

**Česká zemědělská univerzita v Praze**  
**Technická fakulta**

**Kompakční efekt zemědělských pneumatik  
a nežádoucí zhutnění půdy**

bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Kroulík Ph.D.

Vypracoval: Jan Karfilát

**PRAHA 2011**

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Jan Karfilát**

obor Zemědělská technika

Vedoucí katedry Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu ČZU v Praze čl. 16 určuje tuto bakalářskou práci.

Název práce: **Kompakční efekt zemědělských pneumatik a nežádoucí zhutnění půdy**

## Osnova bakalářské práce:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Literární rešerše
4. Závěr
5. Seznam literatury
6. Přílohy



Doporučené zdroje:

Bekker, MG. Theory of land locomotion. (Second edition). 1962. The University of Michigan Press, ann Arbor.

Grecenko, A. Terramechanika. Studijní informace. Zemědělská technika. 1967.

Koolen, A J and Kuipers, H. Agricultural soil mechanics. Springer-Verlag, Berlin, 1983. 241pp. ISBN: 0-387-12257-5.

Lhotský, J. Zhutňování půdy a opatření proti němu. Studijní informace ÚZPI, Praha 2000. 61s. ISBN: 80-7271-067-2.

Muro, T and O'Brien, J. Terramechanics. Land locomotion mechanics. 2004. 277pp. ISBN: 978-90-5-809572-5.

Soane, BD; (Editor). Compaction by agricultural vehicles: a Review. SIAE, Technical report 5. Penicuik, Scotland. 1983. ISBN: 0-7084-0262-3.

Wong, J Y. Theory of ground vehicles. 4th Edition. 2008. 592pp. ISBN: 978-0-470-17038-0. Australian Journal of Soil Research

Journal of Terramechanics

Soil and Tillage Research

Soil Science Society of America Journal

Transaction of the ASABE

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milan Kroulík, Ph.D.**

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání bakalářské práce: duben 2011

  
.....  
Vedoucí katedry



  
.....  
Děkan

V Praze dne: 30. 11. 2009

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením ing. Milana Kroulíka Ph.D. a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne

.....

Jan Karfilát

## **Poděkování**

Zde bych rád poděkoval Ing. Milanu Kroulíkovi Ph.D. za vstřícnost, konzultace a připomínky při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Patriku Priknerovi Ph.D. za cenné rady a informace.

## **Abstrakt**

Cílem této práce je rozbor primárních vztahů mezi pojezdovým ústrojí kolových podvozků zemědělské techniky a zhutnění půdy. Literární rešerše obsahuje citace zásadních vědeckých prací v oblasti utužování půdy a jeho vlivu na růst rostlin, infiltraci vody a erozi půdy. Součástí práce je souhrn dosavadních konstrukčních řešení omezující kompakční efekt zemědělských pneumatik.

## **Klíčová slova**

Zhutňování půd, objemová hmotnost, penetrační odpor, pórovitost, zemědělské pneumatiky

# Compaction effect of agricultural tyres and harmful soil compaction

## **Summary**

The aim of the study is the analysis of fundamental relations between running gear of agricultural wheel vehicles and soil compaction. The summary includes crucial scientific citations from soil compaction topic and effect on plant grown, water infiltration and soil erosion. Second objective explains existing technical solutions that limit the compacting effect of tyres.

## **Keywords**

Soil compaction, bulk density, penetration resistance, porosity, agricultural tyres

<b>ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>1 PŮDA A JEJÍ VLASTNOSTI .....</b>	<b>9</b>
1.1 PŮDNÍ STRUKTURA.....	9
1.2 PÓROVITOST.....	11
1.3 ÚRODNOST PŮDY A ORGANICKÁ HMOTA .....	12
<b>2 PNEUMATIKY .....</b>	<b>14</b>
2.1 TYPY PNEUMATIK .....	14
2.1.1 Diagonální pneumatiky .....	14
2.1.2 Radiální pneumatiky.....	14
2.2 VYUŽITÍ ZEMĚDĚLSKÝCH PNEUMATIK .....	16
2.3 VLIV PNEUMATIK NA PŮDU.....	18
2.3.1 Vytváření stopy, infiltrace vody a eroze.....	18
<b>3 ZHUTNĚNÍ PŮDY .....</b>	<b>20</b>
3.1 PODSTATA ZHUTNĚNÍ.....	20
3.2 ZJIŠŤOVÁNÍ VELIKOSTI ZHUTNĚNÍ.....	21
3.3 ZHUTNĚNÍ PŮDY A JEHO NEGATIVNÍ VLIV NA PŮDNÍ PROSTŘEDÍ .....	23
3.4 VLIV ZHUTNĚNÍ NA RŮST ROSTLIN A VÝNOSY.....	24
3.5 OCHRANA A OPATŘENÍ PROTI ZHUTNĚNÍ .....	27
3.5.1 Omezení přejezdů půdy za vlhka .....	27
3.5.2 Řízení dopravy na poli.....	27
3.5.3 Technické a konstrukční řešení strojů .....	29
3.5.3.1 Snížení zatížení náprav .....	31
3.5.3.2 Zvyšování plochy pneumatik pomocí regulace tlaku v pneumatikách .....	31
3.5.3.3 Použití nízkotlakých pneumatik.....	32
3.5.3.4 Rychlost jízdy .....	33
3.5.3.5 Použití pásových podvozků .....	33
3.5.4 Organické hnojení a vápnění .....	33
3.5.5 Volba vhodných plodin .....	34
3.5.6 Systémy zpracování půdy.....	34
<b>4 DISKUSE A ZÁVĚR.....</b>	<b>37</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>39</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ.....</b>	<b>42</b>

## Úvod

Otázkami škodlivého zhutnění zemědělských půd se světová literatura zabývá více než 30 let. Za hlavní příčinu zhutňování půd půdního profilu se považují přejezdy těžkých kolových mechanizačních prostředků, především dopravních s tím, že příčiny degradace půd jsou složitější a přispívají k nim i další okolnosti: vlastnosti půdy, zejména vlhkost, zrnitost a obsah humusu, organizace pozemků, klima a způsob hospodaření (Lhotský, 2000).

Počátkem 60. let minulého století bylo v České republice provedeno masivní scelování zemědělských pozemků na kterých se začala používat výkonná zemědělská technika, často o vysokých hmotnostech a nevhodných technických parametrech. Uplatňovaly se jednotné technologické postupy a bez ohledu na individuální vlastnosti pozemků. V důsledku používání nevhodné zemědělské techniky a nevhodným způsobům hospodaření došlo k druhotnému zhutnění půdy, k poklesu úrodnosti, zvýšení energetické náročnosti při zpracování půdy a snížení efektivnosti hnojiv. Poznatky o hlavních příčinách zhutňování půdy zemědělskou technikou v povrchové i hloubkové vrstvě ukazují, že výzkum je potřeba zaměřit na účinky mobilních zemědělských strojů do hloubek 40 - 50 cm pod povrchem. Z jejich výsledků je nutné vyvodit závěry a aplikovat je na techniku a technologie používané v zemědělství.

V České republice je podle odborných odhadů zhutněním ohroženo 45 % plochy orných půd. Snížování výnosů vlivem druhotného zhutnění se u nás i ve světě udává o 10 - 30 %, podle druhu plodiny a dalších okolností. Lhotský v roce 2000 uvádí při racionálním odhadu (10% snížení výnosů) vyčíslení každoročních ztrát v České republice na 1,3 mld. Kč.



# 1 Půda a její vlastnosti

V mechanice zemin i v půdoznalství se půdou rozumí zemní hmota přirozeně uložená, kdežto zemina je část půdy, odebraná buď v původním uložení, nebo rozrušená kopáním. Rozrušená zemina téhož druhu a v témž stavu jako půda, nemá obvykle zcela tytéž mechanické vlastnosti, protože rozrušením struktury mizí některé vazby mezi jednotlivými zrny a nemohou být znovu uměle vyvolány.

Zemina je anorganicko – organický materiál s neobyčejně velkým rozsahem možného složení a stavu. Při experimentech nebo výpočtech je nutno co nejpřesněji uvádět podstatné definující vlastnosti zeminy, aby pokus či výpočet byl pokud možno určen a tím při zavedení stejných podmínek reprodukovatelný. Při návrhu experimentu je třeba zdůvodnit s ohledem na jeho cíl volbu sledovaných fyzikálních vlastností zeminy (Grečenko, 1967).

## 1.1 Půdní struktura

Strukturu půdy můžeme charakterizovat jako uspořádání půdních částic v určitém objemu a jejich spojování do větších strukturních jednotek (agregátů). Každý agregát je komplex půdních částic hlavně minerálního, ale i organického původu, které jsou spojovány tmelícími látkami, jako jsou sloučeniny železa, hliníku, vápníku a humusové látky. Pevnost stmelení strukturních agregátů nazýváme stabilitou půdní struktury. Volný prostor mezi půdními částicemi a strukturními agregáty zaujímají půdní póry. Struktura půdy svojí stavbou a uspořádáním agregátů, spolu s mezičásticovými nebo meziagregátovými póry, určuje základní fyzikální vlastnosti půdy, které vlivem zpracování podléhají dynamickým změnám. Půdní struktura integruje všechny základní vlastnosti půdy, vymezuje a ohraničuje její relaci na působení vnějších sil (Hůla a kol., 2008).

Polní půda je složena ze zrn (částic) různých velikostí a mívá spíše soudržný charakter; jsou-li tato zrna převážně menší než 2 mm, užívá se obecného názvu hlína s citováním eventuelně příměsí hrubších zrn. Hlína je na omak i na řezu či lomu drsná na rozdíl od prachu (na omak hladký, na řezu matný) a jílu (na omak hladký až mýdlovitě kluzký, na řezu lesklý). Výraz hlína se podle převahy zrn určité frakce rozlišuje přívlastkem jílovitá (jH), prachovitá (prH) nebo písčitá (pH), (Grečenko, 1994).

Agronomicky je významná stabilita agregátů (odolnost proti rozplavování vodou nebo proti mechanickým tlakům), která se zvyšuje v přítomnosti dostatku kvalitních organických látek, vápníku a příznivého zrnitostního složení. Nejvýznamnějším pro strukturu rušivým činitelem je dešťová voda a půdní roztok. Dešťové kapky mohou v povrchové vrstvě

mechanicky rozbít agregáty, při ovlhčování půd může docházet k rozplavování agregátů, vyplavování koloidů a vyluhováním iontů Ca se vytvářejí rovněž rušivé podmínky pro agregáty. Nevhodné obdělávání půdy, časté pojíždění těžkých mechanismů, peptizační účinky průmyslových hnojiv bez odpovídající kompenzace rovněž narušují půdní strukturu. Rušivým účinkům na strukturu nemusí podléhat jen povrchová vrstva s následnou tvorbou půdního škraloupu, ale může se vytvářet i podorniční utužení s omezenou propustností pro vodu a omezující pronikání kořenů (Studijní informace Jihočeská univerzita).

**Tab. 1 - Půdní druhy podle % hmotnosti jílových zrn (upraveno Lhotský, 2000)**

Skupina půd	Druh půdy	% hmotnosti jílových zrn	označení
Lehké	písčítá	0 - 10	P
	hlinitopísčítá	10 - 20	hP
Střední	písčitohlinitá	20 - 30	pH
	hlinitá	30 - 45	H
Těžké	jílovitohlinitá	45 - 60	jH
	jílovitá	60 - 75	J
	jíl	nad 75	JJ

V půdním profilu s dobrou strukturou platí, že pevné látky, voda a vzduch jsou v poměru přibližně 50:23:23, přičemž obsah organické hmoty je 4 % nebo i vyšší. Pro zajištění základní stability půdní struktury platí pro organickou hmotu nižší prahová hodnota 2 %. Organická hmota je tvořena uhlíkem, dusíkem, fosforem a draslíkem spolu se stopovými prvky. Ovlivňuje růst rostlin úpravou pH půdy, zlepšováním struktury, usnadněním zpracování půdy, dodáváním živin a zadržováním vody. Navíc k těmto základním složkám existuje mnoho dalších prvků, které přispívají k dobré struktuře a zdraví půdy. Patří k nim ohromné množství mikroorganismů a větších organismů, jejichž koexistence utváří půdní ekosystém. Kromě toho pomáhá udržování správné vyváženosti půdních minerálů, optimalizovat zdraví i výnosnost plodin a vytvářet stabilní půdní strukturu. Půdy s velkokapacitní výměnou kationtů jsou schopny poskytnout plodinám vysokou hladinou živin (Scamell, 2000) a správná rovnováha těchto prvků (zvláště Ca a Mn) napomáhá stabilitě půdy. Zpracování půdy dokáže tyto rovnováhy zlepšit nebo v mnoha případech obvykle zničit (Wright, 2010).

