

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Bakalářská práce

**Teoretický model pro úpravu tlaku huštění zemědělských
pneumatik**

David Josef

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

David Josef

Inženýrství údržby

Název práce

Teoretický model pro úpravu tlaku huštění zemědělských pneumatik

Název anglicky

Theoretical model for adjusting the inflation pressure of agricultural tires

Cíle práce

Hlavním cílem práce je zhodnotit navržené parametry pro vytvoření modelu úpravy tlaku huštění pneumatik zemědělských pneumatik s ohledem na individuální kombinaci tlaku huštění a zatížení.

Metodika

1. Vypracování literární rešerše podle vědecké literatury a dalších technických podkladů.
2. Vyhodnocení charakteristické změny velikosti styčné plochy vybraných pneumatik v závislosti na změně zatížení, středního kontaktního tlaku a tlaku huštění.
3. Diskuze bude obsahovat zhodnocení získaných podkladů v kontextu současné úrovně algoritmů predikce.
4. Závěrečná část práce bude obsahovat možná doporučení autora.
5. Seznam použitých zdrojů.
6. Přílohy.

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

zemědělské pneumatiky, střední kontaktní tlak, tlak huštění, zatížení pneumatiky

Doporučené zdroje informací

GREČENKO, Alexandr; VYSOKÁ ŠKOLA ZEMĚDĚLSKÁ V PRAZE. TECHNICKÁ FAKULTA. *Vlastnosti terénních vozidel*. V Praze: Vysoká škola zemědělská, 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.

KOOLEN, A. J.; KUIPERS, H. *Agricultural soil mechanics*. Berlin ; New York: Springer-Verlag, 1983. ISBN 0387122575.

MCKYES, Edward. *Agricultural Engineering Soil Mechanics*. Amsterdam: Elsevier, 1989. ISBN 0-444-88080-1.

TERZAGHI, Karel; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. *Soil mechanics in engineering practice*. New York: Wiley, 1996. ISBN 978-0-471-08658-1.

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

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Patrik Prikner, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 15. 1. 2024

doc. Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 2. 2024

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 08. 02. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: "Teoretický model pro úpravu tlaku huštění zemědělských pneumatik" vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

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

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou 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 1. dubna 2024

.....

David Josef

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce bylo zhodnocení navržených parametrů pro vytvoření modelu úpravy tlaku huštění zemědělských pneumatik s ohledem na jednotlivé kombinace tlaku huštění a zatížení ve snaze minimalizovat zhutnění půdního povrchu. V rešeršní části této práce byly popsány různé přístupy pro stanovení velikosti styčné plochy pneumatiky na měkkém i tvrdém povrchu. Dále byly popsány vztahy mezi konstrukčními parametry zemědělských pneumatik a velikostí plochy otisku při průjezdu terénem. Metodická část studie popisuje postup měření a použité laboratorní vybavení, které umožnilo získat data o velikostech styčných a stykových ploch dvou různých typů radiálních zemědělských pneumatik. Tyto údaje byly získány pro různé kombinace nominálního tlaku huštění a jmenovitého zatížení. Následné vyhodnocení těchto dat umožnilo podrobně analyzovat chování pneumatik na různých typech povrchů, zatíženích a tlaků huštění. Výsledky z měření byly porovnávány s vypočtenými hodnotami. Pro toto srovnání byl využit empirický model, který umožňuje odhadnout velikost styčné plochy pneumatiky na měkkém i tvrdém terénu. Validace tohoto modelu proběhla porovnáním naměřených výsledků s vypočtenými hodnotami. Získaná data byla dále použita pro výpočet a porovnání indexu kompakčního potenciálu označeného jako SCE index (Soil Compaction Effect). Diskuse rovněž obsahuje autorova doporučení týkající se dané problematiky, která vychází z dosažených výsledků.

Klíčová slova: zemědělské pneumatiky, styčná plocha, střední kontaktní tlak, tlak huštění, zatížení pneumatiky, zhutnění půdy

Summary

The aim of this bachelor thesis was to evaluate the proposed tyre parameters for the model which may recommend the correct level of inflation pressure of agricultural tyres for various combinations of inflation pressure and load to minimize soil compaction. The literature review described various approaches for determining the contact area of tyres on both hard and soft surface. Furthermore, relationships between the parameters of agricultural tyres and the size of the footprint area on soil surface were described. The methodological part of the study describes the measurement procedure and the laboratory equipment used to obtain data on the sizes of contact and contact patch areas of two different types of radial agricultural tyres. Results were obtained for individual combinations of nominal inflation pressure and load. Subsequently, evaluation allowed analysis of tyre contact area change on different soil type, load and inflation pressure. The measurement results were compared with calculated values using the empirical model which allowed the estimation of the tyre contact area on both soft and hard surface. Validation of the model, comparison of measured and predicted values was used for the estimation and comparison of results marked as the tyre Soil Compaction Effect - SCE index. The discussion includes the author's recommendations regarding the issue at hand, based on the achieved results.

Keywords: agricultural tyres, contact area, mean contact pressure, inflation pressure, tyre load, soil compaction

Obsah

1	Úvod	1
2	Styčná plocha pneumatiky	2
2.1	Styčná plocha pneumatiky na měkkém povrchu	2
2.2	Stanovení styčné plochy pneumatiky na tvrdém povrchu	10
2.3	Stanovení styčné plochy pneumatiky na měkkém povrchu	19
3	Cíl práce	22
4	Metodika práce	23
4.1	Vzorky měření	23
4.2	Měřicí zařízení a postup měření na měkkém povrchu.....	24
4.3	Postup měření na pevném povrchu.....	25
4.4	Metodika pro výpočet styčné plochy pneumatiky	25
4.4.1	Výpočet styčné plochy na měkkém povrchu	26
4.4.2	Výpočet kompakčního indexu SCE.....	32
5	Výsledky a diskuse	34
5.1	Vyhodnocení styčné plochy na měkkém povrchu	34
5.2	Diskuse	40
6	Závěr	42
	Seznam použitých zdrojů	43

Nomenklatura

Zkratky:

AR	profilové číslo (angl. Aspect Ratio), (-)
a	součinitel poměrného prodloužení vyjadřující poměrnou změnu r_{sx} v závislosti na diferenci odvalených obvodů pneumatiky, (-)
b_t	šířka styčné plochy, (cm)
b_{fTP}	šířka dezénu pneumatiky, (cm)
b_0, b_{IC}	jmenovitá šířka profilu pneumatiky, (cm)
c	koeficient zohledňující druh zeminy při výpočtu styčné plochy, (-)
C	normálová tuhost bočnice, ($\text{kN}\cdot\text{cm}^{-1}$)
C_M	maximální tuhost bočnice, ($\text{kN}\cdot\text{cm}^{-1}$)
C_N	nominální tuhost bočnice, ($\text{kN}\cdot\text{cm}^{-1}$)
D_{Stc}	průměr otisku styčné plochy, (cm)
D	stupeň zhutnění, (%)
d	jmenovitý vnější průměr pneumatiky, (cm)
d_t	vnější průměr pneumatiky, (cm)
E	modul pružnosti, (Pa)
f	deformace pneumatiky, (cm)
f_M	maximální deformace pneumatiky, (cm)
f_{M10}	maximální deformace pneumatiky při rychlosti $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, (cm)
f_{N30}	nominální deformace pneumatiky při rychlosti $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, (cm)
f_x	individuální deformace pneumatiky, (cm)
f_{x10}	individuální deformace pneumatiky při rychlosti $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, (cm)
f_p	poměrná deformace pneumatiky, (cm)
G	modul pružnosti ve smyku, (Pa)
g	gravitační zrychlení, ($9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)
h	výška profilu pneumatiky, (cm)
h'_t	změněná výška profilu pneumatiky při deformaci pneumatiky, (cm)
k	součinitel závislý na parametrech zeminy, (-)
k'_{PDm}	hodnota inverzní k plnosti dezénu, (-)
L_1, L_2	délka styčné plochy, (cm)
l_{TP}	vzdálenost šípů ve středové ose pneumatiky pro zatížený odvalený obvod, (cm)
l_0	vzdálenost šípů při nezatíženém stavu, (cm)
l_Z	vzdálenost šípů při zatíženém stavu, (cm)
n_T	počet párů šípů, (-)

O_o	volný obvod, (cm)
O_z	zatížený odvalený obvod, (cm)
p_i	tlak huštění pneumatiky, (kPa)
q_{tcT}	střední kontaktní tlak na tvrdém povrchu, (kPa)
q_{tcM}	střední kontaktní tlak na měkkém povrchu, (kPa)
r_o	katalogová hodnota statického poloměru pneumatiky, (cm)
r_s	statický poloměr pneumatiky, (cm)
r_{sm}	statický poloměr pneumatiky odpovídající maximální deformaci f_x snížený o výšku šípu, (cm)
r_{sx}	statický poloměr pneumatiky odpovídající maximální deformaci f_x , (cm)
S	styčná plocha pneumatiky, (cm ²)
S_j	velikost jmenovité styčné plochy pneumatiky, (cm ²)
S_T	velikost teoretické styčné plochy pneumatiky, (cm ²)
S_{mT}	naměřená velikost styčné plochy pneumatiky na tvrdém povrchu, (cm ²)
S_{tc}	vypočtená velikost styčné plochy pneumatiky na tvrdém povrchu, (cm ²)
S_{TN}, S_{m}	velikost styčné plochy pneumatiky pro jmenovité katalogové zatížení a odpovídající kombinaci tlaku huštění, (cm ²)
S_{Tx}	velikost individuální styčné plochy pneumatiky pro libovolnou kombinaci zatížení a tlaku huštění, (cm ²)
S_{mM}	naměřená velikost styčné plochy pneumatiky na měkkém povrchu, (cm ²)
S_{tcM}	vypočtená velikost styčné plochy pneumatiky na měkkém povrchu, (cm ²)
ΔS_{ts}	nárůst plochy v přední a zadní části otisku dezénu na měkkém povrchu, (cm ²)
$S_{ts\ 0,5}$	nárůst plochy v přední části otisku dezénu na měkkém povrchu, (cm ²)
$S_{tc\ KPD}$	nárůst plochy v zadní části otisku dezénu na měkkém povrchu, (cm ²)
SRI	index statického poloměru (static radius index), (-)
t	výška šípu, (cm)
W	zatížení pneumatiky, (kg)
$W_{N10/30}$	nominální katalogové hodnoty zatížení pro rychlost 10 a 30 km.h ⁻¹ , (kg)
z	hloubka stopy, (cm)
α	koeficient zohledňující potenciální navýšení délky styčné plochy, (-)
α_A	poměr skutečné a jmenovité velikosti styčné plochy, (-)
α_W	poměr skutečného a jmenovitého zatížení pneumatiky, (-)
β	koeficient elipticity styčné plochy, (-)
ε_d	koeficient deformace pneumatiky, (-)
ν	standardní poměr mezi hodnotami skutečné šířky dezénu b_{tTP} a hodnotě uvedené v katalogu pneumatik b_{tc} , (-)
ρ_d	objemová hmotnost suchá (redukovaná), (kg·m ⁻³)

$\rho_{d,p}$	objemová hmotnost standardizovaná, ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ_{ds}	průměrná objemová hmotnost suchá (redukovaná), ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ_{dl}	kritická objemová hmotnost suchá, ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
σ	normálové napětí v půdě, (kPa)
τ	smykové napětí, (kPa)
N	měrný objem při $p = 1 \text{ kPa}$ ($\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)
λ_n	index komprese, (-)
κ	index rekompresce, (-)
ν	Poissonův poměr, (-)
δ	relativní odchylka, (%)
ψ	koeficient deformace, (-)

1 Úvod

V současné době se v globálním měřítku v oblasti zemědělství objevují nové komplexní výzvy a moderní systémy. Jedním z hlavních úkolů je zajištění dostatečného množství potravin pro neustále rostoucí světovou populaci, a to v kombinaci s minimalizací negativních důsledků ztráty zemědělské a orné půdy. WWP (World Population Prospects, 2022) uvádí, že lze očekávat nárůst světové populace na hodnotu od 9,4 do 10 miliard v příštích 25 letech. S tím souvisí rostoucí tlak na produkci potravin a obnovitelných zdrojů energie.

V tomto kontextu byly aplikovány poznatky podle výzkumu dynamiky vozidel v terénu z USA a SSSR (Reece, 1964; Bekker, 1962; Ivanov, 1950). Od počátku 60. let minulého století byl predikován nárůst požadavků na zemědělskou techniku (Söhne, 1958), který doporučoval analýzu a definici vztahů mezi trakcí, výkonem a technickými parametry vozidel. Tyto postupy byly založeny na klasické mechanice zemin a testech průjezdnosti vozidel v terénu.

Současně s nárůstem požadavků na zemědělskou techniku roste i důležitost hodnocení provozu zemědělských tahačů, zejména s ohledem na konstrukci pojezdového ústrojí. Zemědělské tahače patří k významné skupině mechanizace, která vyžaduje neustálé zdokonalování a testování v provozních podmínkách.

Jedním z klíčových faktorů, které mohou ovlivnit výkonnost zemědělské mechanizace, je velikost a rozměry pneumatik a styčné plochy pneumatiky, která snižuje měrné kontaktní tlaky na půdní povrch. Tato plocha má významný vliv na kompakci půdy a napětí v ní, což může ovlivnit výnos plodin a další vlastnosti půdy. Významný parametr velikost styčné plochy pneumatiky může být využitý k predikci jejího potenciálního kompakčního efektu půdního profilu.

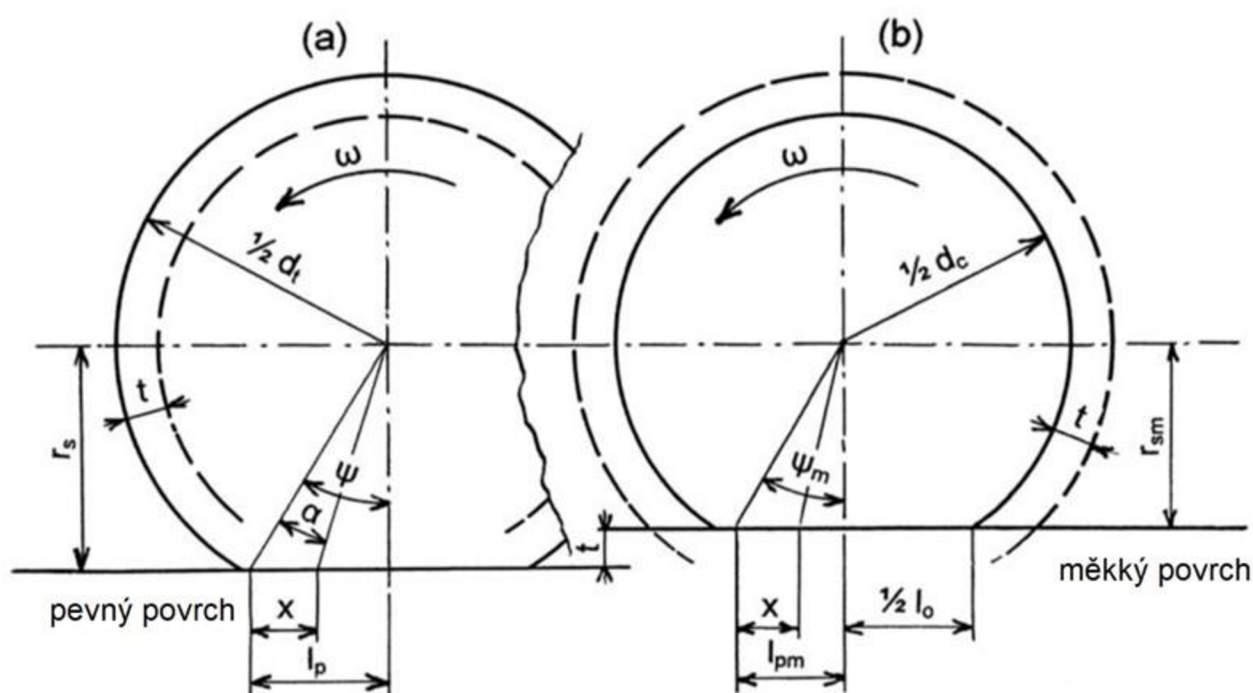
Vzhledem k rostoucím výkonnostem zemědělské techniky a současným trendům v zemědělství je třeba hledat šetrnější a efektivnější systémy pro zachování a udržitelnost příznivého stavu půdního prostředí. Tento úvodní přehled podtrhuje význam vhodného výběru pro testování pneumatik určených zejména pro těžkou zemědělskou mechanizaci a vlivu na půdní strukturu i v kontextu systémů moderního zemědělství.

