech zaměřily na vyhodnocení kontaktního tlaku ve styčné ploše zatížené pneumatiky v kombinaci tlak huštění při statickém katalogovém zatížení. Pro působení kola na vozovku je důležitý tvar a velikost plochy otisku pneumatiky. Čím větší a kompaktnější je plocha otisku pneumatiky, tím nižší je střední hodnota tlaku při konstantní hodnotě svisle působící síly. Kontaktním tlakem kola na půdu a vozovku se rozumí tlak přenášený kolmo na podložku a působící ve styčné ploše pneumatiky. Styčná plocha pneumatiky znázorňuje celkovou plochu dezénu a prostoru mezi ostruhami neboli šípky, která je zabořena do půdy a podílí se na přenosu sil. Styková plocha, též označována jako plocha styku, představuje dotykovou plochu ostruh (šípů) dezénu pneumatiky na tvrdé podložce, (PRIKNER, 2013).

Veškeré pojezdové ústrojí se vyznačuje určitou velikostí dosedací plochy pneumatiky, která značně ovlivňuje kompakci půdy. Plocha otisku S_o je charakterizována jako plocha rovinná, která vzniká na podložkách s malou únosností, např. nakypřená půda, jelikož je omezená obrysem vtačení vzhledem k povrchu půdy. Plnost vzorku běhounu je určena poměrem plochy styku a otisku, na tuhé podložce dosahuje 30 až 60 %. Plocha styku S_d

je část plochy otisku, která je určena stykem výstupků dezénu s podložkou. Dosedací plocha pneumatiky a rozdíl mezi plochou otisku S_o a plochou styku S_d je znázorněn na obrázku č. 3, (SEMETKO, 1986; PRIKNER, 2013).



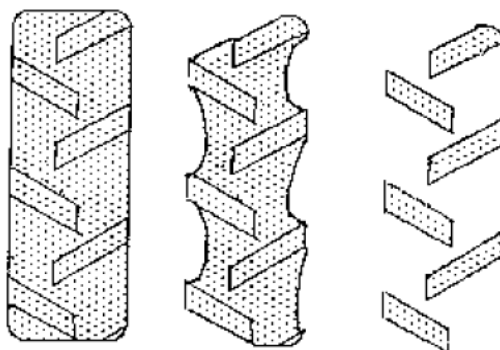
Obrázek č. 3. Plocha otisku a dosedací (styková) plocha pneumatiky

Zdroj: GREČENKO, A. (1963): Kolové a pásové traktory. SZN Praha 1963. (upraveno).

Styčnou plochu pneumatik lze spolehlivě získat pomocí takzvaného vícenásobného otisku. Podle normy ČSN 30 0415 a ČSN 30 0523 se otisk pneumatiky získává vícenásobným zvednutím a spuštěním kola bez posunu traktoru ve vodorovné rovině až do úplného vykreslení otisku. Při každém spuštění se pneumatika pootočí o úhel odpovídající šířce výstupku dezénu pneumatiky. Touto metodou lze jednoduše, avšak velice sofistikovaně, vzájemně porovnat jednotlivé typy a velikosti pneumatik i z pohledu nežádoucího působení na půdu ve formě kompakce. Například diagonální pneumatiky, které jsou velmi oblíbené především díky své pevné konstrukci, vysokou odolností proti průrazům, poměrně nízkým valivým odporem a dobrou životností, jsou určeny jen pro lehčí stroje a vozidla, to znamená do 6 t celkové hmotnosti, právě z důvodů konstrukce. Diagonální pneumatiky mají oproti radiálním menší styčnou plochu, přibližně o 1/4, a při použití diagonální konstrukce pneumatik u strojů a vozidel větších hmotností dochází k výraznému zhoršení tahových vlastností a zvýšení kontaktních tlaků. Zatímco radiální konstrukce pneumatik jsou pružné, díky tomu vytváří velké styčné plochy, které dobře přenášejí tahové síly a umožňují podhuštění. Tvar otisku diagonální konstrukce pneumatik lze přizpůsobit kruhové až oválné ploše, zatímco tvar otisku radiální konstrukce pneumatik nabývá, díky své pružnosti, čtyřúhelníkového tvaru, (PRIKNER, 2013).

2.5.1 Zásadní parametry pro výpočet styčné plochy pneumatik

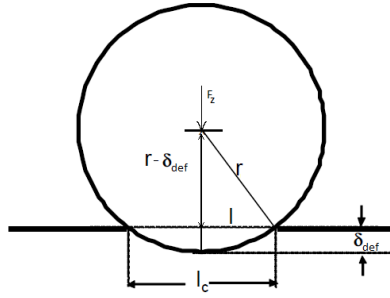
Velikost styčné plochy pneumatiky závisí především na deformačních vlastnostech pneumatiky a půdy, a proto je obtížné ji přesně určit. Deformace půdy závisí na jejím stavu, respektive na hodnotách fyzikálních a chemických půdních parametrů. Deformace pneumatiky je ovlivněna zejména tlakem huštění a působícím zatížením. Při určitém kritickém tlaku huštění se pneumatiky chovají jako pevné tuhé kolo, ale při nízkých tlacích se pneumatika deformuje a tím ovlivňuje velikost styčné plochy. Existuje mnoho metod a empirických studií vytvořené pro stanovení a výpočet styčné plochy pneumatiky, nicméně se jednotlivé výsledky často odlišují. Jedním z možných příčin je odlišný přístup ve stanovení styčné plochy pneumatiky, viz. obrázek č. 4. Měření styčné plochy pneumatiky i s plochou mezi šípy dezénu vykazuje určité odchylky (viz. obrázek č. 4 - idealizovaná plocha), jelikož plocha mezi šípy dezénu není v plném kontaktu s půdou. Pro přesnější analýzu je vhodnější využít tzv. efektivní plochu, která zvažuje pouze plochy šípů dezénu přes které je přenášeno působící zatížení, což je vhodné jak pro odhadování kontaktního tlaku, tak určování smykového napětí. V poslední době se vyvíjejí výpočetní modely založené na idealizované ploše pro stanovení reálné a efektivní plochy pneumatiky.



Obrázek č. 4. Idealizovaná, reálná a efektivní plocha kontaktu pneumatiky na měkké půdě

Zdroj: Abeels, P.F.J. Mechanization of the forest operations and impacts on the environment. 1994. Str. 24. (upraveno).

Modely pro výpočet styčné plochy pneumatiky mohou být empirické, semiempirické nebo teoretické v závislosti na použité metodě. Teoretické modely, které odpovídají nejvíce reálné situaci, zvažují dvě základní možnosti a to pneumatiku na pevném, tvrdém povrchu a pneumatiku na měkkém povrchu. První z teoretických modelů zvažuje pneumatiku na pevném, tvrdém povrchu. Deflektce pneumatiky a teoretická délka kontaktní plochy tohoto teoretického modelu pro stanovení styčné plochy pneumatiky je znázorněna na obrázku č. 5.



Obrázek č. 5. Kontaktní délka pneumatiky na pevném, tvrdém povrchu

Zdroj: Ziani, F. a Biarez. Pressure sinkage relationship for tyres on very loose sand. Journal of Terramechanics 27(3). Str. 170. (upraveno).

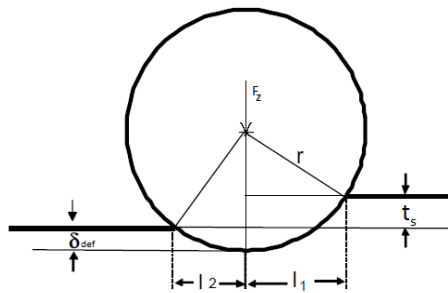
Kde se kontaktní délka l_c spočítá dle vztahu:
$$l_c = 2 \cdot \sqrt{d \cdot \delta_{def} - \delta_{def}^2} \quad (6)$$

Deflektce pneumatik vyjadřuje rozdíl mezi nezatíženým a zatíženým poloměrem pneumatiky:

$$\delta_{def} = r - r_1 \quad (7)$$

Šířka pneumatiky se určuje z deflektce a příčného poloměru pneumatiky. Což vede k vytvoření mírné odchylky, jelikož vzniká problém, jaký příčný poloměr použít. Tento teoretický model pneumatiky na pevném povrchu byl vyvinut Ziani a Biarez (1990).

Druhý teoretický model předpokládá pneumatiku na měkkém povrchu a je založen především na práci Schwanghart (1990). Kontaktní délky l_1 a l_2 mohou být vypočítány podle geometrie kola. Deflektce pneumatiky a délka kontaktní plochy je znázorněna na obrázku č. 6.



Obrázek č. 6. Pneumatika na měkkém povrchu

Zdroj: upraveno: Schwanghart, H. Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. 1990. Str. 198 (upraveno).

Kontaktní délky l_1 , l_2 a celková kontaktní délka l_c se vypočítají dle následujících vztahů:

$$l_1 = \sqrt{r^2 - (r - t_s - \delta_{def})^2} \quad (8)$$

$$l_2 = \sqrt{r^2 - (r - \delta_{def})^2} \quad (9)$$

$$l_c = l_1 + l_2 \quad (10)$$

$$l_c = \sqrt{d \cdot (t_s + \delta_{def}) - (t_s + \delta_{def})^2} + \sqrt{d \cdot \delta_{def} - \delta_{def}^2} \quad (11)$$

Empirické modely jsou založeny na modelech, kde je styčná plocha pneumatiky uvažována jako závisle proměnná a parametry půdy a pneumatiky jako nezávisle proměnné. Běžně používané parametry pneumatik jsou tlak huštění, průměr pneumatik a šířka pneumatiky nebo její tuhost. Půdní parametry jsou především penetrační odpor, vlhkost nebo modul elasticity.

Jak již bylo zmíněno tvar a velikost styčné plochy závisí na konstrukci pneumatiky, použitém huštění a zatížení kol a na vlastnostech půdy. Na tvrdém povrchu mají úzké pneumatiky s velkým průměrem a vysokým tlakem huštění eliptický tvar kontaktní plochy. Jestliže začneme zvětšovat šířku pneumatiky, tak se tvar více zaoblí. Obecný model pro výpočet styčné plochy pneumatiky S_T je:

$$S_T = c \cdot l_c \cdot b \quad (12)$$

Kde c je parametr tvaru, l_c je kontaktní délka a b je kontaktní šířka pneumatiky. Tvar stopy je obvykle mezi kruhem a obdélníkem.

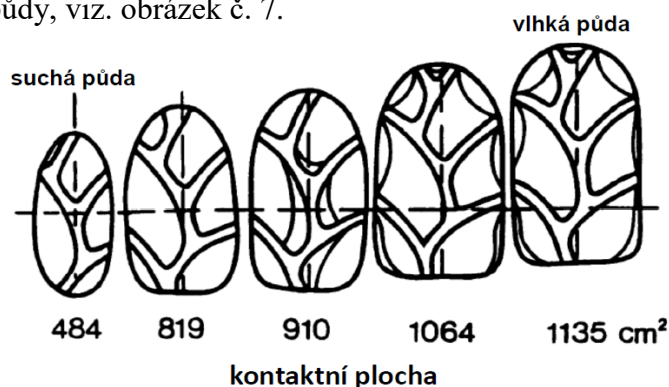
Upadhyaya a Wulfsohn (1990) představili model pro elipsovité tvar stopy pneumatiky:

$$\frac{x^2}{c^2} = \frac{y^2}{\left(\frac{c}{b}\right)^2} \quad (13)$$

Další z modelů stanovil Hallonborg (1996), který navrhl super elipsovité tvar:

$$\frac{x^n}{a^n} + \frac{y^n}{b^n} = 1 \quad (14)$$

Pod stálým tlakem a při stejném působícím zatížení závisí velikost a tvar kontaktní plochy na vlhkosti půdy, viz. obrázek č. 7.



Obrázek č. 7. Kontaktní plocha pneumatiky při různých podmínkách vlhkosti půdy

Zdroj: Hallonborg, U. 1996. Super ellipse as tyre-ground contact area. Journal of Terramechanics 33(3):125-132.

Styčná plocha pneumatiky, resp. plocha obrysu otisku pneumatiky, lze v zásadě spočítat z katalogových údajů o pneumatice. Používá se mnoho různých empirických modelů pro stanovení styčné plochy pneumatik, ale dosud není žádný z nich zcela spolehlivý a použitelný pro všechny případy. Ovšem přesnost $\pm 10\%$ od skutečné, řádně změřené plochy, je zcela přijatelná, (GREČENKO, 1994).

Empirické modely pro stanovení styčné plochy pneumatiky:

$$\text{Söhne (1969):} \quad S_T = 2 \cdot b \cdot \sqrt{d \cdot t_s} \quad (15)$$

$$\text{Silverside \& Sundberg (1989):} \quad S_T = \frac{0,9 \cdot F_z}{p_i} \quad (16)$$

$$\text{Schwanghart (1990):} \quad S_T = 0,77 \cdot b \cdot l_c \quad (17)$$

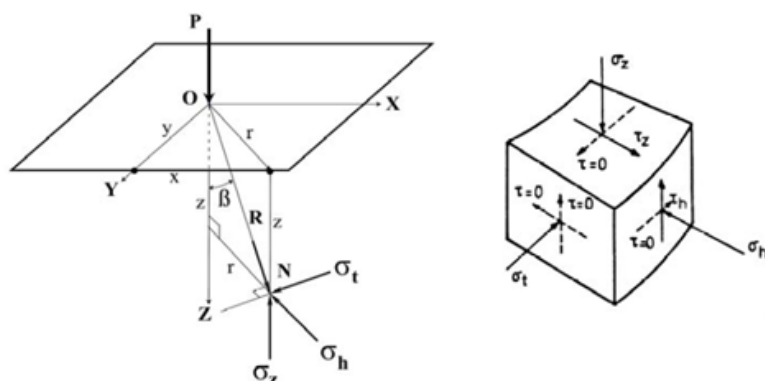
$$\text{Lyasko (1994):} \quad S_T = \frac{\pi}{4} \cdot l_c \cdot b \quad (18)$$

$$\text{Grečenko (1995):} \quad S_T = k \cdot \frac{l_c}{2} \cdot \frac{b}{2} \quad (19)$$

Mezi zásadní parametry pro výpočet styčné plochy pneumatiky patří především délka kontaktní plochy, zatížení, šířka a hustící tlak pneumatiky. Některé modely zvažují i deformaci půdy a to ve formě hloubky vyjeté stopy.

2.6 Normálové napětí

Mnoho modelů dynamického chování zemin používá elastické vlastnosti půdy. Když je půda reprezentována jako lineárně elastická, homogenní, izotropní, beztláčný materiál, jsou elastické vlastnosti potřebné pro úplné představení chování materiálu získávány za pomoci Youngova modulu (E), modulu pružnosti ve smyku (G) a Poissonovým poměrem (ν). Podle této teorie se jakýkoliv prvek půdy v médiu podrobí vertikálnímu (σ_z), horizontálnímu (σ_h) a tangenciálnímu (σ_t) normálovému napětí a vertikálnímu (τ_z) a horizontálnímu (τ_h) smykovému napětí (obrázek č. 8). Youngův modul (E) je poměr vertikálního napětí (σ_z) a jím vyvolané deformace ($\varepsilon_z = d_z/l_z$), je to konstanta lineárně elastického média. Tato úměrnost mezi napětím a deformací, $\sigma = E \cdot \varepsilon$, je známa jako Hookeův zákon formulovaný roku 1678 britským fyzikem Robertem Hookem. Modul pružnosti ve smyku (G) je poměr mezi smykovým napětím a jím způsobenou deformací (TRAUTNER, 2003).



Obrázek č. 8. Zatížení a napětí ve válcovitém souřadnicovém systému

Zdroj: TRAUTNER, Andreas. *On Soil Behaviour during Field Traffic*. Uppsala, 2003. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Str. 8. (upraveno).

Půda pod vozidly a stroji zemědělské techniky může být vystavena takovému intenzivnímu zatížení, jaké není povoleno ani na zpevněných veřejných komunikacích. Provoz těžké techniky na poli může snížit množství pórů plněných vzduchem a dutiny v půdě a tím ovlivnit velký rozsah fyzikálních vlastností půdy a procesů jako jsou například infiltrace, průtok půdní vody a zadržování vody. Kromě toho může zhutnění půdy vést k zvýšení pevnosti půdy a tím brzdit růst kořenů. V hloubce větší než 0,4 m může zhutnění půdy přetrvat po celá desetiletí nebo i trvale, takže zhutnění půdy je vážnou hrozbou pro dlouhodobou produktivitu plodin na orné půdě. V důsledku toho je třeba lépe pochopit, jak minimalizovat zhutnění podloží během provozu zemědělských strojů. Tento problém byl řešen pomocí mnoha různých přístupů. Roku 1885 navrhl Boussinesq matematicky přesné řešení pro výpočet šíření napětí v elastickém materiálu. Základní vztah pro výpočet vertikálního napětí σ_z v bodě N (viz. obrázek č. 8) je dán vztahem, (TRAUTNER, 2003):

$$\sigma_z = \frac{3P z^3}{2\pi R^5} = \frac{3P}{2\pi R^2} \cos^3 \beta \quad (20)$$

Kde P je vertikální bodové zatížení, z je hloubka pod povrchem, R a β jsou polární souřadnice. Pokud však budeme uvažovat, že $R^2 = r^2 + z^2$, pak bude napětí pod středovou osou zatížení vyjádřeno jako:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2} \quad (21)$$

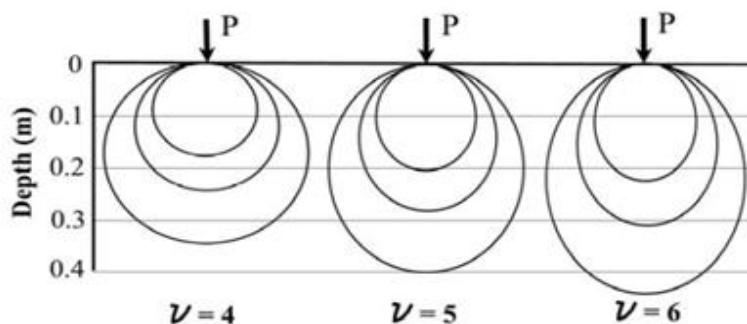
Postupná měření však ukázala, že teorie elasticity a takovéto předvídání napětí v půdě není uspokojivé. K úpravě Boussinesqových rovnic došlo až roku 1934, kdy Fröhlich zavedl koncentrační faktor ν , který bere v úvahu to, že půda není ve skutečnosti elastický materiál, a že napětí jsou více či méně soustředěna kolem osy zatížení v závislosti na síle půdy.

Čím je půda měkčí, tím se koncentrační faktor zvětšuje. Jednoduchý tvar Boussinesq-Fröhlich rovnice předpovídá normálové napětí σ_z v hloubce z , (TRAUTNER, 2003):

$$\sigma_z = \left(\frac{\nu P}{2\pi r^2} \right) \cos^{\nu}(\beta) \quad (22)$$

Kde P je vertikální bodové zatížení na povrchu půdy, r je přímá vzdálenost mezi povrchovým bodem a bodem, který je považován za půdní horizont a β udává vertikální sklon tohoto vektoru. Protože Boussinesq-Fröhlich rovnice jsou založeny na lineárním elastickém materiálu, je možné superponovat napětí do libovolného bodu v půdě způsobené několika body zatížení na dně vyjeté koleje. Většina analytických modelů bere v úvahu pouze normálové zatížení a normálové napětí půdy. Je však třeba kontrolovat i horizontální napětí, aby zatížené kolo nepřekročilo smykovou pevnost podloží. Tradiční matematické vztahy vyvinuté pro použití v geotechnickém inženýrství jsou založeny na rovnovážném stavu mezi napětím a namáháním, zatímco pohyb kola vozidla indikuje velmi odlišné režimy napětí, které obvykle pracují jen na zlomek vteřiny, (TRAUTNER, 2003).

Koncentrační faktor ν nepředstavuje fyzikální vlastnosti půdy, ale vztahuje se k danému typu půdy, obsahu vlhkosti a struktury půdy, k dané kontaktní ploše působícího zatížení a kontaktního napětí. Roku 1953 byly koncentračnímu faktoru přiřazeny hodnoty 4, 5 a 6 pro znázornění suché, relativně suché a vlhké půdy, za předpokladu, že čím více je půda plastická, tím více bude napětí soustředěno kolem osy zatížení a šířeno do větší hloubky půdy viz. obrázek č. 9, (SÖHNE, 1958).



Obrázek č. 9. Rozložení napětí v půdě pro různé koncentrační faktory pod bodovým zatížením P

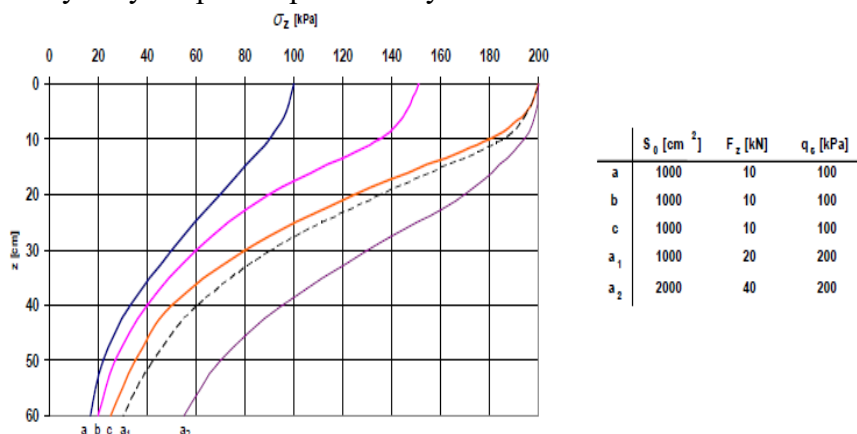
Zdroj: Söhne, W., 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. Agricultural engineering, May. (upraveno).

Velikost napětí σ nezávisí pouze na hmotnosti a uspořádání podvozku, ale také na vlastnostech půdy jako je vlhkost, pórovitost a druh půdy. Směr výsledného napětí σ je kolmý k dosedací ploše, a proto je možné ho rozložit na vodorovnou a svislou složku.

Vodorovná složka napětí vynásobena plochou je u hnaného kola vnější síla odporu valení. Svislou složku tvoří normálová reakce, která svojí velikostí odpovídá tíhové síle přenášené každou pneumatikou nebo pásem a působí kolmo na povrch půdy, (BAUER, 2013).

Je však třeba mít na paměti, že hlavní rozložení napětí je mírně omezeno předpoklady Boussinesqových rovnic, které nebyly nikdy splněny v přirozené půdě. Použitím rovnice (22) se celkové napětí na bod pod zatíženou plochou vypočítává rozdělením kontaktní plochy do několika segmentů, ve kterých bod zatížení působí v jednotlivých centrech, (VAN DEN AKKER, 1987).

V obrázku č. 10. je znázorněn průběh napětí v půdě a to, tuhé suché půdy, kultivované půdy normální vlhkosti a kultivované půdy velmi vlhké. Z obrázku vyplývá, že při dvojnásobně zvýšeném zatížení na suché půdě (a_1) jsou naměřené hodnoty směrodatného účinku pro zhutnění půdy σ_z velmi blízké hodnotám naměřeným na velmi vlhké půdě za normálního zatížení (c). Zvětšováním styčné plochy lze zatížení minimalizovat, respektive při velkém zatížení (a_2), je možno dosáhnout požadovaného směrodatného účinku pro zhutnění půdy tím, že se zvýší styčná plocha pneumatiky.



Obrázek č. 10. Průběh vertikálního napětí v půdě

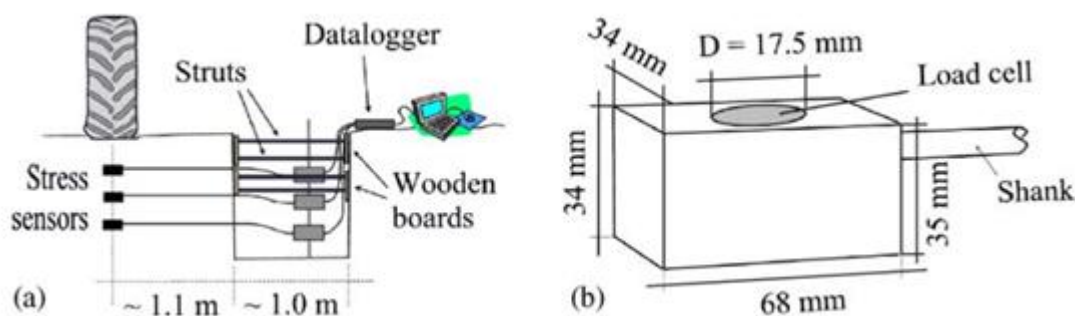
Zdroj: PRIKNER, Patrik. Vlastnosti terénních vozidel [prezentace]. Slide č.11. (upraveno).

Legenda: a - tuhá suchá půda; a_1 - tuhá suchá půda - dvakrát větší zatížení i kontaktní tlak; a_2 - tuhá suchá půda - dvakrát větší styčná plocha pneumatiky i kontaktní tlak, čtyřikrát větší zatížení; b - kultivovaná půda normální vlhkosti; c - kultivovaná půda velmi vlhká.

Zhutnění půdy v určité hloubce určuje střední kontaktní tlak q_s , styčná plocha S_T a stav půdy neboli její vlhkost, druh a složení. Zhutnění půdy v hlubokých vrstvách je závislé především na celkovém zatížení F_z .

2.6.1 Měření normálového napětí v půdě pomocí senzorů

Jedna z možných metod měření normálového napětí v půdě využívá senzory. Ty jsou instalované do půdy vodorovně z vykopané jámy, která je přibližně 1,5 m dlouhá, 1 m široká a 1 m hluboká a stěny jsou stabilizované dřevěnými deskami. Senzory se instalují pomocí vyvrtaných otvorů, které jsou stabilizovány ocelovými trubkami, jež mají stejný průměr jako vyvrtaný otvor. Vzdálenost mezi stěnou jámy a hlavou sondy bývá kolem 1,1 m. Napětí je následně měřeno siloměrem o průměru 17,5 mm. Měření jsou prováděna pod středovou přímkou dráhy kol. Pro dosažení co nejpřesnějších dat se instalují alespoň 3 senzory do různé hloubky půdy a měření se několikrát opakuje. Data jsou následně statisticky analyzována obecným lineárním modelem. Měření normálového napětí v půdě pomocí senzorů je znázorněno na obrázku č. 11, (KELLER, 2004).