## 1.2 Pórovitost

Pórovitost půdy je vedle struktury hlavním znakem prostorového uspořádání půdního profilu. Půda není kompaktní, ale pórovitou (porézní), neboť mezi pevnými částicemi půdy a jejich shluky (agregáty) jsou volné prostory - půdní póry. Jsou to cesty, kterými vnikají do půdy faktory vnějšího prostředí - voda a vzduch - které vyvolávají v půdním profilu pochody zvětrávací a půdotvorné, umožňující pronikání kořenů do půdy a pohyb edafonu i cirkulaci roztoků a plynů v půdě. V pórech se uskutečňují nejdůležitější dynamické děje, probíhají tu látkové přeměny chemické a biochemické, výměnné reakce mezi jednotlivými fázemi a půdou, buňkami mikroorganismů a kořínky rostlin, na stěnách pórů přichází do nejtěsnějšího styku pedosféra a biosféra.

Pórovitost půdy je charakterizována celkovým objemem pórů, jako souhrnem všech pórů vyjádřených v objemových procentech a zastoupením jednotlivých velikostních skupin pórů, tj. pórů kapilárních, semikapilárních a nekapilárních, což je rozhodující pro vodněvzdušné poměry v půdě.

Podobně jako hodnota redukované objemové hmotnosti charakterizuje také pórovitost nakypřenost či utuženost půdy. Pórovitost se v ornících našich půd pohybuje kolem 55 %, u silně humózních a rašelinných půd může dosahovat až přes 80 % objemu, ve spodních vrstvách půd klesá na 45 - 35 % objemu.

Povaha pórovitosti je spojena s prostorovým uspořádáním půdy (strukturou) a její zrnitostí. U půd v elementárním stavu převažují široké gravitační póry mezi částicemi písku, u slitých půd převládají úzké póry kapilární mezi částicemi (mikroagregáty) jílu. Půdy v agregátovém stavu vykazují póry meziagregátové (gravitační) i vnitroagregátové (kapilární). Za výhodnou pórovitost lze považovat stav, kdy gravitační póry tvoří asi třetinu celkové pórovitosti.

Pro funkci pórů je významná jejich velikost. Třídění pórů podle velikosti není snadné, protože jejich průměr nelze přímo měřit. stanovuje se nepřímou podle druhu a velikosti sil, které působí na vodu v nich obsaženou. Třídění pórů na hrubé, střední a jemné je uvedeno v tab. 2. Pro vyjádření sacího napětí vody je tu použito hodnoty  $p_F$ , což je dekadický logaritmus výšky vodního sloupce, jehož tlak je v rovnováze se silou, kterou je voda poutána v pórech.

**Tab. 2 - Rozdělení pórů podle velikosti a sacího napětí vody (upraveno Scheffer a Schachtschabell, 1973)**

póry	ekvivalentní průměr v $\mu\text{m}$	pF
hrubé, široké	> 50	0 - 1,77
hrubé, úzké	50 - 10	1,77 - 2,54
střední	10 - 0,2	2,54 - 4,20
jemné	< 0,2	> 4,20

Půdní póry mají velký význam pro biologii půdy. Póry menší než 1  $\mu\text{m}$  jsou nepřístupné bakteriím, póry 1 - 10  $\mu\text{m}$  jsou přístupné pro bakterie, ale nepřístupné pro vlásečnicové kořínky, póry 10 - 20  $\mu\text{m}$  jsou přístupné pro vlásečnicové kořínky a nepřístupné pro prvoky a řasy, póry větší než 20  $\mu\text{m}$  jsou přístupné pro všechny mikroby.

**Tab. 3 - Zastoupení velikostních skupin pórů v zrnitostně rozdílných půdách (upraveno Jihočeská univerzita)**

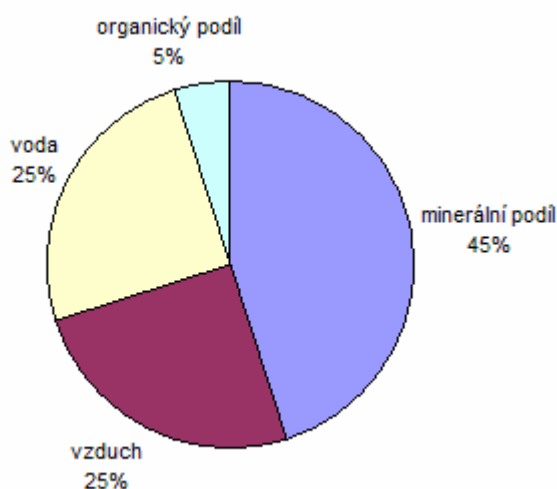
půdní druh	pórovitost	hrubé póry	střední póry	jemné póry
	% objemu			
písečné půdy	42 $\pm$ 7	30 $\pm$ 10	7 $\pm$ 5	5 $\pm$ 3
hlinité půdy	45 $\pm$ 8	15 $\pm$ 10	15 $\pm$ 7	15 $\pm$ 5
jílovité půdy	48 $\pm$ 8	8 $\pm$ 5	10 $\pm$ 5	30 $\pm$ 10

### 1.3 Úrodnost půdy a organická hmota

Úrodnost půdy je schopnost poskytovat vhodné podmínky pro rostliny a jiné organismy, pro které je životním prostředím. Je to tedy komplexní dynamická vlastnost, závislá na řadě fyzikálních, chemických a biologických vlastností, které půda získává v průběhu svého vzniku a vývoje.

Půda je velmi heterogenní disperzní systém, ve kterém jsou navzájem rozptýleny (spolu smíchány) látky tuhé, kapalné a plynné. Kapalná a plynná fáze (půdní voda a půdní

vzduch) jsou zastoupeny v pórech (Hůla a kol., 2008). Obr. 1. názorně popisuje složení faktorů ovlivňující úrodnost půdy.



**Obr. 1 - Faktory ovlivňující úrodnost půdy podle L. Neuderta (Hůla a kol., 2008)**

V odborné literatuře lze najít velké množství různých definic půdní organické hmoty a jejího vymezení vedle pojmu humus, který je mnohem starší a obecně rozšířenější. Baldok a Nelson (2000) definují půdní organickou hmotu jako „*sumu všech přírodních a termálně změněných látek biologického původu, které se nacházejí v půdě nebo na půdním povrchu, jakéhokoli původu, živých nebo odumřelých organismů v jakékoli fázi rozkladu, s výjimkou nadzemních částí živých rostlin*“. Definice tedy zahrnuje živé organismy, jako kořeny rostlin, mikroorganismy, odumřelé mikro a makroorganismy a jejich části, rozpustné organické látky, humus, včetně nehumusových biopolymerů (identifikovatelné organické struktury), hlavně však humusové látky jako huminové kyseliny, fulvokyseliny, humin a konečně zuhelnatělé organické látky (Kubát a kol., 2008).

## 2 Pneumatiky

Pneumatika tvoří spojovací článek mezi podložkou a traktorem. Přenáší hmotnost traktoru a připojeného nářadí, hnací a brzdící momenty a boční síly na podložku. Současně je důležitým členem v pružící soustavě. Proto musí být pneumatice věnována velká pozornost, neboť sebelepší konstrukce traktoru může mnoho ztratit např. na tahových vlastnostech díky nevhodné volbě pneumatik (Bauer a kol., 2006).

### 2.1 Typy pneumatik

#### 2.1.1 Diagonální pneumatiky

Diagonální pneumatiky jsou dnes považovány za „klasickou konstrukci“. Kostru mají tvořenou pásy vedenými od patky k patce a vzájemně se kříží pod úhlem mezi 30° až 40°. Vlákna přenášejí obvodové i příčné síly přímo do patky pláště. Výhodami jsou pevná struktura a silné bočnice, zvláště v terénu je výhodná jejich velká odolnost proti proražení.



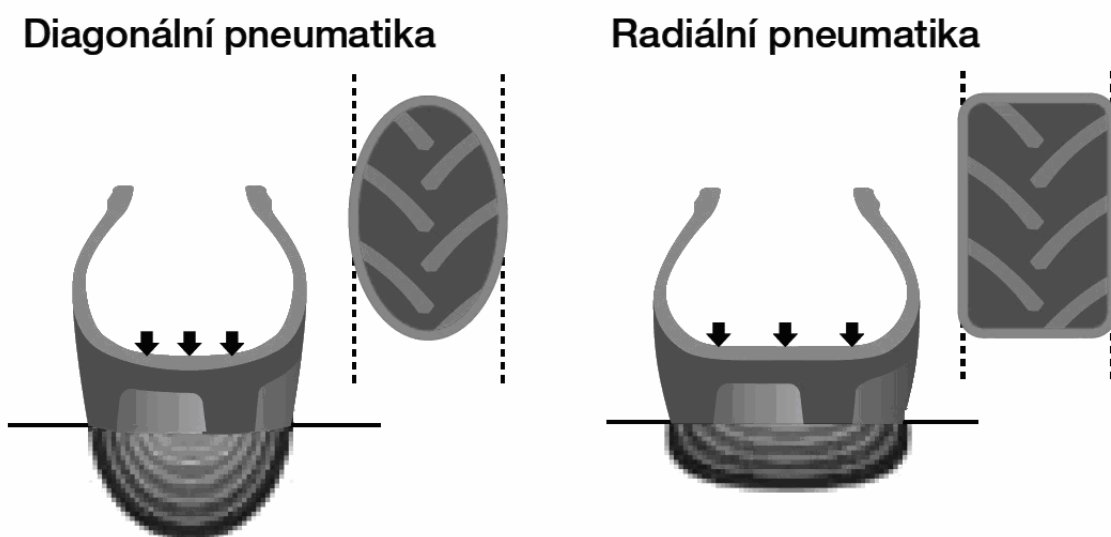
Obr. 2 - Konstrukce pneumatik (diagonální, radiální), (upraveno <http://www.mdline.cz/>)

#### 2.1.2 Radiální pneumatiky

Vlákna kostry jsou uložena pod úhlem blízkým 90° vzhledem k podélné rovině směrem k běhounu a tato část přenáší boční i radiální síly. Schopnost přenášet obvodové síly je malá, proto je kostra stabilizována obvodově neroztažitelným pásem, tzv. nárazníkem. Ten je tvořen vložkami s vlákny kříženými pod úhlem 15° až 20°.

Výhody radiálních pneumatik oproti diagonální:

- větší životnost;
- větší nosnost při stejném tlaku vzduchu;
- výborné boční vedení;
- menší vnitřní deformace a z toho plynoucí menší tepelné namáhání;
- lepší přenos brzdných sil i při náklonu v zatáčkách;
- menší valivý odpor;
- menší hmotnost;
- větší styčná plocha, lepší rozložení tlaku na půdu.



**Obr. 3 - Rozložení tlaku pneumatik na půdu a tvar otisku (upraveno Continental databook 2008)**

Velkoobjemové pneumatiky byly vyvinuté pro traktory s výkonem nad 180 HP a sklízecí mlátičky. Základem je radiální konstrukce pneumatiky, ale mají větší objem vzduchu než klasické radiální traktorové pneumatiky a tím zajišťují šetrnější vztah k půdě. Vzhledem k velkému objemu vzduchu se uplatňují i při provozu na silnicích, především pro vysoký jízdní komfort a velké povolené rychlosti (až  $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

## 2.2 Využití zemědělských pneumatik

V zemědělství se využívá několik druhů pneumatik (obr. 11), které se liší vhodností využití při různých pracovních operacích. Příkladem může být využití traktoru pro přihnojování rostlin během vegetace, kdy v předjaří s namontovanými širokými flotačními pneumatikami provádí regenerační hnojení, naopak při produkčním nebo kvalitativním hnojení využívá kultivačních kol. V této souvislosti se setkáváme i s vícenásobnými montážemi kol. V České republice se nejvíce využívají zdvojené pneumatiky, u těžkých kloubových traktorů lze použít také trojmontáže (obr. 12). Zajímavou alternativou může být dvou-, nebo troj-montáž kultivačních kol při plečkování řádkových kultur kukuřice (převážně v USA) nebo cukrové řepy, s takovou kombinací se můžeme setkat i při zakládání porostů brambor a jejich kultivaci. Pokud jde o pojezdovou rychlost, setkáváme se zpravidla s pneumatikami

s konstrukční rychlostí do 40 až 50 km.h<sup>-1</sup>, pro systémové nosiče a traktory s vyššími pojezdovými rychlostmi se hodnoty zvyšují na 50 až 80 km.h<sup>-1</sup>. Samostatnou skupinou pneumatik jsou typy pro zemědělské nákladní automobily. Především jsou to univerzálních pneumatiky, neboť v jejich případě dochází k časté změně terénu, především splňující požadavky hospodaření na půdě, kam v posledních letech patří různá provedení flotačních pneumatik a nechybí rovněž moderní typy šípových dezénů.



