

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Kompakční potenciál pneumatiky

diplomová práce

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

Diplomant: Bc. Tomáš Javůrek

© 2017 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tomáš Javůrek

Zemědělská technika

Název práce

Kompakční potenciál pneumatiky

Název anglicky

Tyre compaction potential

Cíle práce

Hlavním cílem práce je zhodnotit základní parametry pro stanovení kompakčního potenciálu 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. Výběr vhodných terénních pneumatik, u nichž budou přehodnoceny provozní parametry s ohledem na zobecnění vztahu rozložení kontaktního tlaku v dezénu pneumatiky s odkazem na platné zásady v oboru terramechanika.
3. Laboratorní činnost bude spočívat v testování vybraných zemědělských pneumatik a vyhodnocení charakteristické deformace dezénu v závislosti na změně zatížení a tlaku huštění.
4. V diskuzi bude proveden rozbor a zhodnocení získaných podkladů v kontextu současné technické úrovně zemědělských vozidel.
5. Závěrečná část práce bude obsahovat možná doporučení autora.

Doporučený rozsah práce

50 stran

Klíčová slova

zemědělské pneumatiky, půda, střední 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

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Patrik Prikner, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 12. 1. 2016

doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 1. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 17. 03. 2017

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: "Kompakční potenciál pneumatiky" vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 31.03.2017

.....
(podpis autora)

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce Ing. Patriku Priknerovi, Ph.D. za vstřícný přístup, kolegalitu při laboratorní činnosti a ochotu nápomoci při vypracování.

Abstrakt: Hlavním cílem této diplomové práce bylo zhodnotit základní parametry pro stanovení kompakčního potenciálu pneumatik s ohledem na změnu velikosti styčné plochy v závislosti na individuální kombinaci zatížení a tlaku huštění. První část této diplomové práce obsahuje literární rešerši zaměřenou na problematiku škodlivého zhutnění půdy s důrazem na prevenci jejího vzniku. Další část je zaměřena na popis vlastností zemědělských pneumatik s odkazem na platné zásady v oboru terramechanika, resp. rozložení styčné plochy, kontaktního tlaku a průběh napětí v půdě pod styčnou plochou zatížené pneumatiky. Následně je uvedena metodika měření a vyhodnocení změny velikosti styčné a stykové plochy v závislosti na nominální a individuální kombinaci zatížení a tlaku huštění testované zemědělské pneumatiky. Dále je porovnán očekávaný a originální kompakční potenciál testované pneumatiky (CC-rating), poskytující hodnocení kompakce půdy pomocí katalogových nominálních parametrů. Dodatečně je porovnán očekávaný a originální provozní kompakční potenciál testované pneumatiky (FCC-rating), poskytující hodnocení kompakce půdy pro individuální kombinaci zatížení a tlaku huštění. Závěrem je provedena diskuze k dané problematice s možným doporučením autora této diplomové práce.

Klíčová slova: zemědělské pneumatiky, půda, střední kontaktní tlak

Tyre compaction potential

Summary: The aim of the diploma thesis was to evaluate the basic parameters to determine tyre compaction potential with respect to a change of the contact area depending on the individual combination of tyre load and inflation pressure. The first part of this diploma thesis closes literature review of soil compaction issues with emphasis on compaction avoidance. Next part focuses on the description of agricultural tyre parameters using the terramechanics principles, the tyre–soil contact area and stress distribution and the stress propagation in the soil profile respectively. Subsequently, the diploma thesis includes description of measuring and evaluating the change of the contact area size and contact area of lugs which depend on combination of nominal, individual load and inflation pressure of tested agricultural tyre, respectively. Finally, the original and expected tyre compaction capacity (CC-rating), which offers assessment of soil compaction by using catalogue nominal parameters are compared. Additionally, the original and expected tyre field compaction capacity (FCC-rating), which offers assessment of soil compaction for individual load and inflation pressure of tyre are compared. Conclusion includes the discussion to given issue and the author's recommendations.

Keywords: agricultural tyres, soil, mean contact pressure

OBSAH

1	Úvod	1
2	Literární rešerše zaměřená na kompakční potenciál pneumatik	2
2.1	Účinky zhutnění půd	2
2.1.1	Opatření proti zhutnění půd	3
2.2	Vlastnosti zemědělských pneumatik z pohledu terramechaniky	5
2.2.1	Rozložení styčné plochy pneumatiky	6
2.2.2	Rozložení kontaktního tlaku ve styčné ploše pneumatiky	13
2.2.3	Průběh napětí v půdě pod styčnou plochou zatížené pneumatiky	16
2.3	Modelování kompakčních účinků	19
2.4	CC-rating	21
3	Cíle práce	24
4	Metodika a postup měření	25
4.1	Pracovní postup tvorby jednoduchého a vícenásobného otisku	27
4.2	Pracovní postup měření velikosti styčné a stykové plochy	29
4.3	Postup výpočtu kompakčního potenciálu	30
4.3.1	Provozní kompakční potenciál FCC-rating	31
4.4	Výpočet plnosti otisku stykové plochy	34
5	Vyhodnocení a diskuze	35
5.1	Vyhodnocení měření styčných a stykových ploch	35
5.2	Vyhodnocení plnosti otisku stykové plochy	40
5.3	Vyhodnocení kompakčního potenciálu	43
6	Závěr	47
	Seznam použité literatury	49

NOMENKLATURA

Zkratky a definice:

AR	poměr výšky ku šířce profilu pneumatiky
CC index	číselná hodnota CC-rating pneumatiky, (-)
CC' _c	index CC-rating pneumatiky pro velikost vypočtené styčné plochy S_{Tc} pneumatiky, (-)
CC' _m	index CC-rating pneumatiky pro velikost naměřené styčné plochy S_{Tm} pneumatiky, (-)
CC-rating	(Compaction Capacity) hodnocení kompakčního potenciálu pneumatiky ($q_s \geq 70$ kPa)
eCC index	číselná hodnota eCC-rating pneumatiky, (-)
eCC-rating	(equivalent Compaction Capacity) hodnocení kompakčního potenciálu pneumatiky pro nestandardizovaný typ půdy ($q_s \geq 70$ kPa)
FCC index	číselná hodnota FCC-rating pneumatiky, (-)
FCC _c	index provozního kompakčního potenciálu pneumatiky FCC-rating pro velikost vypočtené styčné plochy S_{Tc} pneumatiky, (-)
FCC _m	index provozního kompakčního potenciálu pneumatiky FCC-rating pro velikost naměřené styčné plochy S_{Tm} pneumatiky, (-)
FCC-rating	(Field Compaction Capacity) hodnocení provozního kompakčního potenciálu pneumatiky pro jakoukoli kombinaci zatížení a tlaku huštění ($q_s \geq 70$ kPa)
LCC index	číselná hodnota LCC-rating pneumatiky, (-)
LCC-rating	(Low Compaction Capacity) hodnocení kompakčního potenciálu pneumatiky ($35 \text{ kPa} \leq q_s \leq 70 \text{ kPa}$)
SGP	(Surphase-Grečenko-Prikner) rovnice pro výpočet nominální styčné plochy S_{T0} pneumatiky (Grečenko a Prikner, 2014), (cm^2)
standardizovaná půda	standardizovaný jílovito-hlinitý typ půdy s parametry dle klasifikačního systému USDA (viz kap. 2.4 CC-rating)

Veličiny:

A	aktuální velikost styčné plochy, (cm^2)
A_{0j}	aktuální velikost styčné plochy při jmenovitém zatížení, (cm^2)
a_{Tm}	aritmetická posloupnost změny velikosti nominální styčné plochy pneumatiky při změně nominálního zatížení (30 km/h na 10 km/h) za konstantního tlaku huštění, (cm)
B	šířka styčné plochy, (cm)
b_0	jmenovitá šířka pneumatiky, (cm)

b_1	navýšení šířky styčné plochy při zatížení (viz kap. 2.2.1 <i>Rozložení styčné plochy pneumatiky</i>), (3–5 cm/ I_w)
b_t	katalogová hodnota šířky profilu (pláště) pneumatiky, (cm)
c	regresní koeficient pro přepočítání hypotetické styčné plochy, (-)
c_0	koeficient pružnosti pneumatiky, (kg/cm)
c_1	koeficient pro trakční zemědělské pneumatiky, (-)
c_N	nominální tuhost bočnic pneumatiky pro katalogové kombinace zatížení a tlaku huštění při dané rychlosti, (kN/cm)
d	katalogová hodnota vnějšího průměru pneumatiky, (cm)
f_N	nominální deformace bočnic pneumatiky pro katalogové kombinace zatížení a tlaku huštění při dané rychlosti, (cm)
f_x	změna deformace bočnic pneumatiky při změně nominálního zatížení (30 km/h na 10 km/h) za konstantního tlaku huštění, (cm)
g	tíhové zrychlení, (9,81 m/s ²)
l, a	délka styčné plochy, (cm)
P	bodové zatížení, (kN)
p_i	tlak huštění pneumatiky, (kPa)
q	efektivní kontaktní tlak ve styčné ploše pneumatiky na měkké půdě, (kPa)
q_s	střední kontaktní tlak pro jmenovitou styčnou plochu S_{T0} pneumatiky a nominální zatížení W_N , (kPa)
q_{sc}	střední kontaktní tlak pro velikost vypočtené styčné plochy S_{Tc} pneumatiky a individuální zatížení W , (kPa)
q_{sm}	střední kontaktní tlak pro velikost naměřené styčné plochy S_{Tm} pneumatiky a individuální zatížení W , (kPa)
r	vzdálenost bodu zjišťovaného napětí v půdě od bodového zatížení P , (m)
r_s	katalogová hodnota statického poloměru pneumatiky, (cm)
r_{sx}	nominální statický poloměr přepočtený pro rychlost 10 km/h, (cm)
S_h	hypotetická obdélníková styčná plocha pneumatiky, (cm ²)
S_{st}	naměřená velikost stykové plochy pneumatiky, (cm ²)
S_T	teoretická velikost styčné plochy pneumatiky, (cm ²)
S_{T0}	teoretická styčná plocha pneumatiky pro jmenovitou hodnotu katalogové kombinace zatížení a tlaku huštění pro rychlost km/h, (cm ²)
S_{Tm}	naměřená velikost styčné plochy pneumatiky, (cm ²)
S_{Tn}	nominální hodnota velikosti styčné plochy pneumatiky odpovídající danému rozsahu tlaku huštění a korespondujícímu zatížení pro rychlost 10 km/h, (cm ²)

S_{Tv}	vypočtená velikost styčné plochy pneumatiky, (cm ²)
W	zatížení pneumatiky, (kg)
w	hmotnostní vlhkost půdy, (%)
W_j, W_N	jmenovité (nominální) zatížení pneumatiky, (kg)
w_p	mez plasticity půdy, (%)
z	hloubka stopy na měkké půdě, (cm)
z_d	uloubka (vzdálenost) od povrchu půdy, (cm)
α	polovina vrcholu úhlu kužele (obr. 14), (°)
α_A	poměr aktuální ku jmenovité velikosti styčné plochy, (-)
α_w, I_w	poměr aktuálního ku jmenovitému zatížení pneumatiky, (-)
β, k	koeficient zakřivení styčné plochy, (-)
δ	deformace pneumatiky, (cm)
ε	plnost otisku stykové plochy pneumatiky (poměr naměřené stykové a naměřené styčné plochy pneumatiky), (%)
ε_d	koeficient deformace pneumatiky, (-)
η	tvárový koeficient styčné plochy, (-)
θ	úhel odklonu vektoru r (vzdálenost bodu zjišťovaného napětí od bodového zatížení P) od svislé osy (viz obr 11), (°)
λ	koeficient zohledňující poměr šířky a délky styčné plochy na měkké půdě pro výpočet efektivního kontaktního tlaku q , (-)
ν	koncentrační faktor půdy, (-)
ρ_{dl}	limitní suchá objemová hmotnost standardizované jílovito-hlinité půdy pro CC-rating, (kg/m ³)
ρ_{dL}	limitní suchá objemová hmotnost standardizované jílovito-hlinité půdy pro LCC-rating, (kg/m ³)
ρ_{ds}	průměrná suchá objemová hmotnost půdy v rozsahu hloubek $z_d = 20\text{--}50$ cm, (kg/m ³)
σ_z	vertikální složka napětí v půdě, (kPa)

1 ÚVOD

Výzkumy naznačují, že světová populace dosáhne kolem roku 2050 přibližně devíti miliard lidí (KC a Lutz, 2014), což se jistě promítne i do požadavků v zemědělství. Z toho vyplývající rostoucí nároky na intenzifikaci produkce potravin a také obnovitelných zdrojů energie z biomasy s sebou ovšem nesou řadu negativ, jako např. zvyšování nároků na chemické ošetřování plodin, používání hnojiv a zvyšování výkonnosti zemědělské mechanizace. Rostoucímu trendu těchto nároků přispívá i celkové snižování podílu orné půdy, a to zejména důsledkem záboru a jiného znehodnocení. Dle tiskové zprávy Českého statistického úřadu (2014) ubylo v České republice od roku 2000 do roku 2013 celkem 9,1 % orné půdy, přičemž ubývající trend je sledován i v celé EU (EEA, 2015). Dle vědců z Granthamova centra pro udržitelnou budoucnost ze Sheffieldské univerzity v Británii (Cameron et al., 2015) dokonce ubylo za posledních 40 let přibližně 33 % světové orné půdy důsledkem eroze a znečištění na úkor stále se zvyšující produkce potravin a vyčerpávání přírodních zdrojů, které navíc nejsou v současnosti trvale udržitelné.

S rostoucími výkony zemědělské techniky se stále více objevují i problémy s nadměrným utužením půdy. Tento nežádoucí jev byl již prokázán mnoha výzkumníky po celém světě a jeho příčinou jsou zejména četné polní přejezdy nadměrně zatíženým pojezdovým ústrojím strojů (Van den Akker et al., 2003). Nadměrná kompakce půdy pak může přetrvávat i po mnoho let a v hlubších vrstvách půdního profilu je často považována i za stálou, jež nenapraví ani pravidelné hluboké zimní mrazy (Etana et al., 2013). Následkem pak bývá zejména dlouhodobé negativní ovlivnění růstu plodin, parametrů půdy a eroze (Soane et al., 1982; Arvidsson a Håkansson, 1996; Lhotský, 2000; Van den Akker et al., 2003). Je tedy více než účelné, aby byla přijata rizika utužení půdy za opodstatněná a pokud možno konvenční systémy v zemědělství by měly být nahrazeny novějšími a šetrnějšími systémy k půdnímu profilu.

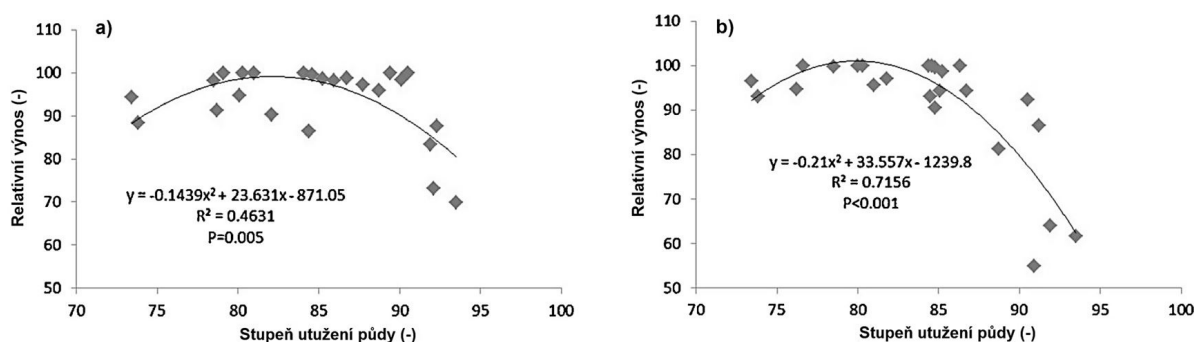
Jak uvádí Van den Akker et al. (2003): „V očích zemědělců může v krátkodobém hledisku znamenat prevence proti utužení zvýšené náklady, ovšem v dlouhodobém hledisku se jeho následky projeví ve snížených výnosech, vyšší náchylnosti k erozi, snížené infiltraci vody v půdě a mnoho dalších. To bude mít velké dopady nejen na samotné zemědělce, ale i celou společnost, jelikož půda již nebude schopna uspokojit všechny lidské potřeby.“

2 LITERÁRNÍ REŠERŠE ZAMĚŘENÁ NA KOMPAKČNÍ POTENCIÁL PNEUMATIK

2.1 Účinky zhutnění půd

Mezi základní negativní vlivy utužení, co se orné půdy týče, lze považovat vlivy na hloubku zakořenění a změny fyzikálních a hydrologických vlastností půdy. To má dopady na růst rostlin, infiltraci vody do půdy a její retenční schopnost (schopnost zadržovat vodu), podpovrchové proudění, erozi, využití vody a živin plodinami, vyplavování živin a agrochemikálií do podzemních vod a mnoho dalších (Van den Akker et al., 2003; Raper, 2005).

I přes zmíněné negativní vlivy nemusí být veškeré utužení striktně škodlivé. Některé plodiny pro svůj optimální růst určitý stupeň kompakce vyžadují, což na své studii ve Švédsku dokazují například Arvidsson a Håkansson (2014). Na obrázku 1 lze vidět například relativní výnos cukrové řepy nebo bobu koňského (hodnoty s nejvyšším výnosem jsou nastaveny na hodnotu 100) v závislosti na stupni kompakce půdy, stanovené Håkanssonem (1990), vyjadřující poměr aktuální suché objemové hmotnosti půdy vůči její referenční hodnotě. Z maxima regresní přímky pak vyplývá optimální stupeň kompakce pro danou plodinu.



Obrázek 1 Vliv stupně kompakce půdy na výnos: a) cukrové řepy, b) bobu koňského

Zdroj: Arvidsson a Håkansson (2014) (upraveno)

Z hlediska škodlivého zhutnění půdy je však nutné se zaměřit zejména na spodní vrstvy půdního profilu a stanovení mezních kritérií utužení. Kritické hodnoty fyzikálních vlastností základních typů půd, jež jsou považovány za hlavní ukazatele v hodnocení utužení, jsou uvedeny v tabulce 1. Jejich překročením dochází k významnému utužení půdy se škodlivým působením na rostliny a ovlivnění hydrologických a fyzikálních vlastností půdy (Lhotský, 2000).

Tabulka 1 Mezní hodnoty významných vlastností pro zhutnělé půdy

Půdní vlastnost	Půdní druh					
	J	JV ,JH	H	PH	HP	P
Objemová hmotnost red. (po vysoušení) (g/cm ³)	> 1,35	> 1,40	> 1,45	> 1,55	> 1,60	> 1,70
Pórovitost (% obj.)	< 48	< 47	< 45	< 42	< 40	< 38
Min. vzdušnost (% obj.)	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Penetrační odpor (MPa) při vlhkosti (% hm.)	2,8 – 3,2	3,3 – 3,7	3,8 – 4,2	4,5 – 5,0	5,5	> 6,0
	28 – 24	24 – 20	18 – 16	15 – 13	12	10

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

Zdroj: Lhotský (2000) (upraveno)

Utžený stav v orné vrstvě (přibližně do hloubky 30 cm) lze napravit běžnou kultivací, ovšem utužení představuje dlouhodobější problémy především v nižších vrstvách půdního profilu. Do těchto hloubek nezasahují při konvenčním zpracování půdy pracovní části strojů, nedochází zde proto ke kypření a vytvořená kompakce bývá stálá, kdy regenerační účinky nemá ani opakované střídání mrazů (Berisso et al., 2012; Berisso et al., 2013; Etana et al., 2013).

2.1.1 Opatření proti zhutnění půd

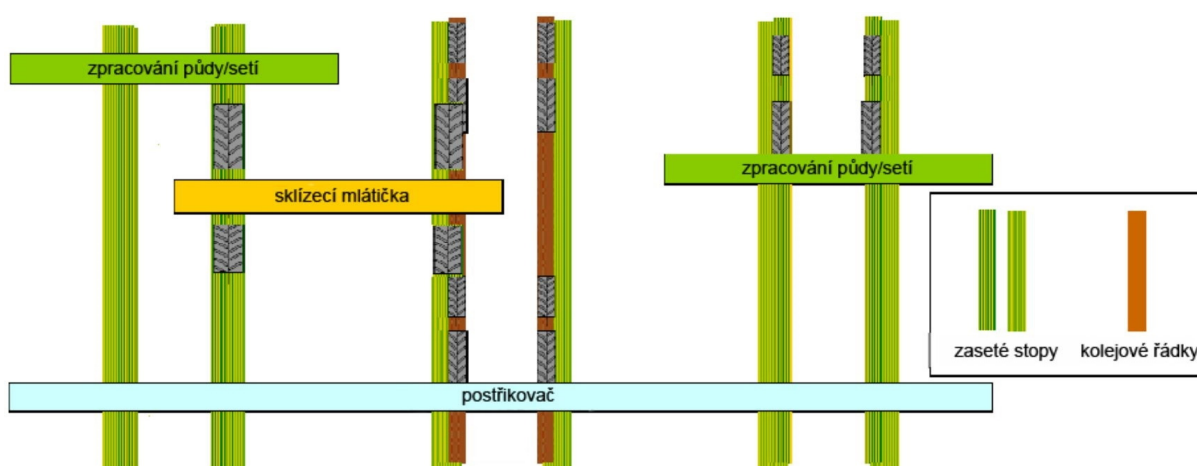
Ačkoli nadměrné hodnoty kontaktních tlaků od pojezdových ústrojí strojů jsou považovány za hlavní příčinu vzniku zhutnění půd, nejsou jeho jedinou. Význam má samotný stav půdy a způsob pohybu strojů po pozemcích. Jedná se především o:

- strukturu a zrnitostní složení půdy (vlastní náchylnost k utužení),
- vlhkost půdy,
- oslabenou půdní pevnost kultivací,
- opakované přejezdy vozidel stejnou stopou,
- pojezdovou rychlost a další (Raper, 2005).

Vlhkost a strukturu půdy lze ovlivnit obtížně, či velmi nákladně a minimální zpracování půdy (s ohledem na požadavky dnešních výnosů) je pak víceméně nezbytné, jelikož dosavadní výzkumy systémů s nulovým zpracováním půdy neprokazují zlepšení půdních parametrů a výnosů plodin (Simoes et al., 2009; Afzalnia a Zabih, 2014; Domínguez a Bedano, 2016). Pro zmírnění utužení někteří autoři doporučují vyvarovat se alespoň přejezdů při vysoké půdní vlhkosti, kdy je půdní pevnost velmi oslabena (Alakukku et al., 2003; Raper, 2005), avšak vzhledem k dodržení agrotechnických lhůt toto často nebývá možné. Navíc, v závislosti

na daném typu půdy a velikosti kontaktních tlaků od pojezdových ústrojí, může docházet k utužení i v suchých obdobích (Horn et al., 2003; Trautner a Arvidsson, 2003).

Z možných řešení tedy zbývá jen možnost snížení počtu přejezdů mechanizace a velikosti kontaktních tlaků od pojezdových ústrojí. Omezení počtu přejezdů řeší některé z komplexních systémů řízených přejezdů využívající neměnných stop, jako je například CTF (Controlled Traffic Farming, viz obr. 2), různé tzv. mostové konstrukce (Raper, 2005) nebo technologie přímého setí (Botta et al., 2007).



Obrázek 2 Organizace obdělávání pozemku při základním modulu 4 m technologie CTF

Zdroj: Kumhála et al. (2013) (upraveno)

Co se týče snížení kontaktních tlaků, lze uvést např. užití dvojmontáží a trojmontáží, pásových a vícenápravových podvozků nebo nízkotlakých pneumatik (Raper, 2005). Do této problematiky však spadá i volba vhodných tlaků huštění běžných zemědělských pneumatik pro skutečné zatížení (viz kap. 2.2 *Vlastnosti zemědělských pneumatik z pohledu terramechaniky*). Existují jistá doporučení přípustných kontaktních tlaků pro zmírnění utužení, avšak vzhledem k rozmanitosti půdních podmínek, a navíc diferencovaně v rámci jednoho pozemku nebo i jednotlivých vrstev půdního profilu, bývá jejich stanovení v praxi velmi obtížné. Státní normu přípustných kontaktních tlaků na půdu má například Rusko (Gost 26955-86, 1996), viz tabulka 2. Naopak Petelkau (1984) uvádí pro jarní období limity pro písčitou půdu 50 kPa, hlinitou 80 kPa a jílovitou 80 kPa, kdy je její obsah vody více jak 70 % z celkové polní vodní kapacity. Hodnoty na podzim pak uvádí pro stejné typy půd 80 kPa, 150 kPa a 200 kPa, kdy je obsah vody v půdě méně jak 70 % z celkové polní vodní kapacity.

