

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

Zemědělská fakulta

Studijní program: B4131 Zemědělství

Studijní obor: Zemědělská technika: obchod, servis a služby

Katedra: Katedra zemědělské, dopravní a manipulační techniky

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

Bakalářská práce

Program COMSOL Multiphysics jako prostředek
pro simulace utužení půdy pojezdem zemědělské
techniky

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Mgr. Tomáš Zoubek

Autor bakalářské práce: Jakub Staněk

České Budějovice, 2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub STANĚK**
Osobní číslo: **Z14662**
Studijní program: **B4131 Zemědělství**
Studijní obor: **Zemědělská technika: obchod, servis a služby**
Název tématu: **Program COMSOL Multiphysics jako prostředek pro simulace utužení půdy pojezdem zemědělské techniky**
Zadávající katedra: **Katedra zemědělské dopravní a manipulační techniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Student se bude ve své bakalářské práci zabývat využitím programu COMSOL Multiphysics ke studiu vlivu pojezdu zemědělské techniky na utužení půdy.


Účelem této práce je vytvořit materiál, který poslouží jako základní text pro orientaci v dané problematice. V praktické části student navrhne jednoduchý ukázkový model pro simulaci rozložení tlaků uvnitř půdy vyvolané působením dvou různých mechanizačních prostředků na povrch.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: minimálně 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

Hrach Rudolf: Počítačová fyzika 1, UJEP, Ústí nad Labem, 2003;
Manuál k programovému balíku COMSOL Multiphysics;
Interní materiály k předmětu Počítačová fyzika 1;
Keller, T. et al., 2014. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. Soil and Tillage Research, 140, pp.106-117;
Naveed, M. et al., 2016. Quantifying vertical stress transmission and compaction-induced soil structure using sensor mat and X-ray computed tomography. Soil and Tillage Research, 158, pp.110-122. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198715300714>;
Databáze www.sciencedirect.cz

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.
Katedra zemědělské dopravní a manipulační techniky
Konzultant bakalářské práce: Mgr. Tomáš Zoubek
Katedra zemědělské dopravní a manipulační techniky
Datum zadání bakalářské práce: 12. ledna 2016
Termín odevzdání bakalářské práce: 15. dubna 2017


prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc., dr. h. c.
děkan

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA
studijní oddělení
Studentská 1608, 370 05 České Budějovice


doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 10. března 2016

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě 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.

V Českých Budějovicích dne: 14.4.2017

.....

Jakub Staněk

Především bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce doc. RNDr. Petru Bartošovi Ph.D. za odborné vedení, poskytnutí cenných rad a zejména za jeho trpělivost. Dále bych rád poděkoval svému konzultantovi Mgr. Tomáši Zoubkovi za pomoc a čas, který mi v průběhu zpracování práce věnoval.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá využitelností programu COMSOL Multiphysics jako prostředku pro simulaci utužení půdy. Práce se skládá ze čtyř tematických celků. V první části je stručně popsána půda a její základní vlastnosti. Druhá část přibližuje problematiku utužení půdy vlivem pojezdu zemědělských strojů a jeho následky. Třetí část se zaměřuje na samotný software, jeho funkce, přídatné moduly a popis jednotlivých kroků, které je potřeba vykonat pro vytvoření modelu. V poslední části je popsán celý proces vytváření multifyzikální úlohy umožňující simulovat zatížení půdy a její deformaci vlivem působení váhy zemědělského stroje.

Klíčová slova: COMSOL Multiphysics, půda, utužení, modelování

Abstract

This bachelor work is concerned with an applicability of the program COMSOL Multiphysics as a device for a simulation of a solidify of a land. The work is composed of four thematic units. In the first one the land is described shortly and its basic property. The second unit is about problems of a solidify of a land under the influence of a roller of farming machines and its results. The third part is pointed on the software its functions, additional function and in the end on a short sequence of action, that is essential to do for making a model. On the last part the all process is described for creating of a multiphysical task with concrete numbers, that pretends loading of the land and its deformation due to a effect of weight of a farming machine.

Key words: COMSOL Multiphysics, land, solidify, simulation

Obsah

Úvod.....	9
1 Půda.....	11
1.1 Základní půdní složky.....	11
1.2 Půdní profil	13
1.3 Fyzikální vlastnosti půdy	14
1.3.1 Půdní druh.....	14
1.3.2 Půdní typ	15
1.3.3 Fyzikální veličiny.....	16
2 Utužení půdy	19
2.1 Vliv utužení	19
2.2 Zúrodnění půdy.....	21
3 Program COMSOL Multiphysics	21
3.1 Structural Mechanical Module	22
3.2 Geomechanical Module	23
4 Postup vytváření modelu.....	23
4.1 Výběr pracovního prostoru	23
4.2 Výběr fyzikálního rozhraní studie	24
4.3 Vytvoření objektů	24
4.4 Zvolení materiálu a vlastností.....	24
4.5 Určení okrajových podmínek	25
4.6 Vytvoření sítě.....	25
4.7 Vytvoření studie.....	25
5 Vytvoření modelu pro výpočet tlaku v půdě.....	26
5.1 Parametry modelu	26
5.1.1 Parametry kola	27

5.1.2 Parametry půdy	28
5.2 Tvorba modelu	29
5.2.1 Výběr pracovního prostoru	29
5.2.2 Výběr prostorové dimenze	30
5.2.3 Výběr fyzikálních rozhraní	30
5.2.4 Výběr studie	31
5.2.5 Vytvoření modelu	32
5.2.6 Volba materiálu	35
5.2.7 Určení okrajových podmínek	38
5.2.8 Vytvoření elementární sítě	40
5.2.9 Vytvoření studie a export dat	41
5.3 Výsledná studie	43
5.3.1 Porovnání dat pro přední a zadní kolo	45
Závěr	48
Literatura	49
Seznam obrázků	52
Seznam tabulek	53
Seznam použitých grafů	54

Úvod

Program COMSOL Multiphysics je softwarový nástroj, sloužící k modelování a simulaci multifyzikálních jevů. Tento program řeší úlohy především pomocí metody konečných prvků, čímž vznikl jeho původní název FEMLAB (Finite Element Method LABoratory). Díky jeho všestrannosti lze COMSOL Multiphysics uplatnit v mnoha oblastech fyziky a techniky, jako jsou například strojírenství, elektrotechnika, akustika, vedení tepla a další. Studie vytvořená v tomto softwaru napomáhá nejen získat řešení dané úlohy, ale také k pochopit mnoho fyzikálních zákonů. K programu je možné dokoupit nastavbové moduly, které ještě více rozšíří aplikovatelnost tohoto softwaru.

Jedním z nastavbových modulů je Geomechanical modul, který slouží k řešení úloh týkajících se půdy. V dnešní době má největší zastoupení v geodezii, kde napomáhá diagnostikovat chování půdního profilu například na svazích, kde je zvýšené riziko sesuv půdy. Tento modul lze však aplikovat i do jiných vědních oborů. Tato práce se bude zabývat především jeho využitím v zemědělství, kde může napomoci vyřešit problematiku týkající se utužení půdy vlivem pojezdu zemědělské techniky.

V první části této práce budou uvedeny základní informace o půdě, které je třeba znát k další práci s programem. Jsou zde uvedeny základní půdní druhy, typy a především fyzikální vlastnosti půdy, pomocí kterých lze definovat její chování, a je možné tak správně nastavit podmínky pro řešení dané problematiky.

Druhá část práce se zabývá samotnou problematikou utužení půdy. V dnešní době nelze říci, jaký bude dlouhodobý dopad utužování půd a do jaké míry je tento jev nezvratný. Tato část popisuje, jak k utužení dochází a jaké jsou nejzásadnější aspekty ovlivňující tento proces.

Třetí kapitola podrobněji popisuje program COMSOL Multiphysics a jeho možnosti. Je zde popsána možnost přidání různých doplňkových modulů, ale i konektivita tohoto softwaru s jinými programy. Druhá část této kapitoly popisuje stručný postup při vytváření modelu a řešení problému.

Ve čtvrté části této práce bude krok po kroku vypracován model zatížení kola zemědělského stroje na půdu. Veškeré hodnoty v něm použité budou reálné a v praxi

použitelné. Na konci této kapitoly bude pro porovnání vytvořen druhý model s odlišnými hodnotami.

V poslední části bude zhodnocena práce s programem, jeho přínos do zemědělství a jeho využitelnost v praxi.

Proces modelování byl vytvořen ve školní verzi COMSOLu Multiphysics ve verzi 5.2 s nastavbovým modulem Geomechanical module. Značnou část teoretických údajů o programu jsem čerpal z domovských stránek programu COMSOL Multiphysics.

1 Půda

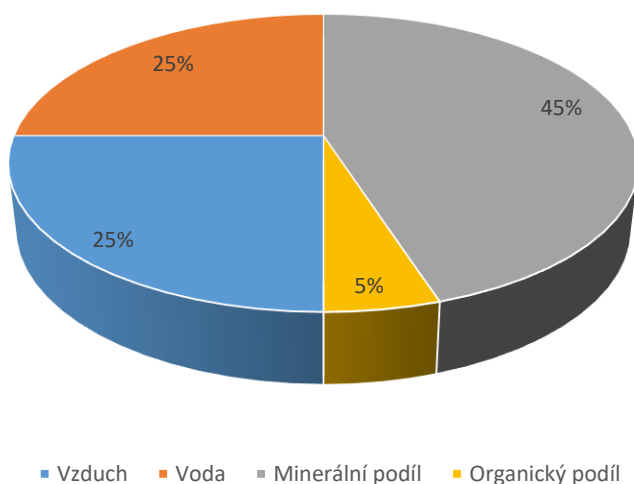
„Půda je samostatný přírodní útvar vzniklý z povrchových zvětralin zemské kůry a z organických zbytků za působení půdotvorných faktorů“ [1].

1.1 Základní půdní složky

Půda se skládá ze dvou základních částí, a to z **pevných částic** (minerální a organický podíl) a z **půdních pórů** (voda, vzduch). Nejrozmanitější částí půdní složky jsou organismy, bez kterých se z půdy stává pouhý **substrát** [2 - 3].

Grafu č. 1 charakterizuje jejich jednotlivé zastoupení, které je v praxi ovšem velice proměnlivé a to zejména kvůli kapilární části. Její vliv závisí na půdním druhu, umístění půdního profilu a podnebí, které hraje pravděpodobně největší roli. V neposlední řadě hraje také roli utužení půdy zemědělskou technikou, kterým se tato práce zabývá. V grafu č.1 je uvedena hlinitá půda bohatá na minerály, která je vhodná pro růst rostlin [2].

Průměrné zastoupení jednotlivých složek minerální hlinité půdy v ČR



Graf č.1: Zastoupení minerálních složek [2]

Minerální podíl je tvořen různými sloučeninami a částicemi o různé velikosti, které v určitém uskupení a procentuálním zastoupení tvoří zrnitostní složení půdy (texturu). Půdní částice se v přírodě vyskytují buď jednotlivě nebo tvoří půdní frakce díky svému specifickému uspořádání. Frakce mohou mít různý tvar například granule, desky, bloky, hranoly nebo sloupce, čímž **vzniká struktura půdy** [2 - 4].

Organickou část tvoří odumřelé rostliny a živočichové, kteří se v půdě rozkládají na jiné látky. Při konečné fázi této přeměny, zahrnující rozkladné i syntetické přeměny, vzniká **humus**. Jedná se o neúrodnější část půdy, která zásobuje rostliny živinami a energií [2 - 4].

Kapalnou částí půdy je **půdní voda**. Jedná se spíše o vodný roztok obsahující různé množství minerálních a organických látek, díky kterým jsou rostliny zásobeny živinami. Tento roztok nepřesahuje koncentraci 1 %, většinou je ale nižší, kolem 0,05 %. Nejdůležitější parametr, který se měří v půdní vodě, je její pH (acidita a alkalita) [2 - 4].

V půdních pórech se kromě půdní vody nachází i **půdní vzduch**. U půdního vzduchu se neměří jen jeho zastoupení v půdě, ale také jeho složení, které je jiné než složení atmosférického vzduchu. Obsahuje totiž méně O₂ a více CO₂ a často má až 100 % vlhkost. Půdní vzduch se vyznačuje i velkým obsahem jiných plynů, jako je například metan, oxid dusný, síra, sirovodík, uhlovodíku a jiné [2 - 4].

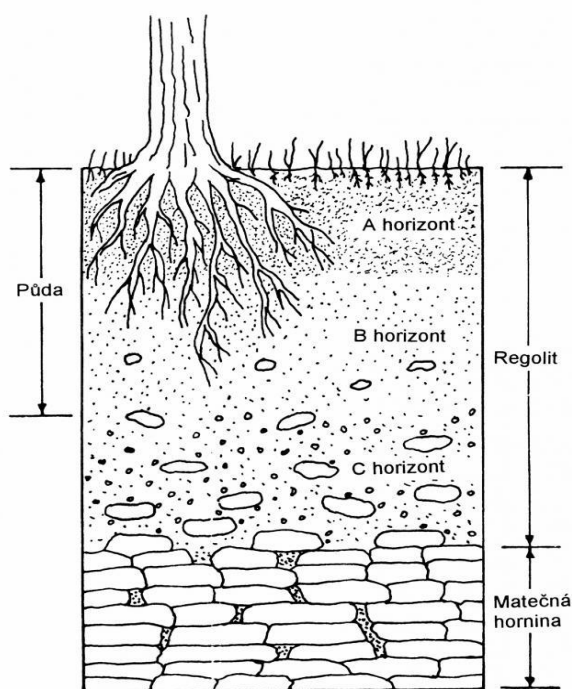
Poslední a nedílnou součástí půdy jsou **půdní organismy**, díky kterým získává jedinečné vlastnosti potřebné pro růst a vývoj rostlin. Půdními organismy mohou být jednoduché mikroorganismy, sinice, řasy, ale i prvoci až obratlovci. Díky těmto organismům může v půdě probíhat nepřetržitý tok látek a jiné procesy [2 - 4].