2 Styčná plocha pneumatiky

2.1 Styčná plocha pneumatiky na měkkém povrchu

Pro vyjádření velikosti plochy otisku dezénu pneumatiky, která se vytvoří na měkkém povrchu, se používá výrazů styčná a styková plocha. Styková plocha je pouze plocha šípů pneumatiky v přímém kontaktu s podložkou a styčná plocha naopak popisuje celou plochu, kterou pneumatika vytváří měrné tlaky na půdní povrch.

Grečenko (2010) zakládá svou teorii na konceptu compaction-sliding (CS), kde uvádí, že pohyb pneumatiky na měkké podložce nejprve způsobí stlačení půdy v horizontální rovině a rozdělí půdu na segmenty mezi šípů pneumatiky. Toto stlačení je doprovázeno třením mezi pneumatikou a půdou. K největšímu stlačení dochází v zadní části styčné plochy. Nakonec stlačení vyvolá sříhové namáhání segmentů půdy mezi šípů.



Obrázek 1: Schéma pohybu kola s pneumatikou: (a) na pevný podklad; (b) na měkký povrch,

Zdroj: Grečenko (2010), (upraveno)

Hnací ústrojí je schopno dokonale přenést hnací výkon na povrch pouze na dokonale přilnavém povrchu, ovšem v terénních podmínkách musí čelit variabilitě půdního povrchu, kde dochází k prokluzu pneumatiky. Výsledná reálná tahová síla, kterou je schopno pojezdové ústrojí přenášet na půdu, vychází z rozdílu naměřené a okamžité tahové síly a vnitřním valivým odporem pneumatiky. Celkový hnací potenciál pneumatiky je pak získán postupným sečtením

jednotlivých dílčích reakcí v segmentech půdy. Tyto veličiny jsou ovlivněny zejména velikostí pneumatiky, zatížením, tlakem huštění, tvarem a hustotou dezénu, úhlem šípů, stoupáním terénu a výškou dezénu. Díky těmto poznatkům je možné stanovit záběrovou a prokluzovou charakteristiku pneumatiky. Získané parametry jsou výhodné při hodnocení trakčních vlastností progresivních konstrukcí a typů pneumatik. Pro hodnocení trakce pneumatik se nabízí přístup CS (compaction-sliding) zjednodušenou verzí vzorců pro tah a prokluz, známou jako G-funkce. Jeho podstata souhlasí s CS a je snadno použitelná pro posuzování trakčních vlastností pneumatik, (Grečenko, 2010).

Grečenko (2006) uvažuje, že se hnací pneumatika s nakloněnými šípů pohybuje po měkkém ulehlém terénu a vytváří kolej, přičemž šípů pronikají do půdy až do své plné výšky, resp. hloubky t . To znamená, že se plášť pneumatiky o vnějším volném průměru d_t odvaluje s odhadovaným průměrem d_c (viz Obr. 1):

$$d_c = d_t - 2t \quad (1)$$

Jako důsledek tohoto zjištění je nutné upravit statický poloměr r_s na r_{sm} :

$$r_{sm} = r_s - t \quad (2)$$

Plocha styku pneumatiky S_o s měkkým povrchem se dá vyjádřit pomocí vzorce:

$$S_o = \frac{k}{4} b_o l_o = \frac{k}{4} b_o \sqrt{d_c^2 - 4r_{sm}^2} \quad (3)$$

Styková šířka plochy b_o na měkkém povrchu sleduje šířku pneumatiky b_t na tvrdém povrchu, nicméně se přepokládá, že b_o bude o 10% menší než šířka pneumatiky b_t . Délku této oblasti můžeme vyjádřit z rovnice (3):

$$l_o = \left(\frac{d_c^2}{4r_{sm}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Hodnotu koeficientu k , který určuje tvar plochy styku S_o , volíme od 3,14 (pro tvar elipsy) do 4 (pro tvar obdélníku), (Grečenko, 2010).

Tato teorie pracuje s modelem plochy S_o ve tvaru obdélníku bez změny šířky b_o a musí být následně upravena délka l_o na l_{om} podle:

$$l_{om} = \frac{S_o}{b_o} = k \frac{l_o}{4} \quad (5)$$

, a výpočet poloviny kontaktní plochy l_{pm} (viz Obr. 1b) má tvar:

$$l_{pm} = \frac{l_{om}}{2} \quad (6)$$

Statický poloměr r_s modifikovaný na r_{sm} (rce 2) a l_{pm} udávají vzájemný vztah pro korekci normály kontaktní plochy:

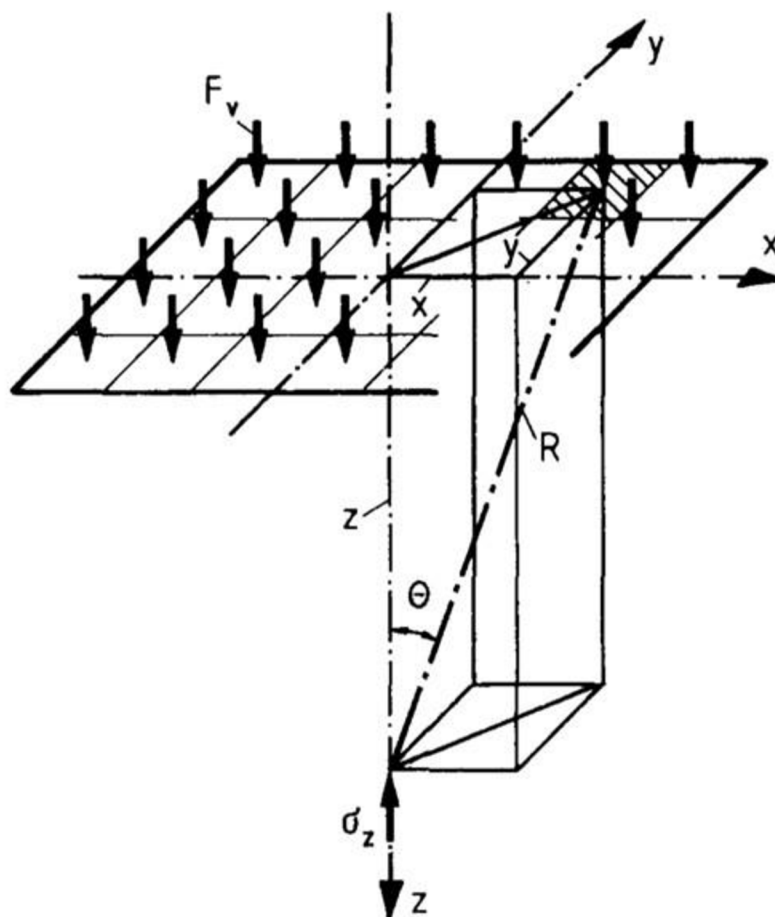
$$\psi_m = \arctan \frac{l_{pm}}{r_{sm}} \quad (7)$$

Poloviční velikost šířky kontaktní plochy je vyjádřena:

$$b_p = \frac{b_o}{2} \quad (8)$$

, takže celkovou velikost kontaktní plochy získáme použitím b_p a l_{pm} v následující rovnici:

$$S_o = 4b_p l_{pm} \quad (9)$$



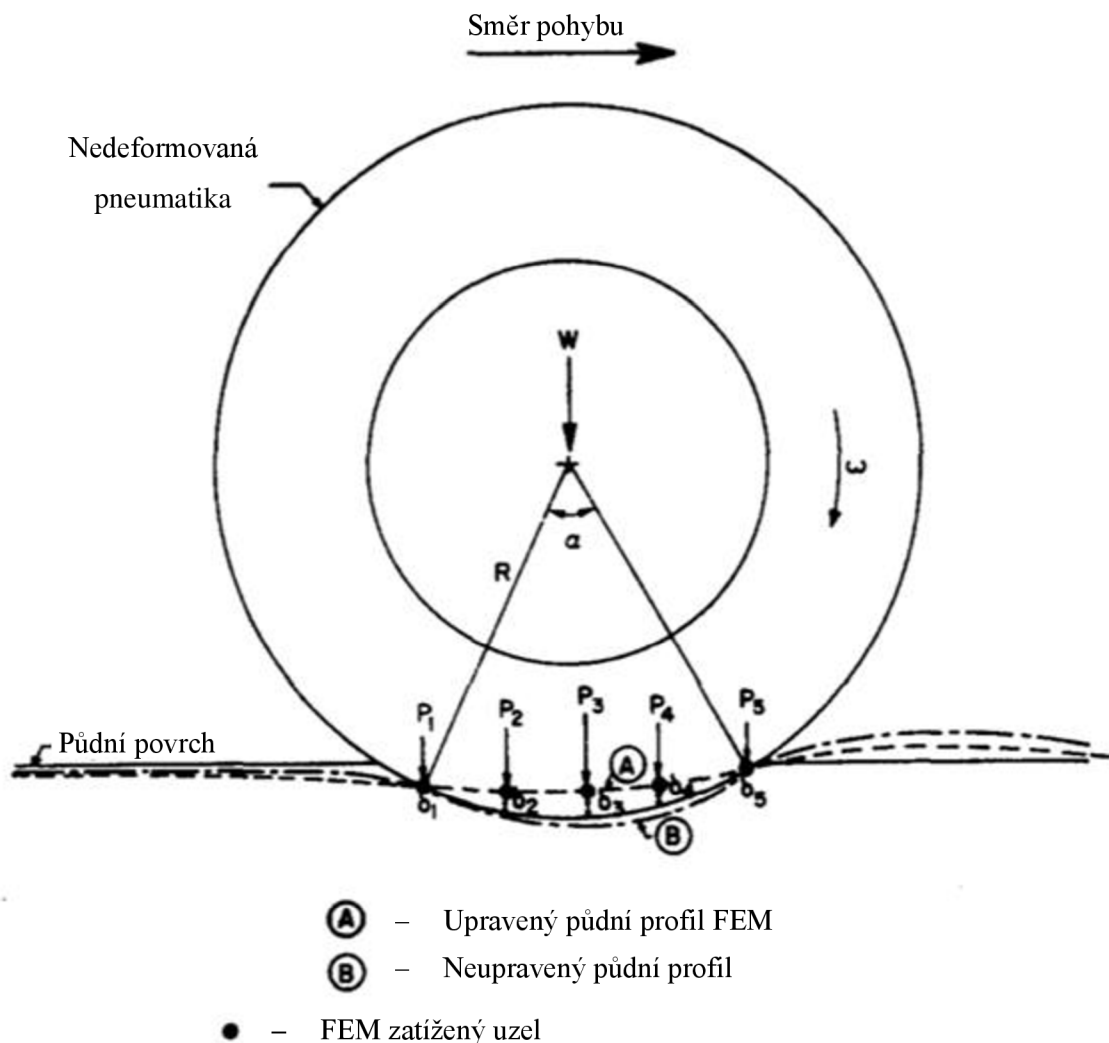
Obrázek 2: Styková kontaktní plocha obdélníkového tvaru a analýzou zatížení při stanovení vertikálního napětí. Zdroj: Schwanghart (1991), (upraveno)

Individuální přístupy vycházejí z hypotézy, že kontaktní plocha na tvrdém povrchu vykazuje stejné hodnoty, jako její otisk na měkkém povrchu. Tento přístup platí pouze na počátku přejezdu a za předpokladu, že hodnota deformace na tvrdém i na měkkém povrchu je identická, (Bekker, 1962).

Bekker ve svých výpočtech využíval vlastností homogenního půdního profilu. Ve skutečnosti však je půdní profil heterogenní a jeho skutečné parametry nelze přesně matematicky vyjádřit pomocí empirických vztahů. Zjednodušením kontaktní plochy na obdélníkový tvar, Yong et al. (1978) vyjadřuje pneumatiku při pohybu válcovým tvarem. Uvažovaný válec simulující pneumatiku při kontaktu s půdou nevytváří deformaci jako plášť pneumatiky a styčná plocha je jako obdélník. Šířka pak reprezentuje část nekonečně velké kružnice s délkou l , která je stanovena:

$$l = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{4W}{\pi \left(\frac{l}{2}\right)^2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (10)$$

, kde R_1 značí poloměr pneumatiky k místu dotyku s půdou v zadní části a R_2 značí stejný poloměr v přední části; ν_1 a ν_2 jsou Poissonovy konstanty; W (N) značí zatížení, E_1 a E_2 představují moduly pružnosti pro pneumatiku a půdu, (Yong et al., 1978).



Obrázek 3: Stanovení deformace pneumatiky. Zdroj: Yong et al. (1978), (upraveno)

McKyes (1985) představil alternativní přístup, který vychází z empirických vztahů. Tento postup spočívá v určení délky kontaktní plochy pneumatiky na základě hloubky, do které se zatížená pneumatika zaboří o více než 5 % poloměru pneumatiky, avšak nelze jej aplikovat

pro všechny velikosti pneumatik. Délku kontaktní plochy lze poté stanovit pomocí následující rovnice:

$$l = \frac{d}{2} \quad (11)$$

S podobným přístupem přichází Komandi (1990), kde jsou navíc zahrnuty i parametry pneumatiky:

$$S = c W^{0,7} \left(\frac{b_0}{d}\right)^{0,5} p_i^{-0,45} 10^{-4} \quad (12)$$

, kde konstanta c identifikuje půdní typ: jílovito-hlinité půdy $c = 3 - 3,2$; strniště $c = 3,6 - 3,8$; suchý písek $c = 4,2 - 4,4$.

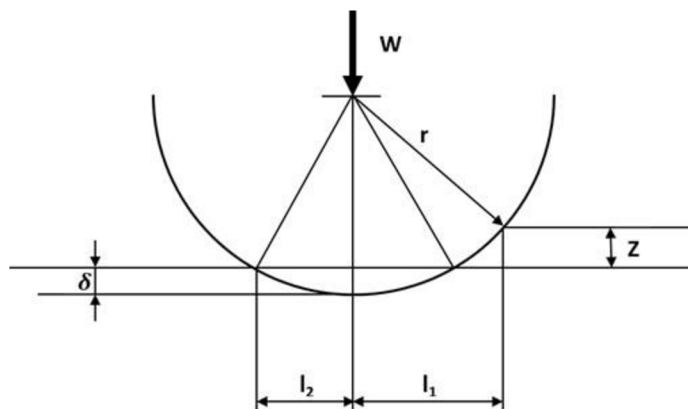
Schwanghart (1991) stanovil způsob výpočtu styčné plochy pro měkký povrch na základě zjednodušené Bekkerovy rovnice:

$$S = \beta l b \quad (13)$$

, pokud empirický β – koeficient elasticity dosahuje pro měkké půdy $0,75 - 0,80$.

Délka l úseku kontaktní plochy (viz Obr. 4) závisí na průměru pneumatiky d , deformaci δ a hloubce stopy z podle následujícího vztahu:

$$l = l_1 + l_2 = \sqrt{[d(z + \delta) - (z - \delta)^2 + (d \delta - \delta^2)]} \quad (14)$$



Obrázek 4: Geometrický rozbor pneumatiky zahloubené do půdy.

Zdroj: Schwanghart (1991), (upraveno)

Hloubku stopy z lze určit podle zjednodušené Bekkerovy rovnice pomocí mechanických parametrů zeminy:

$$z = \left(\frac{q}{k}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (15)$$

, kde q zastupuje kontaktní tlak a součinitel k závisí na parametrech zeminy.