Tabulka 2 Maximální doporučené střední kontaktní tlaky v závislosti na půdních podmínkách

Obsah vody z celkové polní vodní kapacity (%)	Střední kontaktní tlak (kPa)				Vertikální napětí v hloubce 0,5 m (kPa)	
	jaro		léto/podzim		jaro	léto/podzim
	Jílovitá	Písčítá, písčito-hlinitá	Jílovitá	Písčítá, písčito-hlinitá		
>90	80	95	100	120	25	30
70-90	100	120	120	145	25	30
60-70	120	145	140	170	30	35
50-60	150	180	180	215	35	45
<50	180	215	210	250	35	50

Pozn.: Pro dva přejezdy stejnou stopou jsou hodnoty o 10 % nižší; pro tři a více přejezdů o 20 % nižší.

Zdroj: Alakukku et al (2003) (upraveno)

V předchozích odstavcích této kapitoly byla uvedena víceméně preventivní opatření proti utužení, ačkoli v praxi jsou často užívána i opatření nápravná, přičemž se jedná převážně o různé způsoby hloubkového kypření. Odpověď na otázku, jaká řešení jsou z ekonomického a environmentálního hlediska výhodnější, je velmi individuální záležitostí, ovšem zajímavé výsledky uvádí například studie ve Velké Británii Tima Chamena et al. (2015). V porovnání s konvenčním zemědělstvím (žádná preventivní ani nápravná opatření proti utužení) přinesla nejvyšší navýšení hrubých zisků u zkoumaných zemědělských podniků právě prevence proti utužení, přičemž se jednalo zejména o užití systému CTF, nízkotlakých pneumatik a pásových podvozků (CTF nejvyšší a pásové podvozky nejnižší navýšení z těchto tří systémů). Naopak užití hloubkového kypření, jako nápravného opatření proti utužení, znamenalo vždy snížení hrubých zisků u zkoumaných podniků. Metody prevence proti utužení pak byly také hodnoceny jako šetrnější, co se týče vyplavování dusíkatých látek v půdě a celkové produkce CO₂ během celého procesu pěstování daných plodin. Prevence proti utužení tedy ve výsledku znamená přínosy jak pro stranu zemědělce, tak pro stranu životního prostředí.

2.2 Vlastnosti zemědělských pneumatik z pohledu terramechaniky

Rostoucí výkony a hmotnosti zemědělské techniky s ohledem na nejpoužívanější typ pojezdového ústrojí, tedy kolového, mají nesporný vliv na rostoucí požadavky zemědělských pneumatik. Důraz je kladen nejen na jejich nosnost a přenos tahové síly, ale i kompaktní potenciál, a proto se vývoj ubírá směrem radiálních a nízkotlakých (flotačních) pneumatik. Snižování tlaků huštění pneumatik má samozřejmě i svá negativa, jako je např. jejich nižší životnost, zvýšení bočního vybočení na svahu, nebo vyskytující se problémy s prokluzem patky na ráfku (Jurtík, 2004; PAMI, 2005; Elwaleed et al., 2006; Serrano et al., 2009). Proto výrobci poukazují nejen na správnou montáž a tlak huštění, ale i na výběr vhodných typů pneumatik

lišící se svými rozměry, technologiemi výroby a použitými materiály. Někteří výrobci dokonce uvažují i o znovuzavedení duší, jelikož i ty jsou schopné přenášet část hnací síly mezi pneumatikou a ráfkem (Prikner, 2012). Naopak snižování tlaků huštění pneumatik má svá opodstatnění díky zlepšení tahových vlastností, spotřeby paliva (Serrano et al., 2009), vyšší šetrnosti k půdě (viz kap. 2.1 *Účinky zhutnění půd*) a z toho plynoucích ekonomických výhod (Tim Chamen et al., 2015).

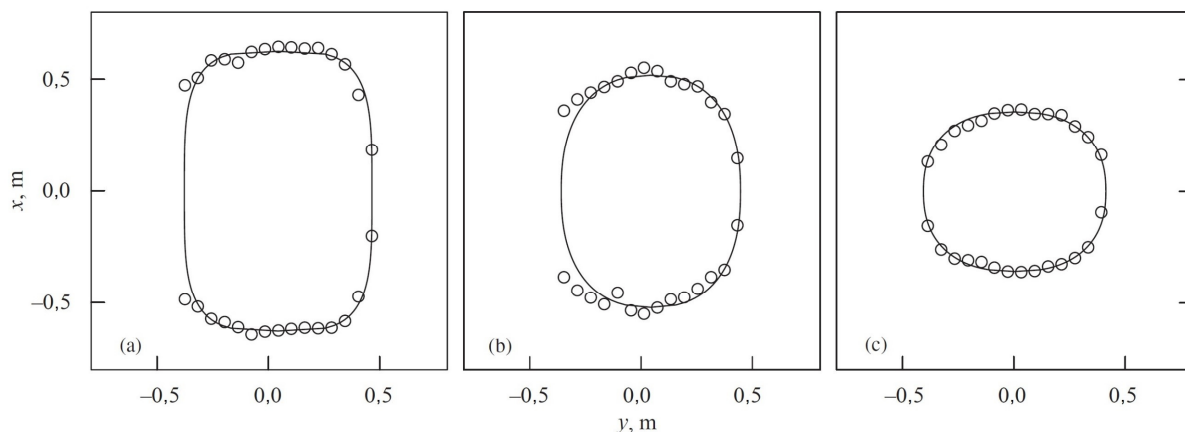
2.2.1 Rozložení styčné plochy pneumatiky

K popisu plochy dezénu pneumatiky, která je v kontaktu s podložkou, se užívá výrazů styčná a styková plocha. Styková plocha představuje pouze dotykovou plochu vzorků, a naopak styčná plocha je dána obrysem vertikálního průmětu oblasti kontaktu pneumatiky s podložkou a zahrnuje tak i plochu mezi vzorky (viz obr. 3) (Schjøning et al., 2008). Vzhledem k polním podmínkám a požadavku stanovení škodlivého zhutnění zejména spodních vrstev půdního profilu, zde bude proveden popis zejména plochy styčné. Zabořením vzorků dezénu pneumatiky do půdy se totiž distribuce napětí v půdě vyrovná již v relativně malé hloubce (Hammel, 1994; Arvidsson a Keller, 2007) a popis stykové plochy zde nemá vyšší význam.

Styčnou plochu mezi pneumatikou a tvrdou podložkou lze popsat plochou kruhovou až eliptickou, a to zejména u diagonálních pneumatik a vyšších tlaků huštění (Grečenko, 1994; Hallonborg, 1996). Teoretická velikost styčné plochy S_T (cm²) pro eliptický tvar je dán rovnicí:

$$S_T = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{4} \quad (1)$$

, kde b (cm) je šířka a a (cm) celková délka styčné plochy. Tuto rovnici uvádí například Soltynski (1979), Kilner (1982) nebo Upadhyaya a Wulfsohn (1990). Na základě vnějšího poloměru a deformace pneumatiky stanovili Bekker (1983) a Lyasko (1994) závislost této délky a a šířky b styčné plochy, přičemž parametry deformace stanovili experimentálně pro každý typ pneumatik zátěžovými testy.



Obrázek 3 Příklad měřených (kruhové body) a teoretických (plná čára) obrysů styčných ploch pneumatiky 800/50R34 dle Schjønninga et al. (2008)

Pozn.: Směr jízdy je podél osy x . Tlaky huštění: a) 50 kPa, b) 100 kPa, c) 240 kPa.

Zdroj: Schjønning et al. (2008) (upraveno)

U diagonálních pneumatik a nižšího tlaku huštění (nebo na měkké podložce) je však tvar styčné plochy spíše oválný. Tento problém například Komandi (1976) řeší užitím půlkruhů pro zaoblení hran hypotetické obdélníkové plochy a jeho výsledná rovnice pro výpočet velikosti styčné plochy má pak tvar:

$$S_T = (a - b) \cdot b + b^2 \cdot \frac{\pi}{4}. \quad (2)$$

Bekker (1983) vychází z obdélníku a využívá tvarového koeficientu λ (-) s hodnotami od 0,78 (pro čistě eliptický tvar) do 1,0 (pro široké trakční pneumatiky), avšak bez stanovení konkrétního tvaru obrysu styčné plochy. Lyasko (1994) naopak ořezává dva vnější segmenty čistě elipsy (viz rovnice (1)) podél hlavní osy ve směru jízdy, čímž dospěl k použití tvarového koeficientu η (-):

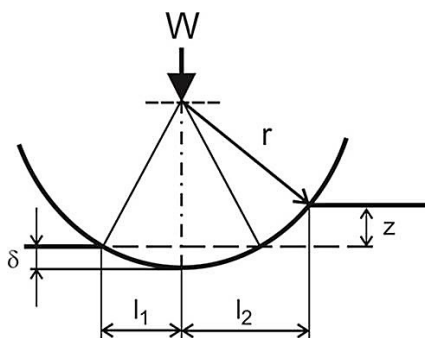
$$S_T = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot a \cdot b \cdot \left(1 - \frac{2\eta}{\pi}\right). \quad (3)$$

Všechny výše uvedené vzorce (1), (2) a (3) však předpokládají plně elastickou půdu bez plastické deformace. Problematika je však v zemědělské praxi složitější a půda plastické deformaci podléhá. Tvar styčné plochy není tedy symetrický podél příčné osy a větší část plochy zaujímá část na straně směru jízdy. Navíc, při jízdě na bočním svahu, nemusí být symetrická ani podél podélné osy.

Asymetrický tvar styčné plochy uvádí například Bekker (1985) a Wulfsohn a Upadhyaya (1992), ovšem rovnice ji popisující obsahují příliš mnoho parametrů a proměnných, které bývají často obtížně dostupné, a jsou tak příliš komplikované pro praktické použití. Snaha autorů tedy

směřuje k dosažení jistého zjednodušení za použití různých empirických vzorců a pokud možno snadno dostupných katalogových údajů o dané pneumatice.

Schwanghart (1991), který své výzkumy zakládal na terénních měřeních, při svých výpočtech vycházel z dvojrozměrného matematického modelu, viz obrázek 4. S jeho pomocí stanovil rovnici pro výpočet délky styčné plochy l (cm), k jejíž tvorbě dochází při průjezdu pneumatiky měkkou půdou. Obdobně jako Bekker (1983) se nezabýval stanovením konkrétního tvaru styčné plochy.



Obrázek 4 Schwanghartův (1991) dvojrozměrný matematický model otisku pneumatiky pro výpočet délky styčné plochy l při průjezdu měkkou půdou

Zdroj: Schwanghart (1991) (upraveno)

Celková délka otisku l je pak dána vztahem:

$$l = l_1 + l_2 = \sqrt{(d \cdot (z + \delta) - (z + \delta)^2)} + (d \cdot \delta - \delta^2) \quad (4)$$

, kde d (cm) je vnější průměr pneumatiky, z (cm) hloubka stopy a δ (cm) deformace pneumatiky dle vzorce:

$$\delta = 0,8 \cdot \frac{W}{c_0} \quad (5)$$

, kde W (kg) je aktuální zatížení kola a c_0 (kg/cm) je konkrétně změřený koeficient pružnosti pneumatiky pro daný tlak huštění (viz tab. 3).

Tabulka 3 Hodnoty koeficientů pružnosti c_0 stanovené Schwanghartem (1991) u vybraných měřených pneumatik v závislosti na tlaku huštění

Označení pneumatiky	Vnější průměr d (cm)	Šířka profilu b_t (cm)	Koeficient pružnosti c_0 (kg/cm) pro daný tlak huštění p_i			
			60 kPa	80 kPa	100 kPa	200 kPa
12.5/80-18	98,7	32,8	150	183	225	373
13.6/12-28	131,0	34,5	186	219	255	458
16.9/14-34	158,5	42,9	206	244	287	525
16.9/14-26	138,1	42,9	201	239	279	509

Zdroj: Schwanghart (1991) (upraveno)

Hloubku stopy z lze stanovit na základě tlaků působících na půdu a jejích parametrů, ale ty jsou však velice závislé na jejím složení a vlhkosti. Také koeficient pružnosti c_0 je nutno stanovit na základě měření či výpočtu dané pneumatiky, tudíž i tato metoda není příliš vhodná pro praktické použití v polních podmínkách. Nicméně výsledný vztah pro výpočet styčné plochy Schwanghart (1991) uvádí takto:

$$S_T = b \cdot l \cdot \beta \quad (6)$$

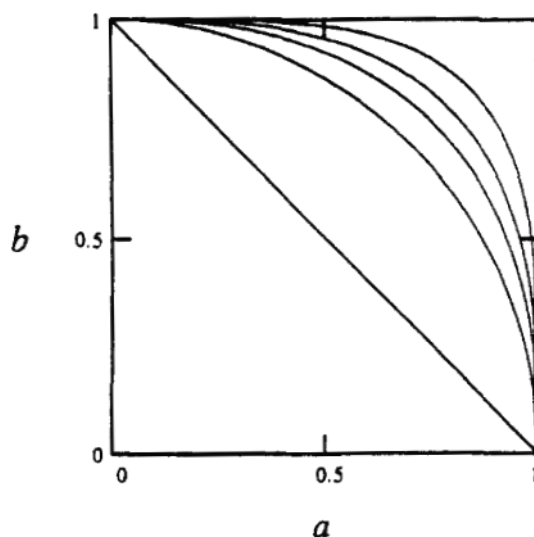
, kde l je délka plochy dle vzorce (4), β (-) koeficient elipticity (0,75–0,80) a b šířka styčné plochy pneumatiky dle vzorce:

$$b = b_0 + b_1 \cdot I_W \quad (7)$$

, kde b_0 (cm) je jmenovitá šířka pneumatiky, b_1 (cm) je 3–5 (cm/procento zatížení) a I_W (-) je podíl aktuálního W ku jmenovitému W_j (kg) zatížení (procento zatížení) dle vzorce:

$$I_W = \frac{W}{W_j} \quad (8)$$

Dalším autorem zabývajícím se empirickými metodami pro stanovení velikosti styčné plochy, jehož výzkumy se zakládaly na terénních měřeních obdobně jako Schwanghart (1991), byl Hallonborg (1996). Jeho snahou bylo vyřešení problému s nesymetričností a „neelipticitou“ reálné styčné plochy, a proto přišel s řešením pomocí tzv. superelipsy popsanou Heinem (1964) a Gardnerem (1965). Super elipsa zahrnuje širokou škálu oválných tvarů od rovné čáry po obdélník (viz obr 5).



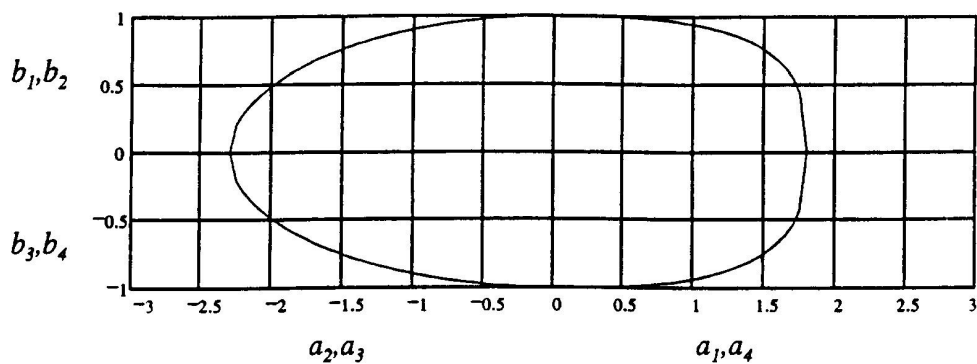
Obrázek 5 Tvary křivek superelipsy v prvním kvadrantu ortogonálního souřadnicového systému ($a = b = 1$; $n = 1, 2, 2.5, 3$ a 4)

Zdroj: Hallonborg (1996) (upraveno)

V ortogonálním souřadnicovém systému má rovnice superelipsy tvar:

$$\frac{x^n}{a^n} \cdot \frac{y^n}{b^n} = 1 \quad (9)$$

, kde s rostoucí hodnotou exponentu n se mění tvar křivky a parametry a a b popisují délky na polovinách hlavních os reprezentující styčnou plochu. Rozdělením řešení do čtyř kvadrantů a dalšími matematickými úpravami vztahu (9) lze dosáhnout matematického popisu požadovaného tvaru kontaktní plochy, jak je patrné na obrázku 6. Pokud exponent n bude roven hodnotě 2, velikost plochy kvadrantu bude odpovídat jedné čtvrtině plochy čisté elipsy, a pokud se jeho hodnota bude blížit nekonečnu, pak plocha kvadrantu bude odpovídat součinu a a b , tedy obdélníku.



Obrázek 6 Tvar kontaktní plochy mezi pneumatikou a půdou stanovené na základě superelipsy dle Hallonborga (1996)

Zdroj: Hallonborg (1996) (upraveno)

Jelikož výpočet velikosti styčné plochy pomocí superelipsy zahrnuje integrální počet, jenž není příliš vhodný pro praktické využití, stanovil Hallonborg (1996) koeficient zakřivení styčné plochy k (-). Plochu kvadrantu S_{kv} (cm²) lze pak získat prostým součinem:

$$S_{kv} = k \cdot a \cdot b . \quad (10)$$

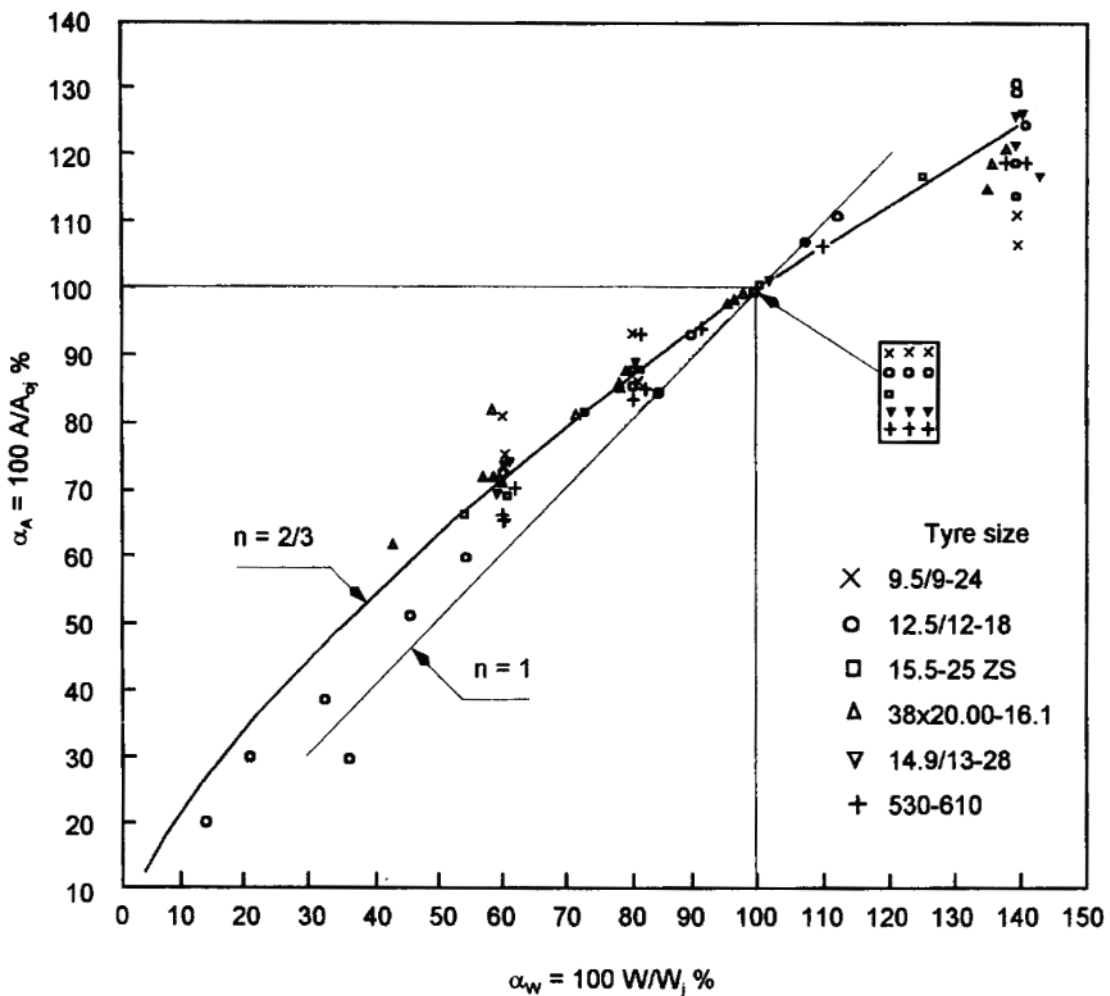
Pro snadnější určení k poté sestavil převodní tabulku pro exponent n v rozsahu 2–4.

Pro ověření Hallonborgových (1996) poznatků provedl porovnání s výzkumem Söhne (1958), přičemž ve stanovení velikosti styčné plochy dosáhl odchylky od reálných hodnot maximálně 3,5 %. Z tohoto důvodu tuto metodu aplikovali již mnozí autoři, jako např. Keller (2005) a Schjønning et al. (2008) v modelu FRIDA, kde se zabývají výpočtem distribuce napětí v půdě pod zatíženou pneumatikou (viz obr. 3), dále Keller et al. (2007) v modelu SoilFlex pro těžce účely či Roşca et al. (2014) v modelu pro výpočet trakce zemědělských pneumatik a mnoho dalších.

Výpočet velikosti styčné plochy s použitím empirických vztahů a dostupných katalogových údajů o pneumatice, avšak na tvrdé podložce, se zabýval Grečenko (1995). Jelikož z katalogových údajů lze získat pouze data pro nominální hodnoty kombinace zatížení a tlaku huštění, stanovil (při konstantním tlaku huštění) na základě vlastních zátěžových testů vybraných pneumatik korekční faktor α_A (viz obr. 7):

$$\alpha_A = \alpha_W^{2/3} \quad (11)$$

, kde α_W (-) je poměr aktuálního zatížení W ku nominálnímu zatížení pneumatiky W_j a α_A (-) je poměr aktuální velikosti styčné plochy A (cm^2) ku styčné ploše pneumatiky při jmenovitém zatížení A_{oj} (cm^2). Při vlastním měření plochy A použil metodu vícenásobného otisku (Grečenko et al., 1990).



Obrázek 7 Zpracovaná série 87 měření styčných ploch vybraných pneumatik pro regresní stanovení funkce $\alpha_A = \alpha_W^n$ s exponentem $n = 2/3$ nebo eventuálně $n = 1$

Zdroj: Grečenko (1995) (upraveno)

Na základě poznatků několika autorů, například Sitkey a Söhne (1969) a Krick (1969), a zejména modifikací empirických vztahů stanovených Pillai a Fielding-Russell (1986), poté Grečenko (1995) uvedl rovnici:

$$S_T = c_1 \cdot \alpha_W^n \cdot b_t \cdot (r_s \cdot (d - 2 \cdot r_s)^2)^{1/3} \quad (12)$$

, kde $c_1 = 1,65$ (pro trakční zemědělské pneumatiky), b_t (cm) je šířka profilu pláště, d vnější průměr a r_s (cm) statický poloměr pneumatiky. Rovnice (12) však nezahrnuje závislost na tlaku huštění.

Dalšími modifikacemi vztahu (12) byla později stanovena rovnice SGP (Surphase-Grečenko-Prikner), (Grečenko a Prikner, 2014):

$$S_{T0} = c \cdot S_h \quad (13)$$

, kde c (-) je koeficient (stanovený regresní analýzou s indexem determinace $R^2 = 0,91$) dle vzorce:

$$c = 0,927 + 0,761 \cdot AR - 1,215 \cdot AR^2 \quad (14)$$

, kde AR je poměr výšky ku šířce profilu pneumatiky a S_h (cm²) je hypotetická obdélníková styčná plocha dle rovnice:

$$S_h = b_t \cdot l \quad (15)$$

, kde b_t je šířka pláště a l délka styčné plochy dle vzorce:

$$l = \sqrt{d^2 - 4r_s^2} \quad (16)$$

, kde d je vnější průměr a r_s statický poloměr pneumatiky. Výsledná rovnice SGP má tedy tvar:

$$S_{T0} = (0,927 + 0,761 \cdot AR - 1,215 \cdot AR^2) \cdot b_t \cdot \sqrt{d^2 - 4r_s^2}. \quad (17)$$

Publikovaný tvar SGP rovnice (17) však platí jen pro nominální hodnoty rozměrů a katalogových kombinací zatížení a tlaku huštění určených pro pracovní rychlost 10 km/h a také není vhodný pro nízkotlaké flotační pneumatiky.