1.2 Půdní profil

Půdní profil je tvořen z několika částí. Základní stavební složkou půdy je mateční hornina nebo také matečná hornina. K přeměně mateční horniny na půdu dochází vlivem zvětrávání, což je velice dlouhý proces a v našich podmínkách se vytvoří přibližně 10 mm silná vrstva půdy za 100 let [5].

Při zvětrání mateční horniny vzniká tzv. **regolit**. Tento neuspořádaný materiál překrývající matečnou horninu má tloušťku od několika milimetrů, až po několik metrů. Profil regolitu může být vytvořen i přesuvem materiálu z jiného místa za působení větru, vody nebo posuvu ledovce [6].

Při pohledu na řez půdy, se ukazuje, že i regolit se dále dělí na vrstvy. Těmito vrstvám se říká **půdní horizonty** (obr. č. 1). Tyto vrstvy klasifikují půdu a řadí ji do určitých skupin. U agrotechnicky obdělávaných půd se dále rozlišuje **orniční vrstva**, která je 20 – 30 cm mocná a je pravidelně zpracovávána (kypřená, oraná) a **podorniční**, které se také říká **spodina**. Právě tato vrstva je nejvíce ovlivněna utužením půdy [6].



Obr. č. 1: Půdní horizont

1.3 Fyzikální vlastnosti půdy

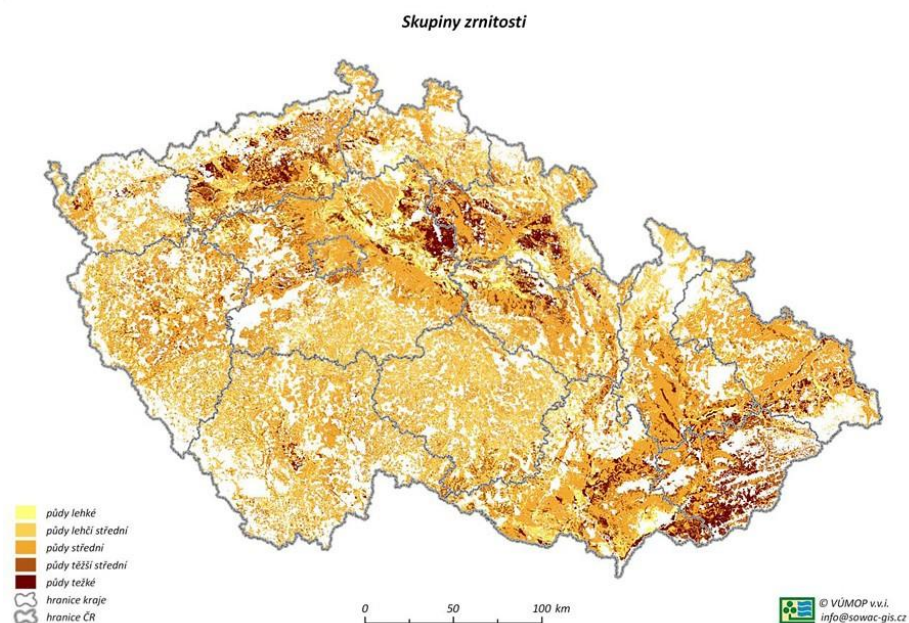
Podle fyzikálních vlastností můžeme určit, jak se bude půda v určitých podmínkách chovat. Můžeme určit kohezi, adhezi, konzistenci, uléhavost, hutnost, hrudkovatění a další. Některé vlastnosti jsou konstantní a určují se pouze podle půdního druhu nebo typu (hmotnost, textura), jiné jsou velice proměnlivé (vlhkost, aerační status) [7].

1.3.1 Půdní druh

Půdu, tedy její pevnou část, lze charakterizovat podle velikosti částic (zrn). Při uskupení zrn určité velikosti začínáme hovořit o frakci (zrnitostní kategorii). Půdu takto tvoří mnoho frakcí a tím určují její zrnitost, díky čemuž je možno ji zařadit do **půdních druhů**. Rozdělení do půdních druhů je základním fyzikálním rozdělením půdy. V tabulce č. 1 je znázorněna klasifikační stupnice půdních druhů podle Nováka. Na obrázku č. 2 je barevně vyznačeno zastoupení skupin půd v ČR [8 - 9].

Půdní druh	Skupina půd	Obsah jílnatých částic (pod 0,01 mm)
Písčité	Lehké	0–10 % částic menších než 0,01 mm (půdy lehké)
Hlinitopísčité		10–20 % částic menších než 0,01 mm (půdy lehké)
Písčitohlinité	Střední	20–30 % částic menších než 0,01 mm (půdy střední)
Hlinité		30–45 % částic menších než 0,01 mm (půdy střední)
Jílovitohlinité	Těžké	45–60 % částic menších než 0,01 mm (půdy těžké)
Jílovité		60–75 % částic menších než 0,01 mm (půdy těžké)
Jíl		> 75 % částic menších než 0,01 mm (půdy těžké)

Tab. č. 1: Klasifikační stupnice půdních druhů [8]



Obr. č. 2: Grafické znázornění zrnitostních skupin v ČR [9]

1.3.2 Půdní typ

Půdu je možné dále klasifikovat podle **půdních typů**. Toto rozdělení vychází z uspořádání půdních horizontů a matečné horniny. Na území ČR se vyskytuje 18 z nich. Půdních typů je velké množství, níže jsou uvedeny ty nejčastější s jejich nejdůležitějšími vlastnostmi: [8 - 11]

- **Nivní půdy** – vznikají v blízkosti vodních toků, střední obsah humusu, dobré sorpční vlastnosti, příznivé fyzikální vlastnosti (louky, pastviny, pole)
- **Černice** – úrodné půdy, do velké míry provlhlé a těžké, na povrchu mají dobré fyzikální vlastnosti
- **Černozemě** – humusový horizont většinou 60 -80cm, odolná vodostálá struktura, dobré sorpční vlastnosti (stepi a lesostepi)
- **Hnědozemě** – středně těžké až těžké půdy, zhoršené sorpční vlastnosti, méně humusu než u černozemě, menší náchylnost k vysychání (lemují černozemě)
- **Illimerizované půdy** – jílem obohacená půda (oglejení), malá propustnost, vysoká vlhkost, středně těžké až těžké půdy (oblasti pahorkatin a vrchovin)

- **Hnědé lesní půdy** – lehké až těžké půdy podle druhu mateční horniny, stejně tak kolísají i fyzikální vlastnosti půdy, sorpční schopnost je většinou příznivá (převládající typ v ČR)
- **Podzolové půdy** – většinou lehké půdy, špatné sorpční vlastnosti, vcelku dobré fyzikální vlastnosti, málo úrodné půdy
- **Gleje** – špatné sorpční a fyzikální vlastnosti, vysoká hladina spodní vody, neúrodné půdy

1.3.3 Fyzikální veličiny

Jak již bylo řečeno, specifické (přesné) fyzikální vlastnosti lze určit podle několika veličin, které se mění podle jednotlivých vzorků půdy. Tyto veličiny jsou pro každý vzorek jiné a v některých případech se nemusí blížit ani průměrné hodnotě z několika měření.

Jednou ze základních veličin udávajících vlastnosti je **hustota**, která je v literatuře udávána jako objemová hmotnost. Tato veličina udává hmotnost vysušené neporušené fáze půdy při určité objemové jednotce. Měrnou hustotu nejvíce ovlivňuje zastoupení křemene, živců, slíd a jílových minerálů.

V tabulce č. 2 jsou uvedeny nejrozšířenější typy půd, jejich i objemová hmotnost a pórovitost [12 - 14].

Půdní druh	Hustota [kg.m ⁻³]	Pórovitost [%]
Jíl	1600	40
Hlinitá půda	1400	47
Písčítá půda	1100	58

Tab. č. 2: Hustoty půdních druhů [13 - 14]

Další veličinou, která ovlivňuje chování půdy, je **Youngův modul** (anglicky Young's modulus) neboli modul pružnosti. Tento modul lze definovat jako poměr napětí a jím vyvolané deformace [15].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Kde označuje:

E – modul pružnosti v tahu [Pa]

ε - poměrná deformace

σ – napětí v tahu [Pa]

V praxi se nedá přiřadit k určitému druhu půdy určitý modul pružnosti, protože záleží na mnoha faktorech, které mohou modul ovlivnit. V tabulce č. 3 jsou znázorněny alespoň průměrné hodnoty z různých měření [15].

Velký rozsah hodnot jednotlivých půd je způsoben právě individualitou fyzikálních vlastností jednotlivých vzorků.

Půdní druh	Modul pružnosti [Mpa]
Jíl	15 - 20
Hlinitá půda	15 - 60
Písčité půda	10 - 25

Tab. č. 3: Modul pružnosti půdních druhů [14 - 15]

Neméně významnou veličinou je Poissonova konstanta. Tímto číslem se udává relativní prodloužení nebo vytlačení materiálu k jejímu příčnému zúžení neboli udává poměr příčného napětí k podélnému rozložení napětí ve směru natahované síly. V tabulce č. 4 jsou uvedeny nejznámější druhy půd a k nim příslušející konstanty [16 - 17].

Půdní druh	Poissonova konstanta
Jíl	0.4 – 0.5
Hlinitá půda	0.1 – 0.3
Písčítá půda	0.1 – 1.0

Tab. č. 4: Poissonovy konstanty půdních druhů [16]

Dalšími veličinami jsou například tepelná kapacita a tepelná vodivost. Tepelná kapacita udává, jak se změní obsah teploty v určitém objemu při určité změně teploty. Různé objemové kapacity půdních složek při teplotě 10 °C jsou zobrazeny v tabulce č. 5. Oproti tomu tepelná vodivost udává samotný přenos tepla v půdě (Tab. č. 6). Tepelná vodivost je závislá na minerálním složení, obsahu humusu, vlhkosti, zrnitosti a struktuře [18].

Složka půdy	Tepelná kapacita [MJ.m ⁻³ .K ⁻¹]
Křemen	2,0
Ost. minerály	2,0
Org. hmota	2,5
Voda	4,2
Vzduch	0,00125

Tab. č. 5: Tepelné kapacity různých složek půdy [18]

Hmota	Tepelná vodivost [$\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
Písek	1,3
Hlína	0,38
Jíl	0,34
Voda	0,42
Vzduch	0,02
Křemen	4,9
Org. hmota	0,35

Tab. č. 6: Tepelné vodivosti různých složek půdy [18]

2 Utužení půdy

Utužení půdy neboli pedokompakce je fyzikální poškození půdní struktury v důsledku stlačení, při němž dochází ke snížení celkové pórovitosti, tedy prostoru mezi jednotlivými částicemi a tím se negativně ovlivňují vlastnosti půdy [19 - 20].

2.1 Vlivy utužení

V důsledku snížení pórovitosti se zvyšuje objemová hmotnost, snižuje provzdušnění půdy a schopnost infiltrace (vsak) vody. Dešťová voda se nemůže vsáknout do půdy a zůstává na povrchu nebo stéká do povodí řek a potoků. Díky těmto vlivům dochází ke snížení mikrobiální činnosti a tím se stává půda chudou na živiny, až neúrodnou [21].

Z fyzikálního hlediska má na vegetaci velký vliv, a to z důvodu utužené vrstvy, kterou nemohou kořeny rostlin prorazit. Rostliny proto nemají dostatečný přísun vláhy a živin a tím dochází k nedostatečnému vývoji rostliny nebo řidšímu porostu. Dalším vlivem je špatná propustnost půdy. Voda proto buď stojí na povrchu, a i tím dojde k znehodnocení sadby, nebo voda stéká, a tím dojde k odplavení živin a sazenic či semen. Bohužel není možné přesně říci, jak velký je tento vliv, protože v posledních 2 dekádách, kdy se nejvíce zvětšila hmotnost techniky, také technologie nejvíce

pokročila, a tím se i zvýšila výnosnost. V tabulce č. 7 jsou uvedené příklady snížení výnosnosti vlivem utužení [22].

Plodina	Snížení výnosu
Obiloviny	10 – 20 %
Kukuřice	10 – 15 %
Luskoviny	10 – 20 %
Brambory	10 – 25 %
Cukrovka	10 – 30 %

Tab. č. 7: Snížení výnosu různých druhů plodin [22]

Jeden z největších vlivů této problematiky je již zmíněná nedostatečná **infiltrace vody**. Voda, která se nedokáže vsáknout a je na svahovité půdě, stéká do řek a potoků. Tím se nepřírozeně zvyšuje jejich hladina a dochází k záplavám. V důsledku se narušuje přírodní koloběh vody, který může mít velký dopad i na klimatické podmínky [23].

Dá se říci, že utužení ovlivňují 3 aspekty. První z nich jsou nepříznivé klimatické podmínky. Přesněji se jedná o **promrzání půdy**. Je to vlastně automatické hloubkové kypření půdy, ke kterému dochází při hlubokém promrznutí půdy (min. 50 cm pod povrchem). Půda totiž vždy obsahuje určité procento vody, která se při zmrznutí roztahuje, oddaluje jednotlivé částice a tím krystalky ledu přírodně vytvářejí póry. Při mírných zimách ovšem půda nepromrzá do dostatečné hloubky a zůstane utužená.

Druhým aspektem je nesprávný **způsob úpravy půdy** a nesprávné nebo nedostatečné střídání plodin. Běžnými způsoby orby se půda nedokáže dostatečně prokypřit, proto se musí používat speciální hloubkové kypřiče, které ovšem zvyšují náklady. S tím úzce souvisí střídání plodin, protože stejně jako každý pluh zasahuje do jiné hloubky, tak i rostliny mají různě hluboký kořenový systém [23].

