

**JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA**

Studijní program: **N4101 Zemědělské inženýrství**

Studijní obor: **Zemědělská a dopravní technika**

Katedra: **Katedra zemědělské, dopravní a manipulační techniky**

Vedoucí katedry: **doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Experimentální stanovení vybraných fyzikálních parametrů  
půd pro potřeby počítačového modelování utužení půd v důsledku  
pojezdu zemědělské techniky**

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: **Mgr. Tomáš Zoubek**

Autor diplomové práce: **Bc. Vladimír Halíř**

České Budějovice, 2019

**Zadání** kvalifikační práce (druhá strana), a třetí strana (1.oboustanééé)

**Zadání** kvalifikační práce (druhá strana), a třetí strana (2. oboustranné)

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě, Zemědělskou fakultou - elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

Datum

Podpis studenta

## **Abstrakt**

Cílem práce bylo experimentálně stanovit vybrané fyzikální parametry půdních vzorků s výstupem dat využitelných k potřebám tvorby počítačových modelů a simulací utužení půd v důsledku zatěžování povrchu půdy pojezdem zemědělské techniky. Výstupní data by měla být účelně konsolidována dle uvedených návrhů syntézy primárních dat, a to s ohledem na zřejmost působících vlivů užitných v podmínkách běžné zemědělské praxe.

Praktická část práce se zabývala diagnostikováním relevantních faktorů majících vliv na fyzikální vlastnosti půdních vzorků se stěžejním zaměřením na faktor obsahu přidané půdní organické hmoty.

Výstupem práce jsou jak surová data modelové vzorkové řady v podobě grafických závislostí navolených specifikačních faktorů v rozsahu definovaných intervalů tak i škála návrhů spolupůsobících provázaností s možností zhodnocení dat pro zemědělskou praxi např. za spoluúčasti podpory sofistikovaného programu pro tvorbu počítačových multifyzikálních simulací jako je COMSOL MULTIPHYSICS®.

## **Klíčová slova**

Utužení půdy; půdní organická hmota; penetrometrie.

## **Abstract**

The aim of the thesis was to experimentally determine the selected physical parameters of soil samples with the output of data usable for the needs of computer modeling and simulation of soil compaction as a result of soil loading by agricultural machinery. Output data should be expediently consolidated according to the proposed primary data synthesis proposals, taking into account the obviousness and clarity of the operating influences useful under normal agricultural practice.

The practical part deals with the diagnosis of relevant factors determining and affecting the technological and consistency properties of soil samples with a focus on the content factor of the added organic soil organic matter.

The output of the thesis is both the raw data of the model sample series in the form of graphical dependencies of the selected specification factors within the range of the defined intervals, as well as the outline of the design of a range of cooperative interconnections with the possibility of data evaluation, with the support of a sophisticated program for the creation of computer multiphysical simulations such as COMSOL MULTIPHYSICS®.

## **Key words**

Soil compaction; soil organic matter; penetrometry.

## Obsah

Úvod.....	10
1 Literární přehled .....	11
1.1 Znehodnocování půdního fondu.....	11
1.2 Technogenní a netechnogenní příčiny znehodnocování půdy.....	11
1.3 Zrychlená eroze půdy .....	12
1.4 Agronomické dopady vodní eroze.....	13
1.5 Půdní humus .....	14
1.6 Hlavní složky půdní organické hmoty.....	15
1.7 Význam půdního edafonu .....	15
1.8 Indikátory kvality půdy .....	16
1.9 Hlavní charakterizační faktory kvality půdy .....	17
1.10 Fyzikální indikátory a jejich využití pro hodnocení půd .....	19
1.11 Struktura půdy.....	19
1.12 Strukturní a nestrukturní půda .....	20
1.13 Utužení půdy.....	21
1.14 Půdní pórovitost.....	23
1.15 Měrná a objemová hmotnost půdy.....	24
1.16 Voda v půdním prostředí .....	24
1.17 Vzduch v půdním prostředí.....	26
1.18 Tepelný režim v půdním prostředí.....	26
1.19 Konzistence a technologické vlastnosti půdy .....	27
1.19.1 Koheze půdy .....	27
1.19.2 Adheze půdy .....	28
1.19.3 Bobtnavost půdy .....	28
1.19.4 Kornatění půdy .....	29
1.19.5 Hrudovitost půdy .....	29

1.19.6	Rozprašování půdy .....	29
1.20	Fyzikální vlastnosti půd a mechanika zemin .....	30
1.20.1	Definice napětí v zemině .....	30
1.20.2	Teorie porušení zemin .....	31
1.20.3	Deformační charakteristiky zemin.....	31
1.20.4	Přístupy a věrohodnost řešení aplikačních úloh .....	31
1.20.5	Laboratorní zkoušení zemin .....	32
1.20.6	Koncepce klasických laboratorních přístrojů pro zkoušení vlastností zemin .....	32
1.21	Výpočetní metody v mechanice zemin.....	33
2	Přehled zahraniční výzkumné činnosti .....	36
2.1	Numerické modelování zhutnění půdy za použití metody konečných prvků.....	36
2.2	Změny ukazatelů utužení půdy v reakci na pojezd zemědělské techniky .....	39
2.3	Porovnání míry půdního utužení při použití pneumatik a pásů na pojezdovém ústrojí zemědělských strojů.....	41
2.4	Posouzení rizik půdního utužení; porovnání vlivu pásových a kolových podvozků.....	43
2.5	Výčet základních parametrů půd užívaných v počítačových modelech a simulacích. ....	46
3	Metodika měření .....	49
3.1	Teoretický úvod do měření.....	49
3.2	Stanovení cíle měření .....	49
3.3	Metodický postup měření .....	50
3.3.1	Koncepce zkušebního přípravku pro zkoušení půdních vzorků. 50	
3.3.2	Sestavení vzorkové řady .....	51
3.3.3	Zatěžovací fáze .....	52



3.3.4	Penetrometrická zkouška .....	52
3.4	Očekávané výsledky a jejich vyhodnocování .....	52
3.5	Hodnocení a úprava metodického postupu.....	53
3.5.1	Volba pozemku pro odebrání půdních vzorků .....	53
3.5.2	Sestavení stupňované vzorkové řady.....	54
3.5.3	Fáze zatěžování vzorků externím tlakem .....	54
3.5.4	Měření penetrometrického odporu ve vertikálním profilu zkušební vzorku.....	55
4	Naměřená data .....	57
5	Vyhodnocení získaných dat .....	63
5.1	Syntéza primárních dat .....	63
6	Diskuse.....	82
	Závěr.....	83
	Přehled použité literatury .....	84
	Příloha 1 .....	88
	Příloha 2 .....	90

## Úvod

Mechanizace a elektrotechnika učinila za posledních 100 let obrovský postup ve vývoji. Změnily se koncepty technologických linek, nicméně člověk jako článek v těchto systémech stále zastává svou zatím ne zcela nahraditelnou funkci. V zemědělství je patrný jasný trend vývoje ke snižování objemu manuální práce a snižování počtu pracovníků ve výrobě. To je možné zajistit právě mnohonásobným zvýšením výkonnosti strojní mechanizace v průběhu technologického pokroku. Moderní zemědělská technika vyráběná dnes disponuje značnými výkony a pracovními záběry. Technická část je tedy poměrně efektivně zvládnuta, co však zaostává, je adekvátní vztah k životnímu prostředí.

Mnoho výzkumných ústavů se však o problematiku zajímá a publikuje své výsledky v odborné literatuře. Právě téma vlivu zemědělské techniky a intenzivního zemědělství na půdní prostředí se dostává do popředí zájmu, a to patrně z důvodu jasně viditelných probíhajících změn v kulturní krajině. Degradace půdního fondu v souvislosti s erozí půdy, erozní smyvy, narušování půdní struktury, změna vláhových a teplotních podmínek, kontaminace povrchových a podzemních vod atd.

Hlavní roli hraje právě stav půdy a její složení vztažené primárně k obsahu půdní organické hmoty. Utužení půdy je v tomto směru uváděno jako jednoznačný diagnostický signál pro popis změn v půdním prostředí. Do souvislosti je udáván právě s vlivem zemědělské techniky. Od éry využívání animální síly pro potah zemědělských strojů až ke komfortním autonomním energetickým prostředkům je snahou zjišťovat, popisovat a porovnávat jejich technologické vlastnosti a konsekvenci vlivy působení na půdní prostředí.

Pokud bychom se zaměřili na pojezdová ústrojí zemědělské techniky, koncepční změna od ocelových kol, pneumatik a pryžových pásů v průběhu doby sleduje trend navyšování pracovních záběrů a hmotností strojů. O vyloučení mobilních energetických prostředků z prostředí zemědělské polní výroby dnes reálně uvažovat nelze. Proto je potřeba efektivně využívat poznatky z výzkumné činnosti a za účasti mezioborové spolupráce tyto pronášet do odborné praxe.

# **1 Literární přehled**

## **1.1 Znehodnocování půdního fondu**

Na znehodnocování půdy se nepodílí jen zemědělství, ale půda je negativně zasahována i jinými profesními resorty, jako např. lesnictví, vodní hospodářství, těžební průmysl atp. V minulosti byly nejvýznamnějšími činiteli znehodnocování půdy přírodní faktory. V současnosti s nezastavitelným postupem industrializace, neustálé těžby neobnovitelných přírodních zdrojů a celoplošného intenzivního využívání zemědělské půdy celosvětově převládají antropogenní faktory s negativním dopadem na půdu.

## **1.2 Technogenní a netechnogenní příčiny znehodnocování půdy**

Antropogenní vlivy na půdu zapříčiněné činností člověka mohou být přímé – technogenní, nebo nepřímé – netechnogenní. Technogenní vliv člověka na půdu se projevuje přímou antropizací půdy, narušováním nevhodnými mechanickými zásahy, nadužíváním syntetických pomocných prostředků, nadměrnou aplikací minerálních hnojiv, monokulturním pěstováním plodin, neadekvátním zavlažováním, nevhodnými agromelioračními a odvodňovacími zásahy, několikanásobnými pojezdy těžkou zemědělskou technikou apod.

Netechnogenní vliv na půdu znamená např. působení deště, klimatických podmínek, ledu a sněhu, podzemní vody a jiné prostředím zprostředkované účinky škodlivin vyprodukovaných činností člověka. Z těchto jsou nejzávažnější účinky průmyslových emisí, exhalátů, polutantů a spadů, které intoxikují půdu. Kyselý déšť, například, je antropogenní netechnogenní činitel, který následně acidifikuje půdní prostředí.

Znehodnocování půdy se projevuje zhoršením jejích základních znaků a přirozených vlastností. Z fyzikálního hlediska by se jednalo o znaky znehodnocení v podobě zhutnění, erozní a antropické destrukce, nadměrné evaporace a vysoušení, zamokření a podmáčení, soliflukce a sesuvů půdy. Chemické znehodnocení půdy v podobě okyselování, alkalizace, zasolování či vyluhování. Narušení biologické se znaky infekčnosti, sterilizace, ochuzení o humus, snížené biologické diverzity půdního edafonu a jeho aktivity.

Individuální jmenované znaky znehodnocení vyjadřují změnu, většinou zhoršení, konkrétní fyzikální, chemické nebo biologické hodnoty půdy. Tyto znaky zpravidla nepůsobí jednotlivě nebo odděleně, naopak synergicky spolupůsobí na půdní prostředí. Např. kompakce je zvýšení objemové hmotnosti půdy, acidifikace je snižování hodnoty pH půdy. Kyselost půdy jako půdní vlastnost nemusí být znakem znehodnocení půdy, pokud se jedná o původní přirozeně vznikající kyselou půdu ve vztahu k podmínkám prostředí. Pokud se však původně slabě kyselá půda změní na silně kyselou, konstatujeme u ní znehodnocení acidifikací. Okyselování půdy s původně neutrální reakcí vyvolává stresové podmínky pro půdní biotu (Šimek, 2004; Šarapatka et al., 2002; Jandák, 2004; Bedrna et al., 1968).

### **1.3 Zrychlená eroze půdy**

Eroze je definována jako rozrušování půdy při působení vnějšího činitele, např. větru, vody v různém skupenství (led, sníh, déšť). Při procesu dochází k přemísťování půdních částic a k jejich následné akumulaci na jiném stanovišti. V závislosti na stanovištních, půdních a klimatických podmínkách se projevuje buď samostatně, nebo v kombinaci s jinými faktory. Z agronomického hlediska znamená eroze fyzikální, chemickou a biologickou degradaci půdy, nenávratnou ztrátu zeminy (prachová a koloidní frakce), humusu a živin, ovlivnění mikrobiálního života aponičení, popřípadě devastaci pěstovaných plodin.

Eroze obecně má tři hlavní stádia. V první fázi, při tzv. denudaci, dochází k odnosu půdní hmoty. Následuje transport unášených částic a jejich přemísťování v prostoru. Konečnou fází je akumulace, kde dochází k uložení hmoty v podobě nánosu, překryvů, sedimentů apod. Na erozi je však nutno nahlížet jako na zcela přirozený přírodní proces, který nelze zcela eliminovat. Lze jej však některými metodami výrazně omezit, nebo naopak některými postupy velmi zrychlit.

Problematika eroze půdy je globálním problémem. Vodní erozí uvolněné půdní částice představují značné komplikace pro vodárenská zařízení. Množství plavenin ve vodních tocích vzrůstá se zvyšující se intenzitou eroze po nevhodných antropogenních zásazích v krajině. S odnášenou půdou dochází i k velkým ztrátám živin z orničního profilu. Neztrácí se pouze živiny, ale i půdní organická hmota. Odnos a úbytek této půdní frakce z aktivního orničního profilu má za následek fatální dopady na zemědělsky využívaných půdách, projevující se nejen na snižování výnosů plodin.

Zrychlená eroze postupně vede k degradaci půdního fondu a v konečném efektu k devastaci krajiny. Toto se projeví zejména po odstranění či změně vegetačního krytu na svažitéch pozemcích. Vodní eroze půdy působí v několika fázích. První je kapková eroze způsobená kinetickou energií dopadajících dešťových kapek na nechráněný půdní povrch. Následuje plošná vodní eroze, která je způsobena odtékající vodou, jež se nestačí vsakovat do půdního profilu. Plošná eroze přechází do liniové, při níž soustředěný odtok podle intenzity vede k vzniku rýhové až výmlové eroze (Šarapatka, et al.; 2002; Cablík, 1963; Janeček 1999).

#### **1.4 Agronomické dopady vodní eroze**

Vliv plošné nebo též vrstevné eroze spočívá v plošném mělnění půdních drobtovitých agregátů na jednotlivé půdní částice a ve splachování jemnozeme do nejbližších nižších poloh mikro-reliéfu. Poněvadž eroznímu smyvu podléhají snáze jemnozrné frakce, zvyšuje se u takto erodované půdy hrubozrnnost. Povrchový odtok též rozpouští a odplavuje soli, a tím půda ztrácí rostlinné živiny, ať už přirozeně vzniklé, nebo dodané v podobě minerálních hnojiv. Škodlivý je tedy i slabý povrchový odtok, který neodnáší půdní zrna. Krom toho, povrchový odtok nepříznivě zasahuje do rovnoměrného rozložení vláhy, neboť svahy ochuzuje a údolí vodou přesycuje.

Ochrana pozemku před erozí je tedy i ochranou půdní vláhy. Plošný splach podstatně neochuzuje pole o minerální skelet, avšak nepříznivě mění její chemismus. V půdě klesá obsah dusíku a jiných ve vodě rozpustných živin, neboť stékající voda vyvolává rozpouštění a vyluhování těchto látek. V půdě zasažené plošnou erozí se takto zemědělsky zhoršují vlastnosti chemické a fyzikální. Dalším důsledkem plošné eroze je vznik půdního škrálopku. Tvorba povrchové krusty a následný pokles vsaku vodních srážek má za následek zmenšenou vodní jímavost a zvyšuje se pak povrchový odtok. Tím je plošná eroze dále umocňována. Naproti tomu způsobuje plošná eroze tzv. erozní zásuš, neboť půda s menší vodní jímavostí se stává vysychavější.

Půdy s nízkým obsahem humusu, jemnozrné a s částicovým či prachovým slohem trpí silně plošnou erozí. Zejména na sklonitějších svazích a vegetací nechráněných površích se plošná eroze viditelně projeví. Dokladem budiž povrchový odtok z těchto poloh zakalen erozními produkty, na rozdíl od čistého odtoku z poloh zalučněných nebo jinak ochráněných.

Nejintenzivněji působí plošná eroze tehdy, když prudký déšť dopadá na silně vyschlou půdu a tříští její nechráněný povrch. Jelikož suchá půda se z počátku provlhuje velmi nesnadno, hromadí se voda na povrchu a zvyšuje se intenzita povrchového ronů, který následně strhne a splachuje zemité částice orního profilu. Plošná eroze postupuje zpravidla pozvolně a nezanechává trvale viditelné stopy po svém působení. Ty jsou poměrně snadno zahlazeny prvním agrotechnickým zásahem na pozemku. V zemědělské praxi pak často nejsou škodlivé účinky včas zaznamenány a náprava není věnována patřičná pozornost. Při své nenápadnosti je však plošná eroze velmi škodlivá, neboť soustavně zhoršuje strukturu půdy a ochuzuje svažité polohy o jemnozem.

Rýhová eroze je charakteristická tím, že voda stékající po svahu vytváří v poškozeném půdním povrchu malé, avšak zřetelně patrné rýžky, které se postupně spojují a prohlubují do brázdových zářezů. Příčinou zvýšeného odnosu půdy není celoplošný splach, nýbrž vymílání vodním proudem, jež postupně rozrušuje povrch a prohlubuje vytvářené stružky, jimiž následně odnáší splavené půdní částice. Erozně splachovaná půda se následně usazuje na úpatí svahu nebo v přilehlém údolí, jakmile srážkový odtok ztratí při zmenšujícím se sklonu území potřebnou unášecí sílu. Částečně je půda také odnášena do přirozených vodních toků (Cablík, 1963; Janeček, 1999; Šimon et al., 1989; Hůla 2000).

## **1.5 Půdní humus**

Primárním zdrojem organického materiálu v půdě je fotosyntézou akumulovaný uhlík. Uhlík je do koloběhu uváděn z několika zdrojů: atmosféra, terestrická biota, půda a oceán. Největší množství uhlíku je obsaženo v oceánech. Dále sestupně řazeno v půdě, terestrické biotě a nejméně v atmosféře. Uvolňování a poutání organického uhlíku je závislé na přítomnosti rostlinného pokryvu a aktivitě mikrobiální bioty. V půdě může být uhlík ve formě volné, stabilní nebo aktivní.

Volný uhlík není vázán na minerální složku půdy a není asociován s minerálními agregáty. Stabilní uhlík je obsažen ve specifických látkách humusové povahy, huminových kyselinách a fulvokyselinách. Stabilní uhlík je značně odolný vůči vlivům mineralizace a biodegradace. Aktivní uhlík (též uváděn jako labilní) tvoří lehce rozložitelné sloučeniny a může být snadno mikroorganismy metabolizovatelný. Podléhá též oxidaci, což vede k snižování obsahu humusu v půdě a v důsledku mikrobiálního rozkladu úzce souvisí s uvolňováním živin.

Půdní organická hmota za působení vhodných klimatických činitelů a biologické aktivity půdních organismů v čase podléhá rozkladným a syntetickým změnám. Primární humusotvorný materiál tvořený nerozloženými organickými zbytky prochází mezistupněm rozkladu, při kterém vznikají meziprodukty tvořené jednoduššími chemickými sloučeninami. Závěrečná fáze přeměny primární organické hmoty je transformace předchozích meziproduktů na vlastní humus, který je výsledkem humifikačních procesů.

Vlastní humus je tvořen dvěma frakcemi. Živný humus složený převážně z látek lehce rozložitelných, tj. fulvokyseliny a látky nehumínové povahy a humus stálý, který je tvořen látkami humínové povahy, tj. humínové kyseliny a humin. Stálý humus je poměrně odolný k mikrobiálnímu rozkladu (Kolář, 1988; Sotáková, 1982; Richter et al., 2003).

## **1.6 Hlavní složky půdní organické hmoty**

Organické zbytky jsou tvořené nerozloženými částmi rostlinných i živočišných tkání a produkty jejich částečného rozkladu. Půdní biomasa označuje veškerou organickou hmotu tvořenou živými mikrobiálními tkáněmi. Pojem humus zahrnuje všechny organické látky v půdě, kromě nerozložených rostlinných a živočišných tkání, produktů jejich částečného rozkladu a půdní biomasy.

Půdní organická hmota je soubor všech neživých látek nacházejících se na povrchu půdy, nebo v půdním profilu. Humínové látky jsou vysokomolekulární sloučeniny vzniklé při sekundárních syntetických reakcích. Látky nehumínové povahy patří do biochemických tříd, jako jsou aminokyseliny, uhlovodíky, tuky, vosky, pryskyřice a organické kyseliny. (Šarapatka, 2014; Kolář 1988)

## **1.7 Význam půdního edafonu**

Půdní edafon zastupuje ve všech půdních procesech významnou roli. Působí na chemické a fyzikálně-mechanické změny, účastní se přímo procesů přeměny organických látek a napomáhá při přeměně a využívání minerálních látek. Jeho činnost je nenahraditelná při tvorbě půdních agregátů, řídí bilanci půdních živin a je významným činitelem biologické auto-asanace půdního prostředí.

Půdní edafon tak tvoří z půdy auto-transformační systém schopný při jeho nenarušení racionálního hospodaření se svou energií. Tato uložená energie je systémem využívána k vyrovnávání se s negativními vlivy prostředí.

Půdní edafon je rozhodujícím článkem v přeměně organických látek v procesech mineralizace, humifikace nebo ulmifikace. Při střídání podmínek aero- a anaerobiózy se vytváří prostředí pro tvorbu meziproductů rozkladem, syntézou a re-syntézou primární organické hmoty a pro ekto- či endocelulární syntézu humusových látek specifickými mikroorganismy. Půdní edafon se účastní změn prostorového uspořádání půdních částic, např. tvorbou chodeb, tmelením mikročástic a mísením jednotlivých minerálních a organických frakcí. Půdní edafon se tedy svou přítomností a činností přímo podílí na vytváření a udržování půdní úrodnosti.

K žádoucí intenzivní aktivitě edafonu pozitivně přispívá např. aplikace organického hnojení, které je zdrojem látek a energie pro půdní organismy. Zároveň slouží k zvýšení početnosti organismů a jejich druhové diversity. Snižování biologické aktivity půdy neuváženými agrotechnickými zásahy, např. neúměrným nadužíváním nepřírodních pomocných chemických prostředků a minerálních hnojiv nevhodného chemického složení, sekundárním technogenním poškozováním půdní struktury atp., vede ke snížení přirozené půdní úrodnosti a schopnosti autoregulace půdotvorných procesů. (Jandák, 2004; Mikula, 1998; Kalinová, 2007)

## **1.8 Indikátory kvality půdy**

Ke kvantifikaci zavedeného pojmu kvalita půdy je snaha používat souborů tzv. indikátorů. Tyto indikátory vycházejí z půdních vlastností, které lze měřit a číselně vyjadřovat. Tak bylo vytvořeno několik systémů s různým zaměřením a pojetím. Je potřeba uvést, že výběr indikátorů není neomezený, částečně subjektivní a pokud má být v praxi využitelný, pak nikdy nemůže podchytit celý rozsah půdních vlastností.

Pro specifické funkce je nutné použít specifických indikátorů. V rámci jedné definované funkce se však mohou konkrétní hodnoty optimálního rozmezí daného indikátoru lišit. Např. v rámci produkční funkce se mohou lišit vhodné agrochemické parametry pro jednotlivé druhy plodin. Optimální rozsahy indikátorů se ještě mohou lišit nejen v závislosti na dané funkci, ale také na použité metodě ke stanovení, souboru podkladových vstupních dat, použité statistické nebo jiné vyhodnocovací metodě apod. U kvalitních zemědělských půd je stále v popředí zájmu tzv. produkční funkce půdy, avšak ekologické funkce se při hodnocení stále více uplatňují z důvodu viditelné tendence zhoršujícího se stavu půdního fondu (Sáňka 2004; Šimek, 2005).



## 1.9 Hlavní charakterizační faktory kvality půdy

Chápání pojmu kvalita půdy se může značně odlišovat dle priorit, které jsou individuálně přisuzovány jednotlivým funkcím půdy, jako např. z pohledu zemědělského využití, utváření krajiny, ekosystémové interakce, využívání přírodních zdrojů atp. Nutno zmínit, že moderní zemědělské výzkumné ústavy uznávají jako indikátory kvality půd nejen agrochemické a produkční vlastnosti, ale také neméně důležité vlastnosti ekologické. V tomto směru půda již tedy neplní pouze funkci produkční.

Z hlediska přímé antropogenní vazby je funkce půdy všeobecně pojímána za základní článek v potravní zásobenosti lidstva a současně jako v globálním měřítku nezastupitelného média pro růst suchozemské rostlinné vegetace (plodin). Půda je také životně důležitou zásobárnou vody pro rostlinstvo a půdní biotu. Je také současně filtračním a čisticím prostředím, přes které voda prochází, pokud není tato její funkce narušena.

Často je bohužel přehlížen význam mikrobiální složky půdy. Je však třeba zmínit, že cyklus hlavních biogenních prvků, jako je uhlík, dusík, fosfor, síra atd., probíhá v půdě právě prostřednictvím interakcí půdního edafonu s organickou i anorganickou frakcí půdy za spolupůsobení fyzikálních a chemických faktorů. Půdní organická hmota je tak hlavní suchozemskou zásobní bankou uhlíku, dusíku, fosforu a síry.

Bilance a přístupnost zmiňovaných prvků je kontinuálně ovlivňována mikrobiální mineralizací a imobilizací. Z biologického pohledu jsou půdní mikroorganismy nedoceněnou databankou genetické informace. Zcela zásadní a nezastupitelnou roli hraje půda ve stabilitě ekosystémů a v bilanci látek a transformace energií.

Při své nenarušené funkci působí půda v environmentálním prostředí jako pufrální médium, které má schopnost zadržovat, degradovat či imobilizovat potenciačně rizikové prvky. Za určitých podmínek však může docházet k uvolňování kumulovaných rizikových látek do koloběhu. V tomto směru je stav půdního fondu jedním z faktorů přímo ovlivňujících a vytvářejících stav životního prostředí a udržitelný rozvoj života.

Chceme-li jako lidstvo se zemědělskou půdou vhodně nakládat a hospodařit a zachovat ji alespoň v přijatelném stavu pro příští generace, je důležité věnovat se definici kvality půdy komplexně. Z definic, které o tomto pojednávají, je možno uvést několik základních atributů.

Kvalita půdy je:

- dána základními parametry, které jsou odvozeny z půdních charakteristik nebo z přímých sledování např. náchylnosti k zhutnění, erodovatelnosti, úrodnosti atd.,
- schopnost zajišťovat a udržovat růst rostlin v jejím profilu, což zahrnuje faktory jako obsah organické hmoty, struktura, snadnost mechanické kultivace, mocnost ornice, hydrolimity, propustnost, pH, obsah živin atd.,
- schopnost půdy fungovat produktivním a dlouhodobě udržitelným způsobem za současného udržování nebo zlepšování podmínek životního prostředí, zdravotního stavu rostlin, živočichů i člověka,
- schopnost půdy plnit funkce daného ekosystému a pozitivně spolupůsobit s externím systémem prostředí,
- schopnost půdy dlouhodobě udržitelným způsobem produkovat zdravou a nutričně hodnotnou rostlinnou biomasu a zvyšovat vitalitu prostředí a jeho obyvatel, aniž by docházelo k degradaci a narušování přírodních zdrojů nebo poškozování životního prostředí.

Souhrnná definice uváděná v zahraniční literatuře byla navržena takto: Kvalita půdy je schopnost půdy plnit funkce daného ekosystému tak, aby byla trvale zajišťována biologická produktivita, udržována kvalita životního prostředí a podporováno zdraví fauny i flóry.

I přes veškerou snahu komplexního vyhodnocení vazeb systému půdy a ostatních složek ekosystému, především z hlediska biodiverzity a celkové funkce půdy v krajině, nejsou zdaleka poznatky na úrovni holistického pojednání. Takový přístup se prozatím i přes značnou míru poznání jeví technicky nezvládnutelný.

Důvod je, že kvantifikace a interpretace vazeb takto rozmanitého funkčního systému by se dostala do nezvládnutelných rozměrů. Proto jsou souběžně tvořeny, vyvíjeny a následně užívány dílčí cílené přístupy a metody hodnocení (Šarapatka, 2002; Sáňka 2004; Hůla, 2002; Hraško, 1988; Sotáková, 1982).

## 1.10 Fyzikální indikátory a jejich využití pro hodnocení půd

Půda vzniká v půdotvorném procesu rozrušováním pevného horninového podloží. Tvořena je tuhou fází, tzn. disperzní podíl půdních částic, kapalnou fází, tj. voda a slabé roztoky různého složení a plynnou fází. Součinností těchto fází vzniká disperzní prostředí. Protože však tuhá fáze je složena z minerálních i organických látek různého tvaru a velikosti, mluvíme o půdě jako o poli-disperzním systému.

Velikost disperzních částic je charakterizována jejich lineárním rozměrem, tj. průměrem. Převrácená hodnota tohoto rozměru představuje stupeň disperzity. S klesající velikostí částic roste stupeň disperzity. Zastoupení částic různé velikosti v půdním vzorku se zjišťuje zrnitostními rozbory. Jednotlivé půdní částice mohou existovat samostatně, častěji však tvoří shluky, tzv. agregáty, které jsou základním faktorem vytváření půdní struktury. (Pavel, 1984; Horáček, et al., 1994)

## 1.11 Struktura půdy

Struktura půdy ovlivňuje růst vegetačního pokryvu, biologické procesy v půdě probíhající, koloběh prvků, výměnu plynů v půdním profilu, vodní režim, apod. Struktura půdy naopak zpětně ovlivňuje některé již zmíněné faktory např. osídlení půdního profilu mikroorganismy a ostatním edafonem, růst rostlin. Dále je struktura půdy ovlivněna texturou, organickou hmotou, půdním roztokem a v neposlední řadě pak způsobem obhospodařování.

Elementární půdní částice jsou v půdě tmeleny koloidy humusu, železa, hliníku a solemi karbonátů a činností půdních mikroorganismů. Koagulace je způsobena zejména ionty vápníku, hořčíku, železa a hliníku. Částice se spojují do mikro-agregátů, v nichž se nachází póry vyplněné vodou a vzduchem. Vzniklé mikroklima agregátu může být životním prostředím pro půdní mikroorganismy s tím, že tyto mohou podpořit fixaci stavby půdních agregátů. Rozpad půdní struktury souvisí s půdní aciditou, účinkem nadměrného obsahu draslíku a sodíku.

Antropogenní podíl na poškozování struktury zemědělské půdy bývá z velké části zapříčiňován právě intenzivním obhospodařováním a využíváním půdního fondu bez zpětné adekvátní kompenzace toku energie a látek v systému.