**Obr. 4 - Různé typy radiálních pneumatik (velkoobjemová, nízkoprofilová, standardní, kultivační), (upraveno Continental)**

U techniky pro zemědělskou dopravu je důležitý především příznivý kontaktní tlak pneumatik s ohledem na průjezdnost terénem, zejména za nepříznivých podmínek. Rozhodujícím faktorem při volbě pneumatik je ovšem celková hmotnost vozidla.



Jde především o návěsy a přívěsy pro zemědělskou dopravu, senážní vozy, aplikační techniku, sklízeče brambor, sklízeče cukrové řepy a závěsné řezačky. Proto každý z výrobců zemědělské dopravní techniky nabízí širokou škálu pneumatik, kdy s jejich rostoucí nosností a celkovou hmotností vzrůstá také šířka pneumatik a zvětšuje se rozměr disku. Posledním trendem je kombinace velkoobjemových pneumatik s dalším příslušenstvím, jako jsou říditelné nápravy, případně systémy změny tlaku v pneumatikách. Konstrukční rychlost těchto pneumatik koresponduje s konstrukční rychlostí pneumatik používaných u traktorů a kromě již zmíněné hodnoty od 40 do 50 km.h<sup>-1</sup> se nejčastěji setkáváme s rychlostí až 60 km.h<sup>-1</sup>.



**Obr. 5 - Těžký kloubový traktor opatřený trojmontáží (upraveno <http://imcdb.org/>)**

V případě pneumatik pro sklizňové stroje se musí brát ohled na nízký kontaktní tlak, průchodnost terénem i následné pracovní operace spojené zejména s přípravou půdy. V případě aktivně poháněných pojezdových kol je nutné mít na zřeteli i dostatečnou trakci. Sklizňové stroje, v našich podmínkách zejména sklízeče brambor a cukrovky, jsou vybaveny zásobníkem, který má určitou kapacitu. Hmotnost sklizených plodin je nutné přičíst ke hmotnosti samotného stroje. V úvahu je třeba brát i klimatické podmínky, za jakých probíhá podzimní sklizeň. V řadě případů pak musí být zohledněn pohyb v řádkových kulturách. Proto není výjimkou, kdy je jedna část podvozku opatřena pneumatikou o daném standardním rozměru a na druhou část jsou namontované pneumatiky s jiným rozměrem.

## 2.3 Vliv pneumatik na půdu

### 2.3.1 Vytváření stopy, infiltrace vody a eroze

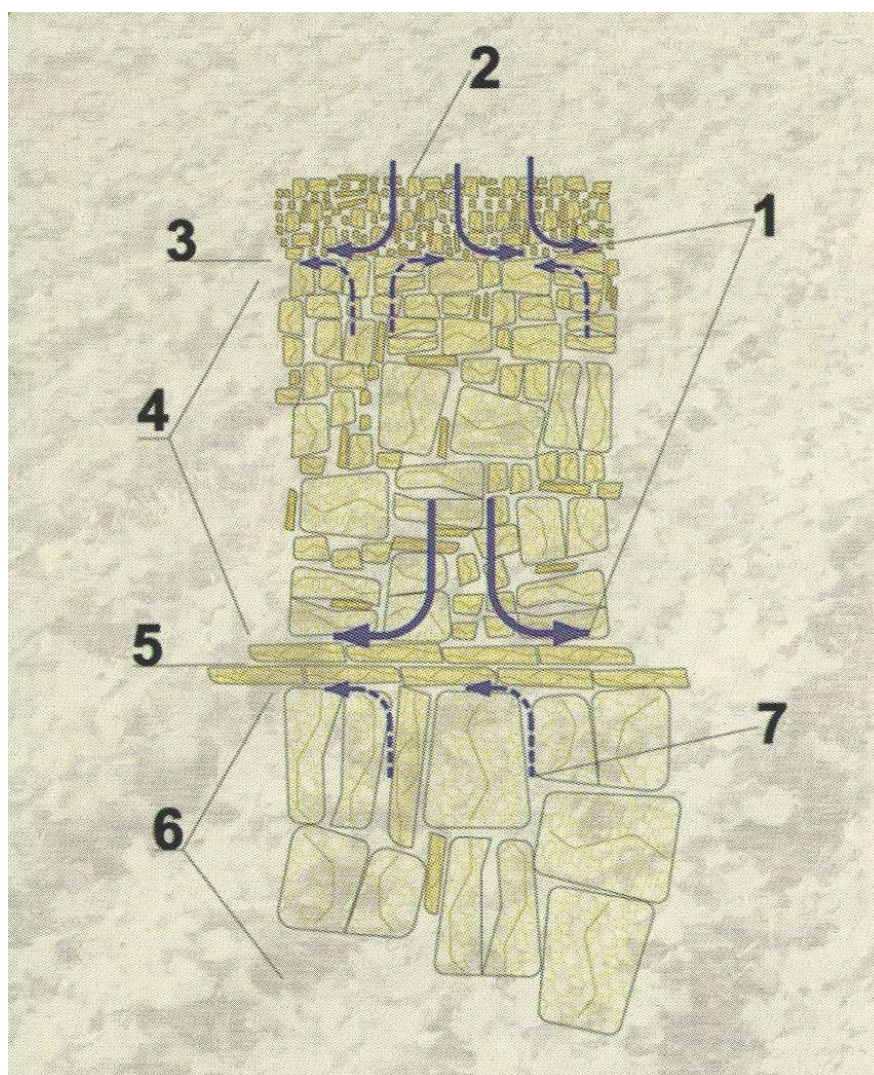
Jedním z prvních viditelných znaků poškození půdy provozem zemědělských strojů jsou nadměrné deformace kolejových řádků a hluboké koleje. Zaboření kol do půdy nastává při pojíždění půdy v nakypřeném stavu nebo za zvýšené vlhkosti půdy. Při zvýšeném zatížení náprav a při zvýšeném tlaku huštění se pneumatiky více zaboří do půdy Raper a kol. (1995). Hloubka vyjetých kolejí traktoru je za přední pneumatikou větší než za zadní při použití dvojmontáží na zadní nápravě Pearman a kol. (1996). Z toho vyplývá, že použití dvojmontáží na traktoru jen na zadní nápravě není dostatečné opatření pro omezování zhutnění (Perdok, 1987).

Z ekonomického hlediska je zabořování pneumatik do půdy také velmi nežádoucí. Udává se, že každý centimetr hloubky stopy navíc znamená nárůst spotřeby paliva o cca 10 %. Stopy o hloubce 10 cm spotřebu traktoru zdvojnásobí a také poškozují půdu. Právě malé pneumatiky klasických přívěsů, nahuštěné na tlak větší než 300 kPa, vytvářejí při sklizni na poli nejhlubší koleje (Beneš, 2009).

Vyjeté koleje jsou viditelným problémem, později může nastat větší problém. Při srážkách se ve vyjetých kolejích zadržuje voda z důvodu nadměrného zhutnění půdy a snížené povrchové propustnosti. Gaultney a kol. (1982) při pokusech zjistili, že na zhutnělých pozemcích stála v místech zhutnění voda mnohem déle než na nezhutněných místech. Kašpar a kol. (2001) zjistili zvýšení odtoku hlinité půdy v kolejových řádcích, eroze byla více než dvojnásobná oproti nezatížené půdě. Vlivem zatížení půdy přejezdy se snížila půdní vlhkost v blízkosti povrchu, tím klesla vlhkost potřebná pro růst rostlin (Hamlett a kol., 1990). Při pokusu s hmotnostmi traktorů na jílovitohlinité půdě snížil přejezd lehkým traktorem (4,1 t) schopnost infiltrovat vodu o 23 % až 33 %, přejezd velkým traktorem (8,2 t) snížil schopnost infiltrace vody o 38 % až 43 % (Allen, Musick, 1995).

Obr. 6 znázorňuje pohyb vody a živin ve zhutnělé půdě. Zhutnělé vrstvy a vrstvy mezi půdními částicemi s póry různé velikosti vytvářejí bariéry pro pohyb vody, vzduchu a živin. Pohyb vody (1) vyvolaný změnami objemové hmotnosti nebo velikosti půdních částic kapilárním působením je silně omezený. To platí za předpokladu, že půda není nasycená, a může pak převažovat gravitace. Půdní částice (2) s póry menší nebo větší velikosti jsou často ovlivněny zpracováním půdy. Pohyb vody (3) od malých pórů k velkým je v nenасыceném stavu velmi pomalý, protože kapilární tlak udržující vodu je vyšší

v oblastech s malými póry. Zóny (4) pod takovými vrstvami proto mohou omezovat vodu (příkladem je kolísající hladina podzemní vody). Zhutnělé vrstvy (5) s vysokou objemovou hmotností rovněž omezují pohyb vody, vzduchu a živin. Zóny (6) pod zhutněnými vrstvami nejsou snadno dostupné pro kořeny. Proto může být v suchých létech omezeno naplňování lusků nebo zrna, což vede k předčasnému zrání a ztrátě potenciálu a výnosu plodiny. Pohyb vody (nebo vzduchu) nahoru (7) je rovněž omezen zhutněnými vrstvami nebo změnami velikosti půdních částic. To může mít významný vliv v suchých sezónách, kdy kapilární vzlínavost může mít příznivý vliv na vcházení plodin s mělkými kořenovými systémy. Zpracování půdy by mělo odrážet potřebu vytvořit správnou strukturu půdy a zabránit prudkým změnám velikosti půdních částic (Wright, 2010).



**Obr. 6 - Pohyb vody a živin ve zhutnělé půdě (upraveno Wright, 2010)**

## 3 Zhutnění půdy

### 3.1 Podstata zhutnění

Globálním vyjádřením vlastností půdy a souhrnným ukazatelem jejího okamžitého stavu je struktura půdy. Právě půdní struktura je zhutněním postihována bezprostředně a od jejího zhoršování se odvíjí i zhoršení ostatních půdních vlastností. Zhoršení struktury a navazujících vlastností se promítne jednak do zhoršení produkčních vlastností (snížení výnosů, zvýšení náročnosti při obdělávání půdy, snížení účinnosti hnojení) a jednak do zhoršení ekologických funkcí půdy, zejména transportních a transformačních pochodů. Struktura půd je ovlivňována vlastním původem (povahou matečné horniny), povětrnostními faktory, agrotechnikou a ovšem také přímými mechanickými zásahy tzn. zhuťováním či kypřením (Lhotský, 2000a).

Negativní důsledky - produkční i ekologické - má deformace nebo až destrukce struktury, např. zhutněním. Zhutnění může být povahy primární, dané povahou půdy, nebo druhotné, způsobené především technologiemi zpracování půdy a pěstování plodin. Přitom ke genetickému lze přiřadit i zhutnění způsobené objemovými změnami v jílovitých půdách (bobtnání) nebo i pedogenetickými procesy (ucpávání porů migrací jemných částic, např. ilimerizací). Naopak k příčinám druhotného (technogeního) zhutnění řadíme především destrukci půdy způsobenou pojezdem a prokluzem mechanizačních prostředků, ale i tlaky, které vyvíjejí pěstované plodiny (např. růst bulev řepy). Odolnost struktury půd oslabují i některé druhy hnojiv (chloridová, draselná, sodná) i jejich forma (tekutá hnojiva, kejda) (Lhotský, 2000a).

Zhutněním je narušen vodní a vzdušný režim, což vyvolává negativní důsledky (Lhotský, 2000a):

- Dochází k deficitu kyslíku pro kořeny rostlin a k celkovému stresu rostlin, kterým se deficit kyslíku prohlubuje (rostlina ve stresu vyžaduje více kyslíku), dalším důsledkem je omezení až zastavení aerobních a rozvoj anaerobních procesů v půdě se všemi důsledky tvorby nekvalitního humusu, nepříznivých meziproductů a okyselování rostlin; konečným důsledkem je nekvalitní růst a složení rostlin.
- V půdách s degradovanou strukturou je snížen celkový objem procesů látkové přeměny, čímž se vytváří méně energie pro růst plodin.
- Klesá schopnost půdy dezaktivovat, resp. degradovat přítomné nebo vstupující škodlivé látky, čímž se snižuje její sanitární účinnost.
- Okyselováním, které bývá průvodním jevem zhutnění, se zhoršuje přijímání živin rostlinou a zvyšuje se mobilita většiny rizikových prvků s důsledkem jejich intenzivnějšího příjmu rostlinami.
- Důsledkem zhutnění je i nižší efektivnost hnojení s následnou akumulací většího podílu nevyužitých hnojiv v půdě.