Třetím a nejvýznamnějším důvodem, proč dochází k utužení půdy, je **pojezd zemědělské techniky**. I přes to, a právě kvůli tomu, že stroje postoupily technologicky vpřed, se sice lépe rozložila styčná plocha, ale také se zvětšila jejich hmotnost a intenzita úpravy půdy [24].

2.2 Zúrodnění půdy

V dnešní době jsou nejúčinnějším řešením podmiťáče nebo podrývače a správné osevné postupy. Problém však je, že nikdo neví, jaký bude dlouhodobý dopad utužování půdy [24].

3 Program COMSOL Multiphysics

Comsol multiphysic je softwarový nástroj určený k řešení inženýrských úloh, za využití metod konečných prvků. V tomto programu lze snadno definovat fyzikální vlastnosti a děje a díky tomu může uživatel jednoduše proniknout do podstaty fyzikálních procesů. Software je velice dobře aplikovatelný i při situacích, kdy je třeba uvažovat o několika fyzikálních procesech najednou. Těchto procesů lze do systému zadat libovolný počet a může tak řešit velice složité, tzv. multifyzikální, úlohy s velkou přesností [25].

Program nemá využití jen u inženýrů a konstruktérů, ale také u vědeckých pracovníků, kteří chtějí detailně proniknout do dané problematiky. Díky předdefinovaným úlohám v jednotlivých nástavbách, lze velice jednoduše vytvořit model, přiřadit mu materiál a okrajové podmínky a následně nechat program vypracovat úlohu. V programu lze exportovat veškeré výpočty a hodnoty, tudíž má uživatel přehled o veškerých funkcích, které byly využity [26].

Pro nejnáročnější je přímo v rozhraní programu možnost definovat vlastní fyzikální jevy, které je možno popsat pomocí matematických rovnic. Díky uživatelsky přívětivému prostředí není třeba rovnice zapisovat do skriptových souborů nebo jinak kódovat. Rovnice lze zadávat ve dvou formátech, a to buď ve formě parciální diferenciální rovnice (PDE) nebo ve formě obyčejné diferenciální rovnice (ODE) [26 - 27].

Na začátcích vývoje byl program znám jako FEMLAB a byl nedílnou součástí MATLABU (nástroj pro technické výpočty a simulaci). Rozvinul se ovšem do takové míry, že mohl tvořit samostatný program, a proto jsou oba produkty vyvíjeny

samostatně. COMSOL Multiphysics nadále umožňuje těsné propojení s MATLABEM a díky němu ještě více rozšíří své možnosti zpracovávat údaje. S výpočetní silou MATLABu a flexibilitou jeho knihoven lze v COMSOLu řešit mnoho jinak obtížně realizovatelných úkolů (tvorba uživatelských aplikací, interaktivní úpravy modelů, optimalizaci, kosimulaci a pokročilé metody zpracování dat a vizualizace výsledků) [26 - 27].

Při použití doplňujících modulů, které je možno libovolně kombinovat, lze vytvářet multifyzikální úlohy, které co nejvíce odpovídají realitě. Díky těmto funkcím dokáže program velice přesně simulovat fyzikální jevy a vytvořit věrný výsledný model [26 - 27].

3.1 Structural Mechanical Module

Jeden ze základních nadstavbových modulů je Structural Mechanical Module, který dokáže napodobit a počítat se strukturou jednotlivých materiálů [28].

Tento nadstavbový modul je určen pro analýzu struktur materiálu a jeho statického a dynamického namáhání. Modul může provádět výpočty na únavu materiálu a zjistí nejslabší místa komponentů. Skrze tuto nastavbu lze počítat i namáhání nosníku a tepelné namáhání materiálů [28].

K tomuto rozhraní lze dále dokoupit další moduly, které dále rozšiřují možnosti programu COMSOL Multiphysics. Díky nim si tak dokáže program poradit s namáháním nosníků, únavou materiálu a jeho životností, ale dokáže také vyhodnocovat tepelnou propustnost nebo vodivost [29].

Velkou výhodou tohoto modulu je široká škála materiálů a jejich nastavení. Materiálu lze manuálně zadat vlastnosti nebo lze využít přednastavených hodnot COMSOLu. Díky takto rozšířenému zadávání hodnot dokáže program s velkou přesností určit například kritická místa nosníku nebo největší odpor ve vodiči. U některých materiálů je přímo vyžadováno zadání určitých hodnot, jako je například modul pružnosti nebo Poissonova konstanta [29].

3.2 Geomechanics Module

Tento nastavbový modul je doplňkový produkt k Structural Mechanical Modulu. Jak již název napovídá jedná se o nastavbu zabývající se složením, vlastnostmi a chováním hornin. Lze tak virtuálně zkoumat a analyzovat půdu a její chování v různých podmínkách, navíc díky možnostem nastavení lze nadefinovat jakýkoliv druh nebo typ půdy. Díky speciálním modelům, lze řešit plasticitu, deformaci a poruchy v zeminách a skalách [30].

Tento rozšiřující modul má široké uplatnění ve stavebnictví, kde lze předejít kolizím následkem sesuvů půdy nebo nesprávného rozložení hmotnosti (budovy, konstrukcí, mostů). Další možnost využití je například při stavbě silnic, kdy lze analyzovat zatížení podloží a jeho následné chování. Praktické využití dobře popisuje článek „Pumping and in jecting from a single Borehole“ z Gottingenské univerzity [31].

V dnešní době se platforma začíná využívat i v jiných oblastech, jako je zemědělství. V tom by mohl mít program obrovskou uplatitelnost a v konečném výsledku i výrazný dopad na mechanizaci v zemědělství a regeneraci zemědělské půdy. Za pomoci modulu by se dalo zjistit, jaké utužení půdě hrozí v dlouhodobějším horizontu a jaký dopad pro ni bude mít neustálý pojezd zemědělských strojů.

4 Postup vytváření modelu

Tvorbu modelu je možno rozdělit do několika základních kroků, které budou v této kapitole popsány.

4.1 Výběr pracovního prostoru

Hned od začátku je třeba znát, jak by měl výsledný model vypadat, co se týče prostorových dimenzí. Program nabízí více možností (0D, 1D, 1D Axisymmetric, 2D, 2D Axisymmetric, 3D), ve kterých lze model vytvářet. Tento krok je důležitý především kvůli usnadnění při zadávání rozměrových hodnot a nejpřesnějším vyhodnocení dat.

4.2 Výběr fyzikálního rozhraní a studie

V tomto kroku je třeba znát, jaké fyzikální jevy se budou ve studovaném systému nejvíce uplatňovat. Program nabízí velké množství fyzikálních rozhraní, která se v některých případech dále dělí. Některá rozhraní se zobrazí až po přidání příslušného modulu. Veškerá fyzikální rozhraní se mohou kombinovat, čímž se mohou se co nejvíce přiblížit realitě.

Po přidání fyzikálních rozhraní je třeba zvolit studii, v rámci které budou nakonec probíhat výpočty. Program opět nabízí různou škálu možností, které lze kombinovat. Je důležité vědět, jestli uživatel požaduje například pouze konečnou deformaci materiálu nebo i celý průběh.

4.3 Vytvoření objektů

Pro vytvoření modelu lze využít dvou možností. První z nich je importování geometrie modelu, vytvořeného v jiném programu. COMSOL Multiphysics tak dokáže načítat geometrické soubory ve formátech STL a VRML, v nichž je model definován povrchovou sítí, 2D soubory ve formátu DXF a 3D modely ve formátu NASTRAN [25].

Druhou možností je vytvoření modelu přímo v samotném prostředí. To lze provést CAD nástroji v grafickém editoru.

4.4 Zvolení materiálu a vlastností

Dalším krokem je definování materiálu a vlastností pro jednotlivé části. Zde lze využít předvoleb, které program nabízí. Tyto předvolby jsou z velké části ovlivněny nastavbovým modulem, kterým program disponuje. Při plném využití potenciálu programu, lze přiřadit fyzikální, chemické nebo elektromechanické vlastnosti jednotlivým objektům. Většinu vlastností a materiálů je třeba dále dodefinovat individuálním nastavením konstant. Například některé stálé materiály mají hodnoty, jako je hustota, pevně přednastavené, u jiných je potřeba tuto hodnotu doplnit.

4.5 Zadání okrajových podmínek

Součástí zadání každé úlohy jsou okrajové podmínky. Určitým bodům, částem geometrie nebo plochám lze určit další vlastnosti, funkce nebo jiné proměnné, které budou dále model zpřesňovat. V praxi se jedná o určení pevných nebo volných částí modelu. Díky okrajovým podmínkám se definují specifické fyzikální vlastnosti jednotlivých částí, kterými je například hmotnost nebo působení gravitační síly.

4.6 Vytvoření sítě

Jedním z prvních kroků numerického řešení úlohy je vytvoření sítě na povrchu tělesa nebo plochy. Program vytvoří na povrchu modelu síť složenou z elementů. Čím hustší síť, tím více bodů vzniká a tím přesnější je konečný model. S tím ale také vzrůstá doba, za kterou dokáže aplikace vypočítat hodnoty pro všechny body. Proto je potřeba dopředu odhadnout, za jakým účelem bude model vytvářen, aby se předešlo případným zbytečným časovým prodlevám.

4.7 Vytvoření studie

Posledním krokem je takzvaná studie, která zohlední veškeré nastavené hodnoty a konstanty a pomocí přednastavených numerických rovnic vyřeší model s danými fyzikálními vlastnostmi. Výsledný model lze zobrazovat současně pomocí izočar, barevných map, izoploch, proudnic, šipek, částic, nebo řezů. Pokud je zvolena studie závislá na čase, je možné ji nechat jednoduše animovat a vyexportovat ji ve formátech AVI, GIF nebo FLash. Pro celkovou a přehlednou zprávu lze data exportovat také ve formátu HTML nebo do formátu .doc. V těchto souborech pak lze nalézt veškeré grafy, vypočítané hodnoty a vzorce.

5 Vytvoření modelu pro výpočet tlaku v půdě

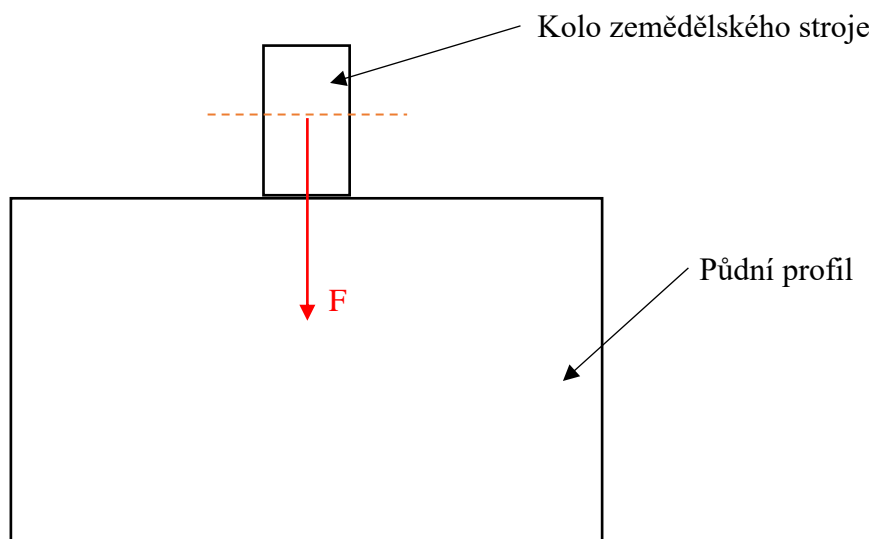
V této části práce bude popsán model zatížení půdy kolem traktoru. Celý model bude definován reálnými hodnotami, aby se dosáhlo co nejuvěrnějších výsledků. Celý postup bude realizován pro jedno kolo, v závěru však budou vyhodnocena kola dvě (přední, zadní).

5.1 Parametry modelu

Veškeré hodnoty zde uvedené byly převzaty z odborných článků nebo publikací. Většinou budou uvedeny průměrné nebo ideální hodnoty, aby výsledek co nejvíce korespondoval s realitou.

Pro zjednodušení bude model tvořen ze dvou ploch ve tvaru obdélníku znázorňujících obě tělesa. První bude znázorňovat kolo zemědělského stroje a druhý bude představovat řez půdním profilem. Obě tělesa jsou zatěžována určitou silou a vzájemně na sebe působí. Na obr. č. 3 je schématicky znázorněn model úlohy a působení síly kola F na podložku. V modelu bude zohledněno působení gravitační síly, působící ve stejném směru jako váha kola.

V příkladu nebude počítáno s dezénem pneumatiky, který by měl jen minimální vliv na rozložení tlaku v půdě. Dále bude počítáno s kolem, jakožto homogenním materiálem, bez prostoru na vzduch a kovové výztuže (disk).



Obr. č. 3: Schéma modelu

5.1.1 Parametry kola

Parametry kola odpovídají traktoru Zetor Proxima CL, který se pohybuje v nižší střední třídě. Tento stroj má hmotnost od 3750 do 4546 kg, podle zvoleného vybavení. V modelu bude použita hodnota 4000 kg. V tabulce č. 8 jsou vypsané základní parametry kol, potřebné k definování rozměrů modelu. Hmotnost zatížení kola je odvozena od ideálního poměru váhy mezi přední a zadní nápravou (2:3) a je počítána pro 1 kolo. Veškeré hodnoty byly převzaty z manuálu firmy Zetor [32].

Náprava	Označení	Průměr kola [mm]	Šířka kola [mm]	Hmotnost [kg]
Přední kolo	320/85 R24	1100	320	800
Zadní kolo	420/85 R34	1590	420	1200

Tab. č. 8: Parametry kol [32]

Předpokládá se, že kola jsou vyrobena z gumy, která má stejné charakteristiky jako kaučuk. V programu se musí zadávat modul pružnosti (Youngův modul) a relativní prodloužení (Poissonova konstanta). Vzhledem k vlastnostem kaučuku není třeba v programu zadávat hustotu, která je v knihovně materiálů již předdefinována. Veškeré hodnoty potřebné k následné tvorbě modelu jsou uvedené v tabulce č. 9 a byly převzaty z [30 - 35].