Příkladem je např. pěstování monokultur polních plodin, nízké zastoupení víceletých pícnin na orné půdě, nevhodné mechanické obdělávání nebo za nevhodných klimatických podmínek, podporování znehodnocení acidifikací aplikací množství fyziologicky kyselých minerálních hnojiv a sekundární zaselování za současně nedostatečného vápnění, nedostatečné hnojení organickými hnojivy a přísun primární organické hmoty, utužování půdy mnohonásobnými pojezdy zemědělské techniky s vysokým měrným kontaktním tlakem, podporování zrychlené eroze půdy, atd. (Pavel et al., 1984; Šarapatka, 2002; Richter, 1997)

### **1.12 Strukturní a nestrukturní půda**

Půdní struktura je z agronomického hlediska jednou z nejvýznamnějších vlastností půdy. Je podmíněna strukturností, tj. schopností spojovat minerální částice a vytvářet strukturní agregáty. Rozlišujeme tak půdy primárně strukturní a naopak nestrukturní.

Nestrukturní půda tak může být ve stavu slitém nebo elementárním. Slitý stav vzniká u hlinitých až jílovitých půd po rozplavení a rychlém vyschnutí rozbředlé hmoty. Výsledkem je stmelení půdy do kompaktních celků. Slitá tenká povrchová vrstva tvoří tzv. půdní škraloup. Elementární stav nestrukturní půdy může být buď volný, kdy půdní částice (zrna písčité nebo prachová) jsou volně uloženy v půdním profilu vedle sebe, nebo stmelený, kdy jsou částice navzájem spojeny tenkými povlakovými vrstvami sesquioxidů, jílu nebo humusu.

Strukturní půda se nachází ve stavu agregovaném, tedy že se celek půdní hmoty samovolně nebo za působení vnější síly rozpadá v agregáty různé velikosti, tvaru a stability. Strukturní agregáty však nejsou kompaktními půdními celky. Jsou prostupovány vnitroagregátovými póry a to jak kapilárními, semikapilárními i nekapilárními. Z agronomického hlediska je nejceněnější drobtovitá půdní struktura tvořena právě těmito strukturními agregáty. I při nasycení kapilárních pórů v agregátech půdním roztokem umožňují nekapilární póry mezi jednotlivými agregáty výměnu půdních plynů, což je příznivé pro aktivitu aerobních mikroorganismů a žádoucí přeměny organických látek. Větší póry také umožňují rostlinám lepší vývin kořenového vlášení.

Struktura půdy bohužel není stavem trvalé povahy. Půda je pod neustálým působením různých vlivů, které strukturnost jednak podporují a vytváří a jedna narušují. Působením přirozených půdotvorných faktorů získává každá půda ve svých genetických horizontech zákonitě určitou strukturu. Tato je označována jako tzv. primární půdní struktura. Kultivačními agrotechnickými zásahy je sice možné vytvořit tzv. sekundární pseudo-strukturu u půd přirozeně nestrukturních nebo s jinak nevhodnou strukturou. Tato umělá struktura však není trvalá a bez systematického udržování ji taková půda snadno a rychle ztrácí a vrací se do svého původního stavu. Tato změna do přirozeného stavu bývá urychlována působícími abiotickými činiteli prostředí a technogenními vlivy (Pavel et al., 1984; Lhotský, 1994; Hůla 2008).

### **1.13 Utužení půdy**

Pedokompakce je závažným poškozením půdy, při kterém se zvyšuje objemová hmotnost jednotky půdy, tj. snižuje se pórovitost. To má za následek snížení objemu vody a vzduchu v půdním profilu. Prvotně přirozená pedokompakce se vytváří půdotvornými procesy se vznikem kompaktních utužených horizontů. Antropogenní pedokompakce je způsobována působením těžkých mechanizačních prostředků na povrch půdy a využíváním půdu zpracujících strojů.

Z dostupné literatury může být vyvozeno, že kontaktní tlak větší než 80 kPa je možno hodnotit již jako škodlivý. Působení tlaku do 150 kPa může slabě znehodnocovat strukturu podorničí. Vyšší zatížení pak má vliv jak na ornici, tak na podorniční profil. Dnes běžně v praxi využívané výkonné traktory působí na půdu středními měrnými kontaktními tlaky 250 až 500 kPa. Tyto hodnoty se promítají až do hloubky 500 mm. Významné jsou rovněž opakované a neřízené pojezdy techniky, při nichž se zhutnění kumuluje a postupuje v půdním profilu.

Míru utužení lze hodnotit několika různými způsoby. K bezpřístrojovým metodám možno využít prostého pozorování na pozemku. Diagnostickým signálem zde bude stagnující voda např. na souvratích a okrajích pozemku. Přesnější laboratorní metody hodnocení neporušených či porušených půdních vzorků poskytují data v podobě např. objemové hmotnosti, pórovitosti, vzdušnosti, propustnosti, retenční kapacity, vlhkosti, atd. Z těchto je možné nepřímou vyhodnocovat různé závislosti a jejich vliv ve vztahu k faktoru utužení. V polních podmínkách můžeme hodnotit hloubku a stupeň utužení pomocí penetrometrické sondy, která zaznamenává odpor vnikání normovaného hrotu sondy do půdního profilu.

Z půdních vlastností nemálo ovlivňuje náchylnost k zhutnění zrnitostní složení půdy. Náchylné jsou půdy jílovité a prachovité, odolnější jsou půdy písčité a šterkovité. Vliv má i kvalitativní zastoupení jílovitých minerálů, kdy nižší stabilitu vykazují půdy s majoritním zastoupením např. kaolinitu nebo illitu.

Významným faktorem půdního prostředí mající značný vliv na půdní mechanické vlastnosti je množství vody obsažené v půdním profilu, resp. vlhkost. Provlhčení půdy snižuje kohezi mezi půdními částicemi a tím umožňuje snadnější pohyb nebo přesun půdních zrn a agregátů při působení vnější síly. Půda vysušená nebo s nízkou vlhkostí je k utužení méně náchylná a je těžko stlačitelná do stavu vysoké kompakce. Se zvyšující se vlhkostí vzrůstá i možnost jejího utužení do určitého limitu vlhkosti. Po překročení určité hranice vlhkosti, pro každou půdu odlišné, klesne únosnost půdy a dochází k hnětení a rozbředání. V této fázi nedochází k zmenšování objemu půdy stlačováním, ale dochází k poškozování struktury půdních agregátů. Jednu z hlavních rolí v náchylnosti půdy k zhutnění hraje kvantita a kvalita půdní organické hmoty.

Minerální půdy s nízkým obsahem organické hmoty a humusu, např. luvizemně, mají menší schopnost odolávat utužení ve srovnání s půdami typu černozem s vyšším obsahem. Nejvíce odolné k objemovým změnám jsou organozemě typu rašeliny.

Nebezpečí utužení snižuje také kvalitní primární struktura daná vývojovou genezí půdy. Z tohoto hlediska mají nízkou odolnost těžké jílovité půdy, kyselé, zamokřené a málo humózní s primárně špatnou půdní strukturou.

Objemové změny utužované půdy působí také negativně na půdní edafon. Při utužení dochází ke snižování pórovitosti a k změnám ve vodním režimu. Aerobní mikroorganismy tak přechází do stresových podmínek ve svém životním prostoru. Se sníženou možností výměny plynů v půdě dochází k zpomalování nebo úplnému zastavení žádoucích biologických procesů. Při dlouho trvajících stresových podmínkách dochází následně k odumírání organismů a k obměně osazení uvolněného životního prostoru např. patogenními mikroorganismy (Šarapatka, 2002; Šimon et al., 1989; Lhotský, 1994; Hůla 2008; Šantrůčková 2001).

## 1.14 Půdní pórovitost

V části objemu půdy se vyskytují meziprostory nezaplňené tuhou fází. Meziprostory jsou nazývány půdními póry. Tyto póry jsou rozdílných tvarů a velikostí a jsou mezi sebou různě propojeny. Pro zjednodušení pro praktické stanovování je zvolen předpoklad, že jsou válcového tvaru a dále charakterizovány svým průměrem. Celková pórovitost u zemědělských půd se ve svrchní vrstvě ornice pohybuje povětšinou v rozmezí 40-50 %. U silně humózních půd a rašelin může dosahovat 70-80 %. Ve spodních podorničních vrstvách klesá na 30-40 % a u půd zamokřených glejového typu i pod 30 %.

Charakter pórovitosti záleží na struktuře půdy. U půd nestrukturních, především písčítých, s volným uložením částic, jsou póry mezi jednotlivými zrny větších rozměrů, tzn., ekvivalentní průměr nabývá hodnoty přibližně 50 $\mu$ m i více. U strukturních půd tvořených půdními agregáty stmelovaných elementárních částic, jsou póry jednak mezi těmito agregáty, tzv. póry mezi-agregátové, a jednak uvnitř struktury agregátu, tzv. vnitro-agregátové póry.

Nejpříznivější půdní poměry jsou nastoleny, je-li celková pórovitost rozdělena na zastoupení mezi-agregátových pórů z 1/3 a vnitro-agregátových pórů z 2/3. Pro funkci pórů je významná jejich velikost. Jejich průměr však nelze měřit přímo, přirovnávají se proto k nepravidelným kapilárám s proměnlivým průměrem. Třídí se proto zpravidla podle druhu a velikosti sil, které působí na vodu v nich obsaženou. Jejich ekvivalentní průměr pak odpovídá průměru válcové kapiláry, ze které lze odsávat vodu shodným podtlakem. Tak lze rozdělit póry na jemné kapilární a hrubé nekapilární.

V jemných kapilárních pórech je pohyb vody řízen kapilárními silami, které vodu zadržují a umožňují její pohyb proti působení gravitační síly. Pohyb vzduchu a výměna plynů v nich je však omezená. Probíhají zde však pochody chemické, fyzikálně-chemické a biologické.

V hrubých nekapilárních pórech je pohyb vody řízen gravitačními silami, při kterých se voda volně pohybuje do spodních vrstev a uvolněný prostor zaplňuje vzduch. Významně se tedy hrubé póry podílí na výměně plynné fáze mezi půdou a atmosférou. Přejedem mezi kapilárními a nekapilárními póry jsou póry semi-kapilární. Zastoupení kapilárních, semi-kapilárních a nekapilárních pórů utvářející celkovou pórovitost se promítá do vzdušných i vodních poměrů v půdě (Šimek, 2004; Kolář, 1975; Horáček et al., 1994; Lhotský 2000).

### 1.15 Měrná a objemová hmotnost půdy

Měrná hmotnost, tj. hustota půdy, je hmotnost jednotkového objemu pevné fáze bez pórů, tedy za předpokladu dokonalého vyplnění prostoru pevnými částicemi. Měrná hmotnost závisí na složení minerálního skeletu a obsahu organické frakce. Tyto složky mají různou měrnou hmotnost, např. křemen 2,65, montmorillonit 2-2,3, humus 1-1,6 g.cm<sup>-3</sup>. Nejvíce zastoupeným nerostem v minerálním podílu většiny půd je křemen.

Hodnotu měrné hmotnosti půdy snižuje obsah humusu, naopak ji zvyšuje obsah těžkých minerálů (např. hematit 4,9-5,3 g.cm<sup>-3</sup>).

Objemová hmotnost půdy je hmotnost objemové jednotky půdy v přirozeném uložení, tj. se zastoupením pórů. Je tedy vždy nižší než hmotnost měrná. Závisí na půdních vlastnostech, jako je zrnitost, struktura, vlhkost, pórovitost, je ovlivňována i zpracováním půdy v zemědělství. Rozlišujeme objemovou hmotnost neredukovanou, tzv. volumovou s póry vyplněnými momentním obsahem vody a vzduchu a redukovanou stanovenou z hmotnosti odebraného vzorku nejčastěji pro laboratorní účely pomocí válečku o obsahu 100 cm<sup>3</sup> a vysušené při 105 °C na konstantní hmotnost.

Objemová hmotnost půdy je parametrem pro hodnocení míry utužení, tj. pedokompakce. Jako optimální hodnota redukované objemové hmotnosti je uváděna hodnota 1,2 g.cm<sup>-3</sup> pro klasické zemědělské plodiny (obilniny), pro kořenovou zeleninu ještě nižší hodnota. Při těchto hodnotách nedochází k negativnímu projevu na růstu kořenového systému rostlin (Horáček et al., 1994; Jandák, 2004; Šimek, 2003; Kolář et al., 1976)

### 1.16 Voda v půdním prostředí

Půdní voda je souhrnným označením veškeré vody a roztoků lokalizovaných pod povrchem půdy a to ve stavu kapalném, plynném i pevném. Voda v půdě rozpouští a zředňuje živiny a vytváří tzv. půdní roztoky. Voda je tedy nosičem a přemísťuje či uvolňuje živiny v půdním profilu. Rostlinám tak umožňuje přístup k těmto látkám a jejich přejímání z půdního roztoku. Nepřímo tak ovlivňuje voda výživu rostlin převážně tím, že podporuje biologickou činnost půdních mikroorganismů, které buď živiny váží, nebo uvolňují. Pro dobrou zásobenost rostlin vodou je důležitá schopnost půdy jímat vodu a zadržovat ji na delší dobu.



Tuto schopnost lze ovlivňovat především obsahem humusu v půdě. Specifikace vodního režimu v půdním profilu bývá uvozována těmito faktory:

- vlhkost půdy stanovována jako hmotnostní a objemová,
- relativní vlhkost vztahovaná k pórovitosti půdy,
- zásobní vlhkost uvádějící výšku vodního sloupce v půdním profilu,
- potenciál půdní vody uváděn jako gravitační, tlakový, osmotický a celkový jako souhrn všech vyjmenovaných,
- sací tlak (celková hydrotenze) jako součet osmotického a kapilárního sacího tlaku.

Kategorie půdní vody jsou zavedeny podle převládajícího působení sil na adsorpční, kapilární a gravitační. Základní půdní hydrolimity jsou objektivně existující rozmezí energetických kategorií půdní vody, které jsou charakterizovány hodnotami z laboratorních rozborů. Do této kategorie spadá:

- adsorpční vodní kapacita udávající maximální množství vody poutané adsorpčními silami,
- lentokapilární bod popisující takový stav vody v půdě, při kterém nastává náhlý pokles pohyblivosti kapilární vody v důsledku přerušení souvislosti kapilární vody,
- retenční vodní kapacita jako maximální množství vody, které je půda po nadměrném zavlažení schopna vlastními silami zadržet v kvazistacionárním stavu.

Ke skupině hydrolimit aplikovaných, tj. charakterizujících hygroskopicitu půdy jsou zařazovány tyto:

- monomolekulární adsorpční vodní kapacita, tj. voda vázaná v adsorpční vrstvě na povrchu půdních částic,
- číslo hygroskopicity udávající maximální množství hygroskopické vody zadržované porušeným půdním vzorkem,
- polní vodní kapacita popisující ustálený stav vlhkosti přirozeného půdního profilu,
- maximální kapilární vodní kapacita udávající množství obsažené semikapilární vody,
- maximální vodní kapacita půdy je hodnota vlhkosti při úplném zaplnění veškerých póru vodou.

Při popisování poměrů vyskytující se vody v půdním prostředí se zpravidla vychází ze stanovování a sledování vlhkosti v orničním a podorničním profilu až do hloubky projevů vzájemné závislosti půdní a podzemní vody. Obecně se v tomto profilu popisují tři základní formace:

- voda zavěšená,
- gravitační podepřená voda,
- voda vzlínající z hladiny podzemní vody (Kutílek et al., 2004; Kolář, 1975; Jandák, 2004).

### **1.17 Vzduch v půdním prostředí**

Vzdušný režim půdy úzce souvisí právě s režimem vodním, neboť množství vzduchu je nepřímo úměrné právě obsahu vody v půdě. Při dostatečném přívodu a výměně vzduch v orničním profilu kořeny rostlin intenzivně dýchají a mohou bez omezení plnit svou funkci přejímání živin. Taktéž aktivita aerobní půdní bioty není omezována ve své činnosti. Statika půdního vzduch je podmíněna schopností poutat vzduch v pórech, dynamika vzduchu se projevuje jeho pohyblivostí skrze půdní profil a výměnou se vzduchem atmosférickým. Fyzikálně stanovované parametry popisující vzdušné poměry v půdě jsou:

- vzdušná kapacita udávající obsah vzduchu v půdě při jejím nasycení kapilární vodou,
- provzdušenost jako momentní obsah vzduchu v pórech odvislá od momentní vlhkosti půdy (Pavel, 1984; Kolář, 1975; Horáček et al., 1994).

### **1.18 Tepelný režim v půdním prostředí**

Vlhkost půdy, pórovitost a provzdušenost jsou třemi důležitými činiteli ovlivňujícími tepelný režim půd. Vliv má také expozice terénu k slunečnímu záření, vegetační kryt a barva půdy. Mineralogické složení půdy má vliv minimální.

Z pohledu fyzikálně měřitelných faktorů je zvyšování teploty půdy závislé na tepelné kapacitě půdy a ta je podmíněna hodnotami měrného tepla jednotlivých složek půdy. Tepelný režim je určován kromě míry absorpce slunečního záření také hodnotou tepelné vodivosti půdy. Tepelná vodivost půdy je vyjadřována jako množství tepla protékajícího půdním tělesem o jednotkové ploše a mocnosti při jednotkovém teplotním gradientu za jednotku času.

Kombinací těchto vlivů se projevují změny záhřevnosti holé půdy takto: při expozici slunečnímu záření se suché půdy v povrchové vrstvě zahřívají rychleji, jelikož mají menší tepelnou kapacitu a odvádí teplo do spodních vrstev půdního profilu pomaleji v důsledku menší tepelné vodivosti vzduchu (oproti vodě), jehož zastoupení převládá v pórech suché půdy. Ovlhčením půdy se její záhřevnost snižuje důsledkem zvětšení tepelné kapacity a vodivosti. Se stoupající půdní vlhkostí sezrychluje odvádění tepla, které je distribuováno do stále větší plochy. U zamokřených půd je jejich záhřevnost podmíněna velkou tepelnou kapacitou obsažené vody v půdě a jejím výparem, který způsobuje odvod značného množství tepla.

Stejně tak se půdy o různé vlhkosti také ochlazují. S rostoucí vlhkostí se ochlazování zpomaluje a vysycháním zrychluje. Vlhkost půdy také omezuje teplotní výkyvy. Tento efekt je sledován v povrchových vrstvách půdy, kdežto ve spodinách je to právě naopak z důvodu pronikání teplotních výkyvů do větších hloubek za současně zvyšující se vlhkosti (Kolář, 1975; Šimek, 2005; Pavel, 1984).

## **1.19 Konzistence a technologické vlastnosti půdy**

Konzistence je soubor vlastností úzce spojených s vlhkostí půdy. Dalším ovlivňujícím faktorem je zrnitost a chemické a mineralogické složení. Pojem konzistence půdy zahrnuje síly zejména kohezní a adhezní.

### **1.19.1 Koheze půdy**

Koheze je obecným označením soudržnosti a jevů přitažlivosti mezi částicemi látek. V půdě se projevuje spojováním částic půdy ve větší celky pomocí jejich vodních obalů. Při snížené vlhkosti se tvoří pouze spojující vodní prstence na vrcholech styku částic. Koheze je tak přímo úměrná povrchovému napětí půdního vodného roztoku a nepřímo poloměru půdních částic. Protože je koheze funkcí počtu a mocnosti vodních obalů, což závisí na množství nejjemnějších koloidních částic, jsou kohezní síly vyšší ve středně těžkých a těžkých půdách, nepatrné v půdách písčitých. K této vlastnosti přispívá též plochý charakter částic ve středních a těžkých půdách oproti kulovitému tvaru částic v půdách písčitých.

Takto vznikající půdní agregáty jsou nestabilní povahy, které se při snížení vlhkosti a vysoušením půdy opět rozpadají. Jedná se tak o tzv. pseudostrukturu půdy. Trvalejší struktura vzniká pouze tehdy, dojde-li k stmelení částic půdními roztoky nebo pseudoroztoky. Půdní koloidy přispívající k stmelování částic jsou rozděleny dle cementační schopnosti na jílové částice, ireverzibilní nebo téměř ireverzibilní anorganické koloidy ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) a organické koloidy (Šimek, 2005; Jandák, 2004; Šimon et al., 1989).

### **1.19.2 Adheze půdy**

Adheze, tj. přilnavost půdy k různým materiálům, zpravidla vzrůstá s obsahem půdních koloidů a s vlhkostí. Maximální adheze se pak projevuje při vyšší vlhkosti, než je zapotřebí k dosažení maximálních kohezních sil. Různé zeminy shodné vlhkosti se projevují odlišně, právě tak stejné zeminy při různé vlhkosti.

Únosnost půdy je vyjádřena velikostí zatížení externím tlakem, při kterém se začne půda vytlačovat a rozbíhat. Přesáhne-li působící tlak mez únosnosti, nastane trvalé vytlačování půdy do stran a k propadu předmětu a jeho zabořování. Únosnost půdy velmi úzce souvisí s její momentní vlhkostí a zrnitostí. Např. vlhký jíl zpravidla bývá méně únosný než suchý ulehlý písek (Sáňka et al., 2004; Jandák, 2004).

### **1.19.3 Bobtnavost půdy**

Bobtnání a smršťování jsou projevy objemových změn za současného vlivu změny vlhkosti. Běžné zemědělské půdy obvykle obsahují určité procento jílovité frakce. Ta je tvořena minerály, které přijímají vodu do mezivrstevních prostor. Při ovlhčení takové půdy dochází k bobtnání, naopak při vysychání nastává smršťování. Při vyšším zastoupení vysoce bobtnavých jílových minerálů v půdním profilu dochází během roku vlivem klimatických podmínek k praskání vysychající půdy a k tvorbě hlubokých trhlin. Takto vzniklé praskliny a přesušená půda je následně umocňujícím faktorem vodní eroze při následných dešťových srážkách (Jandák, 2004; Pavel, 1984).

#### **1.19.4 Kornatění půdy**

Kornatění půdy se projevuje tvorbou povrchového škraloupu nebo ztvrdlé krusty na povrchu půdy po nadměrném provlhčení a následném rychlém vyschnutí. Kornatění souvisí především s nedostatkem strukturních půdních agregátů popř. s jejich malou odolností a vodostálostí. Nejméně náchylné ke kornatění jsou půdy písčité. S přibývajícím jílnatou frakcí vzrůstá i předpoklad k tvorbě povrchové krusty. K zamezení tvorby povrchové krusty přispívá trvale stabilní drobtovitá struktura půdy a krytí povrchu půdy porostem nebo jeho zastínění organickým mulčem (Richter, 1998; Kvěch et al., 1985).

#### **1.19.5 Hrudovitost půdy**

Hrudovatění půdy nastává nejčastěji při agrotechnickém zpracování půdy, tj. při orbě, podmítce, apod. Tvorba hrud je tak nežádoucím opačným pochodem k žádoucímu drobení půdy. Sklon půdy k tvorbě hrud je závislý zejména na obsahu koloidních částic, vápníku a humusu. Vliv zrnitosti a soudržnosti se projevuje tak, že písčité půdy zpravidla nemají sklon k hrudkovatění a půdy těžké slabě humózní tvoří značné množství velkých hrud při zpracování. Hlavní podmínkou pro dosažení žádoucího efektu při mechanickém zpracování půdy s drobtivým účinkem je faktor vhodné vlhkosti k agrotechnickému zásahu. K omezování sklonu půdy k hrudovatění výrazně přispívá i zvyšování obsahu půdní organické hmoty v orničním profilu (Lhotský, 1994; Mikula, 1998; Hůla, 2002).

#### **1.19.6 Rozprašování půdy**

Rozprašování půdy je znakem rozpadu nebo mechanického rozrušení strukturních půdních agregátů na jednotlivé půdní částice, hlavně prachu a nejjemnějšího písku. Stupeň rozprašování je podmíněn mírou vysychavosti půdy a intenzitou agrotechnického zpracování. Např. časté vláčení nebo smykování přeschlého povrchu půdy, či intenzivní předseťová příprava aktivními vířivými branami má tento negativní efekt. Rychlost a míra vysychání půdy je ovlivňována zrnitostí půdy, stabilitou struktury, obsahem půdní organické hmoty a vegetačním krytem. Ochranou proti rozprašování jsou všechna opatření k zvyšování stability půdní struktury a volba méně intenzivních způsobů mechanického zpracování půdy (Šimon et al., 1989; Jandák, 2004; Kvěch, 1985).

## 1.20 Fyzikální vlastnosti půd a mechanika zemin

Fyzikální vlastnosti půd představují soubor vlastností, které jsou podmíněné disperzitou elementárních půdních částic a vzájemnými vztahy mezi pevnou fází, půdním roztokem a vzduchem v půdních pórech.

Jako základní fyzikální parametry jsou uváděny tyto: zrnitost půdy, struktura půdy, měrná hmotnost půdy, objemová hmotnost a pórovitost.

Hydrofyzikální a aerační vlastnosti půd bývají stanovovány jako: vlhkost, maximální hygroskopicitu, vodní kapacita, propustnost, vzlínavost, vzdušná kapacita a provzdušenost půdy.

Teplotní vlastnosti bývají charakterizovány: tepelnou kapacitou, tepelnou vodivostí a teplotou půdy. Fyzikálně-mechanické vlastnosti půd popisují: soudržnost, přílnavost, konzistenci, vláčnost, plastičnost, bobtnavost, sedavost a orební odpor (Hraško a kol., 1988; Jandák 2004).

### 1.20.1 Definice napětí v zemině

Přenos sil a zatížení je u vícefázových látek značně složitý. Detailní zkoumání na úrovni jednotlivých zrn a jejich bezprostředního okolí prakticky není možné, i když je známo, že se každé zatížení musí v konečné fázi přenést na ploše vzájemného kontaktu pevných částic, které tvoří složitý prostorový skelet zemin.

Při řešení praktických úloh mechaniky zemin není potřeba vyšetřovat jednotlivé kontakty. Napětí v zemině je proto definováno jako síla (normálová  $N$ , tangenciální  $Q$ ) dělená plochou  $A$ , ve které tato síla působí. Předpokládá se, že normálové ( $\sigma$ ) nebo smykové ( $\tau$ ) napětí je na ploše ( $A$ ) rozděleno rovnoměrně. Tento předpoklad umožňuje v mechanice zemin využívat výsledky teoretické mechaniky odvozené pro idealizované, homogenní, souvislé prostředí, tzv. kontinuum.

Předpoklad platí vždy, pokud skutečné napětí na jednotlivých kontaktních plochách minerálních částic ještě nezapříčiňují drcení pevných zrn v zemině (Myslivec, 1948; Myslivec et al., 1970; Šimek et al., 1990; Vaníček, 1996).

### 1.20.2 Teorie porušení zemin

Příčiny porušení materiálů vysvětlují různé teorie porušení. Nejstarší, odvozená zvláště pro zeminy je Coulombova teorie porušení (Coulomb, 1736 až 1806). V souvislosti s vypracováním teorie zemních tlaků byl Coulomb nucen řešit i otázku smykové pevnosti zemin. Zjistil, že smyková pevnost zemin  $\tau_f$  není konstantou, ale závisí na velikosti normálového napětí v rovině porušení a v obecném případě má dvě složky: vnitřní tření, charakterizované úhlem vnitřního tření  $\phi$ , a soudržnost  $c$ , kterou lze definovat jako smykovou pevnost při nulovém normálovém napětí.

Při překročení smykové pevnosti zeminy se zemina začíná přetvářet, aniž by dále rostla hodnota smykového napětí (Myslivec, 1948; Myslivec et al., 1970; Šimek et al., 1990; Vaníček, 1996).

### 1.20.3 Deformační charakteristiky zemin

V praktické aplikaci mechaniky zemin lze uplatnit deformační charakteristiky teorie pružnosti, tj. modul pružnosti  $E$ , Poissonovo číslo  $\nu$  a smykový modul  $G$ . To je možné pouze v přesně definovaném rozsahu zatížení, kdy lze obecně složitější závislost mezi přetvořením a napětím nahradit Hookovým zákonem teorie pružnosti.

Složitost přetváření zemin proti jiným látkám je dána skutečností, že deformace zemin je v mnohem větší míře ovlivněna historií zatěžování, způsobem následného zatěžování a metodikou vlastní zkoušky. To jsou převážně faktory vyjadřující partikulární povahu zemin. Tedy charakterizují zeminu jako vícefázový systém zahrnující interakce mezi jednotlivými fázemi a jejich vzájemný podíl na přenosu zatížení (Myslivec, 1948; Myslivec et al., 1970; Šimek et al., 1990; Vaníček, 1996).

### 1.20.4 Přístupy a věrohodnost řešení aplikačních úloh

Geotechnické modely řešení praktických úloh jsou vždy abstraktním popisem půdně mechanických poměrů. Hlavní metodou abstrakce je schematizace složitých přírodních poměrů. V praxi tato řešení naráží na problémy určování vlastností zemin a s tím související výstižnost konstitučních vztahů. Snaha je o maximalizaci poznání přírodního prostředí, včetně poměrů hydrogeologických a změn stavu napjatosti a vliv jejich popsání a zahrnutí do výstižnosti výpočtového modelu.

Míra schematizačního zjednodušení závisí na relativní prostorové hustotě inženýrsko-geologických, hydrogeologických a speciálních geotechnických informací, na kvalitě těchto informací, na požadované přesnosti řešení, na možném měřítku modelu, na druhu řešené úlohy a na úrovni matematického aparátu pro řešení úloh tvorby abstraktních matematických modelů. V problematice modelů se proto nelze obejít bez řešení aparátu matematicko-statistických a pravděpodobnostních úloh. Každá úloha v oboru geotechniky lze řešit za použití vhodného výpočtového modelu a reálných vstupních údajů. Otázkou zůstává prioritita problému, tj. volba výpočtové metody, matematického modelu nebo vstupních dat v podobě parametrů zeminy získávaných z laboratorního zkoušení (Myslivec, 1948; Myslivec et al., 1970; Šimek et al., 1990; Vaníček, 1996).

### **1.20.5 Laboratorní zkoušení zemin**

Laboratorní zkoušky mají své výhody i nevýhody. Tyto zkoušky jsou relativně rychlé, lze je provádět ve větším počtu a opakovaně. Nevýhodou je provádění pozorování na malých vzorcích, které mohou selhávat tam, kde je třeba charakterizovat prostorové podmínky a změny. Vzorky bývají odebírány pouze z předem vytyčených míst a mohou být nežádoucím způsobem při manipulačním procesu a úpravou pro přístrojové zkoušení ovlivňovány jejich vlastnosti.

Zásada laboratorních pokusů je zkoušet vzorky reprezentativní takovým způsobem, aby byl pokud možno co nejreálněji nasimulován způsob zatěžování a přetváření zeminy v přírodě. Například předností zkoušek zemin v triaxiálním přístroji je možnost posuzovat stav napjatosti jak v totálních, tak v efektivních parametrech napětí, prognózovat tlak vody v pórech, atd. Souhrn vlastností mechanických, indexových atp., které jsou vzájemně svázány korelačními vztahy, dále slouží jako podklad pro statické výpočty (Myslivec, 1948; Myslivec et al., 1970; Šimek et al., 1990; Vaníček, 1996).