- Destrukce struktury půdního povrchu přispívá k snížené infiltraci a k erozi, jejímž druhotným důsledkem jsou lokální akumulace smyvů, včetně rizikových látek s nebezpečím zvýšeného transferu do rostlin a vod.
- Deformace struktury hlinitých a jílových půd způsobuje defekty v růstu a kvalitě rostlin, které jsou výrazně v extrémních povětrnostních situacích (za přemokření, za přísušku).
- Absence struktury u lehčích půd má za následek urychlení mineralizačních pochodů s tvorbou dusičnanů a s důsledkem jejich zvýšeného příjmu rostlinou nebo vyplavování do vod.

### 3.2 Zjišťování velikosti zhutnění

Nejjednodušší metodou je empirické pozorování vnějších projevů zhutnění půdy zahrnujících: výskyt míst se stagnující vodou po deštích nebo při jarním tání, špatné vcházení a deficitní růst porostů, zažloutlá barva listů, za sucha škrálopupy a trhliny v půdě, deformace kořenů (Lhotský, 2000a).

Nejpoužívanější metody pro zjištění zhutnění půdního profilu jsou měření půdní objemové hmotnosti a penetračního odporu v daných hloubkách. Obecně platí, že při vyšších vlhkostech jsou písčité půdy méně náchylné ke zhutnění než jílovité v důsledku menšího obsahu jílovitých částic.

Nejpoužívanější a osvědčená nepřímá metoda vyšetření zhutnění půdního profilu je stanovení penetračního odporu pomocí penetrometru (ruční, strojový). Tato metoda je velice jednoduchá a flexibilní. Penetrační odpor je používán stále ve větší míře jako komplexní parametr popisující fyzikální stav půdy. Hodnoty penetračního odporu korelují s objemovou hmotností půdy, jsou však rovněž funkcí druhu půdy a její vlhkosti (Grečenko, 1994).

Penetrační odpor se začal využívat i jako indikátor mechanického odporu půdy vůči růstu kořenového systému (Taylor et al., 1966; Barley et al., 1968). Bengough a Mullins (1991) rozpracovávají tento odpor pomocí rotace penetrometru v závislosti na velikosti úhlu penetračního kužele a definují horizontální smykové napětí. Protože toto napětí (resp. penetrační odpor) je významně ovlivněno třením kovových částí penetrometru o půdní částice, Bengough et al. (1997) upřesněným rozborem všech činitelů ovlivňujících penetrační odpor specifikuje odpor půdy kladený kořenovému systému. To a Kay (2005) stanovili odpor půdy vůči kořenovému systému rostlin přepočtovou rovnicí předpovídající tzv. mechanický odpor půdy, vycházející z funkce půdní struktury (obsah jílnatých částic), obsahu organického

uhlíku v půdě a objemové hmotnosti půdy při definovaných hodnotách vlhkostního potenciálu v závislosti na velikosti aplikovaného normálovém napětí (skutečného penetračního odporu) s přesností 83 %. Podklady pro tuto rovnici byli stanoveny z rozboru neporušených a porušených půdních vzorků.

Håkansson v roce 1990 jako první publikuje tzv. stupeň zhutnění  $D$  (Degree of compactness) vyjadřující míru půdní kompakce, získanou pomocí standardizovaných jednoosých odeometrických testů při tlaku 200 kPa. Stupeň zhutnění je stanoven pro standardizované vlhkostní podmínky v důsledku zabránění možného výkyvu obsahu vody v půdách s rozdílným obsahem jílovitých částic (bobtnání a smršťování půdy).

Ukazatel stupeň zhutnění (dále  $D$ ) umožňuje, aby byly výsledky pokusů se zhutňováním půdy všeobecně platné. Zatímco hodnoty objemové hmotnosti či poréznosti, které jsou optimální pro pěstování plodin, se významně liší podle druhů půd, optimální hodnota  $D$  je fakticky nezávislá na složení půdy. Kritické limity odolnosti proti prostoupení (3 MPa) a podíl vzduchem vyplněných pórů v půdě (10 %) jsou také vázány na hodnotu  $D$  a na vodní tlak ve většině půd. S  $D$ -hodnotou rostoucí nad bod optima se rozsah hodnot vodního tlaku, při kterém existují neomezující podmínky, neustále zmenšuje.  $D$ -hodnota ornice zapříčiněná stejným počtem přejezdů určitého vozidla je podobná ve všech půdách při zachování srovnatelných vlhkostních podmínek. Stupeň zhutnění usnadňuje modelování reakce půdy a plodin na provoz strojů. Přestože byl tento ukazatel vyvinut pro použití na každoročně narušovaných vrstvách půdy, jeho použití lze rozšířit i na nepoškozené vrstvy půdy (Håkansson, 2000).

Další závěry stanovují mezní hodnoty penetračního odporu (2 - 6 MPa) v závislosti na půdních podmínkách (např. Lhotský a kol., 1984; Dexter, 1986). Odlišný směr v předpovědi škodlivého zhutnění půdního profilu je využití simulace zhutnění zemědělské půdy pomocí matematických modelů a metody konečných prvků (např. Raper a kol., 1994; Abu-Hamdeh a Reeder, 2003; ad.). Studium škodlivého zhutnění půdního profilu však musí zohledňovat především jeho heterogenitu. Pokud toto není jasně vyjádřeno, musí se výzkum v této oblasti ubírat novým směrem, např. Håkansson (1990) specifikoval tzv. stupeň zhutnění  $D$  (Degree of compactness), zpracovaný v závislosti na saturaci půdy (Etana a kol., 1997), nebo Grečenko a Prikner (2009), CC - rating pneumatiky (Compaction Capacity) a stanovit hodnoty limitních zatížení a kontaktních tlaků pneumatik, pásů včetně penetračního odporu v přesně definovaných půdních a vlhkostních podmínkách.

### 3.3 Zhutnění půdy a jeho negativní vliv na půdní prostředí

Zhutňování půdy má za následek zvýšení objemové hmotnosti půdy, snížení pórovitosti (především nižší objem nekapilárních pórů) a fyzikálních vlastností půdy, např. k omezené propustnosti půdy pro vodu, způsobuje změny v obsahu vody v rámci půdního horizontu a ovlivňuje její pohyb v půdě. Současně ovlivňuje relace mezi obsahem vzduchu (deficit kyslíku v kořenovém prostoru) a teplotou půdy. Lhotský (1984) uvádí limitní kritické hodnoty některých fyzikálních vlastností půdy (tab. 4), při jejichž překročení dochází nejen ke škodlivému působení na rostliny, ale i na edafon v půdě a na efektivní využití aplikovaných hnojiv.

Při vyšším zhutnění půdy se omezuje zejména půdní mezoedafon (dešťovky, chvostoskoci, členovci aj.) podílející se na droptovité struktuře. Mikroedafon, tvořený zástupci jednobuněčných organismů, především bakterií a prvoků, převážně patří mezi aerobní organismy. Jejich rozvoj je podmíněn nejen dostatečnou zásobou organických látek v půdě, ale i dobrou provzdušeností a vlhkostí. Ve zhutnělých a neprovzdušených půdách je aktivita mikroedafonu značně omezena a důsledkem je klesající kvalita půdního humusu, acidifikace půdního prostředí a jeho kontaminace agrochemikáliemi.

Biologicky činná půda je podmínkou intenzivního a vyváženého příjmu živin a jejich vysoké mobilizace rostlinami. Je zjištěno, že při nadměrném zhutnění půdy tj. při hodnotách objemové hmotnosti nad  $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$  u středně těžkých půd se značně snižuje efektivnost hnojení, přičemž se zejména projevuje nedostatek dusíku.

**Tab. 4 - Mezní hodnoty kritických vlastností zhutnělých půd (upraveno Lhotský, 1984)**

Půdní vlastnost	Půdní druh					
	J	jH	H	pH	hP	P
Obj. hm. red. [ $\text{g.cm}^{-3}$ ]	> 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	2,8 – 3,2	3,3 – 3,7	3,8 – 4,2	4,5 – 5,0	5,5	6
[% obj.]	28 - 24	24 - 20	18 - 16	15 - 13	12	10

Nadměrné zhutnění zvyšuje odpor půd při jejich zpracování a tím vzrůstá energetická náročnost při běžném obdělávání zejména při orbě. Řada autorů zjistila, že za posledních 30 let se v důsledku zhutnění středně těžkých půd zvýšil orební odpor v průměru o 30 %, na souvratích až o 80 %. To se zákonitě promítá do zvýšené spotřeby nafty a ve vyšších nákladech na orbu. Při odstraňování půdního zhutnění podorničí vrstvy půdy (dlátování, hloubkové kypření) se energetická náročnost dále výrazně zvyšuje. Při odstraňování zhutnělé půdy v podorničí činí spotřeba nafty na hloubkové meliorační kypření do 0,65 m zhruba 45 l.ha<sup>-1</sup> (Vach, Javůrek, 2008).

### **3.4 Vliv zhutnění na růst rostlin a výnosy**

Nadměrné zhutnění půdy redukuje rychlost růstu kořenů plodin, jejich prodlužování a prorůstání do spodních vrstev půdy (hloubka zakořenění) i tvorbu kořenového vlásnění. Taylor a kol. (1966) zkoumal vliv různých typů půd na růst kořenů. Jejich výsledky ukázaly, že ve čtyřech různých půdách nepronikl hlavní kořen přes vrstvu 2,5 MPa. Ve zhutnělých půdách jsou nejvíce postiženy plodiny, které tvoří hospodářský výnos podzemními orgány (u cukrovky dochází k tzv. větvení bulv, u brambor k deformaci hlíz apod). U plodin, které vytvářejí hlavní kulový kořen (řepka olejka, sója, slunečnice aj.) se jeho růst omezuje tím, že neproniká zhutnělou vrstvou v podorničí, roste horizontálně a deformuje se. Kašpar a kol. (2001) zjistili, že stlačení půdy kolem výrazně snížil růst kořenů kukuřice ve vrchních 30 cm. Nadměrné zhutnění půdy má za následek nižší příjem vody a živin v porovnání s normálně vyvinutým kořenovým systémem. Příпустné hodnoty objemové hmotnosti půdy pro některé plodiny jsou uvedeny v tab. 6 (Vach, Javůrek, 2008).

Zhutnění orniční a podorniční vrstvy má za následek snížení výnosů plodin v závislosti na velikosti zhutnění a dalších faktorech (klimatické podmínky, půdní druh a způsob hospodaření); obilniny 10 – 20 %, kukuřice 10 – 15 %, luskoviny 15 – 20 %, brambory 20 – 25 %, cukrovka 20 – 30 %. Utužení půdy kromě snížení výnosu nepříznivě ovlivňuje jakost produkce. Bylo prokázáno snížení cukernatosti cukrové řepy v průměru o 15 %, olejnatost semen řepky olejky až o 8 % (Vach, Javůrek, 2008). Hammel (1994) provedl pokusy se zatížením náprav (5, 10 a 20 t) na prachovité hlíně a zjistil zvýšení objemové hmotnosti a penetračního odporu až do hloubky 75 cm. Výnosy nebyly ovlivněny do zatížení 10 tun, ale 20 tun výrazně ovlivnilo růst kořenů a výnosy.



**Tab. 6 - Přípustná a riziková objemová hmotnost půdy pro některé plodiny u středně těžkých půd (upraveno Javůrek, Vach, 2008)**

Plodina	Objemová hmotnost půdy (g.cm <sup>-3</sup> )	
	přípustná	riziková
Pšenice ozimá	1,45 – 1,50	1,60
Žito ozimé	1,35 – 1,40	1,55
Ječmen jarní	1,35 – 1,45	1,50
Oves	1,50 – 1,55	1,60
Kukuřice	1,50 – 1,55	1,60
Luskoviny	1,15 – 1,20	1,30
Cukrovka	1,00 – 1,10	1,35
Brambory	1,00 – 1,15	1,25

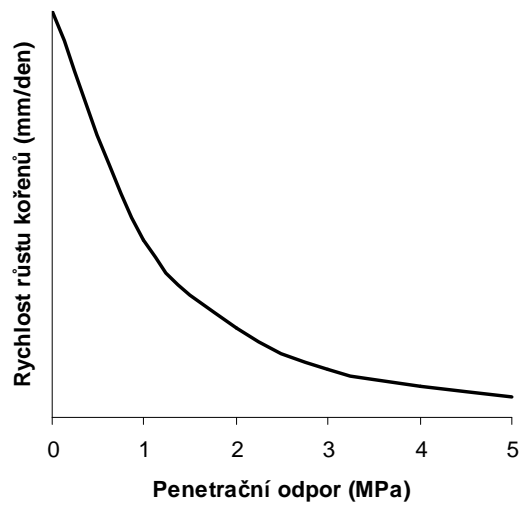
Voorhees (1985, 1991) zjistil, že se výnosy sóji v suchých letech lehce zvýšily na středně zhutnělých jílovitohlinitých půdách oproti nezhutnělým. Tyto závěry potvrzují Bicki a Siemens (1991) dosaženými výsledky u obilí. V suchých letech byly výnosy na zhutnělých plochách vyšší než na nezhutnělých. Nicméně, při příznivé vlhkosti se výnosy na utužených plochách snížily.