Empirických vztahů zahrnující jakoukoli kombinaci zatížení a tlaku huštění existuje celá řada, ovšem stále mají mnoho nedostatků, ať už se jedná o citlivost na půdní parametry, nebo parametry samotných pneumatik. Jedná se například o vztahy Grečenka (1995) (konverze vztahů Steinera a Söhne (1979)) pro:

diagonální pneumatiky:

$$S_T = \frac{98,1 \cdot W}{112,8 + 66,5 \cdot p_i + 0,883 \cdot 10^{-2} \cdot W - 0,4 \cdot d} \quad (18)$$

radiální pneumatiky:

$$S_T = \frac{98,1 \cdot W}{267,7 + 57,5 \cdot p_i + 1,08 \cdot 10^{-2} \cdot W - 1,6 \cdot d} \quad (19)$$

, kde p_i (kPa) je tlak huštění a d vnější průměr pneumatiky. Uvedené vztahy (18) a (19) však nezohledňují šířku pneumatiky.

Další vztah uvádí například O'Sullivan et al. (1999):

$$S_T = s_1 \cdot b_t \cdot d + s_2 \cdot W + \frac{s_3 \cdot W}{p_i} \quad (20)$$

, kde b_t je šířka pláště pneumatiky a s_1-s_3 (-) jsou empirické parametry stanovené pro tuhou až měkkou podložku.

Empiricky stanovený vztah, avšak jen pro vlhkou půdu, pak uvádí například Diserens (2002):

$$S_T = 0,43 \cdot b_t \cdot d - 0,0006152 \cdot p_i + 0,0022 \cdot W . \quad (21)$$

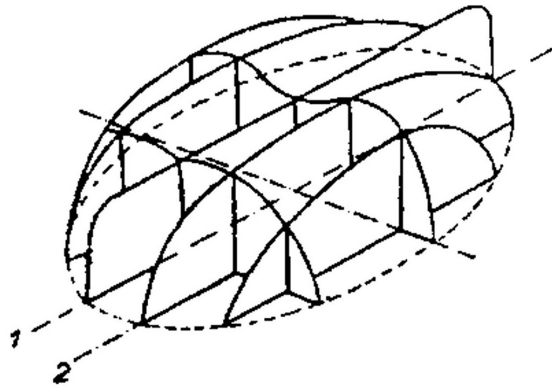
2.2.2 Rozložení kontaktního tlaku ve styčné ploše pneumatiky

Ačkoli literatura často pracuje pouze s hodnotou středního kontaktního tlaku q_s (kPa) (např. O'Sullivan et al., 1999; Van den Akker, 2004; Grečenko a Prikner, 2014):

$$q_s = 98,1 \cdot \frac{W}{A} \quad (22)$$

, kde W (kg) je zatížení kola a A (cm²) velikost styčné plochy mezi pneumatikou a podložkou, skutečný průběh je složitější. Závisí na mnoha parametrech pneumatiky jako je konstrukce, zatížení a tlak huštění, ale také na mnoha parametrech podložky, resp. půdy (Gysi et al., 2001; Jun et al., 2004; Way a Kishimoto, 2004; Schjønning et al., 2008).

Na tvrdé podložce se maximum kontaktního tlaku v podélném řezu posouvá ve směru pohybu, zatímco v příčném řezu závisí na tlaku huštění a radiální tuhosti boků pneumatiky (viz obr. 8). Čím širší pneumatika, tím je i důležitější správné nahuštění podle aktuálního zatížení (dle doporučení výrobce), aby byl průběh kontaktního tlaku co nejvíce vyrovnán. Při přehuštění se maximum kontaktního tlaku objeví uprostřed a při podhuštění se maximum naopak objeví na okrajích stopy a uprostřed bude minimum (Grečenko, 1994).

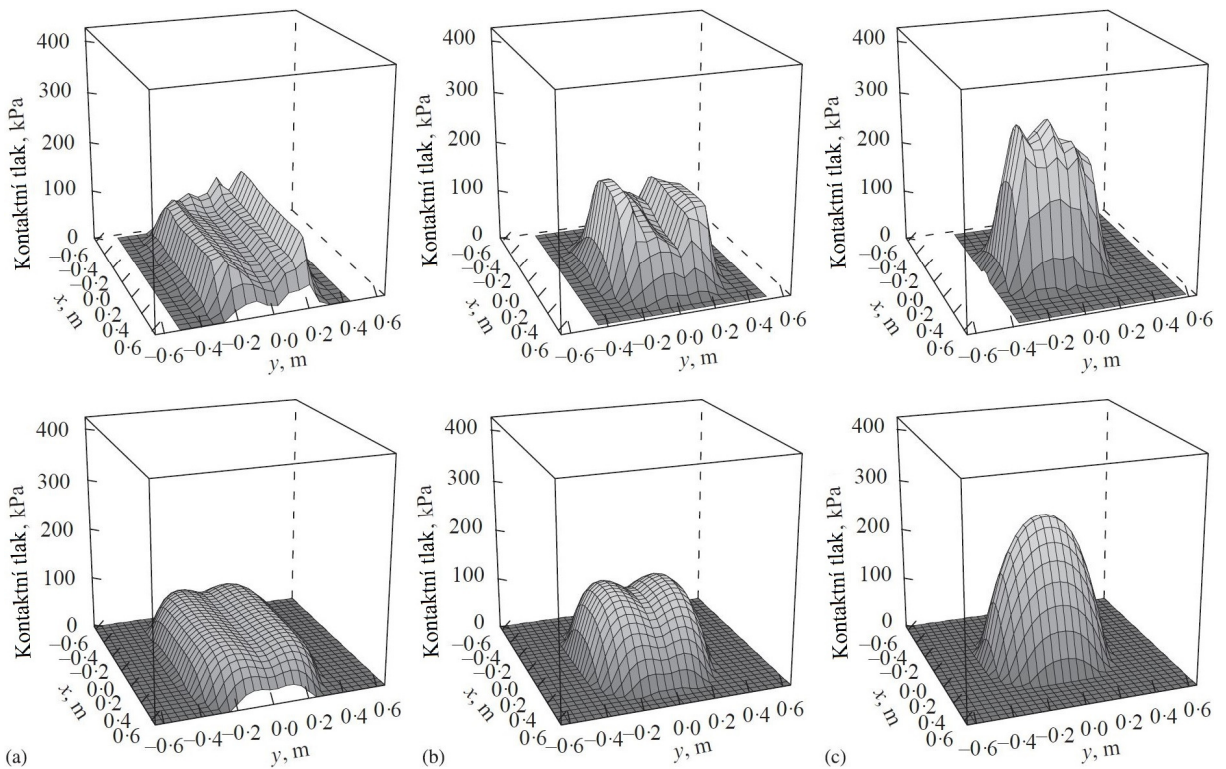


Obrázek 8 Průběh kontaktního tlaku mezi pneumatikou a tuhou podložkou

Zdroj: Grečenko (1994) (upraveno)

Stanovení průběhu kontaktního tlaku na měkké půdě je problematictější. Wong (2001) uvádí, že v případě přehuštění vytváří pneumatika na měkké podložce hlubší stopu a tím se zvyšuje její vnější valivý odpor. U podhuštění pak sice dochází k boření nižšímu, ale naopak díky zvýšené deformaci pneumatiky se zároveň zvyšuje její vnitřní valivý odpor. Z tohoto hlediska by bylo proto žádoucí najít jisté optimum hustícího tlaku. Při nesprávném tlaku huštění také dochází k nerovnoměrnému rozložení kontaktního tlaku stejně jako u tvrdé podložky, a tím i k zrychlenému opotřebení pneumatiky, přičemž v případě podhuštění může být nadměrná deformace i příčinou přehřívání, což snižuje také její životnost (Elwaleed et al., 2006; Serrano et al., 2009).

Opět, podobně jako u tvrdé podložky, se v případě podhušťování maximum kontaktního tlaku koncentruje na okrajích tvořené stopy (v případě přehuštění uprostřed) (Grečenko, 1994), a proto v těchto místech může docházet k vyššímu lokálnímu utužení půdy než pod zbytkem styčné plochy. Ovšem díky současnému značnému navýšení velikosti styčné plochy nabývá toto maximum při podhuštění znatelně nižších hodnot nežli maxima při vyšších tlacích huštění (viz obr. 9) a výsledkem je tedy i nižší utužení půdy (Gysi et al., 2001; Lamandé a Schjønnning, 2008; Schjønnning et al., 2008).

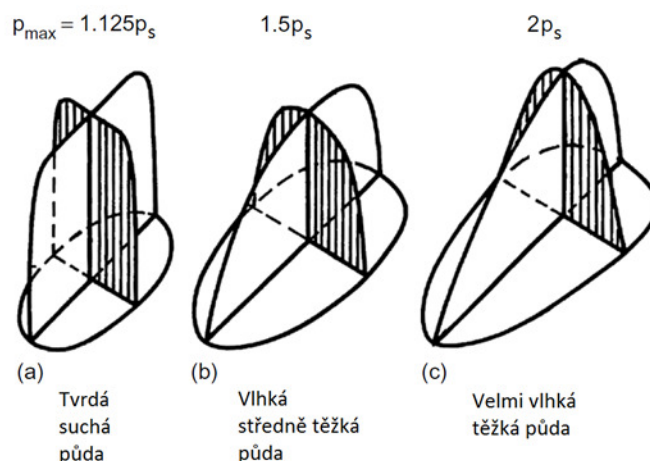


Obrázek 9 Příklad měřeného (nahore) a modelovaného (dole) rozložení kontaktního tlaku ve styčné ploše implement pneumatiky 650/65R30.5 na měkké půdě dle Schjønninga et al. (2008)

Pozn.: Směr jízdy je podél osy x . Tlaky huštění: a) 50 kPa, b) 100 kPa, c) 240 kPa.

Zdroj: Schjønning et al. (2008) (upraveno)

Jak bylo zmíněno, distribuce kontaktního tlaku nezávisí jen na parametrech provozované pneumatiky (typ konstrukce, rozměry, tlak huštění a velikost zatížení), ale i na parametrech půdy. Jímí jsou zejména koheze a úhel vnitřního tření, jež závisí na druhu, složení a pórovitosti půdy, ale také především na její vlhkosti. Rozložení kontaktního tlaku se pak odvíjí víceméně od hloubky tvořené stopy, tedy čím měkčí půda, tím hlubší stopa, přičemž se maximum kontaktního tlaku více koncentruje pod osou kola (viz obr. 10). Proto zde stoupá i požadavek na snížení tlaku huštění (Wong, 2010).



Obrázek 10 Distribuce kontaktního tlaku ve styčné ploše pneumatiky při různých vlhkostních podmínkách půdy

Legenda: p_s – střední kontaktní tlak, p_{max} – maximum kontaktního tlaku.

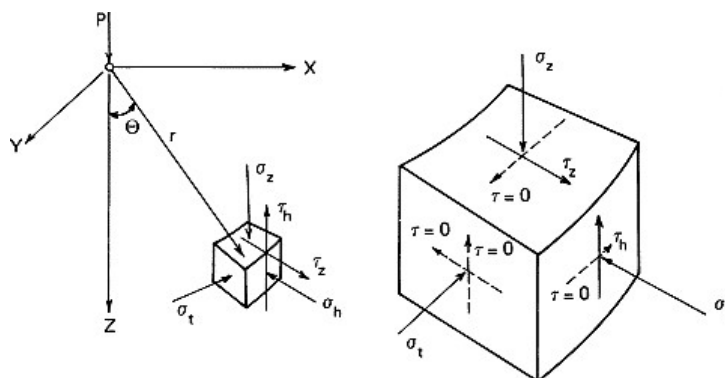
Zdroj: Wong (2010) (upraveno)

2.2.3 Průběh napětí v půdě pod styčnou plochou zatížené pneumatiky

Kontaktní tlak ve styčné ploše zatížené pneumatiky se zákonitě přenáší i do půdy. Pro popis tohoto průběhu se nejčastěji užívá matematického modelu, který stanovil již Boussinesq roku 1885 pro homogenní a plně elastický materiál s bodovým zatížením P (viz obr. 11). Literatura se často zaměřuje jen na hlavní vertikální složku σ_z (kPa) vzniklého napětí v půdním profilu, jelikož má na zhutnění půdy hlavní vliv. Rovnice, jež stanovil Boussinesq (1885) pro výpočet této hlavní složky σ_z , má tvar:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi r^2} \cdot \cos^3 \theta \quad (23)$$

, kde r (m) je vzdálenost bodu zjišťovaného napětí σ_z od bodového zatížení P (kN) a θ ($^\circ$) je úhel mezi r a osou z (viz obr. 11). Úhel θ a vzdálenost r jsou zde polárními souřadnicemi.



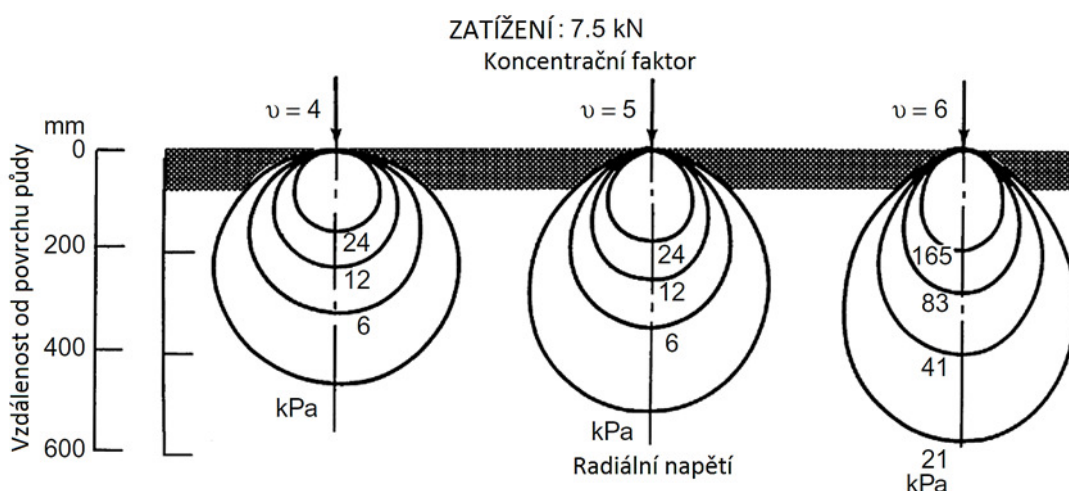
Obrázek 11 Model pro zjištění průběhu napětí v půdě pod bodovým zatížením pomocí polárního souřadného systému

Zdroj: van den Akker (2004) (upraveno)

Jak však ukázala pozdější terénní měření, tento popis není pro skutečné půdní podmínky příliš reprezentativní. Půda vykazuje plastické chování a průběh napětí má tendenci koncentrace v ose zatížení. Proto Fröhlich (1934) úpravou Boussinesq (1885) rovnic stanovil koncentrační faktor ν (-), který tyto plastické vlastnosti půdy zohledňuje. Jím upravená rovnice pro výpočet hlavního napětí σ_z (kPa) má pak tvar:

$$\sigma_z = \frac{\nu P}{2\pi r^2} \cdot \cos^{\nu} \theta . \quad (24)$$

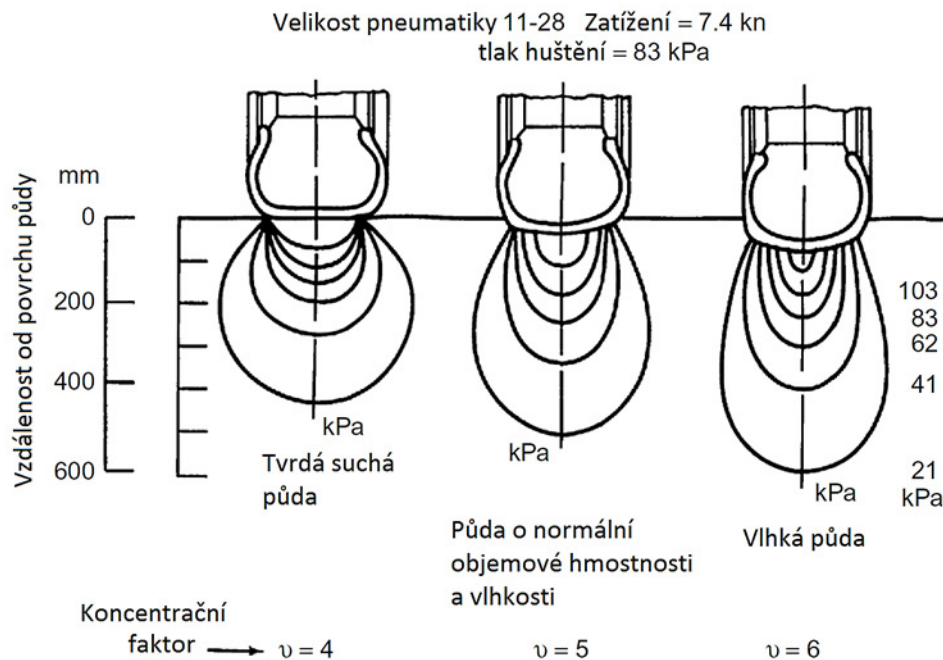
Fröhlich (1934) stanovil hodnotu koncentračního faktoru na $\nu = 3$, jež určuje distribuci napětí v plně elastickém materiálu (extrémně tuhá suchá půda). Söhne (1953) poté stanovil další hodnoty koncentračního faktoru, a to $\nu = 4$ pro tuhou suchou půdu, $\nu = 5$ pro kultivovanou půdu normální objemové hmotnosti a vlhkosti a $\nu = 6$ pro kultivovanou velmi vlhkou půdu. Tedy čím vyšší hodnota, tím měkčí půda. Průběh napětí v půdě pod bodovým zatížením v závislosti na změně koncentračního faktoru znázorňuje obrázek 12.



Obrázek 12 Izobary znázorňující průběh napětí v půdě pod bodovým zatížením v závislosti na koncentračním faktoru ν

Zdroj: Wong (2010) (upraveno)

V praxi ovšem není bodové zatížení příliš reprezentativní, jelikož zatížení je přenášeno skrze celou styčnou plochu pneumatiky. Skutečný průběh napětí v půdě dle modelu Söhne (1953) v závislosti na koncentračním faktoru ν pod reálnou zatíženou pneumatikou je znázorněno na obrázku 13 (Wong, 2010).



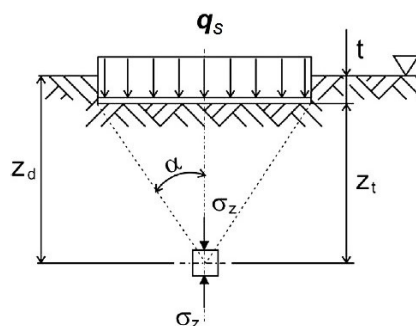
Obrázek 13 Průběh napětí v půdě pod zatíženou pneumatikou v závislosti na koncentračním faktoru v

Zdroj: Wong (2010) (upraveno)

Jelikož pneumatika vykazuje při optimálním tlaku huštění (dle doporučení výrobce) na pevné půdě poměrně vyrovnané rozložení kontaktního tlaku ve styčné ploše (Grečenko, 2003), a pokud je půdní vlhkost pod mezí plasticity, lze v následující úvaze pracovat pouze s hodnotou středního kontaktního tlaku q_s , viz vzorec (22). Protože se hlavní napětí σ_z významně neliší při změně tvaru styčné plochy (kruh, ovál, obdélník) (Grečenko, 1992), a má zmíněnou tendenci koncentrace v ose zatížení (viz obr. 13) (Fröhlich, 1934), lze vztah (24) modifikovat pro rovnoměrně zatíženou plochu takto (Grečenko, 2003):

$$\sigma_z = q_s \cdot (1 - \cos^{\nu} \alpha) \tag{25}$$

, kde α ($^{\circ}$) je polovina vrcholu úhlu kužele dle obrázku 14. Tímto způsobem lze relativně jednoduše stanovit maximum hlavního napětí v dané hloubce pod zatíženým pojezdovým ústrojím a na základě převodních funkcí dále případně stanovit míru utužení půdy.



Obrázek 14 Model pro výpočet hlavního napětí v půdě pod rovnoměrně zatíženou kruhovou plochou

Zdroj: Grečenko (2003) (upraveno)

Ačkoli hodnoty koncentračního faktoru dle Söhne (1953) (viz obr. 12 a 13) užívá řada analytických modelů pro výpočet zhutňování zemědělské půdy vozidly (O'Sullivan et al., 1999; van den Akker, 2004; Keller et al., 2007), nejnovější výzkumy naznačují, že jeho skutečné hodnoty se mohou v polních podmínkách, oproti těmto všeobecně přijatým hodnotám, značně lišit (Keller a Lamandé, 2010; Keller et al., 2014, 2016). Stanovení koncentračního faktoru totiž velice závisí na přesnosti měření skutečného napětí v půdě, která u dřívějších studií nejsou dosud zcela známá (nepřesnost používaných senzorů při měření napětí v půdě) (Keller a Lamandé, 2010). Při jeho stanovení také hrají značnou roli okrajové podmínky, tedy rozložení kontaktního tlaku ve styčné ploše pneumatiky, lišící se mechanické vlastnosti jednotlivých půdních vrstev a jejich hodnoty předpětí (Keller a Lamandé, 2010). Na základě měření Kellera et al. (2014) (včetně ověření metodou konečných prvků) byla u pěti testovaných půd zjištěna průměrná hodnota koncentračního faktoru $\nu = 3,5$, jež by dle doporučení Söhne (1953) měla nabývat hodnoty $\nu = 6$. Některá měření Trautnera (2003) dokonce naznačila i opačnou závislost, tedy půda o vyšší pevnosti vykazovala vyšší hodnotu koncentračního faktoru než měkká půda. Dle Kellera et al. (2014, 2016) proto průběh napětí v půdě pod zatíženou pneumatikou může daleko lépe popisovat původní model Fröhliche (1934) s hodnotou koncentračního faktoru blízkou $\nu = 3$. V této oblasti je tedy zapotřebí ještě dalších výzkumů.

2.3 Modelování kompakčních účinků

Dle předchozích částí této práce je více než patrná složitost mechanismů probíhajících při půdní kompaksi důsledkem polních přejezdů. Pro praktické využití dosavadních poznatků proto vznikla a stále vzniká řada modelů od různých autorů, jejichž snahou je pokud možno co největší zjednodušení při výpočtu utužení a hodnocení jeho následků. Modely lze dle Defossez a Richard (2002) rozdělit do dvou hlavních typů. Jedná se jednak o modely analytické a jednak o numerické modely konečných prvků (FEM), ovšem každé mají zatím mnoho nedostatků pro rozsáhlejší využití. Analytické modely se zakládají na empirických vztazích a převážně na již zmíněných Boussinesq (1885), Fröhliche (1934) a Söhneho (1953) rovnicích pro výpočet distribuce napětí v půdě. FEM modely se pak zakládají převážně na mechanice kontinua.

Řadu modelů, zejména z hlediska jejich spolehlivosti, ve své práci porovnává Defossez a Richard (2002). Výhodou analytických modelů je potřeba relativně málo vstupních parametrů a také již prokázaly uspokojivé výsledky v polních podmínkách. Avšak zatím naráží na problémy zejména u heterogenních půd (hroudy, kameny, tuhé podloží atd.). FEM modely se pak zdají být vhodnější pro 3D modelování distribuce napětí v půdě a také jsou schopny

podávání přesnějších výsledků, nicméně vyžadují mnoho vstupních dat pro matematický popis vlastností dané půdy a okrajových podmínek, které bývají v praxi velmi obtížně zjistitelné (Defossez a Richard, 2002).

Mezi hlavní analytické metody lze zařadit například „Simplified model“ od O'Sullivan et al., 1999), dále model SOCOMO (van den Akker, 2004), SoilFlex (Keller et al., 2007) a FRIDA (Schjønning et al., 2015). O'Sullivanův model vychází z výzkumů Smith (1985) a Gill et al. (1967) a pracuje se střední hodnotou kontaktního tlaku, z které je následně odhadnuto rozložení objemové hmotnosti půdy pod středem empiricky stanovené kruhové styčné plochy. Model užívá dostupných katalogových údajů o pneumatikách a byl vyvinut zejména pro neodborné uživatele pro přiblížení kompakčních mechanismů a orientačně jako pomoc při výběru vhodných typů a rozměrů pneumatik. Nicméně se jedná jen o orientační a nepřliš přesnou metodu výpočtu utužení.

Soil Compaction Model, zkráceně SOCOMO (van den Akker, 2004), byl vyvinutý spíše pro odborné uživatele jako nástroj pro výpočet utužení zejména spodních vrstev půdního profilu. Model zahrnuje různé konfigurace jezdových ústrojí a je doplněn i laboratorními testy, přičemž jeho hlavní výhodou je minimum požadovaných vstupních dat. Sám autor ovšem poukazuje mimo jiné na fakt, že rozložení kontaktního tlaku ve styčné ploše pneumatiky bylo odvozeno spíše odhadem na základě praktických zkušeností, dále na nutnost odhadnutí hloubky vyjetých kolejí (nerovnoměrnost stopy díky tvaru dezénu) a nevhodnost modelu pro velmi suché a popraskané půdy.