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Youngův modul	E	2	MPa
Poissonova konstanta	μ	0.49	-

Tab. č. 9: Hodnoty Young. Modulu a Poissonovy konstanty pro kaučuk [33 - 35]

5.1.2 Parametry půdy

V České republice má největší zastoupení hlinitá půda, která je zároveň nejrozšířenější v Evropě. Proto byly veškeré hodnoty uvažovány pro ni. Je velice těžké stanovit přesné hodnoty fyzikálních veličin pro půdu, protože se mění nejen vlivem ročního období, ale také dle podnebného pásma a momentálních klimatických podmínek. Jsou proto uváděny průměrné hodnoty z mnoha měření.

V programu COMSOL Multiphysics je potřeba pro půdu zadávat modul pružnosti (Youngův modul), relativní prodloužení (Poissonova konstanta) a hustotu. Vybrané veličiny jsou uvedeny v tabulce č. 10 [12 - 15].

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotky
Youngův modul	E	2.5	MPa
Poissonova konstanta	μ	0.2	-
Hustota	ρ	1500	kg.m ⁻³

Tab. č. 10: Hodnoty fyz. veličin charakterizující půdu [12 - 15]

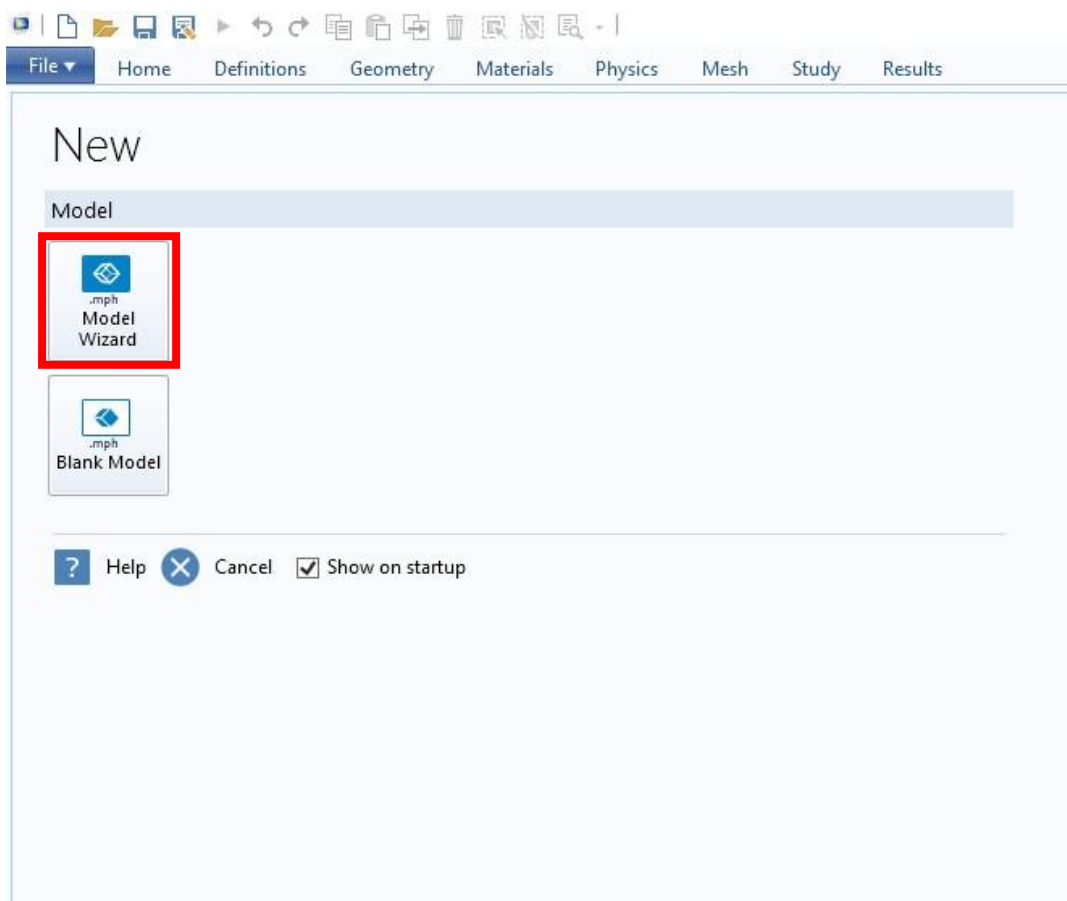
5.2 Tvorba modelu

5.2.1 Výběr pracovního prostoru

V prvním kroku je třeba zvolit pracovní prostor, ve kterém se bude dále pracovat.

První možností je *Model Wizard*, který dále umožňuje přednastavit dimenzi, ve které bude model vytvořen. Druhou možností je *Blank Model*, ve kterém je nutné veškeré fyzikální funkce a vlastnosti vytvořit manuálně v samotném prostředí programu COMSOL Multiphysics.

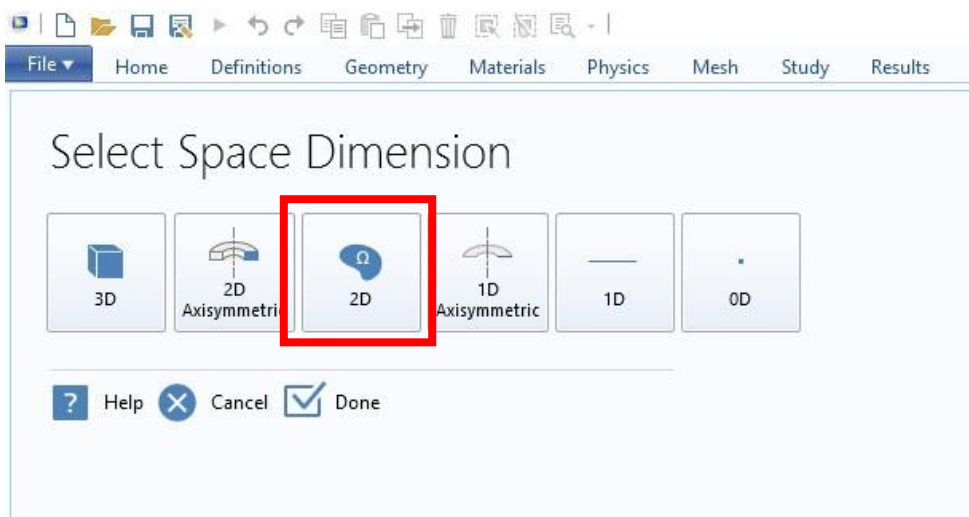
Pro účely této práce bude nejvhodnější využít nabídky *Model Wizard*, která urychlí proces modelování. Pro pokračování stačí kliknout na dané tlačítko (obr. č. 5).



Obr. č. 5: Výběr pracovního prostoru

5.2.2 Výběr prostorové dimenze

Zde program umožňuje výběr ze šesti dimenzí od 3D modelu po pouhý bod. Pro jednodušší zadávání hodnot bude vybrána možnost 2D dimenze, která bude pro tento příklad názornější. Pro pokračování opět stačí kliknout na danou tlačítko (obr. č. 6).

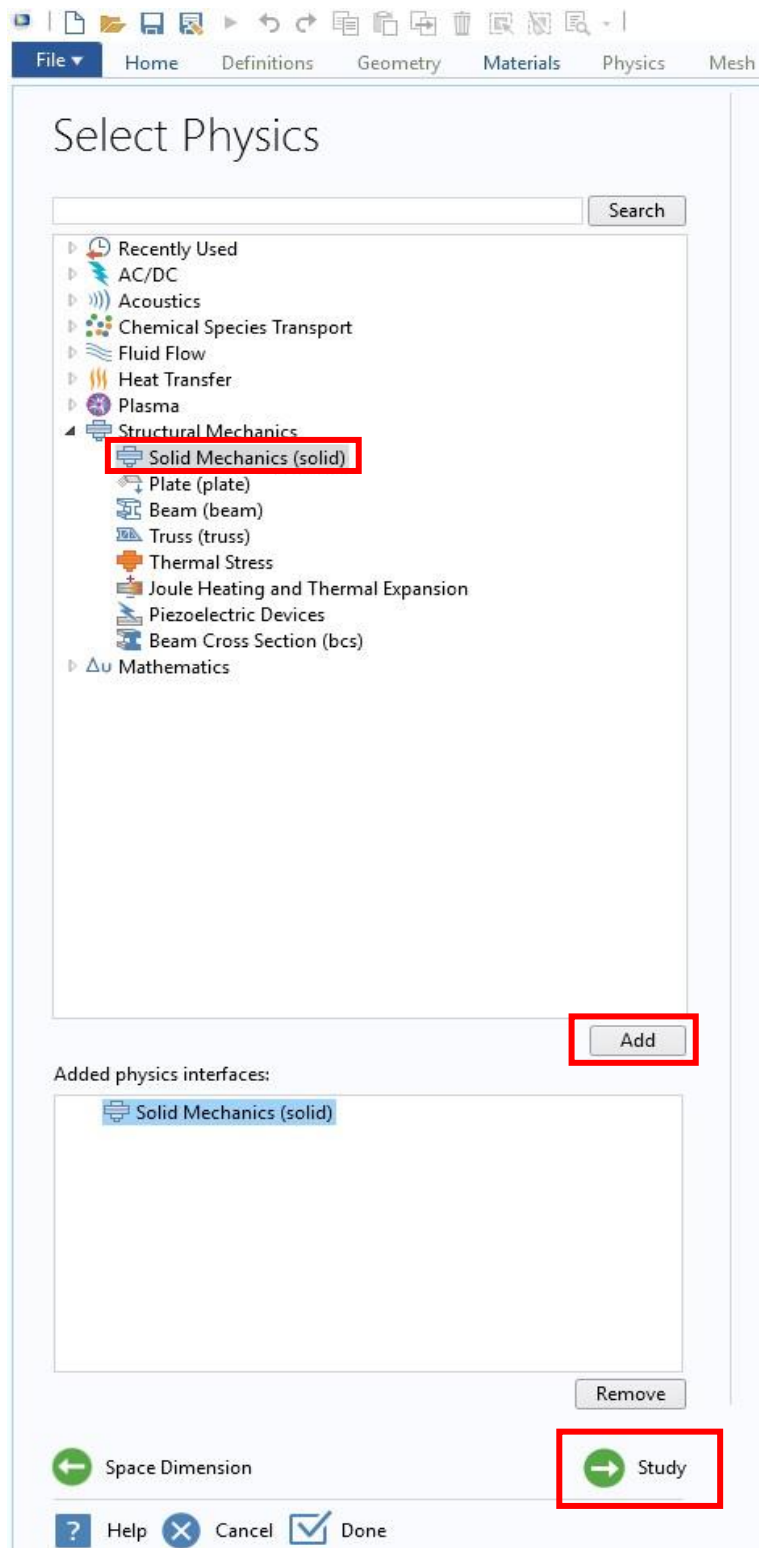


Obr. č. 6: Výběr dimenze

5.2.3 Výběr fyzikálních rozhraní

V tomto kroku lze vybrat z mnoha fyzikálních rozhraní, která budou definovat vlastnosti modelu. Tato rozhraní se dále dělí a specifikují. Na obrázku č. 7 je názorně rozbalená záložka *Structural Mechanics*, pod kterou jsou vypsaná vybrané fyzikální jevy.

Pro přidání rozhraní stačí jakékoliv označit (musí to ovšem být konečné rozhraní, které již dále nelze specifikovat) a kliknout na tlačítko „Add“ (Obr. č. 7). Těchto fyzikálních vlastností lze přidat nekonečně mnoho, díky čemuž lze s velkou přesností napodobit reálné fyzikální jevy. Tato práce bude pracovat se strukturou, a proto bude nejvhodnější výběr *Solid Mechanics (solid)*. Pro pokračování stačí kliknout na tlačítko „Study“.

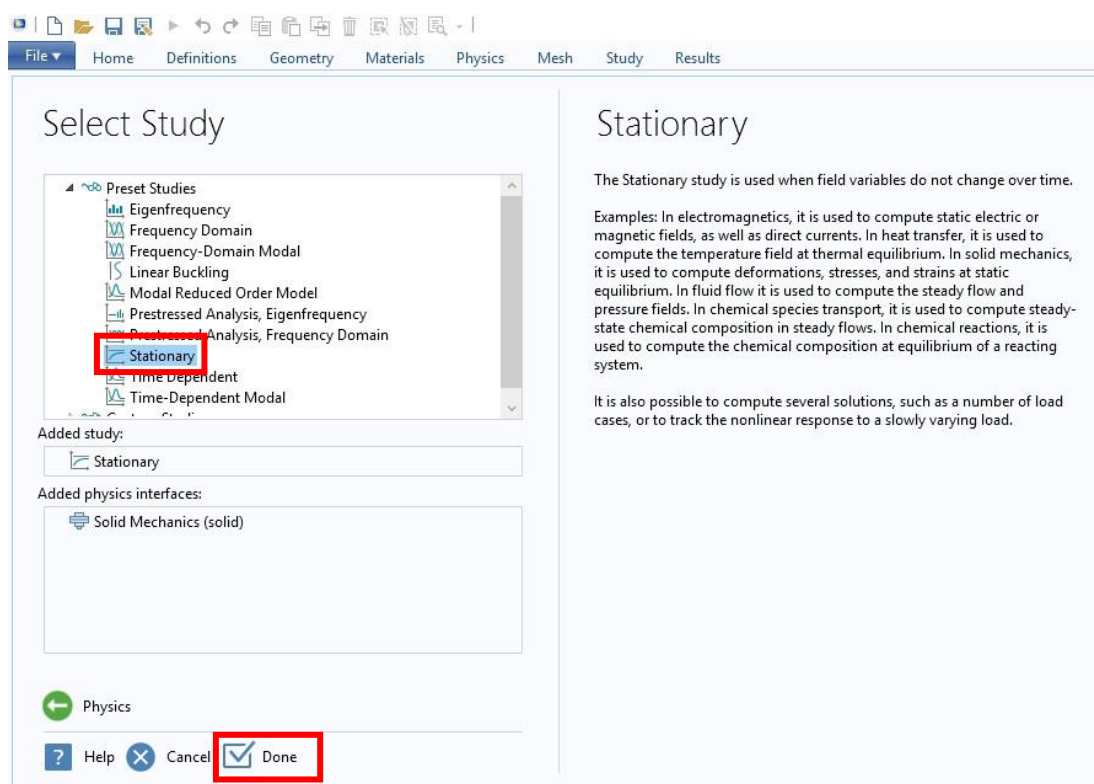


Obr. č. 7: Výběr fyzikálního rozhraní

5.2.4 Výběr studie

Poslední nabídka před samotným modelováním umožňuje zvolit druh studie. Základní výběr je ze 2 možností (přednastavené a vlastní studie), které se dále dělí (obr. č. 8). V přednastavení lze vybrat pouze jednu studii, ale v samotném prostředí COMSOLU lze přidat další. Za účelem této práce bude nejvhodnější výběr *Stationary*, díky čemuž bude vytvořen konečný model po zatížení bez závislosti na času.