Obrázek č. 11. Měření normálového napětí pomocí senzorů

Zdroj: KELLER, T. a J. ARVIDSSON. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil and Tillage Research*. 2004. Str. 194. (upraveno).

Legenda: (a) - Experimentální nastavení pro měření napětí v podloží. (b) - Senzor pro měření napětí v podloží.

Z tohoto měření vyplývá, že napětí v půdě je funkcí napětí na povrchu půdy a kontaktní plochy a to závisí na zatížení kola, uspořádání kol, tlaku v pneumatikách, kontaktního rozložení napětí a na půdních podmínkách. Napětí v půdě a zhutnění půdy nejsou závislé na zatížení nápravy nebo celkovém zatížení vozidla, což je velmi důležité pro praktické účely. Snižováním zatížení kol, například použitím dvoumontáže nebo tandemových kol lze také umožnit snížení tlaku v pneumatikách a tím snížit i riziko zhutnění podloží. Pojem duální pneumatika popisuje případ, ve kterém jsou dvě kola, každý s vlastní pneumatikou, osazeny na každém konci nápravy, zatímco pojem tandemová kola popisuje případ, ve kterém jsou dvě nebo více kol uspořádány jednotlivě za sebou na krátkou

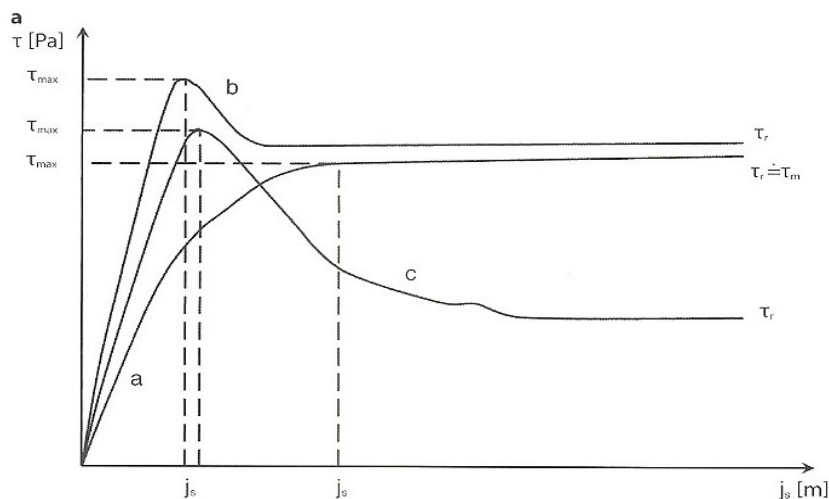
vzdálenost. Prevence zhutnění neboli kompakce půdy je podmínkou pro udržování a zlepšení fyzikálních vlastností půdy, (KELLER, 2004).

2.7 Smykové napětí

Smykové napětí v půdě vytváří hnací kola při pohybu vozidla či stroje a je závislé na druhu a vlhkosti půdy a na kontaktním tlaku mezi pneumatikou a půdou. Smykové napětí půdy τ je funkcí posuvu půdy j_s při určité velikosti kontaktního tlaku q a její velikost se zjišťuje smykovou zkouškou za pomoci smýkacího stroje. Obecný vztah pro výpočet smykového napětí obsahuje smýkací moment zjištěný zkouškou a vnitřní a vnější poloměr smýkacího stroje, (BAUER, 2013).

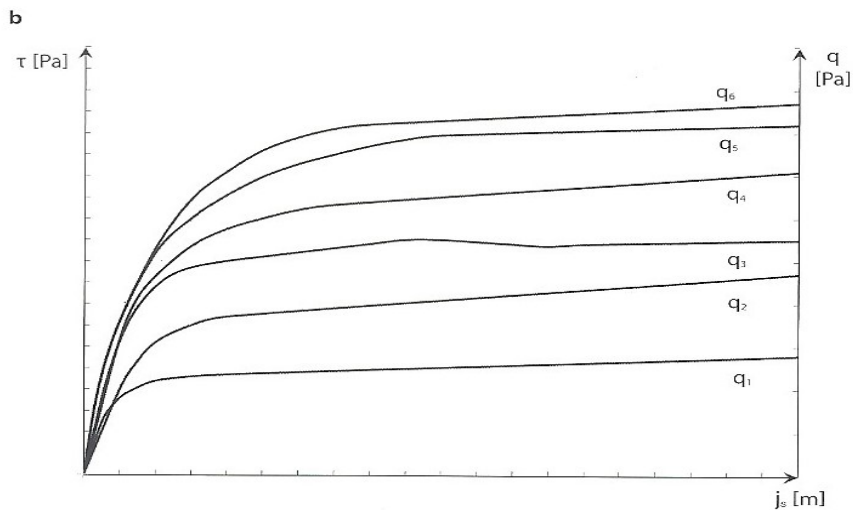
$$\tau = \frac{3M_k}{2\pi \cdot (r_1^3 - r_2^3)} \quad (23)$$

Podle smykových vlastností je půda definována soudržností c , úhlem vnitřního tření φ a průběhem poměru $\tau:\tau_{max}$ jako funkce posuvu půdy j_s (viz. obrázek č. 12). Soudržnost půdy neboli působící kohezní síly v půdě jsou vytvořeny molekulární přitažlivostí a proto jsou větší u půd s jemnými zrny, tzv. jíly, a u půd s organickými vazebnými složkami, někdy též označované jako nepravá soudržnost, vytvořena kořením rostlin. Nakypřením se soudržnost snižuje, (BAUER, 2013).



Obrázek č. 12. Závislost smykového napětí τ na posuvu zeminy j_s , zjištěna smýkacím strojem; na různých druzích půd (křivky a, b, c) při kontaktním tlaku $q = \text{konstanta}$

Zdroj: GREČENKO, A. *Vlastnosti terénních vozidel*. ČZU Praha 1994. str. 54. (upraveno).



Obrázek č. 13. Závislost smykového napětí τ na posuvu zeminy j_s , zjištěna smykacím strojem; na jednom druhu půdy při různých kontaktních tlacích q_1 až q_6

Zdroj: upraveno z GREČENKO, A. *Vlastnosti terénních vozidel*. ČZU Praha 1994. str. 54. (upraveno).

Z obrázku č. 12 je zřejmé, že určitý druh půdy při určité vlhkosti dosáhne maximální smykové pevnosti τ_{\max} při jmenovitém posuvu půdy j_s . Smyková pevnost τ_{\max} stoupá s rostoucím kontaktním tlakem a zároveň se posouvá o jmenovitý posuv půdy j_s . Při dosažení smykové pevnosti dojde k poklesu smykového napětí, které se s dalším zvětšováním posuvu j_s již významně nemění. Z průběhu křivek *a*, *b*, *c* lze vyvodit, (BAUER, 2013):

- Křivka *a*: Rostoucí křivka do hodnoty $\tau_r = \tau_{\max}$ při značném jmenovitém posuvu půdy j_s . Malá soudržnost půdy byla zdolaná již při nejmenších posuvech. Jedná se o kultivovanou půdu, např. strniště po obilnině.
- Křivka *b*: Křivka nabývá hodnot τ_{\max} již při velmi malém posuvu. Následné posuvy půdy probíhají pod stálým napětím τ_r , které je nižší než hodnota maximálního smykového napětí τ_{\max} . Jde o velmi soudržné půdy například louky nebo suché zhutnělé půdy se značným obsahem jílu.
- Křivka *c*: Průběh křivky dociluje hodnot maximálního smykového napětí τ_{\max} při malém posuvu, po kterém následuje pokles smykové pevnosti půdy. Charakteristické pro slatinu s vysokou hladinou podzemní vody.

Na obrázku č. 13 je znázorněna změna smykové pevnosti τ_{\max} a posuvu půdy j_s v závislosti na rostoucím kontaktním tlaku q . Velikost smykové pevnosti τ_{\max} v závislosti na kontaktním tlaku q je znázorněna přímkou, která lze následně vyjádřit za pomoci

Coulombovy rovnice a získat tak rovnici pro výpočet maximální smykové pevnosti (24) pro určitý druh a vlhkost půdy, (BAUER, 2013):

$$\tau_{max} = c + q \cdot \tan \varphi \quad (24)$$

2.8 Analytické modely kompakce půdy

Degradace půdy je hlavním problémem životního prostředí na celém světě. Zhutnění půdy, tj. snížení prostoru pórů, je jedním z nejdůležitějších faktorů zodpovědných za fyzikální degradaci půdy, (PAGLIAI et.al., 2003). Proto je důležité kontrolovat mechanické dopady zemědělských strojů na půdní strukturu. Nadměrné zhutnění vede k degradaci půdních zdrojů, zvýšení znečištění vody a ovzduší a zvýšenému požadavku na udržení růstu plodin. Problémy zhutnění lze nalézt ve většině částí světa, ale zvláště závažné jsou ty části, ve kterých je praktikována vysoká mechanizace zemědělství a působí na nich vysoké dešťové srážky, (SOANE, 1994).

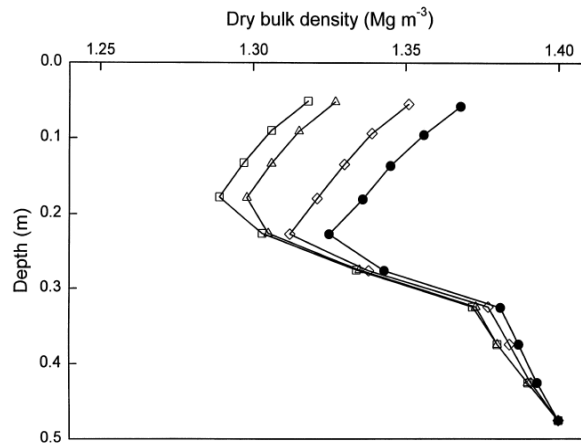
Výpočetní modely zhutnění půdy jsou důležitým nástrojem pro kontrolu zhutnění půdy způsobené indukovanou dopravou v zemědělství. Lze je rozdělit do dvou kategorií, analytické a numerické modely (FEM - Finite Element Method), (DÉFOSSEZ, 2002). Analytické modely jsou založeny na práci Boussinesq (1885), který vyvinul rovnice pro šíření napětí v elastických a homogenních médiích. Později pak upravené Fröhlich (1934), který představil takzvaný koncentrační faktor, aby poukázal na skutečnost, že napětí v půdě se více koncentruje pod středem aplikovaného zatížení nežli v plně elastickém médiu. Numerické modely ve srovnání s analytickými, vyžadují pokročilé odborné znalosti a více vstupních parametrů, které mohou být obtížně měřeny nebo získány. Díky jednoduchosti mohou být analytické modely použity nejen odborníky, ale také zemědělskými poradci, studenty apod., což je velmi důležité pro kontrolu zhutnění půdy v praxi.

Zhutnění podloží je trvalé a efekt z přírodního a umělého kypření je neuspokojivý. Z tohoto důvodu je prevence zhutnění podloží nejlepší způsob, jak zachovat strukturu a kvalitu podloží. Kromě terénních studií existuje zvýšená potřeba analytických nástrojů pro rozvoj a vyhodnocování opatření pro prevenci zhutnění podloží. Deformace podloží není možná v případě, že působící napětí zůstane menší než je aktuální pevnost podloží, (VAN DEN AKKER, 2004).

2.8.1 Metoda Simplified

Zjednodušený postup pro odhad zhutnění půdy umožňuje uživatelům prozkoumat některé z hlavních aspektů zhutnění půdy. Tato metoda je tvořena snadno použitelným tabulkovým procesorem, který odhaduje objemovou hmotnost půdy v ose koleje kola ze snadno dostupných údajů pneumatiky. Pro odhad šíření napětí v půdě se používají analytické metody. Hlavní potenciál modelu spočívá ve výběru pneumatik a systému neboli uspořádání kol na nápravě pro minimalizaci zhutnění. Cílem modelu je odhadnout suchou objemovou hmotnost půdy pod středovou osou koleje kola. Metoda Simplified se skládá ze tří hlavních složek. Za prvé, síly způsobené vozidlem na povrchu půdy jsou modelovány. To zahrnuje i predikci kontaktní plochy mezi kolem a půdou a rozložení zatížení na této ploše vhodnou formou. Za druhé, model využívá analytické metody pro odhad šíření napětí v půdě. Ve třetí složce jsou vybrány vhodné půdní parametry pro popsání účinku napětí na změnu objemu půdy. Metoda Simplified byla určena k demonstrování vlivů vlastností vozidla na zhutnění půdy. V praxi mohou být změněny vlastnosti jako rozměr a typ pneumatik, tlak huštění a zatížení. Využívá se jak pro radiální tak i diagonální pneumatiky, i když se radiální pneumatiky vychylují jiným způsobem než diagonální a produkují větší kontaktní plochu s půdou. Obecně je kontaktní plocha radiální pneumatiky o 20% až 50% větší než u diagonální pneumatiky. V souladu s tím se při měření kontaktní plochy radiálních pneumatik přidává konzervativní hodnota 20%, (O'SULLIVAN, 1999).

Model Simplified může být využit mnoha způsoby, především studenty. Jedním z nich je procvičování výběru pneumatiky, což je velmi důležité v zemědělském poradenství. Příkladem tohoto typu cvičení je minimalizovat zhutnění způsobené zadní nápravou traktoru o pohotovostní hmotnosti 5 tun standardně vybavený zadními pneumatikami 16.9R38 nalezením vhodné alternativní pneumatiky v databázích výrobců. Alternativní pneumatiky by měly mít zhruba stejný celkový průměr jako standardní pneumatiky. V tomto případě byly identifikovány tři alternativní nízko-profilové pneumatiky, a to 600/65R38, 680/75R32 a 800/65R32. Model byl následně použit k odhadu zhutnění půdy každé pneumatiky (obrázek č. 14). Pneumatika 600/65R38 způsobila o něco méně zhutnění než standardní pneumatika. Obě další alternativní pneumatiky by výrazně snížily zhutnění, ale rozdíl mezi nimi je velmi malý, (O'SULLIVAN, 1999).

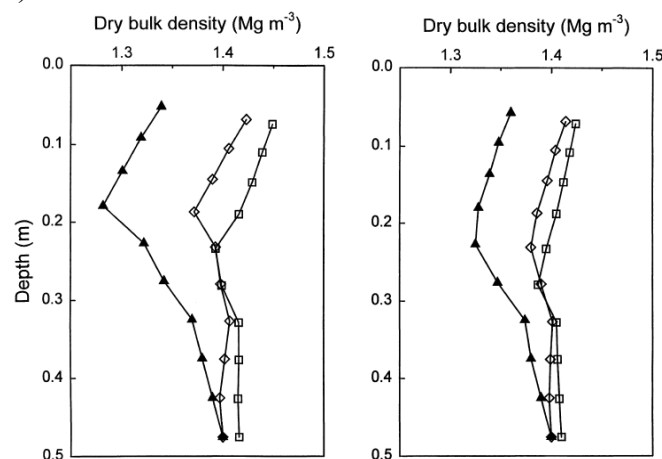


Obrázek č. 14. Stanovení hodnot suché objemové hmotnosti půdy za pomoci modelu zhutňování pro tři alternativní pneumatiky

Zdroj: O'Sullivan, M.F., Henshall, J.K., Dickson J.W.. A simplified method for estimating soil compaction. 1999. Soil and Tillage Research 49. Str. 332. (upraveno).

Výběr nejvhodnější pneumatiky bude záviset na závažnosti problému zhutňování a ochoty zemědělce k investicím do alternativních pneumatik. Kompletnější posouzení by vyžadovalo informace o ekonomických dopadech zhutnění a zejména o účinku zhutnění na výnosu plodin, což je mimo rozsah tohoto modelu.

Druhý příklad využití modelu ilustruje účinky jednonápravových a tandemových přívěsů na dvou typech půdy, a to na jílovitohlinité a písčité půdě (obrázek č. 15). V tomto případě byl nezatížený traktor o výkonu 70 kW porovnáván se zatíženým traktorem na 8 tun, včetně testovaných přívěsů. Na obou typech půdy vyvolává menší zhutnění tandemová náprava, ale rozdíly mezi přívěsy byly větší na jílovitohlinité půdě nežli na půdě písčité, (O'SULLIVAN, 1999).



Obrázek č. 15. Odhadované účinky tandemového (◇) a jednonápravového (□) přívěsu, každý z nich nese 8 tun, v porovnání s nezatíženým traktorem (▲) na jílovitohlinité (vlevo) a písčité (vpravo) půdě.

Zdroj: O'Sullivan, M.F., Henshall, J.K., Dickson J.W.. A simplified method for estimating soil compaction. 1999. Soil and Tillage Research 49. Str. 332. (upraveno).

Existuje však mnoho omezení pro tuto metodu, které byly shrnuty Olsen (1994). Nezákladnějším omezením je to, že odvození vztahu pro výpočet napětí předpokládá hodnotu Poissonova čísla 0,5, což znamená žádnou změnu objemu stlačené půdy. Analýza také předpokládá možnost výskytu velkých a trvalých deformací orné půdy při přejezdu kola. Proto není tato metoda striktně použita při kypření orné půdy, avšak se tento problém snaží překonat použitím dodatečného zatížení. Dalším omezením je, že rovnice byly vyvinuty pro ideálně elastické médium, což skutečná půda není a její vlastnosti se v různé hloubce liší, (SMITH, 1987). Koncentrační faktor je závislý na struktuře a obsahu vody v půdě a na zatěžovací charakteristice a tak je výběr vhodného faktoru problematický. Tato omezení znamenají, že je model vhodnější pro porovnávání zhutnění půdy způsobené různými vozidly, nežli pro odhad skutečné objemové hmotnosti půdy v dané oblasti.

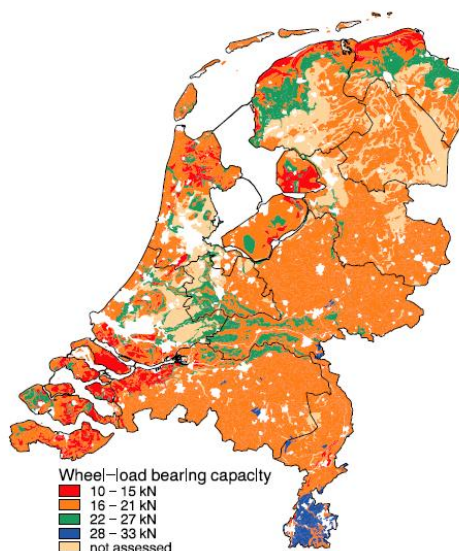
2.8.2 Model SOCOMO

Model, který zahrnuje horizontální zatížení a napětí, se nazývá SOCOMO (Soil Compaction Model). V tomto modelu je rozdělení napětí mezi pneumatikou a půdou promítáno na horizontální obdélníkové mřížky a celkové hodnoty napětí jsou soustředěny na bodech rastru. Vstupní hodnoty zatíženého kola se v modelu SOCOMO skládají ze dvou odpovídajících matic s vertikálním a horizontálním bodovým zatížením, respektive veškeré napětí působící na těchto bodových zatížení se může superponovat a přeměnit na hlavní napětí. Šířka pneumatiky určuje šířku zatížené mřížky. Součet všech svislých bodových zatížení musí být roven svislému zatížení kola. Modelování rozložení vertikálního a horizontálního napětí v kontaktu pneumatiky s půdou může být složité, nicméně ve většině případů se předpokládá lichoběžníkový nebo parabolický průběh napětí. Rozložení tlaku je závislé na průměrné hodnotě vertikálního zatížení působící na stopu pneumatiky. Podle pravidla zavedeného Koolenem a Kuipersem roku 1983 se průměrné normálové napětí v kontaktní ploše rovná 1,2 násobku tlaku v pneumatice. Deset let na to stanovil Van den Akker, že pro nízkotlaké pneumatiky bude střední kontaktní tlak na půdu roven tlaku huštění pneumatik plus 50 kPa, což odpovídá zvýšenému vlivu tuhosti kostry v tlaku na půdu vzhledem k velké deformaci nízkotlakých pneumatik, (SCHJØNNING, 2004).

Cílem výzkumu bylo vyvinout nástroj ve formě počítačového modelu vhodného pro pedagogy, profesionální poradce, zemědělské inženýry a vědce. Analytický model zhutnění půdy SOCOMO byl vyvinut pro výpočet napětí v půdě pod zatíženým kolem. Ve zvláštních případech jsou vypočtené hodnoty napětí porovnávány s hodnotami pevnosti

půdy zjištěnými v laboratoři, (VAN DEN AKKER, 2004). Tento model je velmi snadno ovladatelný a vyžaduje pouze minimální vstupní data. Nicméně ještě není tak uživatelsky přívětivý jak by mohl být. Slabé stránky modelu jsou například, že hloubku vyjeté koleje je třeba odhadnout, a že tvar rozložení tlaku vyvíjeného pneumatikou na spodní straně vyjeté koleje je založen na pravidlech vyvozených ze zkušeností a praxe, nežli z vědeckých poznatků.

Model zhutnění půdy SOCOMO (VAN DEN AKKER, 2004) byl vyvinut pro výpočet a určení toho, zdali bude podloží nadměrně namáháno pod určitým zatížením kola. Díky tomu je možné vypočítat přípustné zatížení kola tím, že se vezme v úvahu rozměr pneumatiky, tlak huštění a převažující pevnost půdy, která je závislá na struktuře půdy, objemové hmotnosti půdy a na vlhkostních podmínkách. Teoretické pozadí SOCOMO je popsáno Van den Akker a Van Wijk (1987). Obecně jsou prezentovány dva příklady využití SOCOMO. V prvním z nich se zkoumají možnosti opatření proti zhutnění půdy za použití nízkých tlaků v pneumatikách, (VERMEULEN, 1992). Účinnost tohoto měření byla následně zkoumána v polních pokusech, ve kterých se měřilo vertikální napětí v podloží, zhutnění a deformace. Ve druhém příkladu byl model použit pro výpočet nosné kapacity podloží pod určitým napětím vody a půdy, (VAN DEN AKKER et.al., 1994). Což byl základ pro vytvoření mapy přípustných zatížení pneumatik (WLCC - Wheel-Load Carrying-Capacity Map) v Nizozemsku, kde byly využity pneumatiky o šířce 0,5 m a tlak huštění 80 kPa. Tato mapa (viz. obrázek č. 16) je jedním z hlavních výstupů modelu SOCOMO. Určuje maximální povolené zatížení kola na daném místě. Hodnoty potřebné pro vytvoření této mapy lze definovat jako maximální zatížení kola vyvíjené konkrétním typem pneumatiky a tlakem huštění, které nevyvolává napětí v půdě a nepřekračuje pevnost podloží.



Obrázek č. 16. Mapa přípustných zatížení pneumatik v Nizozemsku

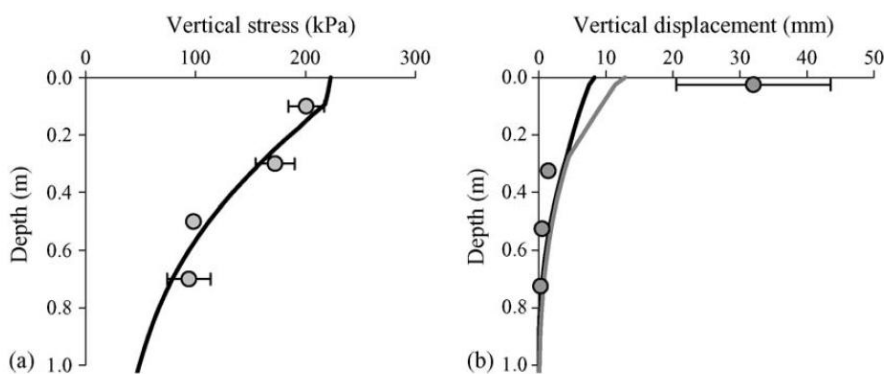
Zdroj: Van den Akker, J.J.H.. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. 2004. Soil and Tillage Research 79. Str. 12. (upraveno).

2.8.3 Model SoilFlex

Model SoilFlex se používá pro výpočet napětí a ztuhnutí půdy, změny objemové hmotnosti půdy a vertikálního posuvu půdy v důsledku provozu zemědělských strojů a techniky. SoilFlex je tvořen tabulkovým procesorem, který se snadno používá a je určen nejen pro odborníky zabývající se mechanikou zemin, ale také například pro zemědělské poradce. Tento analytický model obsahuje tři hlavní části. Za prvé, napětí na povrchu je popsáno normálovou i smykovou složkou napětí. Za druhé, šíření napětí půdou se vypočítává analyticky. Za třetí, deformace půdy je vypočtena jako funkce napětí. SoilFlex umožňuje realistické předpovědi kontaktní plochy a rozložení napětí v kontaktní oblasti ze snadno dostupných parametrů pneumatiky. Možná je i simulace přejezdů několika strojů, obsahující např. traktory s dvoumontáží a tandemové přívěsy. Model je založen na analytických rovnicích pro popis šíření napětí v půdě. Zatížení se aplikuje postupně a poskytuje uspokojivé predikce šíření napětí a změny objemové hmotnosti půdy. Nicméně výsledky výpočtu deformace půdy silně závisejí na mechanických vlastnostech půdy, které jsou pro měření náročné na pracovní sílu a obtížné odhadnout. Představený model se nazývá SoilFlex, protože se jedná o analytický model ztuhnutí půdy, který je flexibilní k podmínkám vstupních údajů modelu, ke konstitutivním rovnicím popisující vztah mezi napětím a deformací a k výstupům modelu. Kromě toho obsahuje funkce pro odhad kontaktní plochy

a kontaktního napětí z pneumatiky a zatěžovací charakteristiky a odhad mechanických vlastností půdy, které jsou potřebné pro určení vztahu mezi napětím a deformací, (KELLER et.al., 2006).