### **1.20.6 Koncepce klasických laboratorních přístrojů pro zkoušení vlastností zemin**

Základ edometru je tvořen tzv. edometrickou krabicí v podobě tuhého válcového prstence, který při zatížení vzorku zamezuje vybočení zeminy do stran. Do prstence se půdní vzorek buď přetlačí z odběrného válce, nebo se zemina zhutňuje přímo v prstenci. Zemina je následně shora a zespodu obklopena filtračními destičkami, které umožňují průchod vody oběma směry.



Zatěžování vzorku je realizováno pístem, který je konstruován tak aby nebyl veden, tedy tak aby se mohl případně naklánět. Dno pístu je mírně kónické a horní filtrační destička je do něj zapuštěna tak, aby byla zaručena co největší rovnost plochy pístu.

Celý vzorek může být chráněn plexisklem pro udržování požadovaného mikroklimatu. Od okamžiku zatížení se registruje deformace vzorku jako funkce času. Pro získávání charakteru plynulých závislostí mezi efektivním zatížením a deformací jsou preferovány zkoušky s plynulým zatěžováním. Zeminy se tedy přetvářejí v závislosti na napětí, deformaci a čase podle tzv. stavových konstitučních rovnic, které vyjadřují jejich reologické vlastnosti. Pro modely jsou zaváděny pojmy jako ideálně pružná, ideálně plastická a ideálně vazká látka.

Klasický triaxiální smykový přístroj umožňuje zkoušet vzorky zemin v osově symetrickém stavu. Vzorky mají tvar válce a je dodržován poměr výšky k průměru 2 : 1. Vzorek je osazen na pohyblivém pístu, který se i se vzorkem pohybuje proti snímači síly umístěnému uvnitř těsné komory. Pohyb je vyvoláván přiváděným hydrostatickým tlakem do tlakové komory pod pístem.

Přístroj tedy umožňuje zatěžování vzorku za osově symetrické napjatosti s řízenými drahami napětí, tím umožňuje zatěžování podle předem zvoleného nárůstu hlavních napětí. Stroj sestává z několika základních součástí: zdroje tlaku pro stabilizaci i plynulé ovládní komorového tlaku a tlaku pod pístem, snímače svislé síly působící na vzorek, snímače deformace pro stanovení svislého přetváření vzorku, měřidla objemových změn vzorku a snímače tlaku vody v pórech. Podrobným popisem triaxiálních přístrojů se zabývá *Bishop a Henkel (1962)* a *Wesley (1975)*.

### **1.21 Výpočetní metody v mechanice zemin**

K výpočtu napjatosti zemin se reálná zemina nahrazuje matematickým modelem poloprostoru s různými mechanickými vlastnostmi. Čím menší počet mechanických parametrů je do výpočtu zahrnut, tím je sice výpočet jednodušší, ale tím větší vzniká riziko úchylnosti od popisu skutečnosti. S rostoucím množstvím parametrů např. anizotropního poloprostoru se zvyšuje složitost výpočtu i možnost reálného měření těchto parametrů.

Výpočty napjatosti lze kvalifikovat z matematického hlediska podle toho, v jaké formě je výsledek podáván. V uzavřené formě by se jednalo např. o pružný poloprostor, ve formě neuzavřené např. o numerické metody. Výpočetní model může být v napjatosti totální nebo efektivní.

Předpokladem je, že totální napětí se v poloprostoru šíří nekonečně rychle. Efektivní napětí je závislé na čase a tuto závislost způsobuje neutrální napětí, neboť objemové změny nasycené zeminy způsobené zatížením vyvolávají v pórech tzv. nestacionární filtrační pole.

Výpočetní modely představují velmi širokou skupinu s rozdílnými návrhy na matematickou úroveň řešení. Rozdělené jsou nejčastěji do tří skupin: přibližná řešení, přímá řešení a numerické modely.

Přibližná řešení zahrnují postupy, které vystihují fyzikální podstatu úlohy jen v hlavních rysech. Jde např. o rovnice v normách pro výpočet tzv. jednodimenzionálního sedání půd, kde je uvažováno pouze svislé normálové napětí. Jedná se také o pragmatické modely, ve kterých jsou fyzikální nedokonalosti nahrazovány empiricky upravenými vstupními daty nebo upravují výsledky rovnic sedání, únosnosti atd.

Přímá řešení zahrnují analytické postupy, které řeší fyzikální model matematicky korektně. Jedná se o úlohy aplikací pružného poloprostoru pro různá zatížení. Řešení úloh jsou korektní z hlediska matematických postupů a teoretické mechaniky. To však nemusí platit z hlediska geomechaniky. Nemodelují tedy přesné chování zemin a interakcí v nich.

Numerické metody jsou používány při řešení složitých okrajových podmínek a při složitých matematických formulacích úloh. Nejčastěji je v tomto směru uplatňována metoda konečných prvků FEM (Finite Element Method) a metoda hraničních prvků BEM (Boundary element method).

Metoda FEM je stále jednou z nejučinnějších variačních metod v souvislosti s rozvojem numerických modelů. Z názvu metody vyplývá, že sledované těleso je rozděleno na konečné prvky. To umožňuje zavést do modelů vlivy technologie, reziduální napětí, opakovaná zatížení, nelinearitu, nehomogenitu a anizotropii reálných půd.

Nevýhodou zůstává problém určení relevantních vstupních dat. Prognózy stanovované metodou konečných prvků totiž nemohou být přesnější než vlastní vstupní data použitá pro daný modelový výpočet.

Při použití metody BEM je diskretizací pouze hranice řešení oblasti, čímž se dosáhne zmenšení počtu vstupních dat, rozsáhlosti výsledné soustavy rovnic i vyšší přesnosti řešení. Postup spočívá v transformaci základních diferenciálních rovnic na rovnice integrální, vyjadřující vztahy jen mezi veličinami na hranici systému. Další výhodou je modelování nekonečných oblastí a přesné řešení uvnitř oblasti i v místech koncentrovaných napětí (Myslivec, 1948; Myslivec et al., 1970; Šimek et al., 1990; Vaníček, 1996).

V simulačním programu COMSOL Multiphysics je používána jako výchozí výpočetní rovnice pro definici teorie plastické deformace půdy tato:

$$F_y = q^2 + M^2 (p - p_c) p = 0$$

Kde:

- $q$  a  $p$  jsou invarianty modelu Cam-Clay vyjadřující hodnotu napětí půd,
- $M$  je parametr poměru os elipsy vznikající průmětem funkce  $F_y$  v prostoru  $p - q$ ,
- $p_c$  udává hodnotu prekonsolidačního tlaku (Humusoft, 2018).

## 2 Přehled zahraniční výzkumné činnosti

V této kapitole bude uvedeno několik vybraných výzkumných prací ze zahraničí, publikovaných v renomovaných vědeckých časopisech a odborné zahraniční literatuře. Práce byly vybrány z hlediska aktuálnosti a zajímavosti pokusných metod a inovativních postupů řešení problematiky půdní mechaniky a fyzikálních vlastností ve vztahu k využívání metod počítačových modelů.

### 2.1 Numerické modelování zhutnění půdy za použití metody konečných prvků.

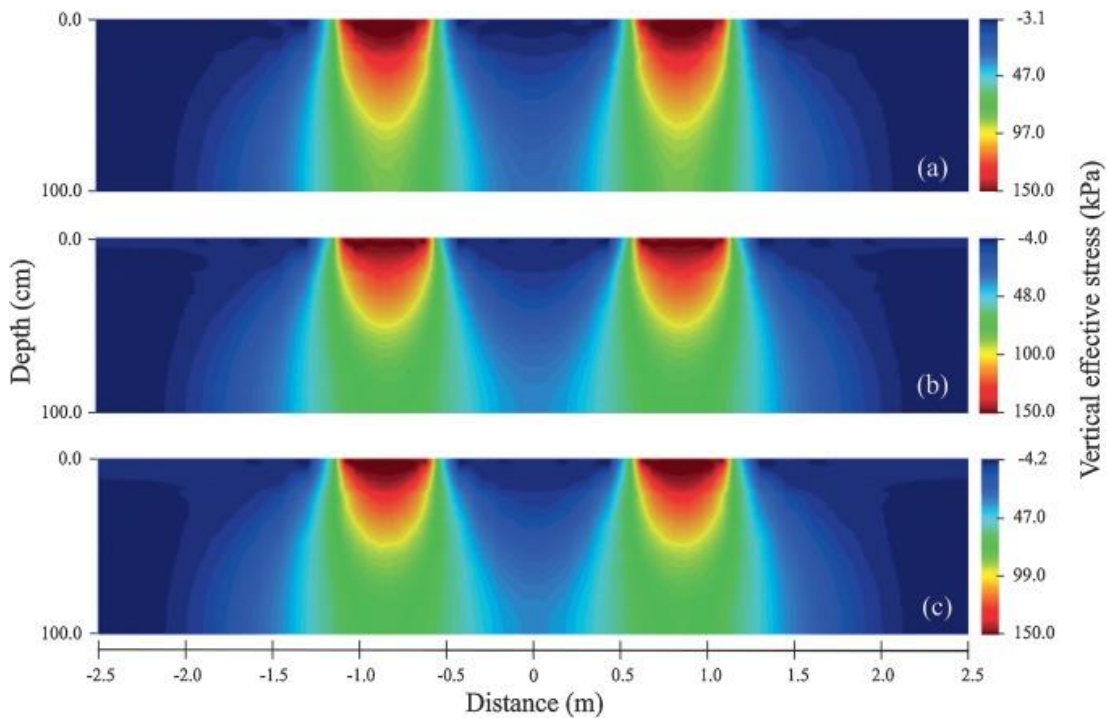
Numerické simulace umožňují tvorbu modelů průběhu zhutňování půdy v důsledku pojezdu zemědělské techniky. Numerická simulace umožňuje modelování pomocí zobrazení změn primárního utužení půdy v závislosti na působení vnějších sil namáhání. Simulace byla provedena metodou FEM (Finite Element Method). Vstupní data zhutnění byla zaznamenávána z půdního profilu 0 až 1000 mm v několika úrovněových intervalech.

V číselné analýze byl použit tzv. modifikovaný elastoplastický konstituční modul (Modified Cam Clay elastoplastic constitutive model). Odebrané půdní vzorky byly podrobeny oedometrickým testům a výsledky byly použity ve škálách vlhkosti 10, 15 a 20 %. Prostřednictvím prekonsolidačního půdního napětí, bylo možné identifikovat oblasti, kde dochází ke zhutňování půdního profilu.

S ohledem na vlhkost bylo zjištěno, že půda o vyšší vlhkosti snáze šíří silové napětí do hlubších vrstev půdního profilu kde následně způsobuje utužení. Intenzita zjišťovaného zhutnění je vysvětlována nízkou odolností půdy proti působícímu zatížení v důsledku její agrotechnické přípravy pro pěstovanou plodinu.

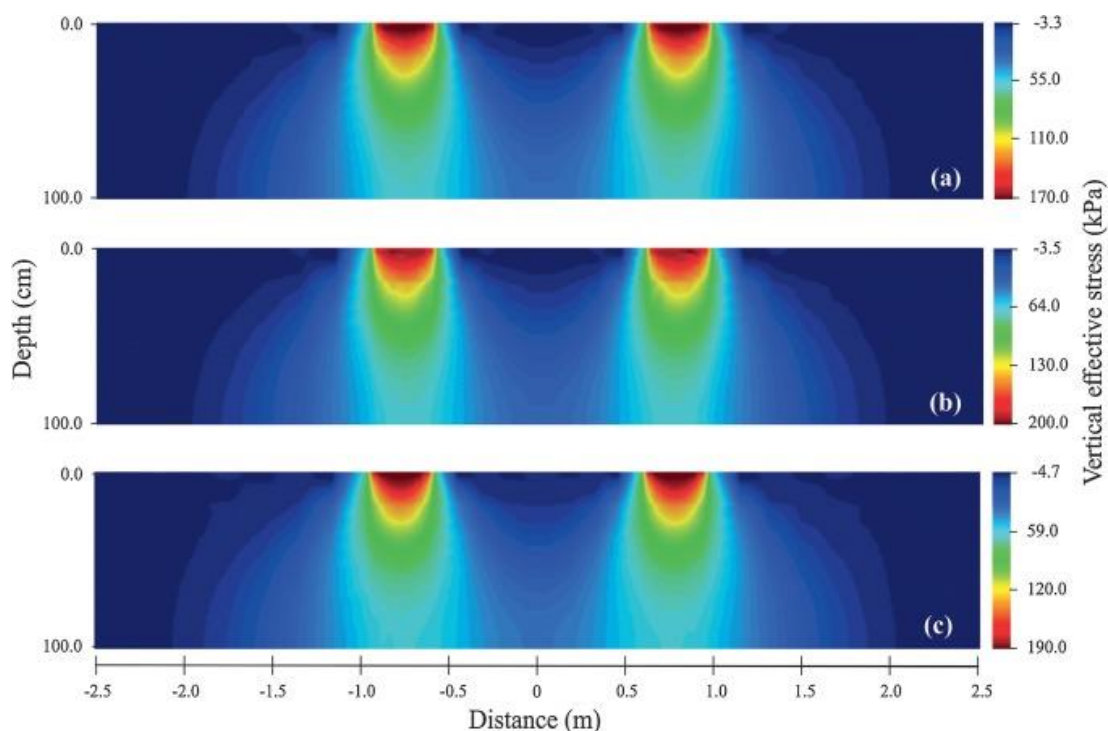
Cílem výzkumné práce (*Raguiara, P. Silva et al., 2018*) bylo vyhodnotit mechanické chování zemědělské půdy po zatížení povrchu provozem zemědělské techniky pro pěstování cukrové třtiny. Výše zmiňovaná metoda FEM byla vyvinuta a aplikována pro získání dat rozložení půdního napětí a zobrazení oblastí zhutnění v reálných podmínkách výrobního provozu. Tak bylo možné zobrazit zátěžová pole vznikající pod styčnými plochami pojezdových pneumatik a jejich působení v půdním profilu. Elastoplastická analýza tak měla za cíl objasnit vliv pojezdu daného zemědělského vozidla na utužení půdy a to při různé vlhkosti půdy.

Koncentrace vertikálního namáhání se objevila nejvyšší v oblasti těsně pod pneumatikami, zejména v povrchové vrstvě v mocnosti 0 - 200 mm. Zobrazené pole s barevně rozlišenými úrovněmi tlaku působícího utužení se rozprostíralo až do hloubky 1000 mm. Při kontaktu zadních pneumatik traktoru (MF 650 4x4) s půdou bylo dosaženo kontaktního tlaku 150 kPa u všech vlhkostí (A: vlhkost 10 %, B: vlhkost 15 %, C: vlhkost 20 %). Přední pneumatiky vykazovaly kontaktní tlak vyšší, různící se s ohledem na vlhkost půdy.



Obrázek 2.1: Model rozložení vertikálního tlaku přenášeného zadními pneumatikami traktoru MF650 (Raguiara, P. Silva et al., 2018)

Vertikální půdní stres způsobující utužení se zvyšoval s rostoucí půdní vlhkostí a to bez ohledu na typ zemědělské mechanizace působící na povrch půdy. Rozložení vertikálních napětí v suchých a velmi tvrdých půdách je více horizontálním směrem v půdním profilu. Podle Kellera a Arvidssona (2004) je přínosem použití tzv. dvoumontáží pro rozložení kontaktního tlaku ve větší ploše při zachování hmotnosti stroje, což snižuje riziko zhutnění půdy. V kontrastu s tím je však předpoklad, že při použití dvoumontáží pojezdových pneumatik je sice redukován kontaktní tlak, nicméně potenciálně je tak utužována větší plocha.



Obrázek 2.2: Model rozložení vertikálního tlaku přenášeného předními pneumatikami traktoru MF650 (Raguiara, P. Silva et al., 2018)

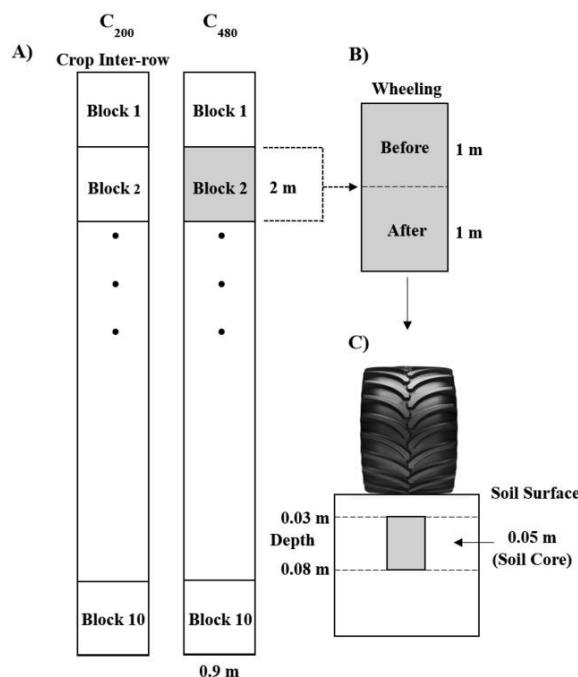
Numerická simulace umožnila nový přístup k zobrazení utužení a rozložení napětí v půdním profilu při přejezdu zemědělské techniky. Takovéto zobrazení definuje hloubku působení, velikost tlaku a jeho prostorové rozložení pod kontaktní plochou pneumatik. Tlakové zatížení půdy přenášené při pojezdu zemědělské techniky bylo až do úrovně 200 mm blízké hodnotám kontaktního tlaku. Hluběji do půdního profilu bylo následně rozptylováno a tlumeno viz modelová zobrazení.

## 2.2 Změny ukazatelů utužení půdy v reakci na pojezd zemědělské techniky

V práci (Renato, P. de Lima et al., 2017) byl zkoumán vliv pojezdů techniky po zemědělské půdě. Kromě měření objemové hmotnosti půdy bývá utužení obvykle vztahováno k změnám pórovitosti a odolnosti proti penetraci. Důsledky pojezdu zemědělské techniky na změnu utužení půdy byly zkoumány za účelem kvantifikace okamžitých dopadů přejezdu na stupeň utužení, změnu penetrometrického odporu a velikost kapilárního sacího tlaku půdní matrix.

Toto bylo sledováno za účelem vyhodnotit chování těchto proměnných a jejich využití jako indikátorů změn, ke kterým po přejezdech techniky následně v půdním prostředí dochází. Byly provedeny dva zkušební pokusy na dvou různých půdách, a to na půdě písčitojílavité ( $200 \text{ g.kg}^{-1}$  jílu) a jílovité ( $480 \text{ g.kg}^{-1}$  jílu).

Koncept pokusu byl sestaven takto: po sklizené kukuřici na obou pozemcích ( $C_{200}$  – písčitojílovitá půda;  $C_{480}$  – jílovitá půda) byl v nepoježděném mezířádku vytyčen úsek o délce 20 m a šířce 0,9 m. Tento úsek byl dále rozdělen na 10 bloků po dvou metrech (schéma A). Každý blok pak obsahoval dva sub-bloky o ploše  $1 \text{ m}^2$ , který byl použit pro vzorkování před a po pojezdu zemědělské techniky (schéma B). Odebráno bylo 10 vzorků od obou variant. Utužení půdy jedním pojezdem bylo provedeno koly levé strany sklizeče kukuřice John Deere Hydro 1175®.



Obrázek 2.3: Schematický plán pokusných parcel a umístění půdních sond (Renato, P. de Lima et al., 2017)

Odběr vzorků byl realizován metodou tzv. cylindrických půdních jader (soil core sampling method) spočívající v umístění kovových válcových přípravků o rozměrech 0,05 m v průměru a 0,05 m vysokých do půdního profilu v hloubce 0,03- 0,08 m (schéma C). Po zatížení vzorků byly tyto vyjmuty z půdního profilu, konzervovány k zamezení změny vlhkosti a transportovány k laboratorním analýzám. Zde byl zjišťován penetrometrický odpor (značen PR – soil penetration resistance [MPa]), kapilární sací tlak (parametr  $h$  - matric suction [hPa]), objemová hmotnost (značena BD [ $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]) a maximální hustota půdy porušených půdních vzorků tzv. Proctorovým testem (značena BDmax – maximum soil bulk density [ $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]).

Vyhodnocení dat z laboratorních analýz provedli za podpory dvourozměrné statistické analýzy variability ANOVA (A two-way analysis of variance). Tento model byl použit k testování rozdílů v navolených proměnných faktorech před a po zatížení povrchu půdy pojezdem techniky. Navazující statistické propočty byly provedeny za podpory R software (R Core Team, 2016). Charakterizace půdní deprese byla dále modelována v simulačním programu SoilFlex (Keller et al., 2007) za použití technických parametrů stroje John Deere Hydro 1175® (viz. Tabulka 2.1: Machinery parameters).

Tabulka 2.1: Technická specifikace parametrů použité mechanizace John Deere Hydro 1175® (Renato, P. de Lima et al., 2017)

Machinery parameters	Symbol [unit]	Tyre	
		Front	Rear
Tyre inflation pressure	$p_{\text{tyre}}$ [kPa]	190	140
Recommended inflation pressure	$p_{\text{tyreR}}$ [kPa]	180	183
Tyre diameter	$T_d$ [m]	1.64	1.16
Tyre width	$T_w$ [m]	0.72	0.32
Wheel load	$W_i$ [kg]	4410	1100

Po simulaci přejezdu se utužení projevilo různou měrou, ovšem stupeň utužení byl vyšší u půdy jílovité. Struktura půdy ovlivňovala po utužení chování penetrometrického odporu a kapilární sací tlak. S nárůstem podílu jílovité frakce půdních částic se snižovaly účinky tření mezi půdními částicemi a změna v penetračním odporu tak nebyla výrazně odlišná ani při zhutnění půdy.



Redukce půdní pórovitosti v návaznosti na utužení způsobila také změnu rozložení a velikosti pórů a jejich míry nasycení vodním roztokem a tím snížila vodní retenční kapacitu půdního profilu. Prokázalo se, že půda s označením C<sub>480</sub> byla více stlačitelná než půda C<sub>200</sub> a to za vlhkostních poměrů blízkých polní retenční kapacitě. Kromě struktury také vlhkost půdy značně ovlivňuje její únosnost v závislosti na zrnitostním složení. Jako únosnější byla vyhodnocena půda C<sub>200</sub> s vyšším obsahem písčitých částic (Severiano et al., 2013).

### 2.3 Porovnání míry půdního utužení při použití pneumatik a pásů na pojezdovém ústrojí zemědělských strojů

Cílem výzkumné práce (Ansorge, D. et al., 2007) bylo popsat relativní efekt působení gumových pojezdových pásů a kol s pneumatickými pláštěmi při simulovaném zatížení nápravy 9-12 tun. Fyzikální parametry změn provázející půdní utužení byly sledovány v kontrolovaných laboratorních podmínkách. Sledování půdního utužení bylo vztaženo k měření pohybu půdy ve sledovaném profilu, změnám hustoty půdy a k hodnotám penetrometrického odporu. Na obrázku je zdokumentován použitý zkušební stroj k simulaci zatížení půdního povrchu.



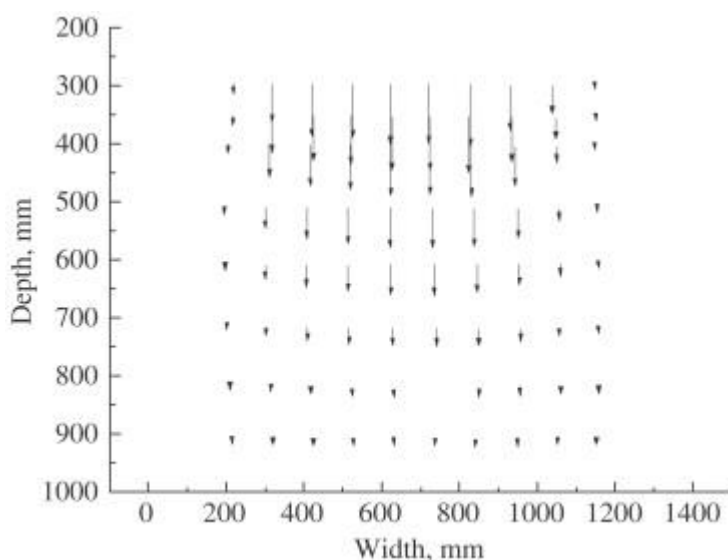
Obrázek 2.4: Zkušební laboratorní přístroj simulující přejezdy zemědělské techniky (Ansorge, D. et al., 2007)

Koncept snímání dat byl inspirován neinvazivní technikou detekující změnu polohy půdy v prostoru a změnu efektivní hustoty půdy v profilu zkušební dráhy (Trein, 1995). Realizace měření spočívala v umístění pásků práškového masteku (tzv. talcum powder lines) do profilu zkušebního žlabu při jeho plnění půdou a hodnoty byly zaznamenávány po každé simulaci přejezdu. Žlab byl dlouhý 20 m, široký 1,8 m, hluboký 1 m a plněn byl písčitou hlínou (Cotterham series).

Ve vertikálním řezu vystupovali zakomponované pásky masteku v půdním profilu jako koordinační body. Pozice koordinačních bodů v řezu byla analyzována digitalizovaným výstupem ze dvou strunových snímačů polohy (tzv. drawstring transducers). Z délky každé struny a vzdálenosti mezi snímači byla dopočtena vertikální i horizontální poloha každého koordinačního bodu. Data z měření byla znázorněna implementací do imaginárního řezu zkušební půdním profilem za podpory tisku CAD plotteru a měření pozice koordinačních bodů pomocí strunových snímačů polohy.

Reálná pozice bodů tak byla známá a mohla být porovnána s polohou vypočítávanou. Možnost tohoto porovnání ukázala, že pozice každého individuálního bodu je výpočtem stanovena s přesností  $\pm 2$  mm v horizontálním směru a ve vertikální rovině s přesností  $\pm 0,5$  mm.

Finálním spojením dat před a po zatížení vzorku ve zkušební dráze vznikl vektorový diagram zachycující pohyb koordinačních bodů v půdním profilu, viz graf odpovídající přejezdu specifikované pneumatiky (800 mm / 10.5 t / 2.5 bar). Sestavena byla také rovnice parametru udávajícího přímo míru relativního navýšení objemové hmotnosti půdy způsobené vertikálním pohybem půdy při zatížení jejího povrchu.



Obrázek 2.5: Vektorový diagram posunu půdy po simulovaném přejezdu (Ansorge, D. et al., 2007)

Změny fyzikálních parametrů půdy vztahovaných k míře půdního utužení jsou ovlivňovány nejen hmotností zemědělského stroje pohybujícího se po poli ale také distribucí přenášeného zatížení v kontaktní ploše pojezdového ústrojí.

Hlavní výhodou podvozkového systému pojezdových gumových pásů v porovnání s konvenčními pneumatikami je redukce povrchového propadu a téměř o 40 % nižší posun půdy v aktivním orničním profilu. Původní objemová hmotnost půdy se tak navýšila po přejezdu pásu o 13 %, po přejezdu pneumatiky o 18 %. Pojezdem pásového podvozku se sice zvýšil penetrometrický odpor v povrchové vrstvě do 20 cm, nicméně značně snížený byl vliv na podorniční vrstvu od hloubky 50 cm.

Z agrotechnického pohledu je tedy méně náročné vhodným kultivačním zákrokem odstranit vzniklé povrchové utužení při použití pásového pojezdového ústrojí než odstraňovat utužené vrstvy v podorničí způsobované pojezdem strojů osazených pneumatikami. Snížení hustícího tlaku v pneumatikách z hodnoty 2,5 bar na 1,25 bar signifikantně snížilo hodnoty penetrometrického odporu, hloubku povrchového propadu a sub povrchový posun půdy. Ve výsledku to znamenalo snížení hodnoty objemové hmotnosti půdy po přejezdu z 18 % při huštění 2,5 bar na hodnotu 12 % při huštění 1,25 bar.

#### **2.4 Posouzení rizik půdního utužení; porovnání vlivu pásových a kolových podvozků**

Cílem studie (*Lamandé, M. et al., 2018*) bylo experimentálně testovat použití pásových a kolových podvozků zemědělských strojů jako možnost technického řešení zvětšení kontaktní plochy přenášející zatížení na půdu, redukce velikosti kontaktních tlaků a porovnání efektu pojezdů techniky na fyzikální vlastnosti půd v závislosti na typu podvozku.

Měření kontaktních tlaků probíhala u plně naloženého sklízecího stroje pro cukrovou řepu vybaveného oběma typy podvozku, tj. kolový a pásový, a to v realistických podmínkách běžného polního provozu. Celkem bylo použito 17 tlakových snímačů instalovaných do půdního profilu. Sledována byla také změna redukované objemové hmotnosti a kapilární propustnost vzduchu v hloubce 0,35 m.

Cílové bylo srovnání rozložení tlaku v kontaktní ploše obou typů pojezdového ústrojí a jeho projevy ve vrstvách půdního profilu, zvláště pak potenciální vliv na utužení podorničních vrstev.

Měřena byla distribuce vertikálního tlaku v rozhraní mezi půdním povrchem a pojezdovým ústrojím sklízecí cukrové řepy metodou, kterou rozpracoval Schjønning et al. (2008). Dva identické sklízecí řepy byly osazeny každý jedním druhem pojezdového ústrojí, tj. nízkotlakými flotačními pneumatikami (1050/50R32) a pásovými podvozky (0,92 m×1,325 m; koncepce s předním a zadním hlavním vodícím kolem a dvěma podpěrnými válečky). V trase polního pokusu bylo umístěno celkem 17 tlakových senzorů do hloubky 0,1 m a překryto volně uloženou ornicí. Pojezdová rychlost stroje při pokusu byla 1,6 km.h<sup>-1</sup> a stroj v každé stopě projel postupně čtyřikrát a to ve třech opakováních.



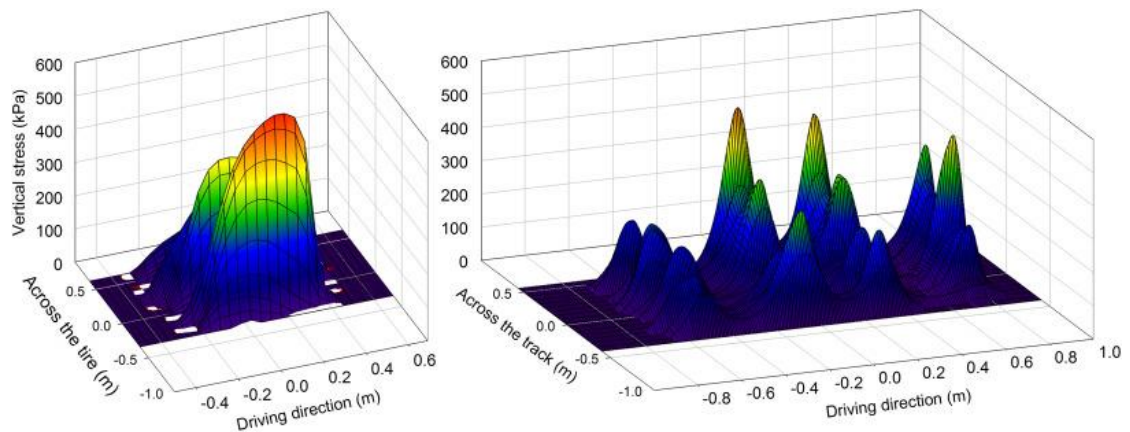
Obrázek 2.6: Postup při polním měření distribuce vertikálního zatížení půdního povrchu v závislosti na druhu podvozku (Lamandé, M. et al., 2018)

Z dráhy pojezdu a z okrajových poloh vně dráhy byly odebrány neporušené půdní vzorky z hloubky 0,13–0,17 m a 0,33–0,37 pomocí odběrových kovových válečků o objemu 100 cm<sup>3</sup> a vzorky byly podrobeny fyzikálním a mechanickým zkouškám zemin (Koolen, 1974; Schjønning, 1991; Lamandé et al., 2017; Iversen et al., 2001). Koheze a úhel vnitřního tření byl vypočten za pomoci Mohr- Coulombova modelu s využitím normálového napětí jako efektivního. Vertikální napětí v půdním profilu bylo vypočteno využitím Söhneho sumační procedury (Söhne, 1953) založené na modelu řešení problému přenosu zatížení z koncentrované normálové síly do izotropního poloprostoru, který vyvinul Boussinesq (1885).