Utváření rostlin často jasně ilustruje problémy se strukturou půdy. Plodiny s citlivým kořenovým systémem, jako je řepka olejka (Canola; obr. 7), jasně signalizují bariéry růstu kořenů. Kořenům vlevo bránila růstu zhutnělá vrstva v hloubce 75 mm až 100 mm. Kořeny vpravo rostly ve strukturní půdě s minimálními bariérami, které by ovlivnily jejich růst. Výnos plodiny na zhutnělém poli může být až o 50 % nižší.

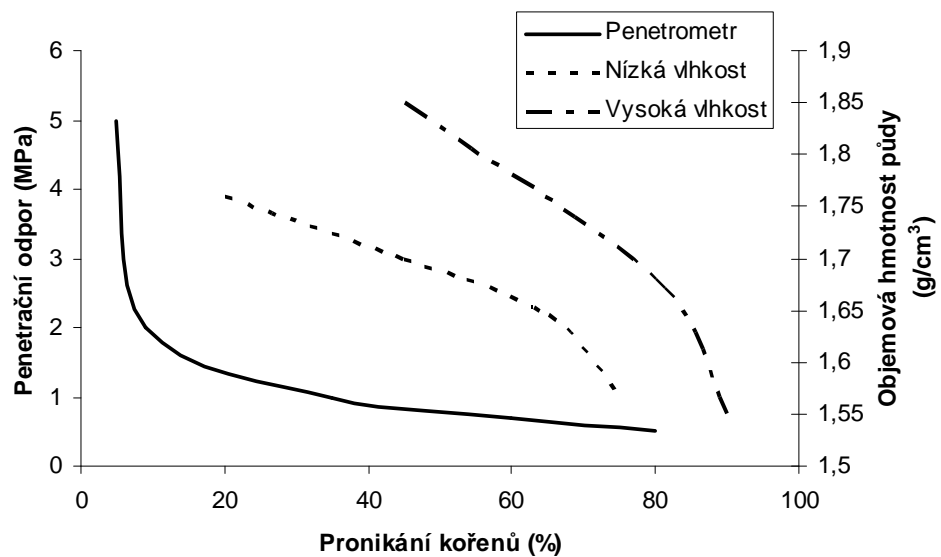
Kritické hodnoty penetračního odporu udávajícího počátek snížení růstu kořenů (obr. 8) se udávají 1 až 1,7 MPa a hodnoty zastavující růst kořenů jsou 3 až 4 MPa (v závislosti na rostlině a typu půdy spolu s rozložením velikosti pórů a obsahem vlhkosti), (Russel, 1977).



Obr. 7 - Rozdíl růstu kořenů ve ztuhlé a strukturální půdě (upraveno Wright, 2010)



Obr. 8 - Vliv ztuhnutí na rychlost růstu kořenů (upraveno Russel, 1977)



Obr. 9 - Vliv objemové hmotnosti a penetračního odporu na pronikání kořenů (upraveno Wright, 2010)

Objemová hmotnost půdy 1,62 až 1,79 g.cm<sup>-3</sup> negativně ovlivňuje růst kořenového systému (obr. 9), (Håkansson, 2000; Wright, 2010).

Zhutňování vytváří nejenom fyzickou bariéru pro kořenový systém, ale významně ovlivňuje transport živin a stopových prvků v půdě. Ztráty dusíku do podzemních vod a do atmosféry jsou ve zhutnělých půdách větší (Lipiec a kol., 1991). Zhutnění svým negativním vlivem na provzdušňování půdy podporuje tvorbu půdního N<sub>2</sub>O, který se tvoří jak přirozeně nitrifikací při rozkladu plodinových zbytků, tak také při denitrifikaci za anaerobních podmínek. N<sub>2</sub>O je skleníkový plyn s mnohonásobně vyšším potenciálem globálního oteplování, než má CO<sub>2</sub>. Denitrifikace proto snižuje hladiny užitečných půdních dusičnanů. Přítomnost vysoké hladiny minerálního dusíku (přirozený nebo hnojením) může emise až zčtyřnásobit a navýšit tak ekologické dopady. Důsledkem jsou potom zvýšené náklady na hnojivo vlivem jeho neefektivního využití (Wright, 2010).

### **3.5 Ochrana a opatření proti zhutnění**

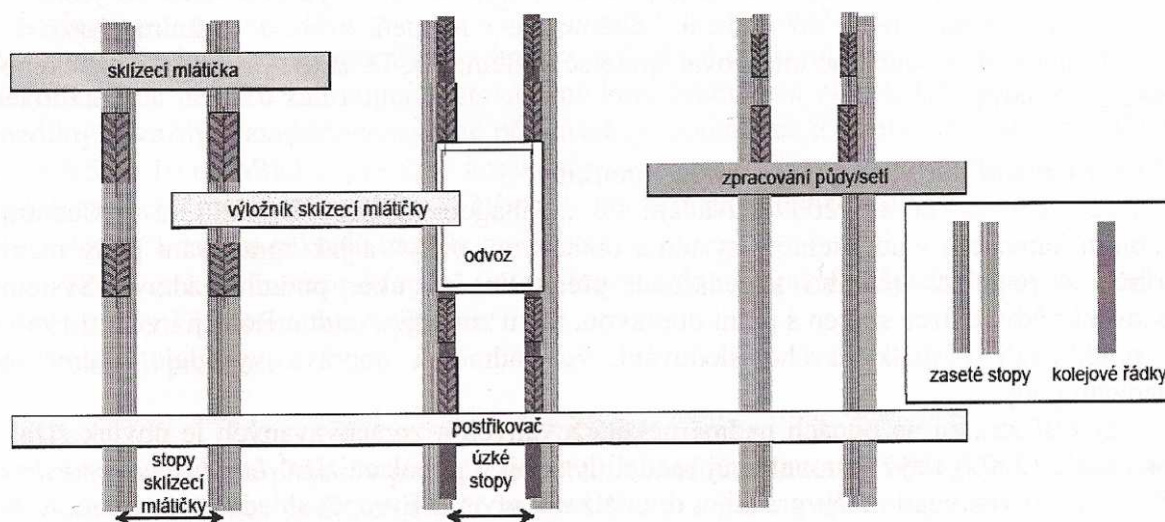
#### **3.5.1 Omezení přejezdů půdy za vlhka**

Snížení utužení půdy lze dosáhnout pojezdy za snížených vlhkostních podmínek a výrazně eliminovat přejezdy při extrémní vlhkosti. Vomočil a kol. (1958) zjistil, že utužení půdy vlivem změny půdní vlhkosti bylo intenzivnější než zhutnění vlivem změny rychlosti pojezdu. Jako porovnávací prvek použily schopnost infiltrace vody do půdy. Allen a Musick (1997) porovnávali provoz lehkého traktoru (4,1 t) a těžkého traktoru (8,2 t) na vlhké půdě. Zjištěné výsledky potvrzují vliv zhutnění na snížení infiltrace vody do půdy přibližně o 23 až 43 %. Za sucha bylo podloží ovlivněno velkým zatížením, ale objemová hmotnost se při stejném zatížení výrazně zvýšila za mokra (Voorhes a kol., 1986).

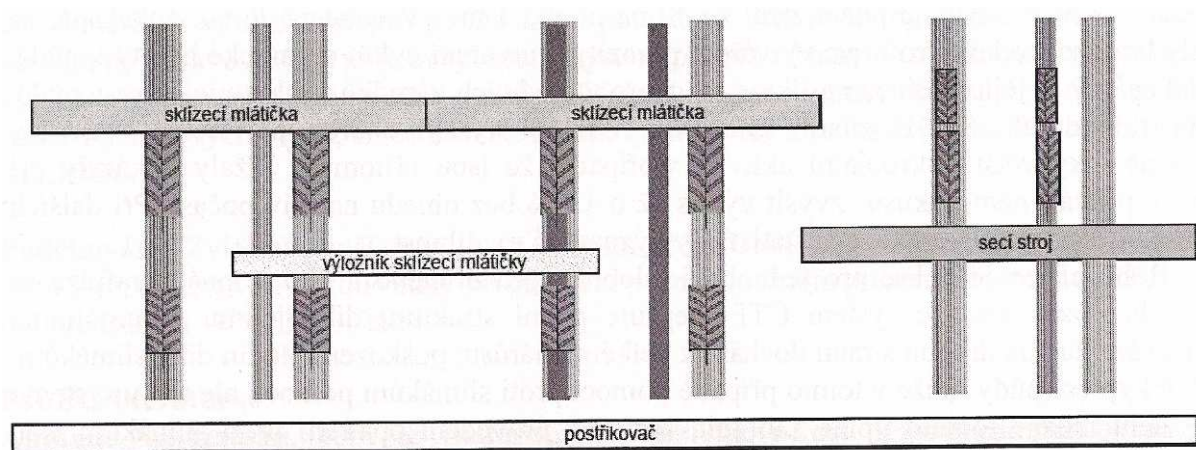
#### **3.5.2 Řízení dopravy na poli**

Zemědělství s řízeným provozem CTF systém (Controlled Traffic Farming) je založená na využívání trvalých kolejových řádků na poli pro všechny operace. První přejezd pneumatiky po půdě způsobí 85 % z celkového zhutnění, proto je důležité pohyby strojů po poli soustředit do stejných kolejových řádků (Raper, 2000). Protože stroje nejsou doposud konstruovány zcela v souladu se systémem CTF, existuje řada omezení. V současnosti je plocha pojezdů v systému CTF 25 %, ve srovnání s konvenčním způsobem zpracování půdy (75 %) je plocha přejezdů při použití CTF mnohem menší. Na obr. 10 a 11 jsou znázorněny dvě používané metody CTF. Obr. 10 znázorňuje metodu CTF se systémem

OutTrac, při kterém jsou stopy sklízecí mlátičky na vnějšku společných úzkých permanentních stop pro ostatní stroje. Pracovní šířka strojů a nářadí je stejná. Na obr. 11 je znázorněn systém CTF AdTrac se dvěma šířkami kolejí a společnou pracovní šířkou nářadí. Toto je používáno, jestliže není možné překrytí stop jako u systému OutTrac. Většina pojezdové plochy je zasetá stejně jako na obr. 10 (Chamen, 2009).



Obr. 10 - CTF systém OutTrack (upraveno Chamen, 2009)



Obr. 11 - CTF systém AdTrack (upraveno Chamen, 2009)

K dlouhodobějším výhodám takového systému může patřit menší tahová síla pro stroje, zlepšená zpracovatelnost půdy a lepší celková účinnost zakládání porostů. Tato metoda představuje možnost omezení škodlivého zhutnění na hlavních částech pole. Principem je omezení přejezdů těžkých strojů na určené plochy, kde nemají škodlivé účinky na plodiny. Využití satelitních navigací – technologie sledování a řízení napomáhá přesným pojezdům po

poli. Také potřebu mimořádně specializovaných strojů lze snížit inteligentním sjednocením pracovních záběrů strojů pro zpracování půdy a secích strojů, např. na šířku adaptéru sklízecí mlátičky.

Během sklizně zemědělských komodit dochází při nadměrném výskytu dopravních prostředků k rozsáhlému zhutnění půdy. V případě sklizně sklízecí mlátičkou je vhodné vyprazdňovat na souvratích, aby se dopravní prostředky (především nákladní automobily) v co nejmenší míře pohybovali po poli. Je vhodné použití překládacích vozů, které jsou opatřeny velkoobjemovými pneumatikami nebo nově pásy. Objevují se i technická řešení, kdy má překládací vůz poháněná kola, u pásových je to téměř vždy, a tím se snižuje prokluz traktoru, umožňuje plynulý průjezd terénem a snižuje se namáhání půdy. V případě sklizně kukuřice na siláž či senážování je doporučeno najíždět kolmo na souvratě a omezit tak náhodný přejezd po pozemku.