SoilFlex (Keller et al., 2007) je založen na analytickém 2D modelu sloužící pro výpočet distribuce napětí v půdě a půdní kompakce. Velikost styčné plochy a rozložení kontaktního tlaku umožňuje stanovit z dostupných parametrů o pneumatice s možností simulace více přejezdů či použití dvojmontáží. Tvar a velikost styčné plochy stanovuje pomocí superelipsy (Hallonborg, 1996) vypočtené z rozměrů a zátěžových charakteristik pneumatik dle O'Sullivan et al. (1999) a Keller (2005), přičemž pro následný výpočet rozložení kontaktního tlaku zahrnuje i smyková napětí. Jsou však nutná data půdních mechanických vlastností, kterých je v modelu omezený počet a obtížně se získávají.

Model FRIDA (Keller, 2005; Schjønning et al., 2008; Schjønning et al., 2015) užívá k popisu styčné plochy též superelipsu (Hallonborg, 1996). Zaměřuje se zejména na distribuci napětí v půdě pod zatíženou pneumatikou, kterou popisuje pomocí dvou funkcí, a to zvláště pro příčný a podélný směr jízdy. Mimoto zahrnuje i změny rozložení kontaktního tlaku

ve styčné ploše pneumatiky v závislosti na zatížení a tlaku huštění vypočtené z dostupných katalogových údajů. Model byl však zatím ověřen jen pro písčité půdy vysoké vlhkosti a do budoucna také vyžaduje ověření pro více kombinací zatížení a tlaku huštění s více typy a rozměry pneumatik (zatím převážně implement pneumatiky).

Moderní výpočetní technika umožňuje využívat programy pro modelování kompakce půdy pomocí metody konečných prvků (FEM). Jak bylo řečeno, pro přesné výsledky je však zapotřebí mnoho vstupních dat. Důležitá je také správná formulace funkcí popisujících elastoplastické chování půdního profilu, případně i vlastností pneumatiky a jejich vzájemných interakcí. Zajímavé výsledky přináší například Cui et al. (2007), kde k 2D analýze deformace půdy a průběhu napětí využívají počítačový kód pojmenovaný PLAXIS (Brinkgreve a Vermeer, 1998) a simulují kompakční účinky zatížením půdy virtuální kruhovou plochou. Dále velmi zajímavé výsledky ukazují výzkumy Mohsenimanesh et al. (2009), Xia (2011), González Cueto et al. (2013) či González Cueto et al. (2016), kde pomocí 3D analýzy simulují interakce celého modelu pneumatiky s modelem reprezentující vlastnosti půdního profilu. Tato problematika je však stále ve velmi rané fázi svého vývoje a je zapotřebí ještě dalších výzkumů.

2.4 CC-rating

CC-rating (Grečenko, 2003, 2016; Grečenko a Prikner, 2009, 2014) byl vyvinut pro praktické využití v zemědělské praxi s cílem vyhodnotit kompakční potenciál pneumatik, který je založen na laboratorních měřeních kompakčních charakteristik standardizované jílovito-hlinité půdy a charakteristické deformace pneumatik v závislosti na jejich kombinaci nominálního zatížení a tlaku huštění. Bezrozměrný index CC (-) přímo stanovuje kompakční potenciál dané pneumatiky na základě dostupných katalogových nominálních parametrů. Je-li index $CC = 100$ (dále CC 100), způsobená půdní kompakce je 10 % nad limitní hodnotou suché objemové dané půdy, a pokud $CC = 0$, limitní hodnota suché objemové hmotnosti nebyla překročena a pneumatika je hodnocena jako šetrná k půdnímu profilu.

Pro měření kompakčních charakteristik byla vybrána standardizovaná jílovito-hlinitá půda dle klasifikačního systému USDA (Clark, 1973) s vlhkostí $w = 19,7 \%$, mezi plasticity $w_p = 23 \%$ a kritickou suchou objemovou hmotností $\rho_{dl} = (1420 \pm 10) \text{ kg/m}^3$. Vzorky byly získávány stlačováním půdního profilu na laboratorním kompaktoru pomocí kruhových desek různých velikostí, které reprezentovaly zatíženou styčnou plochu pneumatiky. Vzorky takto zhutnělé půdy byly odebírány v ose této virtuální styčné plochy, jelikož v těchto místech je

koncentrace hlavního většího napětí v půdě (viz kap. 2.2.3 *Průběh napětí v půdě pod styčnou plochou zatížené pneumatiky*).

Hodnota indexu CC je dána rovnicí:

$$CC = 1000 \cdot \left(\frac{\rho_{ds}}{\rho_{dl}} - 1 \right) \quad (26)$$

, kde ρ_{ds} (kg/m^3) je střední hodnota suché objemové hmotnosti půdy dle vzorce:

$$\rho_{ds} = 0,25 \cdot (\rho_{d20} + \rho_{d30} + \rho_{d40} + \rho_{d50}) \quad (27)$$

, kde ρ s indexy $d20$ – $d50$ značí suché objemové hmotnosti zhutnělé půdy získané na základě zmíněných kompakčních charakteristik v dané hloubce z_d půdního profilu, tedy 20–50 cm od povrchu půdy.

Jelikož pneumatiky se středním kontaktním tlakem nižším než 70 kPa vykazují vždy $CC = 0$, byl pro jejich přesnější hodnocení stanoven index LCC (Low Compaction Capacity) se stejným rozsahem hodnot jako index CC. Ovšem jako limitní suchá objemová hmotnost standardizovaného jílovito-hlinitého typu půdy byla stanovena hodnota $\rho_{dL} = 1290 \text{ kg/m}^3$.

Originální verze CC-rating pneumatiky (Grečenko a Prikner, 2014) také zahrnuje výpočet teoretické velikosti nominální styčné plochy pneumatiky S_{T0} (cm^2) na pevné podložce dle vzorce (17) a velikosti efektivního kontaktního tlaku q (kPa), který zohledňuje reálný tvar styčné plochy:

$$q = (1,06 - 0,06\lambda) \cdot q_s \quad (28)$$

, kde koeficient $\lambda = l/b$ ($l \geq b$) nebo $\lambda = b/l$ ($b \geq l$) (-) a q_s (kPa) je střední kontaktní tlak pneumatiky dle vzorce:

$$q_s = 98,1 \cdot \frac{W_N}{S_{T0}} \quad (29)$$

, kde W_N (kg) je katalogová hodnota nominálního zatížení při daném tlaku huštění. U výpočtu koeficientu λ značí l délku a b šířku (cm) styčné plochy pneumatiky na tvrdé podložce. Výpočet velikosti styčné plochy S_{T0} (cm^2) však platí pouze pro nominální katalogové hodnoty kombinace zatížení a tlaku huštění a rychlost 10 km/h.

Cílem tohoto modelu je především doplnění katalogových údajů kombinací zatížení a tlaku huštění o číslo, které by reprezentovalo šetrnost dané pneumatiky k danému půdnímu profilu. Pro budoucí praktické využití je CC-rating koncipován jako počítačový program, jenž by umožnil individuální hodnocení kompakčního potenciálu dané pneumatiky. Dle indexu CC pro standardizovaný typ půdy v mírném klimatickém pásu mohou být rizika jejího zhutnění

klasifikována takto (index CC/riziko): 0/žádné, pneumatika šetrná k půdnímu profilu; 50/malé; 100/větší; 150/velké; 200/velmi velké; nad 200/extrémní.

Pro stanovení kompakčního potenciálu pneumatiky na ostatních základních půdních typech bylo vytvořeno označení indexu eCC (equivalent Compaction Capacity) (Grečenko, 2016), který využívá přepočtové funkce mezi indexem CC a eCC použitím limitních objemových hmotností základních typů půd dle Lhotského (2000), viz tabulka 1. Díky tomu je umožněno hodnocení kompakčního potenciálu dané pneumatiky pro větší rozsah základních typů půd.

3 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem práce je zhodnotit základní parametry pro stanovení individuálního kompakčního potenciálu pneumatik s ohledem na kombinaci zatížení, tlaku huštění a změně velikosti styčné plochy.

Dílčím cílem je porovnat individuální kompakční potenciál pneumatiky (FCC-rating) s originálním kompakčním potenciálem (CC-rating), poskytující hodnocení kompakce půdy pomocí nominálních katalogových parametrů pneumatiky.

4 METODIKA A POSTUP MĚŘENÍ

Pro laboratorní činnost byla vybrána trakční zemědělská pneumatika značky Mitas o rozměru 650/65R38 (detailní informace viz tab. 4). Jedná se o rozměr určený pro kolové traktory střední výkonové třídy s výkony cca od 100 do 160 kW, přičemž díky své radiální konstrukci zajišťuje větší kontaktní plochu a tím i záběrové vlastnosti s nižším tlakem na půdu.

Tabulka 4 Detailní informace testované pneumatiky Mitas 650/65R38

Rozměr	Dezén	Index zátěže	Index rychlosti	Typ	Ráfek			
650/65R38	RD-03	157D (160 A8)	D (do 65 km/h)	TL (bezdušové provedení)	W 18 L			
Šířka (mm)	Vnější průměr (mm)	Statický poloměr (mm)	Účinný obvod (mm)	Index obvodové rychlosti	75 % vnitřního objemu (l)			
626	1 829	809	5 410	875	630			
Nosnost pneumatiky (kg) při tlaku (bar)								
0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0	Rychlost (km/h)
			3155	3450	3790	4125		65
		2985	3315	3625	3980	4330		50
	2740	3110	3455	3780	4150	4500		40
	2880	3270	3630	3970	4360	4745		30
3000	3505	3980	4420	4830	5310	5775	6775	10

Zdroj: Produktový katalog Mitas a.s. (Zemědělské pneumatiky, 2011) (upraveno)

Zatěžování vybrané pneumatiky bylo prováděno na laboratorním zařízení pro testování pneumatik s variabilní zátěží umístěného v laboratořích Katedry vozidel a pozemní dopravy Technické fakulty ČZU v Praze. Zařízení se skládá ze systému upínání kola a tenzometrické váhy s plochou 1,5 m² umožňující měření v rozsahu od 1100 do 6900 kg. Součástí je hydraulický okruh zahrnující zdroj tlakové hydraulické kapaliny, dva přímočaré hydromotory a obvod s elektronickou regulací zátěže.

Testování pneumatiky zahrnovalo stanovení charakteristické deformace pneumatiky, které vycházelo z měření velikosti styčné a stykové plochy na pevné podložce v závislosti na aktuální kombinaci zatížení a tlaku huštění. Pro jejich stanovení byla vybrána metoda jednoduchého a vícenásobného otisku (Grečenko et al. 1990). Spočívá v nanesení kontrastní barvy na stykovou plochu dezénu a následným zatížením pneumatiky vzniká na pevné podložce jednouchý otisk (styková plocha), nebo vícenásobný otisk (styčná plocha). Vzhledem k časové náročnosti experimentu bylo laboratorní zařízení vybaveno soupravou pro digitální záznam tvaru otisku a systémem pro přesnou regulaci tlaku huštění pneumatiky. Doplňkové vybavení zahrnovalo:

- PTG AIRBOOSTER (sada pro regulaci tlaku huštění pneumatik s rozsahem 0–400 kPa),
- pístový vzduchový kompresor,
- bílou dřevotřískovou desku s vrstvou melaminové pryskyřice o rozměru 19x1032x1325 mm se zakresleným měřítkem 10 a 50 cm,
- fixační rám s protiskluzovými rohožemi pro zajištění konstantní polohy při opakovaném fotografování otisků,
- polohovatelný kovový stativ výšky 3 m,
- inkoust tmavé barvy s molitanovým aplikačním válečkem,
- notebook ThinkPad Yoga s operačním systémem Windows 10 Pro,
- fotoaparát Canon PowerShot S5 IS s připojením přes rozhraní USB 2.0,
- alternativní firmware CHDK verze 101a_1.4.1 (Fandom, 2016) pro fotoaparát Canon PowerShot S5 IS,
- počítačový software Chdkptp verze 18 pro ovládání fotoaparátu přes rozhraní USB 2.0 (Assembla, 2015).

Celé měřicí pracoviště s laboratorním zařízením pro testování pneumatik a uvedeným doplňkovým vybavením je zobrazeno na obrázku 15.



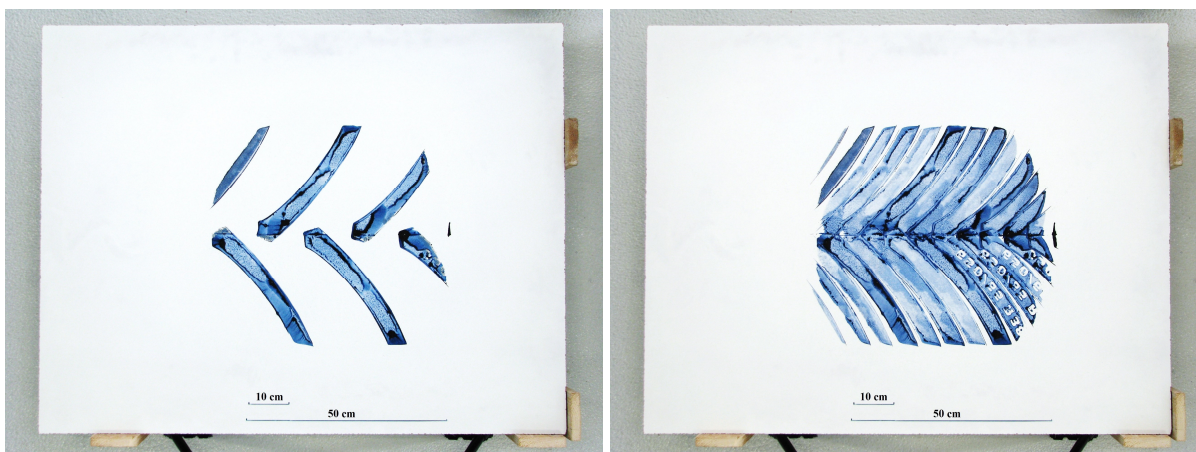
Obrázek 15 Laboratorní zařízení s testovanou pneumatikou Mitas 650/65R38 doplněné vybavením pro digitální záznam otisků a sadou pro regulaci tlaku huštění pneumatiky

4.1 Pracovní postup tvorby jednoduchého a vícenásobného otisku

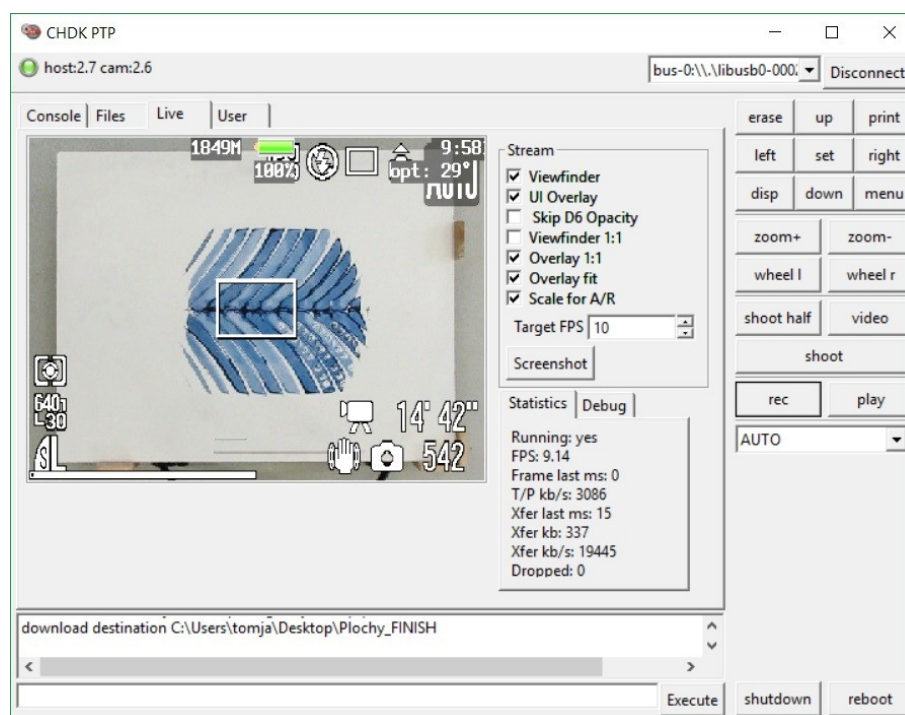
První část měření pneumatiky Mitas 650/65R38 spočívala v získání série otisků při katalogových kombinacích zatížení a tlaku huštění pro rychlosti 10 a 30 km/h. Z důvodu požadavku hodnocení kompakčního potenciálu pneumatiky i v provozních podmínkách a při skutečných zatíženích, byly pro další série měření přehodnoceny katalogové hodnoty, a to na 63 % katalogového zatížení pro rychlosti 10 km/h a 54 % pro rychlosti 30 km/h. Pro vyhodnocení závislosti velikosti styčné plochy na změně tlaku huštění při konstantním zatížení bylo testování dále doplněno o sérii měření při zatíženích 1100, 2000 a 3000 kg; pozn.: z technických důvodů hmotnosti testovaného kola a konstrukce laboratorního zařízení pro testování pneumatik nebylo možné provést testování při zatížení 1000 kg. Pracovní postup pořízení jednoduchého a vícenásobného otisku byl následující:

- přesné nastavení tlaku huštění pneumatiky,
- nastavení zatížení kola pomocí elektronické regulace,
- nanesení kontrastní barvy molitanovým aplikačním válečkem na dotykovou plochu šípů testované pneumatiky,
- umístění bílé melaminové dřevotřískové desky pod testovanou pneumatiku do vhodné polohy na váhu,
- zatížení pneumatiky a vytvoření jednoduchého otisku (viz obr. 16 vlevo),
- umístění bílé melaminové dřevotřískové desky s jednoduchým otiskem na fixační rám,
- vytvoření a automatické uložení fotografie jednoduchého otisku (viz obr. 16 vlevo) do předem stanovené složky v notebooku pomocí fotoaparátu připevněného ke stativu ve výšce 3 m a se spuštěným alternativním firmwarem CHDK ovládaného počítačovým programem Chdkptp (viz obr. 17) přes rozhraní USB 2.0,
- opětovné umístění bílé melaminové dřevotřískové desky pod testovanou pneumatiku do stejné polohy na váhu,
- pořízení vícenásobného otisku opakovaným zatížením (pootáčení kola podle šířky šípů) (viz obr. 16 vpravo),
- umístění bílé melaminové dřevotřískové desky s vícenásobným otiskem na fixační rám,
- vytvoření a automatické uložení fotografie vícenásobného otisku (viz obr. 16 vpravo) do předem stanovené složky v notebooku pomocí fotoaparátu připevněného na stativu ve výšce 3 m a se spuštěným alternativním firmwarem CHDK ovládaného počítačovým programem Chdkptp (viz obr. 17) přes rozhraní USB 2.0,

- očištění a příprava bílé melaminové dřevotřískové desky pro další otisk,
- opakování předchozích bodů pro další kombinaci zatížení a tlak huštění testované pneumatiky.



Obrázek 16 Příklad jednoduchého (vlevo) a vícenásobného (vpravo) otisku pneumatiky Mitas 650/65R38 při tlaku huštění 80 kPa a zatížení 3000 kg

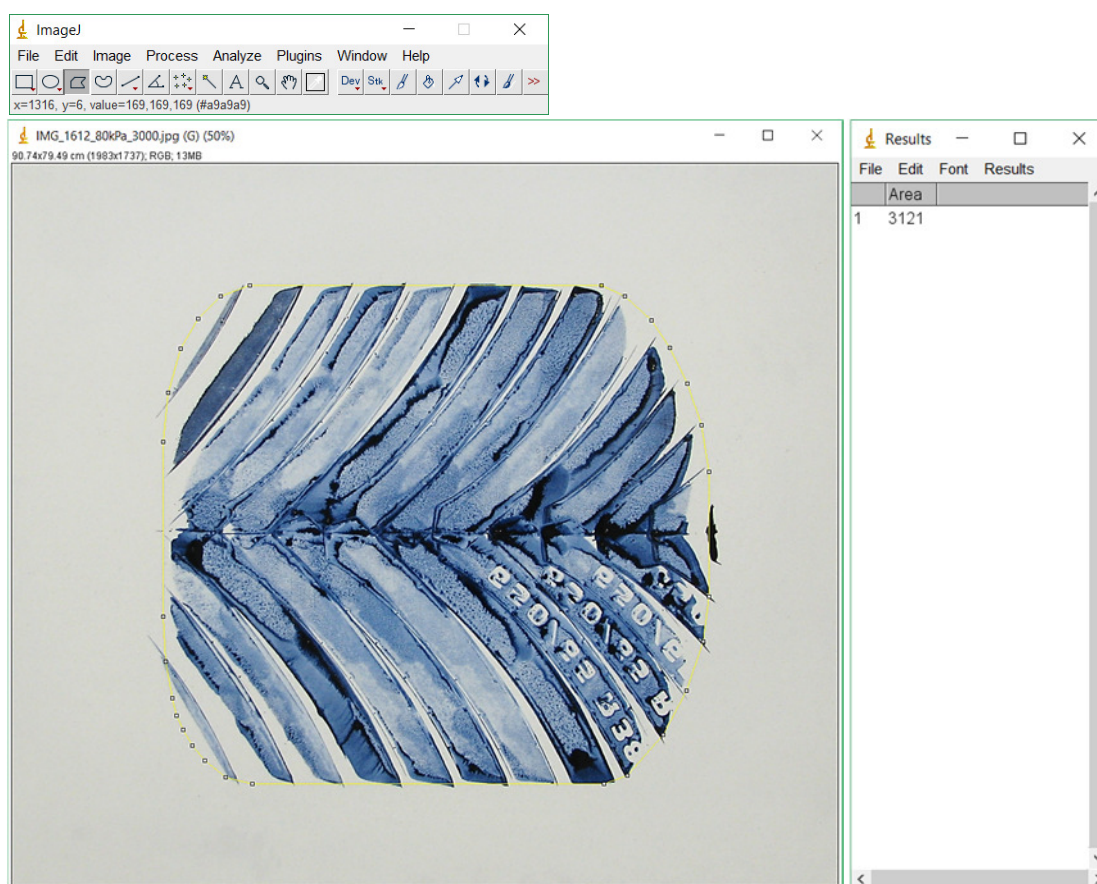


Obrázek 17 Snímek části obrazovky s programem Chdkptp při ovládní fotoaparátu přes rozhraní USB 2.0 během digitálního záznamu vícenásobného otisku pneumatiky Mitas 650/65R38 pro zatížení 3000 kg a tlak huštění 80 kPa

4.2 Pracovní postup měření velikosti styčné a stykové plochy

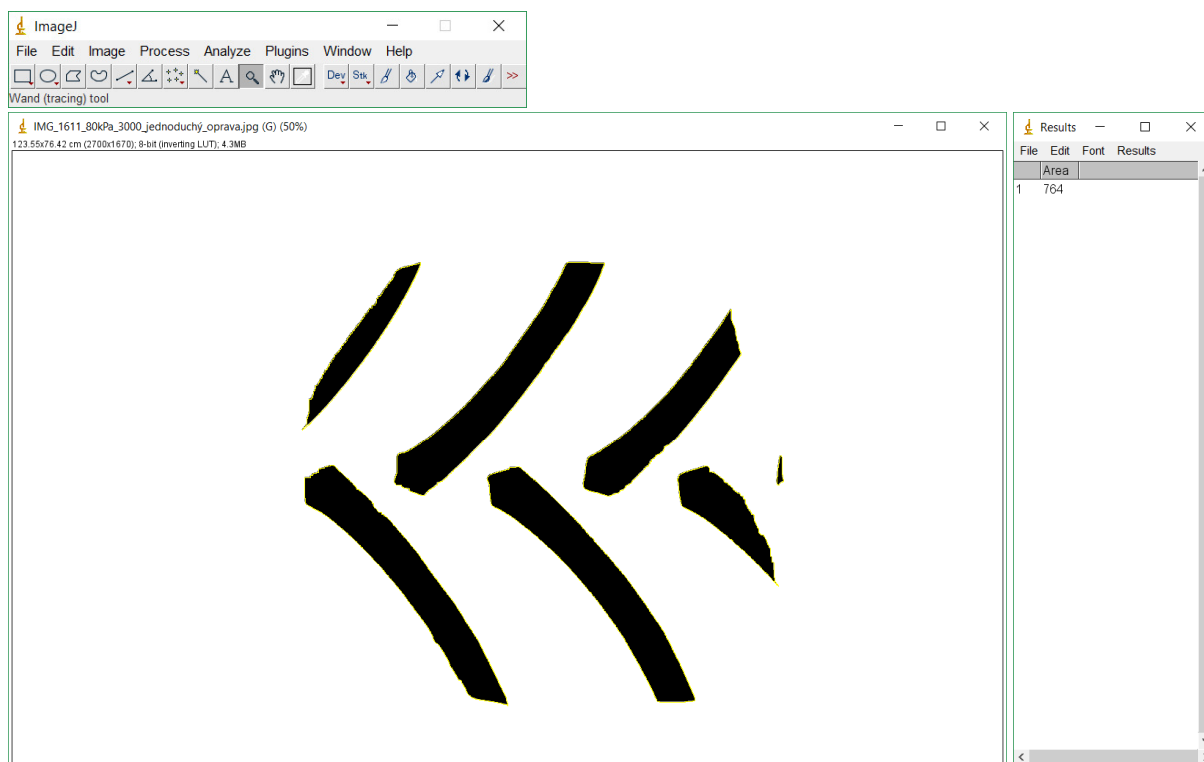
Po získání série jednoduchých a vícenásobných otisků následovalo zpracování digitálních záznamů pomocí počítačového softwaru ImageJ (Rasband, 2016) určeného pro vědeckou analýzu obrázků. Prvním krokem při měření velikosti styčné a stykové plochy v programu ImageJ bylo nastavení výchozího známého rozměru na fotografii, jímž bylo pro tento účel zakreslené měřítko 50 cm na povrchu bílé melaminové dřevotřískové desky. Díky použité fixační soupravě byla při fotografování všech otisků zachována vždy stejná poloha fotoaparátu vůči bílé melaminové dřevotřískové desce, proto zůstala velikost měřítka konstantní a opakování tohoto kroku pro další fotografie nebylo dále zapotřebí.