Využitím poměru aktuálního zatížení W a jmenovitého zatížení W_j lze vyjádřit proměnou šířku styčné plochy b následovně:

$$b = b_0 + b_1 \frac{W}{W_j} \quad (16)$$

, kde pro b_1 platí: $b_1 = 3 - 5$ (cm); b_0 značí jmenovitou šířku pneumatiky.

K výpočtu kontaktní plochy lze také přistoupit pomocí analytických vztahů, jako např. Disserens (2009). Tato metoda využívá lineární regrese k odvození vztahu pro výpočet kontaktní plochy pneumatiky, který zohledňoval její konstrukci. Tento vztah lze vyjádřit lineární rovnicí:

$$S = a b_0 d \quad (17)$$

, kde a je konstanta zohledňující různé typy pneumatik D/R.

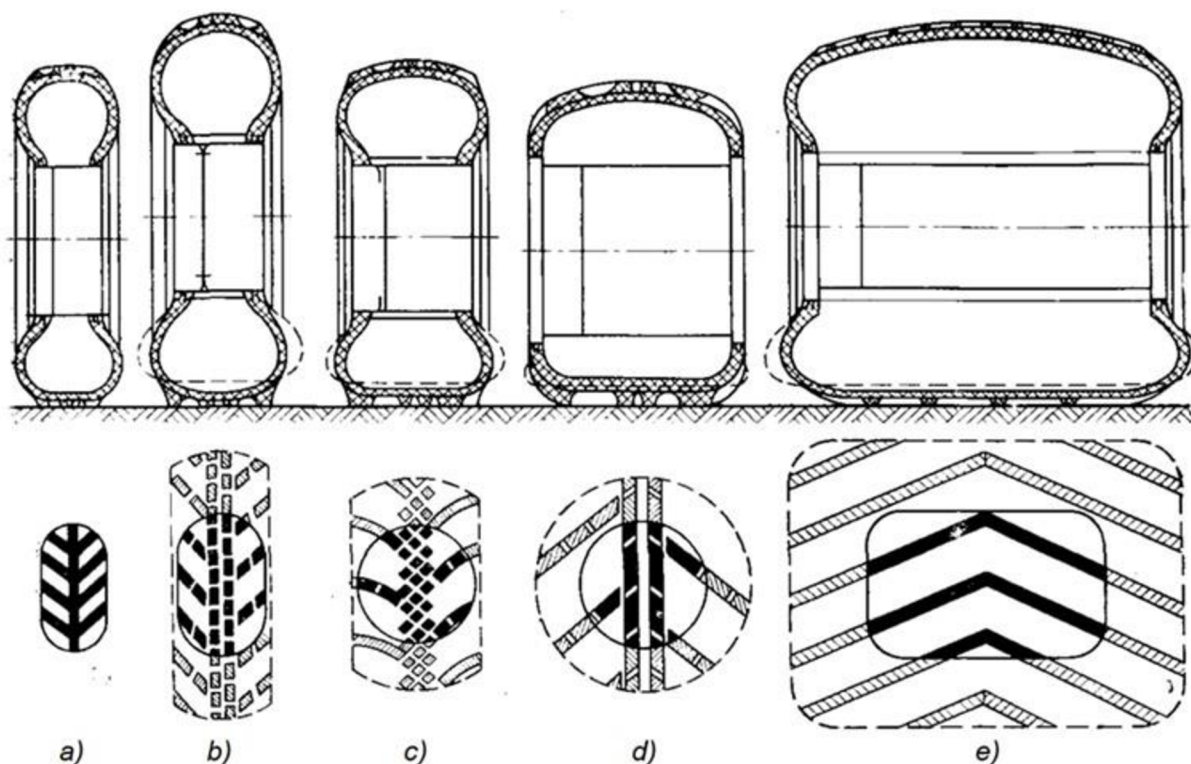
Podrobnější výpočet, který zahrnuje tlak huštění a zatížení, je formulován následovně:

$$S = (a b_0 d) + (e W) + (c p_i) + C \quad (18)$$

, kde e a c představují parametry pro konkrétní typy pneumatik podobně jako a ; C je konstanta. Tyto rovnice však mají omezené využití kvůli nehomogenitě povrchu půdy a jejich aplikace v praxi je vhodná spíše pro výpočet kontaktních ploch na povrchu typu pastviny nebo louky, (Disserens, 2009).

2.2 Stanovení styčné plochy pneumatiky na tvrdém povrchu

Pro různé typy pneumatik na tvrdém povrchu při nominálním tlaku huštění může mít skutečný obrys styčné plochy tvar elipsy, kruhu nebo obdélníku (viz Obr. 5).



Obrázek 5: Terénní pneumatiky: a) nízkotlaké; b) toroidní s nastavitelným tlakem huštění; c) širokoprofilové s nastavitelným tlakem huštění; d) typu lypoid; e) válcové.

Plná čára označuje styčnou plochu při nominálním tlaku huštění, přerušovaná čára označuje tuto plochu při minimálním tlaku huštění. Zdroj: Agejkin (1981), (upraveno)

Bekker (1962) ve své studii stanovil styčnou plochu pneumatiky na základě čtyřúhelníku o stranách b a l zmenšeným o 15 %:

$$S = 0,85lb \quad (19)$$

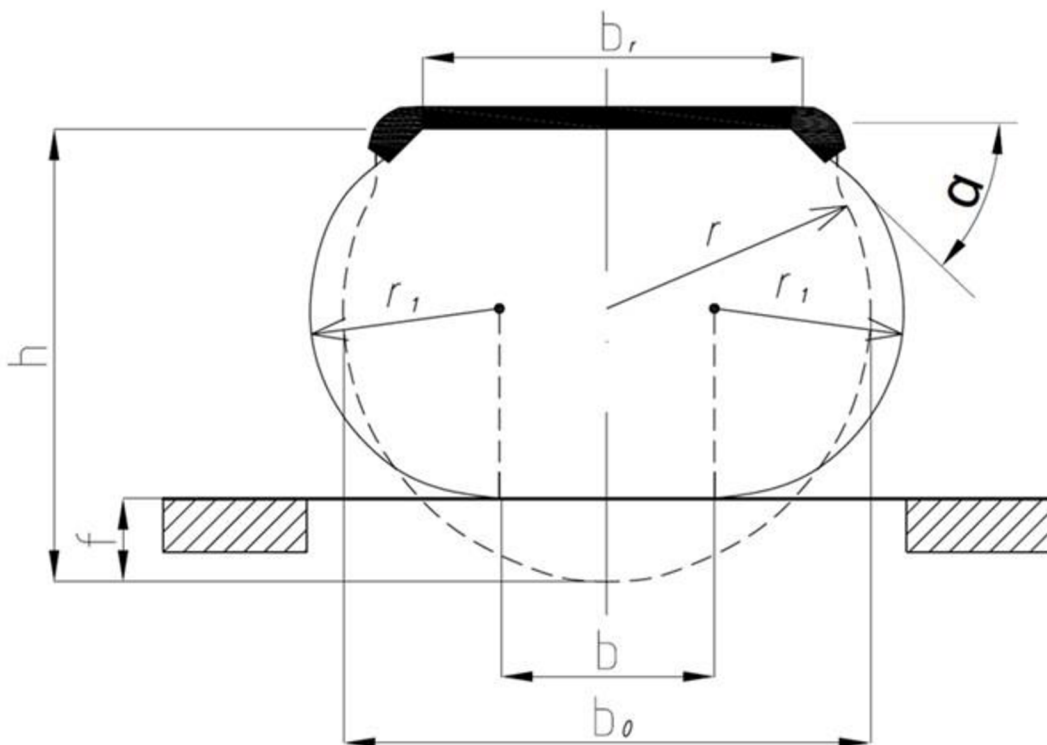
, kde b (cm) je šířka a l (cm) je délka styčné plochy.

Bekker (1962) stanovil šířku b na základě geometrického příčného průřezu pneumatiky (viz Obr. 6). Rovnice (20) předpovídá šířku styčné plochy b , když uvažuje změnu výšky pneumatiky f po zatížení, úhel α svírající prostor mezi rovinou ráfku, tečnou k bočnici, šířku ráfku b_r a nominální šířku profilu b_0 :

$$b = b_0 \frac{\zeta(\pi - \alpha) - (\pi - \sin^{-1} \psi) \sin \alpha}{\pi - \alpha - \sin \alpha} \quad (20)$$

, potom ψ jako poměr šířky ráfku pneumatiky a nominální šířky profilu bez zatížení vychází z následující rovnice:

$$\psi = \frac{b_r}{b_0} \quad (21)$$



Obrázek 6: Parametry průřezu pneumatiky. Zdroj: Markova (2018)

Empirická predikce velikosti jednotlivých ploch pneumatiky na základě katalogových dat byla aplikována při hodnocení kompakčního potenciálu pneumatik (Grečenko a Prikner, 2014). Tato predikce (Grečenko, 1995) byla modifikována pro stanovení individuální kontaktní plochy pneumatiky, (Prikner et al., 2017).

Pro hodnocení kompakčního potenciálu pneumatik byla plocha otisku pneumatiky nahrazena kruhovým tvarem a stejnou plochou. Tímto způsobem byla stanovena metodika hodnocení potenciálního účinku pneumatiky na půdní profil (CC – rating) a dále posouzena vhodnost různých velikostí pneumatik pro práci v polních podmínkách s ohledem na skutečné

zhutnění pŕdy. Využitím rovnice SGP (Surface – Grečenko – Prikner) lze stanovit pouze nominální plochu kontaktu pneumatiky S_T na základě rozměrů pneumatik uvedených v technických katalozích výrobců, které obvykle odpovídají oficiálním normám (např. ETRTO, 2008). Rovnice SGP má tvar:

$$S_T = c b_{tc} \sqrt{d_t^2 - 4r_s^2} = (0,927 + 0,761AR - 1,215AR^2) b_{tc} \sqrt{d_t^2 - 4r_s^2} \quad (22)$$

, a empiricky stanovený c jako faktor měřítka závislý na AR (poměr výšky k šířce pneumatiky); $AR = (d_t - d_r)/2b_{tc}$ (-); b_{tc} katalogová hodnota šířky pláště pneumatik; d_t značí vnější průměr a d_r vnější průměr pro staticky zatíženou pneumatiku; r_s pak statický poloměr zatížení (Prikner et al., 2019).

Původní odhad velikosti individuální kontaktní plochy pneumatiky byl navržený jako předpověď skutečné (aktuální) plochy otisku pneumatiky S_{Tx} a využívala rozměrové parametry pneumatiky při různých kombinacích zatížení a huštění. Tento přístup vyžaduje posouzení tuhosti pneumatiky C , úpravu faktoru měřítka $c = f(AR, p_i)$ a pro moderní trakční pneumatiky také parametr tuhosti bočnice κ pomocí rovnice:

$$\kappa = \frac{C_N}{C_M} \quad (23)$$

, potom C_N jako nominální tuhost boční stěny pneumatiky se získá pro maximální tlak huštění a odpovídající zatížení W_{N30} (rychlost 30 km.h⁻¹):

$$C_N = \frac{W_{N30} g}{f_{N30}} \quad (24)$$

, kdy f_{N30} jako nominální deformace při rychlosti 30 km.h⁻¹, odpovídá pro $r_s = f(w, p_i)$; (ETRTO, 2008):

$$f_{N30} = \frac{d_t}{2} - r_s = r_t - r_s \quad (25)$$

Průběh parametru C_M (maximální tuhost pneumatiky) je popsán funkcí $C_M = f(W_{10}, f_{N30})$, pro rychlosti $10 \text{ km.h}^{-1} / 30 \text{ km.h}^{-1}$. Tato funkce využívá nominální deformaci bočnice f_{N30} získaného z přechozí rovnice (25):

$$C_M = \frac{W_{N10} g}{f_{N30}} \quad (26)$$

Využitím parametrů určujících jmenovitou a maximální hodnotu tuhosti boční stěny pneumatiky pro obě rychlosti 10 a 30 km.h^{-1} , je vyjádřena individuální deformace pneumatiky:

$$f_X = \frac{\Delta W g}{C_M} = \frac{\text{abs}|W_X - W_{30}| g}{C_M} \quad (27)$$

, kde rozdíl zatížené pneumatiky ΔW je absolutní rozdíl individuálního a nominálního zatížení pneumatiky (Prikner et al., 2019).

Zpětné ověření rovnice SGP (viz rce 22), pak je nezbytné provést odhad koeficientu deformace ψ . Tento parametr charakterizuje změnu šířky dezénu pneumatiky b_{tTP} v závislosti na individuální deformaci pneumatiky pomocí katalogové hodnoty šířky pneumatiky b_{tC} . Pro každou individuální deformaci f_X je koeficient deformace pneumatiky ψ vyjádřen následujícím způsobem:

$$\psi = \frac{f_X}{b_{tC}} = \frac{\Delta W}{C_N b_{tC}} \quad (28)$$

Empirický model předpovídá šířku dezénu pneumatiky b'_{tTP} na tvrdém povrchu následovně:

$$b'_{tTP} = \frac{1}{AR} f_{x10} \ln(\psi) + b_{tC} \quad (29)$$

, kde AR je poměr stran pneumatiky, f_{x10} maximální deformace pneumatiky pro rychlost 10 km.h^{-1} a ψ je koeficient deformace pneumatiky, b_{tC} představuje katalogovou hodnotu šířky dezénu pneumatiky.

Nicméně, na tvrdém povrchu, rovnice (29) nedokáže předpovědět změnu šířky dezénu pro všechny typy a velikosti pneumatik. Nejvýznamnější vliv na výsledek mají parametry ráfku a poměr stran profilu pneumatiky. Z tohoto důvodu obsahuje předpověď i změnu šířky dezénu v závislosti na profilu pneumatiky. Úprava vzorce (29) platí pro pneumatiky s poměrovým číslem $AR \geq 65$:

$$b_{tx} = AR'_r b'_{tx} + \Delta b_{fr} - \Delta b'_{hr} \quad (30)$$

, takže b'_{tx} je upravený originální parametr podle rovnice (74) a AR'_r je nový poměr výšky pneumatiky k šířce ráfku, který je získán z rovnice:

$$AR'_r = \frac{h_t}{b_r} \quad (31)$$

Variabilita šířky boční stěny pneumatiky Δb_{fr} souvisí se šířkou ráfku a maximální deformací f_{x10} pro rychlost $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$:

$$\Delta b_{fr} = 1/AR'_r (f_{x10} \ln(\psi) + b_r) / a_{x65} \quad (32)$$

, včetně doplňkového koeficientu a_{x65} , specifikující hodnoty deformace f_c , f_{x10} a f_{x65} až do rychlosti $65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$:

$$a_{x65} = \frac{f_c}{\Delta f_{x65}} \quad (33a)$$

$$\Delta f_{x65} = f_{x10} - f_{x65} \quad (33b)$$

Rozsah statického zatížení zahrnující deformace na základě změny statického poloměru a odvaleného obvodu je standardně vztažen k nominálu rychlosti $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, (ETRTO, 2008). Katalogová hodnota zatížení styčné plochy je získána pro jmenovitou kombinaci tlaku huštění a příslušnou rychlost (doporučení výrobce).