Kolejové řádky jsou plochy do kterých je nejvíce soustředěna doprava na poli. Mají typicky vyšší objemovou hmotnost než nezátížené a obdělávané oblasti v jejich blízkosti. Kašpar a kol. (2001) zjistili Iowě zvýšení hodnot hustoty ve všech kolejových řádcích oproti nezátíženým plochám. Hamlett a kol. (1990) zjistili hodnoty půdní objemové hmotnosti mezi 1,10 a 1,40 g.cm<sup>-3</sup> v nezátížených oblastech a tutéž hodnotu ve hloubce 30 cm v kolejových řádcích. Voorhees a Lindstrom (1984) zjistili na prachovité hlíně zvýšenou objemovou hmotnost v mělké hloubce v rozmezí 0 - 15 cm mezi 1,40 až 1,65 g.cm<sup>-3</sup> v kolejových řádcích oproti nezátíženým oblastem, kde se objemová hmotnost pohybovala od 1,10 až 1,40 g.cm<sup>-3</sup>. Na písčitohlinitých půdách se objemová hmotnost v kolejových řádcích pohybovala kolem 1,74 g.cm<sup>-3</sup> oproti 1,52 g.cm<sup>-3</sup> v nezátížených oblastech (Raper, 2000).

### **3.5.3 Technické a konstrukční řešení strojů**

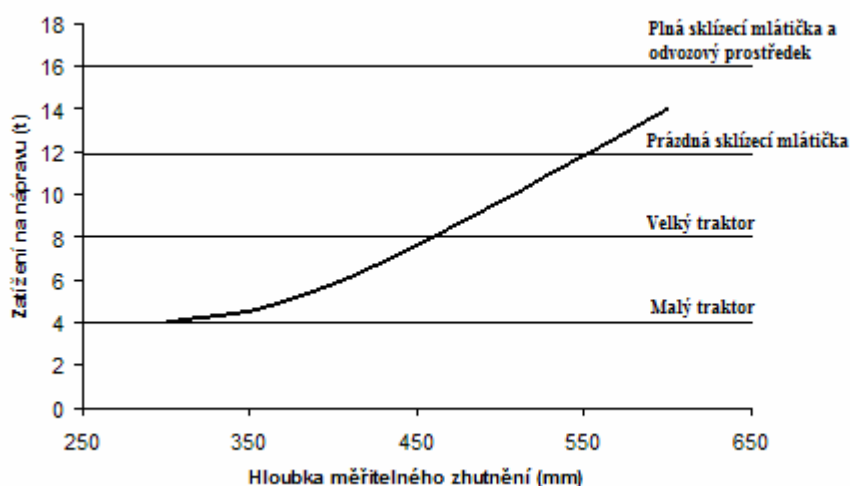
Technická a konstrukční řešení strojů s cílem snížit kontaktní tlak na půdu (styčné plochy pojezdového ústrojí, limitní zatížení náprav atd.) se staly předmětem rozsáhlého výzkumu v 80. letech minulého století (Håkansson, 1987).

Řešení této problematiky v souvislosti se zhutňováním půdy se zaměřilo hlavně na:

- nové konstrukce pneumatik
- snižování hmotnosti strojů.

Snížení zhutnění půdy lze dosáhnout použitím zdvojených kol, klecových kol, případně kombinaci předních pneumatik s oprýžovanými pásy zadního pohonu traktoru.

V současné době se na trhu objevují systémy řízeného huštění pneumatik. Progresivní konstrukce umožňuje používat tlaky huštění od 40 kPa zaručujících zvětšení styčné plochy až o 50 %, při standardních pracovních rychlostech 10 - 15 km.h<sup>-1</sup> umožňují bezpečné podhuštění v rozmezí 80 - 120 kPa. Moderní nízkotlaké pneumatiky jsou šetrnější k půdě tím, že disponují velmi nízkými kontaktními tlaky zaručujícími minimální deformaci půdy. U traktorů a dalších zemědělských strojů se používají kromě standardních radiálních pneumatik i nízkoprofilové typy, které v porovnání s klasickými diagonálními i radiálními pneumatikami vykazují větší kontaktní plochy téměř o 20 % a nižší kompakční efekt (Prikner a Aleš, 2010). Dřívější konstrukce zemědělských strojů, především sklízeců zaměřená na zvýšení jejich výkonnosti přinášela nutně zvýšení jejich hmotnosti, což mělo za následek překračování limitních kontaktních tlaků. Také metody sklizně plodin, kdy sklizený produkt sklízecí stroje ukládaly do současně pojíždějících dopravních souprav s nevhodnými pneumatikami v nevhodných půdních podmínkách (půdní druh a extrémní vlhkost) významně přispěly k nadměrnému zhutňování půd. Zejména při sklizni cukrovky při vyšších vlhkostech půdy docházelo ke extrémnímu zhutňování půdy až do velkých hloubek v podorničí. V současné době již došlo k výrazným změnám sklizňových technologií a konstrukčních sklízecích strojů (používání strojů se zásobníky a nízkotlakými pneumatikami), které snižují negativní vliv těžké mechanizace na půdu. Rovněž využívání strojů s aktivně poháněnými pracovními nástroji, kde se převážná část výkonu motoru přenáší vývodovým hřídelem traktoru, snižuje nároky na trakční vlastnosti traktorů a současně na jejich hmotnost.



Obr. 12 - Vliv zatížení nápravy na zhutnění půdy (upraveno Wrihgt, 2010)

### 3.5.3.1 Snížení zatížení náprav

Zhodnocením výsledků výzkumů prováděných na několika kontinentech byly zjištěny účinky zatížení náprav na půdu. Zatížení 4 tun na nápravu způsobí poškození do 30 cm, 6 tun do 40 cm a 10 tun a více do více než 60 cm (obr. 12). Autoři těchto experimentů došli k závěru, že je třeba omezit zatížení nápravy na maximálně 6 tun (Håkansson, 1990; Grečenko, 2003; Gysi, 1999; Perdok, 1987).

### 3.5.3.2 Zvyšování plochy pneumatik pomocí regulace tlaku v pneumatikách

Lepší účinnosti přenosu trakční síly je možné celkem snadno dosáhnout zvýšením kontaktní plochy pneumatik (převážně radiální konstrukce). Pokud mají radiální pneumatiky snížený tlak vzduchu, na poli se více zplošťují, tím se méně boří a zanechávají tak až o 30 % mělkší stopy. Zabírá větší počet šípů (obvykle čtyři páry), které se rovnoměrněji odvalují (nižší odpor valení) a méně opotřebovávají, protože styčná plocha pneumatiky se prodlužuje, snižuje se i měrný tlak na půdu. Tento efekt úměrně narůstá se zvyšující se vlhkostí půdy. Lepšího záběru kol v půdě lze docílit snížením tlaku vzduchu na poli cca 80 - 100 kPa (záleží na doporučení výrobce), vhodným typem pneumatik a správným dotížením traktoru. Jednou z možností zejména u traktorů vyšší výkonové třídy, používaných k orbě nebo hlubšímu kypření, jsou dvojmontáže pneumatik. Zdvojené radiální pneumatiky s tlakem 60 kPa na obou nápravách kombinaci s vhodným dotížením přední nápravy pro optimální rozložení hmotnosti a správná agregace mohou částečně zlepšit přenos výkonu na půdu. Větší kontaktní plocha a optimální zatížení náprav sníží prokluz hnacích kol. Huštění pneumatik na hodnotu max. 100 kPa může snížit spotřebu paliva až o 15 % v porovnání s jízdou při „silničním“ tlaku kolem 300 kPa. Moderní radiální pneumatiky jsou na provoz při nižším tlaku dimenzovány. Z těchto důvodů se doporučení vztahují nejen na traktory, ale i na samojízdné sklizňové stroje. Například řezačky či sklízecí mlátičky mohou pracovat již s tlakem 200 kPa. Přesto koleje na poli po přejezdech sklizňových strojů nebyvají nic neobvyklého, čímž se komplikuje průběh následných operací zpracování půdy. Proto mají systémy pro změnu tlaku vzduchu v pneumatikách svůj význam.

Účinný jednookruhový systém nabízí například firma Steuerungstechnik StG. U traktorů a návěsů se vzduch přivádí zvnějšku přes otočný převodník do náboje kola. Speciálně pro systémový nosič firmy Claas existuje regulátor, který vzduch zevnitř odvádí ven. Nápravy jsou k tomu účelu provrtány. Systém nepřetržitě kontroluje minimální

a maximální tlak. Přívod zvnějšku má výhodu v tom, že poskytuje větší průřez potrubí, takže plnění a odvzdušnění mohou probíhat rychleji.

Dalším výrobcem výhradně jednookruhových systémů je firma Krude. Nepoháněné nápravy jsou provrtány a vzduch je veden zevnitř. To platí také o nápravách s redukcí v kole, které najdeme například u sklízecích mlátiček nebo řezaček. U všech náprav je přívod vzduchu vyřešen oblíbeným způsobem, tedy zvenčí nad blatníky až k otočnému převodníku. K ovládní slouží elektronický box či ovládací pult sdružující důležité prvky. Řidič si požadovanou hodnotu tlaku nastaví, poté ji může zvýšit nebo snížit a aktuální stav odečítá na tlakoměru. U výkonných traktorů, pracujících v soupravě s třínápravovými podvozky, firma Krude vzájemně spojí až čtyři přídavné hydraulicky poháněné kompresory. Díky celkovému výkonu čtyři a půl tisíce litrů za minutu probíhá doplnění tlaku u všech pneumatik v poměrně krátké době a soupravu nečekají při práci velké prostoje.

### **3.5.3.3 Použití nízkotlakých pneumatik**

Běžné kontaktní tlaky současných zemědělských vozidel se pohybují v rozsahu od 100 do 600 kPa a zatížení náprav může dosahovat až 20 tun. Do jisté míry mohou být tyto měrné tlaky redukovány používáním nízkotlakých pneumatik o větších rozměrech. V minulosti bylo zjištěno, že je kontaktní tlak ve stykové ploše pneumatiky s půdou přímo úměrný zatížení a tlaku huštění pneumatiky (Lachnit, 2007).

Stlačení půdy v určité hloubce je ovlivněno středním kontaktním tlakem, velikostí styčné plochy a stavem půdy. Stlačení v hlubokých vrstvách ovlivňuje především celkové zatížení. Z toho plyne, že použije-li se u těžkého vozidla velkoobjemové pneumatiky podle údajů výrobce pneu, bývá jejich hloubkový účinek škodlivý i přes eventuelně nízké huštění, t.j. nízký střední kontaktní tlak (Grečenko, 1994).

Nízkotlaké válcové (flotační, terra) pneumatiky způsobují ve stykové ploše maximální konstantní tlak 100 kPa, při tlaku huštění přibližně 80 kPa, za předpokladu, že vozidla mají stejnou hmotnost a nosnost. Na kyprých půdách a loukách je nezbytné docílit ještě nižších kontaktních tlaků, přibližně 50 kPa odpovídající tlaku huštění 40 kPa (Prikner, 2004).



### **3.5.3.4 Rychlost jízdy**

Další možností jak omezit vznik zhutnění je zvýšením rychlosti. Vomočil a kol. (1958) použili schopnost infiltrace vody jako porovnávací prvek při měření účinků zatížení půdy pneumatikou. Porovnáním výsledků zjistili, že snížením rychlosti také dochází k poklesu schopnosti infiltrace vody do půdy. Vernikov (1958) zjistil snižování hloubky vyjetých kolejí při zvyšování rychlosti. Z těchto poznatků vycházejí moderní trendy, kdy prodejci zemědělských strojů doporučují vyšší rychlosti při zpracování půdy a zakládání porostů (Raper, 2000; Carman, 2002).

### **3.5.3.5 Použití pásových podvozků**

Moderní pásové traktory jsou osazeny pásy z technické pryže které jsou patřičně zpevněny za účelem dosažení delší doby životnosti. Díky pryžovým pásům odpadají problémy s přepravou těchto strojů po pozemních komunikacích. Oproti pneumatikám o stejné šířce mají pásy nižší měrný tlak na půdu a lepší trakční vlastnosti. Tuto problematiku řešil Grečenko (1967, 2007, 2008), Keller a kol. (2002) a Grisso (2006). Stejně jako v případě klasických pneumatik můžeme také u pásů volit různé šířky, přitom konstrukce pásových podvozků mohou být různé: jeden pás na každé straně, čtyři polopásy místo pneumatik u klasických a v poslední době i u těžkých kloubových traktorů. Moderní pásové podvozky nejsou pouze doménou velkých traktorů, ale setkáme se s nimi také v oblasti sklizňových strojů, zejména sklízecích mlátiček, ale i samojízdných sklízeců brambor a cukrovky.