Mechanické a fyzikální vlastnosti podvozků, počet přejezdů a vzájemné interakce byly testovány pro kontaktní plochu přenosu zatížení, střední kontaktní tlak a maximální vertikální napětí v hloubce 0,35 m. Žádná z těchto proměnných nesledovala trend normálního rozložení, proto byla aplikována výpočetní metoda ANOVA (Kruskal-Wallis test). Vliv podvozku na redukovanou objemovou hmotnost půdy a vzdušnou propustnost byl touto metodou také testován. Pro všechny modelové výpočty byl použit program R (R Development Core Team, 2005).

Distribuce napětí pod pneumatikovým podvozkem vykazovala několik vrcholů v šířce stopy otisku a maximální hodnota pak byla zaznamenávána ve středu jízdní dráhy (Gysi et al., 2001; Way a Kishimoto, 2004; Keller, 2005). Rozložení zatížení pod pásovým ústrojím vykazovalo špičková napětí pod každým vodícím kolem a podpěrnými kladkami (Blunden et al., 1944; Keller et al., 2002; Arvidsson et al., 2011). Pro napnutí gumového pásu byl použit hydraulický tlak 110 bar, což očividně nestačilo k zajištění rovnoměrného rozložení kontaktního tlaku.

Existují různá technická řešení konstrukcí a napínání pásových podvozků, nicméně všechny studie poukazují na nerovnoměrnost rozložení těchto kontaktních napětí. Zdá se, že od roku 1990 se konstrukční vývoj s tímto problémem nedokázal vypořádat.



Obrázek 2.7: Příklady zobrazení naměřených dat rozložení vertikálního tlaku pod pneumatikou - vlevo a pásem - vpravo (Lamandé, M. et al., 2018)

Jak bylo očekáváno, využití pásového podvozku mělo za následek zvětšení kontaktní plochy a v návaznosti snížení úrovně vertikálního napětí přenášeného do půdního profilu. Nicméně přejezdy pásu vykazovaly vliv na porušení systému půdních pórů a tím snižovali provzdušení půdního profilu, což se u pneumatik neprokázalo.

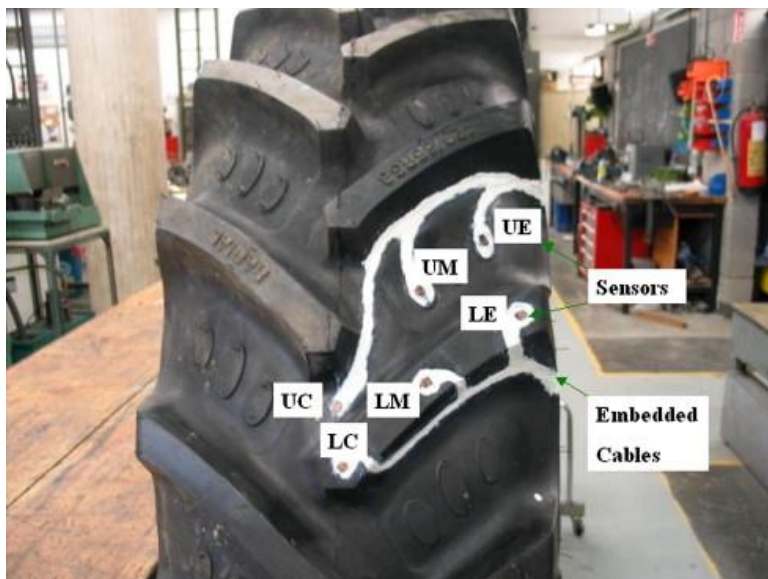
Tento jev může být důsledkem vyšší smykové síly způsobující napěťové špičky pod vodícími koly a napínacími kladkami, které následkem toho vykazují efekt několikanásobných přejezdů. Podle experimentálních výsledků této studie by posouzení rizika půdního utužení nemělo být založeno pouze na monitorování maximálního vertikálního zatížení, ale mělo by být rozšiřováno i o účinky smykových sil působících nejen v mělké podorniční vrstvě půdního profilu.

## **2.5 Výčet základních parametrů půd užívaných v počítačových modelech a simulacích.**

Převážná většina simulačních počítačových programů pro modelování utužení a rozložení napětí v půdním profilu (SoilFlex, COMSOL, SOCOMO, R- software atp.) vyžaduje základní soubor faktorů. Tento soubor lze rozdělit na tři základní okruhy prakticky vždy vyžadovaných faktorů.

První určuje a popisuje mechanické a fyzikální vlastnosti půdy, druhý specifikuje působení a přenos externího zatížení, třetí zahrnuje matematický aparát zpracování dat z předchozích dvou souborů. Dále je uveden výčet základních parametrů z první skupiny. Formát pojmenování faktorů v anglickém jazyce je zachován vzhledem k jazykové vybavenosti uživatelského rozhraní převážné většiny simulačních programů.

Pořizování primárních vstupních dat bývá realizováno při výzkumné činnosti rozličnými pokusnými metodami za podpory moderních elektrotechnických přístrojů. Příkladem by mohl být systém pro snímání kontaktního tlaku instalovaný přímo na pojezdové pneumatice, viz obrázek 2.8 (*Mohsenimanesh, A. et al.;2010*), a pro účely zaznamenávání změn v půdním profilu právě při působení externího zatížení půdního povrchu je zajímavý např. koncept použití půdních snímačů napětí (tzv. strain transducers) viz obrázek 2.9 (*Shahgholi, G. et al.;2015*).



Obrázek 2.8: Rozmístění snímačů inzerovaných přímo do pojezdové pneumatiky (Mohsenimanesh, A. et al.;2010)



Obrázek 2.9: Umístění půdních snímačů napětí ve směru podélném, horizontálním a vertikálním (Shahgholi, G. et al.;2015)



Tabulka 2.2: Výčet parametrů půd užívaných v simulačních modelech:

Značení	Veličina	Jednotky
$z$	soil depth	m
$\sigma_a$	applied stress	kPa
$E$	Young's modulus of elasticity	kPa
$G$	shear modulus	kPa
$c$	cohesion	kPa
$\tau$	shear stress	kPa
$\rho$	bulk density	Mg.m <sup>-3</sup>
$\mu$	Poisson's ratio	–
$\varepsilon_s$	shear strain	–
$\kappa$	recompression or swelling index	kPa <sup>-1</sup>
$\varphi$	angle of internal friction	°
$C_c$	compression index	Mg.m <sup>-3</sup> .kPa <sup>-1</sup>
$j_i$	shear displacement	cm
$N$	specific volume at a mean normal stress of 1 kPa	–
$p$	mean normal stress	kPa
$q_f$	failure deviator stress	kPa
$S_1$	desired degree of saturation	%
$S_k$	desired saturation at a reference stress	%
$\varepsilon_n$	natural volumetric strain	–
$\varepsilon_v$	volumetric strain	–
$\varepsilon_z$	vertical strain	–
$\Delta_T$	slope of bulk density versus degree of water saturation curve	–
$\kappa'$	slope of the steeper recompression line	kPa <sup>-1</sup>
$\lambda_n$	compression index	kPa <sup>-1</sup>
$\zeta$	concentration factor	–
$\rho_k$	reference bulk density	Mg.m <sup>-3</sup>
$\rho_s$	density of solids	Mg.m <sup>-3</sup>
$\rho_0$	initial bulk density	Mg.m <sup>-3</sup>
$\sigma$	normal stress	kPa
$\sigma_k$	reference stress	kPa
$\sigma_r$	radial normal stress	kPa
$n$	initial porosity	–



### **3 Metodika měření**

#### **3.1 Teoretický úvod do měření**

Půda představuje velmi složitý několikafázový a dynamicky proměnný systém, na který v přirozeném prostředí působí mnoho externích vlivů. Pro laboratorní podmínky zkoumání je potřeba definovat relevantní vlivy, které na půdu působí a mohou v tomto systému vyvolávat jisté změny. Popisem vlastností půd se zabývá vědní obor Pedologie. Z mnoha faktorů klimatických ale i antropogenních byl vybrán soubor vlivů, které bylo možno simulovat v laboratorních podmínkách. Kritéria výběru byla taková, aby vzájemné vazby činitelů bylo možné jistě definovat, popsat, nasimulovat a zhodnotit jejich vliv na vzorek.

V přirozeném půdním prostředí však tyto vlivy nepůsobí jednotlivě nebo odděleně ale spolupůsobí a ovlivňují půdní prostředí. Proto byla potřeba koncipovat pokusné laboratorní měření tak, aby bylo možné definovat faktory působení samostatně a následně vyhodnotit i jejich vzájemné působení. Kombinace základních faktorů byly navrženy takovým způsobem, aby jejich vzájemné působení ovlivňovalo takové vlastnosti půdy, které by mohly být užity pro praktické sledování v zemědělské provozní praxi.

#### **3.2 Stanovení cíle měření**

Cílem měření bylo prokázat a popsat vlivy obsahu půdní organické hmoty na vybrané technologické vlastnosti půdy vztažené k intenzivní zemědělské výrobě a změny, ke kterým dochází v půdním prostředí. Z mnoha faktorů byla snaha vybrat pouze ty, které by mohli mít vliv na produkční schopnosti půd a jejich obhospodařování s využíváním zemědělské mechanizace.

V získaných datech měření byly vyhledávány vztahy mezi jednotlivými sledovanými faktory a jejich vzájemné závislosti popř. vlivy na sledované vlastnosti půdního vzorku. Důvodem k navržení praktického laboratorního pokusu byl prokazatelně stále se zvyšující negativní dopad intenzivního zemědělství na půdní fond a životní prostředí.

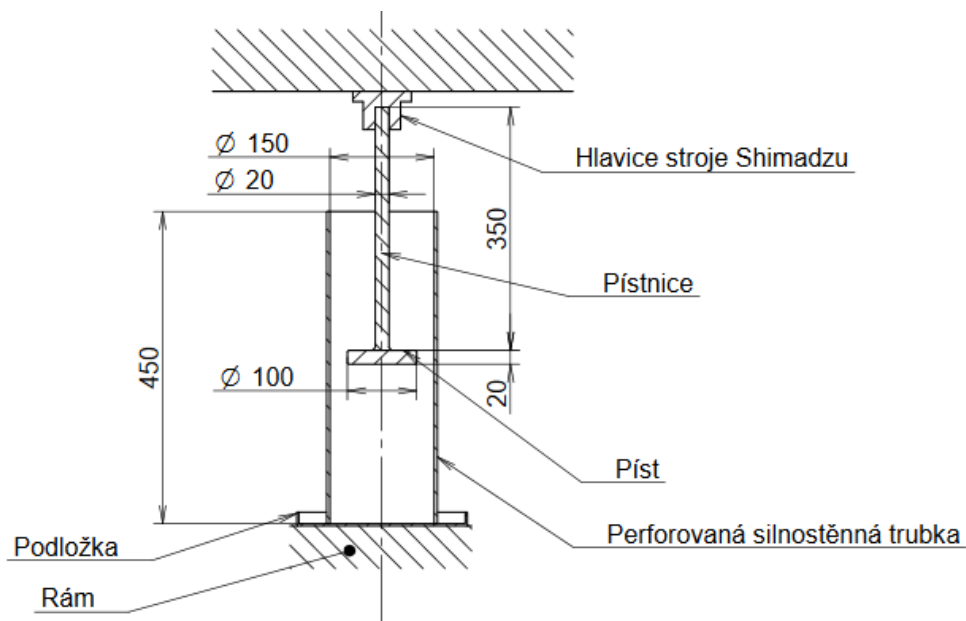
### 3.3 Metodický postup měření

Pro získání a odebrání porušeného půdního vzorku ke zkoumání byl vytipován pozemek silně ohrožený vodní a větrnou erozí půdy. Toto kritérium bylo zvoleno z důvodů negativních vlivů eroze na půdu, zejména vztaženo k snižování obsahu půdní organické hmoty a všem výše popisovaným následkům.

Odebrání vzorku proběhlo z celé hloubky orničního profilu na několika místech z důvodu vytvoření reprezentativního vzorku. Všechny odběry byly následně homogenizovány a uloženy do prodyšného pytle, kde byl vzorek uskladněn a připraven pro laboratorní zkoušky. Tyto probíhaly za stabilní teploty a vlhkosti prostředí uzavřené laboratoře.

#### 3.3.1 Koncepce zkušební přípravky pro zkoušení půdních vzorků

Pro zatěžování vzorků zemin byl použit zkušební přípravek. Tento byl zhotoven z plastové děrované trubky o vnitřním průměru 150 mm a délce 450 mm. Štěrbínové otvory v plášti sloužily k zabezpečení zkoušky odzdušněné a odvodněné. Další součástí zkušební přípravky byla podložka plnící funkci záchytné nádoby umístěvaná pod válcovou nádobu a kovový pěch kruhového průřezu o průměru kontaktní plochy 100 mm. Tento byl upínán do hlavice univerzálního zkušebního stroje SHIMADZU, který pro účely pokusu sloužil jako zdroj externího tlaku. Dalším potřebným diagnostickým přístrojem byl penetrometr (typ Penetrologger 06.15.SA) a přidružená sonda vlhkoměru.



Obrázek 3.1: Schéma zkušební přípravky pro simulaci zatěžování půdních vzorků

Zkušební přípravek byl plněn upravenými vzorky půdy, kdy půda byla v uložení volně sypaném. Po naplnění přípravku proběhlo několik etap zkoušení za definovaných podmínek.

Hlavními proměnnými byly:

- obsah přidané půdní organické hmoty
- vlhkost
- tlak působící na povrch vzorku
- počet cyklů zatížení

Sledovanou veličinou dále byla změna objemu, resp. posun ramene stroje, penetrometrický odpor vnikání normalizované sondy a jeho změny vztažené k hloubce pronikání do profilu vzorku v přípravku.

### **3.3.2 Sestavení vzorkové řady**

Pro pokusné zkoušky byla sestavena speciální vzorková řada substrátů sestávajících z odebrané orniční půdy a částečně humifikované organické hmoty sestávající z:

- kompostované dřevní štěpky
- listovky
- rašelinového sapropelu

Všechny substráty byly ve směsi ve shodném procentuálním zastoupení. Škála zkušebních vzorků byla navržena s rozdílným procentuálním zastoupením těchto složek, označovaných souhrnně jako POH. Rozvržení procentuálních podílů organické složky bylo v intervalu 0 až 95 %. Při nahrazování dílů původního vzorku půdy organickou hmotou byla zajištěna shodná vlhkost obou výchozích substrátů a díly pak byly stanoveny jako hmotnostní. Původní neupravený vzorek ornice byl tedy zvážen a zjištěna jeho aktuální vlhkost. Hmotnost neupraveného vzorku byla rozdělena na sto dílů a byla vypočtena hmotnost pro dodání části substrátu organické hmoty o shodné vlhkosti odpovídající zvolenému intervalu. Takto upravený vzorek byl homogenizován a uložen.

Ostatní výše uvedené proměnné byly taktéž rozděleny do několika navolených intervalů tak, aby co nejvíce simulovaly určité podmínky běžné zemědělské praxe. Např. externí tlakové zatížení by tak mohlo odpovídat průměrnému kontaktnímu tlaku běžných zemědělských strojů.

### **3.3.3 Zatěžovací fáze**

Každý předem upravený vzorek dle navolených kritérií, tj. s určitým procentuálním obsahem organické hmoty a za dané vlhkosti, byl ve zkušebním přípravku zatížen deklarovaným vnějším tlakem na univerzálním zkušebním stroji. Vzorek ve zkušebním přípravku se záchytnou nádobou byl umístěn do rámu trhačího stroje a do posuvného ramene stroje upnut kovový pěch.

V ovládacím programu stroje byla navolena tlaková síla působení a rychlost posunu ramene. Toto zatížení bylo prováděno v několika cyklech simulující přejezdy zemědělské techniky po polním povrchu. Po ukončení zatěžovací fáze byla odečtena hodnota poklesu úrovně povrchu od volně uloženého vzorku půdy v přípravku, která vypovídala o změně objemu, resp. o změně objemové hmotnosti vzorku. Následně byl vzorek v přípravku podroben penetrometrické zkoušce.

### **3.3.4 Penetrometrická zkouška**

Penetrometrická zkouška byla provedena sofistikovaným měřicím přístrojem pro zaznamenávání odporu normalizované sondy proti vnikání. Po sestavení přístroje dle manuálu a uvedení do provozního režimu byla tyčová sonda vpravována plynulým pohybem do hloubkového profilu půdního vzorku. Při tomto pronikání byla do vnitřní paměti přístroje ukládána data o hloubce vpichu a penetračním odporu. Hodnoty byly ihned zpracovány do grafické podoby závislosti penetračního odporu na hloubce průniku a připraveny k další analýze. Penetrometrický odpor kladený kuželíkovým hrotem sondážní tyče při pronikání do profilu vzorku bývá uváděn do souvislosti s mírou půdního utužení.

## **3.4 Očekávané výsledky a jejich vyhodnocování**

Pokusně zatěžovaný vzorek půdy byl vystaven variantám působení všech navolených proměnných faktorů v odstupňovaných škálových řadách. To zajistilo dostatečné množství získaných dat pro statistické vyhodnocování příp. vyvozování vzájemných závislostí a prakticky užitečných závěrů. Výpočetní technikou byla data zpracována do grafických podob křivek závislostí jednotlivých proměnných a sledovaných veličin. Očekávaným předpokladem bylo, že půdní vzorek obohacený o částečně humifikovaný substrát organické hmoty bude vykazovat příznivější reakce na podmínky zkušebního zatěžování než ty vzorky půdy poškozené erozí, které nebyly obohaceny nijak nebo byly obohaceny nedostatečně.

Z vyhodnocených dat bude např. možnost vyvodit nutné kompenzační množství primární půdní organické hmoty v podobě kompostovaného nebo dostatečné uleželého chlévského hnoje pro žádoucí změny ve fyzikálně-mechanických vlastnostech půdy na pozemku erozně ohroženém tak, aby projevy byly pro praxi jasně patrné např. v prodloužení období ideálních podmínek pro zpracování půdy těžkou zemědělskou mechanizací.

### **3.5 Hodnocení a úprava metodického postupu**

Po uskutečnění několika zkušebních měření nanečisto byl prvotně navrhovaný metodický postup upraven a přeorganizován do podoby co možná nejefektivnější a procesně snadno zvládnutelné. Optimalizace modelového metodického postupu měření tak měla za následek přehlednost získávaných dat a eliminovala prostor pro možné chyby způsobované obsluhou laboratorních přístrojů při opakujících se cyklických úkonech při měření vykonávaných.

#### **3.5.1 Volba pozemku pro odebrání půdních vzorků**

Vzorek půdy byl odebrán ze zemědělsky využívaného pozemku se strohým osevním postupem sestávající z pšenice a řepky. Sklon pozemku byl mírný, do 8 % svažitosti. Posklizňové zbytky obilniny i řepky byly klasickým způsobem, tj. orbou, zapravovány do půdního profilu. Ochrana rostlin byla prováděna profesionálními pomocnými chemickými prostředky dle zásad bezpečného používání v souladu s pokyny výrobce a hnojení bylo realizováno minerálními hnojivy, jejichž dávky, vhodnost a způsob aplikace opět byly v souladu s pokyny výrobce.

Pozemek byl vybrán z důvodu patrné degradace půdy. Průvodním jevem vodní eroze na pozemku byla při dešťových srážkách pozorovaná tvorba stroužek ve svažité části, ve spodní části s mírnější svažitostí kumulace značného množství naplavené zeminy a stagnující voda v okrajích pole a v okolí souvratí. Při dešti docházelo k slévání půdního povrchu, nejen v meziorostním období, ale i za vegetace kulturního porostu. Naopak vysychání doprovázela tvorba souvislé povrchové půdní krusty a po mechanizačním zpracování docházelo k rozprašování půdy. Z důvodu těchto projevů degradace byl pozemek vybrán k odebrání vzorků půdy pro účely laboratorního zhodnocení vybraných vlastností a pro zkoumání možné nápravy a zlepšení sledovaných mechanicko-fyzikálních vlastností půdy.

### **3.5.2 Sestavení stupňované vzorkové řady**

Proměnné faktory vzorkových řad byly navrženy tyto:

- obsah přidané organické hmoty (označované POH),
- vlhkost,
- velikost tlaku externího povrchového zatížení
- počet cyklů zatížení externím tlakem.

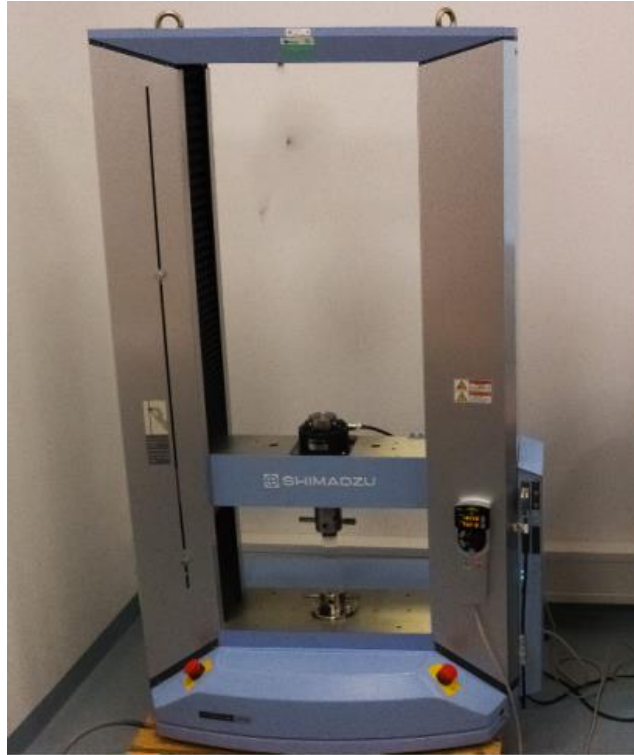
Organická hmota byla rozvržena do intervalu 0 až 95 %. Počáteční stav půdního vzorku byl považován za výchozí stav s nulovým obsahem půdní organické hmoty. Vzorková řada byla navržena s obsahem POH: 0, 5, 10, 30 a 95 %.

Jako další významný faktor byla sledována vlhkost. Měřena byla pomocí vlhkostní kondukto-metrické sondy přidružené k přístroji penetrometru. Měřena tak byla procentuální vlhkost po naplnění zkušebnímu přípravku upraveným půdním vzorkem před jeho následným zatěžováním. Dále pak v průběhu měření byla vlhkost a její změny sledovány po každém kroku v cyklu zatěžování povrchu vzorku externím tlakem.

Stupňování vlhkosti vzorků volně sypaného půdního substrátu ve zkušebním přípravku před zatěžovacími zkouškami bylo navoleno: 1, 8, 16 a 24 %.

### **3.5.3 Fáze zatěžování vzorků externím tlakem**

Pro získání dat zachycujících postupné změny sledovaných fyzikálních vlastností bylo potřeba navolit velikost tlaku působícího kolmo na povrch vzorku umístěného ve zkušebním přípravku v řádech nižších, než působí při kontaktu s půdou pojezd těžké zemědělské techniky. V původní úvaze bylo simulovat právě přejezdy této těžké zemědělské techniky, nicméně pro posuzování projevů působícího tlaku a probíhajících postupných změn např. s ohledem na využití získaných dat pro účely počítačového modelování byly navrženy tlaky: 180, 280 a 480 kPa.



Obrázek 3.2: Univerzální zkušební stroj SHIMADZU

Počet cyklů opakování zatížení definovaným tlakem byl s ohledem na technické možnosti laboratorního zařízení a reálnou proveditelnost pokusu stanoven na: 1, 2, 3 a 4, přičemž penetrometrickou sondou byl vzorek testován v prvním, druhém a čtvrtém cyklu opakovaného zatížení. Vyhodnocovacím programem TRAPEZIUM X byl vykreslen graf závislosti posunu ramene univerzálního zkušebního stroje na postupně narůstajícím tlaku v reálném čase.

#### **3.5.4 Měření penetrometrického odporu ve vertikálním profilu zkušební vzorku**

Penetrometrická sonda byla vzhledem k rozměrům zkušební přípravku sestavena z hrotu č. 1 o velikosti 10 mm a k tomu odpovídajících nastavných tyčí nejslabšího profilu v přístrojové sadě. Po každém odpovídajícím cyklu tlakového zatížení vzorku byl přípravek vyjmut z trhacího stroje a přesunut na pevnou podložku. Následně byla pomocí k penetrologgeru přidružené vlhkostní sondy naměřena vlhkost vzorku, popř. její změna po utužení tlakem působícím v předchozím kroku měření, tj. v zatěžovací fázi. Pro penetraci vzorku kuželíkovou sondou byla navrch zkušební přípravku umístěna odrazivá deska pro možnost stanovování a zaznamenávání hloubky průniku sondy v profilu vzorku a měřen byl penetrační odpor sondy proti vnikání v jednotkách MPa.



Obrázek 3.3: Sestava penetrometrického přístroje (dne: 13.1.2019 staženo z: <http://www.ekotechnika.cz/penetrologger-sada-do-80-cm-s-gps>)

Hloubka průniku sondy je přístrojově měřena odrazem ze spodní části přístroje vyslaných infračervených paprsků od odrazivé desky umístěné na povrchu půdního vzorku. Vzhledem k poměrně malé ploše této desky, která byla součástí přístrojové výbavy, docházelo při vychýlení penetrometru se sondážní tyčí ze svislého směru posunu při pronikání k nezaznamenání hodnot hloubky průniku do vzorku. Data tak byla nepoužitelná, a měření bylo nutno následně opakovat.

Pokud byla však data zaznamenána, počítač penetrologgeru vykreslil z těchto spojité graf závislosti penetrometrického odporu proti vnikání sondy na hloubce ve vertikálním profilu vzorku. Pro každý vzorek z řady tak byla získána sada křivek odpovídající navoleným vlastnostem upraveného půdního vzorku.

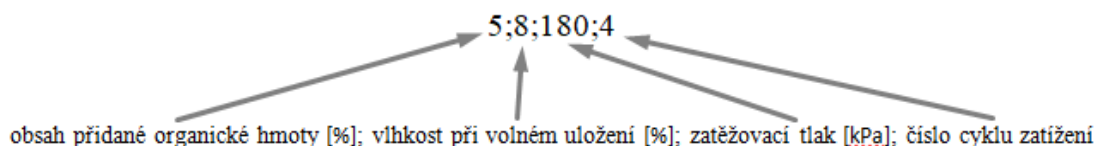


## 4 Naměřená data

Vzorky v řadách byly pro přehlednost dat jednotně označovány takto:

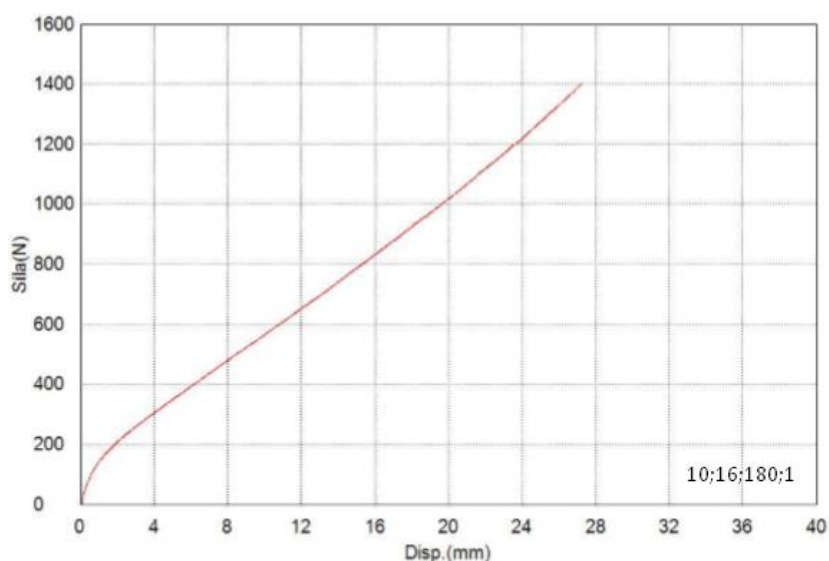
- obsah přidané organické hmoty
- vlhkost při volném uložení
- velikost zatěžovacího tlaku
- číslo cyklu zatížení

Číselný formát označení mohl vypadat např. takto:

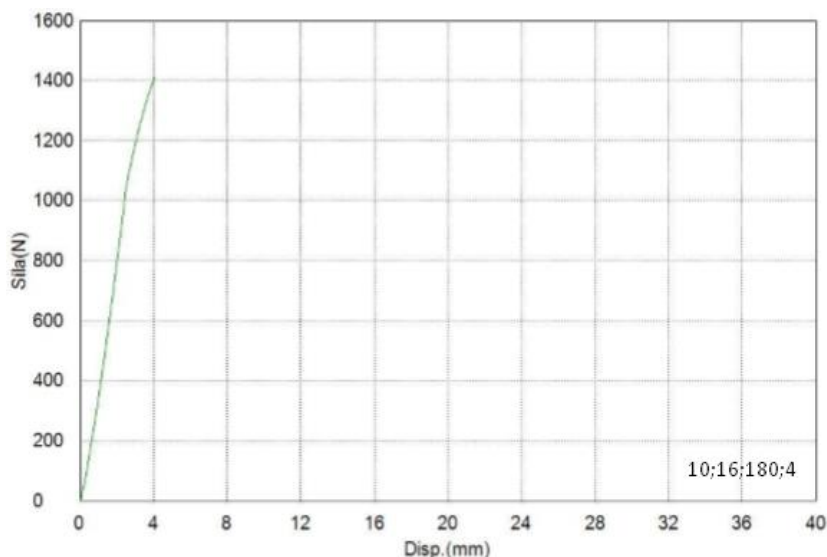


Vzorek byl tedy obohacen o 5 hmotnostních procent půdní organickou hmotou, při plnění do zkušebního přípravku volným nasypáním byla vlhkost vzorku měřena vlhkostní sondou 8 %, tlak působící na povrch vzorku navolen v univerzálním zkušebním stroji na hodnotu 180 kPa a vzorek byl tímto tlakem v cyklu zatížen čtyřikrát. Takto nadefinovaný vzorek byl podroben penetrometrické zkoušce.