Změna boční dilatace $\Delta b'_{hr}$, popisuje vliv šířky ráfku a výšky profilu pro maximální odchylku f_{x10} :

$$\Delta b'_{hr} = 2AR'_r(b'_h + b'_r) \quad (34a)$$

$$b'_h = (\Delta b_{fR} f_{x10}/h_t) \quad (34b)$$

$$b'_r = (\Delta b_{fR} f_{x10}/b_r) \quad (34c)$$

Následnou úpravou základního vzorce (30) můžeme předpovědět hodnotu šířky dezénu pro nízkoprofilové trakční pneumatiky s poměrovým číslem $AR \leq 60$:

$$b_{tx} = AR'_r b'_{tx} + \Delta b_{fx} - \Delta b'_{hr} \quad (35)$$

, kde parametr specifické boční dilatace Δb_{fx} obsahuje identickou hodnotu Δb_{fr} , jako ve vzorci (32):

$$\Delta b_{fx} = \Delta b_{fr} + \Delta b_{0,5fx} \quad (36)$$

Pro nízkoprofilový typ pneumatik ve srovnání s vyšším profilem ($AR \geq 65$) je potřeba vyjádřit průběh rozšíření profilu bočnice i v podélné ose pneumatiky. Použití rovnice (3) proto není doporučeno. Rovnice pro další boční rozšíření $\Delta b_{0,5fx}$ zahrnuje skutečný průhyb f_x a může být vyjádřen:

$$\Delta b_{0,5fx} = \lambda AR'_r (f_{x10} \ln(\psi) + 0.5h_t) \quad (37)$$

, kde koeficient λ specifikuje hysterezní deformaci pneumatiky v logaritmickeém tvaru:

$$\lambda = \ln\left(\frac{h_t f_x}{b_r^2}\right) \quad (38)$$

Nominální deformace pneumatiky f_{N30} je stanovena podle katalogových hodnot pro rychlostní limit 30 km.h^{-1} . Důležité je porovnat tuto nominální hodnotu deformace f_{N30} s maximální možnou deformací pneumatiky f_{M10} při rychlosti 10 km.h^{-1} :

$$f_{M10} = \frac{\Delta W g}{c_{N30}} \quad (39)$$

, kde ΔW (kg) značí rozdíl mezi maximálními a minimálními hodnotami zatížení při doporučeném jmenovitém tlaku huštění (ETRTO, 2008):

$$\Delta W = W_{N(10)} - W_{N(30)} \quad (40)$$

, kde $W_{N(10)}$ představuje nominální hodnotu zatížení při rychlosti 10 km.h^{-1} , $W_{N(30)}$ při rychlosti 30 km.h^{-1} .

$$r_{s(10)} = r_s - f_{M10} \quad (41)$$

, kde r_s je statický poloměr pneumatiky (vychází se z katalogových hodnot).

Využitím rovnice (41) lze koeficient deformace pneumatiky ε_d stanovit jako parametr změny plochy styku pneumatiky pro kombinace hodnot vybraných z katalogu pro W a p_i :

$$\varepsilon_d = 1 - \frac{r_{s(10)}}{r_s} \quad (42)$$

, kde $r_{s(10)}$ značí poloměr statického zatížení při rychlosti 10 km.h^{-1} (viz rce 41) (Prikner et al., 2019).

Upravený model aritmetické posloupnosti a_n a vzniklé a_{tx} , může spolehlivě popsat rovnoměrně klesající (podle lineárního trendu) velikost plochy styku pneumatiky:

$$a_n = a_1 + (n - 1)d_a \quad (43a)$$

$$a_{tx} = (n - 1)\varepsilon_d \quad (43b)$$

, kde: $a_1 = 0$; $n \geq 1$; $n \in N$; a_1 značí aritmetickou posloupnost; n označuje $n^{\text{tý}}$ člen posloupnosti $a_n \Rightarrow a_{tx}$; $d_a \Rightarrow \varepsilon_d$ označuje rozdíl mezi po sobě jdoucími členy; N značí počet členů posloupnosti (Prikner et al., 2019).

Kombinace parametrů pneumatik z katalogu, značená jako W_N a p_i pro rychlost 10 km.h^{-1} , dokáže adekvátně popsat zhutnění půdy při statickém zatížení pneumatiky. Plocha styku S_{TN} pro jmenovité kombinace zatížení z katalogových hodnot a odpovídající kombinaci tlaku huštění, odvozená z úpravy S_T (rce 22), je definována takto:

$$S_{TN} = \nu(1 - a_{tx})S_T = \frac{b'_{tTP}}{b_{tc}}(1 - a_{tx})S_T \quad (44)$$

, kde symbol ν (–) označuje standartní poměr skutečné šířky vzoru dezénu pneumatiky b_{tTP} a katalogové hodnoty profilu pneumatiky b_{tc} (rce 30 a 35) (Prikner et al., 2019)

Plochy otisku jednotlivých pneumatik A_0 je možné předpovědět využitím korekčního faktoru α_A (poměr skutečné a nominální kontaktní plochy) (Grečenko, 1995):

$$\alpha_A = \alpha_W^n = \left(\frac{W}{W_N}\right)^n \quad (45)$$

, kde α_W^n představuje poměr skutečného zatížení a nominální hodnoty umocněný korekčním faktorem n ; W je skutečné zatížení a W_N jeho nominální hodnota.

Grečenko (1995) použil hodnotu korekčního faktoru ($n = 2/3$), kterým lze ve většině případů vyjádřit a stanovit AR a ε_d .

Modifikací korekčního faktoru $n \Rightarrow n_c$ se získá poměr mezi AR a AR' :

$$n_c = \frac{AR'}{AR} = \frac{h'_t/b'_{tTP}}{h_t/b_t} \quad (46)$$

, a parametr AR' je tak závislý pouze na korekci šířky dezénu b'_{tTP} (viz rce 30 a 35) (Grečenko, 1995; Prikner et al., 2019).

Podle zatížení pneumatiky dochází k deformaci bočnice a její adekvátní změně výšky h . Výpočtem h se získá skutečná deformace způsobená konkrétním zatížením pneumatiky:

$$h_t = (h - d_r/2 * 2,54) - f_x \quad (47)$$

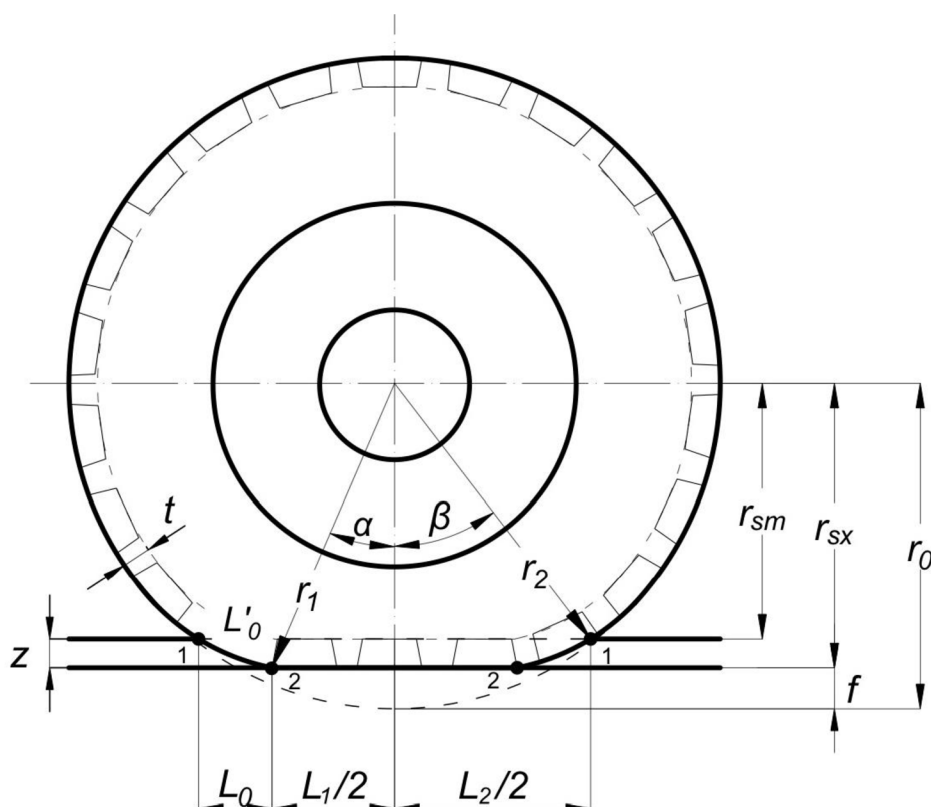
Predikce skutečné kontaktní plochy S_{Tx} (cm²) na tvrdém povrchu při libovolných kombinacích zatížení a huštění, rce (44) vyžaduje úpravu korekčním faktorem α_A (viz rce 45):

$$S_{Tx} = \alpha_A S_{TN} \Rightarrow \left(\frac{W}{W_N}\right)^{n_c} S_{TN} \quad (48)$$

, kde koeficient n_c , nabývá rozsah 0,6 až 0,9.

2.3 Stanovení styčné plochy pneumatiky na měkkém povrchu

Predikce styčné plochy na měkkém povrchu předpokládá, že styčná plocha pneumatiky na měkkém povrchu koresponduje s velikostí tvrdém povrchu. Tento požadavek však platí pro statické zatěžování půdního povrchu a parametry uvedené pro katalogový rychlostní limit 30 km.h^{-1} .



Obrázek 7: Parametry pneumatiky uvedené pro výpočet na měkkém povrchu.
Zdroj: Prikner et al. (2019) (upraveno)

Predikce velikosti kontaktní styčné plochy na měkkém povrchu využívá parametry uvedené na obrázku 7:

$$r_{sx} = r_0 - f_x \quad (49)$$

, a změna statického poloměru zatížené pneumatiky r_{sx} supluje maximální deformaci f_x ; r_0 je katalogová hodnota statického poloměru.

$$r_{sm} = r_{sx} - z \approx r_{sx} - 0,85t \quad (50)$$

, kde statický poloměr zatížené pneumatiky r_{sm} pro maximální deformaci f_x je snížený o výšku dezénu t .

Výpočet r_{sx} vychází z velikosti deformace pneumatiky, která je získána z rovnic pro standardní parametry pro rychlost 30 km.h⁻¹:

$$f_{N30} = \frac{d_t}{2} - r_0 \quad (51)$$

$$f_x = \frac{abs|W_x - W_{N30}| * g}{C_M} \quad (52)$$

$$C_M = \frac{W_{N10} * g}{f_{N30}} \quad (53)$$

Na základě parametrů (viz rce 49–53) lze stanovit parametry pro stanovení kontaktní styčné plochy na měkkém povrchu:

$$r_1 = \sqrt{r_{sx}^2 + (L_1/2)^2} \quad (54)$$

$$r_2 \approx 0,96r_0 \quad (55)$$

$$L_2/2 = \sqrt{r_2^2 - r_{sm}^2} = \sqrt{0,96r_0^2 - (r_{sx} - 0,85t)^2} \quad (56)$$

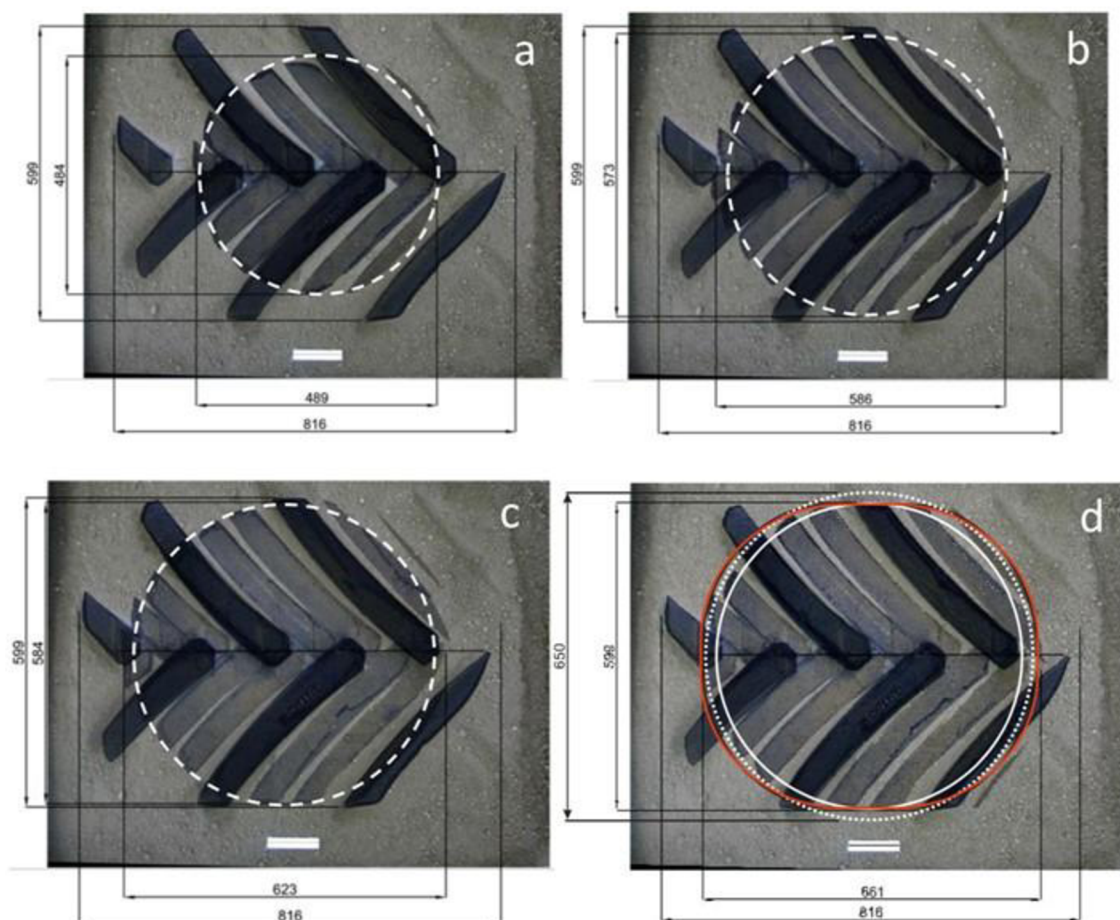
$$L_0 = \frac{L_2}{2} - \frac{L_1}{2} = \sqrt{\left(2r_2 \sin\left(\frac{\beta - \alpha}{2}\right)^2 - z^2\right)} \quad (57)$$

$$\alpha = \arccos \frac{r_{sx}}{r_1} \quad (58)$$

$$\beta = \arccos \frac{r_{sx} - z}{r_2} = \arccos \frac{r_{sx} - 0,85t}{0,96r_0} \quad (59)$$

$$L_0 = \pi * r_2 * (\beta - \alpha) / 180 \quad (60)$$

Zjednodušením se původní tvar styčné plochy uvažuje jako kruhová plocha na tvrdém podkladu. Identickou velikostí kruhového tvaru styčné plochy lze substituovat plochu oválného nebo obdélníkového tvaru z hlediska generování středního kontaktního tlaku na kontaktní ploše na měkkém povrchu (Grečenko a Prikner, 2014; Prikner et al., 2017). Obrázek 8 demonstruje porovnání vícenásobného otisku pneumatiky s jednoduchým otiskem a výhodnost substituce tvarů styčné plochy (Prikner et al., 2019).



Obrázek 8: Pneumatika 650/85 R 38 (SVT) při konstantním zatížení 39,3 kN a daných hodnotách tlaku huštění (a-d) = 240, 140, 120 a 100 kPa. Část (d) znázorňuje rozdíly mezi 3 tvary – červená čára značí původní „oválný“ obrys (3252 cm²), vnitřní bílý kruh s plnou čarou (2830 cm²) – průměr odpovídá šířce styčné plochy a tečkovaný bílý kruh (3318 cm²) – průměr je shodný se šířkou dezénu pneumatiky ($b_{tL} \gg 0,92 b_t$). Zdroj: Prikner et al. (2019).

3 Cíl práce

Hlavním cílem práce je zhodnotit navržené parametry pro vytvoření modelu úpravy tlaku huštění zemědělských pneumatik s ohledem na individuální kombinaci tlaku huštění a zatížení.

4 Metodika práce

4.1 Vzorky měření

Pro laboratorní měření styčné plochy byli vybrány dvě pneumatiky. Jednalo se o trakční zemědělské pneumatiky Continental SVT 650/85 R 38 a Mitas RD – 03 650/65 R 38 (detailní informace viz tab. 1 a 2). Tyto pneumatiky byly vytvořeny pro kolové traktory vyšších výkonů (nad 130 kw) a mají zajišťovat zvětšení styčné plochy oproti standardním pneumatikám.