Pro měření velikosti styčné plochy byly využity fotografie s vícenásobnými otisky a pro měření stykové plochy naopak otisky jednoduché. V případě vícenásobného otisku bylo dalším krokem v programu ImageJ ruční vytvoření obrysu otisku, jak je patrné na obrázku 18. Pomocí zabudované funkce výpočtu velikosti plochy pod ručně zakresleným obrysem byla následně změřena velikost styčné plochy S_{Tm} (cm²) (viz obr. 18 pravá část).



Obrázek 18 Snímek části obrazovky s programem ImageJ při tvorbě obrysu vícenásobného otisku a měření velikosti styčné plochy pneumatiky Mitas 650/65R38 při zatížení 3000 kg a tlaku huštění 80 kPa

V případě měření velikosti stykové plochy S_{st} (cm²) byl použit odlišný postup. Pomocí zabudovaných funkcí programu ImageJ bylo vytvořeno nejprve makro (viz Příloha 1), které z fotografií jednoduchého otisku (viz obr. 16 vlevo) vytvoří černobílý obraz, poté vyhledá grafické nerovnosti otisku šípů, automaticky vytvoří výběr těchto ploch a provede měření jejich velikosti (viz obr. 19). Díky zabudované funkci dávkového zpracování dat v programu ImageJ bylo makro aplikováno na celou složku s fotografiemi jednoduchých otisků a měření stykových ploch tak dále proběhlo plně automaticky.



Obrázek 19 Snímek části obrazovky s programem ImageJ při měření velikosti stykové plochy pneumatiky Mitas 650/65R38 při zatížení 3000 kg a tlaku huštění 80 kPa po použití vytvořeného makra

Získaná data naměřených velikostí styčných a stykových ploch byla dále zpracována pomocí tabulkového procesoru Microsoft Excel 2016 a statistického softwaru StatSoft STATISTICA CZ 12.

4.3 Postup výpočtu kompakčního potenciálu

Výpočet originálního kompakčního potenciálu CC-rating (viz kap. 2.4 CC-rating) pneumatiky Mitas 650/65R38 zahrnuje nejprve teoretický výpočet velikosti nominální styčné plochy S_{T0} (cm²) dle vzorce (17) platného pro katalogové kombinace nominálního zatížení a tlaku huštění a pracovní rychlost 10 km/h. Samotné stanovení indexu $CC = f(p_i, W_N)$, kde p_i (kPa) je tlak huštění a W_N (kg) nominální zatížení pneumatiky, bylo provedeno pomocí demoverze programu *Tyre CC rating (Excel 2010)* (viz obr. 20) pro standardizovanou

jílovito-hlinitou půdu (USDA) (Clark, 1973). Dále byl proveden výpočet středního kontaktního tlaku q_s (kPa) dle vzorce (29) odpovídající danému zatížení a teoretické velikosti styčné plochy S_{T0} .

Další část této práce zahrnuje přehodnocení originálního CC-rating pneumatiky pro velikosti skutečných (námi změřených) styčných ploch S_{Tm} (cm²). Pomocí demoverze programu *Tyre CC rating (Excel 2010)* byl po aplikaci příslušných změřených styčných ploch stanoven očekávaný kompakční potenciál $CC'_m = f(p_i, W_N)$. Dále je zahrnut výpočet středního kontaktního tlaku q_{sm} (kPa) pro naměřené velikosti styčné plochy S_{Tm} při daném nominálním zatížení W_N :

$$q_{sm} = 98,1 \cdot \frac{W_N}{S_{Tm}}. \quad (30)$$

Originální CC-rating pneumatiky (Grečenko a Prikner, 2014) počítá s neměnnou velikostí nominální styčné plochy S_{T0} , která však ve skutečnosti striktně konstantní být nemusí. Proto byl do porovnání zahrnut kompakční potenciál s indexem $CC'_v = f(p_i, W_N)$, zahrnující novou metodu výpočtu teoretické velikosti styčné plochy S_{Tv} (cm²) dle dosud nepublikovaného vztahu (39) (viz kap. 4.3.1 *Provozní kompakční potenciál FCC-rating*). Pomocí vzorce:

$$q_{sv} = 98,1 \cdot \frac{W_N}{S_{Tv}} \quad (31)$$

byl dále vypočten střední kontaktní tlak q_{sv} (kPa) pro teoretickou styčnou plochou S_{Tv} při daném nominálním zatížení.

4.3.1 Provozní kompakční potenciál FCC-rating

Originální CC-rating (Grečenko a Prikner, 2014) umožňuje hodnocení kompakčního potenciálu pneumatiky pouze pro nominální katalogové kombinace zatížení a tlaku huštění určených pro jezdovou rychlost 10 km/h. Proto bylo vyvinuto hodnocení provozního (polního) kompakčního potenciálu FCC-rating (Field Compaction Capacity) s indexem $FCC = f(p_i, W)$, jehož autorem je vedoucí této diplomové práce (dosud nepublikováno).

V koncepci provozního kompakčního potenciálu FCC-rating je pomocí dostupných katalogových parametrů dopočítána velikost styčné plochy pneumatiky pro jakoukoli kombinaci zatížení W (kg) a tlaku huštění p_i . Katalogová data uvádí nominální hodnoty zatížení W_N (kg) při různých tlacích huštění p_i a specifických rychlostech kvůli dodržení přijatelné deformace pneumatiky. Velikost nominální styčné plochy, odpovídající jakékoli kombinaci W_N/p_i , bude označena S_{Tn} .

Základní výpočet aktuální velikosti styčné plochy S_{Tm} (cm²) pro jakoukoli kombinaci zatížení a tlaku huštění spočívá v porovnání tuhosti bočnic a korespondující deformace pneumatiky. Všichni výrobci pneumatik uvádějí hodnotu statického poloměru r_s (cm) pro kombinaci nominálního zatížení a tlaku huštění 160 kPa a rychlostní limit 30 km/h (ETRTO, 2008). Korespondující limit zatížení W_N pro daný rozsah tlaku huštění může být specifikován konstantní hodnotou statického poloměru r_s (rychlost 30 km/h); nicméně nominální deformace f_N zatížené pneumatiky je pak průměrnou hodnotou celého rozsahu katalogových hodnot tlaku huštění, jelikož statický poloměr r_s striktně konstantní být nemusí. Obecná tuhost bočnic pneumatiky pro požadovaný rychlostní limit 30 km/h bude:

$$c_{N(30)} = \frac{g \cdot W_{N(30)}}{f_{N(30)}} \quad (32)$$

, kde $c_{N(30)}$ je tuhost bočnic (kN/cm), g tíhové zrychlení (m/s²) a $f_{N(30)}$ nominální deformace bočnice (cm) dle vzorce:

$$f_{N(30)} = \frac{d}{2} - r_s \quad (33)$$

, kde d (cm) je vnější průměr pneumatiky získán na základě katalogových údajů platných pro rychlost 30 km/h. Toto koresponduje s hlavním předpokladem závislosti mezi deformací bočnic a tlakem huštění.

Z uvedeného vyplývá možnost porovnání nominální deformace $f_{N(30)}$ s maximální deformací $f_{N(10)}$ příslušící katalogovým parametrům pro rychlost 10 km/h:

$$f_{x(10)} = \frac{g \cdot (W_{N(10)} - W_{N(30)})}{c_{N(30)}} \quad (34)$$

, kde $W_{N(10)}$ a $W_{N(30)}$ jsou hodnoty nominálních zatížení (kg) při stejném tlaku huštění. Poté, pro maximální deformaci $f_{N(10)}$, vypadá úprava statického poloměru r_s takto:

$$r_{sx(10)} = r_s - f_{x(10)} \cdot \quad (35)$$

Poměr obou statických poloměrů, koeficient ε_d (-) jako parametr změny velikosti styčné plochy pneumatiky pro katalogovou kombinaci W_N/p_i , bude:

$$\varepsilon_d = 1 - \frac{r_{sx(10)}}{r_s} \quad (36)$$

Pomocí aritmetické posloupnosti lze číselně vyjádřit jednotné snižování velikosti styčné plochy a_{Tn} (-):

$$a_{Tn} = (n - 1) \cdot \varepsilon_d \quad (37)$$

, kde $n \geq 1$; $n \in N$. Nominální velikost styčné plochy S_{T0} dle vzorce (17), aplikovaná v originálním CC-rating (Grečenko a Prikner, 2014), je transformována do formy S_{Tn} :

$$S_{Tn} = (1 - a_{Tn}) \cdot 0,932 \cdot S_{T0} . \quad (38)$$

S_{Tn} (cm²) zde reprezentuje nominální hodnotu odpovídající velikosti styčné plochy v daném rozsahu tlaku huštění a korespondujícího zatížení pro rychlost 10 km/h. Číslo 0,932 je korekce velikosti styčné plochy na tvrdé podložce, kvůli průměrnému rozdílu mezi katalogovou hodnotou šířky pneumatiky a její skutečnou šířkou dezénu. Grečenko (1995) předpovídal velikost styčné plochy pomocí korekčního faktoru α_A pro vyjádření rozdílu mezi aktuální a nominální deformací pneumatiky (viz rovnice (11) a obr. 7). S jeho využitím je výsledná modifikace vztahu pro výpočet velikosti styčné plochy pneumatiky S_{Tv} (cm²) pro jakoukoli kombinaci zatížení a korespondující tlak huštění:

$$S_{Tv} = \left(\frac{W}{W_N} \right)^n S_{Tn} . \quad (39)$$

Grečenko (1995) doporučuje hodnotu exponentu $n = 2/3$. Výsledky testování v rámci této diplomové práce upřesňují tuto hodnotu, která se může pohybovat v rozsahu 0,6–0,78 v závislosti na rozměrech pneumatiky.

Stanovení indexu FCC bylo provedeno pomocí upravené demoverze programu *Tyre CC rating (Excel 2010)* (viz obr. 20) jako závislost na tlaku huštění při konstantním zatížení 1100, 2000 a 3000 kg. Aplikací vypočtené teoretické velikosti styčné plochy S_{Tv} dle vzorce (39) byl stanoven index FCC_v a následně vypočten teoretický střední kontaktní tlak q_{sv} dle vzorce (31) s dosazením individuálního zatížení W za nominální W_N . Pro srovnání teoretických hodnot byl pomocí stejného programu s aplikováním změřených skutečných velikostí styčných ploch S_{Tm} stanoven index FCC_m (-) a pomocí vzorce (30) vypočten skutečný střední kontaktní tlak q_{sm} s dosazením individuálního zatížení W za nominální W_N .



Obrázek 20 Příklad stanovení indexu FCC pneumatiky Mitas 650/65 R38 RD-03 pro standardizovanou jílovito-hlinitou půdu při provozním zatížení 2000 kg a tlaku huštění 100 kPa

Legenda: TYRE DESIGNATION – označení pneumatiky, TYRE SIZE – rozměr pneumatiky, rim – průměr ráfku (“), AR – poměr výšky ku šířce profilu pneumatiky, IP – tlak huštění (kPa), LC – zatížení (kg), FCC – index provozního kompakčního potenciálu (-), S_T – styčná plocha pneumatiky, q_s – střední kontaktní tlak, model – hodnoty pro pevnou podložku, terrain – hodnoty pro měkkou půdu, depth – hloubka od povrchu půdy, clay-loam – standardizovaný jílovito-hlinitý typ půdy.

Zdroj: ing. Patrik Prikner, Ph.D; demoverze počítačového programu Tyre CC rating (Excel 2010)

4.4 Výpočet plnosti otisku stykové plochy

Jako doplněk vyhodnocení naměřených dat byla vyhodnocena závislost plnosti otisku stykové plochy pneumatiky na velikosti styčné plochy. Výpočet plnosti otisku stykové plochy byl proveden pomocí vzorce:

$$\varepsilon = \frac{S_{st}}{S_{Tm}} \cdot 100 (\%) \quad (40)$$

, kde S_{st} (cm²) je velikost naměřené stykové plochy a S_{Tm} (cm²) velikost naměřené styčné plochy testované pneumatiky Mitas 650/65R38.

5 VYHODNOCENÍ A DISKUZE

5.1 Vyhodnocení měření styčných a stykových ploch

Tabulka 5 obsahuje první část naměřených dat velikostí styčných (S_{Tm}) a stykových (S_{st}) ploch testované pneumatiky Mitas 650/65R38 v závislosti na kombinaci zatížení a tlaku huštění. Výsledky jsou rozděleny dle provozní rychlosti 10 a 30 km/h, dále na nominální hodnoty zatížení (W_N) a redukované zatížení (W) odpovídající 63 (pro 10 km/h) a 54 % (pro 30 km/h) nominálních hodnot zatížení. Důvodem doplnění o redukované hodnoty nominálních zatížení bylo jejich přiblížení k reálným provozním podmínkám, jelikož originální katalogové údaje zahrnují pouze maximální přípustné hodnoty zatížení při daném tlaku huštění a provozní rychlosti. Dlouhodobý provoz pneumatiky při tlaku huštění 40 a 200 kPa není výrobcem pneumatik doporučen, proto velikosti styčných ploch 4219 cm² ($W_N = 3000$ kg, $p_i = 40$ kPa) a 3480 cm² ($W_N = 6775$ kg, $p_i = 200$ kPa) nejsou do následujícího porovnání zahrnuty.

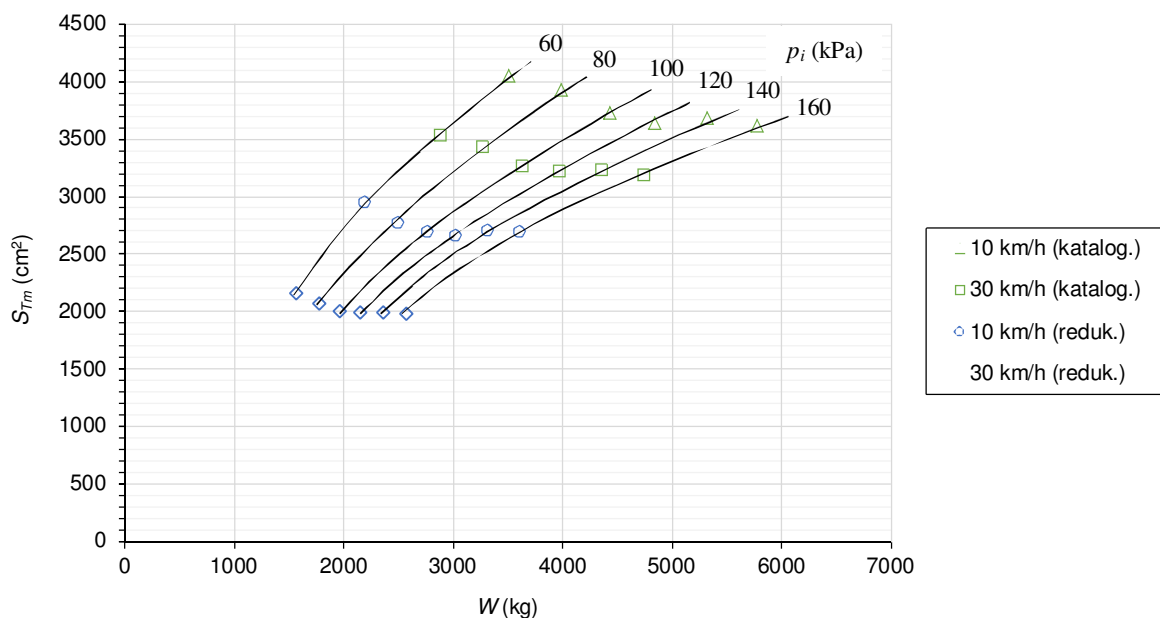
Katalogové hodnoty tlaků huštění uvedené v prvním sloupci tabulky 5 se řídí aritmetickou posloupností a vykazují jednotné zvyšování vždy o 20 kPa. Avšak katalogové nominální hodnoty zatížení se aritmetickou posloupností neřídí a jednotlivé diference sousedních hodnot jsou spíše náhodné, viz rozdíly zatížení ΔW . Z uvedeného je zřejmé, že pro katalogové kombinace nominálních kombinací zatížení a tlaků huštění nelze usuzovat žádnou závislost velikosti styčné či stykové plochy na tlaku huštění, jak dokazuje i kolísání bodů v grafu na obrázku 21. Jelikož hodnoty redukovaných zatížení jsou odvozeny od nominálních, vykazují obdobné kolísání diferencí ΔW , viz tabulka 5 (obr. 21).

Tabulka 5 Naměřené hodnoty styčných a stykových ploch pneumatiky Mitas 650/65R38 pro katalogové a redukované kombinace zatížení a tlaku huštění

p_i (kPa)	Rychlost 10 km/h (katalogové zatížení)				Rychlost 30 km/h (katalogové zatížení)				Rychlost 10 km/h (63 % katalogového zatížení)				Rychlost 30 km/h (54 % katalogového zatížení)			
	W_N (kg)	ΔW (kg)	S_{Tm} (cm ²)	S_{st} (cm ²)	W_N (kg)	ΔW (kg)	S_{Tm} (cm ²)	S_{st} (cm ²)	W (kg)	ΔW (kg)	S_{Tm} (cm ²)	S_{st} (cm ²)	W (kg)	ΔW (kg)	S_{Tm} (cm ²)	S_{st} (cm ²)
60	3 505	-	4 044	1 014	2 880	-	3 526	889	2 190	-	2 941	744	1 560	-	2 155	528
80	3 980	475	3 928	992	3 270	390	3 422	865	2 490	300	2 770	693	1 770	210	2 068	515
100	4 420	440	3 726	956	3 630	360	3 260	836	2 760	270	2 690	684	1 960	190	1 997	503
120	4 830	410	3 639	929	3 970	340	3 208	824	3 020	260	2 653	694	2 150	190	1 990	515
140	5 310	480	3 678	942	4 360	390	3 219	824	3 320	300	2 697	668	2 360	210	1 988	512
160	5 775	465	3 609	923	4 745	385	3 181	818	3 610	290	2 690	667	2 570	210	1 979	505

Legenda: p_i – tlak huštění, W_N – nominální zatížení, W – redukované nominální zatížení, $\Delta W = W_{(i)} - W_{(i-1)}$, S_{Tm} – styčná plocha (naměřená), S_{st} – styková plocha (naměřená).

Ačkoli katalogová data uvádí nominální hodnoty zatížení při různých tlacích huštění a specifických rychlostech kvůli dodržení přijatelné deformace pneumatiky, z naměřených dat uvedených v tabulce 5 vyplývá, že velikosti styčných, případně stykových ploch se mohou při statickém zatížení značně lišit. Z bodů vyobrazených v grafu na obrázku 21 je patrný klesající trend velikosti styčné plochy při rostoucím tlaku huštění.



Obrázek 21 Graf závislosti velikosti styčné plochy pneumatiky Mitas 650/65R38 na nominální a redukované nominální kombinaci zatížení a tlaku huštění

Legenda: W – zatížení, S_{Tm} – styčná plocha (naměřená), p_i – tlak huštění.

Pro provozní rychlost 10 km/h a nominální zatížení byl oproti nejmenší velikosti styčné plochy zjištěn nárůst až cca o 12 % (rozdíl 435 cm²) a pro provozní rychlost 30 km/h a nominálního zatížení byl nárůst přibližně o 11 % (rozdíl 345 cm²). V případě provozní rychlosti 10 km/h a redukovaného zatížení bylo zaznamenáno zvětšení velikosti styčné plochy až o cca 11 % (rozdíl 288 cm²) a v případě provozní rychlosti 30 km/h a redukovaného zatížení přibližně 9 % (rozdíl 176 cm²). Ačkoli v případě hodnot pro provozní rychlost 10 km/h a redukované zatížení nebyla naměřena nejmenší velikost styčné plochy při tlaku huštění 160 kPa, jako je tomu v ostatních případech, ale při tlaku huštění 120 kPa, ve srovnání s vyššími tlaky huštění se rozdíly pohybují v řádu jednotek cm² a vzhledem k zaokrouhlování při redukci zatížení a možné subjektivní chybě při tvorbě obrysů vícenásobných otisků, nemusí být tento rozdíl považován za významný.

Výrobci zemědělských pneumatik mezi technickými katalogovými údaji někdy uvádějí i velikost styčné plochy. Jak naznačují výsledky měření uvedené v tabulce 5 (obr. 21), je nutno

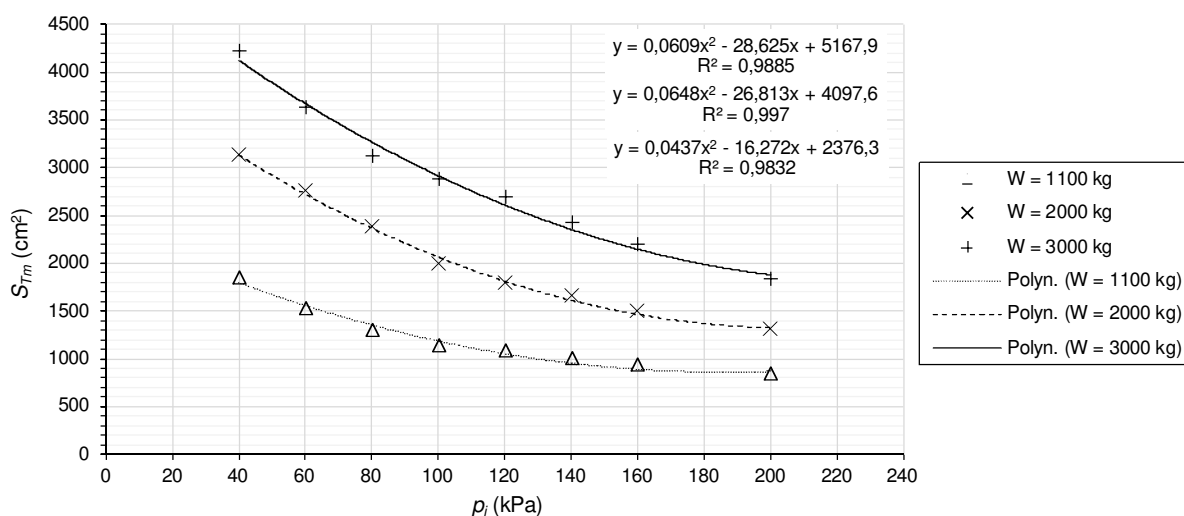
tuto hodnotu brát jen jako orientační údaj, který nemusí být platný při jakýchkoli katalogových kombinacích zatížení a tlaku huštění při dané provozní rychlosti.

Tabulka 6 obsahuje druhou část naměřených dat velikostí styčných a stykových ploch testované pneumatiky Mitas 650/65R38, avšak v závislosti na tlaku huštění při konstantním zatížení 1100, 2000 a 3000 kg. Z tabulky 6 (příp. obr. 22) lze pozorovat klesající trend velikosti styčné a stykové plochy při stoupajícím tlaku huštění. Při zatížení 1100 kg byl zaznamenán nárůst velikosti styčné plochy pneumatiky až přibližně o 122 %, při zatížení 2000 kg až o 140 % a při zatížení 3000 kg až o 131 % (viz tab. 6, obr. 22). Zmíněná navýšení styčných ploch se týkají porovnání hodnot mezi tlaky huštění 40 a 200 kPa. Dlouhodobé užití těchto tlaků huštění v provozních podmínkách není výrobcem pneumatik doporučeno, proto je vhodnější porovnání hodnot mezi tlaky huštění 60 a 160 kPa. V tomto případě byl pro zatížení 1100 kg zaznamenán nárůst velikosti styčné plochy pneumatiky až cca o 65 %, při zatížení 2000 kg až o 84 % a při zatížení 3000 kg až o 66 % (viz tab. 6, obr. 22).