Mezi hlavní výstupy modelu SoilFlex patří porovnávání simulovaných a naměřených hodnot vertikálního napětí a posuvu částic v půdě při pojezdu zemědělskou technikou. Při vyhodnocování tohoto modelu bylo použito zatížení kola o 86 kN, hustící tlak pneumatiky 100 kPa a hodnota koncentračního faktoru ξ se rovnala 5. Hodnoty simulovaného napětí velmi dobře odpovídaly hodnotám naměřeného napětí (obrázek č. 17 a). Nicméně hodnoty simulovaného vertikálního posuvu částic už byly rozdílné oproti naměřeným hodnotám (obrázek č. 17 b). Tato odchylka hodnot mohla vzniknout v důsledku nepřesných hodnot některých parametrů, a to zejména parametrů smykového napětí, (KELLER et.al., 2006).



Obrázek č. 17. Porovnání naměřených a vypočtených hodnot vertikálního napětí a posuvu částic v půdě. (a) změřené vertikální napětí (symboly) a vypočtené napětí (křivka); (b) změřený vertikální posuv (symboly) a vypočtené hodnoty za předpokladu jednoosé deformace (černá křivka) a za předpokladu rovinné deformace (šedá křivka)

Zdroj: Keller T., Défossez P., Weisskopf P., Arvidsson J., Richard G. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. 2006. Soil and Tillage Research. Str. 13. (upraveno).

Budoucí vylepšení modelu by mohlo zahrnovat funkci pro odhad trakce neboli určení smykového napětí na povrchu půdy z požadavku tahové síly náradí na zpracování půdy, začlenění více funkcí pro odhad mechanických vlastností půdy a zvážení faktoru času, jelikož deformace je proces závislý na čase.

2.8.4 Model FRIDA

Cílem tohoto modelu bylo vytvoření postupné výpočtové procedury, která umožní přesné předpovědi za snadno dostupných dat. Bylo využito mnohonásobné regrese

pro identifikování rovnic pro predikci parametrů modelu FRIDA z naměřených zátěžových charakteristik včetně objemu kostry pneumatiky, zatížení kola, deformace kola a vyjádření tlaku v pneumatice, vypočtené jako přirozený logaritmus aktuálního a doporučeného tlaku huštění. Šířka kontaktní plochy byla přesně určena kombinací šířky pneumatiky a tlaku huštění. Díky k velkému rozdílu mezi záběrovými a vodícími pneumatikami byly vytvořeny oddělené predikční rovnice, zejména pro stanovení dotykové plochy. Parametry modelu FRIDA α a β znázorňují schopnost pneumatiky distribuovat napětí jak ve směru jízdy tak v příčném směru. Tuto schopnost ovlivňuje především délka a šířka kontaktní plochy. Parametr α byl dále ovlivněn zatížením kola, zatímco parametr β byl ovlivněn tlakem v pneumatice a deformací pneumatiky. V modelu FRIDA se předpokládá, že velikost a tvar kontaktní plochy mezi pneumatikou a půdou, jakož i rozložení vertikálního napětí v podélném a příčném směru jízdy vyjádřené prostřednictvím parametrů α a β , je určeno a může být předpovězeno pomocí zátěžových charakteristik. Patří mezi ně především rozměry pneumatik, tlak huštění a zatížení aplikované na kolo. Model FRIDA poukázal na to, že je možné předvídat kontaktní plochu a rozložení vertikálního napětí v půdě z rozměrů pneumatik, tlaku huštění a zatížení kola. Byl vyvinut systém predikčních rovnic počínaje objemem pneumatiky, který zahrnuje pouze proměnné, které přímo ovlivňují rozložení napětí. Navrhovaný systém predikčních rovnic umožňuje velmi přesné odhadnout kontaktní plochy a rozložení vertikálního napětí v kontaktní ploše ze snadno dostupných zátěžových charakteristik dané situace. Pomocí tohoto modelu bylo také zjištěno, že je velký rozdíl mezi záběrovými a vodícími pneumatikami. Při doporučeném tlaku huštění pneumatiky bylo naměřeno, že záběrové pneumatiky mají průměrně asi 14 % z obvodu pneumatiky v kontaktu s půdou, zatímco vodící pneumatiky mají kontakt okolo 18 % a to znamená, že kontakt mezi pneumatikou a půdou je relativně větší u vodících pneumatik. Tento predikční model byl vyvinut a je platný pro neobdělávané půdy s obsahem vlhkosti blízké polní kapacitě. Je však zapotřebí dalších studií pro kvantifikaci účinků pevnosti ornice a konzistence vlastností kontaktu pneumatiky a půdy, (SCHJØNNING et.al., 2015).

2.9 3D otisk pneumatiky

Provozování zemědělských strojů a techniky na měkké půdě s vysokým obsahem vlhkosti a nízkým penetračním odporem má za následek vytváření poměrně hlubokých (70 až 130 mm) vyjetých kolejí. Proto byla vyvinuta metoda pro odhad 3D otisku pneumatiky, která následně dává přístup pro kvantifikaci objemu zhutněné půdy v terénu.

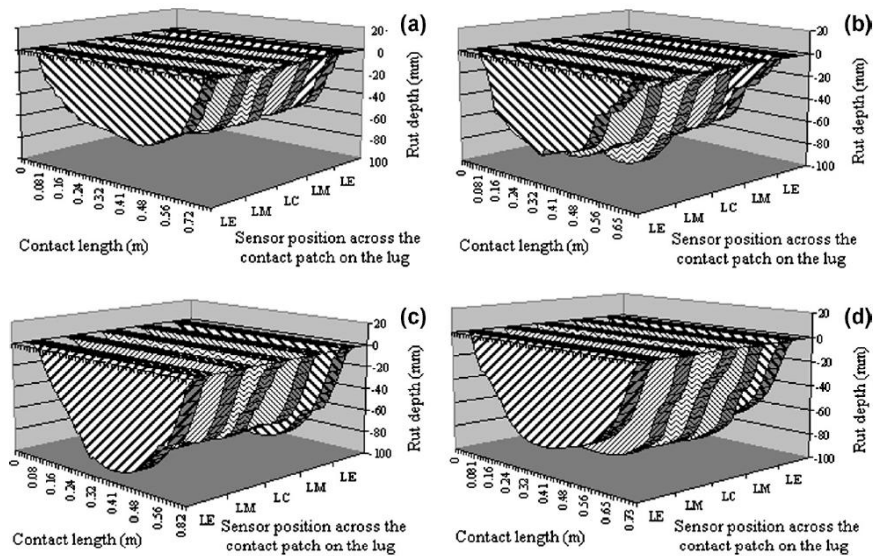
Metoda byla vyvinuta pro odhad trojrozměrné stopy pneumatiky 16.9R38 a je založena na naměřených hodnotách kontaktního tlaku v rozhraní pneumatiky a půdy a délky kontaktu kola stanovených z kontaktního tlaku a z hloubky a šířky vyjetých kolejí v půdě. Modelování 3D otisku pneumatiky bylo zkoumáno polními testy, kde tlakové senzory pneumatiky procházely měkkou hlinitou půdou. Pneumatika byla vybavena šesti miniaturními tlakovými senzory, které se nacházely na kraji, uprostřed a ve středové části pneumatiky neboli ve vzdálenosti přibližně 10, 100 a 200 mm od okraje pneumatiky, viz. obrázek č. 18, (MOHSENIMANESH, 2010).



Obrázek č. 18. Instalace senzorů na radiální pneumatice 16.9R38

Zdroj: Mohsenimanesh A. a Ward M.S. Estimation of a three-dimensional tyre footprint using dynamic soil-tyre contact pressures. Journal of Terramechanics. 2010. Str. 417. (upraveno).

Takto vybavena pneumatika byla testována při konstantní rychlosti $0,27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na měkké půdě, při 23% prokluzu, penetračním odporu $0,48 \text{ MPa}$ a 25,6% obsahu vlhkosti. Výsledky rozložení napětí mezi pneumatikou a půdou poukazují na to, že při zvyšování hustího tlaku se zvyšuje i pevnost půdy a to v blízkosti středu pneumatiky a ve formě nárůstu zhutnění, které je snímáno kuželovým penetrometrem. 3D otisk byl založen na kombinaci hloubky profilu vyjeté koleje a senzoru snímající šířku. Celková šířka kontaktní plochy byla nakonec považována jako rovnající se hodnota naměřené šířky vyjetých kolejí. Hlavní výstup této metody je znázorněn v obrázku č. 18, kde jsou, odvozené od napětí a hloubky vyjeté koleje, zobrazeny 3D otisky pneumatiky ve čtyřech kombinacích tlaku huštění a zatížení. Doporučená kombinace tlaku huštění (70 kPa) a zatížení (15 kN) je zobrazena v obrázku č. 19 a. Stejné zatížení, ale za zvýšeného tlaku huštění (150 kPa) je zobrazeno v obrázku č. 19 b. Příklad podhuštěné pneumatiky (70 kPa) při zatížení 24 kN ilustruje obrázek č. 19 c. Stejné zatížení při doporučeném tlaku huštění 150 kPa znázorňuje obrázek č. 19 d, (MOHSENIMANESH, 2010).



Obrázek č. 19. 3D otisk pneumatiky v závislosti na hloubce vyjeté koleje, délky kontaktu, zatížení a hustícího tlaku

Zdroj: Mohsenimanesh A. a Ward M.S. Estimation of a three-dimensional tyre footprint using dynamic soil-tyre contact pressures. *Journal of Terramechanics*. 2010. Str. 419. (upraveno).

Porovnání obrázku č. 19 a, kde je pneumatika poměrně pružná, a obrázku č. 19 b, kde je pneumatika tužší, ukazuje, že se zvýšeným hustícím tlakem se půda stala méně soudržnou pod středem pneumatiky. Srovnání správně nahuštěné pneumatiky (obrázek č. 19 a) a podhuštěné pneumatiky (obrázek č. 19 c) ukazuje, že když se zatížení zvyšuje a tlak v pneumatice je udržován na 70 kPa, tak dochází k zvýšené deformaci půdy na hranách pneumatiky. U správně nahuštěné (obrázek č. 19 d) a přehuštěné (obrázek č. 19 b) pneumatiky je 3D otisk poměrně stejný, deformace půdy je vzhledem k rozdílnému zatížení větší u správně nahuštěné pneumatiky. Poslední porovnání dvou správně nahuštěných pneumatik (obrázek č. 19 a, č. 19 d) znázorňuje, že se zvyšujícím se zatížením a hustícím tlakem se zvětšuje poměr 3D otisku pneumatiky. Znázorněné hodnoty byly shromážděny pro jeden šíp dezénu a předpokládá se symetrický průběh těchto hodnot po celé šířce pneumatiky. Poměry 3D otisků pneumatiky naměřené senzory jsou velmi blízké hodnotám naměřených hloubek vyjetých kolejí. Tento výsledek prokázal podstatu a funkčnost navrhované metody pro odhad 3D otisku pneumatiky, (MOHSENI MANESH, 2010).

3. Zemědělské pneumatiky

V dnešní době jsou na moderní zemědělské stroje a techniku především na výkonné kolové traktory, kladeny stále se zvyšující požadavky s ohledem na univerzální používání. Využívání zemědělské techniky jak pro těžké tahové práce, tak v dopravě jako tahače návěsů je naprosto běžné. Proto je velmi důležité zaměřit se i na pojezdové ústrojí těchto strojů a to především na používané pneumatiky, které tvoří spojovací článek mezi traktorem a podložkou. Mezi hlavní funkce pneumatiky patří přenos hmotnosti vozidla na vozovku nebo půdu, přenos brzdících a bočních sil a částečné odpružení vozidla. Zemědělské pneumatiky jsou vyráběny v různých velikostech a typech s ohledem na rychlostní, hmotnostní a zejména výkonové požadavky zemědělských strojů a techniky. Rovněž také dochází k neustálému vývoji, zlepšování a vyrábění nových typů nejpoužívanějších rozměrů pneumatik používaných pro dané výkonnostní skupiny strojů s ohledem na lepší využití a plnění stále se zvyšujících požadavků na kvalitu a vlastnosti pneumatik. Oproti druhé polovině 20. století se nynější výkony motorů výrazně zvýšily, v některých případech i trojnásobně, a tomu se vhodně přizpůsobuje konstrukce i tvar dezénu pneumatik, (SYROVÝ, 2008; PRIKNER, 2015).

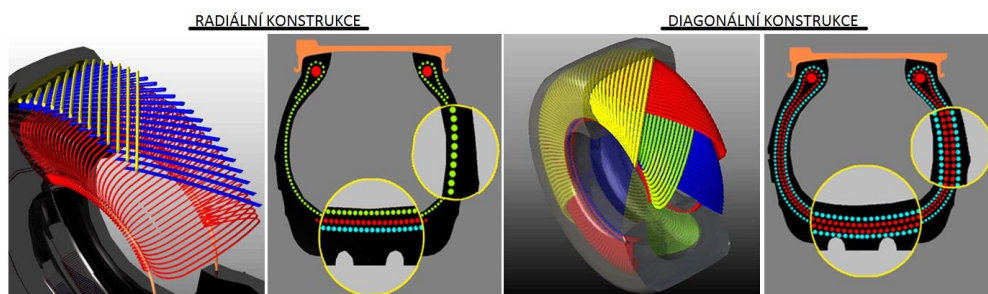
3.1 Konstrukce a typy pneumatik

Konstrukce pneumatiky, respektive její kostry, má největší vliv na vlastnosti pneumatiky, což je především styčná plocha, nosnost a valivý odpor. Použitý materiál na výrobu kostry, počet a orientace kordových vložek nejvíce ovlivňuje deformační vlastnosti pneumatik. Podle konstrukce kostry se pneumatiky rozdělují na radiální a diagonální, (BAUER, 2013).

3.1.1 Radiální a diagonální pneumatika

Na trhu s pneumatikami se v poslední době začaly výrazně rozšiřovat pneumatiky radiální, které postupně vytlačují pneumatiky diagonální. Rozdíl mezi těmito pneumatikami je v konstrukci. U diagonálních pneumatik jsou vlákna kostry kladeny křížem přes sebe, obvykle pod úhlem 30 - 40°, zatímco u radiální konstrukce jsou vlákna vnitřní vrstvy kostry kladeny kolmo přes sebe (viz. obrázek č. 20). U diagonální konstrukce pneumatiky tvoří běhoun a bočnice jeden celek a všechny pohyby se tak přenášejí na běhoun, což způsobuje rychlejší opotřebení a menší záběr pneumatik. Zatímco u radiální konstrukce pracují všechny

části pneumatiky nezávisle na sobě a tím pádem nedochází k takovému namáhání běhounu. Pružnost radiálních pneumatik navíc umožňuje vytvoření větší kontaktní plochy s půdou a do záběru se tak dostane více segmentů, což vede ke zlepšení tahových vlastností a snížení prokluzu, (CROLLA, 2009).



Obrázek č. 20. Radiální a diagonální konstrukce pneumatiky

Zdroj: [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://www.michelinag.com/Innovating/Radial-vs.-Bias-technology>. (upraveno).

Hlavními výhodami radiální konstrukce pneumatik je především vynikající přilnavost, menší zhuštění půdy v podobě lepšího rozložení tlaků na půdu, delší životnost, vyšší komfort i pružnost a nižší spotřeba paliva oproti diagonální konstrukci.

3.1.2 Flotační a terra pneumatiky

Flotační pneumatiky jsou velmi široké a díky tomu umožňují velmi malé tlaky huštění, což snižuje tlak na půdu a její zhuštění. Charakterizuje se dobrými vlastnostmi při přenosu síly na podložku. Terra pneumatiky jsou speciálně určené pro těžké stroje do terénu. Oproti radiální konstrukci se liší v zesílené boční vrstvě, která zvyšuje odolnost pneumatiky proti proražení. Jedná se o nízkotlaký typ pneumatik patentované firmou GOODYEAR v 60. letech minulého století. Tyto pneumatiky umožňují tlak huštění až 40 kPa, (PRIKNER, 2015).

3.2 Moderní zemědělské pneumatiky

Nově vyráběné zemědělské pneumatiky se stávají stále dokonalejšími, jsou více odolné, mají lepší vlastnosti a jsou univerzálnější, což značně zlepšuje využití mobilních dopravních prostředků. Hlavní směr ve vývoji pneumatik je zaměřen na hustící tlaky pneumatik. Vysoký tlak chrání pneumatiku před poškozením patky a bočnice a omezuje nebezpečí protočení pneumatiky na ráfku. Ovšem používání vysokého tlaku má i své nevýhody jako je např. nerovnoměrné opotřebení pneumatik při nezátížené jízdě, slabý efekt

tlumení nerovností, dochází k vytváření větších vyjetých kolejí a ke stlačování půdy, ke snížení tažné síly traktoru a zvýšení tahového odporu. Proto jsou výrobci nových zemědělských pneumatik zaměřeni především na snížení tlaku huštění pneumatik při práci. Při používání nižšího husticího tlaku dochází k zvětšení styčné plochy pneumatiky, na půdu tak bude působit menší kontaktní tlak a pneumatika bude vytvářet menší vyjeté koleje a méně stlačovat půdu. Nejlépe to posoudíme na vlhké a měkké půdě, na které vznikají velké rozdíly mezi používáním nízkého a vysokého tlaku huštění pneumatiky. Hlavními výrobci traktorových, resp. zemědělských pneumatik, jsou například MITAS, CONTINENTAL, MICHELIN, TRELLEBORG, NOKIAN, BKT, atd., (JAVOREK, 2012).

Moderní zemědělská pneumatika by měla zajistit tyto vlastnosti, (SYROVÝ, 2008):

- Přenos vertikálních zatížení (resp. přenos hmotnosti vozidla na vozovku či půdu)
- Přenos horizontálních sil (přenos brzdné síly, boční síly)
- Částečné odpružení vozidla
- Nízký valivý odpor
- Vysoká nosnost
- Jízdní bezpečnost na různém povrchu a jeho různém stavu
- Hospodárnost provozu (nízká hmotnost, odolnost, stabilita, montáž)
- Nízký přenos hluku a vibrací

3.3 Centrální systémy huštění pneumatik

Obvykle se při jízdě na silnici používají užší pneumatiky nahuštěné na vyšší tlak, naopak při provozu strojů a techniky na poli je vhodnější použít širší pneumatiky nahuštěné na nižší tlak, aby nedocházelo k nežádoucímu zhutnění půdy a tvorbě hlubokých vyjetých kolejí. Právě správná volba husticího tlaku je jednou z možností snižování limitního kontaktního tlaku na půdu, což vede k ochraně zemědělské půdy před nežádoucím zhutněním. V oblasti moderního zemědělství je nežádoucí zhutnění půdy, vytvářené pojezdy těžkými zemědělskými stroji a technikou, stále více diskutované téma. V současné době je tedy možné se setkat se zemědělskými stroji a soupravami, které jsou vybaveny centrálním systémem huštění pneumatik. Tento systém umožňuje rychlou změnu tlaku v pneumatikách, a tím dochází k zlepšení vlastností pneumatiky, především tahových, jak na měkké, vlhké půdě,

tak při jízdě na silnici. Regulace tlaku je možná za jízdy z místa obsluhy a umožňuje tak měnit tlak v pneumatikách v závislosti na druhu práce a potřebném tlaku huštění. Vysoký tlak se používá při práci na tvrdých podložkách a v dopravě, jelikož snižuje valivý odpor a zmenšuje opotřebení. Nízký hustící tlak pneumatik se používá především při práci v terénu a na nezpevněném povrchu, (JAVOREK, 2012; PRIKNER, 2015).

Nejčastěji se používají dva typy systémů centrálního huštění pneumatik:

- integrované systémy v konstrukci traktoru
- dodatečně instalované systémy

3.3.1 Integrovaný systém centrálního huštění pneumatik

Hlavní výhodou integrovaného systému centrálního huštění pneumatik spočívá v rychlosti zvyšování a snižování tlaku v pneumatice. Zvýšení tlaku o 100 kPa trvá zhruba 6 minut a snížení tlaku v pneumatice o 100 kPa zhruba 2 minuty. Značnou nevýhodou tohoto systému je ovšem vysoká cena, která je závislá na výrobci a typu stroje. Integrovaný systém centrální regulace tlaku v konstrukci traktoru od firmy Fendt je znázorněn na obrázku č. 21, (AGCO, 2016).



Obrázek č. 21. Integrovaný systém centrálního huštění pneumatik od firmy Fendt

Zdroj: [online].[cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.fendt.com/int/11342.asp>

3.3.2 Dodatečně instalované systémy centrálního huštění pneumatik

U dodatečně instalovaných systémů centrálního huštění pneumatik se vzduch přivádí z vnějšku nebo vnitřku kola přes otočný převodník do náboje kola. Probíhá zde nepřetržitá kontrola maximálního a minimálního tlaku pneumatik. U přívodu vzduchu z vnějšku kola lze použít potrubí s větším průměrem, což urychluje proces huštění. Požadovaný tlak v pneumatikách je nastavován pomocí potenciometru obsluhou systému. Hlavní nevýhodou tohoto systému je značné namáhání otočných převodníků a vysoké náklady. Dodatečně instalovaný systém centrálního huštění pneumatik s přívodem vzduchu z vnější strany kola je znázorněn na obrázku č. 22, (TRACTAIR, 2016).



Obrázek č. 22. Centrální huštění pneumatik traktoru

Zdroj: [online].[cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.airbrakesystems.co.uk/central-tyre-inflation/>

Systémy centrálního huštění pneumatik jsou sice nákladné, ale následná úspora vyplývající z jejich používání je poměrně značná, jelikož při správném tlaku huštění, případně při mírném podhuštění, dochází ke zlepšení tahových vlastností, snížení prokluzu a valivého odporu a k menší spotřebě paliva. Nicméně někteří zemědělci se tomuto přístupu brání s odůvodněním většího opotřebení a snížení životnosti pneumatik při jejich značně vysokých cenách a proto budou využívat jedno provozní huštění, (PRIKNER, 2015).

3.4 Dvumontáže a zatěžování kapalinou

Používání dvumontáže kol vede k snížení měrného tlaku na půdu a k zlepšení tahových vlastností, díky zvětšení styčné plochy pneumatiky s půdou či vozovkou.

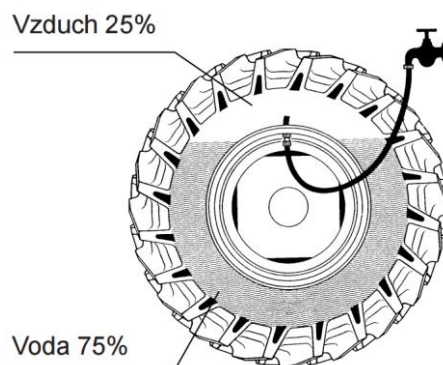
V některých zemích se používají u těžkých traktorů s výkonem motoru přes 300 kW i trojmontáže kol. U této metody je důležité zvolit správnou kombinaci velikostí pneumatik. Vhodné je použít pneumatiky stejných rozměrů, to ovšem ovlivňuje celkovou šířku traktoru a povolený limit 2,55 metrů (viz. obrázek č. 23), proto se často používají různé šířky pneumatik, které ovšem musejí disponovat stejným valivým poloměrem. Některé výkonné traktory ovšem nesplňují požadovanou celkovou šířku a proto jsou osazovány pásy. Doporučení pro výběr nejvhodnější kombinace pneumatik pro danou typovou třídu lze snadno získat z katalogů výrobců pneumatik, (BENEŠ, 2002; PRIKNER, 2015).



Obrázek č. 23. Použití dvoumontáže kol se shodnými pneumatikami

Zdroj: [online].[cit.2016-03-01]. Dostupné z: http://www.farmweb.cz/index.php?page=view_gallery&gal=51335

Kvalitnějšího záběru kol, respektive zlepšení tahových vlastností, lze také docílit dodatečným zatěžováním hnacích kol pomocí kapaliny. Jedná se o nejjednodušší a nejlevnější metodu přídatného zatížení, která spočívá ve zvýšení měrného tlaku na půdu, ale nezvyšuje zatížení nápravy. Z důvodu zachování pružnosti se pneumatiky plní kapalinou maximálně na 75 % objemu (viz. obrázek č. 24). Toho se docílje tím, že při plnění pneumatiky je plnicí ventil v nejvyšší poloze. V zimních obdobích se pneumatiky plní nemrznoucí směsí. Tato metoda ovšem není určena pro každou pneumatiku, jelikož pro plnění kapalinou musí být pneumatiky vybaveny speciálním ventilem, který umožňuje plnění kapalinou a zároveň upouštění vzduchu. Hlavní nevýhodou této metody je, že plnění pneumatik kapalinou značně mění jejich vlastnosti. Pneumatiky jsou tužší a méně pružné, zvyšuje se valivý odpor a riziko poškození pneumatik, ráfků i náprav, (FERDUS, 2016).