Tabulka 1: Technické údaje pneumatiky Continental SVT 650/85 R 38

Zdroj: Continental (2012)

Doporučené ráfky	Šířka pláště (mm)	Vnější průměr (mm)	Statický poloměr (mm)	Odvalený obvod (mm)
DW 23 B	720	2070	920	6130
Výška šípů (mm)	SRI	Styčná plocha (cm ²)	Počet šípů	Váha pneumatiky (kg)
63	975	3550	42	330

Tabulka 2: Technické údaje pneumatik Mitas RD - 03 650/65 R 38

Zdroj: Mitas (2014)

Doporučené ráfky	Šířka pláště (mm)	Vnější průměr (mm)	Statický poloměr (mm)	Odvalený obvod (mm)
W 18 L	618	1828	810	5416
Výška šípů (mm)	SRI	Styčná plocha (cm ²)	Počet šípů	Váha pneumatiky (kg)
53	875	2700	44	200

4.2 Měřicí zařízení a postup měření na měkkém povrchu

Pro testování bylo využito laboratorního zařízení, jehož princip byl popsán v Jiříčka (2022).



Obrázek 9: Vytvoření otisku styčné plochy pneumatiky na měkkém povrchu (mobilní půdní kontejner). (zdroj: autor)

Před samotným měřením byla provedena kalibrace zatížení pneumatiky na tvrdém povrchu (prázdňá váhová deska), aby se zjistila přesnost naměřených hodnot. Po zatížení pneumatiky zaznamenáváme její otisk na měkkém povrchu v půdním kontejneru. Testování ovšem kladlo důraz na referenční hodnotu pro srovnání naměřených výsledků; tzn. vtisk pouze do hloubky výšky šípů, aniž by běhoun a šípy vytvořili nadměrné zaboření a deformace pláště. Pro vytvoření předstlačeného profilu byla průměrná suchá objemová hmotnost $\rho_{d,p} = 1350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ při vlhkosti $19,5 \pm 0,5 \%$.



Obrázek 10: Ukázka deformace stlačených vrstev v tisku styčné plochy pneumatiky na měkkém povrchu. (zdroj: autor).

Zatížení pneumatiky vytvářející otisk na půdní vrstvě bylo udržováno po dobu 10 sekund. Následně byl pořízen fotografický snímek s označením otisku a měřítkem 10 cm pro všechny kombinace tlaků huštění a zátěže. Fotodokumentace byla upravena v grafickém prostředí Adobe Photoshop CS4 a Corel Draw 2018 a vyhodnocená pro skutečné hodnoty velikosti styčných ploch.

4.3 Postup měření na pevném povrchu

Pro měření bylo využito metody vícenásobného otisku (Markova, 2018). K vyhodnocení získaných obrázků bylo využito grafických editorů ImageJ a CorelDraw 2018. Fotografování otisků a stanovení měřítka probíhalo obdobným způsobem jako u otisku na měkkém povrchu.

4.4 Metodika pro výpočet styčné plochy pneumatiky

V rámci této bakalářské práce bude provedeno dílčí porovnání velikostí styčných ploch na vybraných pneumatikách pro oba typy povrchu a následné vyhodnocení jejich kompakčního potenciálu:

- 1) Revize velikostí stykové a styčné plochy na tvrdém povrchu (Markova, 2018).
- 2) Verifikace stykové a styčné plochy na měkkém povrchu (Jiříčka, 2022).
- 3) Stanovení individuální kompakce pneumatiky na základě předchozích postupů 1 a 2.

4.4.1 Výpočet styčné plochy na měkkém povrchu

Styčnou plochu pneumatiky na měkkém povrchu je možné stanovit podle rovnic 61 až 81. Délka styčné plochy pro měkký povrch (L_2) i pro tvrdý povrch (L_1) zahrnuje vzájemný poměr obvodů pneumatiky v zatíženém a nezatíženém stavu a následně se získá poměr poloměrů o stejné hodnotě pro zatížený a volný stav. Hlavní předpoklad uvádí styčnou plochu pneumatiky na tvrdém a měkkém povrchu za téměř shodnou, proto je možné použít styčnou plochu na tvrdém povrchu pro výpočet styčné plochy na měkkém povrchu. V další části této práce je pak graficky znázorněn rozdíl styčných ploch.

Volný obvod (nezatížený) pneumatiky získáme z rovnice:

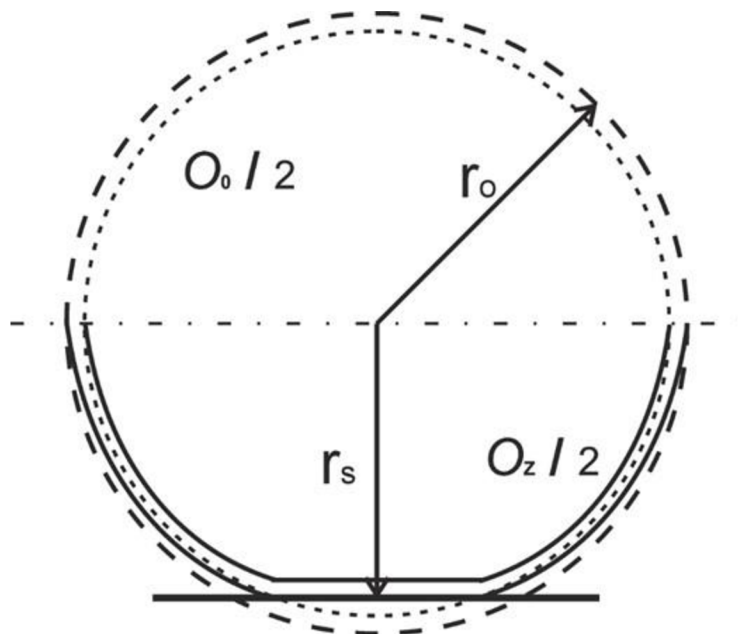
$$O_o = 2\pi r_0 \quad (61)$$

, kde O_o značí volný obvod a r_0 katalogovou hodnotu poloměru nezatížené pneumatiky.

Zatížený obvod pneumatiky na měkkém povrchu součet poloviny obvodů za použití zatíženého a nezatíženého poloměru (viz Obr. 11):

$$O_z = 0,5(2\pi r_0 + 2\pi r_{sx}) \quad (62)$$

, kde O_z značí zatížený odvalený obvod, r_{sx} statický poloměr pneumatiky v závislosti na deformaci pneumatiky f_x způsobené zatížením a r_0 volný poloměr nezatížené pneumatiky získaný z katalogové hodnoty volného průměru.



Obrázek 11: Schéma rozdílů obvodů pneumatiky při zatížení ve vztahu k deformaci pneumatiky.

Součinitel a' vyjadřuje poměrnou změnu obvodů při zatíženém a nezatíženém stavu. Po úpravě použijeme v rovnici poloměrů za stejných stavů:

$$a' = \frac{O_o}{O_z} = \frac{2\pi r_o}{2\pi r_{sx}} \quad (63)$$

Pro výpočet změny délky ΔL_x za použití poměru odvalených obvodů je nezbytné použít koeficient α jako hodnotu, která zahrnuje potenciální navýšení délky L_x :

$$\alpha = 1 - \ln(a') \quad (64)$$

Efekt hystereze během deformace šípů a jejich rozložení na podložce je zastoupeno přirozeným logaritmem součinitele a' . Obdobný postup je při stanovení výpočtu šířky otisku pneumatiky na tvrdém povrchu (viz rce 51).

Následující rovnice stanovuje poloměr r_1 , jako vzdálenost od středu k prvnímu bodu dotyku dezénu s povrchem:

$$r_1 = r_0 - (0,01r_0r_{sx}^{(-a')}) \quad (65)$$

, kde byl součinitel a' použit jako záporný exponent v součinu statického r_{sx} a volného poloměru r_0 pneumatiky. Exponent musí být záporný, protože představuje účinek změny obvodu pneumatiky v důsledku deformace dezénu způsobeného statickým zatížením

Součinitel α vyjadřuje poměr mezi zatíženým a nezatíženým obvodem. Úpravou rovnice použijeme ve vzorci pouze poloměry za stejných stavů pneumatiky, jako tomu je u obvodů:

$$\alpha = \frac{O_z}{O_o} = \frac{2\pi r_{sx}}{2\pi r_o} \quad (66)$$

Pro výpočet statického poloměru zatížené pneumatiky r_{sx} použijeme již použitý vzorec (49):

$$r_{sx} = r_0 - f_x \quad (67)$$

, kde f_x značí deformaci pneumatiky a r_0 značí katalogovou hodnotu statického poloměru pneumatiky.

Pro tvrdý povrch získáme délku styčné plochy L_1 z rovnice tímto způsobem:

$$L_1 = 2\chi\sqrt{(r_1^2 - r_{sx}^2)} \quad (68)$$

, kde r_1 a r_{sx} získáme z předchozích rovnic (65 a 67).

K výpočtu délky styčné plochy na měkkém povrchu L_2 se řídíme podobným postupem, jako pro tvrdý povrch. Ve výpočtu bude navíc zahrnuta poměrná změna odvalených obvodů a' . Tento přístup nám umožňuje zohlednit jak změnu poloměru r_1 , tak i posunutí šípů v ose vzorku při zatíženém a nezatíženém stavu. Je důležité poznamenat, že tato plocha slouží pouze k vizualizaci tvaru a velikosti obrysu všech zapadlých šípů a není vhodná pro určení kompakce půdy. Její hlavní využití spočívá ve zkoumání trakčních podmínek.

Pro výpočet L_2 budou použity součinitelé d' a c' , které získáme z rovnice:

$$c' = a'd'r_1(1 - a') \quad (69)$$

$$d' = \frac{l_0}{0,5l_z} \quad (70)$$

, kde l_z je vzdálenost šípů při zatížení a l_0 vzdálenost šípů při volném nezatíženém stavu.

Následně je možné vyjádřit délku styčné plochy na měkkém povrchu L_2 :

$$L_2 = \left(2\sqrt{(r_1 + \ln(c'))^2 - r_{sx}^2} \right) \pm 0,5h_t^{d'} \quad (71)$$

Pokud poměrná deformace f_p pro maximální kombinaci zatížení a tlaku huštění dosáhne nebo přesáhne hodnotu 1 ($f_p \geq 1$), provede se odečtení poloviny výšky šípů $h_t^{d'}$. Pokud je f_p menší než 1, polovina $h_t^{d'}$ bude přičtena. Hodnotu f_p získáme následující poměrem:

$$f_p = \frac{a'f_{rx}}{100} \quad (72)$$

Při výpočtu styčné plochy S_{ts} na měkkém povrchu je potřeba určit poměrné prodloužení ΔL_x . Uvažuje se, že skutečný tvar styčné plochy pneumatiky je možno nahradit kruhovým tvarem a její vlastnosti převést na měkký povrch.

Protože se jedná o kruhový tvar, průměr kružnice styčné plochy D_{Stc} bude vypočítán jako nominální šířka otisku b'_{tTP} :

$$D_{Stc} \Rightarrow b'_{tTP} = AR^{-1}(f_{x10} \ln \psi + b_{tc}) \quad (73)$$

Základní rovnice pro určení velikosti styčné plochy může být vyjádřena následovně:

$$S_{ts} = S_{tc} + \Delta S_{ts} \quad (74)$$

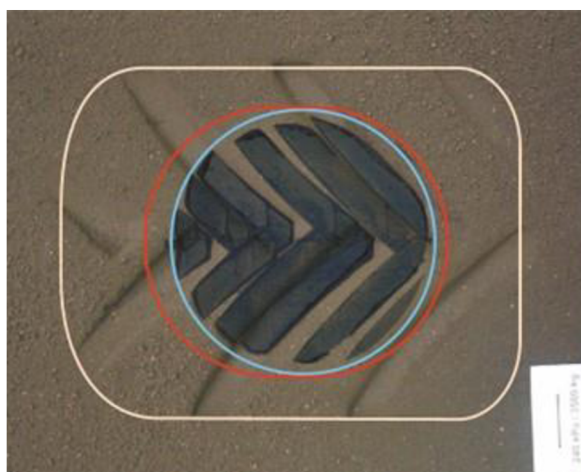
, kde S_{tc} reprezentuje známou velikost styčné plochy na tvrdém povrchu (Markova, 2018). Pro výpočet použijeme hodnoty momentálního a nominálního zatížení W :

$$S_{tc} = \alpha_A S_{tn} = \left(\frac{W}{W_N}\right)^{n_c} S_{tn} \quad (75)$$

, ΔS_{ts} označuje součet přírůstků ploch v přední a zadní dotykové části dezénu pneumatiky na měkkém povrchu:

$$\Delta S_{ts} = S_{ts\ 0.5} + S_{ts\ KPD} \quad (76)$$

Při dosažení shody mezi naměřenými a predikovanými hodnotami se vychází z teoretického předpokladu symetrického rozložení podél vertikální osy otisku (Prikner et al, 2019). Avšak rozdíl ve velikostech jednotlivých ploch je způsoben plností dezénu a zvýšenou hustotou šípů ve střední ose dezénu, což zvyšuje jeho tuhost. Tento fakt znamená, že délku styčné plochy L_1 nelze brát jako obecný parametr a není možné na ní jednoznačně spoléhat. Obrázek 12 ukazuje rozdíly v křivosti kontur v přední a zadní části otisku na měkkém povrchu.



Obrázek 12: Demonstrace rozdílů tvaru, velikostí a umístění skutečných styčných a stykových ploch na měkkém a tvrdém povrchu, Continental SVT 650/85 R 38 (tlak huštění 160 kPa; zatížení 5500 kg).

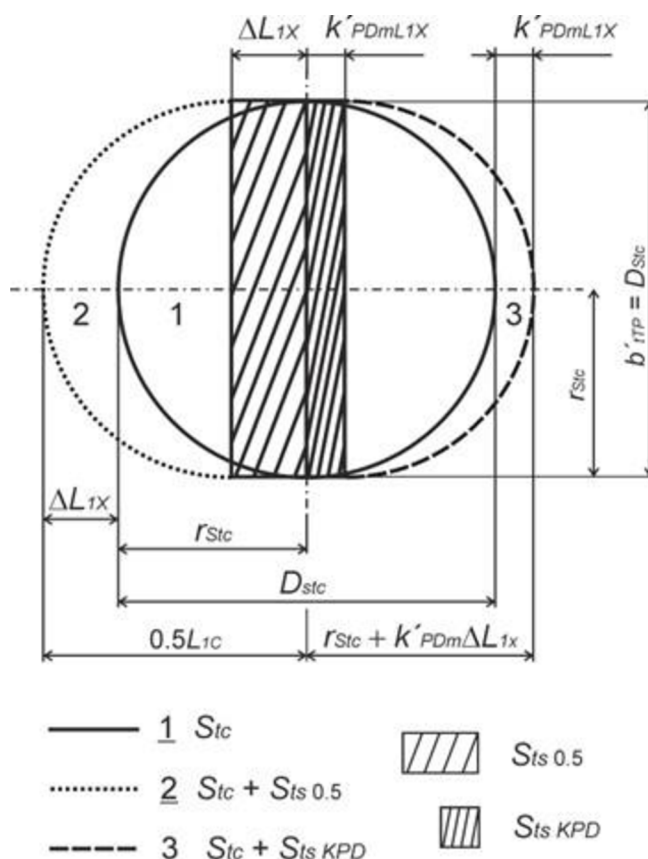
Celková styčná plocha S_{ts} bude proto rozdělena na dvě různé části (viz Obr. 13). Vychází se z předpokladu, že se pneumatika při zatížení odvaluje a s ní se odvalují i šípky, kde dochází k výraznému nárůstu plochy v přední části otisku a o trochu menšímu nárůstu i v zadní části. Toto chování je ovlivněno hlavně tuhostí a pružností dezénu pneumatiky.