Tabulka 6 Naměřené velikosti styčných a stykových ploch testované pneumatiky Mitas 650/65R38 v závislosti na tlaku huštění při konstantním zatížení 1100, 2000 a 3000 kg

W (kg)	p_i (kPa)															
	40		60		80		100		120		140		160		200	
	S_{Tm} (cm ²)	S_{St} (cm ²)	S_{Tm} (cm ²)	S_{St} (cm ²)	S_{Tm} (cm ²)	S_{St} (cm ²)	S_{Tm} (cm ²)	S_{St} (cm ²)	S_{Tm} (cm ²)	S_{St} (cm ²)	S_{Tm} (cm ²)	S_{St} (cm ²)	S_{Tm} (cm ²)	S_{St} (cm ²)	S_{Tm} (cm ²)	S_{St} (cm ²)
1 100	1 849	457	1 529	382	1 302	320	1 140	287	1 079	271	995	255	929	231	834	220
2 000	3 126	771	2 749	659	2 375	569	1 998	483	1 795	443	1 654	401	1 497	367	1 305	335
3 000	4 219	1 051	3 630	871	3 121	764	2 872	706	2 688	645	2 414	578	2 190	550	1 827	889

Legenda: p_i – tlak huštění, W – zatížení, S_{Tm} – styčná plocha (naměřená), S_{St} – styková plocha (naměřená).



Obrázek 22 Graf naměřených velikostí styčných ploch pneumatiky Mitas 650/65R38 v závislosti na tlaku huštění při konstantním zatížení 1100, 2000 a 3000 kg

Legenda: S_{Tm} – styčná plocha (měřená), p_i – tlak huštění, W – zatížení pneumatiky.

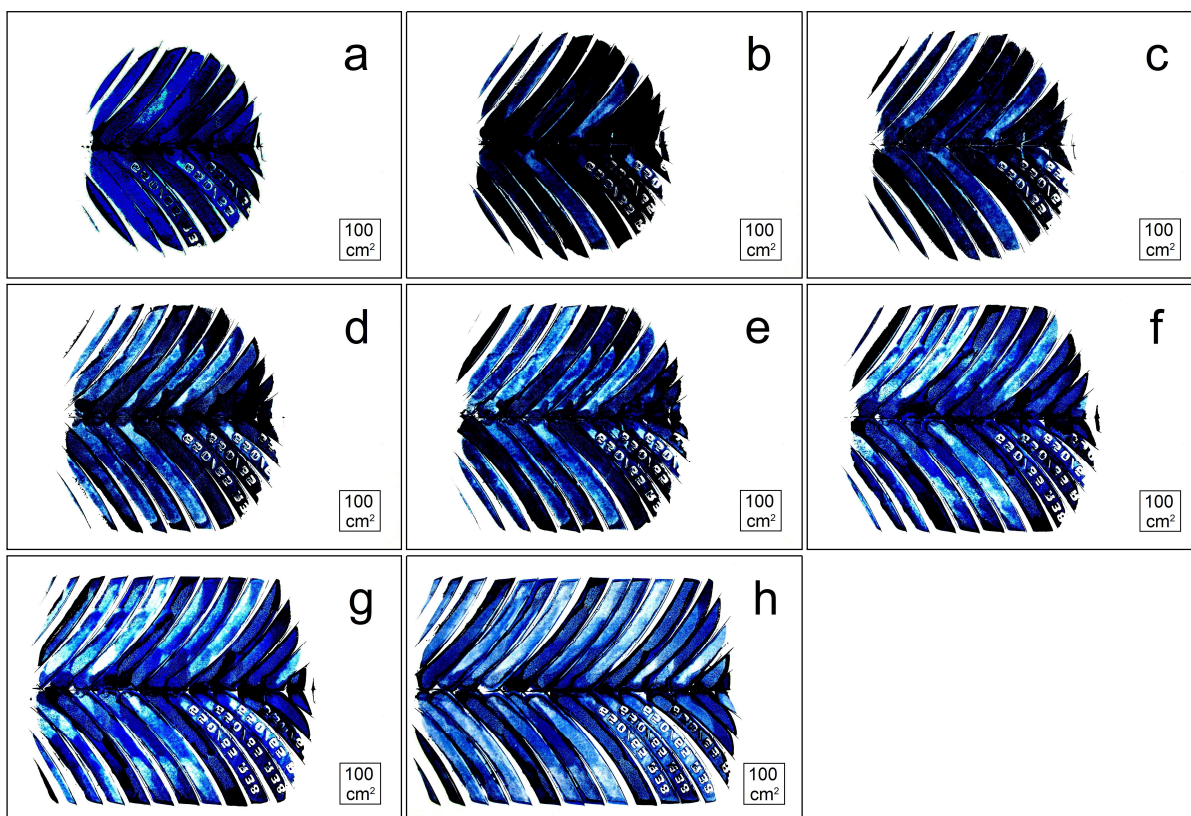
Do závislosti velikosti styčné plochy při konstantním zatížení se může promítnout i vliv konstrukce, rozměrů a pružnosti samotného pláště pneumatiky a nemusí tak být závislá jen na tlaku huštění. Z důvodu neznalosti těchto parametrů nelze vyslovit teoretický předpoklad pro použití určitého typu regrese, proto jsou pro názornost závislosti dat na obrázku 22 hodnoty proloženy pouze polynomem druhého stupně.

Zvyšováním zatížení z hodnoty 1100 kg na 3000 kg byl zjištěn nárůst velikosti styčné plochy průměrně o 138 %. Při konstantním tlaku huštění má tedy hodnota zatížení významný vliv na velikost styčné plochy. V tomto případě však dochází i k nárůstu středního kontaktního tlaku, což může mít vliv i na možné utužení půdy (viz kap. 5.3 *Vyhodnocení kompakčního potenciálu*).

Výsledky této práce dokazují významnou souvislost mezi velikostí styčné a stykové plochy (viz kap. 5.2 *Vyhodnocení plnosti otisku stykové plochy*), proto lze obdobné průběhy vyobrazené v grafech na obrázcích 21 a 22 sledovat i v případě velikostí stykových ploch.

U všech individuálních kombinací zatížení a tlaku huštění uvedených v tabulce 6 nebyly překročeny dovolené katalogové hodnoty testované pneumatiky připadající provozní rychlosti 10 km/h. Jelikož v zemědělské praxi bývá často nastaven jeden provozní tlak huštění (v tomto případě nejčastěji 160 kPa) bez ohledu na skutečné zatížení, nemusí být proto využit veškerý potenciál pneumatiky na zvýšení velikosti styčné plochy (viz tab. 6 a obr. 22) a snížení tak rizika škodlivého zhutnění půdního profilu.

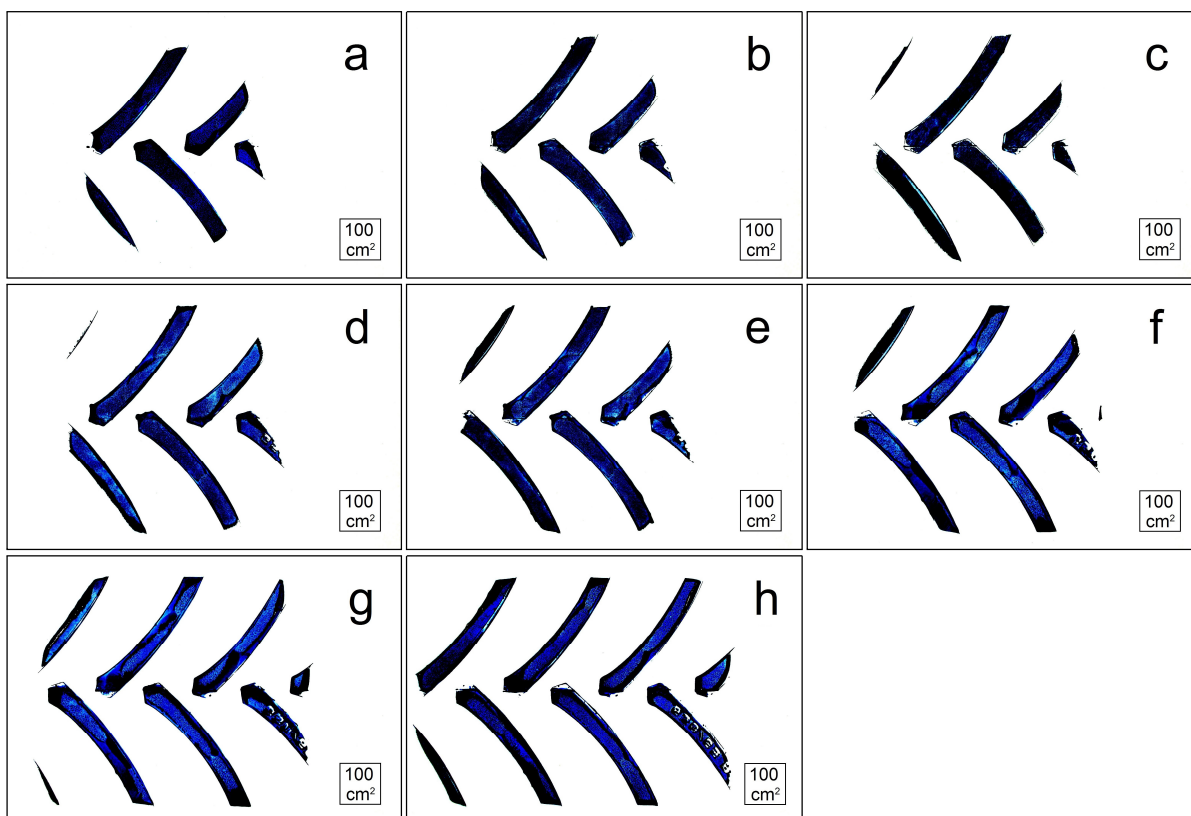
Pro praktické znázornění vlivu tlaku huštění na změně velikosti a tvaru styčné plochy byla na obrázku 23 vybrána série digitálních záznamů vícenásobných otisků při zatížení 3000 kg, která u tohoto typu a rozměrů pneumatik může být příkladem stavu zatížení běžně se vyskytujícího v praxi. Za účelem lepší představy je u každého otisku vynesena čtverec představující měřítko o velikosti 100 cm². Tvar styčné plochy u vyšších tlaků huštění je přibližně kruhový až oválný, a naopak při postupném snižování tlaku huštění se tvar přibližuje spíše obdélníku, což potvrzuje tvrzení ostatních autorů uvedené v kap. 2.2.1 *Rozložení styčné plochy pneumatiky*. Obdobné chování bylo také sledováno při zatížení 2000 kg. Naopak při nejnižším zatížení 1100 kg zůstal tvar styčné plochy přibližně kruhový.



Obrázek 23 Série digitálních záznamů vícenásobných otisků pneumatiky Mitas 650/65R38 na tvrdé podložce při snižování tlaku huštění a konstantním zatížení 3000 kg

Legenda: Tlak huštění: a) 200 kPa, b) 160 kPa, c) 140 kPa, d) 120 kPa, e) 100 kPa, f) 80 kPa, g) 60 kPa, h) 40 kPa.

Na obrázku 24 je dále uvedena série digitálních záznamů jednoduchých otisků odpovídající stejným kombinacím zatížení a tlaku huštění jako v případě vícenásobných otisků na obrázku 23. Dotyková plocha šípů, obdobně jako velikost styčné plochy na obrázku 23, významně roste se snižujícím se tlakem huštění.



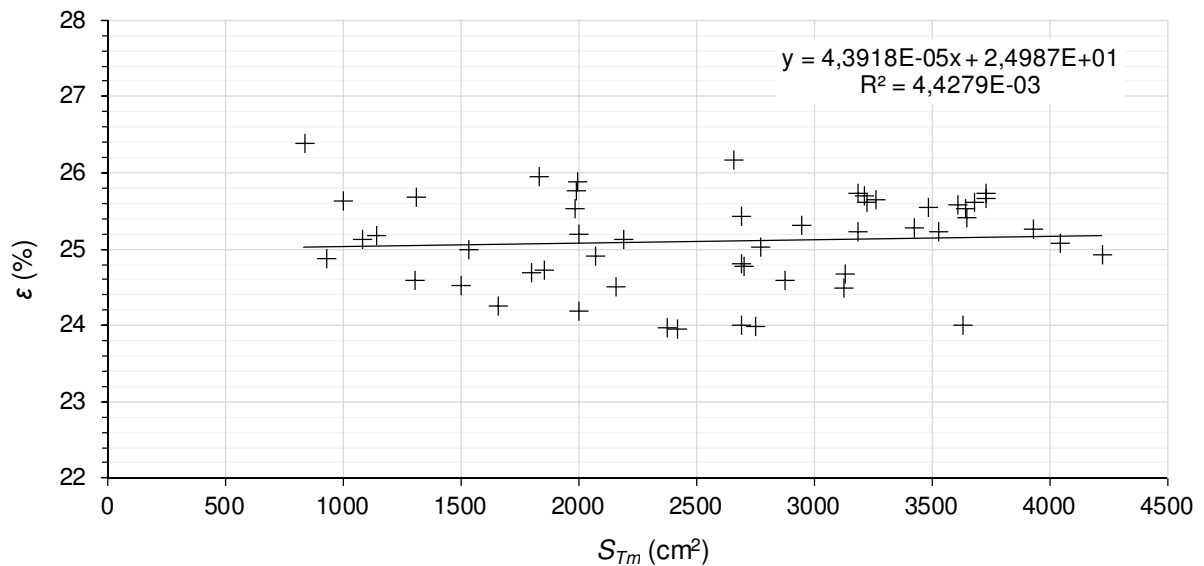
Obrázek 24 Série digitálních záznamů jednoduchých otisků pneumatiky Mitas 650/65R38 na tvrdé podložce při snižování tlaku huštění a konstantním zatížení 3000 kg

Legenda: Tlak huštění: a) 200 kPa, b) 160 kPa, c) 140 kPa, d) 120 kPa, e) 100 kPa, f) 80 kPa, g) 60 kPa, h) 40 kPa.

V příloze 2 jsou do grafu vyneseny veškeré výsledky měření velikostí styčných ploch testované pneumatiky v závislosti na zatížení při daném tlaku huštění. Po proložení bodů se souhlasnými tlaky huštění polynomem druhého stupně lze v grafu pozorovat významný vliv zatížení a tlaku huštění na velikost styčné plochy. Obdobné charakteristiky by mohly být například součástí technické dokumentace zemědělských pneumatik, které by sloužily jako pomocný nástroj při výběru vhodných rozměrů a typů pneumatik a uzpůsobení jejich tlaku huštění pro snížení škodlivého zhutnění půdy.

5.2 Vyhodnocení plnosti otisku stykové plochy

Na základě všech naměřených dat velikostí styčných a stykových ploch testované pneumatiky Mitas 650/65R38 (viz tab. 5) byly vypočteny plnosti otisků stykových ploch ε (%). Na obrázku 25 může být po proložení bodů lineárním trendem patrná mírná závislost plnosti otisku stykové plochy na velikosti měřené styčné plochy. Pro ověření, zda je tato závislost statisticky významná, byl s pomocí programu Microsoft Excel 2016 proveden test lineární nezávislosti v testovaném souboru dat.



Obrázek 25 Graf závislosti plnosti otisku stykové plochy pneumatiky Mitas 650/65R38 na velikosti styčné plochy

Legenda: S_{Tm} – styčná plocha (měřená), ε – plnost otisku stykové plochy pneumatiky.

Předpoklady: Dvourozměrný základní soubor má normální rozdělení a korelační koeficient ρ .

Výběrový soubor má n prvků a koeficient korelace r .

Nulová hypotéza (H_0): $\rho = 0$

Alternativní hypotéza (H_1): $\rho \neq 0$

Testovací kritérium (Tato veličina má Studentovo rozložení s $(n - 2)$ stupni volnosti):

$$t = \frac{r}{\sqrt{1 - r^2}} \cdot \sqrt{n - 2} = 0,471570$$

Kritická hodnota pro hladinu významnosti $p = 0,05$:

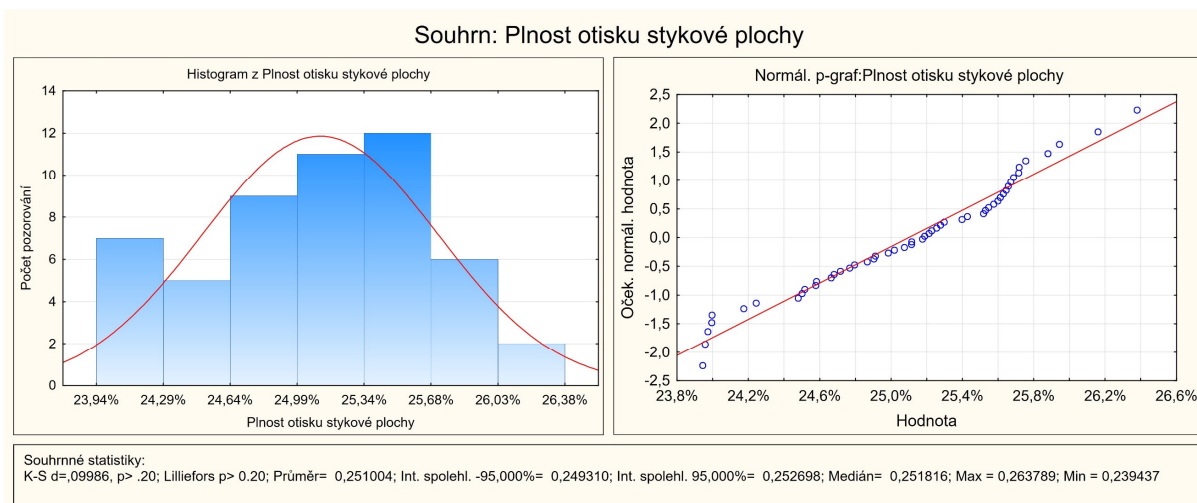
$$t_{0,05}(n - 2) = 2,008559$$

Závěr: Hodnota testovacího kritéria nepřekročila kritickou hodnotu. Není nutno zamítnout hypotézu H_0 , plnost otisku stykové plochy není na hladině významnosti $p = 0,05$ lineárně závislá na velikosti styčné plochy.

Pro ověření, zda lze plnost otisku stykové plochy považovat za konstantní a zda rozptýlení hodnot kolem střední hodnoty $\bar{\varepsilon} = 25,1$ % je čistě náhodné, byl s pomocí programu StatSoft STATISTICA CZ 12 proveden test normality mezi hodnotami. Pro rozdělení hodnot do k tříd bylo použito Sturgesovo pravidlo: $k \cong 1 + 3,3 \log n \cong 7$. Pro provedení testu byl zvolen Lillieforsův test dobré shody pro jeden výběr. Jedná se o modifikaci Kolmogorova-Smirnova

testu dobré shody pro jeden výběr, který nebylo možné použít z důvodu neznámé střední hodnoty a rozptylu základního souboru.

Hodnota testovacího kritéria d nepřekročila kritickou hodnotu p (viz obrázek 26), proto není nutno zamítnout nulovou hypotézu H_0 , která říká, že testovaná data pochází ze souboru s normálním rozdělením. Z grafického posouzení histogramu na obrázku 26 (vlevo) nemusí být normalita plně zřejmá, nicméně body okolo přímky normálního pravděpodobnostního grafu na obrázku 26 (vpravo) nasvědčují, že data pocházejí z normálního rozdělení.



Obrázek 26 Test normality dat plnosti otisku stykové plochy pneumatiky Mitas 650/65R38; (výstup StatSoft STATISTICA CZ 12)

Na základě výsledku *Lillieforsova testu dobré shody pro jeden výběr* lze tedy na hladině významnosti $p = 0,05$ považovat plnost otisku stykové plochy pneumatiky za konstantní, jež se dle normálního rozdělení pohybuje kolem střední hodnoty $\bar{\varepsilon} = 25,10 \%$ s 95% intervalem spolehlivosti (24,93 %; 25,27 %) (viz obr. 26 dole) a dle testu o lineární nezávislosti není na hladině významnosti $p = 0,05$ statisticky závislá na velikosti styčné plochy.

Uvedeného poznatku by bylo možné v budoucnu využít například při testování kompakčního potenciálu dalších rozměrů a typů pneumatik. Na menším rozsahu měření by se nejprve vyhodnotila plnost otisku stykové plochy a zbytek měření styčných ploch (v závislosti na kombinaci zatížení a tlaku huštění) by byl proveden na základě přepočtu ploch stykových. Tvorba jednoduchého otisku spočívá pouze v jednonásobném zatížení a následné zpracování digitálních záznamů lze automatizovat například pomocí počítačového programu ImageJ (Rasband, 2016) určeného pro vědeckou analýzu obrázků, a proto lze tvorbu jednoduchého otisku pneumatiky (oproti vícenásobnému otisku) a její následné vyhodnocení stykové plochy, provádět s významně nižší časovou náročností.

Dalšího uplatnění by bylo možné nalézt například v hodnocení trakčních vlastností pneumatik v závislosti na individuální kombinaci zatížení a tlaku huštění. Ze získaných výsledků této práce lze usuzovat, že při tahových polních pracích bude při zvyšující se velikosti styčné plochy úměrně stoupat i počet šípů, které se budou podílet na přenosu tahové síly mezi půdou a dezénem pneumatiky.

5.3 Vyhodnocení kompakčního potenciálu

V návaznosti na kapitolu 5.1 *Vyhodnocení měření styčných a stykových ploch* je v tabulce 7 provedeno porovnání kompakčního potenciálu pneumatiky Mitas 650/65R38 pomocí CC-rating pneumatiky v závislosti na vybraných katalogových kombinacích zatížení a tlaku huštění určených pro jezdovou rychlost 10 km/h. Porovnání zahrnuje index CC, který je počítán pomocí originálního CC-rating pneumatiky (viz kap. 2.4 *CC-rating*) s konstantní velikostí styčné plochy S_{T0} (cm²). Tabulka 7 dále zahrnuje index CC'_m, který je úpravou originálního CC-rating pro naměřené velikosti styčné plochy S_{Tm} (cm²) a index CC'_v, jenž je úpravou originálního CC-rating pro teoreticky vypočtené velikosti styčné plochy S_{Tv} (cm²) dle dosud nepublikovaného vzorce (39). Pro porovnání vlivu velikosti zatížení jsou zde uvedeny střední kontaktní tlaky q_s , q_{sm} , a q_{sv} odpovídající daným velikostem styčných ploch.

Tabulka 7 Porovnání originálního, teoretického a očekávaného kompakčního potenciálu CC-rating pneumatiky Mitas 650/65R38

p_i (kPa)	60	80	100	120	140	160
W_N (kg)	3 505	3 980	4 420	4 830	5 310	5 775
S_{T0} (cm ²)	4489					
q_s (kPa)	77	87	97	106	116	126
CC	19	51	77	98	117	130
S_{Tm} (cm ²)	4 044	3 928	3 726	3 639	3 678	3 609
q_{sm} (kPa)	85	99	116	130	142	157
CC'_m	41	74	103	119	128	138
S_{Tv} (cm ²)	4 112	4 008	3 904	3 800	3 696	3 592
q_{sv} (kPa)	84	97	111	125	141	158
CC'_v	37	70	95	113	128	138

Legenda: p_i – tlak huštění, W_N – nominální hodnota zatížení, S_{T0} – nominální teoretická styčná plocha (originální CC-rating), q_s – střední kontaktní tlak (originální CC-rating), CC – index originálního CC-rating, S_{Tm} – styčná plocha (naměřená), q_{sm} – střední kontaktní tlak (vztažený k ploše S_{Tm}), CC'_m – index očekávaného kompakčního potenciálu (vztažený k ploše S_{Tm}), S_{Tv} – styčná plocha (vypočtená teoretická), q_{sv} – střední kontaktní tlak (vztažený k ploše S_{Tv}), CC'_v – index kompakčního potenciálu (vztažený k teoretické ploše S_{Tv}).

Při tlaku huštění 60 kPa a nominálním zatížení 3505 kg je hodnota očekávaného indexu CC'_m = 41 (viz tab. 7), tedy suchá objemová hmotnost standardizované jílovito-hlinité půdy je

41 % nad její limitní suchou objemovou hmotností a pneumatika může být dle originálního CC-rating klasifikována jako mírně riziková ke zhutnění půdního profilu. Při tlaku huštění 80 kPa a nominálním zatížení 3980 kg je hodnota očekávaného indexu $CC'_m = 74$, tedy suchá objemová hmotnost standardizované jílovito-hlinité půdy je 74 % nad její limitní suchou objemovou hmotností a pneumatiku lze klasifikovat s větším rizikem ke zhutnění dané půdy. V obou těchto případech nebyla překročena kritická hodnota CC 100 očekávaného indexu CC'_m a pneumatiku by tak bylo za těchto podmínek možné provozovat bez velkého rizika ke zhutnění daného typu půdy. Při vyšších tlacích huštění a odpovídajících nominálních zatíženích kritická hodnota CC 100 očekávaného indexu CC'_m již byla překročena, pneumatiku lze v těchto případech klasifikovat jako vysoce rizikovou ke zhutnění a není zaručeno šetrné chování pneumatiky k danému typu půdy.