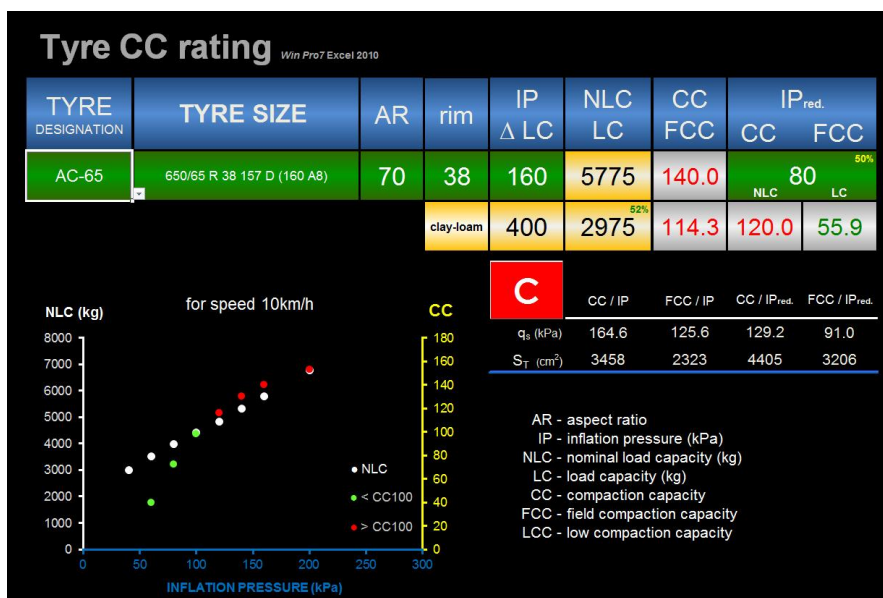
Obrázek č. 24. Plnění pneumatik vodou nebo nemrznoucí směsí

Zdroj: [online].[cit.2016-03-01]. Dostupné z: http://www.ferdus.cz/data/files/2027_Prosept-plneni-vodou.pdf

3.5 CC rating

Jedním ze způsobů minimalizace škodlivého zhutnění půdního profilu je využití limitních hodnot zatížení pneumatik stanovených podle standardizované metodiky CC - rating, (GREČENKO, 2014). CC-rating neboli Compaction Capacity = kompakční potenciál pneumatiky představuje pokrokový trend pro moderní zemědělství, na základě katalogových údajů pneumatik je přímo možné stanovit mezní hodnoty zatížení libovolné pneumatiky pro danou kombinaci jejího zatížení a tlaku huštění. Udává míru kompakce půdního profilu do hloubky 50 cm při limitní vlhkosti, kdy je půda nejnáchylnější na změny objemové hmotnosti. Objemové překročení hmotnosti půdy nad její kritickou hodnotu znázorňuje hodnota CC. Standardizovaná metodika byla vytvořena pro jílovitohlinitou půdu představující všeobecný půdní typ, disponující ideálním zrnitostním složením pro sledování kompakce půdy. Základní hodnota indexu 100 může představovat limitní hodnotu objemové hmotnosti jílovitohlinité půdy $1420 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, zaručující optimální podmínky pro růst kořenového systému. Hodnocení míry kompakce podle indexu CC je následující: CC 0-100, pneumatika se chová k půdě šetrně a nedojde k poškození půdního profilu; CC 101-150 představuje již škodlivou nominální kombinaci tlaku huštění a zatížení pneumatiky, ukazující na překročení limitní objemové hmotnosti. CC 151-200 je rozsahově extrémní překročení limitní hodnoty a pokud by pneumatika dosahovala hodnot v tomto rozmezí, nebyla by vhodná pro použití v konkrétních provozních podmínkách. CC index větší 200 se nedoporučuje vůbec a je označen jako extrémně škodlivý. Popisovaná metoda hodnocení kompakčního potenciálu pneumatiky by měla především pomoci výrobcům zemědělské techniky při výběru vhodných pneumatik pro konkrétní stroj podle nominálních technických parametrů udávaných výrobcem pneumatik. Další možností CC-rating hodnocení pneumatik je posouzení aktuální

kombinace tlaku huštění a zatížení přímo v provozních podmínkách. Dílčí označení FCC (Field Compaction Capacity) umožňuje okamžitě stanovit úroveň tlaku huštění pro optimální snížení kontaktního tlaku pro dané zatížení konkrétní pneumatiky s odkazem na index aktuální míry kompakce FCC (viz. obrázek č. 25).



Obrázek č. 25. Příklad stanovení hodnot kompakčního potenciálu pneumatiky CC a FCC pro jílovitohlinitou půdu (pneu Mitas RD-03, 650/65 R 38); nominální NLC (katalogové) a provozní (požadované) LC kombinace zatížení pneumatiky a tlaku huštění pneumatiky.

Zdroj: Prikner Patrik. Demoverze programu pro stanovení kompakčního potenciálu. Nepublikováno.

4. Přehled zemědělských pneumatik a jejich porovnání

V této kapitole byl vytvořen ucelený přehled a porovnání zemědělských pneumatik od firmy CONTINENTAL - MITAS, což jsou jedni z největších světových výrobců zemědělských pneumatik. Jednotlivé pneumatiky a jejich alternativní náhrady byly vybrány z technického rádce pro zemědělské pneumatiky 2014/2015 a následně porovnány pomocí programu Tyre CC rating (viz. obrázek č. 25). Prostřednictvím tohoto programu bylo možné vzájemně porovnat CC, FCC, střední kontaktní tlak a styčnou plochu pneumatiky s ohledem na individuální kombinaci tlaku huštění a zatížení. Přehled a porovnání bylo vytvořeno pro pneumatiky (viz. obrázek č. 26):

- AS-Farmer - robustní diagonální pneumatika
- AC 65 - radiální nízkoprofilová pneumatika
- AC 85 - radiální kultivační pneumatika
- SVT - velkoobjemová pneumatika



Obrázek č. 26. Přehled porovnávaných pneumatik

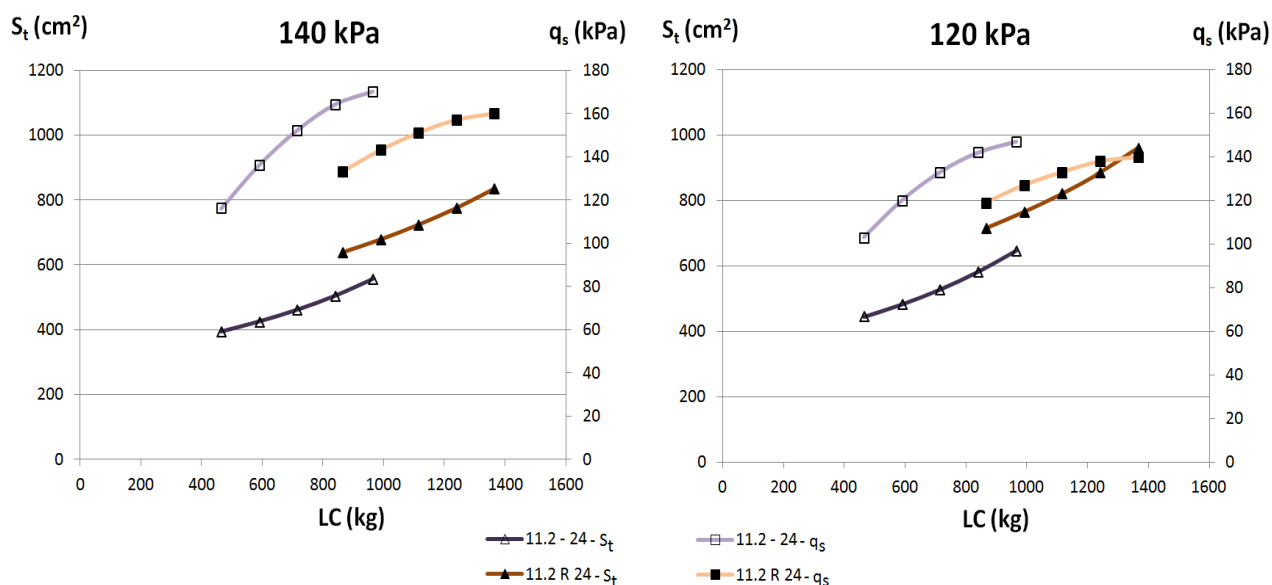
Zdroj: upraveno: [online].[cit.2016-03-12]. Dostupné z: http://www.mitas-tyres.com/underwood/download/files/continental_databook_2014-15_cz.pdf. (upraveno).

Porovnávány byly diagonální pneumatiky AS-Farmer s kultivačními pneumatikami AC 85 stejných rozměrů, nízkoprofilové pneumatiky AC 65 s alternativními kultivačními pneumatikami AC 85 a poslední část kapitoly se věnuje velkoobjemovým pneumatikám SVT určených pro zemědělské stroje nejvyšších výkonových tříd. Alternativní pneumatiky byly vybrány pomocí převodní tabulky, která by měla být obsažena v každém technickém rádci zemědělských pneumatik. Tlak huštění u předních pneumatik byl nastaven na 140 a 120 kPa, u zadních pneumatik na 160 a 140 kPa. Grafické znázornění závislosti mezi zatížením, styčnou plochou a kontaktním tlakem je vytvořeno vždy pro první a poslední kombinaci

pneumatik dané tabulky, kromě pneumatik SVT, u kterých je porovnávána vždy jen jedna pneumatika.

Pneumatiky AS-Farmer jsou osvědčené robustní diagonální pneumatiky, které jsou univerzální a vhodné pro všechny druhy použití, a to především na suché půdě. Charakterizují se zejména vysokou odolností proti defektu, proříznutí a oděru. K těmto pneumatikám byly rozměrově přiřazeny pneumatiky AC 85 pro porovnání diagonálních a radiálních pneumatik. Moderní radiální pneumatiky AC 85 disponují vyváženými charakteristikami a jsou vhodné jak pro práci na poli, tak pro jízdu na silnici. Přehled a porovnání těchto pneumatik je zpracováno v tabulce č. 2. Na základě těchto dat bylo následně zpracováno grafické porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení, viz. graf č. 1 a č. 2.

Graf č. 1. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatiky AS-Farmer a AC 85 - přední (1.kombinace)

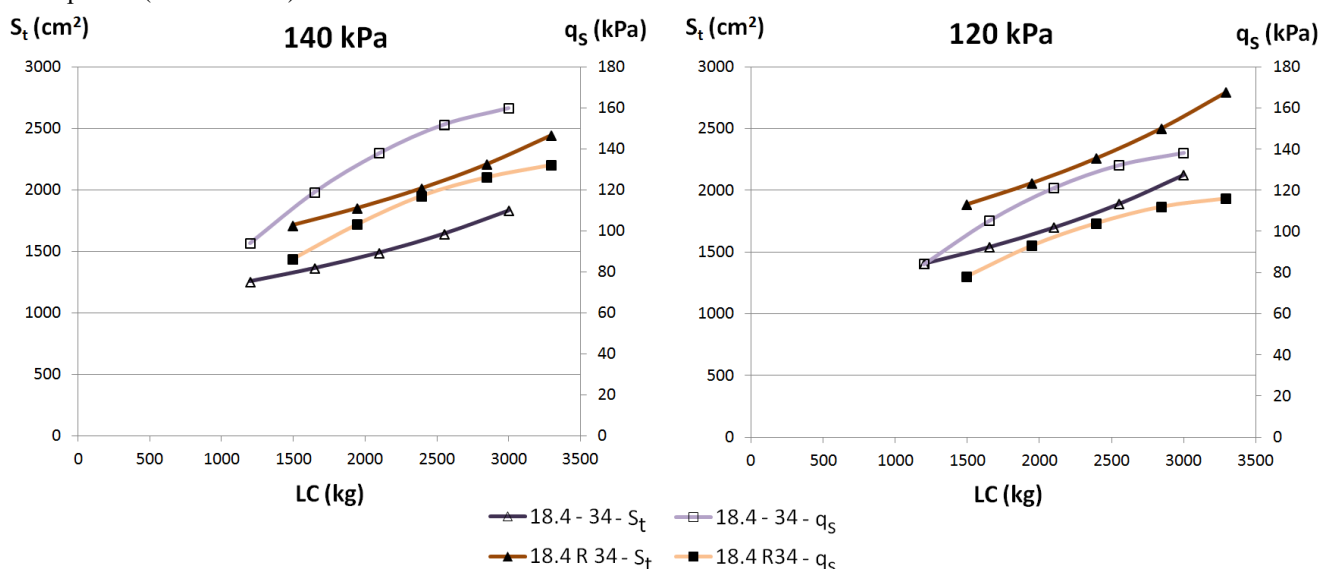


Tabulka č. 2. Přehled a porovnání pneumatik AS-Farmer a AC 85

AS-farmer	11.2 - 24 (8 PR)			12.4 - 24 (8 PR)			14.9 - 24 (8 PR)			16.9 - 30 (8 PR)			16.9 - 34 (8 PR)			18.4 - 34 (8 PR)							
pi (kPa)	140 - 120			pi (kPa)			140 - 120			pi (kPa)			140 - 120			pi (kPa)							
LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC				
465	394 - 444	116 - 103	6 - 3	865	508 - 578	167 - 147	24 - 15	700	646 - 724	106 - 95	17 - 10	725	917 - 1024	78 - 70	0 - 0	875	1059 - 1185	81 - 72	6 - 0	1200	1255 - 1407	94 - 84	29 - 14
590	425 - 482	136 - 120	9 - 6	990	540 - 618	180 - 157	28 - 19	950	701 - 792	133 - 118	32 - 29	1100	1001 - 1128	108 - 96	35 - 22	1250	1153 - 1302	106 - 94	39 - 24	1650	1363 - 1541	119 - 105	62 - 45
715	461 - 527	152 - 133	12 - 8	1115	576 - 662	190 - 165	31 - 22	1200	766 - 873	154 - 135	43 - 36	1475	1102 - 1254	131 - 115	57 - 43	1625	1264 - 1440	126 - 111	60 - 44	2100	1490 - 1700	138 - 121	82 - 71
840	504 - 581	164 - 142	14 - 10	1240	618 - 714	197 - 170	33 - 23	1450	844 - 970	169 - 147	50 - 41	1850	1225 - 1407	148 - 129	69 - 54	2000	1400 - 1609	140 - 122	72 - 55	2550	1645 - 1891	152 - 132	93 - 79
965	556 - 645	170 - 147	15 - 11	1365	666 - 773	201 - 173	34 - 25	1700	940 - 1089	177 - 153	54 - 44	2225	1380 - 1598	158 - 137	76 - 60	2375	1568 - 1817	149 - 128	78 - 61	3000	1834 - 2127	160 - 138	98 - 83
NLC 140/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC
1090	620	176	16	1490	721	206	36	1950	1060	184	58	2600	1579	164	79	2750	1782	153	81	3450	2074	165	101
980	626	156	13	1365	726	187	30	1760	1070	164	49	2340	1602	146	67	2470	1807	135	67	3100	2104	146	88

AC 85	280/85 R 24 [11.2 R 24]			320/85 R 24 [12.4 R 24]			380/85 R 24 [14.9 R 24]			420/85 R 30 [16.9 R 30]			420/85 R 34 [16.9 R 34]			460/85 R 34 [18.4 R 34]							
pi (kPa)	140 - 120			pi (kPa)			140 - 120			pi (kPa)			140 - 120			pi (kPa)							
LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC				
865	638 - 714	133 - 119	25 - 23	1200	826 - 928	143 - 127	42 - 37	1130	1017 - 1129	109 - 98	37 - 26	1200	1367 - 1501	86 - 78	24 - 13	1380	1478 - 1630	92 - 83	34 - 21	1495	1711 - 1884	86 - 78	29 - 15
990	678 - 764	143 - 127	29 - 26	1325	870 - 983	149 - 132	45 - 39	1380	1093 - 1222	124 - 111	50 - 39	1575	1479 - 1640	105 - 94	50 - 36	1755	1594 - 1774	108 - 97	57 - 42	1945	1850 - 2056	103 - 93	59 - 42
1115	724 - 820	151 - 133	32 - 27	1450	920 - 1045	155 - 136	47 - 41	1630	1180 - 1330	136 - 120	59 - 50	1950	1611 - 1803	119 - 106	67 - 52	2130	1731 - 1943	121 - 108	73 - 56	2395	2013 - 2258	117 - 104	78 - 60
1240	776 - 884	157 - 138	34 - 28	1575	975 - 1113	159 - 139	49 - 42	1880	1282 - 1457	144 - 127	65 - 54	2325	1769 - 1999	129 - 114	79 - 62	2505	1893 - 2144	130 - 115	83 - 65	2845	2208 - 2500	126 - 112	90 - 71
1365	836 - 959	160 - 140	35 - 29	1700	1038 - 1191	161 - 140	50 - 42	2130	1404 - 1608	149 - 130	68 - 57	2700	1961 - 2237	135 - 118	85 - 68	2880	2088 - 2386	135 - 118	89 - 72	3295	2445 - 2793	132 - 116	96 - 77
NLC 140/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC
1490	906	163	37	1825	1109	164	52	2380	1552	152	71	3075	2200	139	86	3255	2329	138	90	3745	2739	136	100
1390	925	149	32	1700	1133	149	45	2220	1584	139	62	2865	2259	126	75	3035	2385	126	79	3490	2804	123	87

Graf č. 2. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatiky AS-Farmer a AC 85 - přední (6.kombinace)



Z výše uvedených záznamů vyplývá, že radiální kultivační pneumatiky AC 85 nabízí lepší záběr a vyšší ochranu půdního podloží nežli diagonální pneumatiky AS-Farmer. Díky své konstrukci disponují větší styčnou plochou a hodnoty středního kontaktního tlaku tak dosahují nižších hodnot i při značně větším zatížení. Z hodnot CC a FCC v tabulce č. 2 je patrné, že oba typy pneumatik se chovají k půdě šetrně a nedochází k poškození půdního profilu, nicméně pneumatiky AC 85 se dají použít pro těžší a výkonnější stroje díky vyšším hodnotám nominálního zatížení.

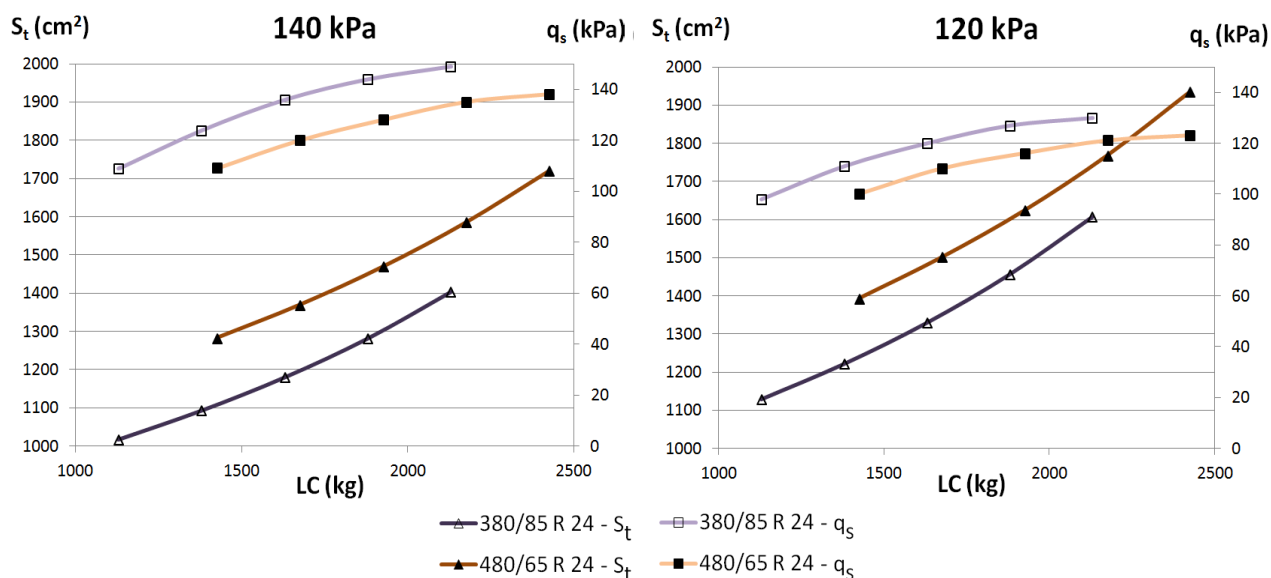
Následující přehled se týká pneumatik AC 85 a AC 65, ve kterém šlo především o porovnání standardních kultivačních pneumatik AC 85 s nízkoprofilovými pneumatikami AC 65. Oba typy pneumatik se vyznačují všestranným použitím a určitou efektivitou na poli i na silnici. Nejdříve jsou porovnávány přední pneumatiky, následně zadní pneumatiky.

Tabulka č. 3. Přehled a porovnání předních pneumatik AC 85 a AC 65

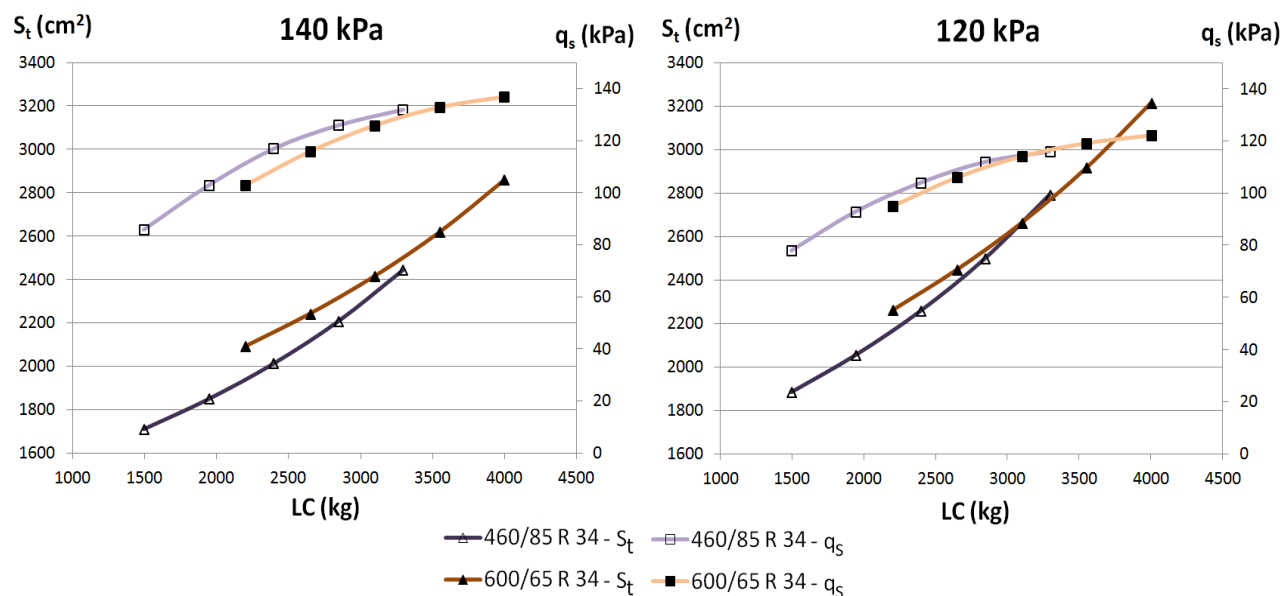
AC 85	380/85 R 24 [14.9 R 24]			420/85 R 30 [16.9 R 30]			420/85 R 34 [16.9 R 34]			460/85 R 34 [18.4 R 34]					
p_i (kPa)	140 - 120			p_i (kPa)	140 - 120			p_i (kPa)	140 - 120			p_i (kPa)	140 - 120		
LC (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	FCC
1130	1017 - 1129	109 - 98	37 - 26	1200	1367 - 1501	86 - 78	24 - 13	1380	1478 - 1630	92 - 83	34 - 21	1495	1711 - 1884	86 - 78	29 - 15
1380	1093 - 1222	124 - 111	50 - 39	1575	1479 - 1640	105 - 94	50 - 36	1755	1594 - 1774	108 - 97	57 - 42	1945	1850 - 2056	103 - 93	59 - 42
1630	1180 - 1330	136 - 120	59 - 50	1950	1611 - 1803	119 - 106	67 - 52	2130	1731 - 1943	121 - 108	73 - 56	2395	2013 - 2258	117 - 104	78 - 60
1880	1282 - 1457	144 - 127	65 - 54	2325	1769 - 1999	129 - 114	79 - 62	2505	1893 - 2144	130 - 115	83 - 65	2845	2208 - 2500	126 - 112	90 - 71
2130	1404 - 1608	149 - 130	68 - 57	2700	1961 - 2237	135 - 118	85 - 68	2880	2088 - 2386	135 - 118	89 - 72	3295	2445 - 2793	132 - 116	96 - 77
NLC 140/120 (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	CC
2380	1552	152	71	3075	2200	139	86	3255	2329	138	90	3745	2739	136	100
2220	1584	139	62	2865	2259	126	75	3035	2385	126	79	3490	2804	123	87

AC 65	480/65 R 24 133 D (136 A8)			540/65 R 30 150 D (153 A8)			540/65 R 34 145 D (148 A8)			600/65 R 34 151 D (154 A8)					
p_i (kPa)	140 - 120			p_i (kPa)	140 - 120			p_i (kPa)	140 - 120			p_i (kPa)	140 - 120		
LC (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	FCC
1425	1283 - 1393	109 - 100	47 - 37	1690	1633 - 1762	102 - 94	53 - 42	1890	1686 - 1823	110 - 102	68 - 57	2200	2093 - 2263	103 - 95	70 - 56
1675	1370 - 1501	120 - 110	58 - 47	2065	1754 - 1912	116 - 106	72 - 59	2265	1806 - 1971	123 - 113	84 - 72	2650	2244 - 2450	116 - 106	89 - 74
1925	1470 - 1624	128 - 116	66 - 54	2440	1894 - 2086	126 - 115	84 - 71	2640	1945 - 2142	133 - 121	95 - 81	3100	2418 - 2665	126 - 114	101 - 86
2175	1586 - 1768	135 - 121	71 - 59	2815	2058 - 2289	134 - 121	92 - 77	3015	2106 - 2342	140 - 126	102 - 87	3550	2621 - 2917	133 - 119	108 - 92
2425	1721 - 1935	138 - 123	74 - 61	3190	2254 - 2532	139 - 124	96 - 80	3390	2297 - 2577	145 - 129	105 - 90	4000	2862 - 3215	137 - 122	111 - 96
NLC 140/120 (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	CC	NLC 140/120 (kg)	St (cm ²)	q_s (kPa)	CC
2675	1882	141	77	3565	2491	142	98	3765	2526	147	107	4450	3151	140	114
2455	1951	125	64	3255	2580	125	83	3450	2622	130	92	4055	3274	122	97

Graf č. 3. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatiky AC 85 a AC 65 - přední (1.kombinace)



Graf č. 4. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatiky AC 85 a AC 65 - přední (4.kombinace)



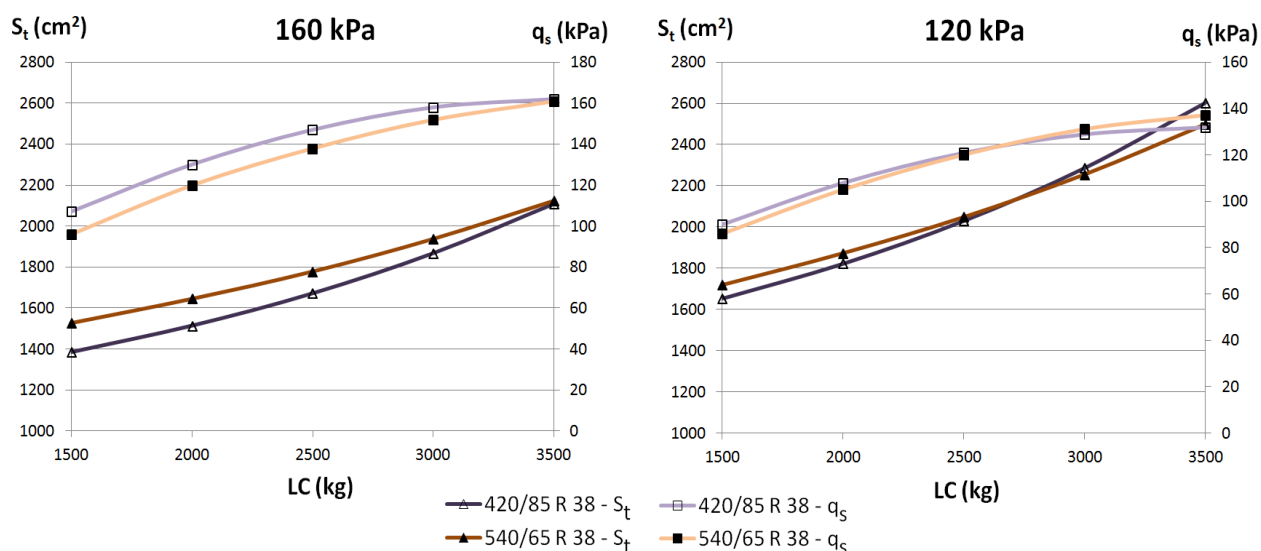
Dle hodnot z tabulky č. 3 je patrné, že pneumatiky AC 65 disponují větší styčnou plochou než pneumatiky AC 85. Hodnoty CC a FFC se pohybují v optimálním rozmezí a nemělo by tak docházet k nežádoucímu zhuštění půdy u těchto pneumatik. Pneumatiky AC 65 se tak jeví jako vhodná alternativa pneumatik AC 85, jak pro práci na poli, tak pro jízdu na silnici.