Pro pokračování je potřeba kliknout na danou studii a tlačítkem „Done“ (Obr. č. 8) se potvrdí veškeré přednastavení (dimenze, fyzikální rozhraní, studie).



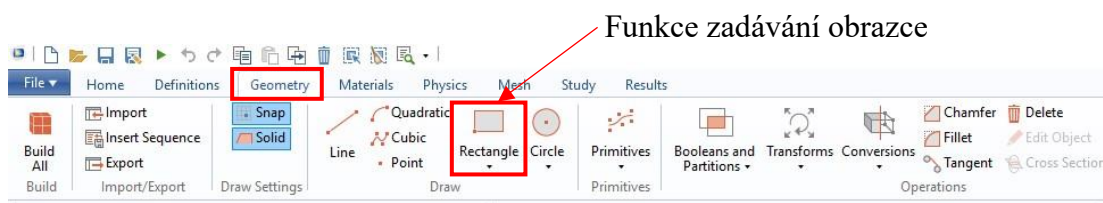
Obr. č. 8: Výběr studie

5.2.5 Vytvoření geometrie modelu

Jak již bylo řečeno, geometrii lze vytvořit dvěma způsoby. První z nich je importovat model z jiného programu, který disponuje možností uložení do příslušného formátu. Tento způsob lze provést přes záložku *Geometry*, v níž je tlačítko *Import*, díky kterému se otevře nastavení jak importovat soubor.

Pro názornost zde bude popsán postup při vytváření modelu v samotném prostředí programu COMSOL Multiphysics. Nejprve je potřeba si otevřít již zmiňovanou kartu *Geometry*, ve které je veškeré nastavení modelu, od určení bodů po

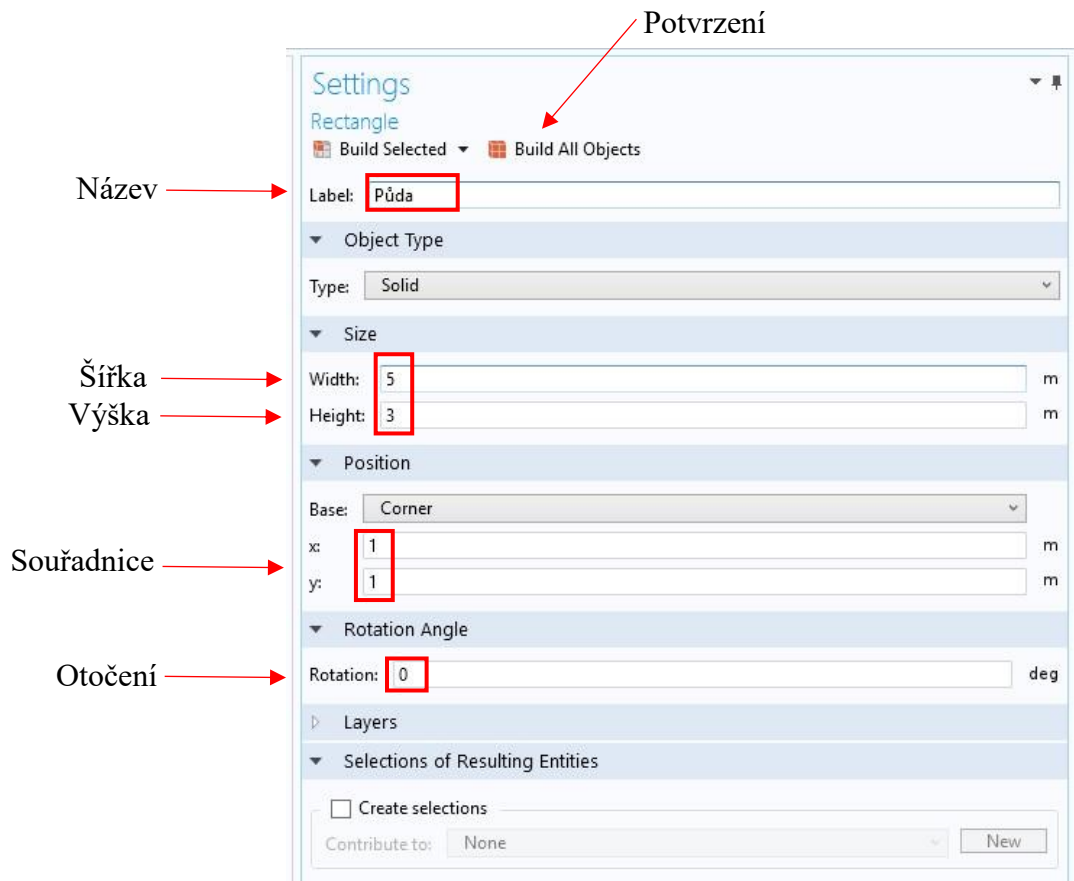
vytvoření průniků ploch. V oblasti Draw jsou základní pomůcky pro vytvoření geometrického útvaru a jeho definici rozměrů. Možnosti *Rectangle* (obdélník) a *Circle* (kruh) skrývají další možnosti, především způsoby zadávání útvarů. K vytvoření modelů bude využita samotná funkce *Rectangle*, a to se zadáváním pomocí rohových bodů (obr. č.9).



Obr. č. 9: Lišta Geometry

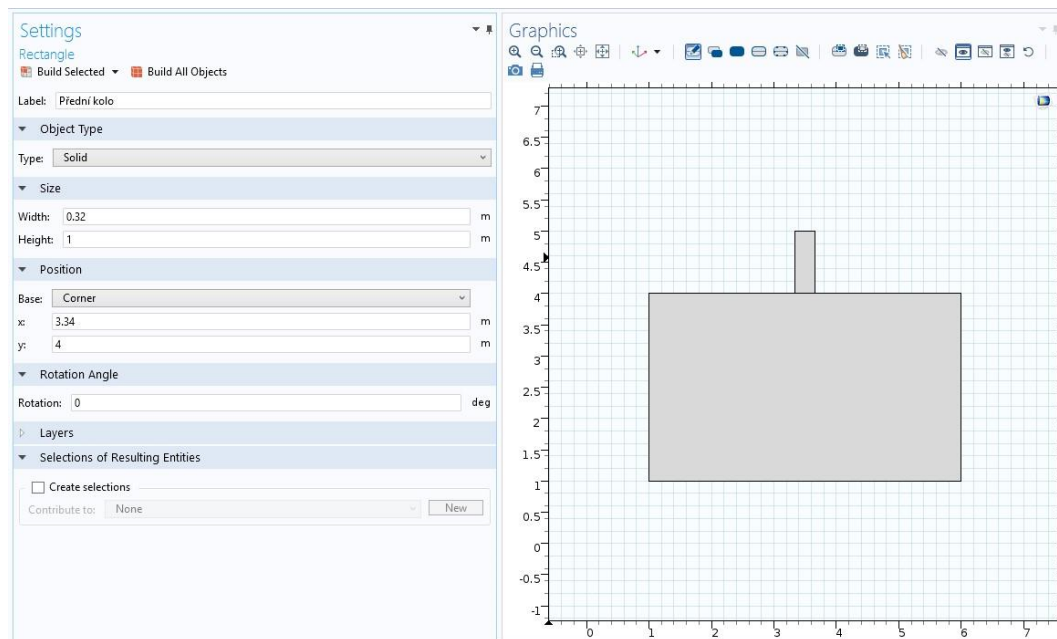
Nyní je třeba zadat samotné rozměry modelu a určit jeho polohu v prostoru. Jako první budou zadávány hodnoty pro plochu znázorňující půdu. Hodnoty se zadávají do nově vzniklé lišty vlevo od pracovního prostoru s názvem *Settings* (nastavení) (obr. č. 10).

V prvním řádku s názvem *Label* lze objektu změnit název (v tomto případě změněno na *Půda*). Další řádek poskytuje možnost vybrat typ objektu. V tomto případě ponecháme původní možnost *Solid*. V prostoru nazvaném *Size* (rozměry) je potřeba zadat objektu velikost jednotlivých stran. První řádek *Width* označuje šířku a druhý řádek *Height* naopak výšku. V tomto případě byly zvoleny rozměry obdélníku 5x3 metry. Je možné zvolit i jiné jednotky a to tak, že se napíše zkratka veličiny do hranatých závorek (je třeba dodržet velikosti písmen, jinak program hodnotu nerozpozná). V další nabídce *Position* je třeba nastavit polohu plochy pomocí souřadnic x, y . V tomto úseku lze také nastavit, k jakému bodu se budou souřadnice vztahovat. Uživatel má na výběr z *Corner* (rok) nebo *Center* (střed). Zadané souřadnice se v tomto případě budou vztahovat k levému spodnímu rohu a budou mít hodnoty [1;1]. Posledním nastavením je možnost s danou plochou otáčet pomocí funkce *Rotation*, která v tomto případě nemá uplatnění a zůstane tedy nulová. Pro aplikaci hodnot na model je třeba nastavení potvrdit tlačítkem *Build All Objects*. Tento krok je třeba provést po každé změně v nastavení.



Obr. č. 10: Nastavení objektu znázorňující půdu

Obdobným způsobem bude vytvořen i druhý model, znázorňující kolo traktoru. Tato plocha byla definována podle zadaných hodnot pro traktor. Výška obdélníku bude znázorňovat průměr kola, tudíž bude 1,1 metru a šířka bude 0,32 metru. Souřadnice byly zvoleny tak, aby plocha znázorňující kolo byla na středu plochy, znázorňující půdu. Souhrn úkonů je třeba opět potvrdit tlačítkem *Build All Objects*. Výsledná geometrie je zobrazena na obrázku č. 10, kde je vyobrazená i pracovní plocha s vymodelovanými objekty (obr. č. 11).

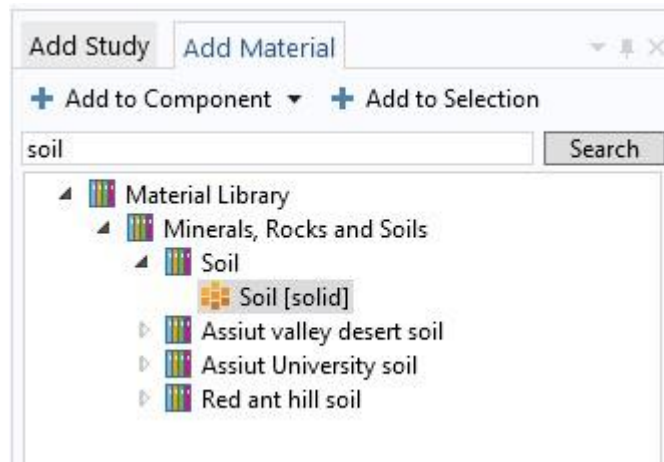


Obr. č. 11: Nastavení objektu znázorňující kolo

5.2.6 Volba materiálu

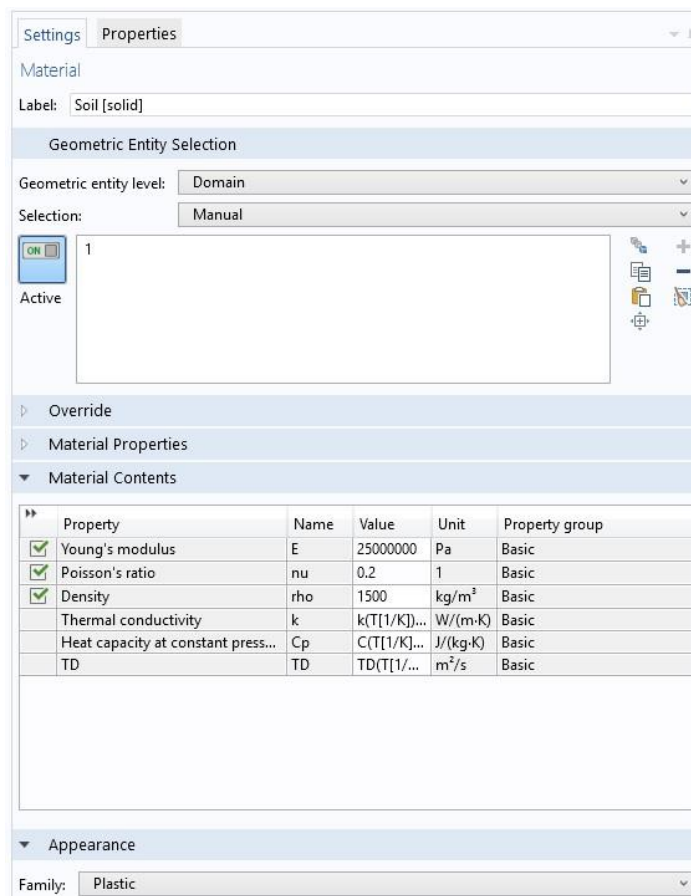
Pravděpodobně nejdůležitější částí deformace modelu je volba materiálu a zadání příslušných hodnot. Pro tento úkon je třeba otevřít záložku *Materials*, v nichž uživatel klikne na položku *Add Material*. Na pravé straně se poté otevře nový panel s materiály a vlastnostmi. Zde je možné vybírat z obrovského množství možností a využít tak potenciál COMSOLu. Materiál lze hledat manuálně, rozklikáváním jednotlivých složek nebo za pomoci okénka na rychlé vyhledávání materiálů.