Data získaná z trhačímho stroje a penetrometru byla ukládána v grafické podobě závislostí na odpovídajících faktorech a připravena pro porovnávání a vyvozování závěrů. Vzhledem k značné objemnosti získaných dat jsou tato v podobě grafických závislostí zařazena do přílohy práce. Pro ilustraci podoby surových dat jsou dále uvedeny obrázky pořízené ze zkušebních a měřících přístrojů pro vzorkovou řadu s označením 10;16;180 v 1 a 4 cyklu zatížení.



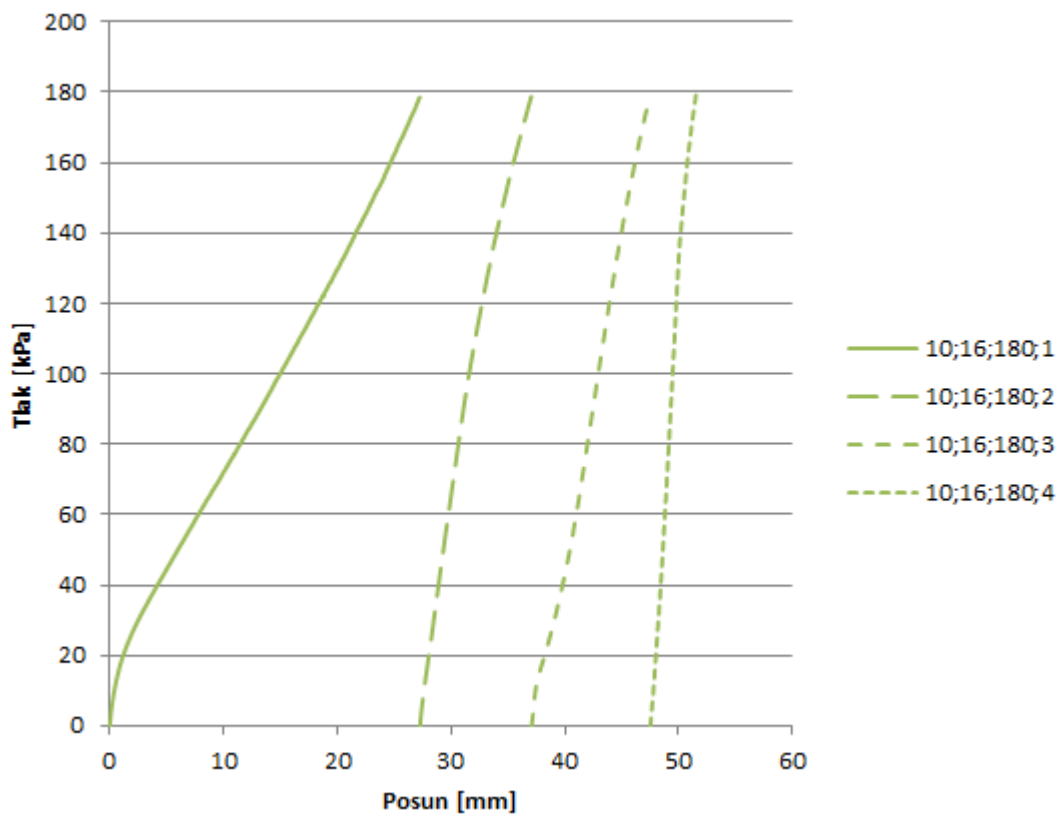
Obrázek 4.1: Velikost posunu v závislosti na působící síle pro vzorek 10;16;180;1



**Obrázek 4.2:** Velikost posunu v závislosti na působící síle pro vzorek 10;16;180;4

Pořizovaná surová data z měřicích přístrojů byla následně extrahována a přepracována do vhodného formátu. Výsledné zpracované základní grafy zobrazují závislost tlaku [kPa] na posunu [mm].

**Obrázek 4.3:** Přepracovaný formát zobrazování křivek závislosti stlačení půdy na působícím tlaku pro vzorek 10;16;180 ve čtyřech cyklech zatížení.



V tabulce 4.1 je uvedena specifikace všech zkoušených půdních vzorků pro zpřehlednění škály navolených vstupních proměnných faktorů.

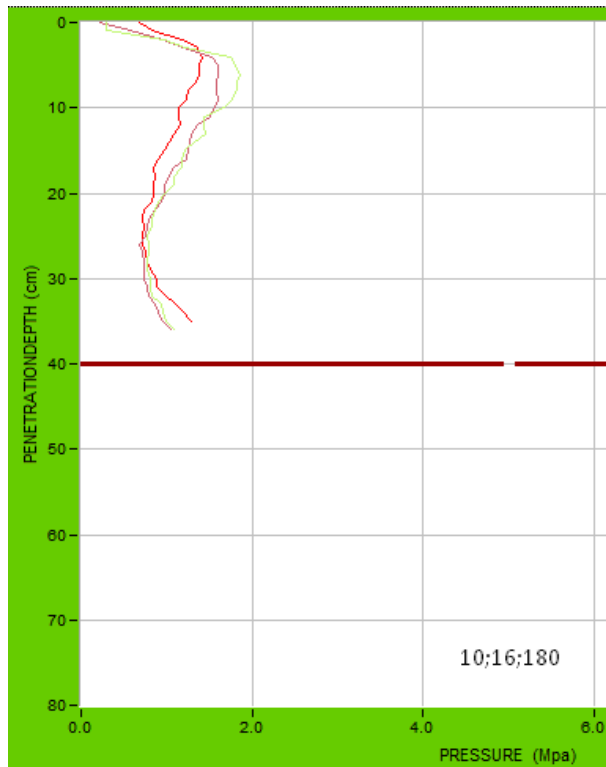
Tabulka 4.1: Výpis a specifikace všech zkoušených půdních vzorků

POH [%]	Vlhkost [%]	Tlak [kPa]	Cykly	POH [%]	Vlhkost [%]	Tlak [kPa]	Cykly	POH [%]	Vlhkost [%]	Tlak [kPa]	Cykly
0	1	180	1	5	2	180	1	10	2	180	1
0	1	180	2	5	2	180	2	10	2	180	2
0	1	180	4	5	2	180	4	10	2	180	4
0	1	280	1	5	2	280	1	10	3	280	1
0	1	280	2	5	2	280	2	10	3	280	2
0	1	280	4	5	2	280	4	10	3	280	4
0	3	480	1	5	3	480	1	10	3	480	1
0	3	480	2	5	3	480	2	10	3	480	2
0	3	480	4	5	3	480	4	10	3	480	4
0	8	180	1	5	9	180	1	10	10	180	1
0	8	180	2	5	9	180	2	10	11	180	2
0	8	180	4	5	9	180	4	10	12	180	4
0	11	280	1	5	10	280	1	10	12	280	1
0	11	280	2	5	10	280	2	10	12	280	2
0	11	280	4	5	10	280	4	10	13	280	4
0	12	480	1	5	11	480	1	10	10	480	1
0	12	480	2	5	11	480	2	10	10	480	2
0	12	480	4	5	11	480	4	10	10	480	4
0	20	180	1	5	19	180	1	10	19	180	1
0	20	180	2	5	19	180	2	10	20	180	2
0	20	180	4	5	19	180	4	10	20	180	4
0	20	280	1	5	22	280	1	10	21	280	1
0	20	280	2	5	22	280	2	10	21	280	2
0	20	280	4	5	22	280	4	10	21	280	4
0	25	480	1	5	24	480	1	10	23	480	1
0	25	480	2	5	24	480	2	10	24	480	2
0	25	480	4	5	24	480	4	10	24	480	4
0	30	180	1	5	26	180	1	10	25	180	1
0	30	180	2	5	26	180	2	10	26	180	2
0	31	180	4	5	26	180	4	10	28	180	4
0	32	280	1	5	28	280	1	10	28	280	1
0	32	280	2	5	29	280	2	10	32	280	2
0	32	280	4	5	30	280	4	10	32	280	4
0	32	480	1	5	30	480	1	10	32	480	1
0	32	480	2	5	32	480	2	10	34	480	2
0	32	480	4	5	33	480	4	10	34	480	4

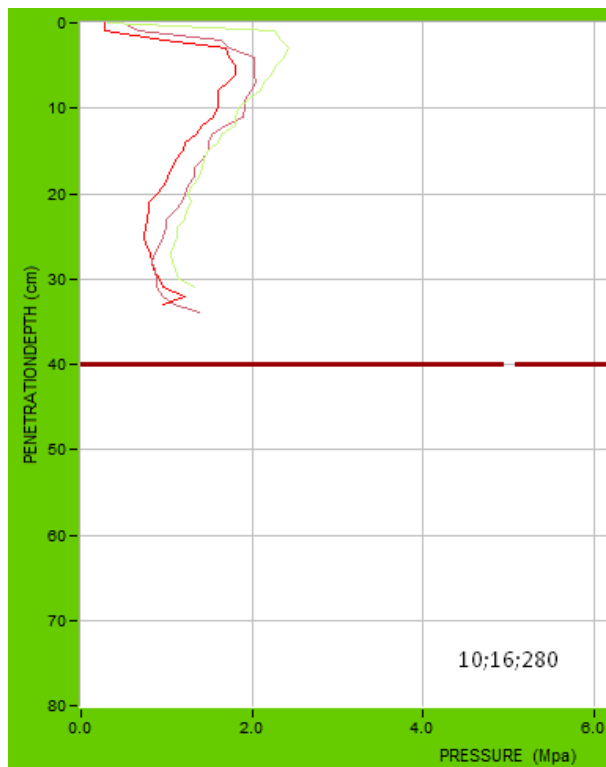
Pokračování: Tabulka 4.1

POH [%]	Vlhkost [%]	Tlak [kPa]	Cykly	POH [%]	Vlhkost [%]	Tlak [kPa]	Cykly
30	1	180	1	95	7	180	1
30	1	180	2	95	7	180	2
30	1	180	4	95	7	180	4
30	2	280	1	95	8	280	1
30	2	280	2	95	8	280	2
30	2	280	4	95	8	280	4
30	2	480	1	95	8	480	1
30	2	480	2	95	8	480	2
30	2	480	4	95	9	480	4
30	9	180	1	95	18	180	1
30	9	180	2	95	20	180	2
30	10	180	4	95	21	180	4
30	10	280	1	95	21	280	1
30	10	280	2	95	21	280	2
30	10	280	4	95	22	280	4
30	11	480	1	95	24	480	1
30	11	480	2	95	24	480	2
30	11	480	4	95	24	480	4
30	20	180	1	95	33	180	1
30	20	180	2	95	33	180	2
30	22	180	4	95	35	180	4
30	23	280	1	95	37	280	1
30	22	280	2	95	39	280	2
30	22	280	4	95	41	280	4
30	25	480	1	95	43	480	1
30	25	480	2	95	44	480	2
30	27	480	4	95	44	480	4
30	31	180	1	95	35	180	1
30	32	180	2	95	38	180	2
30	33	180	4	95	41	180	4
30	34	280	1	95	33	280	1
30	35	280	2	95	37	280	2
30	36	280	4	95	38	280	4
30	35	480	1	95	40	480	1
30	37	480	2	95	41	480	2
30	38	480	4	95	43	480	4

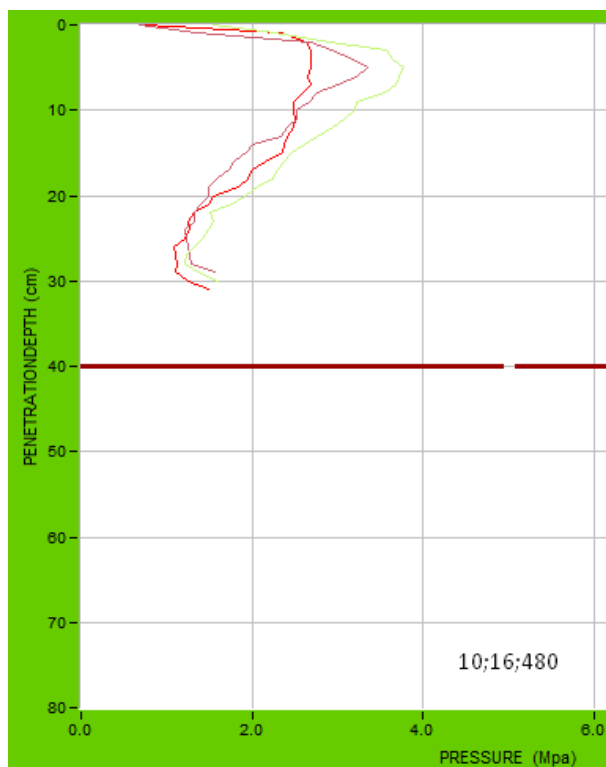
Data z penetrolgeru byla ponechána v základním formátu, kde je zobrazena závislost odporu proti vnikání, resp. tlaku, značeného v grafech jako PRESSURE (MPa) na hloubce průniku značené jako PENETRATIONDEPTH (cm). Barevné odlišení křivek znázorňuje penetraci po prvním (červená), druhém (fialová) a čtvrtém (zelená) cyklu zatížení externím tlakem. Veškeré pořízené penetromertické grafy jsou zařazeny v příloze práce.



**Obrázek 4.4:** Křivky penetrometrického odporu vztažené k hloubce průniku sondy pro vzorek 10;16;180 v navolených cyklech opakovaného zatížení



**Obrázek 4.5:** Křivky penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek 10;16;280 v navolených cyklech opakovaného zatížení



**Obrázek 4.6:** Křivky penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek 10;16;480 v navolených cyklech opakovaného zatížení

## 5 Vyhodnocení získaných dat

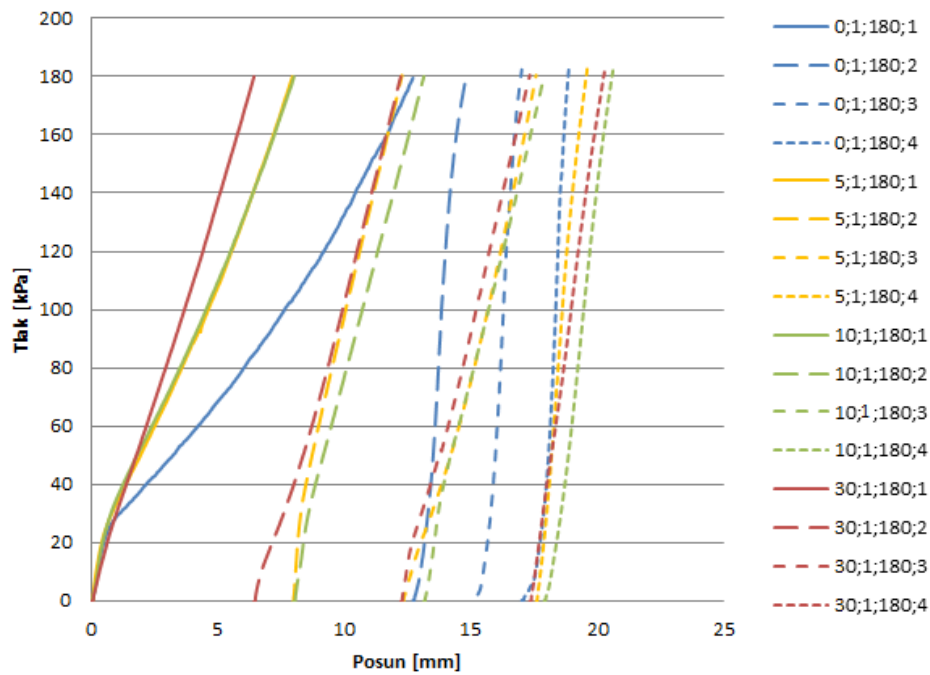
I přes fakt, že se jednalo o pilotní pokus experimentálního stanovování vybraných fyzikálních a mechanických parametrů půdních vzorků upravovaných primárních vlastností, vykazovala pořízená data již v neupravené podobě jisté tendence a závislostní trendy. Praktické měření však bylo do značné míry limitováno značným množstvím uvažovaných vstupních proměnných. Experimentální měření bylo navrženo v reálně proveditelných intervalech, i tak množství výstupních dat nebylo možné adekvátně a s náležitou komplexností pro danou problematiku vyhodnotit pomocí bazální statistiky.

Dílčí zhodnocení se zaměřením na vybraný parametr bylo možné provést např. u páru vzorků metodou komparace. Tento postup však nezachycoval kontinuum změn, ke kterým při takto navrženém pokusu formou stupňovaných vstupních faktorů u půdních vzorků docházelo. Částečné vyhodnocení dat bylo provedeno pro několik vybraných parametrů s ohledem na možnost ohodnocení jevů vztažených k zemědělské praxi.

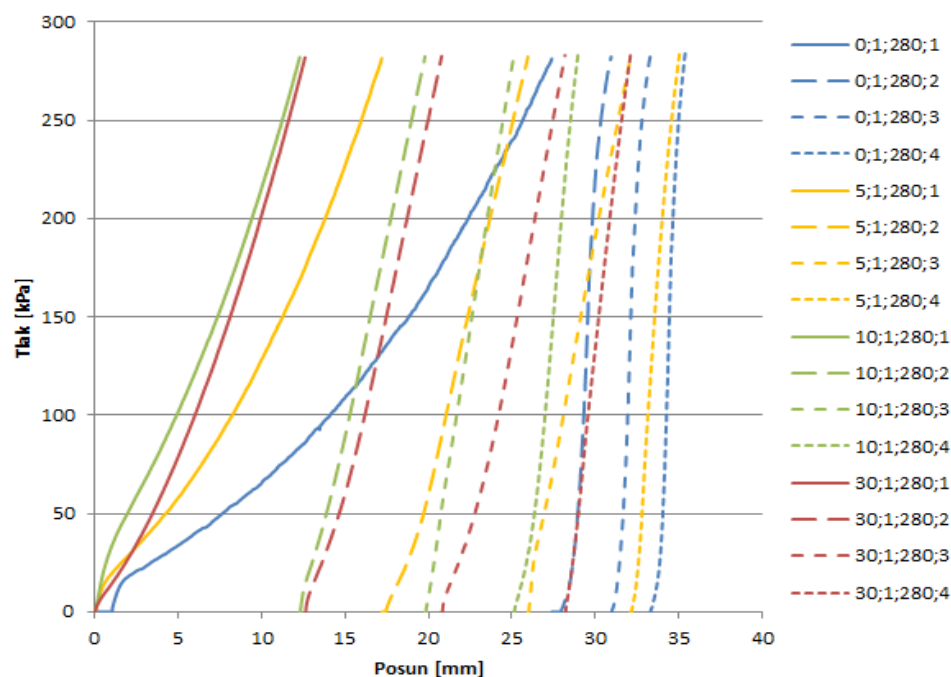
### 5.1 Syntéza primárních dat

Základní grafy zobrazující závislost tlaku [kPa] na posunu [mm] pro jednotlivé vzorky byly v následné kompilaci sestaveny do podoby zobrazující tyto křivky společně v jednom obrázku. Tento formát zobrazení primárních surových dat zachycoval projevy změn v závislosti na různém obsahu přidané organické hmoty (POH), ostatní určující faktory byly shodné. Odlišení jednotlivých vzorků ve vyobrazeních bylo provedeno pomocí různě barevných čar a typů čar odpovídající tvaru číselného kódování vzorku zapsaného v legendě grafu.

Křivky pro jednotlivé půdní vzorky shodných definovaných vlastností a s proměnným obsahem POH byly uskupeny v návaznosti na počtu zatěžovacích cyklů (čerchování čar dle legendy grafu). Vzorek s 95% obsahem POH byl zobrazen samostatně z důvodu značně odlišného rozsahu hodnot, které ve společném měřítku grafu zhoršovaly jeho optickou čitelnost. Grafické závislosti byly sestaveny pro definované vlhkosti 1, 8, 16 a 24 % a pro zatěžovací tlaky 180, 280 a 480 kPa. Celkem vzniklo 12 primárních grafů zobrazujících křivky čtyř vzorků ve čtyřech cyklech zatížení.

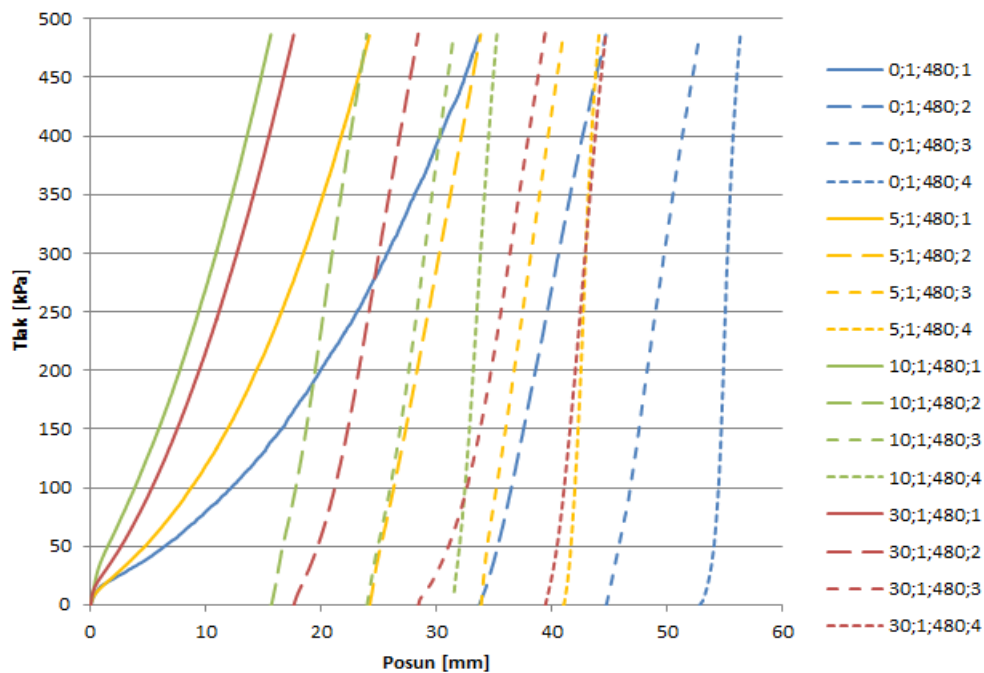


**Obrázek 5.1:** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorky půd obohacené o 0, 5, 10 a 30 % POH při počáteční vlhkosti 1 % do maximálního navoleného tlaku 180 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)

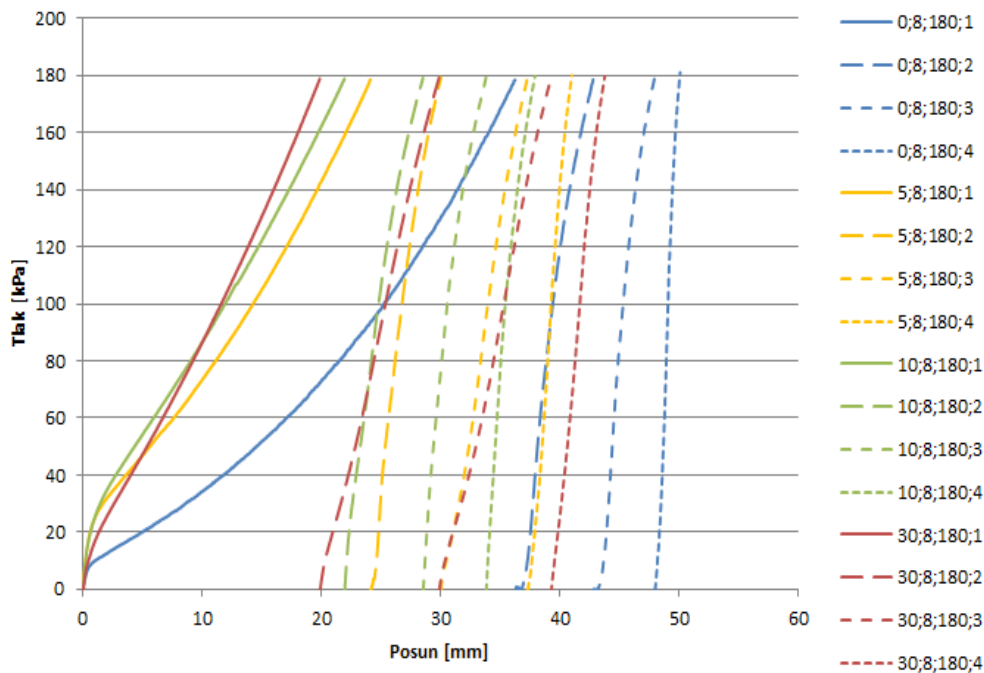


**Obrázek 5.2** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorky půd obohacené o 0, 5, 10 a 30 % POH při počáteční vlhkosti 1 % do maximálního navoleného tlaku 280 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)

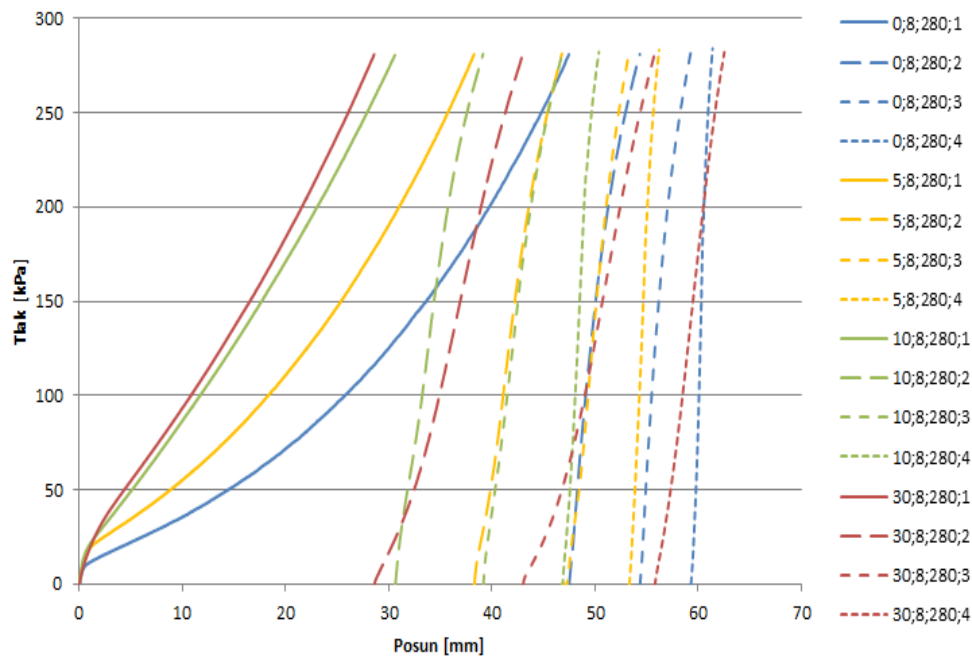




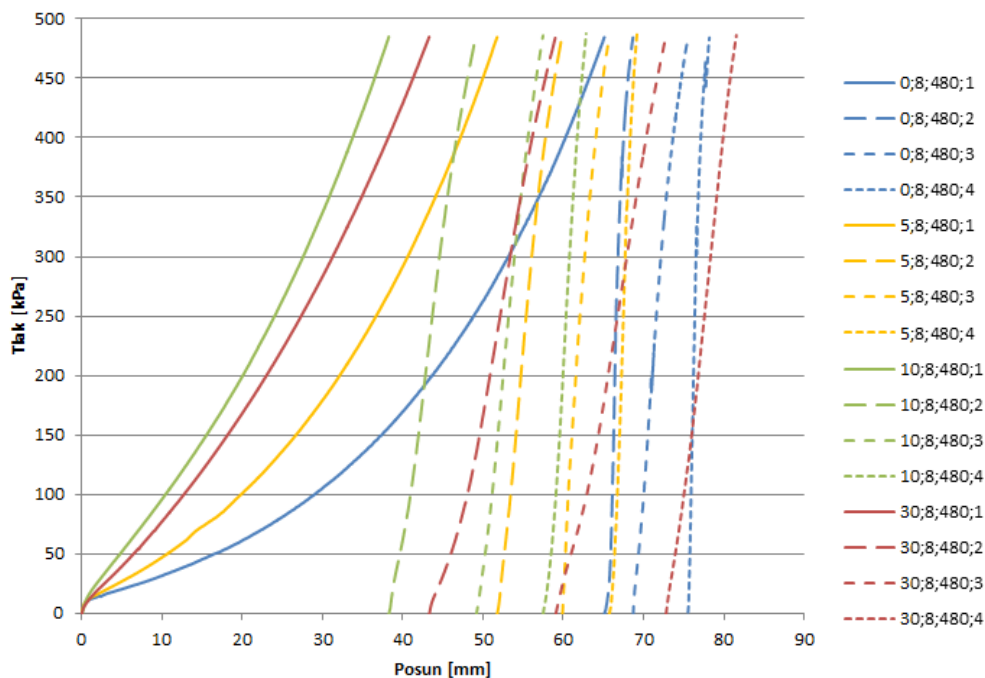
**Obrázek 5.3** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorky půd obohacené o 0, 5, 10 a 30 % POH při počáteční vlhkosti 1 % do maximálního navoleného tlaku 480 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)



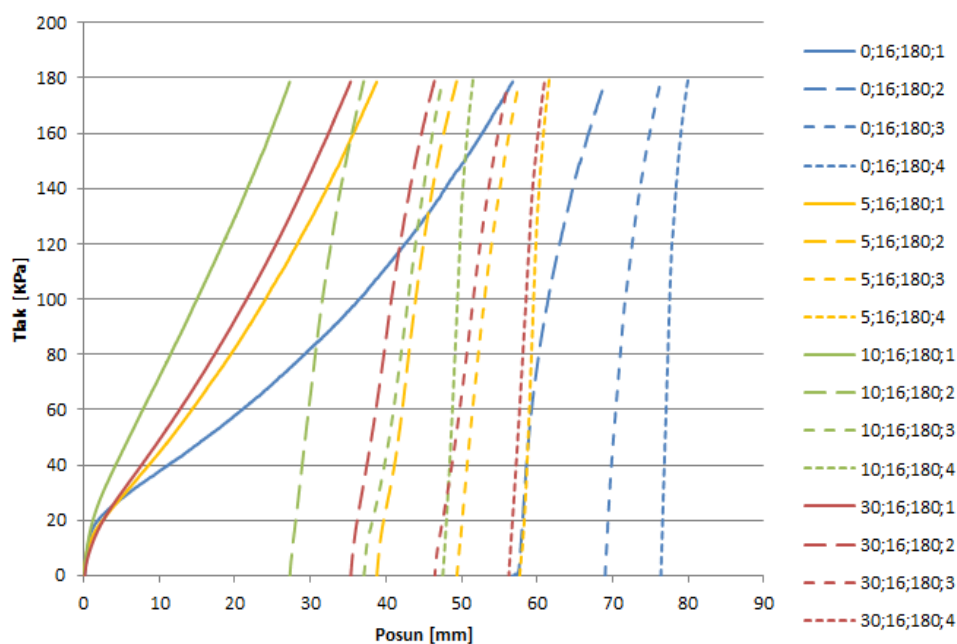
**Obrázek 5.4** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorky půd obohacené o 0, 5, 10 a 30 % POH při počáteční vlhkosti 8 % do maximálního navoleného tlaku 180 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)