Hodnoty originálního indexu CC v tabulce 7 mají oproti očekávanému indexu CC'_m tendenci podhodnocovat kompakční potenciál testované pneumatiky. V tomto případě jsou hodnoty originálních indexů CC průměrně o 24 % nižší nežli hodnoty očekávaných indexů CC'_m . Nejvýznamnější absolutní odchylka indexů kompakčního potenciálu 26 odpovídá diferenci středního kontaktního tlaku 20 kPa ($p_i = 100$ kPa), a naopak nejvýznamnější absolutní odchylka středního kontaktního tlaku 31 kPa odpovídá diferenci indexů 8 ($p_i = 160$ kPa). Důvodem, proč není při maximální diferenci středního kontaktního tlaku i maximální difference indexu kompakčního potenciálu, může být podstata výpočtu samotného indexu CC, který je průměrnou hodnotou pro pět hloubek půdního profilu (viz kap 2.4 *CC-rating*) a dále může být důvodem nejednotné zvyšování katalogových hodnot nominálních zatížení ΔW (viz tab. 5).

Hodnoty indexů CC'_v v tabulce 7 jsou oproti očekávaným indexům CC'_m v průměru nižší pouze o cca 5 % a pro tlaky huštění 140 a 160 kPa jsou zcela shodné. Nejvýznamnější rozdíl indexů 8 odpovídá největší diferenci středního kontaktního tlaku 8 kPa a též největší diferenci velikosti styčné plochy 178 cm². S ohledem na tolerovanou chybu 5 % velikosti styčné plochy (možná subjektivní chyba při tvorbě obrysu vícenásobného otisku) a možné variability půdního profilu v polních podmínkách, může být tato odchylka hodnocena jako přijatelná. Nová metoda výpočtu velikosti styčné plochy dle dosud nepublikovaného vztahu (29) proto může nabídnout přísnější hodnocení kompakčního potenciálu CC-rating pneumatiky.

V tabulce 8 je uvedena závislost provozního kompakčního potenciálu (FCC-rating) (viz kap. 4.3.1 *Provozní kompakční potenciál FCC-rating*) na tlaku huštění při konstantním zatížení 1100, 2000 a 3000 kg. Hlavním cílem FCC-rating je rozšíření hodnocení originálního kompakčního potenciálu (CC-rating) pneumatiky pro jakoukoli kombinaci zatížení a tlaku

huštění. Hodnota indexu FCC_v charakterizuje kompakční potenciál pneumatiky s teoreticky vypočtenou velikostí styčné plochy S_{Tv} (cm²) dle dosud nepublikovaného vzorce (39) a hodnota indexu FCC_m charakterizuje očekávaný kompakční potenciál pneumatiky pro naměřenou velikost styčné plochy S_{Tm} (cm²). Pro danou velikost styčné plochy a odpovídající zatížení jsou zde uvedeny hodnoty středních kontaktních tlaků q_{sm} , a q_{sv} (kPa).

Tabulka 8 Porovnání skutečného a teoretického provozního kompakčního potenciálu FCC pneumatiky Mitas 650/65R38 v závislosti na tlaku huštění při konstantním zatížení

		p_i (kPa)	60	80	100	120	140	160
W (kg)	1 100	S_{Tm} (cm ²)	1 529	1 302	1 140	1 079	995	929
		q_{sm} (kPa)	71	83	95	100	108	116
		FCC_m (-)	0	35	64	76	91	102
		S_{Tv} (cm ²)	1 484	1 346	1 240	1 156	1 070	998
		q_{sv} (kPa)	73	80	87	93	101	108
		FCC_v (-)	5	28	46	62	77	90
	2 000	S_{Tm} (cm ²)	2 749	2 375	1 998	1 795	1 654	1 497
		q_{sm} (kPa)	71	83	98	109	119	131
		FCC_m (-)	0	35	72	92	106	119
		S_{Tv} (cm ²)	2 613	2 340	2 130	1 952	1 752	1 600
		q_{sv} (kPa)	75	84	92	101	112	123
		FCC_v (-)	12	38	61	72	96	110
	3 000	S_{Tm} (cm ²)	3 630	3 121	2 872	2 688	2 414	2 190
		q_{sm} (kPa)	81	94	102	109	122	134
		FCC_m (-)	30	63	80	92	109	120
		S_{Tv} (cm ²)	3 456	3 094	2 814	2 590	2 370	2 185
		q_{sv} (kPa)	85	95	105	114	124	135
		FCC_v (-)	40	64	82	96	110	123

Legenda: p_i – tlak huštění, W – zatížení, S_{Tm} – styčná plocha (naměřená), q_{sm} – střední kontaktní tlak (vztažený k ploše S_{Tm}), FCC_m – provozní index očekávaného kompakčního potenciálu (vztažený k ploše S_{Tm}), S_{Tv} – styčná plocha (vypočtená teoretická), q_{sv} – střední kontaktní tlak (vztažený k ploše S_{Tv}), FCC_v – provozní index kompakčního potenciálu (vztažený k ploše S_{Tv}).

Při zatížení 1100 kg byla kritická hodnota 100 (dále FCC 100) očekávaného indexu FCC_m překročena jen při tlaku huštění 160 kPa (viz tab. 8). Kritická hodnota FCC 100, s ohledem na tolerovanou chybu 5 % velikosti styčné plochy (možná subjektivní chyba při tvorbě obrysu vícenásobného otisku) a možné variability půdního profilu v polních podmínkách, toleruje hodnotu $FCC_m = 102$ a pneumatiku by bylo možné při daném zatížení provozovat v celém uvedeném spektru tlaků huštění bez velkého rizika ke zhutnění daného typu půdy. Pro tlak huštění 60 kPa a zatížení 1100 kg je hodnota očekávaného indexu $FCC_m = 0$, kritická suchá objemová hmotnost standardizované jílovito-hlinité půdy tedy nebyla překročena a pneumatika je za těchto podmínek hodnocena jako šetrná k danému půdnímu profilu. Při zatížení 2000 a 3000 kg je kritická hodnota FCC 100 očekávaného indexu FCC_m překročena pro tlak huštění 140 a 160 kPa. V tomto případě je pneumatika hodnocena jako vysoce riziková k utužení

daného půdního profilu a není zaručeno šetrné chování k danému typu půdy. Pro tlak huštění 60 kPa a zatížení 2000 kg je hodnota očekávaného indexu $FCC_m = 0$ a pneumatika klasifikována jako šetrná k danému půdnímu profilu.

Při porovnání s očekávaným indexem FCC_m v tabulce 8 má teoretický index FCC_v pro nižší tlaky huštění tendenci nadhodnocovat kompakční potenciál pneumatiky, a naopak pro vysoké tlaky huštění dosahuje hodnot nižších. Nejvýznamnější odchylka obou indexů 20 odpovídá diferenci středního kontaktního tlaku jen 8 kPa. Opět s ohledem na tolerovanou chybu 5 % velikosti styčné plochy a možné variability půdního profilu v polních podmínkách, může být tato odchylka hodnocena jako přijatelná.

Dle dosažených výsledků této práce uvedených v tabulce 7 a 8 byla naměřena odchylka až 24 % (příp. 880 cm²) mezi teoretickou hodnotou velikosti styčné plochy S_{T0} a skutečnou velikostí styčné plochy S_{Tm} testované pneumatiky Mitas 650/65R38. Zkreslení hodnot originálního kompakčního potenciálu (CC-rating) pneumatiky, kvůli nezohlednění možné variability velikosti styčné plochy při nominálních kombinacích zatížení a tlaku huštění, může být proto považováno za významné. V případě nové metody výpočtu velikosti styčné plochy S_{Tv} pomocí dosud nepublikovaného vztahu (39) byla naměřena odchylka od skutečné velikosti styčné plochy S_{Tm} maximálně 9 % (příp. 178 cm²) a má proto potenciál k podávání přesnějších výsledků. Provozní kompakční potenciál FCC-rating pneumatiky pro jakoukoli kombinaci zatížení a tlaku huštění, případně upravený originální CC-rating s výpočtem velikosti styčné plochy dle vztahu (39), se ukázal být jako praktický nástroj pro hodnocení šetrnosti dané pneumatiky k danému půdnímu profilu.

6 ZÁVĚR

Rešeršní část práce popisuje problematiku škodlivého zhutnění půdy následkem přejezdů nadměrně zatíženého pojezdového ústrojí zemědělské mechanizace. Především je zdůrazněn jejich škodlivý efekt na změnu fyzikálních a hydrologických vlastností půdy v souvislosti s environmentálními dopady a budoucím negativním vývojem globálních klimatických změn. Důraz je primárně kladen na prevenci v porovnání s řešením následků zhutnění půdy. Dále je probrána problematika zemědělských pneumatik z pohledu terramechaniky, resp. rozložení styčné plochy, kontaktního tlaku a průběhu napětí v půdě pod styčnou plochou zatížené pneumatiky. Uvedeny jsou výpočetní modely různých autorů zabývající se charakteristickou deformací pneumatik a jejich působení na vlastnosti půdního profilu důsledkem polních přejezdů. Závěr rešeršní části zahrnuje rozbor metody hodnocení kompakčního potenciálu pneumatik (*tyre CC-rating*).

V rámci laboratorní činnosti bylo provedeno měření rozměrových parametrů vybrané trakční zemědělské pneumatiky Mitas 650/65R38 s dezénem RD-03. Metodou jednoduchého a vícenásobného otisku byla stanovena její velikost styčné a stykové plochy nejprve pro vybrané katalogové a posléze individuální kombinace zatížení a tlaku huštění. Výrobci pneumatik uvádějí nominální hodnoty zatížení při různých tlacích huštění a specifických rychlostech kvůli dodržení přijatelné deformace pneumatiky, avšak výsledky měření potvrdily odchylky velikostí styčných ploch, které se pro vybrané nominální kombinace zatížení a tlaku huštění a danou provozní rychlost lišily až o 21 %. Měřením závislosti styčné plochy na tlaku huštění při konstantním zatížení bylo zaznamenáno zvětšení velikosti styčné plochy téměř o 150 %, aniž by byly překročeny nominální hodnoty.

Dále byla zjištěna statisticky nevýznamná závislost plnosti otisku stykové plochy testované pneumatiky na velikosti styčné plochy a dle normálního rozdělení dosahuje střední hodnoty 25,1 %. Získaný poznatek dává možnost dalšího využití při testování jiných typů a rozměrů pneumatik pro snížení časové náročnosti měření a vyhodnocení.

Další část této práce se zabývala vyhodnocením kompakčního potenciálu testované pneumatiky. Pro vybrané katalogové kombinace tlaku huštění a nominálního zatížení (pro pojezdovou rychlost 10 km/h) byl stanoven očekávaný kompakční potenciál testované pneumatiky v reálných podmínkách. Kritická hodnota CC 100 nebyla překročena pouze u nominálních kombinací při tlaku huštění 60 a 80 kPa, v ostatních případech není zaručeno šetrné chování pneumatiky ke standardizovanému jílovito-hlinitému typu půdy.

Z naměřených závislostí velikostí styčných ploch na tlaku huštění při konstantním zatížení bylo provedeno hodnocení očekávaného kompakčního potenciálu testované pneumatiky pomocí dosud nepublikovaného konceptu FCC-rating, jehož autorem je vedoucí této diplomové práce. V porovnání s originálním hodnocením CC-rating tento navrhovaný koncept umožňuje hodnocení při libovolné kombinaci zatížení a tlaku huštění. Pneumatika byla v tomto případě hodnocena jako šetrná jen u zatížení 1100 a 2000 kg s tlakem huštění 60 kPa, resp. kritická objemová hmotnost půdy nebyla překročena a v těchto případech index $FCC = 0$. Kritická hodnota $FCC = 100$, s ohledem na tolerovanou chybu 5 % velikosti styčné plochy, toleruje hodnotu $FCC = 102$. V případě zmíněné tolerance byla tato hodnota překročena při zatížení 2000 a 3000 kg s tlaky huštění 140 a 160 kPa. V těchto případech pneumatika nezaručuje šetrnost ke standardizovanému půdnímu typu.

Jelikož originální koncept FCC-rating pneumatiky počítá s teoretickým výpočtem velikosti styčné plochy dle dosud nepublikovaného vzorce (39), bylo v této práci provedeno porovnání jeho teoretických indexů FCC s výše uvedenými očekávanými, přičemž bylo dosaženo průměru absolutních odchylek 9. Nového teoretického výpočtu velikosti styčné plochy bylo dále pro porovnání využito i v originálním CC-rating. Průměr absolutních odchylek od očekávané hodnoty byl v tomto případě 4, oproti průměru absolutních odchylek 19 indexu originálního CC-rating (založený na nominální velikosti styčné plochy).

Z uvedených poznatků vyplývá, že aplikací upravené metody výpočtu velikosti styčné plochy do původního konceptu CC-rating lze dosáhnout přísnějšího hodnocení pneumatik v porovnání s originálním CC-rating. Autor této práce doporučuje zahrnutí modifikovaného hodnocení CC-rating jako součást katalogových údajů pro každou kombinaci zatížení a tlaku huštění, který by umožnil snadnější výběr vhodných rozměrů pneumatik pro daný stroj za účelem snížení rizika zhutnění půdy. Koncept FCC-rating lze doporučit jako vhodnou mobilní aplikaci, která by umožnila před vjezdem na pozemek stanovit optimální úroveň podhuštění pro dané pneumatiky podle skutečného zatížení, aniž by byly překročeny nominální hodnoty kombinací zatížení a tlaku huštění uvedené v katalogu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- AFZALINIA, S. – ZABIHI, J., 2014. Soil compaction variation during corn growing season under conservation tillage. *Soil and Tillage Research* [online]. 137, 1-6 [cit. 2016-06-01]. DOI: 10.1016/j.still.2013.11.003. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198713002031>
- ALAKUKKU, L. – WEISSKOPF, P. – CHAMEN, W. C. T. – TIJINK, F. G. H. – VAN DER LINDEN, J. P. – PIRES, S. – SOMMER, C. – SPOOR, G., 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. *Soil and Tillage Research* [online]. 73(1-2), 145-160 [cit. 2016-06-07]. DOI: 10.1016/S0167-1987(03)00107-7. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198703001077>
- ARVIDSSON, J. – HÅKANSSON, I., 1996. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil and Tillage Research* [online]. 39(3-4), 175-197 [cit. 2016-10-22]. DOI: 10.1016/S0167-1987(96)01060-4. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198796010604>
- ARVIDSSON, J. – HÅKANSSON, I., 2014. Response of different crops to soil compaction: Short-term effects in Swedish field experiments. *Soil and Tillage Research* [online]. 138, 56-63 [cit. 2016-05-31]. DOI: 10.1016/j.still.2013.12.006. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198714000026>
- ARVIDSSON, J. – KELLER, T., 2007. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil and Tillage Research* [online]. 96(1-2), 284-291 [cit. 2016-11-11]. DOI: 10.1016/j.still.2007.06.012. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198707001146>
- ASSEMBLA, 2015. *Chdkptp*. Ver. 18. Assembla Workspaces. Dostupné také z: <https://app.assembla.com/wiki/show/chdkptp>. Open Source software pro ovládání fotoaparátu přes rozhraní USB 2.0 pomocí protokolu CHDK PTP
- BEKKER, M., 1983. Prediction of design and performance parameters in agro-forestry vehicles: Methods, Tests, and Numerical Examples. Kanada: *National Research Council of Canada*. Division of Energy.
- BEKKER, M., 1985. The effect of tire tread in parametric analysis of tire-soil systems. *National Research Council Canada*. NRCC, Report No. 24146, 19(29).
- BERISSO, F. E. – SCHJØNNING, P. – KELLER, T., 2012. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. *Soil and Tillage Research* [online]. 122, 42-51 [cit. 2016-11-12]. DOI: 10.1016/j.still.2012.02.005. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198712000451>
- BERISSO, F. E. – SCHJØNNING, P. – KELLER, T. – LAMANDÉ, M. – SIMOJOKI, A. – IVERSEN, B. V. – ALAKUKKU, L. – FORKMAN, J., 2013. Gas transport and subsoil pore characteristics: Anisotropy and long-term effects of compaction. *Geoderma* [online]. 195-196, 184-191 [cit. 2016-11-12]. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.12.002. ISSN 00167061. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706112004193>

- BOTTA, G. F. – POZZOLO, O. – BOMBEN, M., 2007. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil and Tillage Research* [online]. 96(1-2), 145-154 [cit. 2016-10-18]. DOI: 10.1016/j.still.2007.05.003. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198707000979>
- BOUSSINESQ, J., 1885. Application des Potentiels à l'étude de l'équilibre et du Mouvement des Solides Élastiques. *Gauthier-Villars*. Paris, 30.
- BRINKGREVE, R. B. J. – VERMEER, P. A., 1998. *PLAXIS: finite element code for soil and rock analyses* ; Version 7. Rotterdam: Balkema. ISBN 9789054104490.
- CAMERON, D. – OSBORNE, C. – HORTON, P. F. – SINCLAIR, M., 2015. *A sustainable model for intensive agriculture*. The University Of Sheffield [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://grantham.sheffield.ac.uk/engagement/policy/a-sustainable-model-for-intensive-agriculture/>
- CLARK, S. J., 1973. A proposed soil classification system for soil-vehicle and tillage mechanics. *Journal of Terramechanics* [online]. 10(3), 9-19 [cit. 2016-11-17]. DOI: 10.1016/0022-4898(73)90077-3. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022489873900773>
- CUETO, O. G. – CORONEL, C. E. I. – BRAVO, E. L. – MORFA, C. A. R. – SUÁREZ, M. H. 2016. Modelling in FEM the soil pressures distribution caused by a tyre on a Rhodic Ferralsol soil. *Journal of Terramechanics* [online]. 63, 61-67 [cit. 2016-11-17]. DOI: 10.1016/j.jterra.2015.09.003. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022489815000877>
- CUETO, O. G. – CORONEL, C. E. I. – MORFA, C. A. R. – SOSA, G. U. – GÓMEZ, L. H. H. – URRIOLAGOITIA, C. G. – SUÁREZ, M. H., 2013. Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 99, 146-152 [cit. 2016-11-17]. DOI: 10.1016/j.compag.2013.08.026. ISSN 01681699. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168169913002044>
- CUI, K. – DÉFOSSEZ, P. – RICHARD, G., 2007. A new approach for modelling vertical stress distribution at the soil/tyre interface to predict the compaction of cultivated soils by using the PLAXIS code. *Soil and Tillage Research* [online]. 95(1-2), 277-287 [cit. 2016-11-17]. DOI: 10.1016/j.still.2007.01.010. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198707000475>
- ČSÚ, 2014. Roste podíl vlastní obhospodařované půdy, tisková zpráva. *Český statistický úřad* [online]. Praha: Odbor statistiky zemědělství, lesnictví a životního prostředí ČSÚ [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: https://www.czso.cz/czso/roste_podil_vlastni_obhospodarovane_pudy
- DEFOSSEZ, P. – RICHARD, G., 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil and Tillage Research* [online]. 67(1), 41-64 [cit. 2016-11-16]. DOI: 10.1016/S0167-1987(02)00030-2. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198702000302>
- DISERENS, E., 2002. Ermittlung der Reifen-Kontaktfläche im Feld mittels Rechenmodell. FAT-Berichte Nr. *Swiss Federal Research Station for Agricultural Economics and Engineering*, 12.
- DOMÍNGUEZ, A. – BEDANO, J., 2016. The adoption of no-till instead of reduced tillage does not improve some soil quality parameters in Argentinean Pampas. *Applied Soil Ecology* [online]. 98, 166-176 [cit. 2016-06-01]. DOI: 10.1016/j.apsoil.2015.10.014. ISSN 09291393. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0929139315301074>

- EEA, 2015. Soil. *European Environment Agency* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.eea.europa.eu/soer-2015/europe/soil>
- ELWALEED, A. K. – YAHYA, A. – ZOHADIE, M. – AHMAD, D. – KHEIRALLA, A. F., 2006. Effect of inflation pressure on motion resistance ratio of a high-lug agricultural tyre. *Journal of Terramechanics* [online]. 43(2), 69-84 [cit. 2016-11-13]. DOI: 10.1016/j.jterra.2004.08.006. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022489804000898>
- ETANA, A. – LARSBO, M. – KELLER, T. – ARVIDSSON, J. – SCHJØNNING, P. – FORKMAN, J. – ARVIS, N., 2013. Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. *Geoderma* [online]. 192, 430-436 [cit. 2016-06-06]. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.08.015. ISSN 00167061. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706112003102>
- ETRTO, 2008. *Engineering design information*. Brussels-Belgium: European tyre and rim technical organizations.
- FANDOM, 2016. *CHDK* (Canon Hack Development Kit) [firmware]. Ver. 101a_1.4.1. Fandom powered by Wikia. Dostupné také z: <http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK>. Experimentální alternativní open source firmware pro fotoaparát Canon PowerShot S5 IS
- FRÖHLICH, O. K., 1934. *Druckverteilung im Baugrunde*. Wien: Springer Verlag, 178.
- GARDNER, M., 1965. The "Superellipse": a curve that lies between the ellipse and the rectangle. *Scientific American*. 222.
- GILL, W. R. – BERG, G. E. V., 1967. Soil dynamics in tillage and traction. *Agricultural Handbook*. Washington, DC: USDA-ARS, (316), 355–362.
- GOST 26955-86, 1996. Agricultural mobile machinery. *Rates of force produced by propelling agents on soil*. Moscow: USSR State Committee for Standards, Moscow, Russia. Dostupné z: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/28952/>
- GREČENKO, A., 1992. *Computing maximum stress under vehicle running gear*. Proceedings of the Conference Trends in Agricultural Engineering. Prague: Technical faculty, University of Agriculture, 1, 146-149.
- GREČENKO, A. – NOVOTNÝ, V. – RÁSOCHOVÁ, H., 1990. *Tyre contact area geometry on a sloping plane*. Proc. AgEng 90. Berlin, 191.
- GREČENKO, A., 1994. *Vlastnosti terénních vozidel*. Vyd. 1. V Praze: Vysoká škola zemědělská. ISBN 80-213-0190-2.
- GREČENKO, A., 1995. Tyre footprint area on hard ground computed from catalogue values. *Journal of Terramechanics* [online]. 32(6), 325-333 [cit. 2016-10-24]. DOI: 10.1016/0022-4898(96)00003-1. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022489896000031>
- GREČENKO, A., 2003. Tire load rating to reduce soil compaction. *Journal of Terramechanics* [online]. 40(2), 97-115 [cit. 2016-11-16]. DOI: 10.1016/j.jterra.2003.10.001. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022489803000351>
- GREČENKO, A., 2016. Tire compaction capacity rating on non-standard soil. *Journal of Terramechanics* [online]. 66, 59-61 [cit. 2017-03-01]. DOI: 10.1016/j.jterra.2016.03.003. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022489816300015>