Nejprve je potřeba určit prodloužení v přední části otisku pomocí dostupných proměnných L_{1C} a D_{Stc} :

$$\Delta L_{1X} = 0,5(L_{1C} - D_{Stc}) \quad (77)$$

Nyní lze stanovit velikost přední části styčné plochy $S_{ts\ 0.5}$ (viz Obr. 13) následovně:

$$S_{ts\ 0.5} = 0,5\Delta L_{1X}b'_{TPP} \quad (78)$$



Obrázek 13: Schéma rozdělení velikosti styčné plochy na měkkém povrchu na 2 navýšené poloviny

Dále získáme zadní část styčné plochy $S_{ts\ KPD}$, která je ovlivněna plností dezénu a jeho úpravou:

$$S_{ts\ KPD} = k'_{PDm} \Delta L_{1X} b'_{tTP} = (S_{tc}/S_{tL}) \Delta L_{1X} b'_{tTP} \quad (79)$$

, kde k'_{PDm} představuje obrácenou hodnotu plnosti dezénu.

Celkovou velikost styčné plochy získáme součtem známé velikosti styčné plochy na tvrdém povrchu S_{tc} (viz rce 75) a přírůstkem plochy v přední a zadní dotykové části dezénu na měkkém povrchu ΔS_{ts} (viz rce 76):

$$S_{ts} = S_{tc} + \Delta S_{ts} \quad (80a)$$

a podle obrázku (13) lze získat rovnici pro S_{ts} sečtením jednotlivých dílčích ploch:

$$S_{ts} = S_{tc} + S_{ts\ 0.5} + S_{ts\ KPD} \quad (80b)$$

4.4.2 Výpočet kompakčního indexu SCE

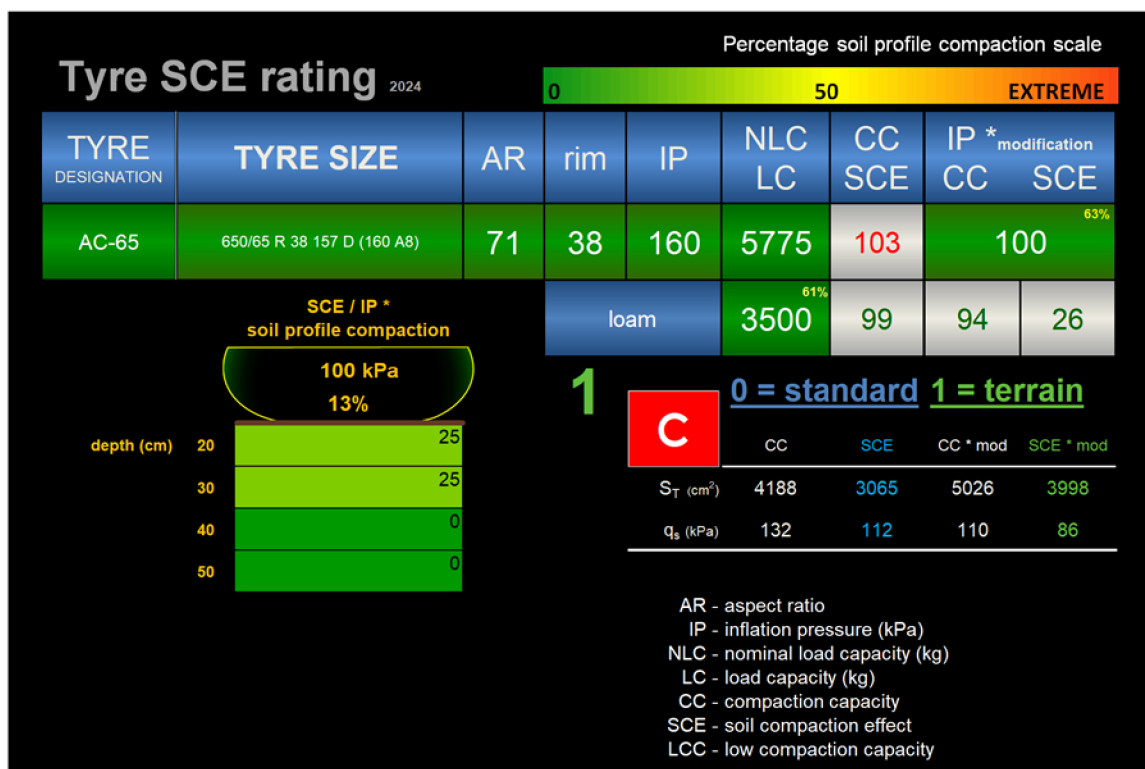
K vyhodnocení míry kompakce půdního povrchu bylo využito indexu SCE (soil compaction efect) (Prikner et al, 2017). Jedná se o bezrozměrné číslo vypovídající o míře zhutnění půdy pod zatíženou pneumatikou. Jako porovnávací hodnoty bylo využito standardizované půdy s jílovito-hlinitopísčitou texturou při její kritické kompakci (stejný postup jako u CC-rating). Hodnota SCE je stanovena podle stejného vzorce jako u dříve používaného indexu CC (Compaction Capacity) (Grečenko a Prikner, 2014):

$$CC \Rightarrow SCE = 1000 \cdot \left[\left(\frac{\rho_{ds}}{\rho_{dl}} \right) - 1 \right] = 1000 \cdot \left[\left(\frac{\rho_{ds}}{1420} \right) - 1 \right] \quad (81)$$

Hustota suché půdy ρ_{ds} vychází z průměrné hodnoty funkce $\rho_d = f(z)$ získané z měření půdy po zatížení v hloubce $z = 20$ až 50 cm. Tato funkce je spočtena za základě čtyř měření hustoty suché půdy po zatížení (hloubka 20, 30, 40 a 50 cm):

$$\rho_{ds} = \frac{1}{4} (\rho_{d20} + \rho_{d30} + \rho_{d40} + \rho_{d50}) \quad (82)$$

, kde ρ_{dl} značí kritickou hustotu suché půdy (hlinitopísčité půdy = $1420 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), při které dochází k omezení růstu polních plodin na hlinitých půdách, (Lhotský, 2000).



Obrázek 14: Příklad stanovení indexu SCE na standardizované hlinité půdě pro pneumatiku Mitas RD-03 650/65 R 38. Zatížení 3500 kg; kombinace tlaků huštění 100 / 160 kPa.

Legenda: TYRE DESIGNATION – označení pneumatiky; TYRE SIZE – rozměr pneumatiky; AR – poměr výšky ku šířce profilu pneumatiky; rim - průměr ráfku (in); IP – tlak huštění (kPa); LC – zatížení (kg); SCE – hodnota kompakčního potenciálu (-); S_T – styčná plocha pneumatiky (cm²); q_s – střední kontaktní tlak (kPa); depth – hloubka od povrchu půdy; loam – standardizovaný hlinitý typ půdy; 1 – hodnota značící měkký povrch

5 Výsledky a diskuse

5.1 Vyhodnocení styčné plochy na měkkém povrchu

V tabulkách 3 a 4 jsou uvedeny velikosti jednotlivých styčných ploch, kontaktních tlaků a relativních odchylek pro obě zkoumané pneumatiky.

Tabulka 3: Vypočtené a naměřené velikosti styčných ploch pro pneumatiku Continental SVT 650/85 R 38

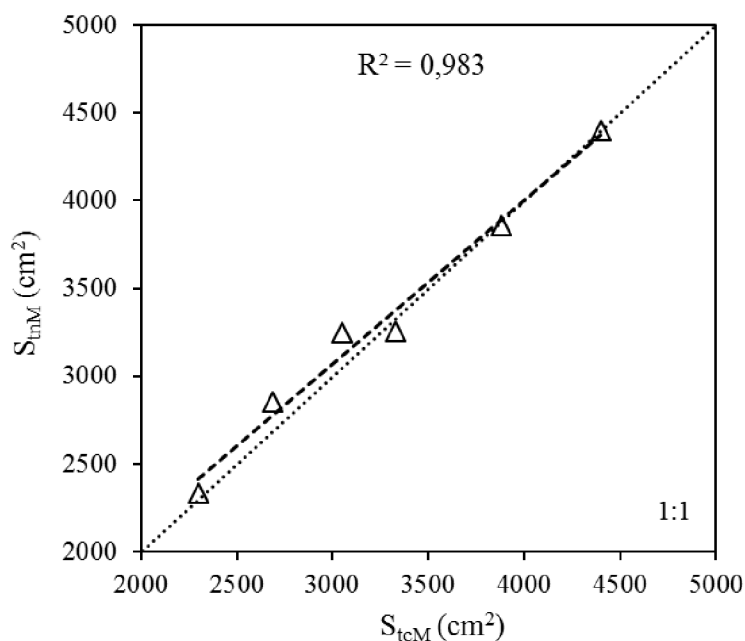
Tlak huštění	Zatížení	S_{tcT}	S_{tcM}	S_{tnM}	δ_S	q_{tcM}	q_{tnM}	δ_q
(kPa)	(kg)	(cm ²)	(cm ²)	(cm ²)	(%)	(kpa)	(kpa)	(%)
	5500	2997	3050	3246	6,04	176,90	166,22	6,43
240	4500	2643	2689	2851	5,68	164,17	154,84	6,02
	3500	2258	2297	2336	1,67	149,48	146,98	1,70
	5500	4321	4398	4399	0,02	122,68	122,65	0,02
120	4500	3812	3879	3859	0,52	113,81	114,39	0,52
	3500	3273	3330	3254	2,34	103,11	105,52	2,28

Tabulka 4: Vypočtené a naměřené velikosti styčných ploch pro pneumatiku Mitas RD - 03 650/65 R 38

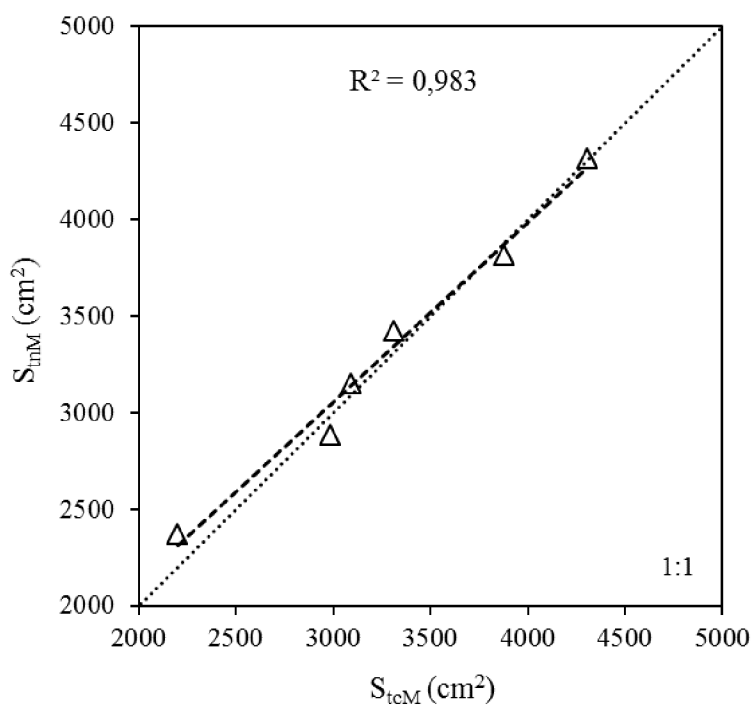
Tlak huštění	Zatížení	S_{tcT}	S_{tcM}	S_{tnM}	δ_S	q_{tcM}	q_{tnM}	δ_q
(kPa)	(kg)	(cm ²)	(cm ²)	(cm ²)	(%)	(kpa)	(kpa)	(%)
	4500	2868	3312	3425	3,30	133,29	128,89	3,41
160	4125	2716	2982	2885	3,36	135,70	140,26	3,25
	3000	2227	2119	2370	7,21	133,83	124,18	7,78
	4500	3779	4306	4316	0,23	102,52	102,28	0,23
100	4125	3565	3874	3815	1,54	104,46	106,07	1,52
	3000	2894	3088	3150	1,98	95,30	93,43	2,01

δ_S – relativní odchylka S_{tcM} a S_{tnM} v procentech; δ_q – relativní odchylka q_{tcM} a q_{tnM} v procentech

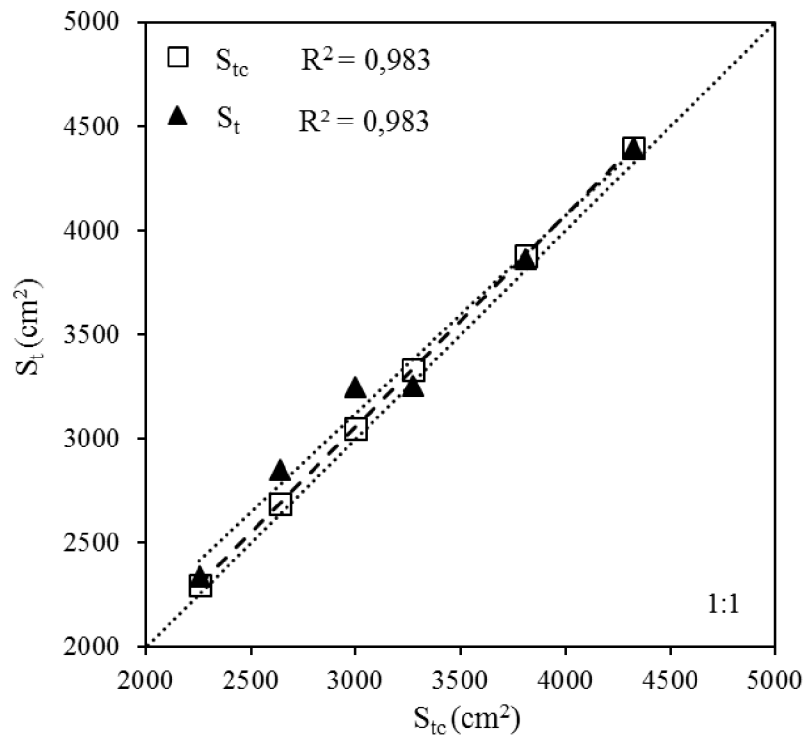
Obrázky 15 až 18 znázorňují závislosti naměřených a vypočtených styčných ploch na měkkém i tvrdém povrchu pro obě pneumatiky. Obrázky 19 a 20 ukazují porovnání jejich relativních odchylek. Závislosti kompakce půdního povrchu znázorňují obrázky 21 až 24.



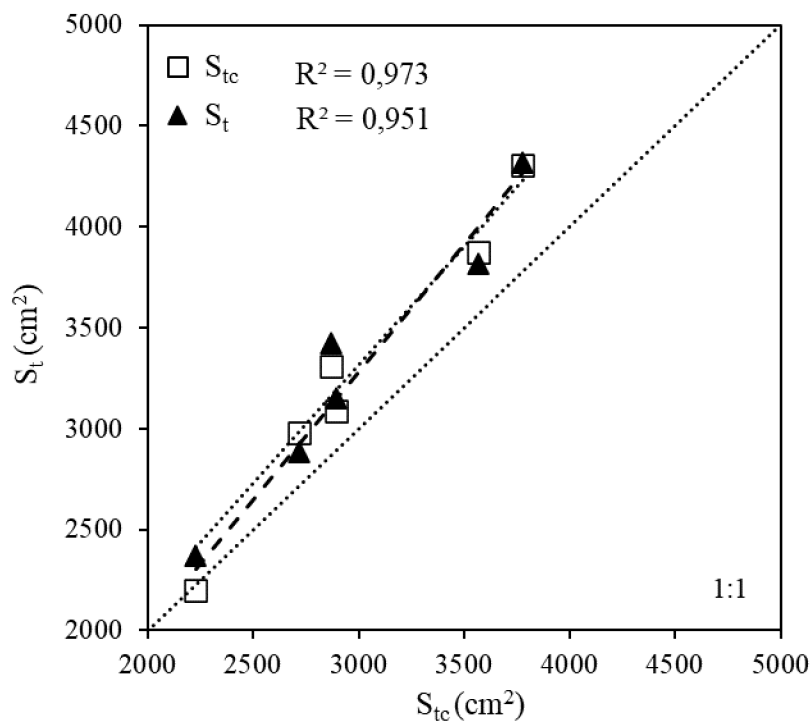
Obrázek 15: Grafické porovnání mezi vypočtenými velikostmi styčné plochy a naměřenými velikostmi styčné plochy na měkkém povrchu pneumatiky Continental SVT 650/85 R 38.