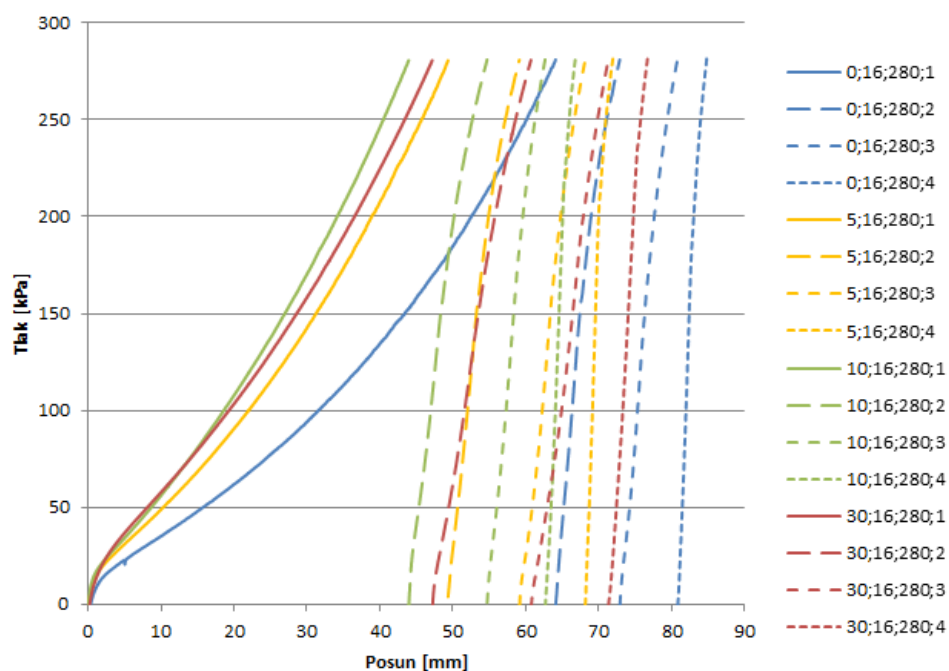
**Obrázek 5.5** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorky půd obohacené o 0, 5, 10 a 30 % POH při počáteční vlhkosti 8 % do maximálního navoleného tlaku 280 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)



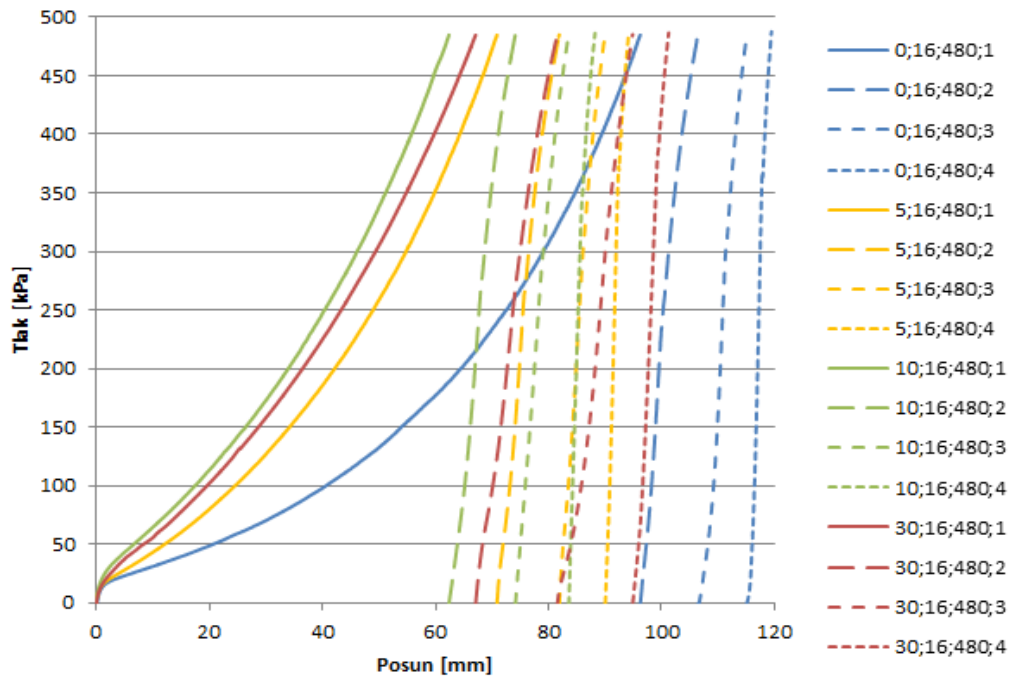
**Obrázek 5.6** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorky půd obohacené o 0, 5, 10 a 30 % POH při počáteční vlhkosti 8 % do maximálního navoleného tlaku 480 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)



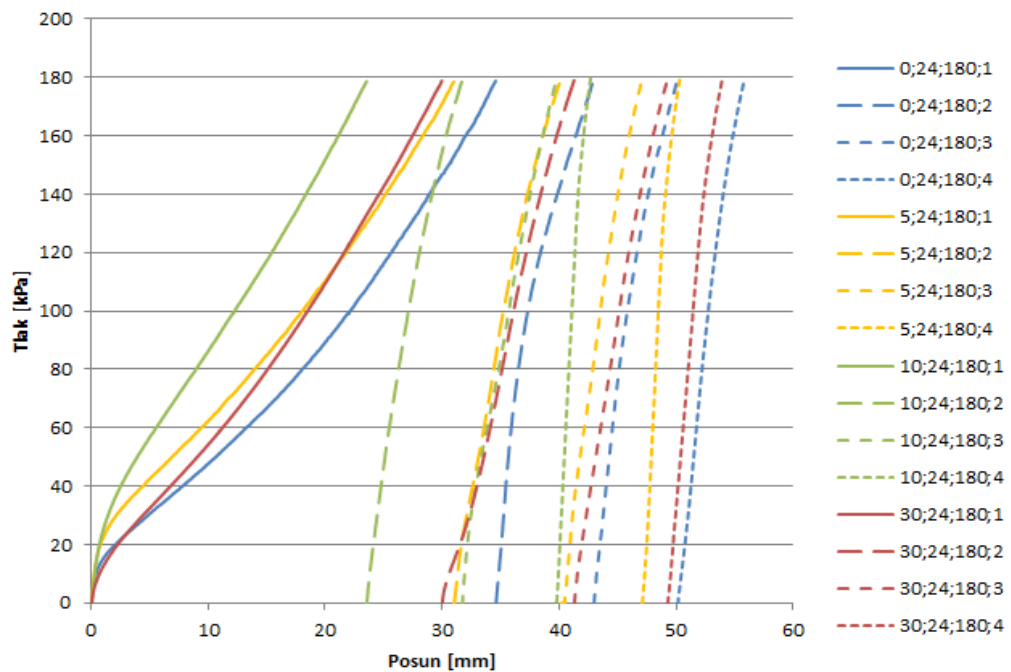
**Obrázek 5.7:** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorky půd obohacené o 0, 5, 10 a 30 % POH při počáteční vlhkosti 16 % do maximálního navoleného tlaku 180 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)



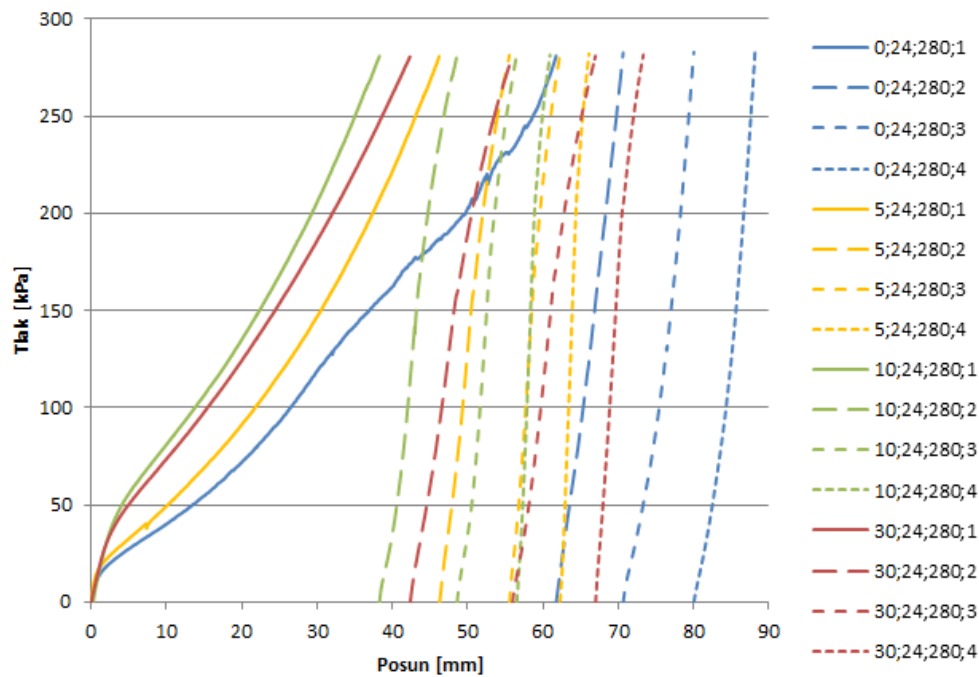
**Obrázek 5.8:** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorky půd obohacené o 0, 5, 10 a 30 % POH při počáteční vlhkosti 16 % do maximálního navoleného tlaku 280 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)



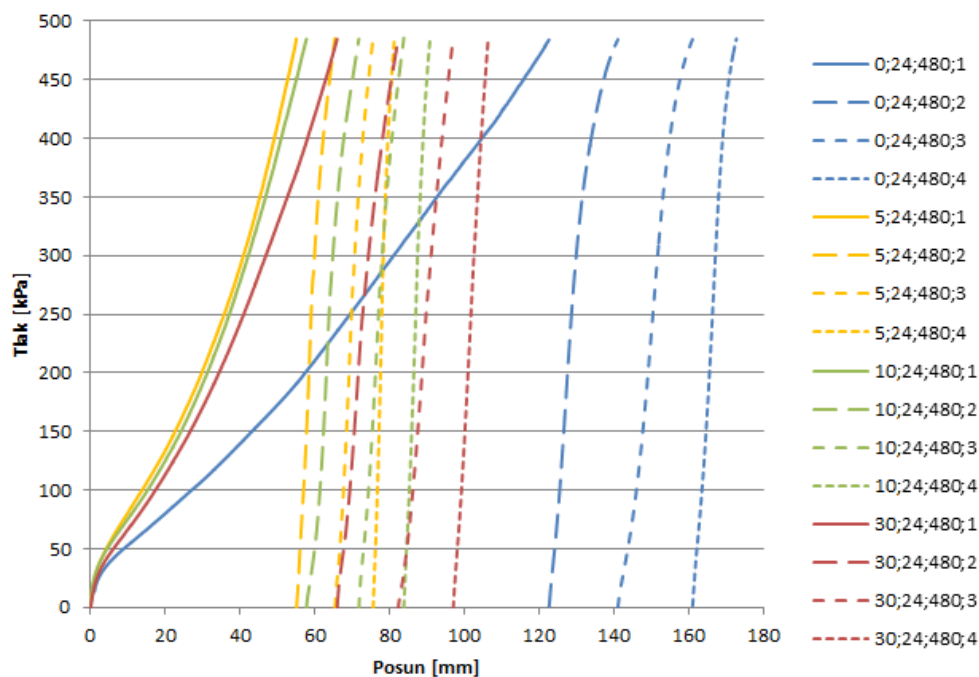
**Obrázek 5.9:** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorky půd obohacené o 0, 5, 10 a 30 % POH při počáteční vlhkosti 16 % do maximálního navoleného tlaku 480 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)



**Obrázek 5.10:** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorky půd obohacené o 0, 5, 10 a 30 % POH při počáteční vlhkosti 24 % do maximálního navoleného tlaku 180 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)



**Obrázek 5.11:** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorky půd obohacené o 0, 5, 10 a 30 % POH při počáteční vlhkosti 24 % do maximálního navoleného tlaku 280 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)

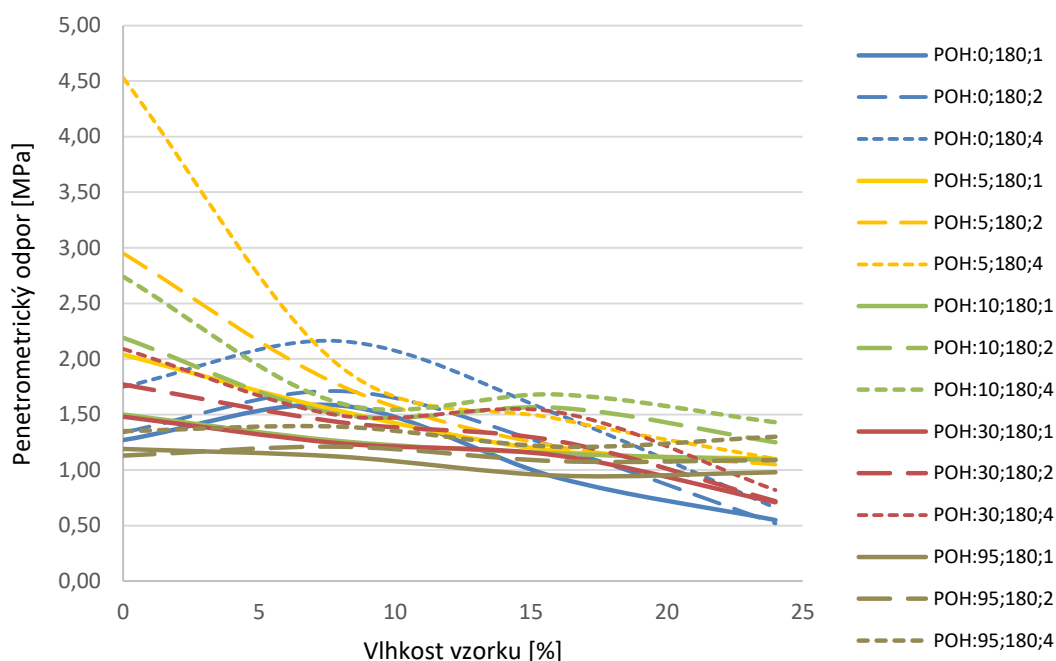


**Obrázek 5.12:** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorky půd obohacené o 0, 5, 10 a 30 % POH při počáteční vlhkosti 24 % do maximálního navoleného tlaku 480 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)

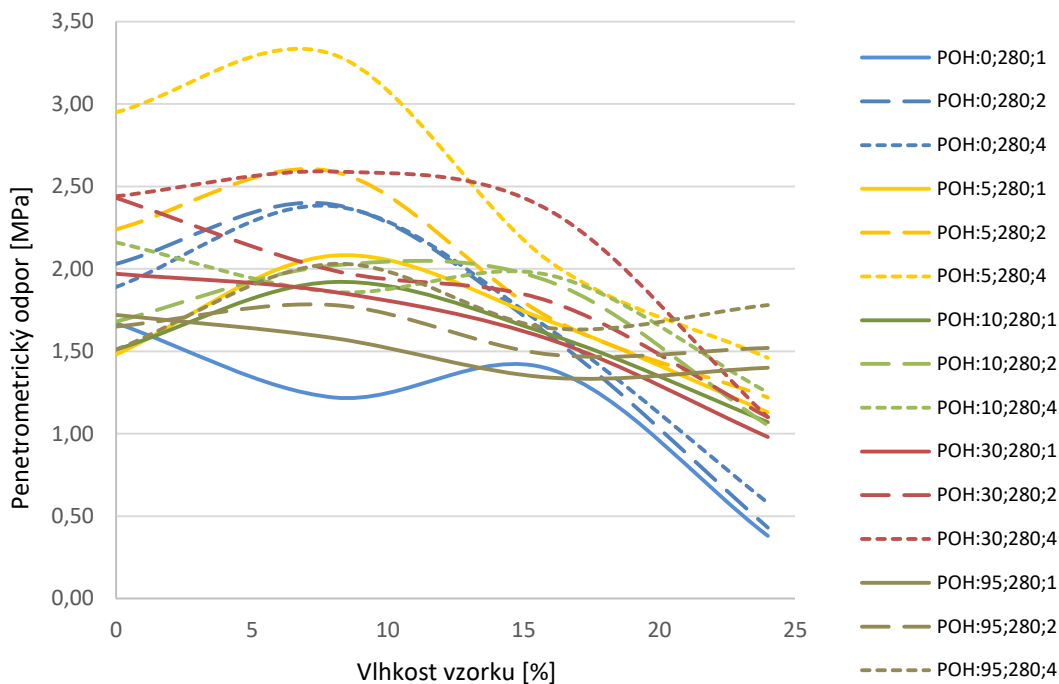
Z takto uspořádaných dat by bylo možné usuzovat míru nakypřenosti půdních vzorků ve stavu volného uložení, přeneseně vzato např. v polních podmínkách po mechanickém kultivačním zpracování půdy. Jednotlivé cykly zatížení, opět přeneseně, mohou simulovat počet přejezdů zemědělské techniky. V tomto ohledu se nabízí komparace křivek v 1. a 4. cyklu zatížení. Z velikosti posunu by bylo možné uvažovat např. odolnost proti utužení.

Penetrační křivky obdržené z penetrolgeru jsou všechny ve své původní podobě zařazeny v příloze práce. Na obrázku 5.13, 5.14 a 5.15 jsou zobrazeny hodnoty penetrometrického odporu v hloubce 10 cm profilu půdního vzorku. Závislost velikosti penetračního odporu je vztažena k různé vlhkosti definované ve vzorkové řadě před zatěžovací fází a k obsahu POH. Sestaveny byly tři grafy při odlišném zatížení maximálním tlakem. Obsahující sadu tří křivek pro každý definovaný vzorek (viz legenda). Penetrometrický odpor byl měřen v 1, 2 a 4 zatěžovacím cyklu.

Sledování hodnot v hloubce 10 cm bylo zvoleno z pohledu agrotechnického v souvislosti s požadavky agronomickými na zakládání porostů a to s přihlédnutím k limitujícím faktorům pro vývoj kořenového vlášení v počátečních fázích růstu většiny klasických polních plodin v této úrovni půdního profilu.



**Obrázek 5.13:** Závislost penetrometrického odporu v 10 cm hloubky na vlhkosti vzorku s různým obsahem POH po zatížení tlakem 180 kPa v cyklu 1; 2; 4.



**Obrázek 5.14:** Závislost penetrometrického odporu v 10 cm hloubky na vlhkosti vzorku s různým obsahem POH po zatížení tlakem 280 kPa v cyklu 1; 2; 4.



**Obrázek 5.15:** Závislost penetrometrického odporu v 10 cm hloubky na vlhkosti vzorku s různým obsahem POH po zatížení tlakem 480 kPa v cyklu 1; 2; 4.

Tabulka 5.1 až 5.15 obsahuje vyčtené hodnoty z primárně pořízených křivek a to v podobě hodnot maximálního naměřeného penetrometrického odporu, značeného: pen;max [MPa] a hloubky jeho dosažení v profilu zkušební vzorku v tabulce uváděné jako: hloubka průniku [cm]. Tabulky hodnot byly v této podobě sestaveny pro všechny varianty definovaných vzorků.

**Tabulka 5.1:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek neobohacený POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 180 kPa

P180;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
0;0	1,27	10,00	1,55	5,00	1,97	5,00
0;8	1,79	6,00	2,06	5,00	3,21	3,00
0;16	1,27	4,00	1,69	4,00	2,11	3,00
0;24	0,61	3,00	0,62	2,00	0,66	1,00

**Tabulka 5.2:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek neobohacený POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 280 kPa

P280;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
0;0	2,00	4,00	2,16	7,00	2,00	7,00
0;8	2,67	5,00	2,83	6,00	3,44	6,00
0;16	1,83	3,00	2,42	3,00	2,10	3,00
0;24	0,99	12,00	0,60	18,00	0,65	8,00



**Tabulka 5.3:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek neobohacený POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 480 kPa

P480;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
0;0	2,93	10,00	3,31	10,00	3,98	14,00
0;8	4,17	5,00	4,34	6,00	4,44	5,00
0;16	2,67	8,00	2,99	4,00	3,23	6,00
0;24	1,51	10,00	1,20	12,00	1,30	11,00

**Tabulka 5.4:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek obohacený o 5 % POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 180 kPa

P180;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
5;0	2,3	11	3,27	11	4,81	14
5;8	1,69	5	2,04	6	2,35	7
5;16	1,31	6	1,42	4	1,81	6
5;24	1,13	8	1,27	4	1,22	5

**Tabulka 5.5:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek obohacený o 5 % POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 280 kPa

P280;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
5;0	1,72	18	2,32	9	3,51	13
5;8	2,33	4	2,75	6	3,38	6
5;16	1,8	8	1,99	5	2,48	4
5;24	1,25	7	1,43	5	1,54	7

**Tabulka 5.6:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek obohacený o 5 % POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 480 kPa

P480;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
5;0	2,82	12	3,52	15	3,88	13
5;8	4,03	8	4,33	10	4,53	6
5;16	2,59	9	2,8	4	3,52	10
5;24	1,68	7	1,79	9	1,93	11

**Tabulka 5.7:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek obohacený o 10 % POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 180 kPa

P180;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
10;0	1,66	14	2,54	12	3,15	15
10;8	1,51	5	1,7	6	1,97	5
10;16	1,41	4	1,61	6	1,81	5
10;24	1,3	3	1,39	4	1,53	9

**Tabulka 5.8:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek obohacený o 10 % POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 280 kPa

P280;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
10;0	1,74	16	2,16	14	2,54	17
10;8	2,08	8	2,39	5	2,66	6
10;16	1,8	6	2,04	7	2,43	3
10;24	1,23	5	1,33	3	1,33	3

**Tabulka 5.9:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek obohacený o 10 % POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 480 kPa

P480;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
10;0	3,08	12	3,08	11	4,36	13
10;8	3,35	5	3,1	7	3,66	5
10;16	2,69	3	3,35	5	3,77	5
10;24	1,34	4	1,33	6	1,47	4

**Tabulka 5.10:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek obohacený o 30 % POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 180 kPa

P180;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
30;0	1,68	14	2,07	16	2,49	13
30;8	1,32	5	1,45	11	1,66	6
30;16	1,13	10	1,33	7	1,6	8
30;24	0,81	2	0,83	6	0,91	3

**Tabulka 5.11:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek obohacený o 30 % POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 280 kPa

P280;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
30;0	2,23	14	2,58	15	3	13
30;8	1,86	10	2,06	9	2,59	10
30;16	1,79	7	1,92	6	3,39	8
30;24	1,03	8	1,15	9	1,15	6

**Tabulka 5.12:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek obohacený o 30 % POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 480 kPa

P480;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
30;0	2,3	17	2,76	17	3,34	14
30;8	3,13	5	3,29	9	2,98	7
30;16	2,57	6	2,98	7	3,21	4
30;24	1,21	11	1,28	14	1,36	14

**Tabulka 5.13:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek obohacený na 95 % POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 180 kPa

P180;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
95;0	1,19	10	1,22	8	1,38	9
95;8	1,4	4	1,42	5	1,63	6
95;16	1,08	5	1,13	6	1,25	8
95;24	1,06	5	1,2	7	1,34	8

**Tabulka 5.14:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek obohacený na 95 % POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 280 kPa

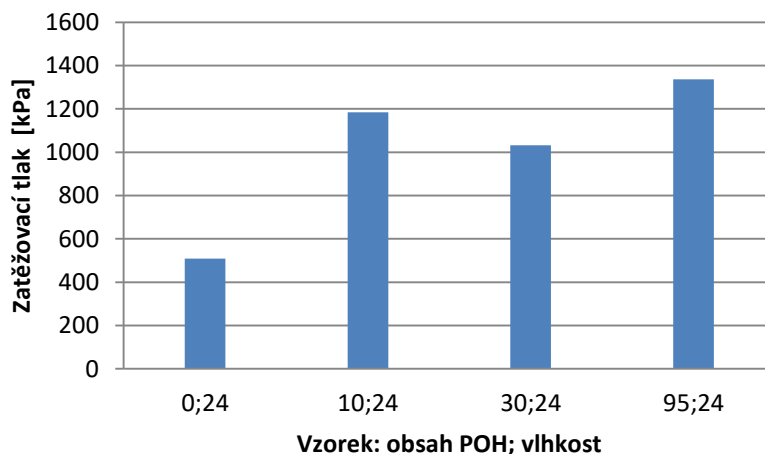
P280;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
95;0	1,72	11	1,68	9	1,55	12
95;8	1,74	4	1,94	8	2,16	7
95;16	1,36	8	1,48	10	1,64	10
95;24	1,49	6	1,58	7	1,81	9

**Tabulka 5.15:** Maximální hodnoty penetrometrického odporu a hloubka jeho dosažení pro vzorek obohacený na 95 % POH ve škále navolených vlhkostí a cyklech zatížení maximálním tlakem 480 kPa

P480;	1. cyklus		2. cyklus		4. cyklus	
vzorek: obsah POH; vlhkost	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]	pen;max [MPa]	hloubka průniku [cm]
95;0	2,77	10	2,87	11	3,48	12
95;8	2,74	9	2,92	7	2,65	7
95;16	1,68	8	2	11	2,11	14
95;24	1,95	9	2,18	11	2,55	11

Pro rozšíření úvahy jsou v tabulce 5.1 až 5.15 uvedeny hodnoty maxima penetrometrického odporu a hloubka jejich dosažení. Z takto koncipovaných tabulek by bylo možné vyhodnotit riziko tvorby zhutněných vrstev, jejich umístění v půdním profilu a závislost jejich výskytu na vlhkosti a obsahu organické hmoty. Přeneseno do polních podmínek, by byla možnost uvažovat dále např. o vlivu omezení růstu kořenů pěstovaných plodin nebo retardaci vývoje kořenového vlášení v důsledku výskytu lokálních vrstev zhutnění půdního profilu vznikající např. po zatížení polního povrchu neřízeným systémem pohybu zemědělské techniky.

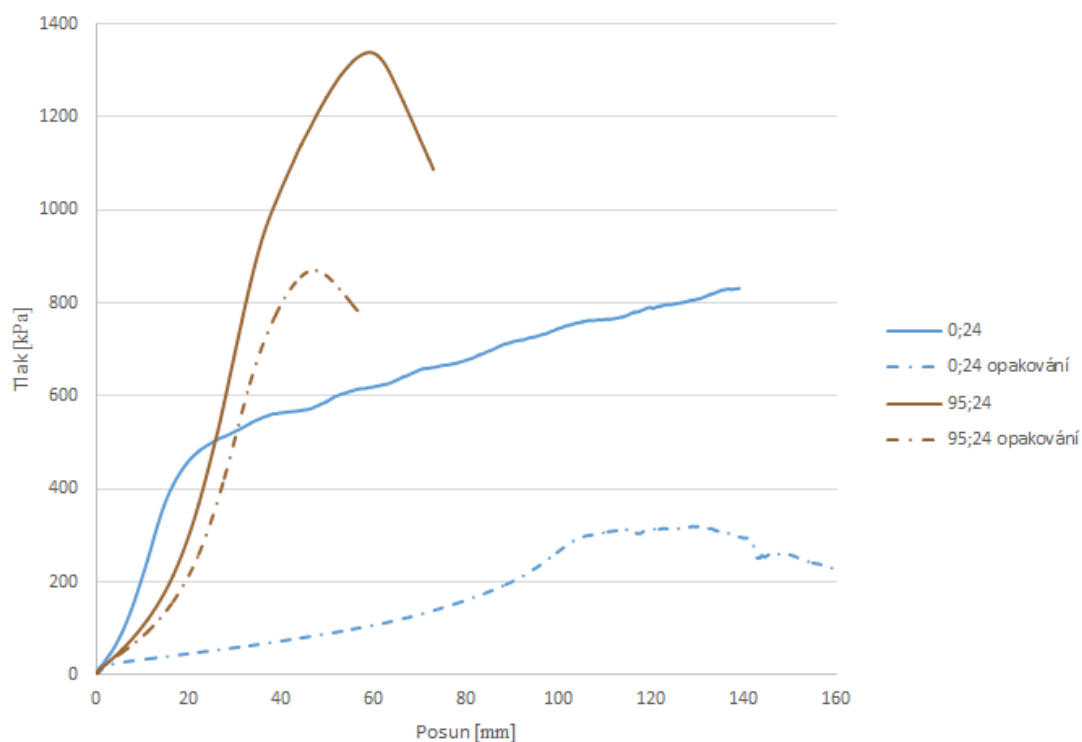
Sloupcový graf na obrázku 5.16 byl sestaven z vybraných hodnot doplňkového měření mezí únosnosti půdních vzorků. Vzorky o výchozí vlhkosti 24 % byly vystaveny zatížení nad mez únosnosti. Mez únosnosti byla definována jako okamžik, při kterém začalo docházet k vytlačování půdy do stran za viditelného poklesu zaznamenávaného působícího tlaku při konstantním posunu pěchu upnutého na rameni zkušebního stroje.



**Obrázek 5.16:** Mez únosnosti vzorků v závislosti na obsahu POH při vlhkosti 24 %

Zajímavý jev byl zaznamenán v průběhu grafu na obrázku 5.17. Zatížení byl vystaven vzorek neobohacený POH při výchozí vlhkosti 24 % před zatížením. Zaznamenaná křivka vykazovala několik pravidelně navazujících fází smykového kluzu projevujícího se mírným zvlněním. Vykreslené zvlnění lze interpretovat jako střídání fáze vytlačování s fází utužování. Tento jev nebyl u ostatních vzorků zkušební řady pozorován a docházelo k trvalému propadu křivek zatížení.

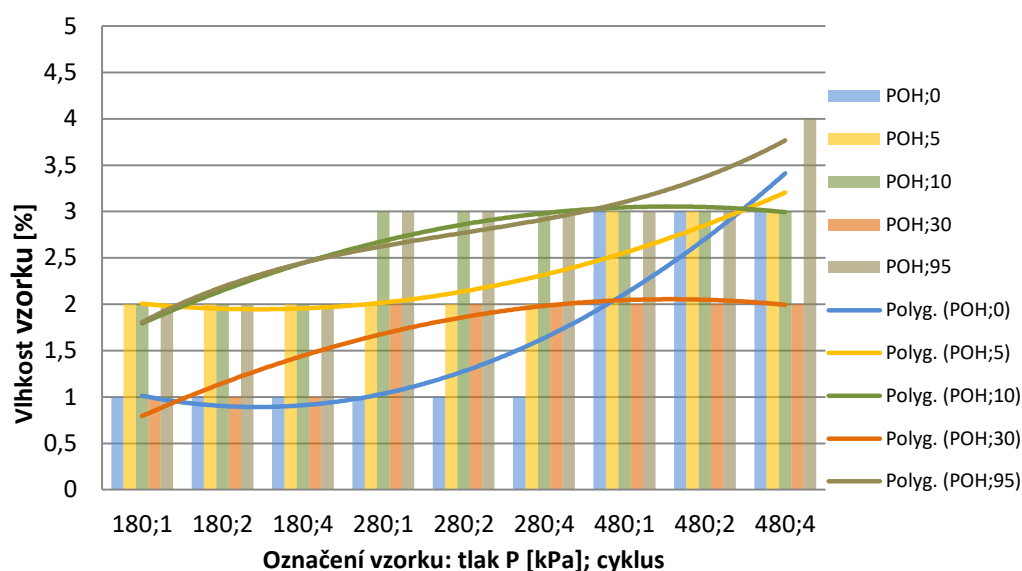
Další zajímavý poznatek byl zjištěn při opakovaném vystavení téhož vzorku nadlimitnímu zatížení nad definovanou mez únosnosti. Výsledkem bylo zjištění značného snížení prvotně zjištěné meze únosnosti vyčtené z odpovídající křivky na obrázku 5.17.