### **3.5.4 Organické hnojení a vápnění**

Vliv organické hmoty na úrodnost půdy je nepopiratelná. Dalším důležitým aspektem je vliv na strukturu půdy. Dostatečný přísun organické hmoty je podmínkou tvorby žádoucí struktury půdy, jako preventivní opatření proti poškozením, je zdrojem výživy mikroorganismů, zdrojem živin pro rostliny a zdrojem látek pro vznik humusu v půdě. Po stránce půdní mechaniky zvětšuje větší podíl organické hmoty v půdě odolnost půdní struktury proti deformaci (větší interval elastické deformace), při vyšším obsahu organické hmoty ve vrstvě 0 - 10 cm lze dosáhnout snížení zhutnění během několika let a zvýšení množství vody v půdě, což se příznivě projevuje při vegetativním období rostlin (Lhotský, 2000a).

Vápněním kyselých půd se udržuje půdní reakce v optimálním stavu pro strukturotvorné procesy, dále má pozitivní vliv na tvorbu kvalitních humusových látek,

vodní režim půdy, obsah přístupných živin a omezení mnoha cizorodých prvků. Vápník (sloučeniny vápníku) sám o sobě působí jako vazebný prostředek při tvorbě půdní struktury (Lhotský, 2000a).

### 3.5.5 Volba vhodných plodin

Skladba osevních postupů zaujímá v soustavě hospodaření na půdě prvořadou úlohu. Pěstované plodiny zaujímají z hlediska zhutnění půd dvojí postavení. Jednak samy rostliny působí podzemní i nadzemní produkcí různým způsobem příznivě na fyzikální a biologické vlastnosti půd. Na druhé straně i rostlinám vyhovuje různé rozmezí fyzikálních a dalších půdních vlastností a to nejen v orniční, ale i podorniční části profilu půdy. V této souvislosti je nutné konstatovat, že v podmínkách současného trhu s komoditami je velmi obtížné zachovávat přijatelnou strukturu plodin v zemědělských podnicích.

Způsob jak eliminovat zhutnění půdy a současně zvýšit výnosy je využití krycích plodin (meziplodin). Nejrozšířenější meziplodiny jsou světlice barvířská (saflor - *Carthamus tinctorius*), svazenka vratičolistá (*Phacelia tanacetifolia*) a hořčice (*Sinapis arvensis* nebo *alba*). Na lehčích půdách je výhodné použít způsob podsevu plodin např. vojtěškou (*Medicago sativa*). Krycí plodiny napomáhají snižovat penetrační odpor pravděpodobně zvýšením infiltrace a uchováním vlhkosti. Při zpracování půdy napomohla krycí plodina ke zmírnění zhutnění v mělké vrstvě (2,5 až 7,5 cm) a zvýšení výnosu. Nejdůležitější pro meziplodiny je kořen a nízký podíl nadzemní biomasy (Raper a kol., 2000).

### 3.5.6 Systémy zpracování půdy

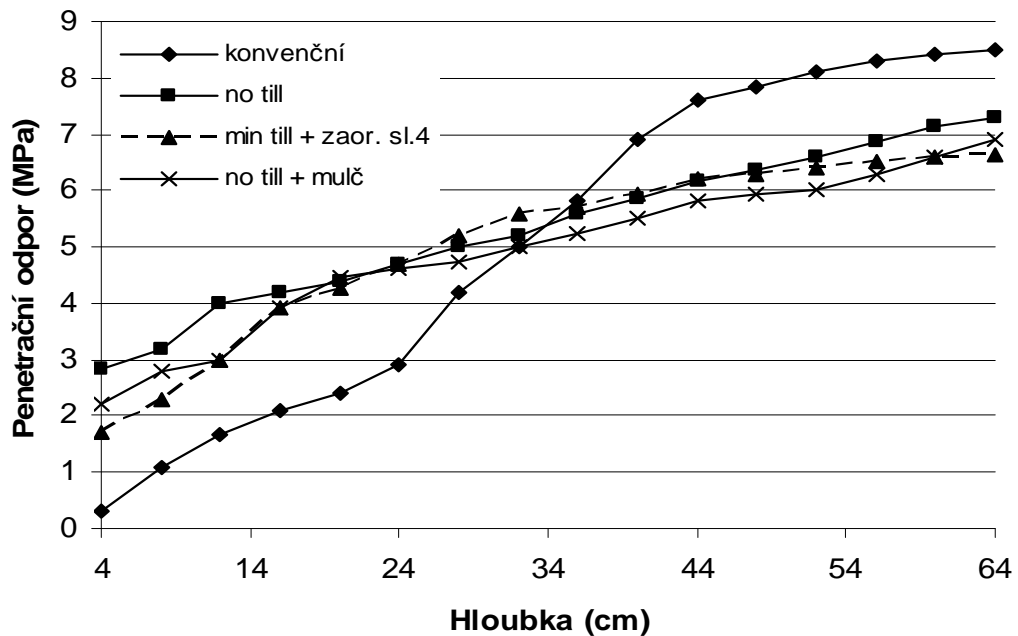
Konvenční zpracování půdy (orební systém) bylo do konce 90. let minulého století standardní způsob obdělávání. Při orbě, kdy traktor jede kolem v brázdě, dochází k přímému zhutnění podorničí. Výhodnější je technologie orby při jízdě mimo brázdu. Při orbě dochází k výraznému nakypření, což umožňuje hlubší promrzání. Mráz se považuje za pomocníka regenerace zhutněných půd, avšak proces mrznutí a tání odstraní jen polovinu škod zhutněním, a to pouze do 8 cm, a čtvrtinu do 30 cm (Raper, 2005). Ve spojení s podzimní orbou odstraní mráz škodlivé zhutnění z 90 % do 20 cm, ale není vhodná do stále stejné hloubky (Lhotský, 2000a).

Další možností obdělávání půdy jsou způsoby ochranného zpracování půdy, které využívají přednosti minimalizace zpracování a příznivého působení mulče z posklizňových zbytků předplodiny (většinou slámy) a rostlinné biomasy vypěstovaných meziplodin. Uplatňováním ochranných způsobů zpracování půdy lze především dosáhnout:

- pozitivního vlivu na většinu půdních vlastností (vyšší stabilita půdních agregátů v povrchové vrstvě v závislosti na obsahu organické hmoty, zlepšení pórovitosti půdy, intenzifikace biochemických procesů, vyšší biologická aktivita půdy atd.),
- omezení zhutnění půdy především tím, že se snižuje podíl kolejevých stop asi o 50 % oproti konvenčnímu způsobu, menší četnost mechanických zásahů do půdy snižuje narušení půdních agregátů a tím se zvyšuje únosnost půdy.

VÚRV, v.v.i. v Praze-Ruzyni, provedli polní pokus, který byl během 13 let zaměřen na porovnání vlivů zpracování půdy na zhutnění. Výsledky jsou znázorněné na obr. 13. Intenzitu zhutnění v profilu do 64 cm ukazují jednotlivé křivky, reprezentující varianty zpracování půdy. Byly porovnávány: varianta konvenční s orbou, varianta s minimálním zpracováním do hloubky 12 - 15 cm se zapravenou drcenou slámou (min till + zaorání slámy), varianta bez zpracování půdy (no till) a varianta bez zpracování s mulčem a drcenou slámou předplodiny (no till + mulč). Průběh jednotlivých křivek je typický pro konkrétní technologie zpracování v jednotlivých variantách. Nejnižší zhutnění půdy v celém profilu ornice vykazuje varianta konvenční, což odpovídá vyšší intenzitě zpracování do hloubky cca 25 cm. Naopak nejvíce utužená půda, zejména v horní vrstvě ornice je na variantě, kde se půda vůbec nezpracovává (no till). Ve variantě minimálního zpracování je v orničním profilu patrné mělké kypření. Pod hloubkou zpracování v konvenční variantě vzniká zhutnělé podbrázdí, proto odpor půdy stoupá až na úroveň hodnot z varianty nezpracovávané (no till) (Javůrek, Vach, 2008).

Nejvíce zatíženou oblastí, kde dochází k narušení struktury půdy zhutněním, jsou souvratě či dočasné polní cesty. To má zpravidla za následek nižší pórovitost a s tím spojenou nižší infiltraci vody v porovnání se zbytkem pole, horší zpracovatelnost půdy a vyšší energetické nároky. Doporučuje se hlubší zpracování těchto oblastí, převážně orbou či hloubkovým kypřením. Při podzimní orbě je nutné hroudy rozdrobit. Na omezení nadměrného zhutnění v nejvíce namáhaných oblastech má velmi příznivý vliv organické hnojení.



Obr. 13 - Penetrační odpor půdy v závislosti na hloubce a intenzitě zpracování (upraveno VÚRV, 2007)

Agromeliorační zásahy jsou na bázi kypření zhutnělých vrstev a způsoby použitelné u nás se člení podle intenzity (hloubky) zásahu, počínaje nejjednodušším (Lhotský, 2000b):

- orba s podrýváky (podrývací radličky pod plužním tělesem) je vhodná pro kypření zhutnělého pod brázdí, zvyšuje energetickou náročnost orby o 20 - 30%, opakování je účelné po 2 - 3 letech,
- podrývání (podrývací dláta v jedné nebo dvou hloubkách místo plužního tělesa) je vhodné pro půdy se zhutnělou orníci i podorničím a při minimálním (protierozivním) zpracování půdy bez převrstvení,
- dlátování (nakypření půdy do 0,45 m) je vhodné pro půdy s výrazně zhutnělým podorničím a propustnou spodinou. Účinnost 2 - 3 roky,
- hloubkové meliorační kypření (nakypření půdy do 0,5 m i hlouběji) se používá pro nejtěžší případy zhutnění. Pro jeho provedení se vyžaduje vypracovaný projekt který určí hloubku zásahu, rozchod a směr kypřících rýh, odvedení přebytečné vody apod. Účinnost je 3 - 4 roky a obnova lze provést méně náročným způsobem.

## 4 Diskuse a závěr

Škodlivé zhutnění zemědělského půdního profilu lze eliminovat použitím velkoobjemových pneumatik, aplikací dvojmontáží (trojmontáží) pneumatik, použitím pásů a polopásových nástavců. Tyto úpravy mají jeden významný nedostatek - omezená manévrovatelnost vozidla (valivé odpory, poloměr zatáčení, rychlost, ap.). Tento faktor, je bohužel komerční sférou opomíjen a zemědělská veřejnost je ovlivňována současnými trendy výrobců zemědělské techniky a pneumatik, založených na výsledcích světového výzkumu. Faktem je, že např. použití velkoobjemových pneumatik na těžkých zemědělských návěsech v aplikaci s třínápravovým podvozkem má nesporně šetrný efekt (Perdok, 1987), ovšem přejezdy, zejména na těžších jílovitých půdách (Trautner, Arvidsson, 2003) v jejich extrémních vlhkostních podmínkách (20 - 23 %) mají velice škodlivý účinek. Zvětšená zatížená styčná plocha pneumatiky přenese nadměrné kontaktní tlaky do větších hloubek a škodlivé zhutnění zasáhne půdní vrstvy v hloubkách 60 - 80 cm. V této souvislosti řada autorů doporučuje radikální snížení kontaktních tlaků v rozsahu od 80 do 100 kPa (Lhotský, 1991; Grečenko, 2003; Håkansson a kol., 1988; Raper, 2005)

Úzké kultivační pneumatiky působí na půdu jako rozbrušovací kotouč, vytváří se hluboké koleje v nichž začíná eroze, které jsou zdrojem problémů s kopírováním terénu u žacích stolů sklízecích mlátiček či s vyorávacími radlicemi při sklizni cukrovky. Radiální pneumatika doplněná regulátorem tlaku vzduchu umí zátěž stroje lépe rozložit na plochu a snížit tak hloubku stop. Tato výbava by mohla být již samozřejmostí u samojízdných postřikovačů vzhledem k jejich téměř celoročnímu využití v různých podmínkách. Problém měrného tlaku na půdu a průchodnosti se řeší také u sklízecích mlátiček a sklízečů řepy (Arvidsson a kol., 2001). Tyto stroje mohou být vybaveny radiálními pneumatikami s šířkou 800 nebo i 1000 mm a případně i regulátorem tlaku vzduchu. Uvedené pneumatiky umožňují pojíždět na poli s tlakem 200 kPa i s plným zásobníkem. Tím se kromě úspory nafty získá i lepší průchodnost terénem, větší tažná síla na svazích a méně hluboké stopy od kol. V praxi systém funguje tak, že na začátku sklizně mají pneumatiky na přední nápravě tlak např. 130 kPa, po naplnění zásobníku zrna do poloviny je tlak zvýšen na 180 kPa a po skončení práce pro cestu na silnici na 250 kPa. Tím je zajištěna dobrá říditelnost a bezpečné brzdění.