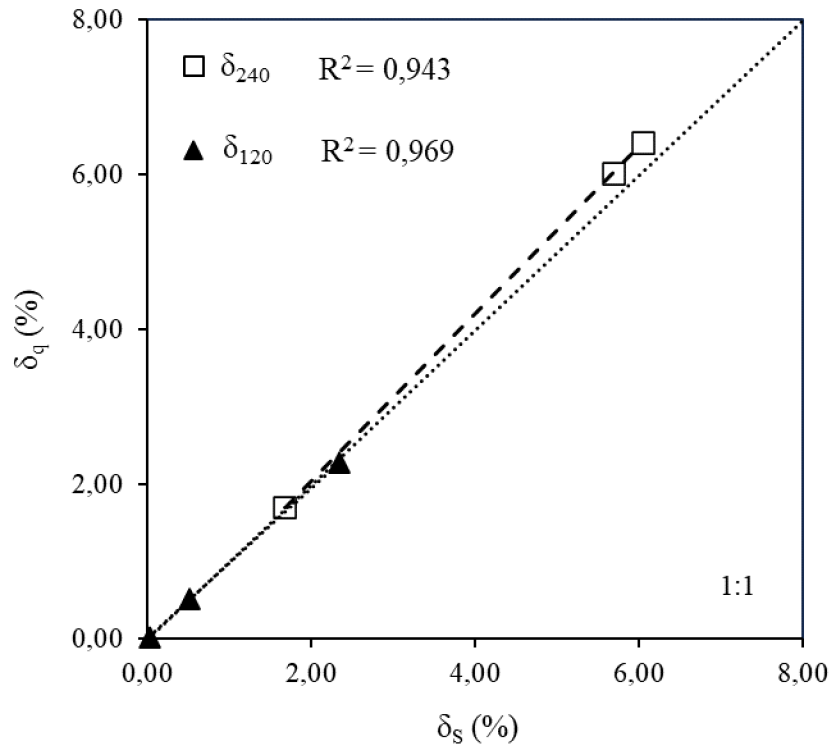
Obrázek 16: Grafické porovnání mezi vypočtenými velikostmi styčné plochy a naměřenými velikostmi styčné plochy na měkkém povrchu pneumatiky Mitas RD - 03 650/65 R 38.



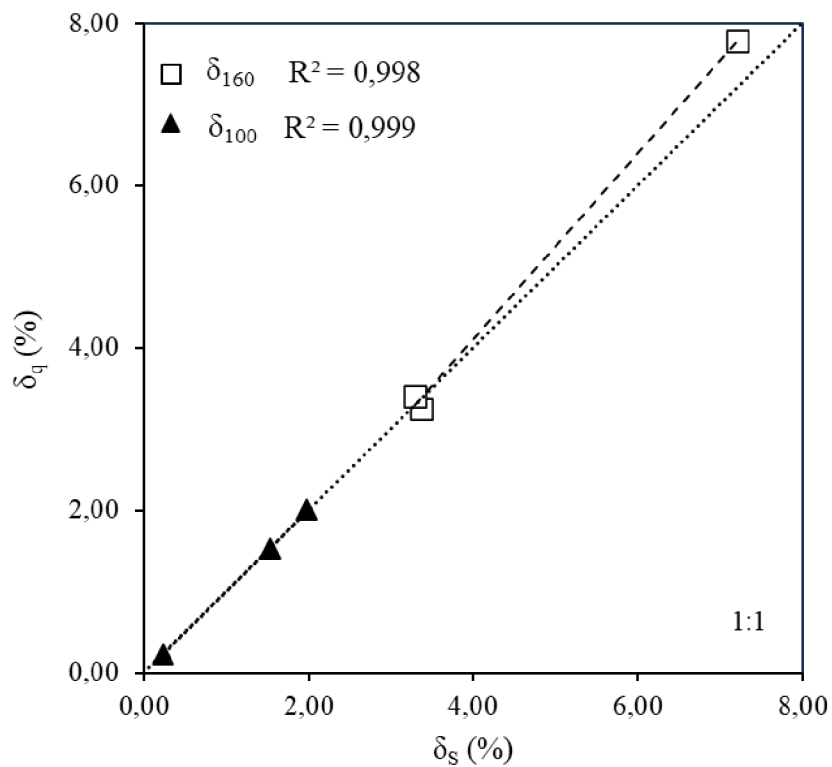
Obrázek 17: Grafické porovnání vypočtené styčné plochy na tvrdém povrchu s vypočtenou styčnou plochou na měkkém povrchu (S_{tc}) a s naměřenou styčnou plochou na měkkém povrchu (S_t) pro pneumatiku Continental SVT 650/85 R 38.



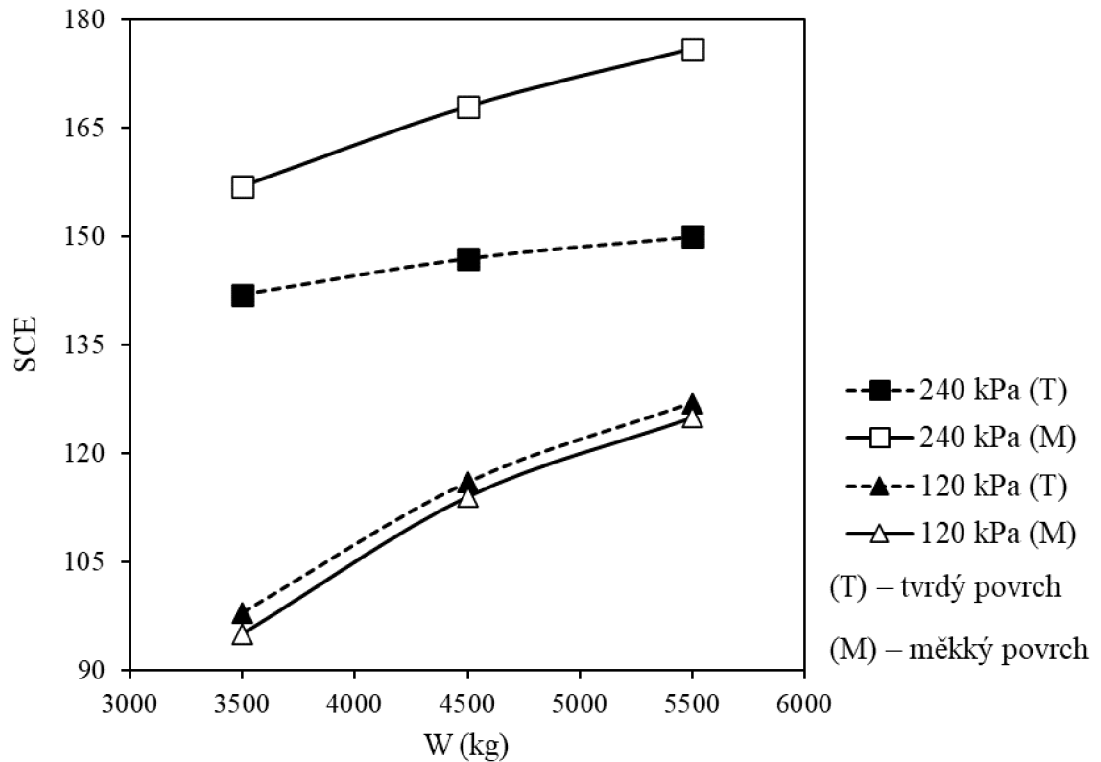
Obrázek 18: Grafické porovnání vypočtené styčné plochy na tvrdém povrchu s vypočtenou styčnou plochou na měkkém povrchu (S'_t) a s naměřenou styčnou plochou na měkkém povrchu (S_{ts}) pro pneumatiku Mitas RD - 03 650/65 R 38.



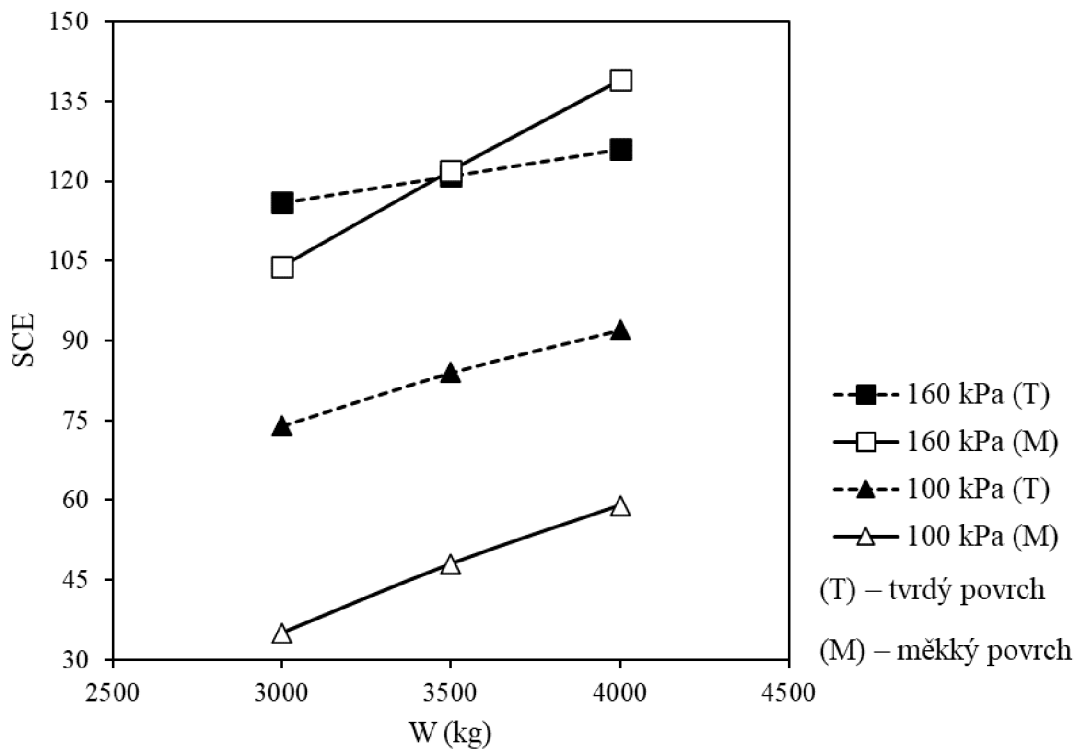
Obrázek 19: Grafické znázornění korelace relativních odchylek δ_S a δ_q (viz tabulka 3) pro jednotlivé tlaky huštění (240 a 120 kPa) pro pneumatiku Continental SVT 650/85 R 38.



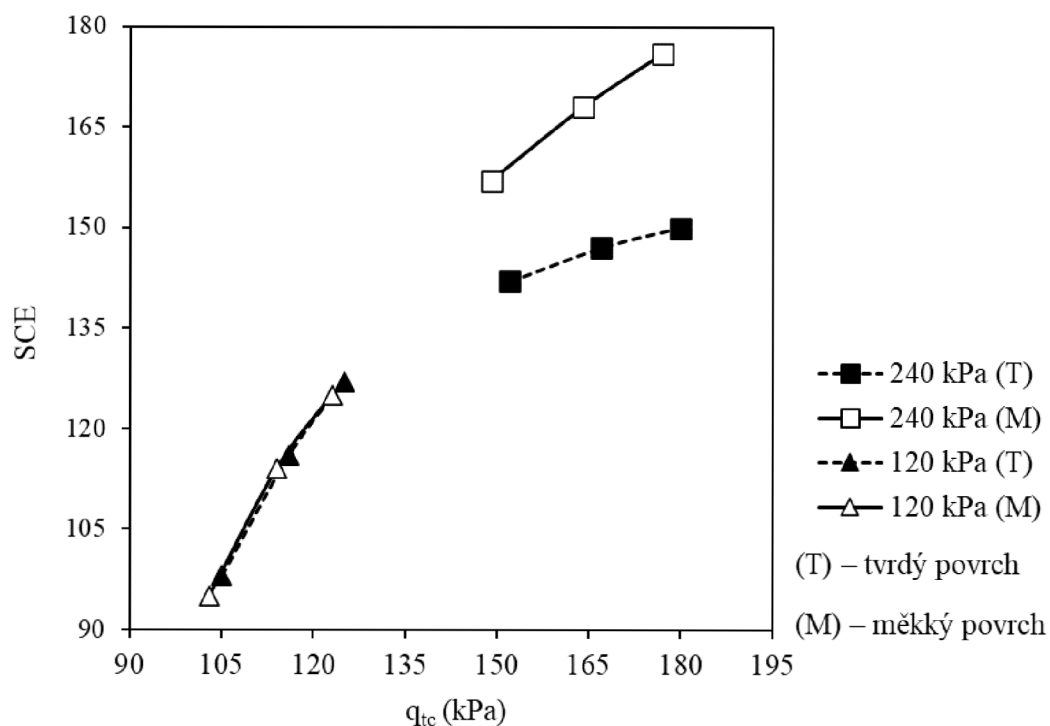
Obrázek 20: Grafické znázornění korelace relativních odchylek δ_S a δ_q (viz tabulka 4) pro jednotlivé tlaky huštění (160 a 100 kPa) pro pneumatiku Mitas RD - 03 650/65 R 38.



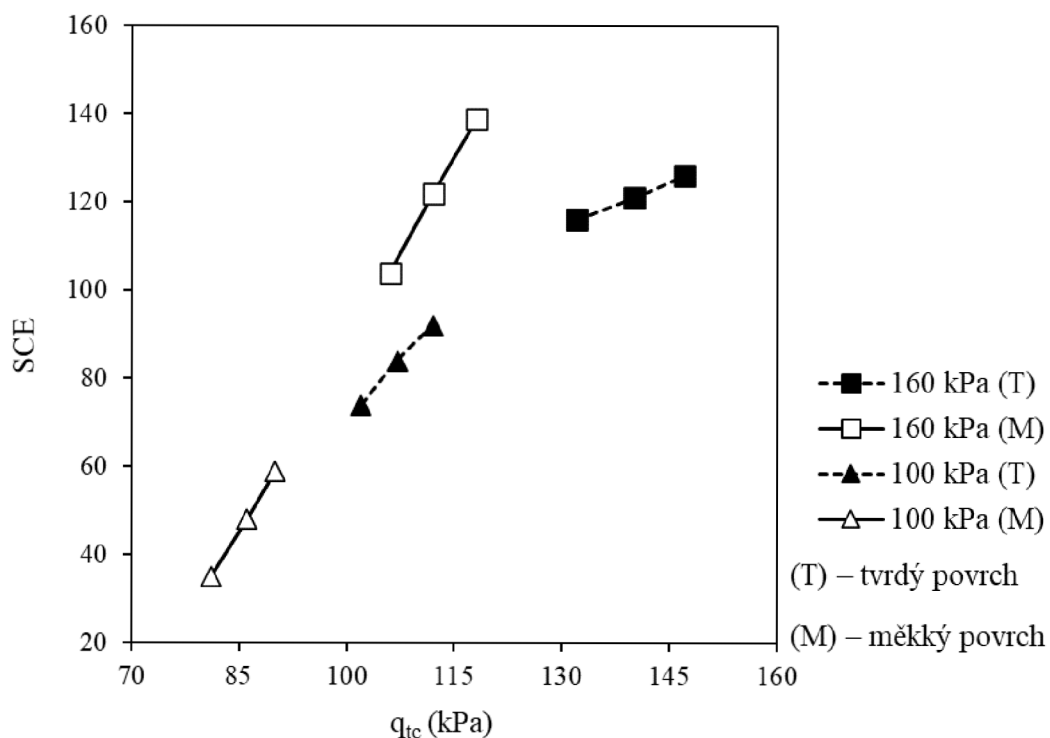
Obrázek 21: Grafické znázornění hodnoty kompakce (SCE) jílovo-hlinité půdy v závislosti na zatížení při tlaku 240 a 120 kPa pro pneumatiku Continental SVT 650/85 R 38 (viz příloha 3).