Tabulka č. 4. Přehled a porovnání zadních pneumatik AC 85 a AC 65

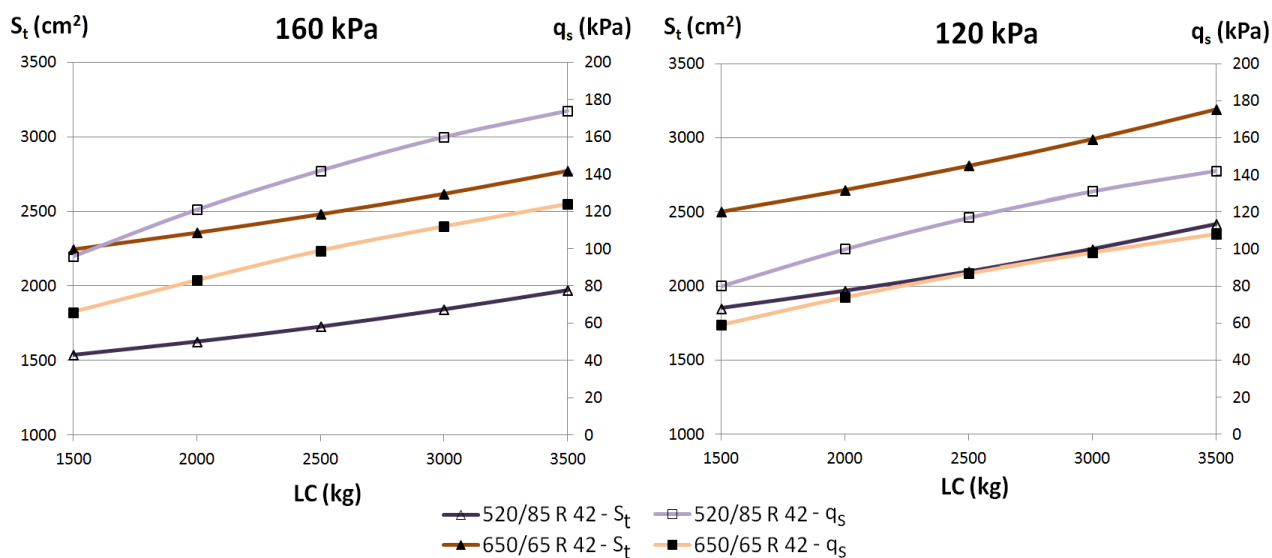
AC 85				420/85 R 38 [16.9 R 38]				460/85 R 38 [18.4 R 38]				520/85 R 38 [20.8 R 38]				520/85 R 42 [20.8 R 42]			
pi (kPa)	160 - 120			pi (kPa)	160 - 120			pi (kPa)	160 - 120			pi (kPa)	160 - 120						
LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC				
1500	1386	1654	107 - 90	55 - 29	1500	1446	1724	102 - 86	52 - 23	1500	1682	2012	88 - 73	51 - 3	1500	1539	1850	96 - 80	67 - 23
2000	1515	1823	130 - 108	81 - 56	2000	1558	1871	126 - 105	84 - 56	2000	1786	2149	110 - 91	79 - 43	2000	1628	1967	121 - 100	91 - 57
2500	1673	2031	147 - 121	96 - 71	2500	1688	2041	145 - 120	101 - 78	2500	1904	2304	129 - 106	99 - 70	2500	1728	2098	142 - 117	108 - 80
3000	1869	2287	158 - 129	103 - 79	3000	1845	2246	160 - 131	109 - 88	3000	2038	2481	144 - 119	113 - 89	3000	1844	2251	160 - 131	120 - 100
3500	2110	2603	162 - 132	105 - 81	3500	2031	2491	169 - 138	112 - 95	3500	2193	2684	157 - 128	122 - 98	3500	1972	2420	174 - 142	128 - 108
NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC				
3640	2197	163	106	4225	2377	176	119	5040	2863	174	131	5300	2642	199	137				
3205	2305	137	88	3680	2489	146	102	4440	2978	147	116	4650	2736	168	125				

AC 65				540/65 R 38 147 D (150 A8)				600/65 R 38 153 D (156 A8)				650/65 R 38 157 D (160 A8)				650/65 R 42 165 D (168 A8)			
pi (kPa)	160 - 120			pi (kPa)	160 - 120			pi (kPa)	160 - 120			pi (kPa)	160 - 120						
LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC				
1500	1528	1720	96 - 86	48 - 29	1500	1828	2047	81 - 72	25 - 3	1500	1988	2237	74 - 66	32 - 0	1500	2246	2502	66 - 59	0 - 0
2000	1646	1874	120 - 105	82 - 62	2000	1940	2192	101 - 90	69 - 46	2000	2090	2370	94 - 83	67 - 36	2000	2358	2649	83 - 74	46 - 12
2500	1779	2049	138 - 120	100 - 80	2500	2065	2357	119 - 104	95 - 74	2500	2206	2521	111 - 97	92 - 69	2500	2482	2812	99 - 87	78 - 50
3000	1938	2256	152 - 131	111 - 91	3000	2208	2544	133 - 116	110 - 91	3000	2339	2694	126 - 110	111 - 92	3000	2619	2992	112 - 98	100 - 77
3500	2124	2499	161 - 137	115 - 98	3500	2373	2758	145 - 125	117 - 102	3500	2481	2880	138 - 119	124 - 103	3500	2773	3193	124 - 108	116 - 95
NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC				
4305	2523	168	119	5110	3120	162	130	5775	3458	165	140	6005	3930	150	137				
3640	2709	132	95	4275	3364	125	103	4830	3715	128	116	5065	4232	118	110				

Graf č. 5. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatiky AC 85 a AC 65 - zadní (1.kombinace)



Graf č. 6. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatiky AC 85 a AC 65 - zadní (4.kombinace)



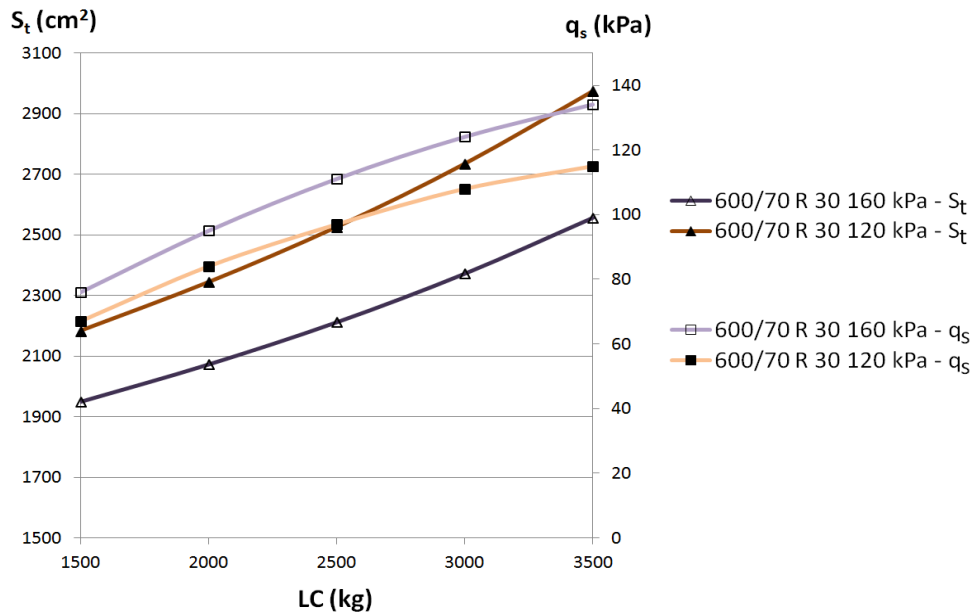
Při porovnání zadních pneumatik AC 85 a AC 65 je z tabulky č. 4 a grafu č. 5 a č. 6 zřejmé, že se hodnoty styčné plochy a kontaktního tlaku jen mírně odchylojí, nicméně čím větší rozměry pneumatik se porovnávají, tím jsou odchylky větší. Pneumatiky AC 65 pak disponují většími styčnými plochami a menším kontaktním tlakem než pneumatiky AC 85. Při porovnání hodnot FCC a CC jsou s pohledu kompakce půdního profilu výhodnější pneumatiky AC 65. Další výhodou pneumatik AC 65 je jejich možnost zvýšeného zatížení oproti AC 85, díky pevnosti bočnice.

Velkoobjemové pneumatiky SVT (Super Volume Tyre) byly vyvinuty především pro těžké, silné stroje s výkonem převyšující 200 HP. Zaručují šetrnější vliv na půdu díky extrémně velkému objemu vzduchu v pneumatice. Pneumatiky SVT jsou též vhodné jak pro práci na poli i pro jízdu na silnici. Na poli poskytuje pneumatika maximální výkon díky vyšší nosnosti a nízkému husticímu tlaku. Na silnici se vyznačuje dobrým jízdním komfortem, stabilitou a mimořádnou přepravní kapacitou.

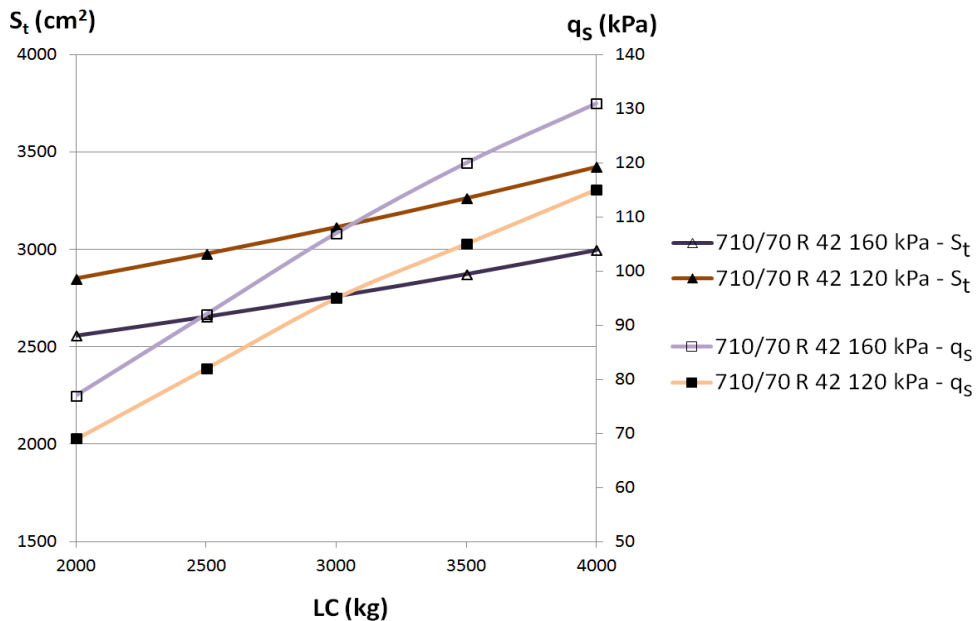
Tabulka č. 5. Přehled a porovnání pneumatik SVT

SVT	600/70 R 30 152 D (155 A8)					620/75 R 30 163 B (163 A8)					650/65 R 34 161 D (164 A8)			
pi (kPa)	160 - 120				pi (kPa)	160 - 120				pi (kPa)	160 - 120			
LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC		LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC		LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	
1500	1949 - 2183	76 - 67	14 - 0		1500	1866 - 2085	79 - 71	43 - 1		1500	1994 - 2228	74 - 66	18 - 0	
2000	2072 - 2344	95 - 84	60 - 35		2000	1973 - 2226	100 - 88	76 - 45		2000	2106 - 2375	93 - 83	62 - 36	
2500	2211 - 2526	111 - 97	90 - 65		2500	2093 - 2383	117 - 103	98 - 75		2500	2232 - 2540	110 - 97	91 - 67	
3000	2371 - 2735	124 - 108	107 - 84		3000	2229 - 2561	132 - 115	113 - 95		3000	2375 - 2726	124 - 108	110 - 88	
3500	2555 - 2975	134 - 115	116 - 96		3500	2383 - 2763	144 - 124	123 - 106		3500	2536 - 2937	135 - 117	121 - 102	
NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC		NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC		NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	
4970	3310	149	125		5355	3209	165	134		5425	3436	156	133	
4580	3575	127	109		4780	3446	137	118		4860	3715	130	116	
SVT	800/70 R 38 171 D (178 A8)					900/60 R 38 172 D (175 A8)					710/70 R 42 173 D (176 A8)			
pi (kPa)	160 - 120				pi (kPa)	160 - 120				pi (kPa)	160 - 120			
LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC		LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC		LC (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	FCC	
2000	3233 - 3745	61 - 52	0 - 0		2000	3473 - 3860	57 - 51	0 - 0		2000	2557 - 2851	77 - 69	34 - 0	
2500	3337 - 3883	74 - 63	24 - 0		2500	3587 - 4010	68 - 61	0 - 0		2500	2654 - 2978	92 - 82	75 - 49	
3000	3452 - 4032	86 - 73	78 - 27		3000	3710 - 4170	79 - 71	45 - 1		3000	2759 - 3115	107 - 95	104 - 79	
3500	3569 - 4186	96 - 82	100 - 57		3500	3841 - 4342	89 - 79	84 - 44		3500	2872 - 3264	120 - 105	123 - 101	
4000	3700 - 4358	106 - 90	120 - 82		4000	3982 - 4526	99 - 87	110 - 75		4000	2995 - 3425	131 - 115	136 - 117	
NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC		NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC		NLC 160/120 (kg)	St (cm2)	qs (kPa)	CC	
8960	5744	155	159		8820	6158	142	156		7840	4462	174	156	
7965	6133	129	146		7460	6718	110	129		6910	4794	143	144	

Graf č. 7. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatika 600/70 R30 při tlaku huštění 160 a 120 kPa



Graf č. 8. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatika 710/70 R42 při tlaku huštění 160 a 120 kPa



Pneumatiky SVT jsou charakteristické velkou styčnou plochou a to především díky vyráběným rozměrům a jejich konstrukci. Tyto extrémně široké pneumatiky rozkládají hmotnost stroje na půdu a snižují nežádoucí utužení půdního profilu. Z tabulky č. 5 je patrné, že pneumatiky SVT vytvářejí poměrně nízké hodnoty středního kontaktního tlaku. V případech kdy je střední kontaktní tlak nižší než 70 kPa vycházejí hodnoty FCC nulové, ovšem jen u velmi malého zatížení. Grafy č. 7 a č. 8 slouží jako ilustrace změny velikosti styčné plochy a kontaktního tlaku v závislosti na zatížení a hustícím tlaku pneumatiky. Obecně lze však říci, že velikost kontaktní plochy pneumatiky a kontaktního tlaku závisí na aktuálním svislém zatížení.

5. Laboratorní testování

Laboratorní testování bylo zaměřeno především na stanovení styčné plochy pneumatiky s ohledem na individuální kombinaci tlaku huštění a zatížení. Interakce kontaktního tlaku a styčné plochy pneumatiky zahrnuje deformaci, která může být formulována jako funkce zátěže s ohledem na specifické parametry pneumatiky pod stálým zatížením. Výsledky testování byly hlavním podkladem pro vytvoření grafického znázornění závislostí mezi zatížením kola, rozložením kontaktního tlaku a velikostí styčné plochy pneumatiky.

5.1 Materiály a metody

Laboratorní testování probíhalo na části laboratorního půdního kompaktoru, u kterého byla využita souprava pro testování pneumatik s volitelnou zátěží. Pneumatika byla připevněna k hydraulickému ovládnání a elektronické regulaci zátěže v plošině o 1 m², která umožňuje maximální zatížení pneumatik až na 6900 kg. Dále bylo využito kompaktní přenosné zařízení plantograf, obsahující systém měření kontaktního tlaku mezi pneumatikou a deskou, ve kterém jsou uspořádány miniaturní dotykové senzory tlaku. Toto zařízení umožňuje snímání statických i dynamických průběhů zatížení. Tlakové senzory jsou řízeny elektronickými obvody, které kontrolují funkci a přenos naměřených dat do počítače k dalšímu vyhodnocení. Konstrukce desky plantografu je popsána v patentu, (VOLF et.al., 2010). Tento systém spolu s laboratorním půdním kompaktozem umožňuje se zlepšenou přesností přímé měření a promítnutí rozložení kontaktního tlaku mezi pneumatikou a deskou, resp. ve stykové ploše dezénu pneumatiky (viz. obrázek č. 27).

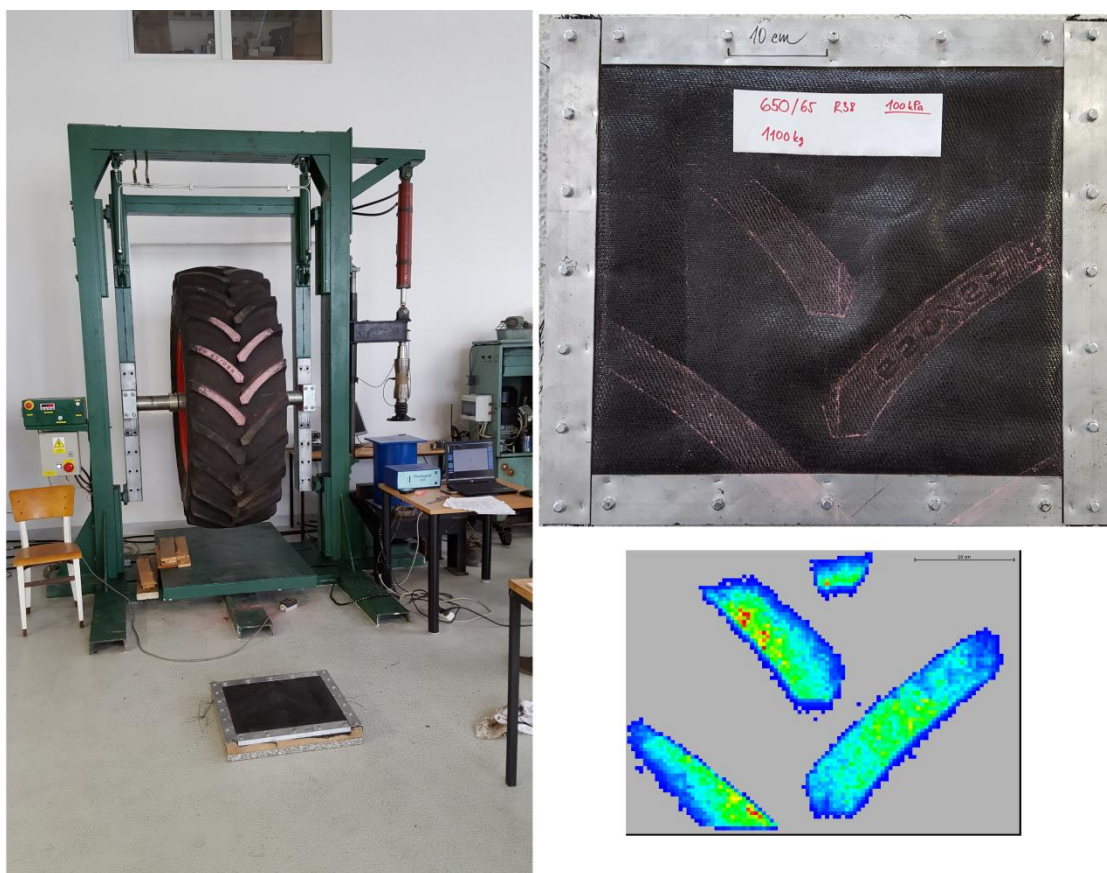


Obrázek č. 27. Laboratorní zařízení pro testování pneumatik s regulovatelným zatížením a plantografem (namontovaná pneumatika - Mitas 650/65R38 RD-03)

Testovací plocha plantografu je vybavena 7500 kusy senzorů v aktivní ploše 40 x 30 cm, což je přibližně 6,25 senzoru na cm². Vnitřní část desky je přesně pokryta vodivým elastomerem a nevodivým pružným materiálem, aby se zabránilo vnějšímu poškození. Povrch desky je opatřen pružnou geotextilní vrstvou. Rychlost snímání se pohybuje v rozmezí až do 300 snímků za sekundu. Plantograf je vybaven pojistkou proti přetížení a umožňuje měřit hodnoty kontaktního tlaku do 400 kPa. Sensory umožňují aplikovat jmenovité zatížení 34 kN pro velké zemědělské pneumatiky, což koresponduje s traktorem o celkové hmotnosti blížící se 15 tunám. Výstup ze zařízení je barevný rastr a matice hodnot tlaků vyvolané pneumatikou, které jsou detekovány jednotlivými miniaturními senzory. Základní technické údaje jsou uvedeny v tabulce č. 6.

Tabulka č. 6. Základní technické údaje Plantografu

Zatížení	až do 3400 kg
Rozsah tlaků	0 - 400 kPa
Aktivní rozsah senzorů	40 x 30 cm
Počet senzorů	7500 kusů
Počet snímků za sekundu	60
Snímkovací frekvence	2,5 MHz



Obrázek č. 28. Porovnávání ploch šípů pneumatiky Mitas 650/65R38 RD-03

První část testovací procedury byla zaměřena na ověření funkčnosti a přesnosti plantografu. Testovaná pneumatika Mitas 650/65R38 RD-03 byla zatěžována v rozsahu od 500 do 2000 kg při tlaku huštění 100 a 160 kPa. Následně byly stanoveny, pomocí programu Corel-Draw, a porovnávány plochy šípů dezénu pneumatiky zaznamenané plantografem s plochami šípů vytvořené otiskem pneumatiky na desce plantografu, viz. obrázek č. 28.

Druhá část testovací procedury zahrnovala odhad vztahu mezi zatížením kola a rozložením tlaku v kontaktní ploše dezénu pneumatiky při statickém zatížení. Testování statického zatížení probíhalo na pneumatice Mitas 650/65R38 RD-03 s využitím části laboratorního půdního kompaktoru (viz. obrázek č. 27). Postup měření byl podobný jako u ověření funkčnosti a přesnosti plantografu. To znamená, že pneumatika byla zatěžována v rozsahu od 50 do 2000 kg při tlaku huštění 100 a 160 kPa. Následné vyhodnocení probíhalo porovnáním těchto vstupních parametrů v závislosti na výstupu plantografu, tedy na barevném rastru znázorňující kontaktní plochu pneumatiky a rozložení tlaku.

Poslední část testovací procedury spočívala v porovnání statického a dynamického zatížení pneumatiky. Dynamické testování umožňuje přímé sledování chování tlaku a snižuje extrémní odchylky v rozložení tlaku na snímací desku plantografu z důvodu minimalizace deformace dezénu pneumatiky. K testování byla vybrána pneumatika Barum 14,9-28 (8PR), namontovaná na zadní nápravu traktoru Zetor 5011 (viz. obrázek č. 29). Zatížení zadní pneumatiky 770 kg bylo vypočteno v souladu s celkovým rozložením hmotnosti na obě nápravy v poměru 30/70 %. Při celkové hmotnosti traktoru 2200 kg působí na zadní nápravu zatížení o 1540 kg.