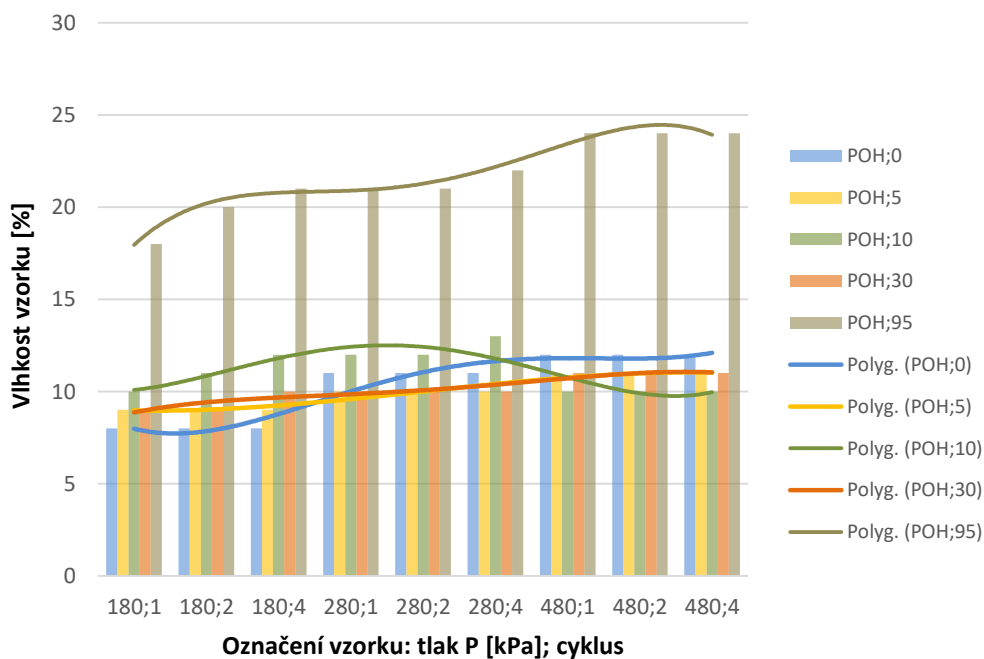
**Obrázek 5.17:** Mez únosnosti vybraných vzorků při počáteční vlhkosti 24 %

Pro polní podmínky by mohly být křivky vyloženy tak, že při nedostatku půdní organické hmoty a za určité vlhkosti bude docházet k částečnému hnětení půdy za současného porušování půdní struktury a půdních mikro-agregátů s následkem utužování půdy s kumulativním charakterem, kterým bude následně ovlivňována mez únosnosti půdy.

Vlhkost byla vždy sjednocena při plnění zkušebního přípravku upraveným půdním vzorkem. Výchozí vlhkost měřena vlhkostní sondou byla vždy pro vzorek nezatížený ve volném uložení nasypáním do zkušebního přípravku. Vlhkost byla nadále sledována po každé fázi zatížení. Obrázky 5.18, 5.19, 5.20 a 5.21 zaznamenávají změnu vlhkosti vzorků v závislosti na velikosti zatížení, cyklu a obsahu POH.

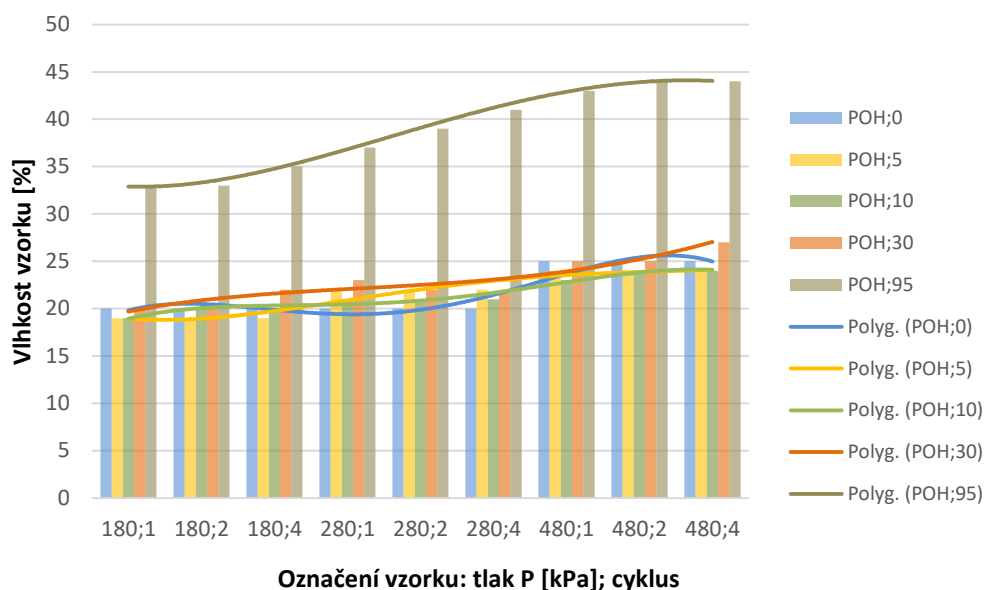


**Obrázek 5.18:** Změna vlhkosti vzorku v závislosti na působícím tlaku a cyklu zatížení pro celou škálu POH při počáteční vlhkosti 1 %

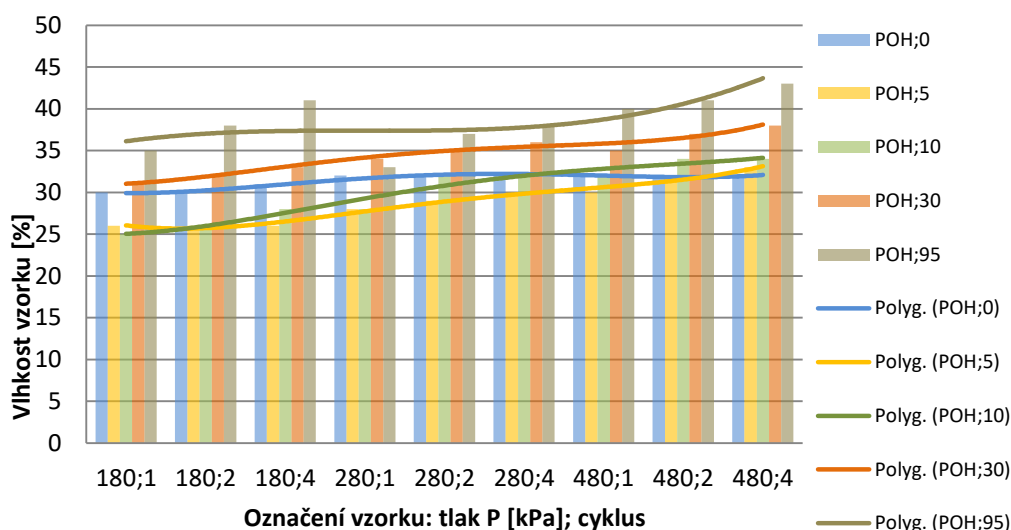


**Obrázek 5.19:** Změna vlhkosti vzorku v závislosti na působícím tlaku a cyklu zatížení pro celou škálu POH při počáteční vlhkosti 8 %





**Obrázek 5.20:** Změna vlhkosti vzorku v závislosti na působícím tlaku a cyklu zatížení pro celou škálu POH při počáteční vlhkosti 16 %



**Obrázek 5.21:** Změna vlhkosti vzorku v závislosti na působícím tlaku a cyklu zatížení pro celou škálu POH při počáteční vlhkosti 24 %

Z hodnot zanesených do formy sloupcových grafů je patrná vlastnost zadržování většího množství vody půdní organickou hmotou než u půdních vzorků neobohacených nebo chudých na POH. V polních podmínkách by patrně docházelo při dostatečném obohacení půdy o POH k navýšení míry retenční vodní kapacity a zvýšení objemu dostupné vody pro rostliny. V návaznosti by se jednalo o schopnost půdy efektivně zadržovat např. větší množství náhlých vodních srážek a následně poskytovat zadrženou vodu rostlinám v příznivějším časovém horizontu rozložení.

## 6 Diskuse

Příkladem nesrovnalostí v problematice posuzování půdních vlastností by mohl být manuál ke komerčně dostupné soupravě penetrometru (v práci byl použit Penetrologger 06.15.SA společnosti Ekotechnika s.r.o), kde je např. sjednocován termín míra stlačení a únosnost půdy. Také tvrzení, že čím vyšší je obsah vlhkosti v půdě, tím nižší je odpor, a proto i nosnost půdy, není možno vzhledem k získaným datům z experimentálního měření považovat za směrodatné. V odborné literatuře se zaměřením na pěstování rostlin bývá uváděn penetrometrický odpor a jeho vliv na růst kořenů, ovšem bez dalších nutných specifikačních faktorů, kterými by měla být minimálně vlhkost, dále obsah humusu a půdní organické hmoty, ideálně specifikace z fyzikálního a chemického rozboru půdy atp.

Pro rozšíření konceptu experimentálního stanovování půdních vlastností je závěrem uvedeno několik převzatých postřehů a úvah z citované odborné literatury pro návazný výzkum a vyhodnocování primárních dat. Spolehlivost a vypovídací hodnota penetrometrie úzce souvisí s vlhkostí, minerálním složením půdního skeletu a obsahem půdní organické hmoty.

Utuzení roste v závislosti na frekvenci zatěžování povrchu externím kontaktním tlakem. K největší objemové změně dochází při prvním zatížení, zvláště u půd s nízkým obsahem strukturních agregátů a přeměněné organické hmoty, resp. humusu. Změna vlhkostních podmínek, mechanické narušení a časový interval mezi jednotlivými zatíženími ovlivňuje restrukturalizační proces půdy.

Přírozně nestrukturní půda s nedostatečným obsahem primární a přeměněné organické hmoty bývá za zvýšené vlhkosti po mechanické kultivaci náchylná k tvorbě tzv. sekundárních pseudo-agregátů. Půda dostatečně obohacená o organickou hmotu nepodléhá tak snadno utužení či rozbředání, v širším intervalu půdně-klimatických faktorů udržuje žádoucí strukturu jemně drobtovitou a neklesá její únosnost i po opakované expozici nadlimitnímu zatížením tak rapidně, jako je tomu u půd chudých na organickou hmotu.

V závislosti na obsahu POH v orničním profilu se mění partikulární chování půdních částic a rozložení působícího kontaktního tlaku v půdním profilu je s tímto jevem v ne zcela objasněné korelaci. Problém je řešen právě při tvorbě modelových počítačových simulací utužení půdy v závislosti na pojezdu zemědělské techniky.

## Závěr

Hlavním výstupem této práce je soubor primárních, experimentálně stanovených dat umožňujících následnou kvantifikaci vybraných fyzikálních parametrů zkušebních vzorků půd za podpory počítačového modelování. Navržený metodický postup byl v průběhu měření pozměněn a optimalizován a pro následné využití k návaznému výzkumu problematiky fyzikálních vlastností půd je dalším úpravám otevřen. Potřeba provedení metodické změny může nastat např. v důsledku přidání rozšiřujícího faktoru sledování.

Specifické faktory vstupních proměnných charakterizující půdní vzorek nebyly voleny jako limitní a to z důvodu možnosti sledování průběžných změn a jejich závislostních trendů, opět s přihlédnutím k požadavku pořizování dat k potřebám tvorby počítačových modelů. Tyto limitní hodnoty by však bylo vhodné do navazujícího výzkumu zařadit v souvislosti se zhodnocením dat pro zemědělskou praxi. Příkladem užitečného výstupu by mohlo být navržené doplňkové měření meze únosnosti půdy v závislosti na faktoru vlhkosti, obsahu organické hmoty a počtu zatížení nadlimitním kontaktním tlakem.

Pro účely dlouhodobějšího prohlubujícího výzkumu a zpřesňování experimentálně získávaných dat by přicházeli do úvahy např. možnosti sledování změn navrhovaných faktorů v časovém horizontu popř. za proměnných půdně-mikroklimatických podmínek. Data by následně sloužila ke komparaci s modelovými hodnotami. V literárním přehledu práce jsou uvedeny možné provázanosti vybraných činitelů majících vliv na sledované agrotechnické vlastnosti zemědělských půd.

Vzhledem k značné rozmanitosti možných půdních substrátů, rozsáhlosti širší intervalů vstupních proměnných a nepřehledného množství možností zhodnocení získaných dat jsou v kapitole 5.1 Syntéza primárních dat uvedeny návrhy interpretace se zaměřením na vypovídací hodnotu pro potřebu zemědělské praxe. Surová data zařazena do přílohy této práce je možné použít jako data podkladová k vývoji počítačového modelu utužování půd v důsledku využívání zemědělské techniky. Hlavním faktorem závislosti byl zvolen obsah půdní organické hmoty. Závěrem je, že obsah POH znatelně ovlivňuje fyzikální vlastnosti půdy a pokles obsahu POH v systémech intenzivního zemědělství má za následek agrotechnologické degradační změny půdního fondu.

## Přehled použité literatury

ANSORGE, D. et al., *The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction*, Part 1: Single axle-studies; Biosystems Engineering Volume 98, Issue 1, September 2007, Pages 115-126; dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.06.005>

BEDRNA, Z. et al., 1968. *Pol'nohospodárske pôdoznalectvo 1.vyd.* Slovenské vydavateľstvo pôdohospodárskej literatúry, Bratislava.

CABLÍK, Jan a Karel JŮVA. *Protierozní ochrana půdy*. Druhé, přepracované a rozšířené vydání. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1963. Rostlinná výroba.

HORÁČEK, Jan, Rostislav LEDVINA a Jitka KOUBALÍKOVÁ. *Geologie a půdoznalství: cvičení pro I. ročník studia*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 1994. ISBN 80-7040-106-0.

HRAŠKO, J. et al., 1988. *Aplikované pôdoznalectvo*. Bratislava.

HŮLA, Josef. *Půdoochranné technologie zakládání porostů plodin: (technika v půdoochranných technologiích) : (studijní zpráva)*. Praha: ÚZPI, 2000. Studijní informace: zemědělská technika. ISBN 80-7271-060-5.

HŮLA, Josef a Blanka PROCHÁZKOVÁ. *Vliv minimalizačních a půdoochranných technologií na plodiny, půdní prostředí a ekonomiku*. Praha: ÚZPI, 2002. Zemědělské informace. ISBN 80-7271-106-7.

HŮLA, Josef a Blanka PROCHÁZKOVÁ. *Minimalizace zpracování půdy*. Praha: Profi Press, 2008. ISBN 978-80-86726-28-1.

- JANEČEK, Miloslav. *Nové směry v protierozní ochraně půdy: (studijní zpráva)*. Praha: ÚZPI, 1999. Studijní informace: rostlinná výroba. ISBN 80-86153-93-2.
- JANDÁK, Jiří, Alois PRAX a Eduard POKORNÝ. *Půdoznalství*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2004. ISBN 80-7157-559-3.
- KALINOVÁ, Jana. *Půdní úrodnost, výživa a hnojení rostlin v ekologickém zemědělství: odborná monografie*. Č. Budějovice: ZF JU, 2007. ISBN 978-80-7394-029-4.
- KOLÁŘ, Ladislav. *Agrochemie a pedologie*. Praha: SPN, 1975.
- KOLÁŘ, Ladislav a Rostislav LEDVINA. *Cvičení z pedologie a geologie*. Praha: SPN, 1976.
- KOLÁŘ, Ladislav. *Organické hnojení a humus*. Praha: VŠZ (Praha), 1988.
- KUTÍLEK, Miroslav, Václav KURÁŽ a Milena CÍSLEROVÁ. *Hydropedologie 10*. 2. přeprac. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02237-4.
- KVĚCH, Otomar a Vítězslav ŠKODA. *Současné a perspektivní způsoby zpracování půdy*. Praha: VŠZ (Praha), 1985.
- LAMANDÉ, M. et al., *Risk assessment of soil compaction in Europe – Rubber tracks or wheels on machinery*; CATENA Volume 167, August 2018, Pages 353-362; dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.015>
- LHOTSKÝ, Jiří. *Kultivace a rekultivace půd*. Praha-Zbraslav: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 1994.
- LHOTSKÝ, Jiří. *Zhutňování půd a opatření proti němu: (studijní zpráva)*. Praha: ÚZPI, 2000. Studijní informace: rostlinná výroba. ISBN 80-7271-067-2.

MIKULA, Pavel. *Organická hmota v půdě: (studijní zpráva)*. Praha: ÚZPI, 1998. Studijní informace: rostlinná výroba. ISBN 80-66153-22-3.

MOHSENI MANESH, A. et al.; *Estimation of a three-dimensional tyre footprint using dynamic soil–tyre contact pressures*; Journal of Terramechanics; Volume 47, Issue 6, December 2010, Pages 415-421; dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2010.02.003>

MYSLIVEC, A. 1948. *Mechanika zemin 1. díl, Fyzikální vlastnosti zemin*. České vysoké učení technické, Praha.

MYSLIVEC, A. et al., 1970. *Mechanika zemin*. SNTL Nakladatelství technické literatury, Bratislava.

PAVEL, Lubomír. *Geologie a půdoznalství*. Praha: Vysoká škola zemědělská (Praha), 1984.

RAGUIARA, P. Silva et al., *Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method*. Soil and Tillage Research Volume 181, September 2018, Pages 1-10; dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.019>

RENATO, P. de Lima et al., *Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic*; Biosystems Engineering Volume 162, October 2017, Pages 1-10; dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.07.002>

RICHTER, Rostislav. *Půdní úrodnost*. 2. vyd. Praha: Institut výchovy a vzdělávání MZe ČR, 1997. ISBN 80-7105-145-4.

RICHTER, Rostislav a Jaromír KUBÁT. *Organická hnojiva, jejich výroba a použití*. [1. vyd.]. Praha: ÚZPI, 2003. ISBN 80-7271-133-4.

SÁŇKA, Milan a Jan MATERNA. *Indikátory kvality zemědělských a lesních půd ČR*. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR, 2004. Edice Planeta 2004 : odborný časopis pro životní prostředí.

SHAHGHOLI, G. et al.; *Measuring soil compaction and soil behavior under the tractor tire using strain transducer*; Journal of Terramechanics Volume 59, June 2015, Pages 19-25; dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.02.007>

ŠARAPATKA, Bořivoj, Pavel DLAPA a Zoltán BEDRNA. *Kvalita a degradace půdy*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2002. ISBN 80-244-0584-9.

ŠARAPATKA, Bořivoj. *Pedologie a ochrana půdy*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. Odborná publikace. ISBN 978-80-244-3736-1.

ŠANTRŮČKOVÁ, Hana. *Ekologie půdy*. České Budějovice: Biologická fakulta Jihočeské univerzity, 2001.

ŠIMEK, J. et al., 1990. *Mechanika zemin*. SNTL Nakladatelství technické literatury, Praha. ISBN 80-03-00428-4.

ŠIMEK, Miloslav. *Základy nauky o půdě*. České Budějovice: Biologická fakulta Jihočeské univerzity, 2003. ISBN 80-7040-630-5.

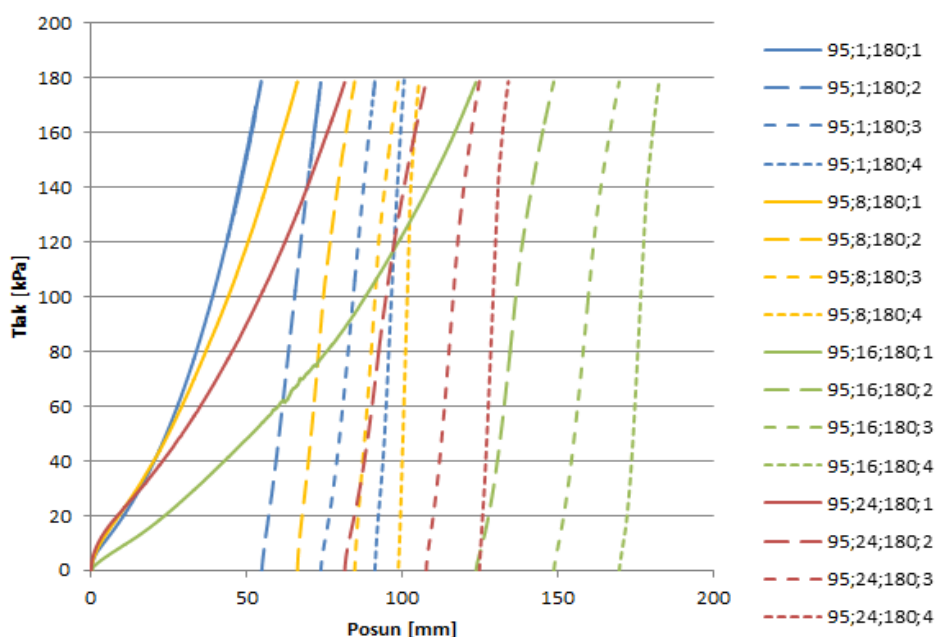
ŠIMEK, Miloslav. *Základy nauky o půdě*. České Budějovice: Biologická fakulta Jihočeské univerzity, 2004. ISBN 80-7040-667-4.

ŠIMEK, Miloslav. *Základy nauky o půdě*. 2. uprav. a rozš. vyd. České Budějovice: Biologická fakulta Jihočeské univerzity, 2005. ISBN 80-7040-747-6.

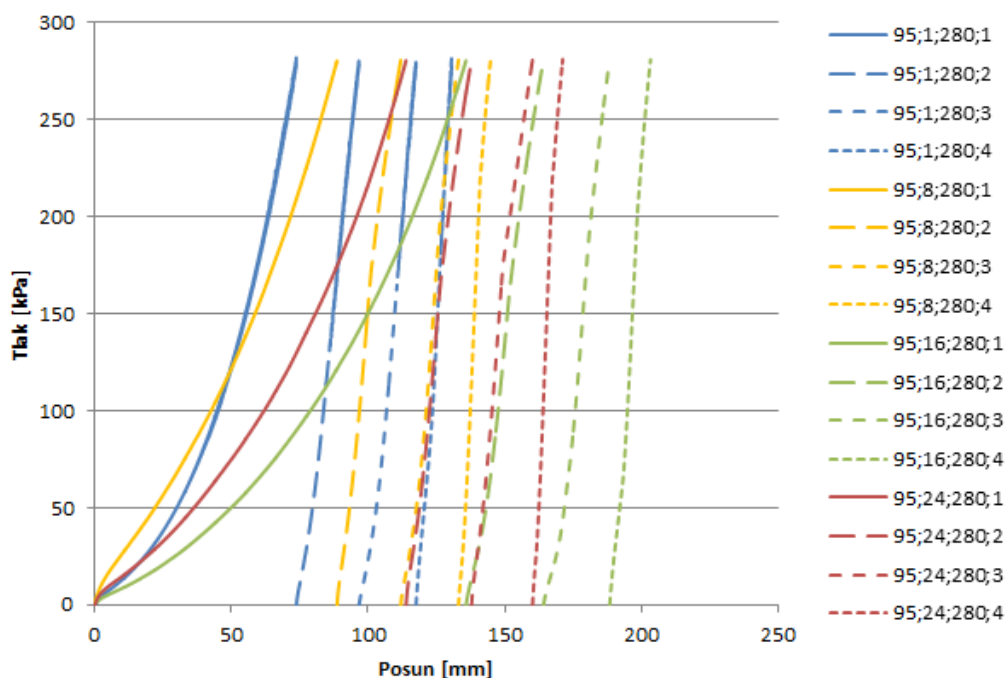
ŠIMON, Josef a Jiří LHOTSKÝ. *Zpracování a zúrodnování půd*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1989. Rostlinná výroba. ISBN 80-209-0048-9.

SOTÁKOVÁ, Soňa. *Organická hmota a úrodnost' půdy*. Bratislava: Příroda, 1982.

## Příloha 1

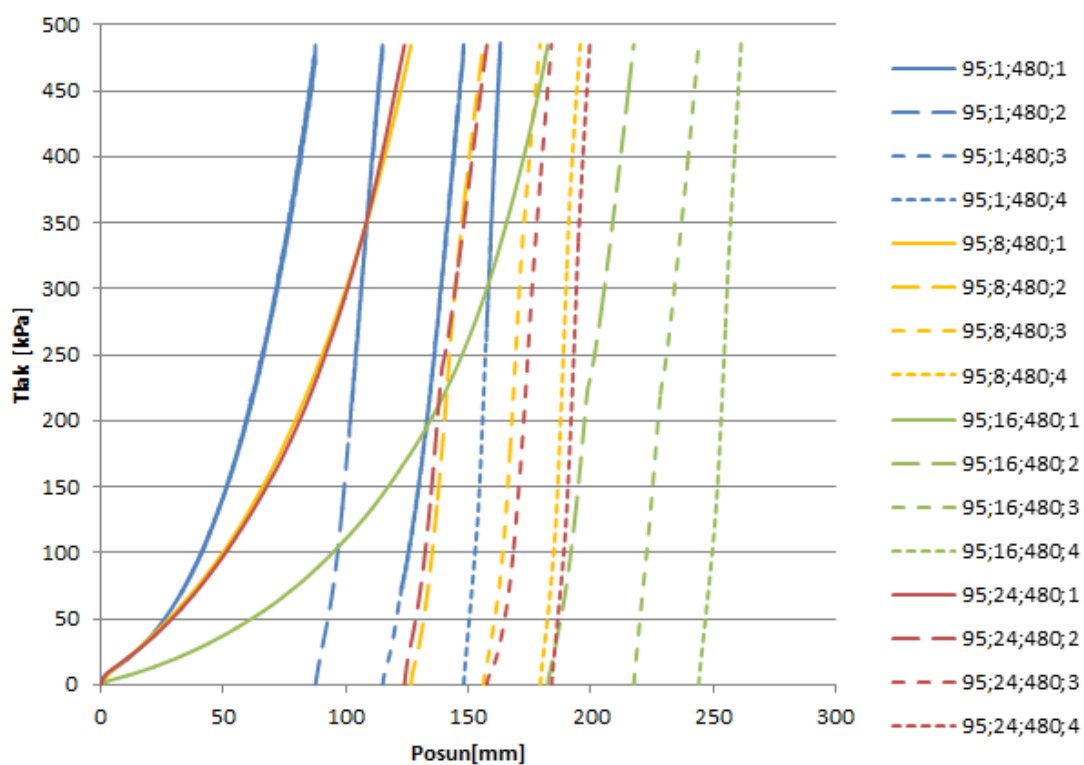


**Příloha 1.1:** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorek půdy obohacený na 95 % POH při počáteční vlhkosti 1, 8, 16 a 24 % do maximálního navoleného tlaku 180 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)



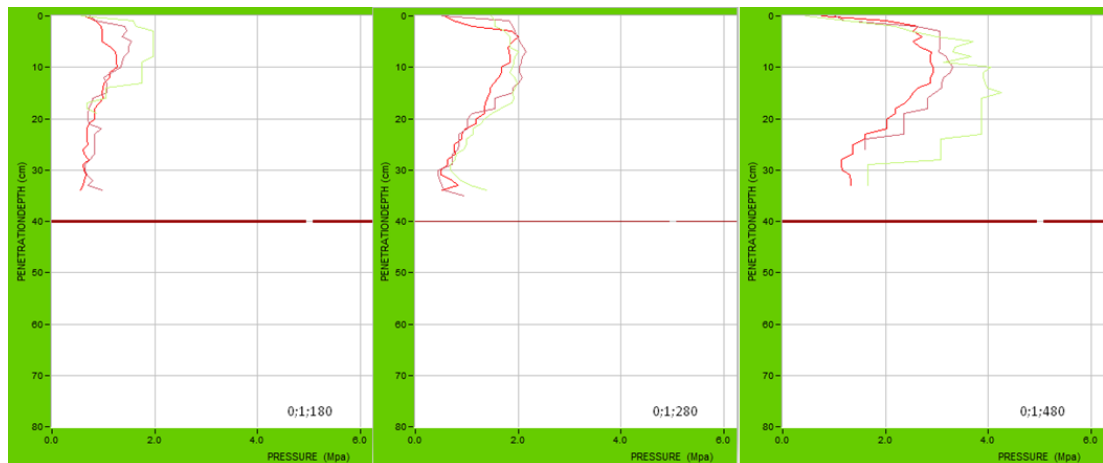
**Příloha 1.2** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorek půdy obohacený na 95 % POH při počáteční vlhkosti 1, 8, 16 a 24 % do maximálního navoleného tlaku 280 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)



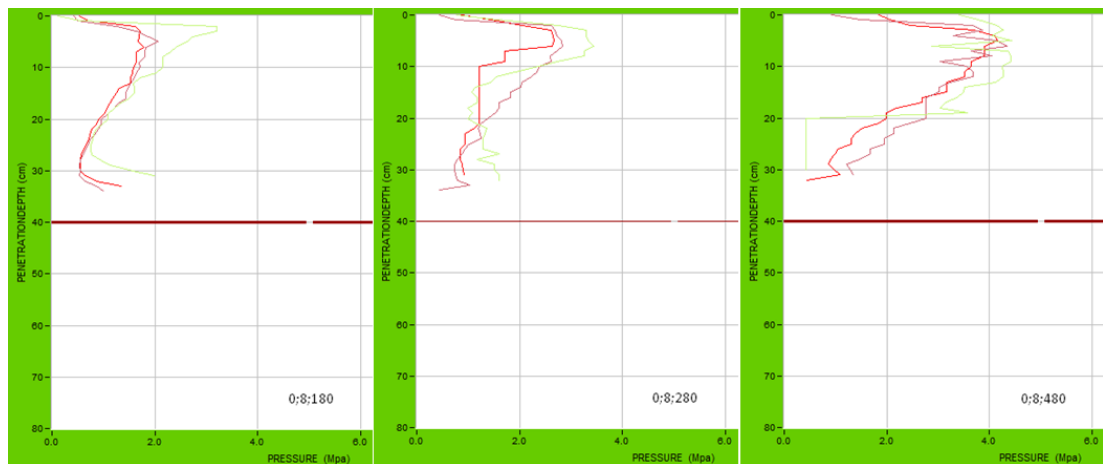


**Příloha 1.3:** Kompilace křivek závislosti stlačení půdy (posun [mm]) a působícího tlaku [kPa] pro zkušební vzorek půdy obohacený na 95 % POH při počáteční vlhkosti 1, 8, 16 a 24 % do maximálního navoleného tlaku 480 kPa ve 4 cyklech zatížení (viz značení v legendě grafu)