Obrázek 22: Grafické znázornění hodnoty kompakce (SCE) jílovo-hlinité půdy v závislosti na zatížení při tlaku 160 a 100 kPa pro pneumatiku Mitas RD - 03 650/65 R 38 (viz příloha 4).



Obrázek 23: Grafické znázornění hodnoty kompakce (SCE) jílovo-hlinité půdy v závislosti na kontaktním tlaku při tlaku 240 a 120 kPa pro pneumatiku Continental SVT 650/85 R 38 (viz příloha 3).



Obrázek 24: Grafické znázornění hodnoty kompakce (SCE) jílovo-hlinité půdy v závislosti na kontaktním tlaku při tlaku 160 a 100 kPa pro pneumatiku Mitas RD - 03 650/65 R 38 (viz příloha 4).

5.2 Diskuse

Tato studie se zaměřila na porovnání stanovených velikostí styčných ploch na tvrdém a měkkém povrchu (viz Obr. 17, 18) a porovnání vypočtených a naměřených hodnot na měkkém povrchu (viz Obr. 15, 16). Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 3 a 4., z nichž vyplývá, že velikost styčné plochy závisí jak na celkovém zatížení a tlaku huštění, ale i na konstrukci pneumatiky. Tyto vlivy nejsou vůči sobě lineárně závislé. Porovnání vypočtených a naměřených hodnot kontaktních styčných ploch a adekvátních kontaktních tlaků na měkkém povrchu ukazuje, že relativní chyba má zvyšující se trend podle tlaku huštění pneumatiky a snižující se s kontaktní plochou (viz Obr. 19, 20). Toto bude další předmět výzkumu pro upřesnění analýzy všech parametrů ovlivňující provozní vlastnosti pneumatik.

Podobně jako u vyhodnocení velikostí styčných ploch, byl proveden výpočet a následné porovnání indexu kompakčního potencionálu (SCE). Vypočtené hodnoty SCE v závislosti na specifickém zatížení a kontaktním tlaku pro obě varianty tlaku huštění a typy pneumatik jsou uvedeny v přílohách 3 a 4, s označením akceptovatelných hodnot. Jejich grafické porovnání v závislosti na zatížení a tlaku prezentují Obr. 21 a 22 a v závislosti na kontaktním tlaku Obr. 23 a 24. Z analýzy grafů (Obr. 21 až 24) vyplývá, že při použití doporučeného podhuštění (Continental SVT - 240 kPa a Mitas RD03 - 160 kPa) je hodnota SCE téměř vždy nad akceptovatelnou hranicí. Toto zhodnocení poukazuje na význam hodnoty SCE jako ukazatele míry poškození půdního profilu. Hladina limitní SCE 100 pak koresponduje s doporučenou úrovní tlaku podhuštění na ½ nominálu a dále doporučení přijatelné hodnoty tlaku huštění, které již garantuje minimální efekt pneumatiky na zhutnění půdního profilu. Při podhuštění se zatížená pneumatika deformuje ve smyslu zvětšení její styčné plochy a snížení kontaktního tlaku (viz tabulka 3, 4). Nominální tlaky huštění se doporučují na silniční přejezdy pro vyšší rychlost (cca od 30 km·h⁻¹) a naopak nižší tlaky jsou doporučeny na využití v polních podmínkách, kde je kladen důraz na trakci a nízkou kompakci půdy.

V názorném porovnání výhodnosti úpravy tlaků huštění byly vybrány specifické kombinace zohledňující přijatelnou hodnotu SCE 100 jednak podle zatížení pneumatiky a dále velikosti styčné plochy na měkkém povrchu. Při hodnocení SCE na standardizované hlinité půdě, je pro téměř shodné hodnoty velikosti styčné plochy $S_{tcM} = 3900 \text{ cm}^2$ (Mitas RD – 03 100 kPa / 3500 kg a Continental SVT 120 kPa / 4500 kg) evidentní nárůst kontaktního tlaku, Mitas RD-03 = 86 kPa / Continental SVT = 114 kPa, čímž pneumatika Continental SVT produkuje SCE 90 a Mitas RD-03 pouze SCE 26. Obě hodnoty jsou získané pro optimální úpravu tlaku huštění Mitas 100 kPa a SVT 120 kPa. Druhé posouzení využití

indexu SCE spočívá ve výběru vhodné velikosti pneumatiky s ohledem na zatížení náprav. V tomto případě jde o hodnotu zatížení pneumatiky 3500 kg, kde pro Continental SVT tato hodnota při tlaku huštění 120 kPa produkuje střední kontaktní tlak 103 kPa a kompakci vyjádřenou SCE 72. Pouze tato hodnota ukazuje míru šetrnosti této pneumatiky při této nejnižší sledované kombinaci zatížení a tlaku huštění. Pneumatika Mitas RD-03 však při tomto zatížení a při tlaku huštění 160 kPa působí styčnou plochou na půdu středním kontaktním tlakem 112 kPa, nicméně její kompakční efekt SCE je 99, což garantuje limit stále přijatelné kombinace s ohledem na kompakční účinek pneumatiky. Další extrém nastane, pokud by se tato pneumatika zatížená 3500 kg podhustila na doporučenou hodnotu tlaku huštění 100 kPa. Tímto způsobem by se opět dosáhlo významného snížení středního kontaktního tlaku na hodnotu 86 kPa a indexu SCE pouze 26. Tato hodnota již spolehlivě garantuje téměř nepatrné poškození půdního profilu na hlinité půdě do hloubky až 50 cm.

6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo na základě empiricky dosažených parametrů ověřit správnost výsledků získaných pomocí modelu umožňujícího stanovit optimální tlak huštění zemědělských pneumatik s ohledem na jejich kompakční účinek.

Na základě literárních zdrojů jsou prezentovány individuální přístupy pro predikci velikostí styčné plochy jak na měkkém, tak na tvrdém povrchu s ohledem na zatížení pneumatiky. Tyto závěry zohledňují vliv konstrukčních parametrů pneumatik na velikost styčné plochy na základě dostupných technických parametrů.

Metodická část práce zahrnuje popis testování dvou odlišných typů a velikostí zemědělských trakčních radiálních pneumatik (Continental SVT 650/85R38, a Mitas RD – 03 650/65 R 38). Vyhodnocení výsledků testování otisků pneumatiky na měkkém povrchu (Jiříčka, 2022) a vícenásobného otisku na tvrdé podložce (Markova, 2018) stanovilo referenční hodnoty styčných a stykových ploch pro nominální i individuální kombinace tlaku huštění a zatížení. Na základě získaných dat byl posuzován vytvořený empirický model umožňující současně predikovat velikosti styčné plochy pneumatiky na měkkém i tvrdém povrchu a stanovit index kompakčního potencionálu (SCE), který je dále navržen jako budoucí nástroj pro eliminaci zhutnění půdy.

Analýza vypočtených a naměřených velikostí styčných ploch prokázala vysokou přesnost vytvořeného empirického modelu, nicméně relativní chyba se zvyšovala se zvyšujícím se tlakem huštění, tedy se snižující se plochou otisku. Pro pneumatiku Continental SVT dosahovala nejvyšší relativní odchylka při tlaku huštění 120 (kPa) hodnoty 2,34 % (3330 cm²) a při tlaku huštění 240 (kPa) 6,04 % (3050 cm²). Tyto data je vhodné zvážit při dalším zpřesňování výpočtů, společně s materiálovými a konstrukčními vlastnostmi pneumatik.

Při porovnávání pneumatik bylo zjištěno, že získané výsledky naznačují výraznou závislost hodnoty SCE na tlaku huštění. Nominální hodnoty tlaku huštění způsobovaly zvýšené hodnoty SCE a tím vyšší zhutnění půdy. Vyšší tlaky huštění jsou doporučované na silniční přejezdy, kde nedochází k deformaci povrchu. Úpravou tohoto tlaku na nižší je možné efektivně ovlivnit hodnotu SCE a dosáhnout tak požadované úrovně zhutnění. Je důležité poznamenat, že pro stanovení míry zhutnění pomocí hodnot SCE je potřeba brát v potaz i další parametry pneumatiky, jako je styčná plocha nebo kontaktní tlak.

Díky těmto výsledkům lze konstatovat, že volba správných typů a velikostí pneumatik zahrnující korektní nastavení tlaku huštění mají zásadní vliv na kompakci půdy. Nadměrná kompakce může negativně ovlivnit strukturu půdy a její schopnost zadržovat vodu a živiny.

Seznam použitých zdrojů

- AGEJKIN, Ya, 1981. *Prokhodimost' avtomobilej*. Moskva: Mashinostroenie.
- BEKKER, Mieczyslaw Gregory, 1962. *Theory of Land Locomotion: The Mechanics of Vehicle Mobility*. 2. University of Michigan Press, 522 s. ISBN 0598366903, 9780598366900.
- CONTINENTAL, 2012. *Agricultural Tyres, Technical Databook*.
- DISSERENS, E., 2009. Calculating the contact area of trailer tyres in the field. *Soil and Tillage Research*. **103**(2), 302–309. ISSN 01671987. doi: 10.1016/j.still.2008.10.020.
- ETRTO, 2008. *Engineering design information. Brussels-Belgium: European tyre and rim technical organization*.
- GREČENKO, A. a P. PRIKNER, 2014. Tire rating based on soil compaction capacity. *Journal of Terramechanics*. **52**, 77-92. ISSN 00224898. doi: 10.1016/j.jterra.2013.08.001.
- GREČENKO, Alexandr, 1995. Tire footprint area on hard ground computed from catalogue values. *Journal of Terramechanics*. **32**(6), 325–333.
- GREČENKO, Alexandr, 2006. Re-examined principles of thrust generation by a track on soft ground. *Journal of terramechanics*. **44**(1), 123 - 131. ISSN 0022-4898.
- GREČENKO, Alexandr, 2010. Thrust and slip of a low-pressure tire on compressible ground by the compression-sliding approach. *Journal of Terramechanics*. **47**(4), 249 - 259. ISSN 0022-4898. doi: 10.1016/j.jterra.2010.01.001.
- IVANOV, N, 1950. Osnoivnyje polozhenija mechaniky gruntov opredelyauschije prochodimost. In *Trudy soveschanija po prokhodimosti kolesnykh i gusenychnykh mashin*.
- JIŘIČKA, T., 2022. *Empirické stanovení styčné plochy pneumatiky na měkkém povrchu*. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- KOMANDI, G., 1990. Establishment of soil-mechanical parameters which determine traction on deforming soil. *Journal of Terramechanics*. **27**(2), 115-124.
- LHOTSKÝ, J., 2000. *Zhutňování půd a opatření proti němu*. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, 61 s. ISBN 80-7271-067-2 (brož.).
- MARKOVA, E., 2018. *Empirické stanovení styčné plochy pneumatiky*. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- MCKYES, E., 1985. *Soil Cutting and Tillage*. In: . 1. 1. Amsterdam: Elsevier Science. ISBN 9780444601049.
- MITAS, 2014. *Agricultural Tires, Technical databook*.

- PRIKNER, P., A. GREČENKO a R. PRAŽAN, 2017. Application of tire rating with aim to implement the matter on agricultural tires. *Proceedings of the 19th International and 14th European-African Regional Conference of the ISTVS*. Budapest, 1-12.
- PRIKNER, P., E. MARKOVA, A. GREČENKO a G. L. MASON, 2019. Tire individual contact area (TICA) pattern – The standard of tire CC-Rating and tire-SCE. *Proceedings of the ISTVS 15th European-African Regional Conference*.
- REECE, Alan R., 1964. *Problems of Soil Vehicle Mechanics: U.S.ARMY Tank-Automotive Center, Land Locomotion Laboratory, Report NO. 97*.
- SCHWANGHART, H., 1991. Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. *Journal of Terramechanics*. Elsevier, **28**(4), 309-318.
- SÖHNE, W., 1958. Fundamentals of Pressure Distribution and Soil Compaction Under Tractor Tires. *Agricultural Engineer*. USA, **39**(5), 276-281. ISSN 0002-1458.
- World Population Prospects 2022: Summary of results, 2022*. 27. Population Division. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs. ISBN 978-92-1-148373-4.
- YONG, R.N., E.A. FATTAH a P. BOONSINSUK, 1978. Analysis and prediction of tyre-soil interaction and performance using finite elements. *Journal of terramechanics*. **15**(1), 43–63. ISSN 00224898. doi: 10.1016/0022-4898(78)90038-1.

Přílohy

Příloha 1: Tabulka zatížení pneumatiky při různých tlacích pro rychlosti 10, 30 a 65 km.h⁻¹.
Continental SVT 650/85 R 38

		Zatížení pneumatiky při tlaku huštění (kg)									
Rychlost (km.h ⁻¹)	p _i (kPa)	40	60	80	100	120	140	160	200	240	280
65					4465	4895	5195	5450	6075	6500	
30			4050	4610	5135	5630	5975	6270	6985	7475	
10		4210	4930	5610	6250	6855	7275	7630	8500	9100	9750

Příloha 2: Tabulka zatížení pneumatiky při různých tlacích pro rychlosti 10, 30 a 65 km.h⁻¹.
Mitas RD - 03 650/65 R 38

		Zatížení pneumatiky při tlaku huštění (kg)								
Rychlost (km.h ⁻¹)	p _i (kPa)	40	60	80	100	120	140	160	200	
65					3155	3450	3790	4125		
30			2880	3270	3630	3970	4360	4745		
10		3000	3505	3980	4420	4830	5310	5775	6190	

Příloha 3: Tabulka kompakce půdy pro různé povrchy pro pneumatiku Continental SVT 650/85 R 38. (T) – tvrdý povrch; (M) – měkký povrch.

Tlak huštění (kPa)	Zatížení (kg)	S _{tcT} (cm ²)	S _{tcM} (cm ²)	q _{tcT} (kPa)	q _{tcM} (kPa)	Jilovitá půda		Jilovito- hlinitá půda		Hlinitá půda		Písčito- hlinitá půda		Hlinitý písek		Písek	
						(T)	(M)	(T)	(M)	(T)	(M)	(T)	(M)	(T)	(M)	(T)	(M)
240	3500	2258	2297	152	149	198	210	142	157	120	137	52	38	22	8	0	0
	4500	2643	2689	167	164	203	218	147	168	125	148	59	41	29	11	0	0
	5500	2997	3050	180	177	205	224	150	176	129	157	64	41	34	12	0	0
120	3500	3273	3330	105	103	154	151	98	95	74	72	9	8	0	0	0	0
	4500	3812	3879	116	114	173	170	116	114	92	90	22	20	0	1	0	0
	5500	4321	4398	125	123	185	183	127	125	(103)	(101)	32	30	2	2	0	0

Pozn. Čísla (x) označují akceptovatelnou hodnotu kompakčního potenciálu

Příloha 4: Tabulka kompakce půdy pro různé povrchy pro pneumatiku Mitas RD - 03 650/65 R 38. (T) – tvrdý povrch; (M) – měkký povrch.

Tlak huštění (kPa)	Zatížení (kg)	S_{tcT} (cm ²)	S_{tcM} (cm ²)	q_{tcT} (kPa)	q_{tcM} (kPa)	Jílovitá půda		Jílovito- hlinitá půda		Hlinitá půda		Písčito- hlinitá půda		Hlinitý písek		Písek	
						SCE											
						(T)	(M)	(T)	(M)	(T)	(M)	(T)	(M)	(T)	(M)	(T)	(M)
160	3000	2227	2784	132	106	174	137	116	(104)	93	81	18	0	0	0	0	0
	3500	2452	3065	140	112	194	181	121	122	99	99	27	0	0	0	0	0
	4000	2665	3331	147	118	186	198	126	139	(104)	115	32	0	2	0	0	0
100	3000	2894	3617	102	81	130	84	74	35	52	13	0	0	0	0	0	0
	3500	3119	3998	107	86	167	(102)	84	48	61	26	1	0	0	0	0	0
	4000	3493	4366	112	90	149	114	92	59	69	37	3	0	0	0	0	0

Pozn. Čísla (x) označují akceptovatelnou hodnotu kompakčního potenciálu