Obrázek č. 29. Porovnávání dynamického a statického zatížení pneumatiky Barum 14,9-28 pomocí plantografu

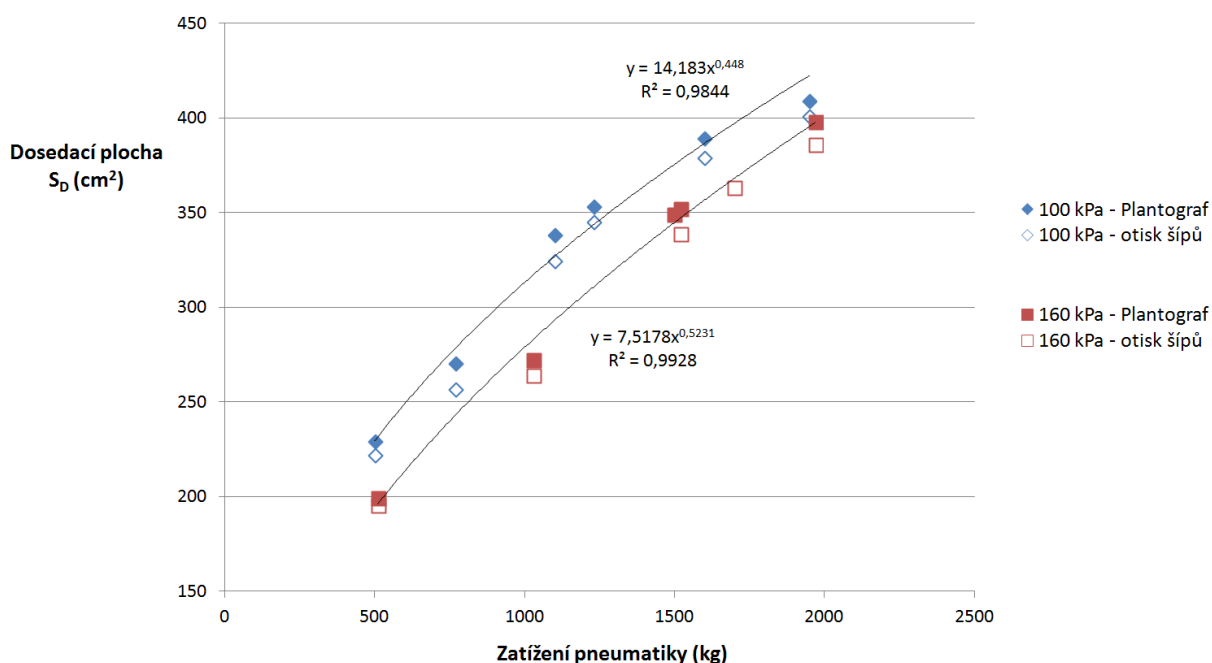
5.2 Výsledky a diskuze

Při ověřování funkčnosti a přesnosti plantografu byly naměřené hodnoty ploch šípů pneumatiky otisknuté na desce plantografu velmi blízké hodnotám naměřených a vypočtených ploch zjištěné pomocí samotným plantografem. Postup je zřejmý z obrázku č. 28. Naměřené a vypočtené hodnoty ploch šípů jsou znázorněny v tabulce č. 7 a následně graficky zpracovány, viz. graf č. 9.

Tabulka č. 7. Ověření funkčnosti a přesnosti plantografu testováním pneumatiky Mitas 650/65 R38

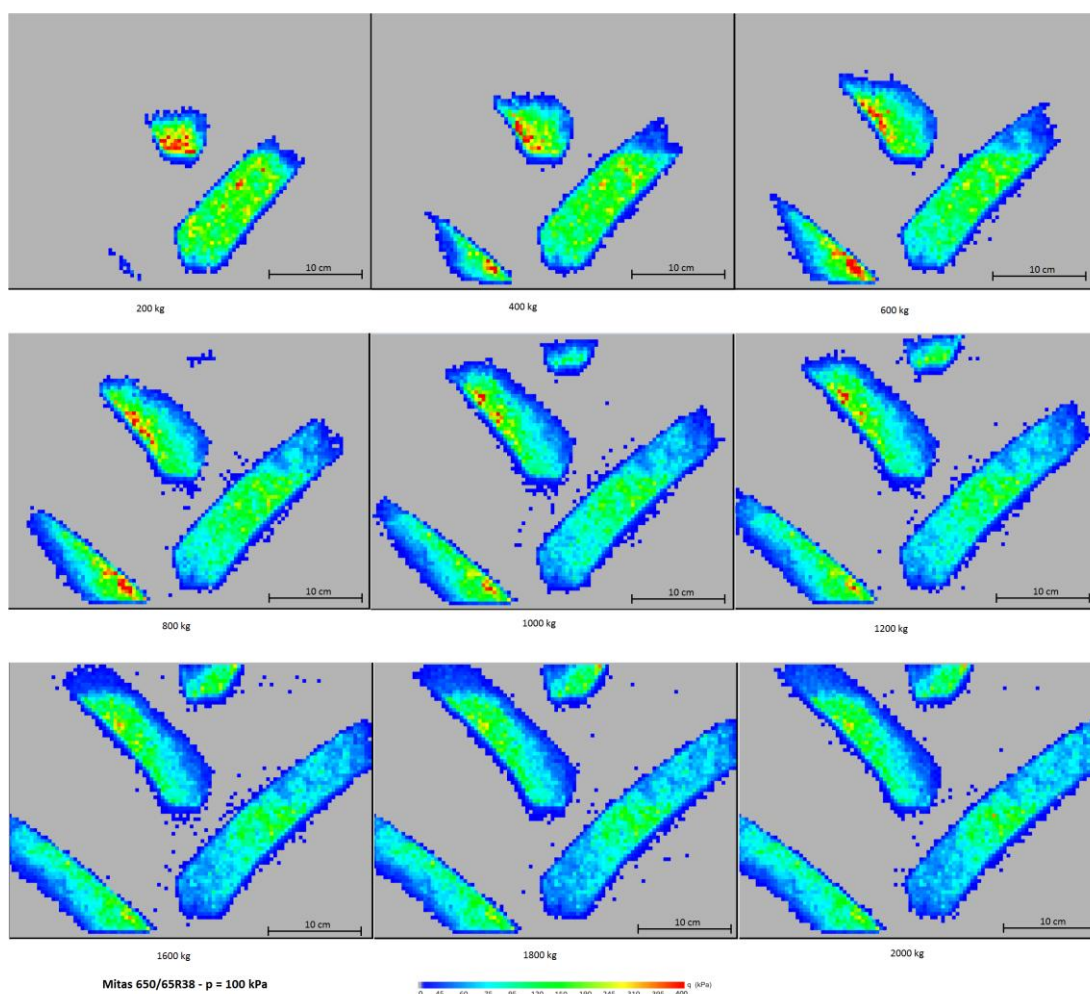
Tlak huštění (kPa)	Zatížení (kg)	Plocha šípů pneumatiky na desce (cm ²)	Plocha šípů zjištěna Plantografem (cm ²)
100	500	221,7	229,1
	770	256,5	270,3
	1100	324,6	338,4
	1230	345,2	353,2
	1600	379,1	389,2
	1950	401,1	409,3
160	510	195,2	199,4
	1030	264,8	272,1
	1520	338,5	349,3
	1700	363,2	352,5
	1970	386,1	398,4

Graf č. 9. Porovnávání plochy šípů dezénu pneumatiky u pneumatiky Mitas 650/65 R38

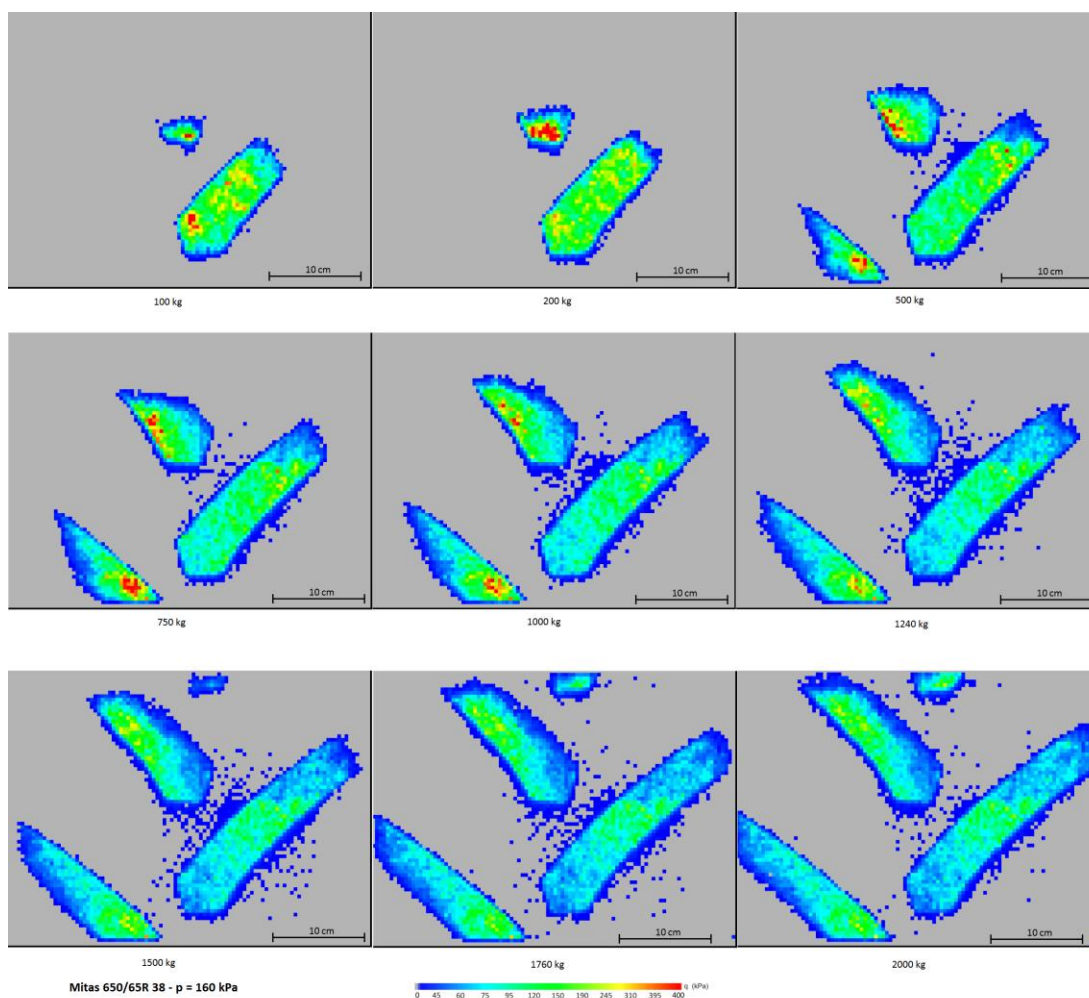


Z naměřených hodnot vyplývá, že odchylka mezi jednotlivými plochami zjištěnými otiskem šípů dezénu a pomocí plantografu se pohybuje kolem 3 %, a to jak při tlaku huštění 100 kPa, tak 160 kPa. Plochy šípů pneumatiky zjištěné plantografem jsou o něco větší než plochy vytvořené otiskem, to může být způsobeno nepřesným stanovením ploch pomocí programu pro analýzu obrazu. Plantograf zobrazuje rozložení kontaktního tlaku, který se rozkládá i mimo rozměry šípů pneumatiky a při stanovení dosedací plochy tak mohou vznikat mírné odchylky.

Další část testovací procedury se týkala postupného zatěžování pneumatiky Mitas 650/65 R38 na části laboratorního půdního kompaktoru (viz. obrázek č. 27). Na obrázcích č. 30 a č. 31 je vytvořen přehled výstupů plantografu při zatěžování pneumatiky za tlaku huštění 100 a 160 kPa ze kterých je patrné, že plantograf dokáže poměrně přesně monitorovat průběh kontaktního tlaku a velikosti dosedacích ploch pneumatiky.



Obrázek č. 30. Výstupy plantografu při testování pneumatiky Mitas 650/65 R38 při tlaku huštění 100 kPa



Obrázek č. 31. Výstupy plantografu při testování pneumatiky Mitas 650/65 R38 při tlaku huštění 160 kPa

Pomocí těchto snímků byly stanoveny a vypočteny hodnoty dosedacích ploch pneumatiky, středního kontaktního tlaku, kontaktního tlaku v šípu dezénu pneumatiky a pomocí prostředků matematické analýzy byl stanoven příslušný počet šípů dezénu pneumatiky v závislosti na dosedací ploše, viz. tabulka č. 8 a č. 9.

Tabulka č. 8. Naměřené a vypočtené hodnoty při zatěžování pneumatiky Mitas 650/65 R38 při tlaku huštění 160 kPa

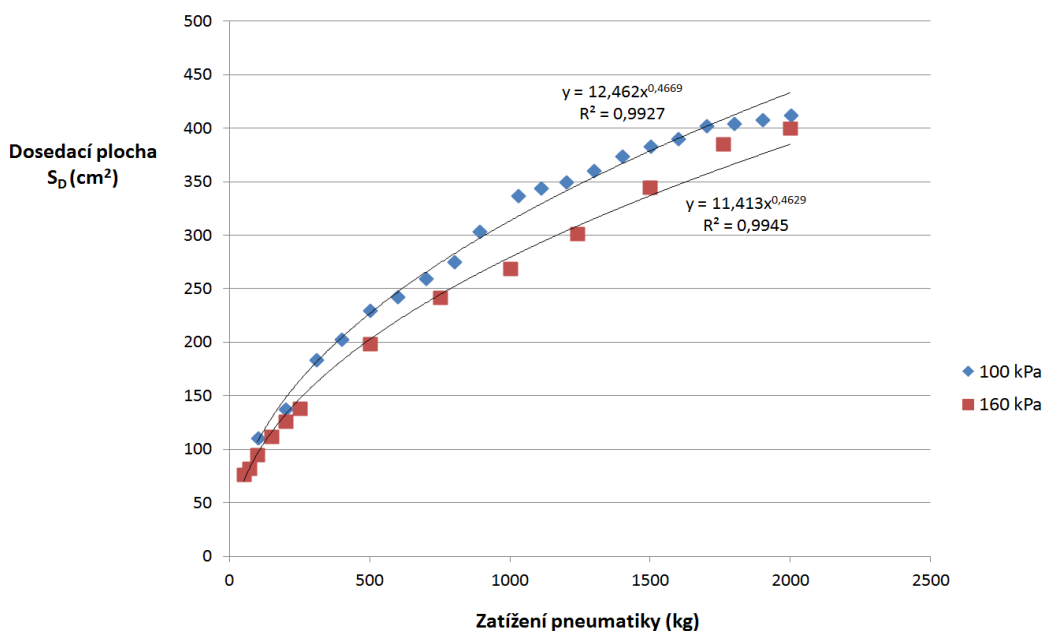
Tlak huštění (kPa)	Zatížení (kg)	S_d (cm ²)	počet šípů	q_s (kPa)	q_L (kPa)
160	50	77	0,5	124,9	63,9
	70	83	0,5	150,9	83,1
	100	95	0,6	162,4	103,1
	150	112	0,7	175,1	131,1
	200	127	0,8	183,1	154,7
	250	139	0,9	190,9	176,6
	500	199	1,3	185,8	246,5
	750	242	1,6	188,3	303,9
	1000	269	1,8	202,7	364,1
	1240	302	2,1	200,7	403,4
	1500	345	2,3	185,5	426,6
	1760	386	2,5	174,1	447,5
2000	400	2,6	183,9	490,5	

Tabulka č. 9. Naměřené a vypočtené hodnoty při zatěžování pneumatiky Mitas 650/65 R38 při tlaku huštění 100 kPa

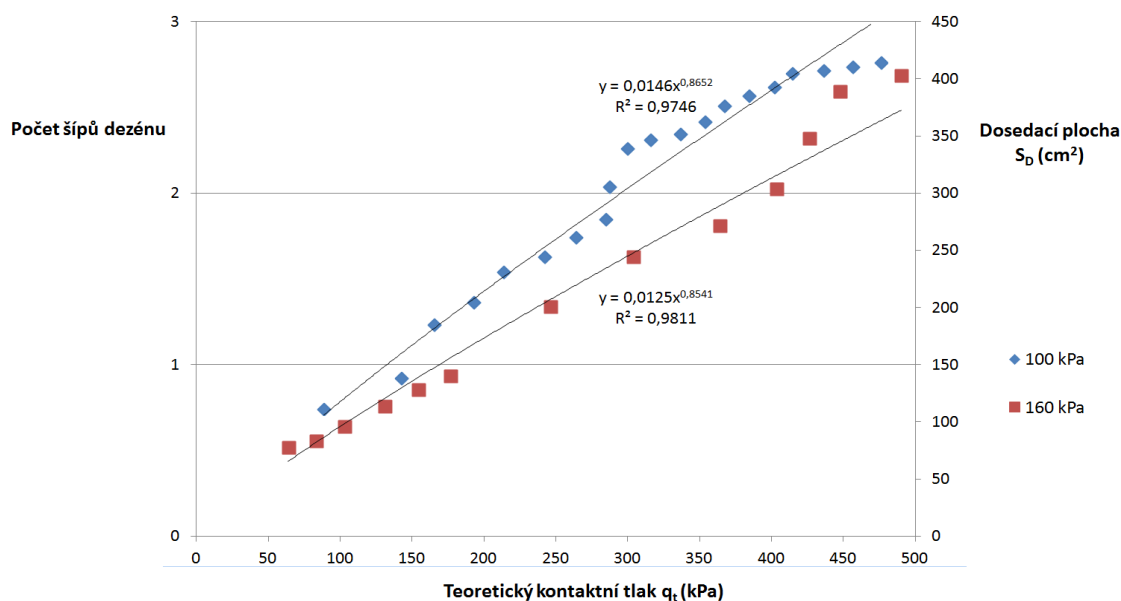
Tlak huštění (kPa)	Zatížení (kg)	S_d (cm ²)	počet šípů	q_s (kPa)	q_L (kPa)
100	100	110	0,7	120,1	88,6
	200	137	0,9	156,3	142,9
	310	183	1,2	135,4	165,7
	400	203	1,4	142,6	193,2
	500	229	1,5	139,7	213,7
	600	243	1,6	150,1	242,6
	700	259	1,7	152,7	264,4
	800	275	1,8	155,3	285,1
	890	304	2,0	142,2	287,6
	1030	337	2,2	133,6	300,1
	1110	344	2,3	137,9	316,4
	1200	349	2,3	144,6	336,8
	1300	360	2,4	147,6	354,2
	1400	374	2,5	147,5	367,5
	1500	383	2,5	150,7	384,5
	1600	389	2,6	154,9	402,6
	1700	402	2,7	154,7	414,8
1800	404	2,7	162,1	436,8	
1900	408	2,7	167,9	456,8	
2000	412	2,8	173,5	476,5	

Na základě naměřených a vypočtených hodnot z výše uvedených tabulek č. 8 a č. 9, bylo vytvořeno grafické znázornění velikosti dosedací plochy pneumatiky v závislosti na zatížení (viz. graf č. 10) a závislost vypočtené hodnoty teoretického kontaktního tlaku pod šípem dezénu pneumatiky na velikosti dosedací plochy (viz. graf č. 11). Z výše uvedených hodnot je patrné, že velikost středního kontaktního tlaku je značně vyšší u pneumatiky nahuštěné na větší tlak. Velikosti středního kontaktního tlaku u zatěžované pneumatiky nahuštěné na 160 kPa dosahují průměrně o 21 % vyšších hodnot než u pneumatiky nahuštěné na 100 kPa. Obdobně to je i s dosedací plochou pneumatiky, při tlaku huštění 160 kPa jsou velikosti dosedacích ploch zhruba o 11 % menší než při tlaku huštění 100 kPa (viz. graf č. 10).

Graf č. 10. Velikost dosedací plochy pneumatiky Mitas 650/65 R38 v závislosti na zatížení a tlaku huštění

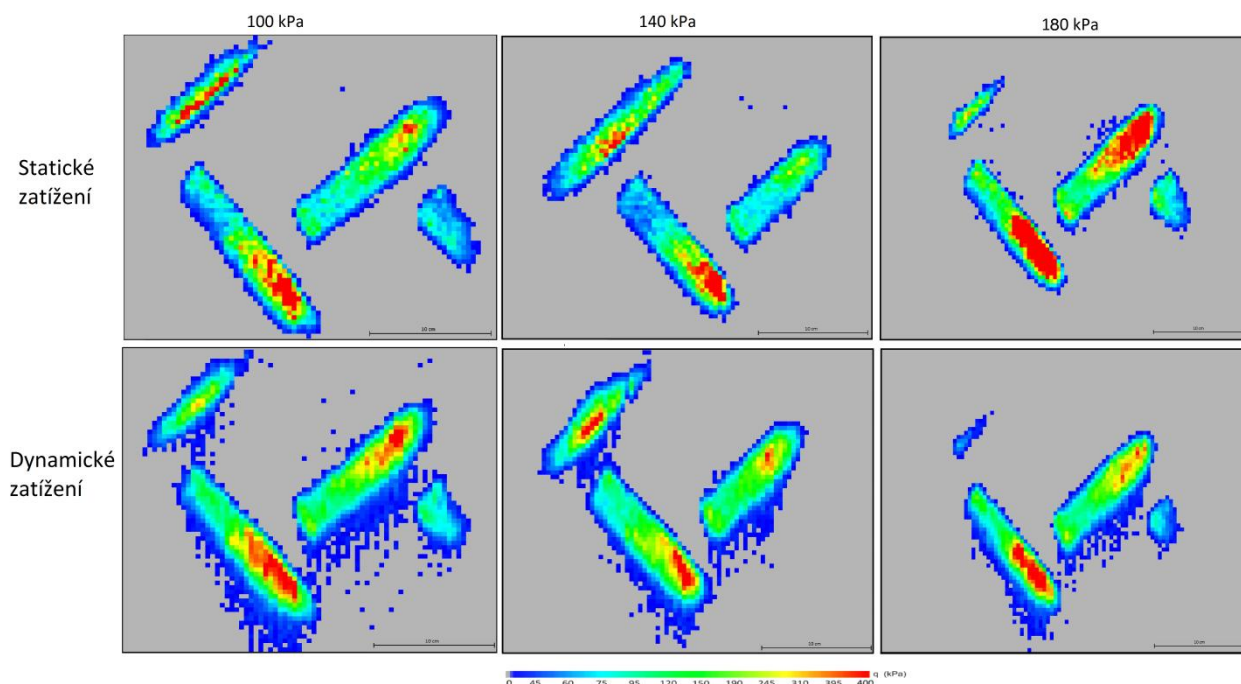


Graf č. 11. Vypočtené hodnoty teoretického kontaktního tlaku pod šípem dezénu pneumatiky a velikosti dosedací plochy pneumatiky Mitas 650/65 R38



Graf č. 11 znázorňuje rozložení šípů dezénu pneumatiky Mitas 650/65 R38 při určitých hodnotách dosedacích ploch a teoretického kontaktního tlaku. Velikost plochy nezatíženého šípů dezénu pneumatiky byla stanovena na 150 cm². Z výše uvedeného vyplývá, že při zvyšujícím se zatížení se zvyšují i velikosti dosedacích ploch a teoretického kontaktního tlaku, který se následně rozkládá na více šípů dezénu pneumatiky.

Statické a dynamické zatížení pneumatik bylo testováno na diagonálních pneumatikách Barum 14,9-28 (8PR) při tlaku huštění 100, 140 a 180 kPa. Postup testovací procedury je zřejmý z obrázku č. 29. Průběh dosedací plochy pneumatiky pod statickým a dynamickým zatížením je znázorněno na obrázku č. 32. Naměřené hodnoty jsou zpracovány v tabulce č. 10 a následně graficky zpracovány (viz. graf č. 12).



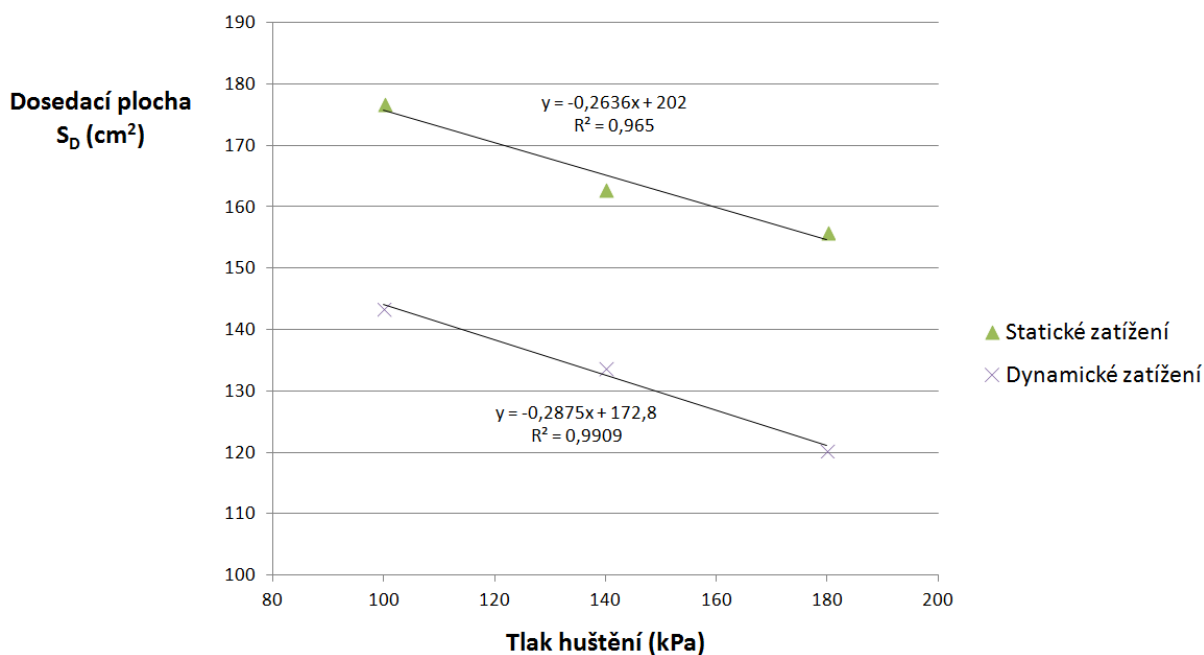
Obrázek č. 32. Porovnání statického a dynamického zatížení diagonální pneumatiky Barum 14,9-28

Z obrázku č. 31 je patrné, že velikost dosedací plochy pneumatiky je větší při statickém zatížení nežli při dynamickém. U dynamického zatížení se vlivem jízdy lépe rozkládá zatížení a kontaktní tlak. Extrémy kontaktního tlaku se při dynamickém zatížení objevují především na hranách šípů dezénu pneumatik, zatímco u statického zatížení se tyto extrémy přenášejí přes plochu šípů v důsledku větší deformace. Testovaná diagonální pneumatika Barum 14,9-28 byla zatížena 770 kg.