Nejprve bude vyhledán materiál napodobující fyzikální vlastnosti půdy. Cesta k němu je znázorněna na obrázku č. 12 (cesta je zkrácená, bez jiných materiálů). Po vyhledání materiálu je třeba jej, dvojklikem na levé tlačítko myši, přidat do materiálů, se kterými bude program dále pracovat. Zvolené materiály se dále zobrazují na levé části obrazovky v panelu *Model Builder*, ve kterém jsou ve složkách vytvořeny jednotlivé kroky modelování. Přidáním materiálu se automaticky zobrazí jeho nastavení v panelu *Settings*.



Obr. č. 12: Cesta k materiálu půda

Dále program automaticky vybízí k přidání materiálu pro příslušný objekt nebo plochu. Stačí na plochu nebo objekt kliknout a systém sám materiál přiřadí nebo naopak odebere. V nastavení vlastností pro půdu (obr. č. 13) je třeba zadat celkem tři hodnoty.



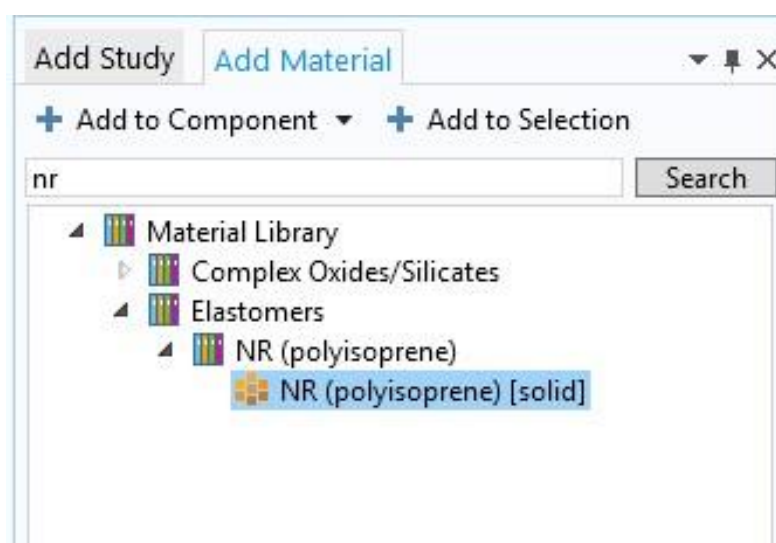
Obr. č. 13: Lišta nastavení půdy

První z nich *Young's modulus* (Youngův modul) neboli modul pružnosti. Byla zvolena hodnota 25 000 000 Pa, která odpovídá hodnotě hlinité půdy (viz. Tab. č. 3).

Další veličinou je *Poisson's ration* neboli Poissonova konstanta. Z tabulky č.4 byla vybrána hodnota 0.2, která opět nejlépe odpovídá hlinité půdě.

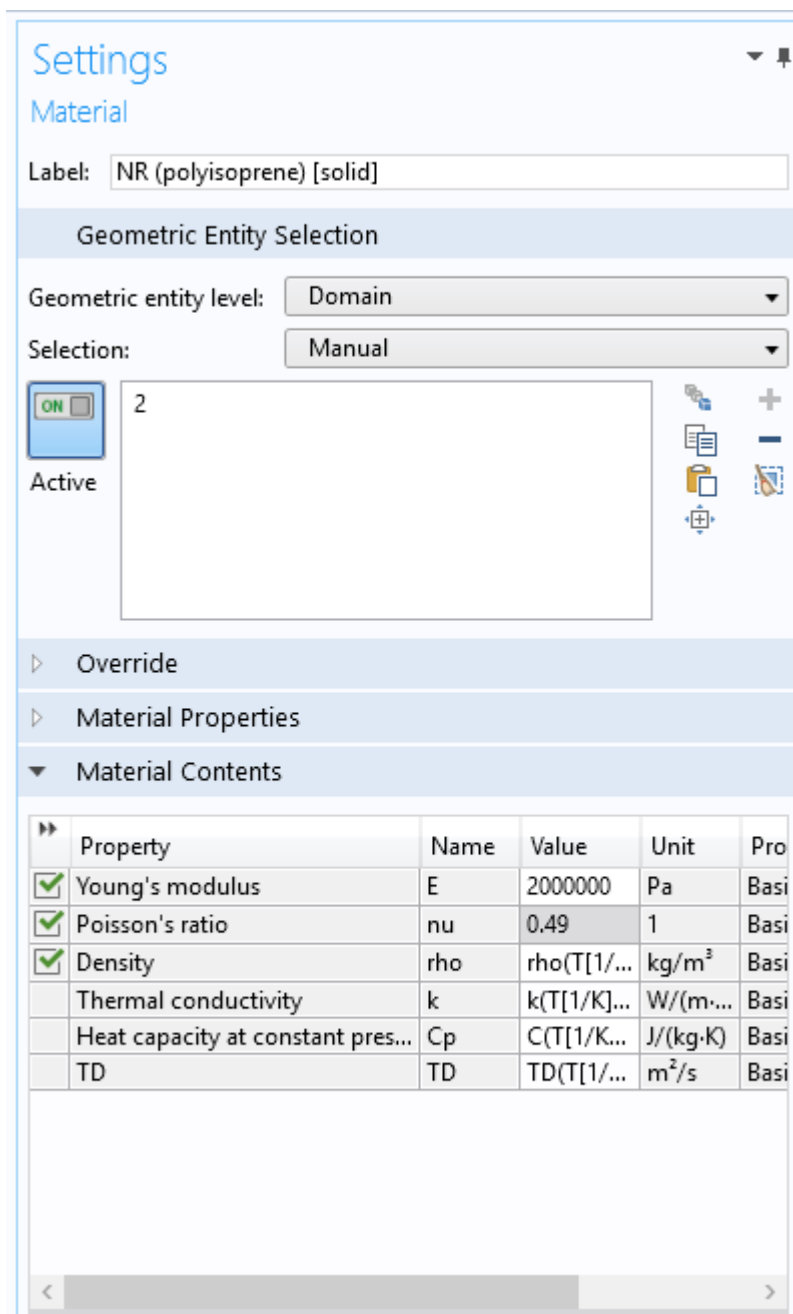
Poslední potřebnou proměnnou pro nastavení je *Density* neboli hustota. Jak již bylo řečeno, u půd se hustota nazývá objemovou hmotností a pro účely této práce nejlépe odpovídala hodnota 1500 kg.m⁻³.

Dále je třeba nadefinovat materiál i pro druhý objekt (kolo), kterým je kaučuk. Ten bude vyhledáván pod názvem *NR (polyisoprene)*. Cesta k němu je ukázána na obrázku č. 14 (cesta k němu je opět zkrácená, bez okolních materiálů). Pro přidání je opět potřeba dvojklik na levé tlačítko myši a dále je nutné vybrat plochu, ke které bude materiál přidán.



Obr. č. 14: Cesta k materiálu kaučuk

I pro kaučuk je třeba nadefinovat některé veličiny. Protože je kaučuk stálým materiálem a dobře měřitelným, jeho hustota se nemění a COMSOL Multiphysics jej sám definuje. Je ale třeba nastavit hodnoty pro *Young's modulus*, který byl zvolen 2 000 000 Pa a *Poisson's ratio*, které bylo zvoleno 0,49. Veškeré hodnoty jsou názorně vypsány v obrázku č. 15.



Obr. č. 15: Lišta nastavení kaučuku

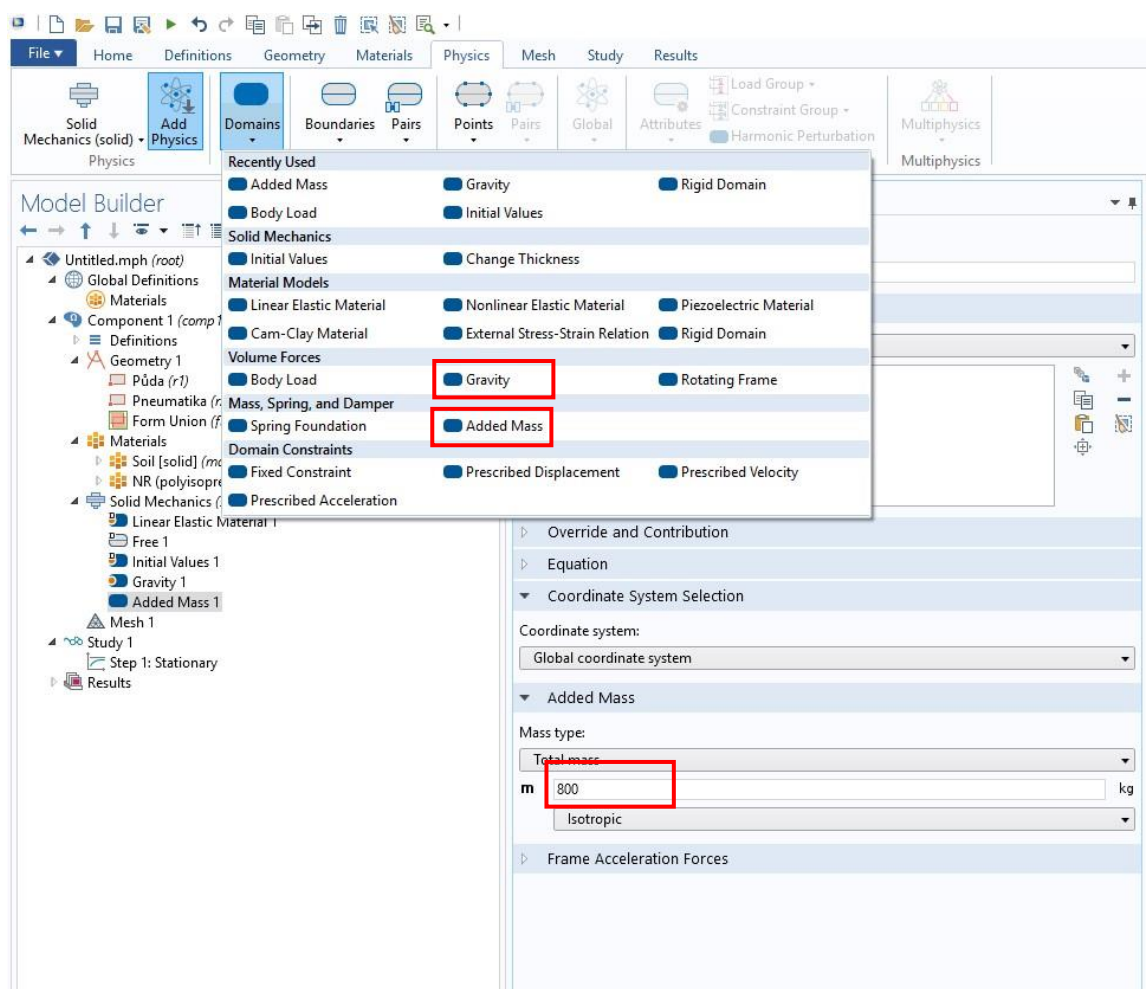
5.2.7 Určení okrajových podmínek

Nyní je třeba vytvořit objektům okrajové podmínky, které budou určovat, jaké části zůstanou statické (nehybné) a které se budou moci pohybovat nebo deformovat. Dále jim udají hmotnost a tím se určí, jakou silou na sebe budou působit. Hmotnost se nebude u půdy zadávat, protože cílem této práce není zjistit, jak moc se dokáže utužit půda sama o sobě, ale jak ji dokáže utužit zemědělský stroj.

Pro tyto úkony je třeba přejít na kartu *Physics*, kde je lze definovat. Zde jsou pro základní nastavení nejdůležitější dvě funkce, které definují okrajové podmínky, *Domains* (oblast) a *Boundaries* (hranice). Obě funkce po rozkliknutí nabídnou množství okrajových podmínek, podle kterých se definuje model. Nabídka pro *Domains* je zobrazena na obrázku č. 16 a pro *Boundaries* je pak na obrázku č. 17.