- GREČENKO, A. – PRIKNER, P., 2009. Progress in tire rating based on soil compaction potential. *Journal of Terramechanics* [online]. 46(5), 211-216 [cit. 2016-11-09]. DOI: 10.1016/j.jterra.2009.03.001. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022489809000457>
- GREČENKO, A. – PRIKNER, P., 2014. Tire rating based on soil compaction capacity. *Journal of Terramechanics* [online]. 52, 77-92 [cit. 2016-11-09]. DOI: 10.1016/j.jterra.2013.08.001. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022489813000621>
- GYSI, M. – MAEDER, V. – WEISSKOPF, P., 2001. PRESSURE DISTRIBUTION UNDERNEATH TIRES OF AGRICULTURAL VEHICLES. *Transactions of the ASAE* [online]. 44(6), - [cit. 2016-11-12]. DOI: 10.13031/2013.7001. ISSN 21510059. Dostupné z: <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=7001&CID=t2001&v=44&i=6&T=1>
- HÅKANSSON, I., 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and Tillage Research* [online]. 16(1-2), 105-120 [cit. 2016-06-01]. DOI: 10.1016/0167-1987(90)90024-8. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0167198790900248>
- HALLONBORG, U., 1996. Super ellipse as tyre-ground contact area. *Journal of Terramechanics* [online]. 33(3), 125-132 [cit. 2016-10-24]. DOI: 10.1016/S0022-4898(96)00013-4. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022489896000134>
- HAMMEL, K., 1994. Soil stress distribution under lugged tires. *Soil and Tillage Research* [online]. 32(2-3), 163-181 [cit. 2016-11-16]. DOI: 10.1016/0167-1987(94)90018-3. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0167198794900183>
- HEIN, P., 1964. Superellipsen, en enkel lösning på ett ällmant problem. *Dansk Kunsthåndvaerk*. (97).
- HORN, R. – WAY, T. – ROSTEK, J., 2003. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil and Tillage Research* [online]. 73(1-2), 101-106 [cit. 2016-06-07]. DOI: 10.1016/S0167-1987(03)00103-X. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016719870300103X>
- JUN, H. – WAY, T. R. – LÖFGREN, B. – LANDSTRÖM, M. – BAILEY, A. C. – BURT, E. C. – MCDONALD, T. P., 2004. Dynamic load and inflation pressure effects on contact pressures of a forestry forwarder tire. *Journal of Terramechanics* [online]. 41(4), 209-222 [cit. 2016-11-12]. DOI: 10.1016/j.jterra.2004.03.002. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022489804000400>
- JURTÍK, T., 2004. Proč používat radiální traktorové pneumatiky. *Mechanizace zemědělství*. ProfiPress, (1), 17.
- KC, S. – LUTZ, W., 2014. The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Global Environmental Change* [online]. - [cit. 2016-04-09]. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.06.004. ISSN 09593780. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959378014001095>
- KELLER, T. – BERLI, M. – RUIZ, S. – LAMANDÉ, M. – ARVIDSSON, J. – SCHJØNNING, P. – SELVADURAI, A. P. S., 2014. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil and Tillage Research* [online]. 140, 106-117 [cit. 2016-11-15]. DOI: 10.1016/j.still.2014.03.001. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198714000361>

- 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. *Biosystems Engineering* [online]. 92(1), 85-96 [cit. 2016-10-24]. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2005.05.012. ISSN 15375110. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511005001030>
- KELLER, T. – DÉFOSSEZ, P – WEISSKOPF, P. – ARVIDSSON, J. – RICHARD, G., 2007. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil and Tillage Research* [online]. 93(2), 391-411 [cit. 2016-11-15]. DOI: 10.1016/j.still.2006.05.012. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198706001413>
- KELLER, T. – LAMANDÉ, M., 2010. Challenges in the development of analytical soil compaction models. *Soil and Tillage Research* [online]. 111(1), 54-64 [cit. 2016-11-13]. DOI: 10.1016/j.still.2010.08.004. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016719871000142X>
- KELLER, T. – RUIZ, S. – STETTLER, M. – BERLI, M., 2016. Determining Soil Stress beneath a Tire: Measurements and Simulations. *Soil Science Society of America Journal* [online]. 80(3), 541- [cit. 2016-11-15]. DOI: 10.2136/sssaj2015.07.0252. ISSN 03615995. Dostupné z: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/80/3/541>
- KILNER, J., 1982. Pneumatic tire model for aircraft simulation. *Journal of Aircraft* [online]. 19(10), 851-857 [cit. 2016-11-01]. DOI: 10.2514/3.44786. ISSN 00218669. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.44786>
- KOMANDI, G., 1976. The determination of the deflection, contact area, dimensions, and load carrying capacity for driven pneumatic tires operating on concrete pavement. *Journal of Terramechanics* [online]. 13(1), 15-20 [cit. 2016-11-01]. DOI: 10.1016/0022-4898(76)90028-8. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022489876900288>
- KRICK, G., 1969. Radial and shear stress distribution beneath rigid wheels and pneumatic tyres on yielding soils with regard to tyre deformation. *Journal of Terramechanics* [online]. 6(3), 73-98 [cit. 2016-11-09]. DOI: 10.1016/0022-4898(69)90129-3. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022489869901293>
- KUMHÁLA, F. – Gutu, D. – Hůla, J. – Chyba, J. – Kovaříček, P. – Krouhlík, M. – Kvíz, Z. – Mašek, J. – Vlášková, M., 2013. *Technologie řízených přejezdů po pozemcích: Uplatněná certifikovaná metodika*. Praha: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta. ISBN 9788021324251. Dostupné také z: http://katedry.czu.cz/storage/3506_TECHNOLOGIE%20ŘÍZENÝCH%20PŘEJEZDŮ%20O%20POZEMCÍCH%20-%20metodika.pdf
- LAMANDÉ, M. – SCHJØNNING, P., 2008. The ability of agricultural tyres to distribute the wheel load at the soil–tyre interface. *Journal of Terramechanics* [online]. 45(4), 109-120 [cit. 2016-11-13]. DOI: 10.1016/j.jterra.2008.09.004. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022489808000578>
- LHOTSKÝ, J., 2000. *Zhutňování půd a opatření proti němu: (studijní zpráva) = Soil compaction and measures against it : (review)*. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací. Studijní informace. Rostlinná výroba. ISBN 8072710672.
- LYASKO, M. I., 1994. The determination of deflection and contact characteristics of a pneumatic tire on a rigid surface. *Journal of Terramechanics* [online]. 31(4), 239-246 [cit. 2016-11-01]. DOI: 10.1016/0022-4898(94)90019-1. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022489894900191>

- MOHSENI MANESH, A. – WARD, S. M. – OWENDE, P. O. M. – JAVADI, A., 2009. Modelling of pneumatic tractor tyre interaction with multi-layered soil. *Biosystems Engineering* [online]. 104(2), 191-198 [cit. 2016-11-17]. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.06.020. ISSN 15375110. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511009002013>
- O'SULLIVAN, M. F. – HENSHALL, J. K. – DICKSON, J. K., 1999. A simplified method for estimating soil compaction. *Soil and Tillage Research* [online]. 49(4), 325-335 [cit. 2016-11-13]. DOI: 10.1016/S0167-1987(98)00187-1. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198798001871>
- PAMI, 2005. *Nine Tips for Tractor Operators* [online]. ALBERTA AGRICULTURE AND FORESTRY. 2016-05-26 [cit. 2016-11-06]. ISSN 1188-4770. Dostupné z: [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/eng9920](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/eng9920)
- PETELKAU, H., 1984. Auswirkungen von Schadverdichtungen auf Bodeneigenschaften und Pflanzenenertrag sowie Massnahmen zu ihrer Minderung. *Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der Deutschen Demokratischen Republik*. (227), 25-34.
- PILLAI, P. S. – FIELDING-RUSSELL, G. S., 1986. Empirical Equations for Tire Footprint Area. *Rubber Chemistry and Technology* [online]. 59(1), 155-159 [cit. 2016-11-09]. DOI: 10.5254/1.3538183. ISSN 00359475. Dostupné z: <http://rubberchemtechnol.org/doi/abs/10.5254/1.3538183>
- PRIKNER, P., 2012. Vliv zatížených pneumatik na půdu. *Zemědělec: Odborný a stavovský týdeník* [online]. Profi Press s. r. o. [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <http://zemedelec.cz/vliv-zatizenych-pneumatik-na-pudu/>
- RAPER, R. L., 2005. Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics* [online]. 42(3-4), 259-280 [cit. 2016-04-10]. DOI: 10.1016/j.jterra.2004.10.010. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022489805000108>
- RASBAND, W. S., 2016. *ImageJ* [počítačový program]. Ver. 1.51h. USA: U. S. National Institutes of Health. Dostupné také z: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>. Open source počítačový program pro vědeckou analýzu obrázků.
- ROȘCA, R. – CÂRLESCU, P. – ȚENU, I., 2014. A semi-empirical traction prediction model for an agricultural tyre, based on the super ellipse shape of the contact surface. *Soil and Tillage Research* [online]. 141, 10-18 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1016/j.still.2014.03.007. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198714000506>
- SERRANO, J. M. – PEÇA, J. O. – SILVA, J. R. – MÁRQUEZ, L., 2009. The effect of liquid ballast and tyre inflation pressure on tractor performance. *Biosystems Engineering* [online]. 102(1), 51-62 [cit. 2016-11-06]. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2008.10.001. ISSN 15375110. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511008003000>
- SCHJØNNING, P. – LAMANDÉ, M., TØGERSEN, F. A. – ARVIDSSON, J. – KELLER, T., 2008. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. *Biosystems Engineering* [online]. 99(1), 119-133 [cit. 2016-11-09]. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2007.08.005. ISSN 15375110. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511007002176>
- SCHJØNNING, P. – STETTLER, M. – KELLER, T. – LASSEN, P. – LAMANDÉ, M., 2015. Predicted tyre-soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics. *Soil and Tillage Research* [online]. 152, 52-66 [cit. 2016-10-24]. DOI: 10.1016/j.still.2015.03.002. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198715000598>

- SCHWANGHART, H., 1991. Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. *Journal of Terramechanics* [online]. 28(4), 309-318 [cit. 2016-10-26]. DOI: 10.1016/0022-4898(91)90012-U. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/002248989190012U>
- SIMOES, R. P. – RAPER, R. L. – ARRIAGA, F. J. – BALKCOM, K. S. – SHAW, J. N., 2009. Using conservation systems to alleviate soil compaction in a Southeastern United States ultisol. *Soil and Tillage Research* [online]. 104(1), 106-114 [cit. 2016-06-01]. DOI: 10.1016/j.still.2009.01.004. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198709000178>
- SITKEY, G. – SÖHNE W., 1969. Beziehungen zwischen den Kenngrößen von Ackerschlepperreifen auf fester Fahrbahn. *Grundlagen der Landtechnik*. 19(2), 29-32.
- SMITH, D. L. O., 1985. Compaction by wheels: a numerical model for agricultural soils. *Journal of Soil Science* [online]. 36(4), 621-632 [cit. 2016-11-17]. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1985.tb00364.x. ISSN 00224588. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2389.1985.tb00364.x>
- SOANE, B. D. – DICKSON, J. W. – CAMPBELL, D. J., 1982. Compaction by agricultural vehicles: A review III. Incidence and control of compaction in crop production. *Soil and Tillage Research* [online]. 2(1), 3-36 [cit. 2016-10-12]. DOI: 10.1016/0167-1987(82)90030-7. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0167198782900307>
- SÖHNE, W., 1953. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundlagen der Landtechnik*. 5(5), 49-63.
- SÖHNE, W., 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agricultural Engineering*. 276-281.
- SOLTYNSKI, A., 1979. The mobility problem in agriculture. *Journal of Terramechanics* [online]. 16(3), 139-149 [cit. 2016-11-01]. DOI: 10.1016/0022-4898(79)90024-7. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022489879900247>
- STEINER, M. – SÖHNE W., 1979. Berechnung der Tragfähigkeit von Ackerschlepperreifen sowie des Kontaktflächenmitteldruckes und des Rollwiderstandes auf starrer Fahrbahn. *Grundlagen der Landtechnik*. 29(5), 145-180.
- TIM CHAMEN, W.C. – MOXEY A. – TOWERS W. – BALANA W. – HALLETT P., 2015. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research* [online]. 146, 10-25 [cit. 2016-10-17]. DOI: 10.1016/j.still.2014.09.011. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198714001901>
- TRAUTNER, A – ARVIDSSON, J., 2003. Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. *Soil and Tillage Research* [online]. 73(1-2), 107-118 [cit. 2016-06-07]. DOI: 10.1016/S0167-1987(03)00104-1. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198703001041>
- TRAUTNER, A., 2003. *On soil behaviour during field traffic*. Uppsala: Dept. of Soil Sciences, Swedish Univ. of Agricultural Sciences. ISBN 9157664048. Dostupné také z: <http://pub.epsilon.slu.se/219/>
- UPADHYAYA, S. K. – WULFSOHN, D., 1990. Relationship between tire deflection characteristics and 2-D tire contact area. *Transactions of the ASAE* [online]. 33(1), 0025-0030 [cit. 2016-11-01]. DOI: 10.13031/2013.31288. ISSN 21510059. Dostupné z: <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=31288&CID=t1990&v=33&i=1&T=1>

VAN DEN AKKER, J. J. H, 2004. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil and Tillage Research* [online]. 79(1), 113-127 [cit. 2016-11-13]. DOI: 10.1016/j.still.2004.03.021. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198704000960>

VAN DEN AKKER, J. J. H. – ARVIDSSON J. – HORN R., 2003. Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil and Tillage Research* [online]. 73(1-2), 1-8 [cit. 2016-05-31]. DOI: 10.1016/S0167-1987(03)00094-1. ISSN 01671987. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198703000941>

WAY, T. R. – KISHIMOTO T., 2004. Interface Pressures of a Tractor Drive Tyre on Structured and Loose Soils. *Biosystems Engineering* [online]. 87(3), 375-386 [cit. 2016-11-12]. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2003.12.001. ISSN 15375110. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511003002289>

WONG, J. Y., 2001. *Theory of ground vehicles*. 3rd ed. New York: John Wiley. ISBN 0471354619.

WONG, J. Y., 2010. *Terramechanics and off-road vehicles engineering*. Second edition. Kidlington, Oxford: Elsevier/BH. ISBN 9780750685610.

WULFSOHN, D. – UPADHYAYA S., 1992. Prediction of traction and soil compaction using three-dimensional soil-tyre contact profile. *Journal of Terramechanics* [online]. 29(6), 541-564 [cit. 2016-11-01]. DOI: 10.1016/0022-4898(92)90036-J. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/002248989290036J>

XIA, K., 2011. Finite element modeling of tire/terrain interaction: Application to predicting soil compaction and tire mobility. *Journal of Terramechanics* [online]. 48(2), 113-123 [cit. 2016-11-17]. DOI: 10.1016/j.jterra.2010.05.001. ISSN 00224898. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022489810000492>

Zemědělské pneumatiky: Technické informace, 2011. 11. vyd. Praha: MITAS a.s., 92 s.

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázky:

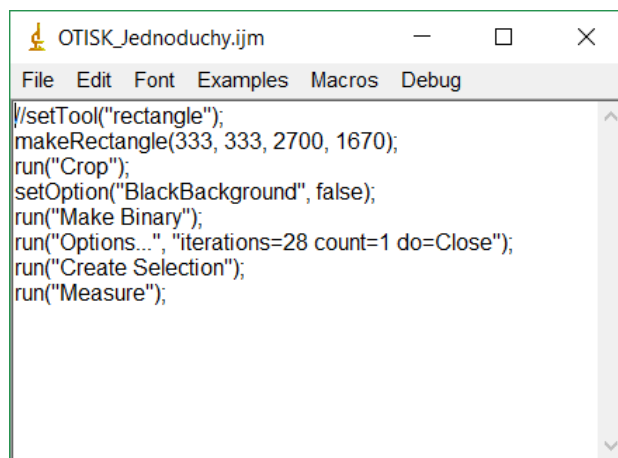
Obrázek 1 Vliv stupně kompakce půdy na výnos: a) cukrové řepy, b) bobu koňského	2
Obrázek 2 Organizace obdělávání pozemku při základním modulu 4 m technologie CTF	4
Obrázek 3 Příklad měřených (kruhové body) a teoretických (plná čára) obrysů styčných ploch pneumatiky 800/50R34 dle Schjønninga et al. (2008).....	7
Obrázek 4 Schwanghartův (1991) dvojrozměrný matematický model otisku pneumatiky pro výpočet délky styčné plochy l při průjezdu měkkou půdou	8
Obrázek 5 Tvary křivek superelipsy v prvním kvadrantu ortogonálního souřadnicového systému ($a = b = 1$; $n = 1, 2, 2.5, 3$ a 4)	9
Obrázek 6 Tvar kontaktní plochy mezi pneumatikou a půdou stanovené na základě superelipsy dle Hallonborga (1996)	10
Obrázek 7 Zpracovaná série 87 měření styčných ploch vybraných pneumatik pro regresní stanovení funkce $\alpha_A = \alpha_W^n$ s exponentem $n = 2/3$ nebo eventuálně $n = 1$	11
Obrázek 8 Průběh kontaktního tlaku mezi pneumatikou a tuhou podložkou	14
Obrázek 9 Příklad měřeného (nahore) a modelovaného (dole) rozložení kontaktního tlaku ve styčné ploše implement pneumatiky 650/65R30.5 na měkké půdě dle Schjønninga et al. (2008)	15
Obrázek 10 Distribuce kontaktního tlaku ve styčné ploše pneumatiky při různých vlhkostních podmínkách půdy	16
Obrázek 11 Model pro zjištění průběhu napětí v půdě pod bodovým zatížením pomocí polárního souřadného systému	16
Obrázek 12 Izobary znázorňující průběh napětí v půdě pod bodovým zatížením v závislosti na koncentračním faktoru v	17
Obrázek 13 Průběh napětí v půdě pod zatíženou pneumatikou v závislosti na koncentračním faktoru v	18
Obrázek 14 Model pro výpočet hlavního napětí v půdě pod rovnoměrně zatíženou kruhovou plochou.....	18
Obrázek 15 Laboratorní zařízení s testovanou pneumatikou Mitas 650/65R38 doplněné vybavením pro digitální záznam otisků a sadou pro regulaci tlaku huštění pneumatiky	26
Obrázek 16 Příklad jednoduchého (vlevo) a vícenásobného (vpravo) otisku pneumatiky Mitas 650/65R38 při tlaku huštění 80 kPa a zatížení 3000 kg	28
Obrázek 17 Snímek části obrazovky s programem Chdkptp při ovládní fotoaparátu přes rozhraní USB 2.0 během digitálního záznamu vícenásobného otisku pneumatiky Mitas 650/65R38 pro zatížení 3000 kg a tlak huštění 80 kPa.....	28
Obrázek 18 Snímek části obrazovky s programem ImageJ při tvorbě obrysu vícenásobného otisku a měření velikosti styčné plochy pneumatiky Mitas 650/65R38 při zatížení 3000 kg a tlaku huštění 80 kPa	29

Obrázek 19 Snímek části obrazovky s programem ImageJ při měření velikosti stykové plochy pneumatiky Mitas 650/65R38 při zatížení 3000 kg a tlaku huštění 80 kPa po použití vytvořeného makra.....	30
Obrázek 20 Příklad stanovení indexu FCC pneumatiky Mitas 650/65 R38 RD-03 pro standardizovanou jílovito-hlinitou půdu při provozním zatížení 2000 kg a tlaku huštění 100 kPa.....	34
Obrázek 21 Graf závislosti velikosti styčné plochy pneumatiky Mitas 650/65R38 na nominální a redukované nominální kombinaci zatížení a tlaku huštění.....	36
Obrázek 22 Graf naměřených velikostí styčných ploch pneumatiky Mitas 650/65R38 v závislosti na tlaku huštění při konstantním zatížení 1100, 2000 a 3000 kg	37
Obrázek 23 Série digitálních záznamů vícenásobných otisků pneumatiky Mitas 650/65R38 na tvrdé podložce při snižování tlaku huštění a konstantním zatížení 3000 kg	39
Obrázek 24 Série digitálních záznamů jednoduchých otisků pneumatiky Mitas 650/65R38 na tvrdé podložce při snižování tlaku huštění a konstantním zatížení 3000 kg	40
Obrázek 25 Graf závislosti plnosti otisku stykové plochy pneumatiky Mitas 650/65R38 na velikosti styčné plochy.....	41
Obrázek 26 Test normality dat plnosti otisku stykové plochy pneumatiky Mitas 650/65R38; (výstup StatSoft STATISTICA CZ 12)	42

Tabulky:

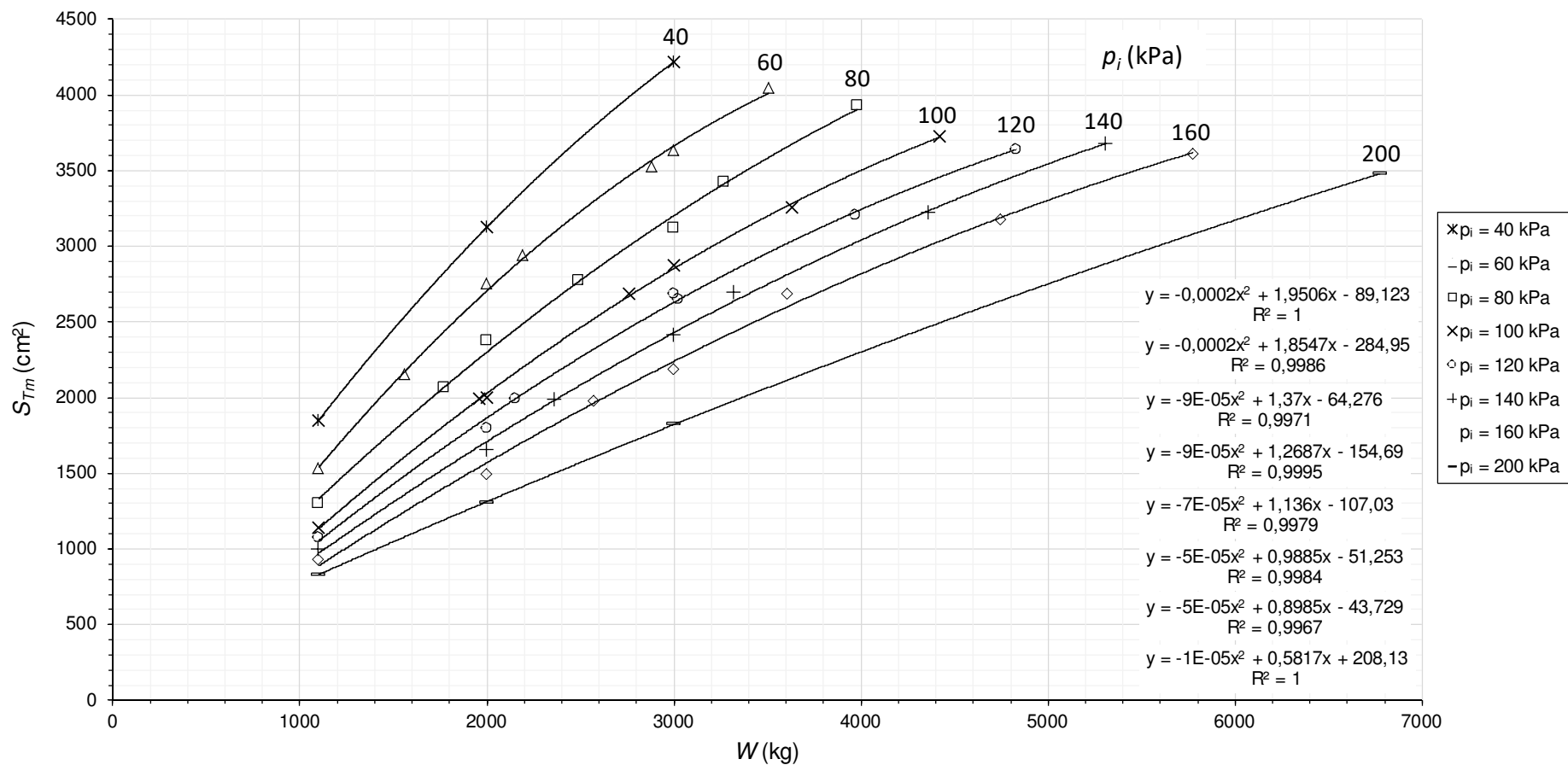
Tabulka 1 Mezní hodnoty významných vlastností pro zhutnělé půdy	3
Tabulka 2 Maximální doporučené střední kontaktní tlaky v závislosti na půdních podmínkách	5
Tabulka 3 Hodnoty koeficientů pružnosti c_0 stanovené Schwanghartem (1991) u vybraných měřených pneumatik v závislosti na tlaku huštění.....	8
Tabulka 4 Detailní informace testované pneumatiky Mitas 650/65R38.....	25
Tabulka 5 Naměřené hodnoty styčných a stykových ploch pneumatiky Mitas 650/65R38 pro katalogové a redukované kombinace zatížení a tlaku huštění.....	35
Tabulka 6 Naměřené velikosti styčných a stykových ploch testované pneumatiky Mitas 650/65R38 v závislosti na tlaku huštění při konstantním zatížení 1100, 2000 a 3000 kg.....	37
Tabulka 7 Porovnání originálního, teoretického a očekávaného kompakčního potenciálu CC-rating pneumatiky Mitas 650/65R38.....	43
Tabulka 8 Porovnání skutečného a teoretického provozního kompakčního potenciálu FCC pneumatiky Mitas 650/65R38 v závislosti na tlaku huštění při konstantním zatížení.....	45

Příloha 1 Zdrojový kód vytvořeného makra pro měření velikosti stykové plochy v programu ImageJ



```
OTISK_Jednoduchy.ijm
File Edit Font Examples Macros Debug
//setTool("rectangle");
makeRectangle(333, 333, 2700, 1670);
run("Crop");
setOption("BlackBackground", false);
run("Make Binary");
run("Options...", "iterations=28 count=1 do=Close");
run("Create Selection");
run("Measure");
```

Příloha 2: Graf všech naměřených hodnot velikostí styčných ploch testované pneumatiky Mitas 650/65R38 v závislosti na zatížení při daném tlaku huštění



Legenda: S_{Tm} – styčná plocha (měřená), W – zatížení pneumatiky, p_i – tlak huštění.