Prvotním opatřením proti nežádoucímu zhutnění půdy je omezení pojezdů po poli při vyšších vlhkostech půdy a zásadně nepřekračovat nominální kombinace tlaku huštění a zatížení konkrétních pneumatik s ohledem na měrný kontaktní tlak (Grečenko, Prikner,

2009). Dále dodržovat maximální doporučené celkové zatížení na nápravu (Švédsko, 6 t) (Håkansson, 1990) a omezit nadbytečné pojezdy po poli, popř. zavést systém stálých kolekových řádků (CTF). Z ekologického hlediska je výhodné využití půdoochranného zpracování půdy vzhledem k tomu, že rostlinné zbytky mohou omezit vliv dešťových kapek na půdu a tak snížit erozi. Dalším řešením je využití vhodných meziplodin, které rovněž napomáhají proti erozi a jejich kořenové systémy zmírňují utužování půdy. Optimálním řešením by bylo zařazení víceletých píceň do osevních postupů, nicméně trend intenzivního zemědělství a jeho ekonomické požadavky tento půdoochranný způsob omezuje.

## Použitá literatura

- Abu-Hamdeh, N.H., Reeder, R.C. 2003. Measuring and predicting stress distribution under tractive devices in undisturbed soils. *Biosystems Engineering*. 85. 493-502.
- Arvidsson, J., Trautner, A., van den Akker, J.J.H., Schjonning, P. 2001. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. *Soil Till Res.* 60. 79-89.
- Barley, K.P., Farrel, D.A., Greacen, E.L. 1968. The influence of soil strength on the penetration of a loam by plant roots. *Austr. J. Soil Res.* 3. 69-79.
- Bauer, F., Sedlák, P., Šmerda, T. 2006. *Traktory*. Profi Prees. Praha. 192 s. ISBN: 80-86426-15-0
- Beneš, P. Přínos změny tlaku v pneumatikách [online]. *Zemědělec*. 23. října 2009 [cit. 2011-4-7]. Dostupné z < [http://www.agroweb.cz/Prinos-zmeny-tlaku-v-pneumatikach\\_\\_s425x34869.html](http://www.agroweb.cz/Prinos-zmeny-tlaku-v-pneumatikach__s425x34869.html) >
- Bengough, A.G., Mullins, C.E. 1991. Penetrometer resistance, root penetration and root elongation rate in two sandy loam soils. *Plant and Soil*. 131. 59-66.
- Bengough, A.G., Mullins, C.E., Wilson, G. 1997. Estimating soil frictional resistance to metal probes and its relevance to the penetration of soil by roots. *European J. Soil Science*. 48 (4). 603-612.
- Bicki, T.J., Siemens, J.C. 1991. Crop response to wheel traffic soil compaction. *Trans ASAE*. 34 (3). 909-13.
- Carman, K. 2002. Compaction characteristics of towed wheels on clay loam in a soil bin. *Soil Till Res.* 65. 37-43.
- Dexter, A.R. 1986. Model experiments on the behaviour of roots at the interface between a tilled seedbed and a compacted subsoil. *Plant and Soil*. 95. 123-133.
- Etana, A., Comia, R.A., Håkansson, I. 1997. Effect of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. *Soil Till. Res.* 44. 13-21.
- Gaultney, L., Krutz, G.W., Steinhardt, G.C., Liljedahl, J.B. 1982. Effects of subsoil compaction on corn yields. *Trans ASAE* (3). 563-9.
- Gee-Clough, D., McAllister, M., Evenden, D. W. 1977. Tractive performance of tractor drive tyres. I. The effect of lug height. *J. Agric. Eng. Res.* 22 (4). 373-384.
- Grečenko, A. 1967. *Terramechnika. Studijní informace - Zemědělská technika*. ÚVTI. Praha. 322s.
- Grečenko, A. 1994. *Vlastnosti terénních vozidel*. Vysoká škola zemědělská. Praha. 118 s. ISBN: 80-213-0190-2.
- Grečenko, A. 2003. Tire load rating to reduce soil compaction. *J. Terramechanics*. 40. 97-115.
- Grečenko, A. 2007. Re-examined principles of thrust generation by a track on soft ground. *J. Terramechanics*. 44. 123-131.
- Grečenko, A. 2008. Thrust and slip of a track determined by the compression-sliding approach. *J. Terramechanics*. 44. 451-459.
- Grečenko, A., Prikner, P. 2009. Progress in tire rating based on soil compaction potential. *J. Terramechanics*. 46. 211-216.

- Gysi, M. 1999. Influence of single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil. *Soil Till Res.* 52. 141-151.
- Hamlett, JM., Melvin, SW., Horton, R. 1990. Traffic and soil amendment effects on infiltration and compaction. *Trans ASAE.* 33 (3). 821–6.
- Hammel, JE. 1994. Effect of high-axle load traffic on subsoil physical properties and crop yields in the Pacific Northwest USA. *Soil Till Res.* 29 (2–3). 195–203.
- Håkansson, I., Vorhees, W.B., Riley, H. 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil Till. Res.* 11. 239-282.
- Håkansson, I. 1990. A method for characterizing the State of compactness of the plough layer. *Soil Till. Res.* 16. 105-120.
- Håkansson, I., Lipiec, J. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Till. Res.* 53. 71-85.
- Hůla, J., Procházková, B., a kol. 2008. Minimalizace zpracování půdy. Profi Press s.r.o. Praha. 248 s. ISBN 978–80–86726–28–1
- Chamen, W. C. T. 2009. Řízený pohyb strojů po pozemcích - základní technologie pro snižování variability v rámci pozemku. GPS autopiloty v zemědělství. Powerprint s.r.o. Praha. 50 s. ISBN 978-80-213-1993-6.
- Kaspar, TC., Radke, JK., Laflen, JM. 2001. Small grain cover crops and wheel traffic effects on infiltration, runoff, and erosion. *J Soil Water Conserv.* 56 (2). 160–4.
- Keller, T., Trautner, A., Ardivisio, J. 2002. Strees distribution and soil displacement under a rubber-tracked and wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. *Soil Till. Res.* 68. 39-47.
- Kubát, J., Cerhanová, D., Mikanová, O., Šimon, T. 2008. Metodika hodnocení množství a kvality půdní organické hmoty v orných půdách. VÚRV, v.v.i. Praha. 34 s. ISBN: 978-80-87011-65-2
- Lachnit, F. 2007. Minimalizace zhutňování půd v zemědělsky precizních systémech. Česká zemědělská univerzita v Praze. Technická fakulta. Praha. 87 s.
- Lipiec, J., Håkansson, I., Tarkiewicz, S., Kossowski, J. 1991. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil Till Res.* 19. 2-3.
- Lhotský, J., Váchal, J., Ehrlich, P. 1984. Soustava opatření k zúrodnování zhutněných půd. Metodiky ÚVTIZ. Praha. 39 s.
- Lhotský, J. 2000a. Zhutňování půd a opatření proti němu. Stud. Inf. ÚZPI . Praha. 61 s. ISBN:80-7271-067-2.
- Lhotský, J. 2000b. Půdy ohrožené zhutněním a opatření proti němu. *Farmář.* Praha. 6(2). 32-33.
- Pearman, BK., Way, TR., Johnson, CE., Burt, EC., Bailey, AC., Raper, RL. 1996. Soil stresses and rut depths from tires of a mechanical front wheel drive tractor. *Trans ASAE.* 39 (4). 1249–57.
- Perdok, U. D., Arts, W. B. M. 1987. The Performance of Agricultural Tyres in Soft Soil Conditions. *Soil Till Res.* 10. 319-330.
- Prikner, P. 2004. Limity zatížení pojezdového ústrojí zemědělských vozidel a strojů z hlediska stlačování půdy. Česká zemědělská univerzita v Praze. Technická fakulta. Praha. 154 s.



- Prikner, P., Aleš, Z. 2010. Assessment of soil compaction risk by agricultural tyres. In Trends in Agricultural Engineering 2010. CULS Prague. Praha. 499-504. ISBN 978-80-213-2088-8.
- Raper, R.L., Johnson, C.E., Bailey, A.C. 1994. Coupling normal and shearing stresses to use in finite element analysis of soil compaction. Transaction of the ASAE. 37 (5). 1417-1422.
- Raper, RL., Bailey AC, Burt EC, Way TR, Liberati P. 1995. Inflation pressure and dynamic load effects on soil deformation and soil–tire interface stresses. Trans ASAE. 38 (3). 685–9.
- Raper, R.L. 2005. Agricultural traffic impacts on soil. J. Terramechanics. 42. 259-280.
- Reed, I. F., J. W. Shields. 1950. The effect of lug height and of rim width on the performance of farm tractor tires. SAE Nat. Tractor Meeting Paper. 504.
- Russel, R.S. 1977. Plant root systems: their function and interaction with the soil. London. 298. ISBN: 0-07-084068-7
- Scamell, J. 2000. Integrated soil nutrition. Journal of the RASE. 161. 76-89.
- Studijní informace - Přednáška č. 12 ZS [online]. Jihočeská univerzita. 2007. Dostupné z <[http://home.zf.jcu.cz/public/departments/kpu/vyuka/pu/skripta\\_geologie/web-prednasky/zs/predn-12\\_zs.pdf](http://home.zf.jcu.cz/public/departments/kpu/vyuka/pu/skripta_geologie/web-prednasky/zs/predn-12_zs.pdf)>.
- Trautner, A., Arvidsson, J. 2003. Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. Soil Till. Res. 73. 107-118.
- Taylor, HM., Roberson, GM., Parker, Jr. JJ. 1966. Soil strength – root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. Soil Sci. 102 (1). 18–22.
- To, J., Kay, B.D. 2005. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer function. Geoderma. 129. 261-276.
- Vach, M., Javůrek. M. 2008. Negativní vlivy zhutnění půd a soustava opatření k jejich odstranění. VÚRV, v.v.i. Praha. 24 s. ISBN: 978-80-87011-57-7
- Vernikov, IS. 1958. Relation of the depth of soil working to the forward speed of machines. Mekh Electric Selsk Khoz. 15 (1). 9–11.
- Vomocil, JA., Fountaine, ER., Reginato, RJ. 1958. The influence of speed and drawbar load on the compacting effect of wheeled tractors. Proceedings. 178–80.
- Voorhees, WB., Lindstrom, MJ. 1984. Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. Soil Sci Soc Am J. 48 (1). 152–6.
- Voorhees, WB., Evans, DE., Warnes, DD. 1985. Effect of preplant wheel traffic on soil compaction, water use, and growth of spring wheat. Soil Sci Soc Am J 49 (1). 215–20.
- Voorhees, WB., Nelson, WW., Randall, GW. 1986. Extent and persistence of subsoil compaction caused by heavy axle loads. Soil Sci Soc Am J. 50 (2). 428–33.
- Voorhees, WB. 1991. Compaction effects on yield – are they significant. Trans ASAE. 34 (4). 1667–72.
- Way, T. R., Bailey, A. C., Raper, R. L., Burt, E. C. 1995. Tire lug height effect on soil stresses and bulk density. Trans ASAE. 38 (3). 669-674.
- Wright, P. 2010. Půda - nejcennější aktivum zemědělství. Odborná publikace. Simba international. 35 s.

## **Seznam použitých obrázků**

- Obr. 1 - Faktory ovlivňující úrodnost půdy podle L. Neuderta (upraveno Hůla a kol., 2008)
- Obr. 2 - Konstrukce pneumatik (diagonální, radiální), (upraveno <http://www.mdline.cz/>)
- Obr. 3 - Rozložení tlaku pneumatik na půdu a tvar otisku (upraveno Continental databook 2008)
- Obr. 4 - Různé druhy radiálních pneumatik (velkoobjemová, nízkoprofilová, standardní, pro meziřádkovou kultivaci), (upraveno Continental)
- Obr. 5 - Těžký kloubový traktor opatřený trojmontáží (upraveno [http://imcdb.org/vehicle\\_45841-Case-IH-STX-Steiger-435.html](http://imcdb.org/vehicle_45841-Case-IH-STX-Steiger-435.html))
- Obr. 6 - Pohyb vody a živin ve zhutnělé půdě (upraveno Wright, 2010)
- Obr. 7 - Rozdíl růstu kořenů ve zhutnělé a strukturní půdě (upraveno Wright, 2010)
- Obr. 8 - Vliv zhutnění na rychlost růstu kořenů (upraveno Russel, 1977)
- Obr. 9 - Vliv objemové hmotnosti a penetračního odporu na pronikání kořenů (upraveno Wright, 2010)
- Obr. 10 - CTF systém OutTrack (upraveno Chamen, 2009)
- Obr. 11 - CTF systém AdTrack (upraveno Chamen, 2009)
- Obr. 12 - Vliv zatížení nápravy na zhutnění půdy (upraveno Wrihgt, 2010)
- Obr. 13 - Penetrační odpor půdy v závislosti na hloubce a intenzitě zpracování (upraveno VÚRV, 2007)