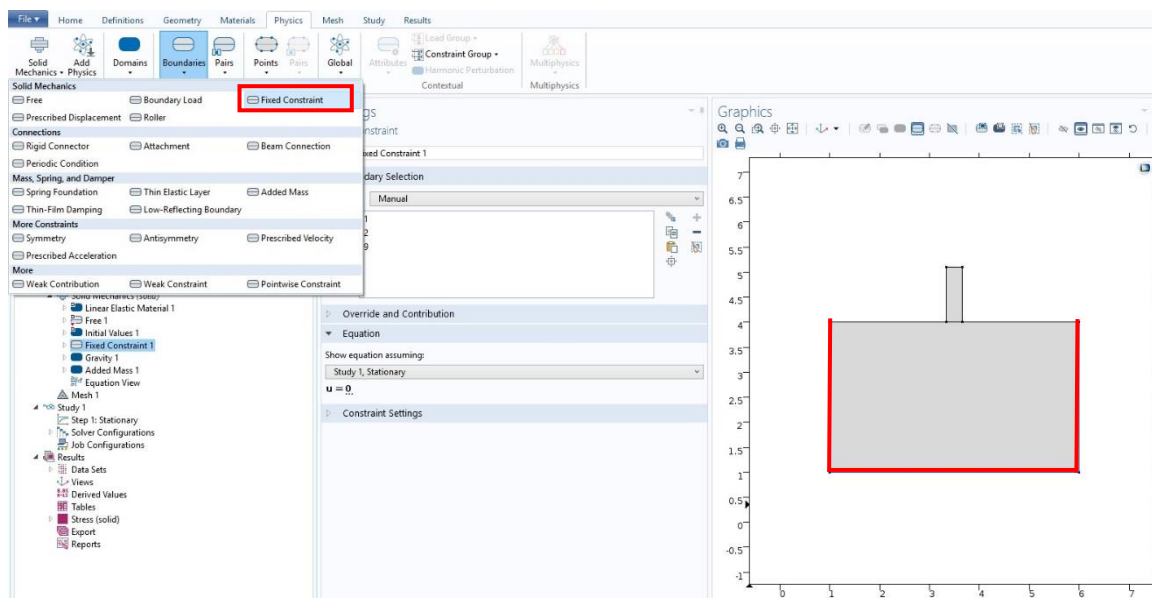
Pro nadefinování hmotnosti kola bude nejvhodnější vložit plošnou fyzikální podmínku *Added Mass*, která je v nabídce *Domains*. Opět se otevře panel pro nastavení podmínky *Settings*. V sekci *Added Mass* je potřeba změnit typ hmotnosti *Mass Type* na *Total mass*, což umožní zadat hmotnost v základních jednotkách [kg]. Hmotnost byla zadána dle reálných hodnot udávaných výrobcem, tedy 800 kg na jedno přední kolo (tab. č. 8).

Pro co nejreálnější výsledek je potřeba v nabídce *Domains* vybrat funkci *Gravity*, díky které začne na kolo působit gravitační síla (obr. č. 16).



Obr. č. 16: Nabídka Domains

Poslední okrajovou podmínkou je *Fixed Constraint*, která je v nabídce *Boundaries*. Tato podmínka se aplikuje na pevné hrany půdního profilu, tak aby půda držela tvar. Fixované hrany jsou znázorněny na obrázku č. 17.

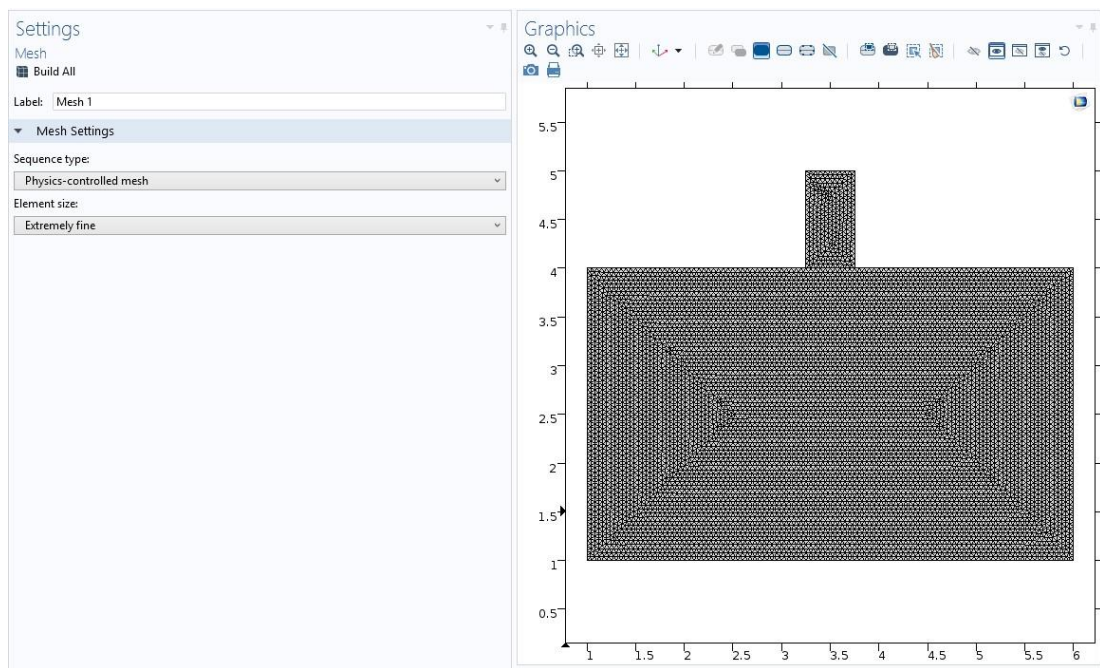


Obr. č. 17: Nabídka Boundaries a zafixované hrany

5.2.8 Vytvoření elementární sítě

Tato funkce vytvoří na povrchu objektu síť, složenou z elementů. V průřezích elementů dochází k samotným výpočtům programu. Celý proces je založen na výpočtech pomocí metody konečných prvků.

Funkce *Mesh* (pletivo) by se měla automaticky přidat do panelu *Model Builder* při vytvoření modelu. Pokud se tak nestane, v záložce *Mesh* stačí stisknout kolonku *Add Mesh* a funkce bude vytvořena. Při vybrání sítě v panelu *Model Builder* se zobrazí její nastavení. Nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím výsledný model je *Element Size* (velikost elementů). Zde lze nastavit různou jemnost od *Extremely Coarse* (extrémně hrubý) po *Extremely Fine* (extrémně jemný). Po nastavení je třeba stisknout *Build All*, aby byla síť vytvořena. Na obrázku č. 18 je znázorněné nastavení a vykreslení sítě na modelu. Osy jsou přednastavené na dílkové jednotky metry a je zde vidět, jak malé segmenty se na povrchu vytvořily.



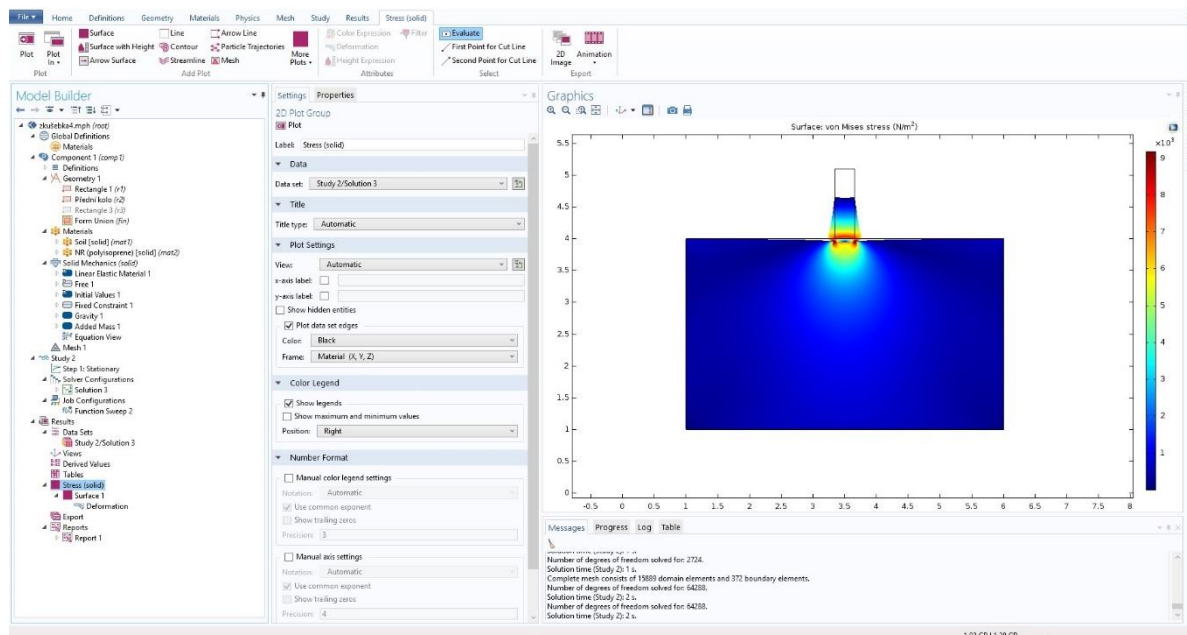
Obr. č. 18: Vygenerovaná síť

5.2.9 Vytvoření studie a export dat

Posledním krokem je vytvoření studie, při které program pomocí vzorců spočítá změny, ke kterým v materiálu došlo vlivem působení nadefinovaných sil. V záložce *Study* (studie) stačí kliknout na tlačítko *Compute* (počítat) a počkat na dokončení výpočtů.

Konečný výsledek je znázorněn na obrázku č. 19, kde lze sledovat deformaci jak půdy, tak i kola. Pomocí os (x,y), které jsou v tomto případě v metrech, lze odměřit, k jak velkému propadu kola došlo, a díky barevnému znázornění a stupnici je možné odhadnout velikost zatížení v určité hloubce. Tato stupnice je znázorněna v kN.m^{-2} .

Celý model byl vytvořen na školním počítači s procesorem Intel® Xeon® E5 – 1630 s taktem na 3,70 GHz a grafickou kartou NVIDIA GeForce GTX 960. Při těchto parametrech výpočetní techniky a při nastavení nejjemnější sítě trval celý proces výpočtů tři sekundy. Po zvolení hrubší sítě je možné docílit konečného času vykreslení menšího než 1 sekunda. Takto krátkou dobu trval proces v díky své jednoduchosti. Při řešení náročnějších úloh, zahrnujících mnoho proměnných a složitějších objektů (například v 3D rozhraní) se lze dostat s tímto výkonem až na několik desítek minut až hodin.

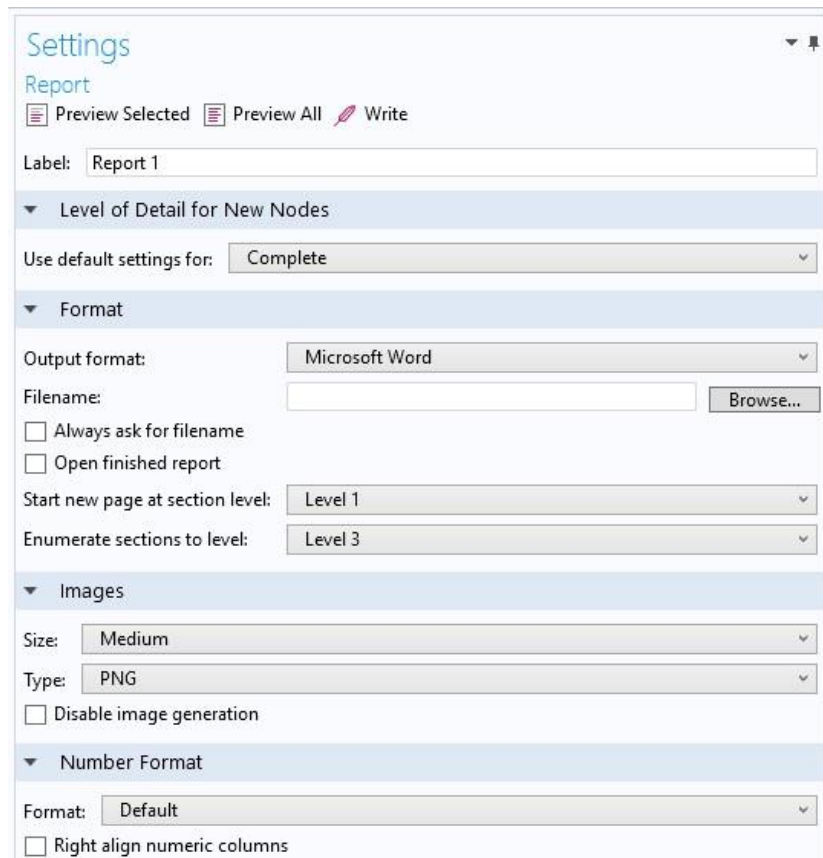


Obr. č. 19: Vytvořená studie

Veškerá data (výpočty, vzorečky, grafy) je možno exportovat, a to stisknutím pravého tlačítka myši na odrážku *Reports* (zprávy) v panelu *Model Builder*. Po zobrazení nabídky je možné vybrat mezi různými rozsahy zprávy od stručné *Brief Report* po kompletní *Complete Report*. Program zde nabízí i možnost vlastního nastavení *Custom Report* zprávy, kde si každý může nadefinovat, jaké informace chce exportovat.

Po zvolení rozsahu zprávy je nutné nastavit vlastnosti v panelu *Setting*, které jsou vidět na obrázku č. 20. V prvním řádku *Label* je možné změnit název dané zprávy. Další možností je *Use default settings for*, díky které můžete změnit rozsah zprávy. Nejdůležitější část nastavení je sekce *Format*, ve které lze nastavit, v jaké formě se má soubor exportovat. Lze exportovat ve formátu *.docx* (formát textových editorů) nebo ve formátu *HTML*, který převede data do internetové prezentace. Poslední možností je zvolit si formát a velikost, v jakém mají být exportovány obrázky a grafy. V exportovaném souboru jsou dále k nalezení použité vzorce a jejich postup řešení.

Veškerá data z této analýzy jsou uložena v příloze této práce.



Obr. č. 20: Panel nastavení exportu dat

5.3. Výsledná studie

V první řadě je třeba poznamenat, že celý model byl vytvářen za předpokladu, že pro všechny použité materiály platí Hookův zákon po celou dobu simulace. Bohužel tyto fyzikální vlastnosti odpovídají pouze kaučuku, nikoliv půdě. V důsledku těchto faktorů se půda deformuje jinak, než by se deformovala ve skutečnosti, kde by došlo ke kohezi materiálu a k narušení plasticity materiálu. Tyto faktory ovšem na zatížení půdy nemají vliv, a proto bude vytvořený model pro tuto práci postačující.

Kolo traktoru se ve skutečnosti skládá z disku, pláště a vzduchu o určitém tlaku. Model kola byl v tomto případě pro zjednodušení vytvořen pouze z celistvého kaučuku, proto je na obrázku č. 21 vidět tak velká deformace. K té by ve skutečnosti nedošlo, protože by kaučuk tvořil pouze vnější plášť.