Tabulka č. 10. Naměřené hodnoty dosedací plochy pneumatiky při statickém a dynamickém zatížení pneumatiky Barum 14,9-28

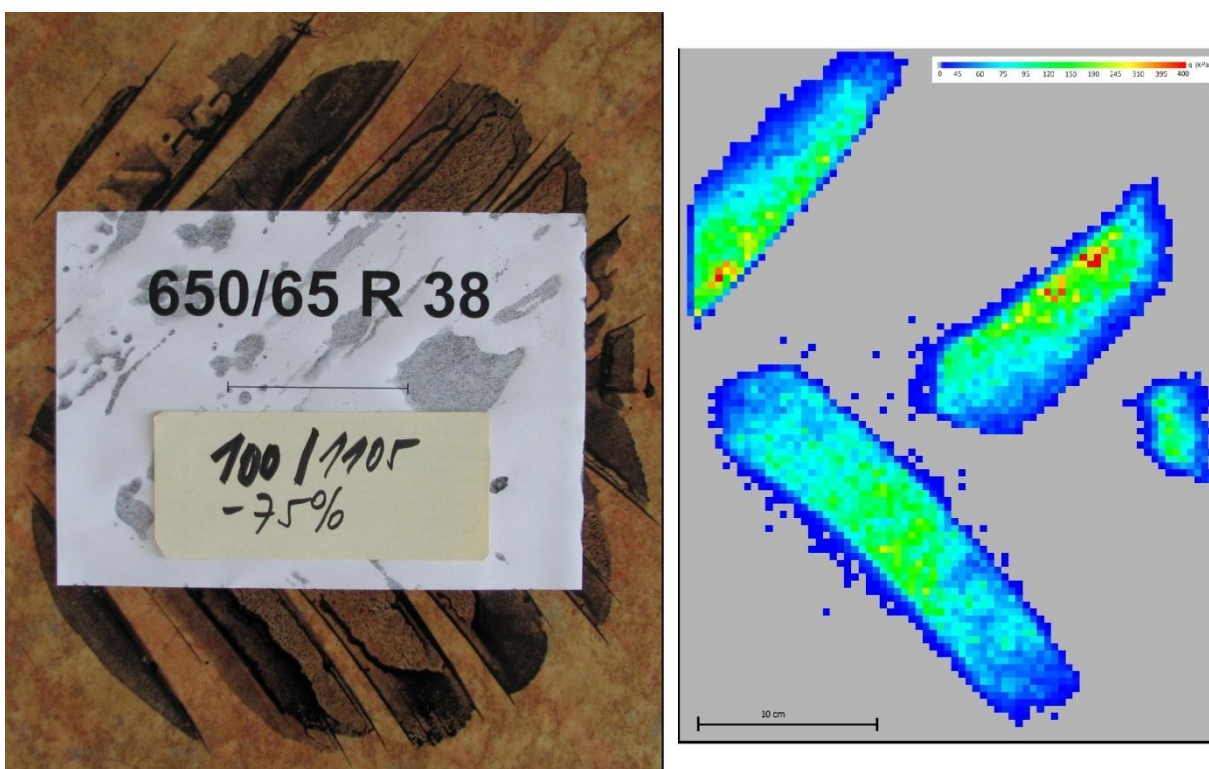
Statické zatížení		Dynamické zatížení	
Tlak huštění (kPa)	S_d (cm ²)	Tlak huštění (kPa)	S_d (cm ²)
100	178	100	143
140	163	140	134
180	156	180	120

Graf č. 12. Porovnání velikostí styčné plochy pneumatiky při statickém a dynamickém zatížení pneumatiky Barum 14,9 - 28; zatížení 770 kg



Z grafu č. 12 vyplývá, že velikost dosedací plochy pneumatiky je značně vyšší u statického zatížení nežli u dynamického. Rozdíly mezi dosedací plochou při statickém a dynamickém zatížení dosahují v průměru až 33 cm², respektive přibližně o 20 %. Velikost dosedací plochy pneumatik je závislá na tlaku huštění a konstrukci, resp. rozměrech pneumatiky. Z výše uvedeného vyplývá, že při vzrůstajícím tlaku huštění pneumatik se snižuje jejich dosedací plocha.

Jako ukázka přesnosti záznamu byla spočítána plnost otisku pneumatiky Mitas 650/65 R38. Jedná se o porovnání styčné plochy pneumatiky, respektive plochy otisku a stykové plochy pneumatiky, která vyjadřuje celkovou kontaktní plochu šípů dezénu pneumatiky (viz. obrázek č. 33). Plnost kontaktní plochy pneumatiky závisí právě na poměru těchto styčných a stykových ploch pneumatiky. Jako standard se bere rozsah 21 až 25 % pro používání zemědělských pneumatik, to ovšem striktně závisí na rozměrech pneumatiky.



Obrázek č. 33. Porovnání styčné a stykové plochy pneumatiky Mitas 650/65 R38

Plocha otisku pneumatiky byla získána pomocí vícenásobného otisku pneumatiky (viz. kapitola 2.5 Styčná plocha pneumatiky). Plochy šípů dezénu byly snímány pomocí plantografu a následně změřeny a vypočteny programem pro analýzu obrazu. Pneumatika byla zatížena na 1105 kg při tlaku huštění 100 kPa.

Tabulka č. 11. Plnost otisku pneumatiky 650/65 R38 při zatížení 1105 kg a tlaku huštění 100 kPa

Plocha otisku S_o (cm ²)	Plocha styku S_d (cm ²)	Plnost otisku (%)
1431	316	22

Z hodnot z tabulky č. 11 vyplývá, že plnost otisku pneumatiky 650/65 R38 při tlaku huštění 100 kPa a zatížení 1105 kg se rovná 22 %, což odpovídá standardnímu rozsahu.

Měřením a testováním se potvrdilo, že plantograf je přístroj schopný poměrně přesně promítat pomocí senzorů kontaktní tlak a dosedací plochu pneumatiky. Limitujícími vlastnostmi jsou především rozměr desky a maximální přípustné zatížení. Při vysokém zatížení pneumatiky totiž dochází k přesahům šípů dezénu přes desku plantografu a průběh tlaků tak může být lehce zkreslený. Další vývoj tohoto zařízení by se tedy mohl ubírat především zvětšením testovací plochy plantografu a zvýšením počtu senzorů.

Porovnáním výsledků statického zatěžování radiální pneumatiky Mitas 650/65 R38 a statického a dynamického zatěžování diagonální pneumatiky Barum 14,9-28 při individuální kombinaci tlaku huštění vyplývá, že výhody v používání podhuštěných pneumatik k ochraně půdního profilu jsou zcela zřejmé. Podhuštěné pneumatiky disponují většími dosedacími plochami a nižšími kontaktními tlaky než pneumatiky huštěné na vyšší tlak. Při statickém testování radiální pneumatiky byly naměřeny největší rozdíly 18 % v dosedací ploše pneumatiky huštěné na 100 a 160 kPa. Nejvyšší hodnoty kontaktního tlaku dosahovaly hodnot u méně nahuštěné pneumatiky okolo 174 kPa a u více nahuštěné 203 kPa, v průměru byl kontaktní tlak pneumatiky více nahuštěné vyšší o 21 %. Radiální pneumatiky disponují velkou flexibilitou a větší kontaktní plochou v závislosti na dosedací ploše šípů a plnosti dezénu pneumatiky. Celková plocha šípů dezénu a styčná plocha pneumatiky striktně závisí na tvaru šípu a vzorku dezénu šířícího se po elastickém povrchu.

Statické a především dynamické testování diagonální pneumatiky potvrdilo lepší snímání a rozložení kontaktního tlaku u pneumatiky s nižším tlakem huštění. Největší rozdíly mezi statickým a dynamickým testováním byly naměřeny při tlaku huštění 180 kPa a to až o 23 %. Statické zatížení může způsobit určité rozdíly v rozložení tlaku ve stykové ploše pneumatiky v důsledku velké deformace pneumatiky, což může vést k přesahu šípů přes desku plantografu. Je možné dospět k závěru, že dynamické snímání tlaku produkuje přijatelné výstupy, nicméně styková plocha pneumatiky není přesně popsána v důsledku krátké doby kontaktu. Laboratorní testování se týkalo především dosedací, stykové plochy pneumatiky. Celková styčná plocha pneumatiky má díky plnosti dezénu mnohem větší tvar.

Námětem k diskuzi je jak zabránit zhutňování zemědělské půdy působením tlaků pojezdového ústrojí zemědělské techniky a strojů na půdu. Nabízí se například tato řešení:

- Zvětšení dosedacích ploch - z výsledků testování v této práci jasně vyplývá, že nejvhodnější pro vysokovýkonné traktory jsou radiální pneumatiky, které

při nahuštění na menší tlak méně zhutňují půdu než pneumatiky diagonální. Vývoj radiální pneumatiky, kdy se za posledních pět let razantně změnila šíře a průměr kola a tím pádem i váhový a rychlostní index - z 16,9R30 137A8/134B na 1050/50R32 178A8/172D - nemůže jít tímto směrem donekonečna. Cena takto velkých pneumatik by již byla neúměrně vysoká.

- Vytvoření zelených pásů, tzv. biokoridorů - „zmenšením“ polí by došlo k tomu, že by se nemuseli používat tak velké a těžké stroje, které kompakci půdy způsobují; ovšem vzhledem k současným trendům a celosvětové výrobě není tento způsob zabránění zhutňování půdy reálný, protože ve snaze dosáhnout co nejvyšších zisků, nebude nikdo přistupovat na zmenšování výměr obdělávané půdy na úkor biokoridorů.

Jako nejvýhodnější řešení proti kompakci půdy autor navrhuje tento soubor opatření:

- Vybavit všechny traktory s výkonem motoru nad 180 hp radiálními nízkotlakými pneumatikami, systémem centrálního dohušťování a senzory tlaku v pneumatikách a vše propojit se systémem GPS, které by pomáhalo optimalizovat jízdu po polích při zemědělských pracích a přenášelo aktuální tlak v pneumatikách přímo do systému Zemědělské správy k dalšímu zpracování.
- Na toto vybavení využít evropské dotace z kapitoly bezpečnosti silničního provozu, kde už se takto čerpalo např. na senzory tlaku pro osobní automobily.
- Jelikož se traktory s manipulační technikou pohybují i po veřejných komunikacích je nutno udržovat předepsaný tlak v pneumatikách na těchto komunikacích.
- Vytvořit pro jednotlivá pole dokumentaci – pasport (na základě jedné vybrané zkoušky – měření zhutnění půdy), který by obsahoval údaje o obdělávaném poli: výměru, typ půdy, atd. a např. jedenkrát za pět let by se za podpory Ministerstva zemědělství tento pasport obnovoval.

Výsledkem použití takového souboru opatření by pak bylo využívání veškerých získaných dat přímo v praxi a v terénu jak zemědělci, tak Zemědělskou správou. Již nyní jsou všichni zemědělci registrováni na Zemědělské správě, ta má k dispozici veškeré výměry polí a přes satelit sleduje například správnost pokosení trvalých travních porostů.

Využitím výše zmíněného souboru opatření by se zemědělci při nastartování traktoru aktivovala GPS, tím by se odeslal signál Zemědělské správě o přesunu traktoru po veřejné komunikaci na zemědělskou půdu na správně nahuštěných pneumatikách pro běžný silniční provoz, při příjezdu k obdělávanému poli by zemědělec využil data z pasportu pole, která by byla zadaná v GPS a upustil by pneumatiky na určenou hodnotu vzhledem k povaze půdy, o změně tlaku v pneumatikách by opět byla prostřednictvím GPS informovaná Zemědělská správa a po dokončení prací by si zemědělec tlak v pneumatikách pomocí centrálního dohušťování opět zvýšil na předepsaný tlak pro silniční provoz a teprve poté by mohlo dojít k přesunu traktoru zpět po veřejné komunikaci.

Ministerstvo zemědělství by mělo přesné informace, který zemědělec obhospodařuje půdu tak, aby nedocházelo k nepatřičnému zhutňování a mohl by jej zvýhodnit dalšími pobídkami. Zemědělec je navíc „odměněn“ vyšší úrodností a lepším zachytáváním vody v obdělávané půdě.

6. Závěr

Cílem práce bylo vytvořit ucelený přehled zemědělských pneumatik určených pro zemědělské tahače nejvyšší výkonové třídy a dále pak sofistikovaně zhodnotit zásadní parametry pro výpočet styčné plochy pneumatiky s ohledem na individuální kombinaci tlaku huštění a zatížení.

Úvodem byla provedena literární rešerše mapující kompakci půdy. Produkce zemědělské výroby je v dnešní době závislá zejména na dopravě. Vysoká hmotnost moderní zemědělské techniky a strojů způsobuje deformaci půdního profilu a změny přirozených vlastností půdy. Nežádoucí zhutnění mohou způsobovat i opakované přejezdy lehčí zemědělské techniky a dalšího vybavení, pokud jsou použity opakovaně na stejném místě. V podkapitolách byla popsána styčná plocha pneumatiky, normálové a smykové napětí a závěrečná část první kapitoly se věnuje popisu analytických modelů kompakce půdy, které patří mezi zásadní nástroje pro kontrolu zhutnění půdy způsobené indukovanou dopravou v zemědělství.

Část práce je zaměřena na moderní zemědělské pneumatiky, na jejich konstrukci, typy a na systémy centrálního huštění pneumatik. Obzvláště je věnována pozornost na stanovení kompakčního potenciálu pneumatiky - CC rating. V rámci čtvrté kapitoly byl vytvořen ucelený přehled zemědělských pneumatik od firmy Continental - Mitas a jejich porovnání CC a FCC indexů, středního kontaktního tlaku a styčných ploch pneumatik. Porovnávané byly diagonální pneumatiky AS-Farmer s radiálními pneumatikami AC 85 stejných rozměrů, nízkoprofilové pneumatiky AC 65 s alternativními pneumatikami AC 85. Dále byly popsány velkoobjemové pneumatiky SVT určené pro tahače nejvyšších výkonových tříd. Z naměřených a porovnávaných hodnot vyplývá, že radiální pneumatiky AC 85 disponují větší styčnou plochou a dosahují tak nižších hodnot středního kontaktního tlaku než pneumatiky AS-Farmer, nicméně dle indexů CC a FCC se oba typy pneumatiky chovají šetrně k půdě a nedochází k poškození půdního profilu i při nominálním zatížení. Z porovnávání radiálních pneumatik plyne, že pneumatiky AC 65 se jeví jako vhodná alternativa pneumatik AC 85, jelikož mají větší styčné plochy a možnost většího zatížení v důsledku pevnosti bočnice pneumatik AC 65. Pneumatiky SVT jsou charakteristické velkou styčnou plochou díky vyráběným rozměrům, konstrukci a možnosti použít velmi nízký tlak huštění. Tyto poměrně široké pneumatiky rozkládají hmotnost stroje na půdu a snižují nežádoucí kompakci půdního profilu.

Závěrečná část této práce byla věnována laboratornímu testování. První testovací procedura byla zaměřena na ověření funkčnosti a přesnosti plantografu, kdy byla testovaná pneumatika Mitas 650/65 R38 RD-03 při individuální kombinaci tlaku huštění a zatížení. Následně byly porovnávány otisky šípů dezénu vytvořené na desce plantografu s výstupem plantografu, s barevným rastrem. Odchytky jednotlivých ploch při stejném tlaku huštění se pohybovaly kolem 3 %, což poukazuje na dostatečnou přesnost a funkci plantografu. Další část testovací procedury zahrnovala odhad vztahu mezi zatížením kola a rozložením kontaktního tlaku v dosedací ploše dezénu pneumatiky při statickém zatížení. Testování statického zatížení probíhalo na pneumatice Mitas 650/65R38 RD-03 a potvrdilo se jím, že metoda podhuštění pneumatiky pro ochranu půdního profilu je vhodná a účinná. Plochy podhuštěné pneumatiky byly v průměru o 18 % větší než plochy pneumatiky nahuštěné na větší tlak. Obdobně je to i s kontaktním tlakem, kdy pneumatiky s nižším tlakem huštění působí menší kontaktní tlaky, nežli pneumatika více nahuštěná. Porovnávání proběhlo při tlaku huštění pneumatiky 100 a 160 kPa a průměrné rozdíly kontaktního tlaku dosahovaly 21 %. Poslední část testování se týkala porovnání statického a dynamického zatížení diagonální pneumatiky Barum 14,9-28 (8PR) při zatížení 770 kg a třech kombinací tlaku huštění a to 100, 140 a 180 kPa. Dynamické testování umožňuje přímé sledování chování tlaku a snižuje extrémní odchytky v rozložení tlaku na snímací desku plantografu z důvodu minimalizace deformace dezénu pneumatiky. Největší rozdíly mezi dosedacími plochami pneumatiky byly naměřeny při největším tlaku huštění, nicméně v průměru jsou plochy statického zatížení o 20 % větší než u dynamického.

Mezi hlavní doporučení autora patří: vybavit všechny vysokovýkonné traktory radiálními pneumatikami, systémem centrálního huštění pneumatik a vše propojit se systémem GPS; vytvoření dokumentace pro jednotlivá pole, která by obsahovala příslušné informace o obdělávaném poli a např. jednou za pět let by se za podpory Ministerstva zemědělství obnovovala. Jako zajímavým rozšířením této práce by mohlo být zpracováno porovnání zemědělských pneumatik pomocí plantografu v terénu a laboratoři.

Seznam použité literatury

- ABEELS, P.F.J. 1994.** *Mechanisation of the forest operations and impacts on the environment*. Feldafing, Germany : Joint Committee on Forest Technology, 1994. Div. P3.08.0. 24 p..
- AGCO, FENDT. 2016.** Fendt 900 Vario. *AGCO GmbH, FENDT*. [Online] AGCO GmbH, 2016. [Citace: 12. Leden 2016.] <http://www.fendt.com/int/11342.asp>.
- ASAE. 1999.** *ASAE Standards 4E. EP291.2: terminology and definitions for soil tillage and soil-tool relationships*. místo neznámé : ASAE, 1999.
- BAUER, František. 2013.** *Traktory a jejich využití*. Praha : Profi Press, 2013. 978-80-86726-52-6.
- BENEŠ, P. 2002.** *Moderní technologie pojezdu a ochrana půdy*. místo neznámé : Mechanizace zemědělství, 2002. 8, s. 26-28.
- BOUSSINESQ, J. 1885.** *Application des potentiels a` l`e`tude de l`e`quilibre et du mouvement des solides e`lastiques*. Paris : Gauthier-Villars, 1885. 30 pp..
- BRADY, Nyle C, Harry O BUCKMAN. 1974.** *The nature and properties of soils*. New York : Macmillan, 1974. 00-231-3350-3.
- CELJAK, Ivo. 2013.** *mechanizaceweb.cz*. <http://mechanizaceweb.cz/tlak-mezi-vozovkou-a-dezenem-pneumatiky/>. [Online] Profi Press, 2013. [Citace: 12. Leden 2016.] <http://mechanizaceweb.cz/tlak-mezi-vozovkou-a-dezenem-pneumatiky/>.
- CERRUTI, V. 1888.** *Sulla deformazione di un corpo elastico isotropo per alcune speciali condizioni ai limiti*. Rom : Mathematica Acc. r. de`Lincei, 1888.
- CROLLA, A.D. 2009.** *Automotive engineering: Powertrain, Chassis system and Vehicle Body*. Oxford, UK : Butterworth-Heinemann, 2009. 978-1-85617-577-7.
- DÉFOSSEZ, P., RICHARD, G. 2002.** *Models of soil compaction due to traffic and their evaluation*. místo neznámé : Soil and Tillage Research 67, 2002. 41-64.
- EAGRI, 2015.** *EAGRI: Zemědělství*. <http://eagri.cz/public/web/mze/zemedelstvi/kontroly-podminenosti-cross-compliance-1/legislativa/>. [Online] Ministerstvo zemědělství, EAGRI, 2015. [Citace: 28. Listopad 2015.] <http://eagri.cz/public/web/mze/zemedelstvi/kontroly-podminenosti-cross-compliance-1/legislativa/>.
- FERDUS. 2016.** *Ferdus*. *Ferdus*. [Online] 2016. [Citace: 13. Leden 2016.] http://www.ferdus.cz/data/files/2027_Prosepekt-plneni-vodou.pdf.
- FRÖHLICH, O.K. 1934.** *Druckverteilung im Baugrunde*. Wien : Springer Verlag, 1934. 178 pp..
- GARCIANO, O.L., JONES, A.R., JERSEY, R.S., UPADHYAYA, K.S. 2007.** *Determination of the soil pressure distribution around a cone penetrometer*. CA, USA : Journal of Terramechanics 44 (2007) 265-273, 2007. 10.1016/j.jterra.2007.04.003.

- GREČENKO, A. 1995.** *Tyre footprint area on hard ground computed from catalogue values.* místo neznámé : J. Terramech. 32, 1995. 325-333.
- GREČENKO, A., PRIKNER, P. 2014.** *Tire rating based on soil compaction capacity.* Praha : Journal of Terramechanics 52 (2014) 77-92, 2014. 10.1016/j.jterra.2013.08.001.
- GREČENKO, Alexandr. 1994.** *Vlastnosti terénních vozidel.* Praha : Vysoká škola zemědělská, 1994. 80-213-0190-2.
- HÅKANSSON, Inge, Randall C. Reeder. 1994.** *Subsoil compaction caused by heavy vehicles.* Uppsala, Sweden : Swedish University of Agricultural Sciences, 1994. 01671987.
- HALLONBORG, U. 1996.** *Super ellipse as tyre-ground contact area.* místo neznámé : Journal of Terramechanics 33(3), 1996. 125-132.
- HAMLETT, JM., MELVIN, SW., HORTON, R. 1990.** *Traffic and soil amendment effects on.* místo neznámé : Trans ASAE, 1990. 821-826.
- JANDÁK, J., POKORNÝ, E., PRAX, A. 2007.** *Půdoznalství 2.* Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2007. 978-80-7157-559-7.
- JAVOREK, F. 2012.** *Správné pneumatiky pro trakci a dopravu. Mechanizace zemědělství: Odborný časopis pro zemědělskou a lesnickou techniku.* Praha : ProfiPress, 2012. ISSN 0373-6776.
- JAVŮREK, M., VACH, M. 2008.** *Negativní vlivy zhutnění půd a soustava opatření k jejich odstranění.* Praha : Výzkumný ústav rostlinné výroby, 2008. 978-80-87011-57-7..
- JOHNSON, C.E., BURT, E.C. 1990.** *A method of predicting soil stress state under tires.* místo neznámé : Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 33, 1990. 713-717.
- KARAFIATH, Leslie L., Edward A. NOWATZKI. 1978.** *Soil mechanics for off-road vehicle engineering.* Clausthal, Germany : Trans Tech S.A., 1978. 0-87849-020-5.
- KELLER, T., DÉFOSSEZ, P., WEISSKOPF, P., ARVIDSSON, J., RICHARD, G. 2006.** *SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches.* místo neznámé : Soil and Tillage Research, 2006. doi:10.1016/j.still.2006.05.012.
- KELLER, T., ARVIDSSON, J. 2004.** *Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil.* Uppsala, Sweden : Swedish University of Agricultural Sciences, 2004. 01671987.
- KELLER, T. 2005.** *A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters.* místo neznámé : Biosyst. Eng. 92, 2005. 85-96.
- KOOLEN, A.J.P., LERINK, D.A., VAN DEN AKKER, J.J.H. 1992.** *Prediction of aspects of soil-wheel systems.* místo neznámé : Soil and Tillage Research 24, 1992. 381-396.
- LHOTSKÝ, J. 2000.** *Zhutňování půd a opatření proti němu.* Praha : ÚZPI, 2000.

- MOHSENI MANESH, A., WARD, M.S. 2010.** *Estimation of a three-dimensional tyre footprint using dynamic soil-tyre contact pressures.* místo neznámé : Journal of Terramechanics 47, 2010. 415-421.
- NIMMO, J.R. 2004.** *Porosity and Pore Size Distribution* . London, Elsevier : in Hillel, D., ed. Encyclopedia of Soils in the Environment, 2004. v. 3, p. 295-303.
- O'SULLIVAN, M.F., HENSHALL, J.K., DICKSON, J.W. 1999.** *A simplified method for estimating soil compaction.* místo neznámé : Soil and Tillage Research 49, 1999. 325-335.
- OLSEN, H.J. 1994.** *Calculation of subsoil stresses.* místo neznámé : Soil and Tillage Research 29, 1994. 111-123.
- PAGLIAI, M., MARSILI, A., SERVADIO, P., VIGNOZZI, N., PELLEGRINI, S. 2003.** *Changes in some physical properties of a clay soil in central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power.* místo neznámé : Soil and Tillage Research 73, 2003. 119-129.
- PEARMAN, BK., WAY, TR., JOHNSON, CE., BURT EC., BAILEY, AC., RAPER, RL. 1996.** *Soil stresses and rut depths from tires of a mechanical front wheel drive tractor.* místo neznámé : Trans ASAE, 1996. 1249-1257.
- POKORNÝ, E., ŠARAPATKA, B., HEJÁTKOVÁ, K. 2007.** *Hodnocení kvality půdy v ekologicky hospodařícím podniku.* Náměšť nad Oslavou : ZERA, 2007. 80-903548-5-8.
- PRIKNER, P. 2015.** *Moderní zemědělské pneumatiky mohou snížit škodlivé zhutnění půdy.* Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, 2015.
- PRIKNER, P. 2013.** zemedelec.cz. <http://zemedelec.cz/vliv-zatizenych-pneumatik-na-pudu-2>. [Online] Profi Press, 2013. [Citace: 12. Leden 2016.] <http://zemedelec.cz/vliv-zatizenych-pneumatik-na-pudu-2>.
- RAPER, RL., BAILEY, AC., BURT, EC., WAY, TR., LIBERATI, P. 1995.** *Inflation pressure and dynamic load effects on soil deformation and soil-tire interface stresses.* místo neznámé : Trans ASAE, 1995. 685-689.
- RAPER, R.L. 2005.** *Agricultural traffic impacts on soil.* 2005. Sv. 3-4. 00224898.
- SEMETKO, J. 1986.** *Mobilné energetické prostriedky 3.* Bratislava : Príroda, 1986. 64-021-86.
- SCHJØNNING, P., STETTLER, M., KELLER, T., LASSEN, P., LAMANDÉ, M. 2015.** *Predicted tyre-soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics.* místo neznámé : Soil and Tillage Research 152, 2015. 52-66.
- SCHJØNNING, Per (ed.), Susanne ELMHOLT (ed.) a Bent TOLSTRUP CHRISTENSEN (ed.). 2004.** *Managing soil quality: challenges in modern agriculture.* Wallingford : CABI Publishing, 2004. 08-519-9671-X.
- SCHWANGHART, H. 1990.** *Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil.* Great Britain : Journal of Terramechanics, 1990. Vol. 28, No. 4, pp. 309-318.