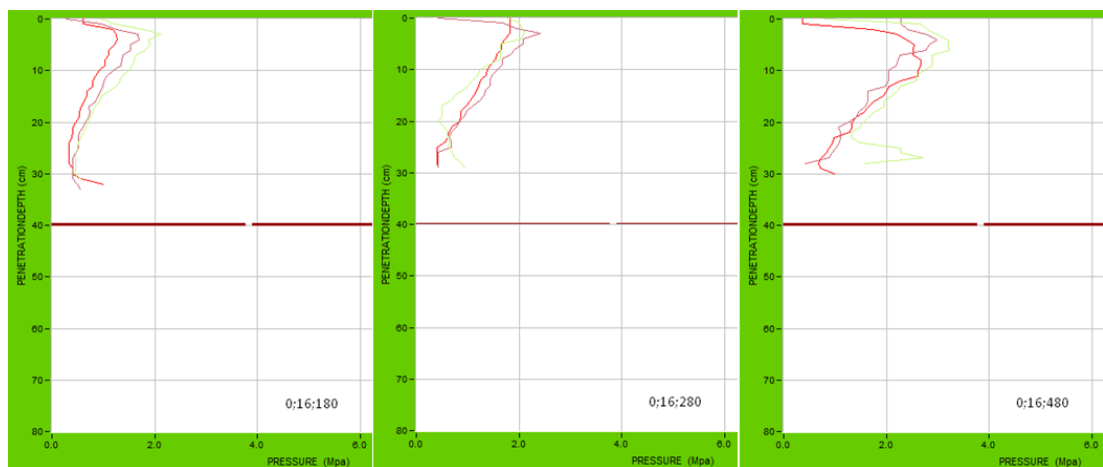
## Příloha 2



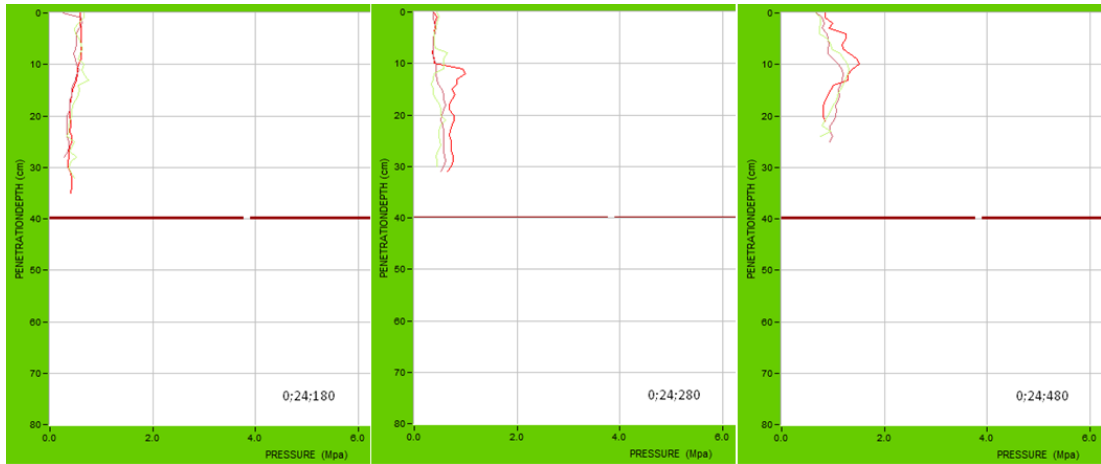
**Příloha 2.1 :** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek neobohacený o POH při výchozí vlhkosti 1 %



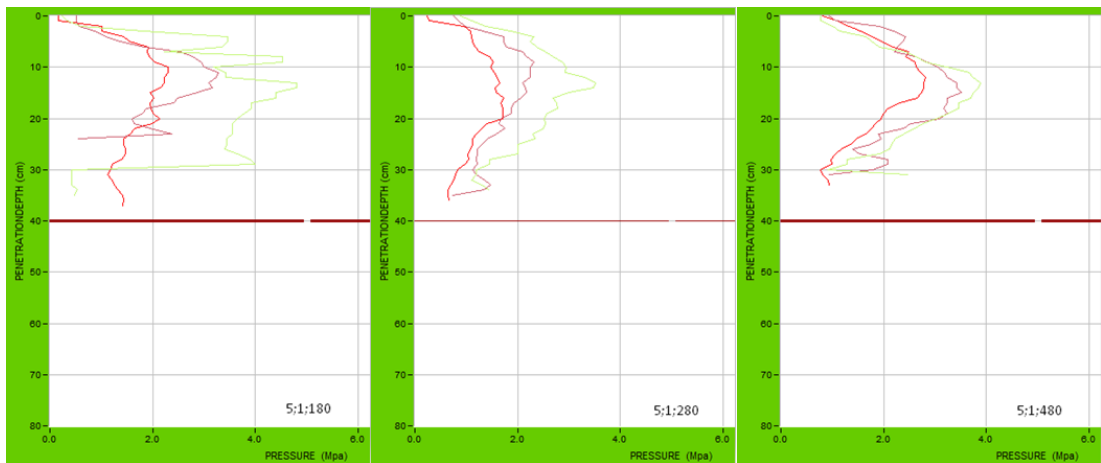
**Příloha 2.2 :** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek neobohacený o POH při výchozí vlhkosti 8 %



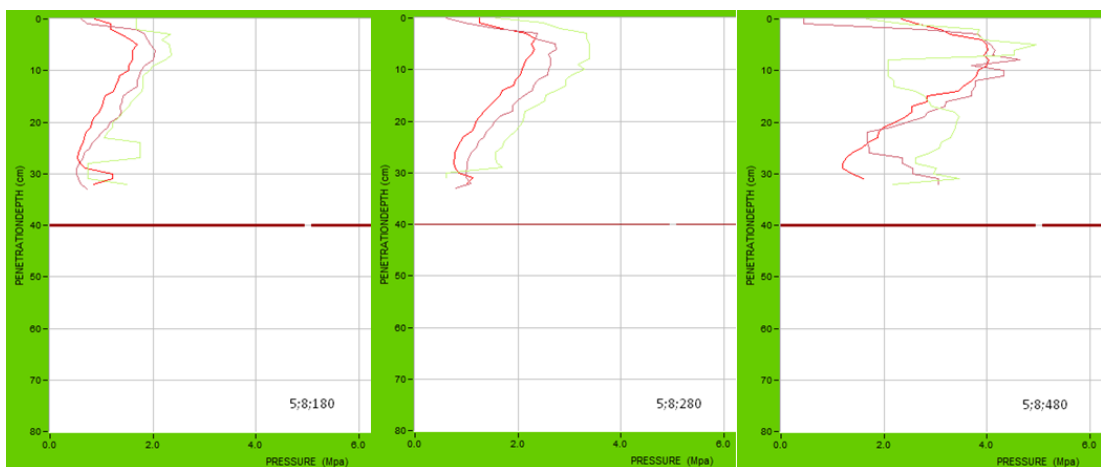
**Příloha 2.3 :** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek neobohacený o POH při výchozí vlhkosti 16 %



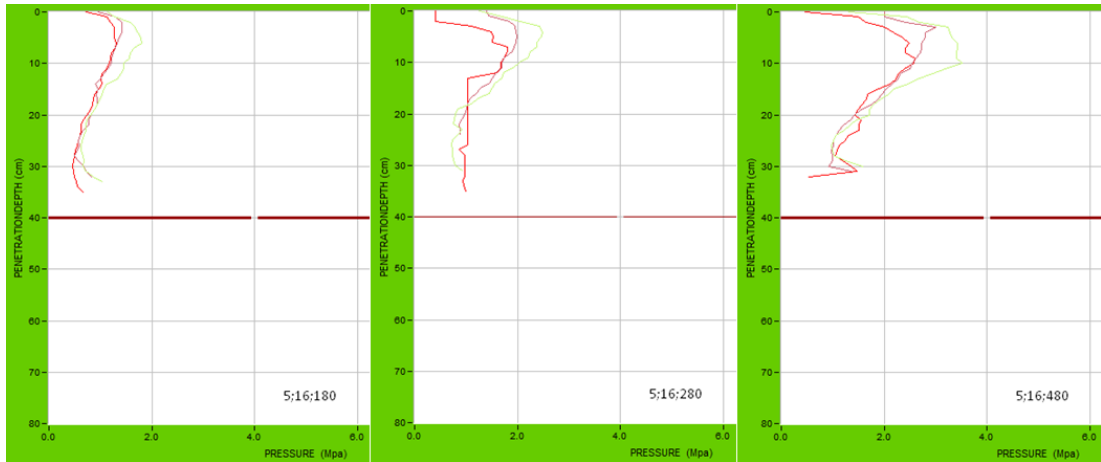
**Příloha 2.4:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek neobohacený o POH při výchozí vlhkosti 24 %



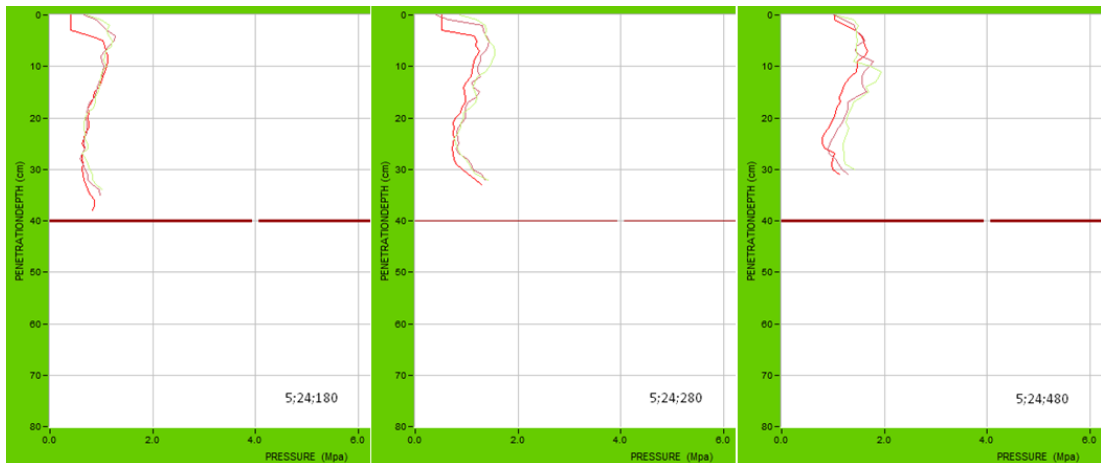
**Příloha 2.5:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený o 5 % POH při výchozí vlhkosti 1 %



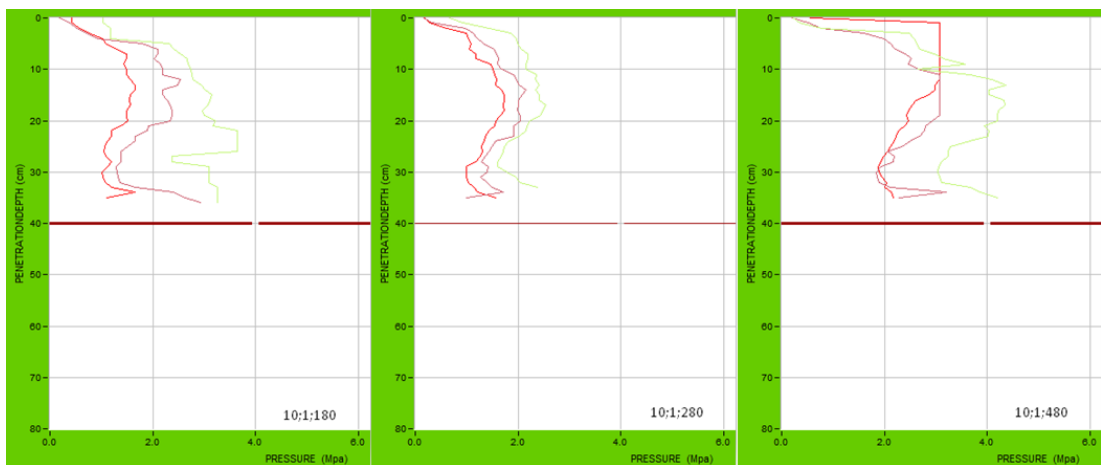
**Příloha 2.6:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený o 5 % POH při výchozí vlhkosti 8 %



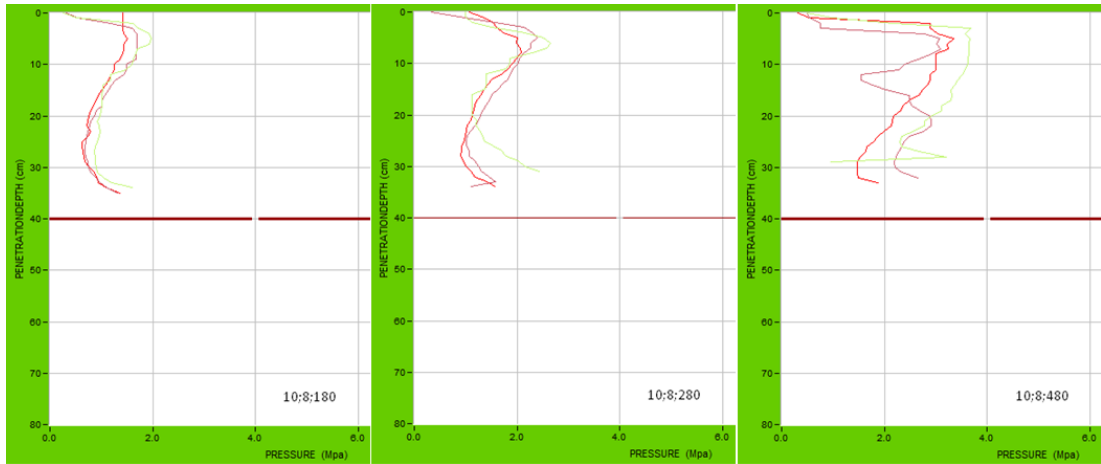
**Příloha 2.7:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený o 5 % POH při výchozí vlhkosti 16 %



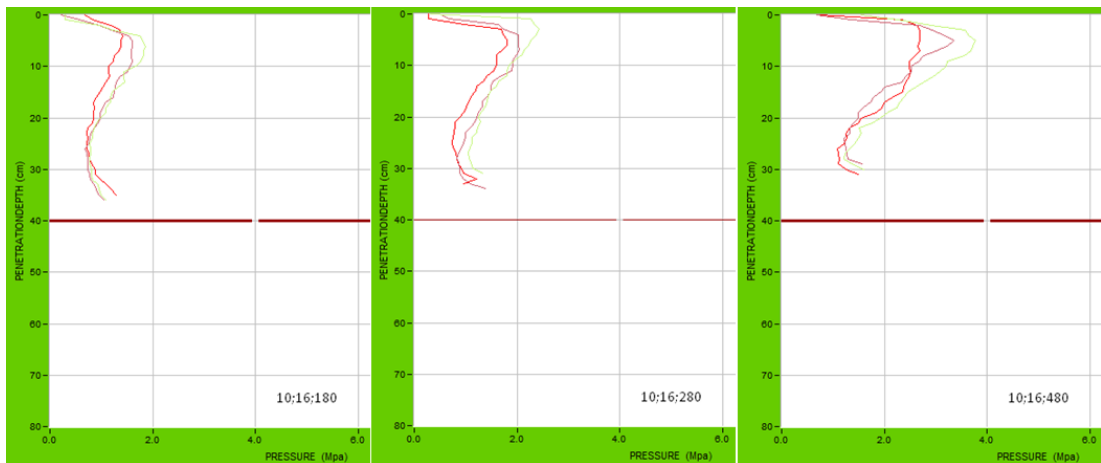
**Příloha 2.8:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený o 5 % POH při výchozí vlhkosti 24 %



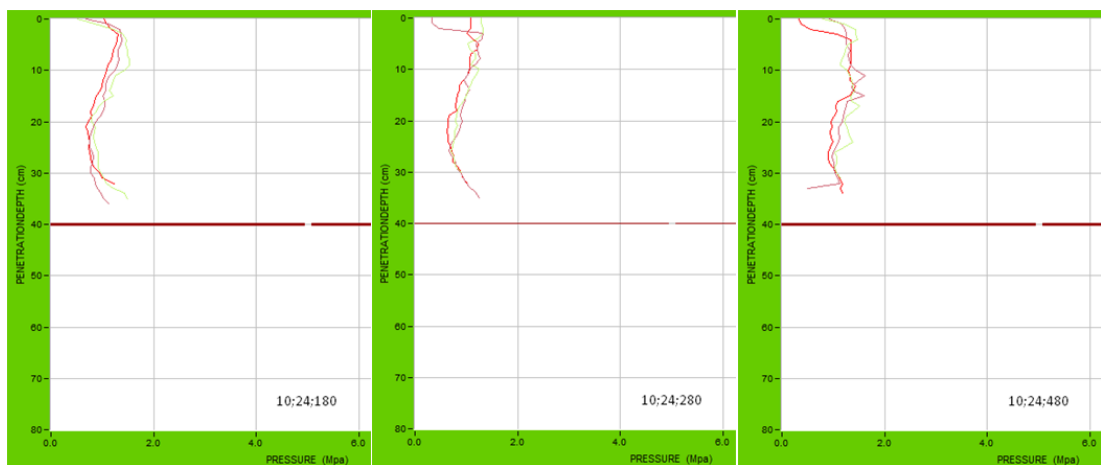
**Příloha 2.9:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený o 10 % POH při výchozí vlhkosti 1 %



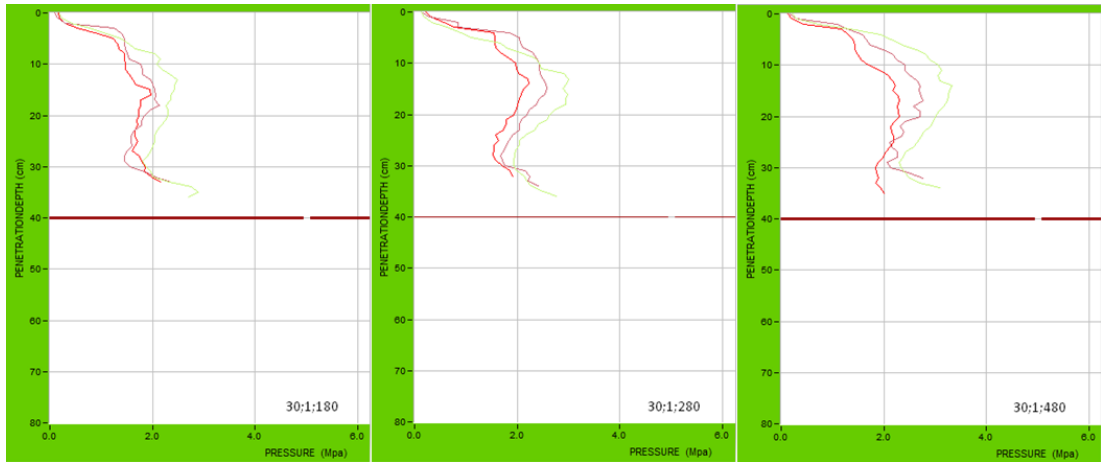
**Příloha 2.10:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený o 10 % POH při výchozí vlhkosti 8 %



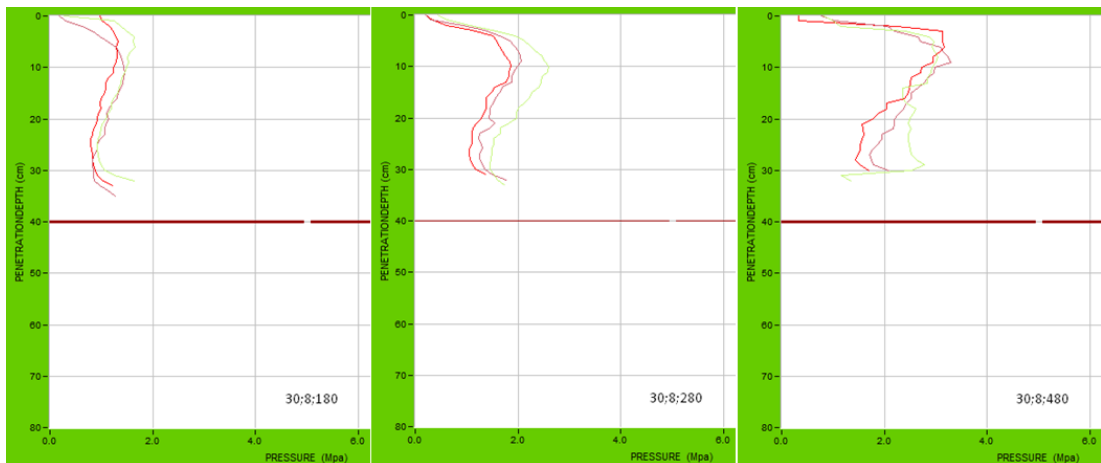
**Příloha 2.11:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený o 10 % POH při výchozí vlhkosti 16 %



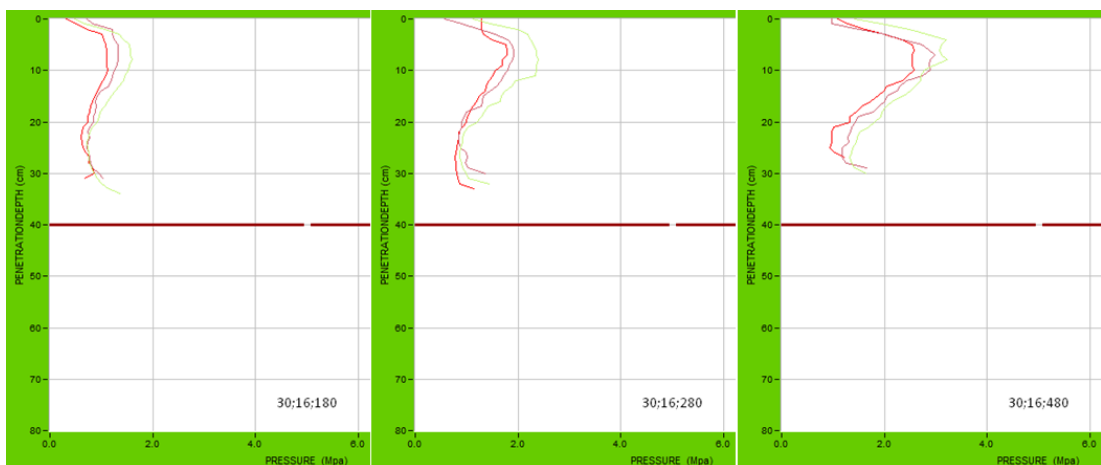
**Příloha 2.12:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený o 10 % POH při výchozí vlhkosti 24 %



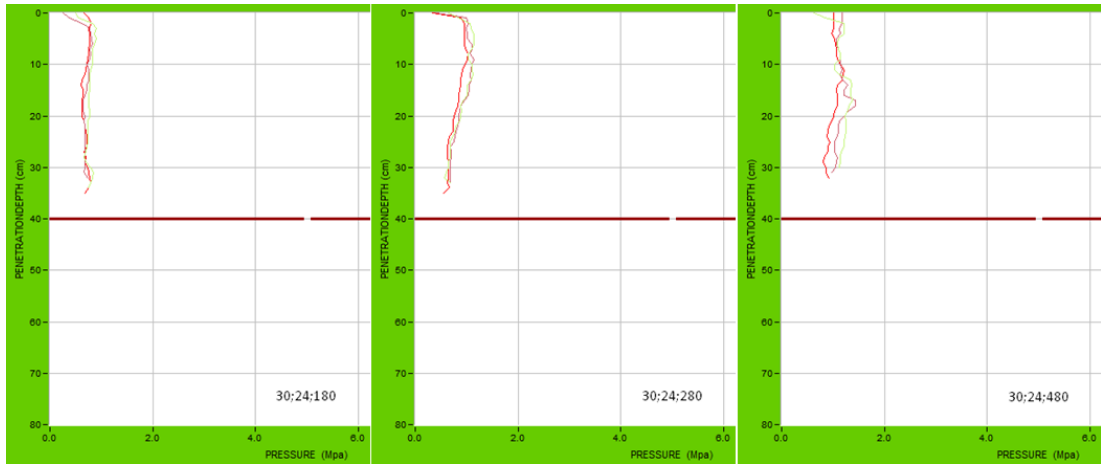
**Příloha 2.13:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený o 30 % POH při výchozí vlhkosti 1 %



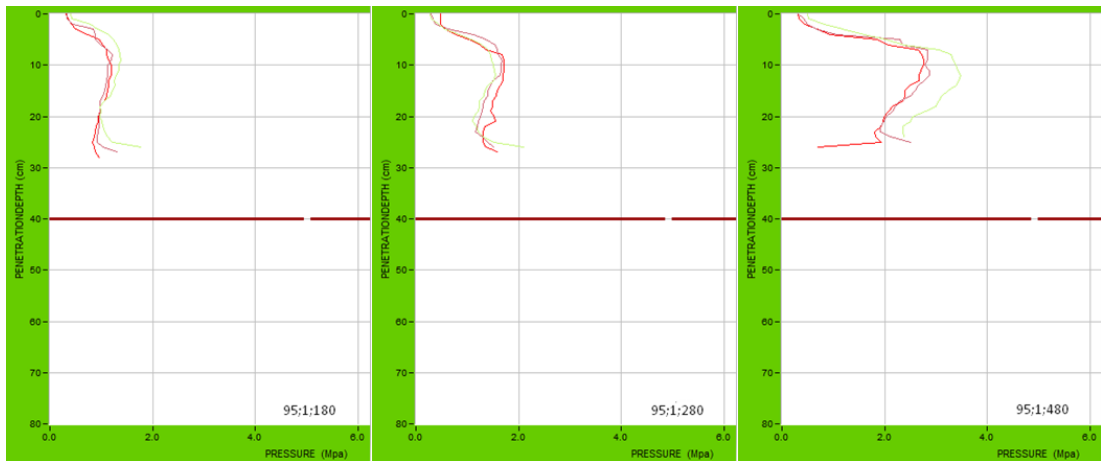
**Příloha 2.14:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený o 30 % POH při výchozí vlhkosti 8 %



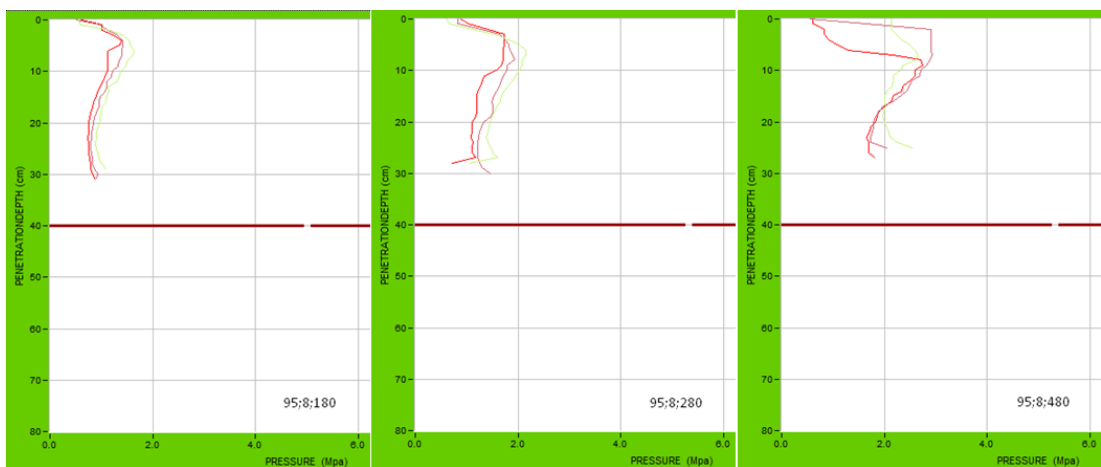
**Příloha 2.15:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený o 30 % POH při výchozí vlhkosti 16 %



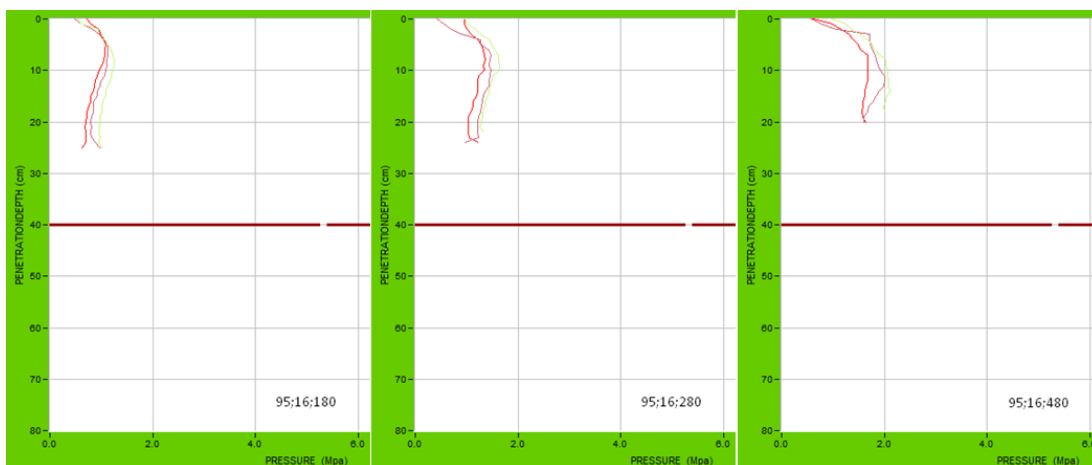
**Příloha 2.16:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený o 30 % POH při výchozí vlhkosti 24 %



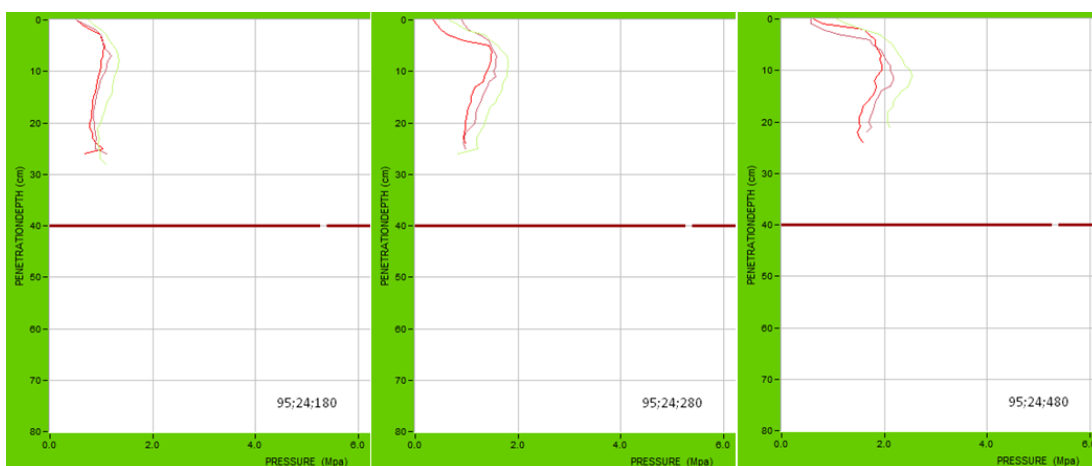
**Příloha 2.17:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený na 95 % POH při výchozí vlhkosti 1 %



**Příloha 2.18:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený na 95 % POH při výchozí vlhkosti 8 %



**Příloha 2.19:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený na 95 % POH při výchozí vlhkosti 16 %



**Příloha 2.20:** Sada křivek penetrometrického odporu vztaženého k hloubce průniku sondy pro vzorek obohacený na 95 % POH při výchozí vlhkosti 24 %