- SMITH, D.L.O. 1985.** *Compaction by wheels: a numerical model for agricultural soils.* místo neznámé : J. Soil Sci. 36, 1985. 621-632.
- SMITH, D.L.O. 1987.** *Measurement, interpretation and modelling of soil compaction.* místo neznámé : Soil Use Manage. 3, 1987. 87-93.
- SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, C. 1994.** *Soil Compaction in Crop Production.* Elsevier, Amsterdam : Developments in Agricultural Engineering 11., 1994.
- SÖHNE, W. 1953.** *Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schleppereifen (Pressure distribution in soil and soil deformation under tractor tyres).* místo neznámé : Grundlagen der Landtechnik 5, 1953. 49-63.
- SÖHNE, W. 1958.** *Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires: Agricultural engineering.* 1958.
- STEINER, M. 1979.** *Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigen Boden.* Lehrstuhl für Landmaschinen : Technische Universität München, 1979. M.E.G. No 33..
- SÝROVÝ, O. 2008.** *Výzkum energeticky méně náročných technologií rostlinné výroby.* Praha : Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i. Praha, 2008. 978-80-86884-44-8.
- SYROVÝ, O. 2008.** *Doprava v zemědělství.* Praha : Profi Press, 2008. 978-80-86726-30-4.
- ŠUMAN-HREBLAY, M. 2011.** *Encyklopedie českých traktorů: Od r. 1912 do současnosti .* Brno : Computer Press, a.s., 2011. 978-80-251-2685-1.
- TIMOSHENKO, S., GOODIER, J.N. 1980.** *Theory of Elasticity, third ed. MC.* New York, London : Graw-Hill Book Company, 1980.
- TRACTAIR. 2016.** Tract Air - Air Brake Systems. *Central tyre inflation.* [Online] 2016. [Citace: 13. Leden 2016.] <http://www.airbrakesystems.co.uk/central-tyre-inflation/>.
- TRAUTNER, Andreas. 2003.** *On Soil Behaviour during Field Traffic.* Uppsala : Swedish University of Agricultural Sciences, 2003. 91-576-6404-8.
- VAN DEN AKKER, J.J.H., ARTS, W.B.M., KOOLEN, A.J., STUIVER, H.J. 1994.** *Comparison of stresses, compactions and increase of penetration resistances caused by a low ground pressure tire and a normal tire.* místo neznámé : Soil and Tillage Research 29, 1994. 125-134.
- VAN DEN AKKER, J.J.H., A.L.M. VAN WIJK. 1987.** *A model to predict subsoil compaction due to field traffic: Soil compaction and regeneration.* 1987.
- VAN DEN AKKER, J.J.H. 2004.** *SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity.* místo neznámé : Soil and Tillage Research 79, 2004. 113-127.
- VERMEULEN, G.D., KLOOSTER, JJ. 1992.** *The potential of a low ground pressure traffic system to reduce soil compaction on a clayey loam soil.* místo neznámé : Soil and Tillage Research 24, 1992. 337-358.

- VOLF, J., NOVÁK, M., VLČEK, J., TRINKL, A. 2010.** *Device for tactile information sensing.* Prague : Czech Republic Patent, 2010. No.: 301717.
- VOORHEES, WB., Lindstrom ,MJ. 1984.** *Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction.* místo neznámé : Soil Sci Soc Am J, 1984. 152-156.
- VOORHEES, WB., YOUNG, RA., LYLES, L. 1979.** *Wheel traffic considerations in erosion research.* místo neznámé : Trans ASAE, 1979.
- WAY, TR., KISHIMOTO, T., BURT, EC., BAILEY, AC. 1997.** *Tractor tire aspect ratio effects on soil stresses and rut depths.* místo neznámé : Trans ASAE, 1997. 871-881.
- WONG, J.Y. 2009.** *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering, 2nd Ed: Terrain Behaviour.* Wiley : Off-Road Vehicle Performance and Design, 2009. 978-0750685610.
- YANG, W.-H., CLIFFORD, D., MINASNY, B. 2015.** *Mapping soil water retention curves via spatial Bayesian hierarchical models.* Elsevier, Nizozemsko : Journal of Hydrology 524 (2015) 768-779, 2015. 10.1016/j.jhydrol.2015.03.029.
- ZIANI, F., BIAREZ. 1990.** *Pressure sinkage relationship for tyres on very loose sand.* místo neznámé : Journal of Terramechanics 27(3), 1990. 167-177.

Seznam symbolů

- b - šířka pneumatiky (m)
c - soudržnost půdy (kPa)
CC - kompakční potenciál (-)
d - průměr pneumatiky (mm)
FCC - půdní kompakční potenciál (-)
 F_z - normálová reakce (tlaková síla) (kN)
 j_s - posuvu půdy (m)
 $l_{1,2}$ - kontaktní délka (m)
 l_c - celková kontaktní délka (m)
LC - zatížení (kg)
 M_k - smýkací moment (Nm)
NLC - katalogové (nominální) zatížení (kg)
 p_i - tlak huštění pneumatiky (kPa)
q - kontaktní tlak (kPa)
 q_s - střední kontaktní tlak (kPa)
 q_L - kontaktní tlak šípů dezénu pneumatiky (kPa)
r - nezatížený poloměr pneumatiky (m)
 R, β - polární souřadnice ($^\circ$)
 r_1 - zatížený poloměr pneumatiky (m)
 S_d - plochou styku (cm^2)
 S_o - plocha otisku pneumatiky (cm^2)
 S_T - styčná plocha pneumatiky (cm^2)
 t_s - hloubka stopy (m)
 δ_{def} - deflektce pneumatiky (m)
v - koncentrační faktor (-)
 σ_h - horizontálnímu napětí (kPa)
 σ_t - normálovému napětí (kPa)
 σ_t - tangenciálnímu napětí (kPa)
 σ_z - vertikální napětí (kPa)
 τ - smykové napětí (kPa)
 τ_h - horizontální smykové napětí (kPa)
 τ_z - vertikální smykové napětí (kPa)

ϕ - úhel vnitřního tření v půdě (°)

Seznam grafů

Graf č. 1. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatiky AS-Farmer a AC 85 - přední (1.kombinace)	42
Graf č. 2. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatiky AS-Farmer a AC 85 - přední (6.kombinace)	44
Graf č. 3. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatiky AC 85 a AC 65 - přední (1.kombinace).....	45
Graf č. 4. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatiky AC 85 a AC 65 - přední (4.kombinace).....	45
Graf č. 5. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatiky AC 85 a AC 65 - zadní (1.kombinace)	46
Graf č. 6. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatiky AC 85 a AC 65 - zadní (4.kombinace)	46
Graf č. 7. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatika 600/70 R30 při tlaku huštění 160 a 120 kPa	48
Graf č. 8. Porovnání styčné plochy a středního kontaktního tlaku v závislosti na zatížení; pneumatika 710/70 R42 při tlaku huštění 160 a 120 kPa	48
Graf č. 9. Porovnávání plochy šípů dezénu pneumatiky u pneumatiky Mitas 650/65 R38	52
Graf č. 10. Velikost dosedací plochy pneumatiky Mitas 650/65 R38 v závislosti na zatížení a tlaku huštění.....	56
Graf č. 11. Vypočtené hodnoty teoretického kontaktního tlaku pod šípem dezénu pneumatiky a velikosti dosedací plochy pneumatiky Mitas 650/65 R38	56
Graf č. 12. Porovnání velikostí styčné plochy pneumatiky při statickém a dynamickém zatížení pneumatiky Barum 14,9 - 28; zatížení 770 kg	58

Seznam obrázků

Obrázek č. 1. Schéma kuželového penetrometru	6
Obrázek č. 2. Průběh napětí v půdě pod pneumatikou 11-28 při stejném zatížení	9
Obrázek č. 3. Plocha otisku a dosedací (styková) plocha pneumatiky.....	12
Obrázek č. 4. Idealizovaná, reálná a efektivní plocha kontaktu pneumatiky na měkké půdě ..	13
Obrázek č. 5. Kontaktní délka pneumatiky na pevném, tvrdém povrchu	14
Obrázek č. 6. Pneumatika na měkkém povrchu	14
Obrázek č. 7. Kontaktní plocha pneumatiky při různých podmínkách vlhkosti půdy	15

Obrázek č. 8. Zatížení a napětí ve válcovitém souřadnicovém systému	17
Obrázek č. 9. Rozložení napětí v půdě pro různé koncentrační faktory pod bodovým zatížením P	18
Obrázek č. 10. Průběh vertikálního napětí v půdě.....	19
Obrázek č. 11. Měření normálového napětí pomocí senzorů	20
Obrázek č. 12. Závislost smykového napětí τ na posuvu zeminy j_s , zjištěna smýkacím strojem; na různých druzích půd (křivky a, b, c) při kontaktním tlaku $q = \text{konstanta}$	21
Obrázek č. 13. Závislost smykového napětí τ na posuvu zeminy j_s , zjištěna smýkacím strojem; na jednom druhu půdy při různých kontaktních tlacích q_1 až q_6	22
Obrázek č. 14. Stanovení hodnot suché objemové hmotnosti půdy za pomoci modelu zhutňování pro tři alternativní pneumatiky	25
Obrázek č. 15. Odhadované účinky tandemového (\diamond) a jednonápravového (\square) přívěsu, každý z nich nese 8 tun, v porovnání s nezatíženým traktorem (\blacktriangle) na jílovitohlinité (vlevo) a písčité (vpravo) půdě.....	25
Obrázek č. 16. Mapa přípustných zatížení pneumatik v Nizozemsku.....	28
Obrázek č. 17. Porovnání naměřených a vypočtených hodnot vertikálního napětí a posuvu částic v půdě. (a) změřené vertikální napětí (symboly) a vypočtené napětí (křivka); (b) změřený vertikální posuv (symboly) a vypočtené hodnoty za předpokladu jednoosé deformace (černá křivka) a za předpokladu rovinné deformace (šedá křivka)	29
Obrázek č. 18. Instalace senzorů na radiální pneumatice 16.9R38	31
Obrázek č. 19. 3D otisk pneumatiky v závislosti na hloubce vyjeté koleje, délky kontaktu, zatížení a hustícího tlaku	32
Obrázek č. 20. Radiální a diagonální konstrukce pneumatiky	34
Obrázek č. 21. Integrovaný systém centrálního huštění pneumatik od firmy Fendt	36
Obrázek č. 22. Centrální huštění pneumatik traktoru	37
Obrázek č. 23. Použití dvoumontáže kol se shodnými pneumatikami	38
Obrázek č. 24. Plnění pneumatik vodou nebo nemrznoucí směsí	39
Obrázek č. 25. Příklad stanovení hodnot kompakčního potenciálu pneumatiky CC a FCC pro jílovitohlinitou půdu (pneu Mitas RD-03, 650/65 R 38); nominální NLC (katalogové) a provozní (požadované) LC kombinace zatížení pneumatiky a tlaku huštění pneumatiky. ...	40
Obrázek č. 26. Přehled porovnávaných pneumatik	41
Obrázek č. 27. Laboratorní zařízení pro testování pneumatik s regulovatelným zatížením a plantografem (namontovaná pneumatika - Mitas 650/65R38 RD-03).....	49
Obrázek č. 28. Porovnávání ploch šípů pneumatiky Mitas 650/65R38 RD-03	50

Obrázek č. 29. Porovnávání dynamického a statického zatížení pneumatiky Barum 14,9-28 pomocí plantografu.....	51
Obrázek č. 30. Výstupy plantografu při testování pneumatiky Mitas 650/65 R38 při tlaku huštění 100 kPa.....	53
Obrázek č. 31. Výstupy plantografu při testování pneumatiky Mitas 650/65 R38 při tlaku huštění 160 kPa.....	54
Obrázek č. 32. Porovnání statického a dynamického zatížení diagonální pneumatiky Barum 14,9-28.....	57
Obrázek č. 33. Porovnání styčné a stykové plochy pneumatiky Mitas 650/65 R38	59

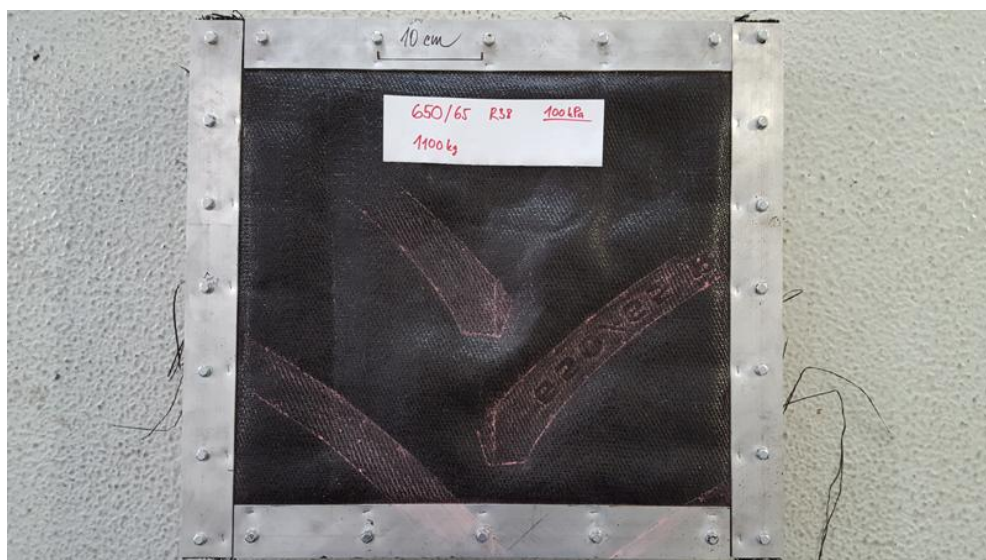
Seznam tabulek

Tabulka č. 1 Limitní hodnoty některých fyzikálních vlastností zhutnělé půdy.....	4
Tabulka č. 2. Přehled a porovnání pneumatik AS-Farmer a AC 85	43
Tabulka č. 3. Přehled a porovnání předních pneumatik AC 85 a AC 65	44
Tabulka č. 4. Přehled a porovnání zadních pneumatik AC 85 a AC 65	46
Tabulka č. 5. Přehled a porovnání pneumatik SVT.....	47
Tabulka č. 6. Základní technické údaje Plantografu	50
Tabulka č. 7. Ověření funkčnosti a přesnosti plantografu testováním pneumatiky Mitas 650/65 R38	52
Tabulka č. 8. Naměřené a vypočtené hodnoty při zatěžování pneumatiky Mitas 650/65 R38 při tlaku huštění 160 kPa	54
Tabulka č. 9. Naměřené a vypočtené hodnoty při zatěžování pneumatiky Mitas 650/65 R38 při tlaku huštění 100 kPa	55
Tabulka č. 10. Naměřené hodnoty dosedací plochy pneumatiky při statickém a dynamickém zatížení pneumatiky Barum 14,9-28	57
Tabulka č. 11. Plnost otisku pneumatiky 650/65 R38 při zatížení 1105 kg a tlaku huštění 100 kPa.....	59

Seznam příloh

Příloha 1: Otisk šípů pneumatiky Mitas 650/65R38 při tlaku huštění 100 kPa	1
Příloha 2. Otisk šípů pneumatiky Mitas 650/65R38 při tlaku huštění 160 kPa	1
Příloha 3. Kontaktní plocha pneumatiky Mitas 650/65R38 snímaná plantografem; tlak huštění 100 kPa	1
Příloha 4. Kontaktní plocha pneumatiky Mitas 650/65R38 snímaná plantografem; tlak huštění 160 kPa.....	1

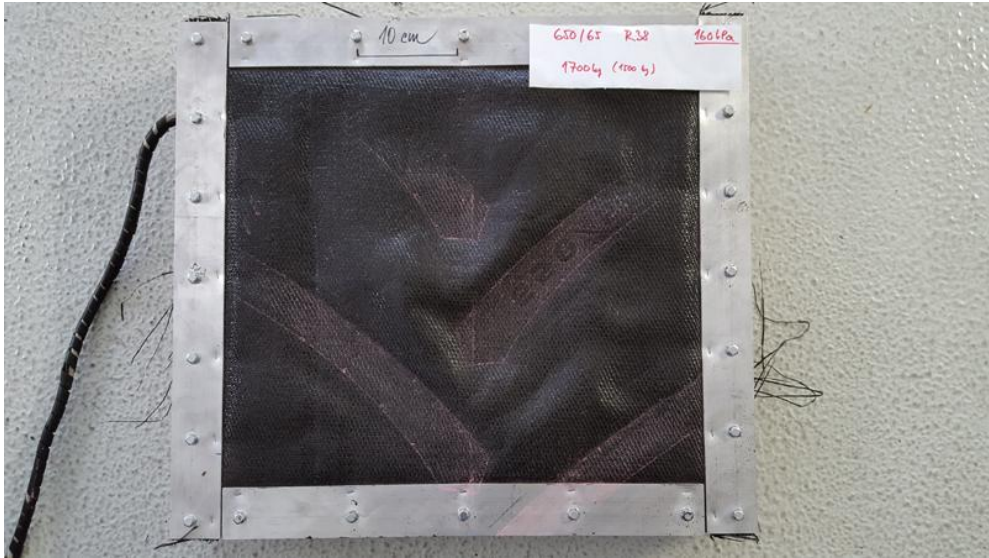
Příloha 1: Otisk šípů pneumatiky Mitas 650/65R38 při tlaku huštění 100 kPa



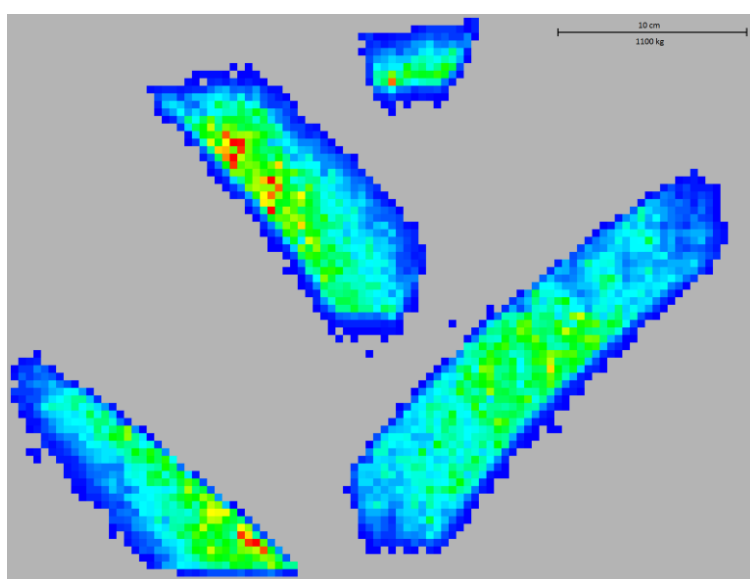
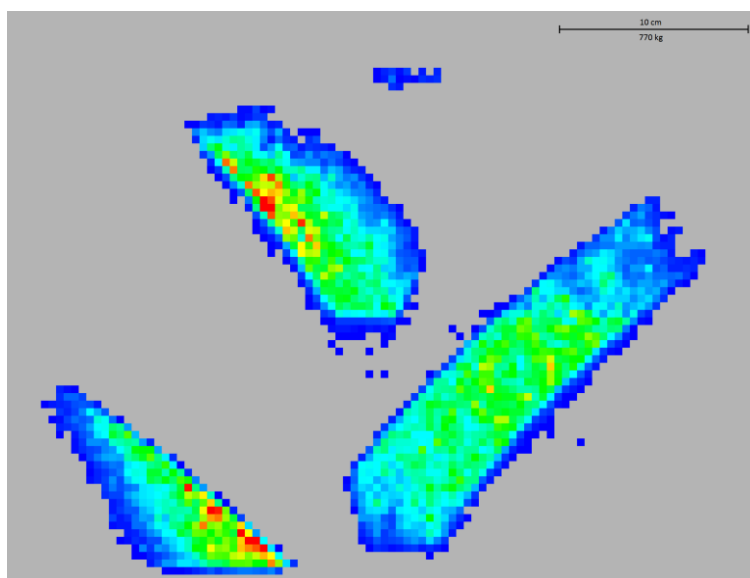
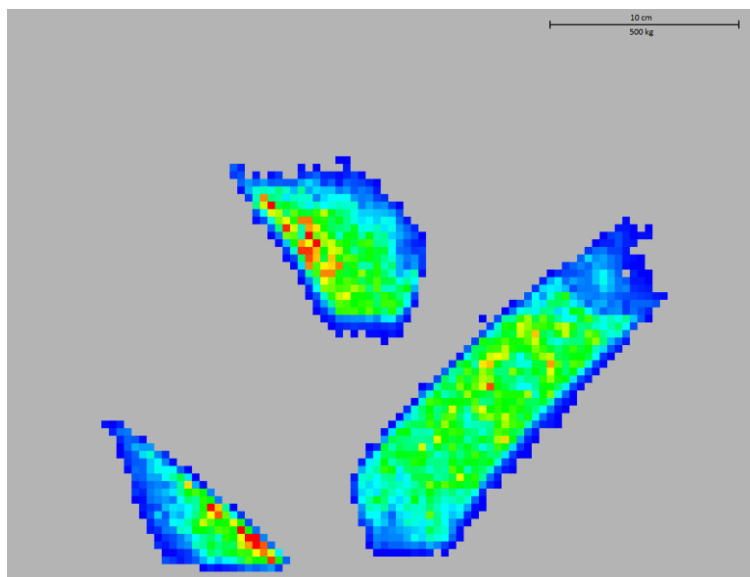


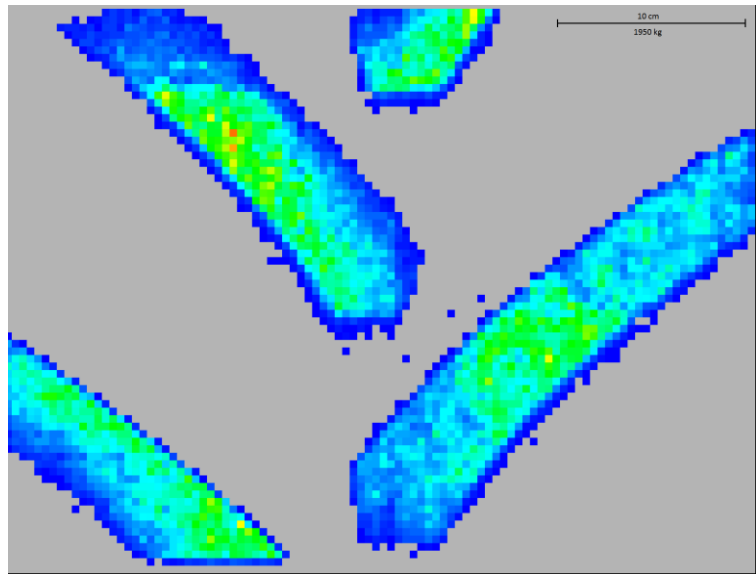
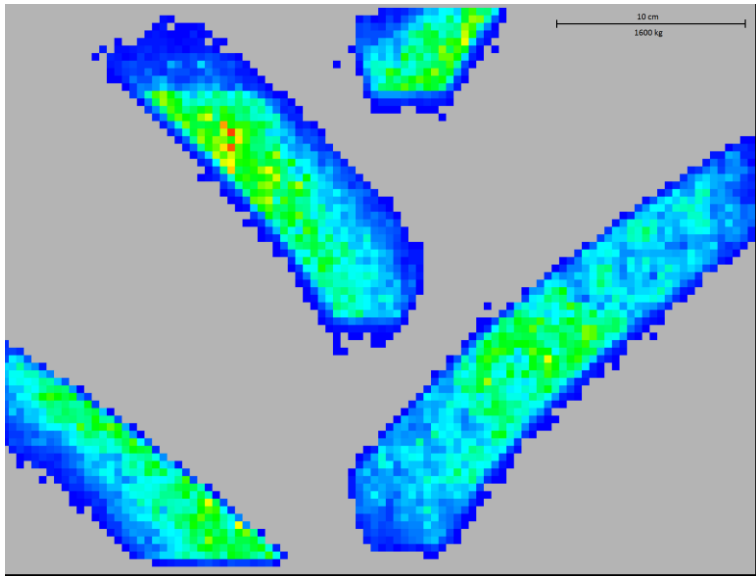
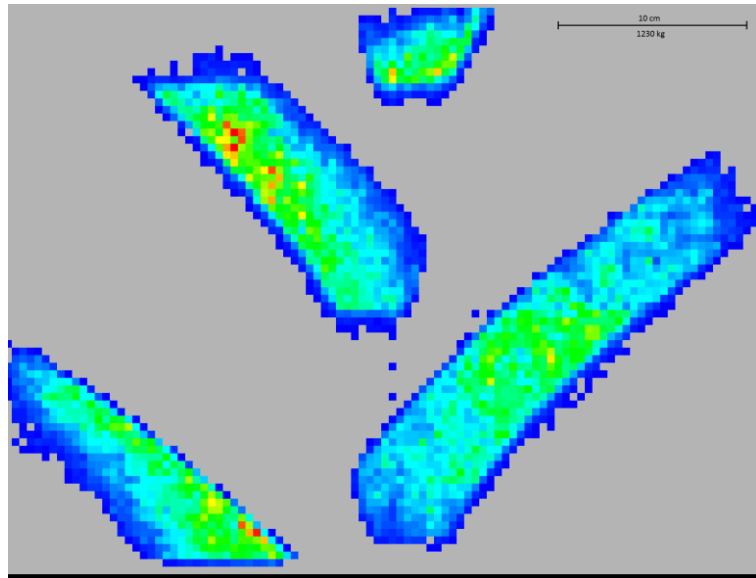
Příloha 2. Otisk šípů pneumatiky Mitas 650/65R38 při tlaku huštění 160 kPa





Příloha 3. Kontaktní plocha pneumatiky Mitas 650/65R38 snímaná plantografem; tlak huštění 100 kPa





Příloha 4. Kontaktní plocha pneumatiky Mitas 650/65R38 snímaná plantografem; tlak huštění 160 kPa