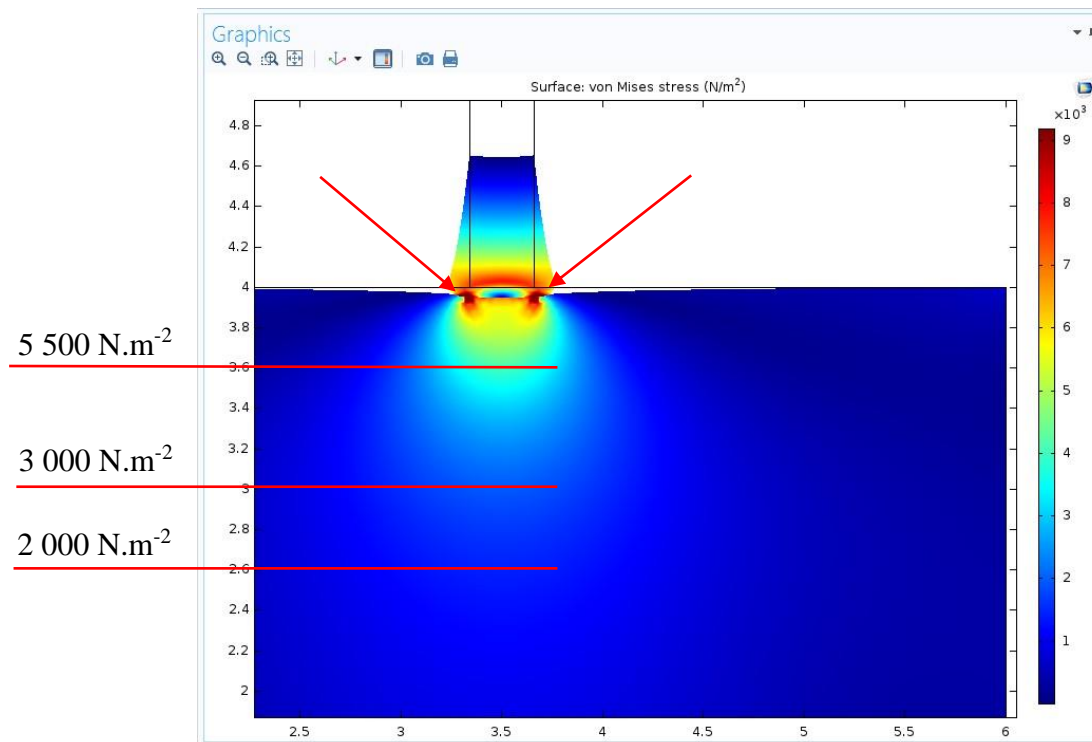
Na obrázku č. 21 lze vidět dvě nejvíce zatížená místa, která jsou v rozích kola (označená šipkou). Tato místa by též ve skutečnosti nevznikla, a to z důvodu jiného

průřezu kola (bez ostrých hran) a především v důsledku jiného chování půdy. Ve skutečnosti by bylo toto zatížení rovnoměrné na celé styčné ploše kola s půdou.

Nejdůležitější částí této práce je výsledné zatížení půdy, které odpovídá skutečnosti. Jak je vidět na obrázku č. 21, největší zatížení působí do hloubky 400 mm a to silou přibližně $5\,500\text{ N.m}^{-2}$ (odečteno z barevné stupnice). Jak uvádí web www.agromanual.cz, dnešní hloubkové kypřiče působí právě do hloubky 400 mm (maximálně), a tím dokáží odstranit nejvýraznější utužení.

Menší zatížení ale dále působí do hloubky 1 m, do které již žádný hloubkový kypřič nezasahuje. Toto zatížení se pohybuje okolo $3\,000\text{ N.m}^{-2}$ a z krátkodobého hlediska je to velice malé zatížení pro jednoznačné stanovení rizika utužení. Stejně tak ovšem nelze určit, zda by nedošlo k utužení půdy dlouhodobým nebo opakovaným působením této síly.

Na obrázku č. 21 lze ale dále pozorovat minimální zatížení, které působí až do hloubky 1.4 m. Toto zatížení je již poměrně malé, přibližně $2\,000\text{ N.m}^{-2}$. I přes tak malé zatížení může dojít k narušení pórovitosti, která je v takové hloubce již velice malá, a zabránění vsaku půdy. I při častém působení této síly se ovšem jedná o horizont desítek let, při kterých by mohlo dojít k poškození půdy. Poslední otázkou zůstává, jaký bude dlouhodobý vliv těchto zatížení a zdali půdotvorné a regenerační procesy dokáží odvrátit utužení půdy. Jak je vidět, program COMSOL Multiphysics již dnes dokáže určit velikost zatížení a při detailnějším zadání hodnot je schopen vytvořit i reálnou deformaci půdy.



Obr. č. 21: Detail zatížení

5.3.1 Porovnání dat pro přední a zadní kolo

Jak již bylo zmíněno, byly vytvořeny dvě analýzy. První studie, která byla detailně popsána v této práci, byla vytvořena pro simulování zatížení předního kola traktoru. Druhá byla vytvořena pro zadní kolo, které má jiný průměr, šířku a působí na něj jiná síla. Pro druhou studii byly použity hodnoty z tabulky č. 8. Materiály byly použity stejné jako pro první kolo (byly i stejně definovány jejich vlastnosti). Na obrázku č. 22 (přední kolo) a na obrázku č. 23 (zadní kolo) lze pozorovat rozdíly jednotlivých analýz.

Jak je vidět na obrázcích a jim odpovídajících stupnicích, znázorňujících zatížení, je patrné, že zadní kolo vytváří mnohem větší tlak na půdu, i přes jeho větší styčnou plochu. V předcházející části bylo ve 400 mm pod povrchem (hodnota odpovídající hloubkovému kypření), naměřeno $5\,500\text{ N.m}^{-2}$. Při pohledu na obrázek č. 23 je vidět, že stejné zatížení působí až do hloubky 600 mm. Minimální zatížení pak působí až do hloubky 2.8 m.

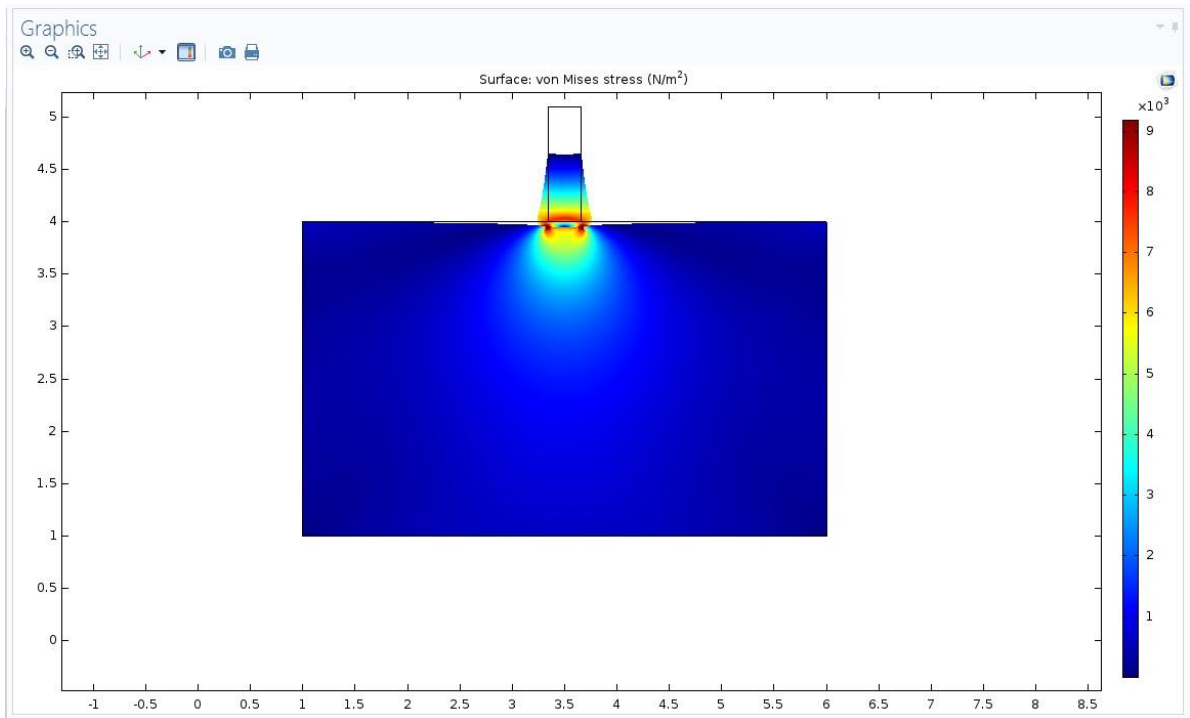
Výpočty pro oba objekty byly provedeny při klidovém zatížení. Při pojezdu by byl dopad na půdu mnohem větší, vzhledem k tomu, že obě kola jsou v zákrytu a zadní

projíždí v brzdě vytvořené předním kolem. Největší zatížení bylo v obou případech na styčné ploše pneumatiky s půdou a postupně klesalo.

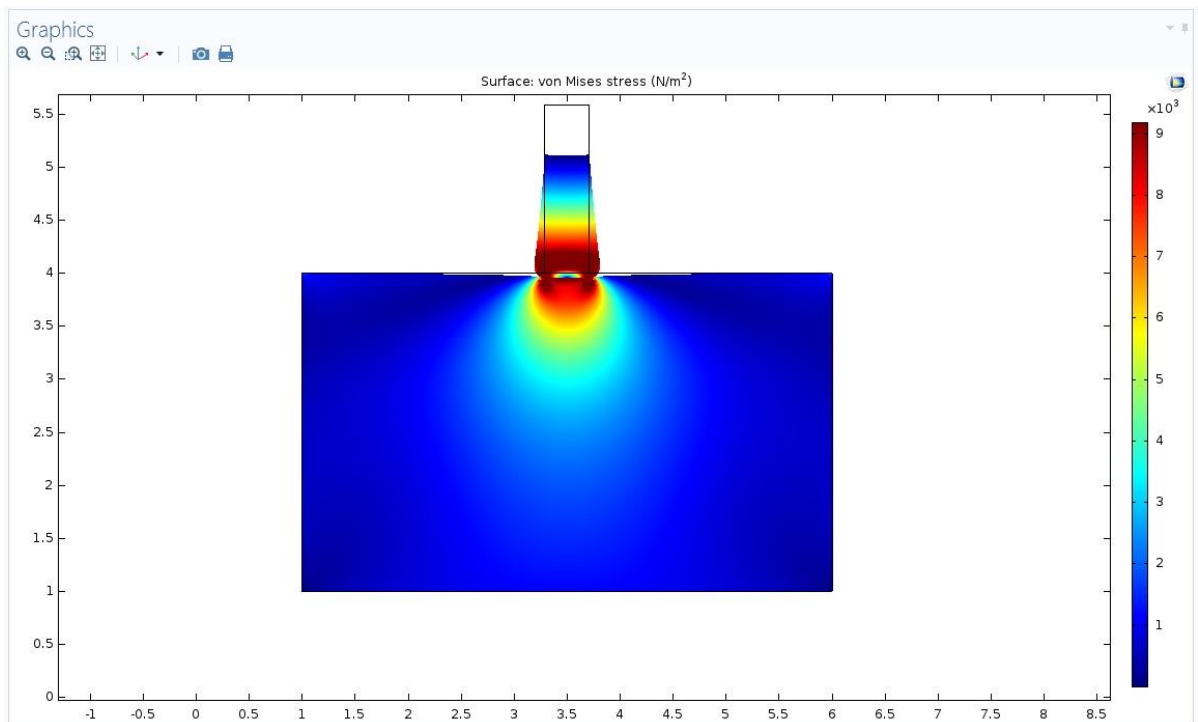
Naměřené hodnoty lze vidět v tabulce č. 11, ve které jsou vypsány hodnoty pro obě kola. Tyto hodnoty nejsou naprosto přesné, protože byly odvozeny odhadem z barevně rozdělené stupnice. Z tabulky je dále patrné, že při hloubce 2.5 m je u předního kola zatížení téměř nezatelné oproti zadnímu, které stále ukazuje znatelné hodnoty.

Hloubka	Zatížení [N.m ⁻²]	
	Přední kolo	Zadní kolo
0.1	8 000	9 000
0.4	5 500	7 000
1	3 000	4 000
1.5	2 000	3 000
2	1 000	2 000
2.5	200 - 500	1500

Tab. č. 11: Vypočtené hodnoty tlaku v různých hloubkách



Obr. č. 22: Vyhodnocený model pro přední kolo



Obr. č. 23: Vyhodnocený model pro zadní kolo

Závěr

Tato práce byla vypracována jako pomocný materiál, sloužící k rychlé orientaci v programu COMSOL Multiphysics a jeho aplikaci na problematiku týkající se utužení půdy. Celá práce byla koncipována jako návod na vytvoření modelu a vychází z předchozí teoretické části, která přibližuje půdu a její utužení.

COMSOL Multiphysics se ukázal jako všestranný pomocník při řešení multifyzikálních jevů a díky předdefinovaným příkladům urychlí proces řešení dané problematiky a ušetří tak čas i peníze. Jeho velkou výhodou je i přehlednost, díky které může být použit jako výukový systém pro lepší pochopení fyzikálních jevů.

K programu lze dále přikoupit nastavbové moduly, které rozšíří jeho uplatnitelnost. V této práci bylo využito nastavbového modulu Geomechanical Module, který dokáže pracovat s vlastnostmi půdy. Jeho uplatnění v geodezii může být nyní rozšířeno o uplatnění v zemědělství. Tento program by mohl pomoci objasnit mnoho nežádoucích vlivů zemědělství na půdu. Jedním z nejzásadnějších vlivů v zemědělství je utužení půdy působením zemědělské techniky. Díky tomuto programu by se dalo určit, do jaké míry pojezd zemědělské techniky ovlivňuje půdu, a to především její fyzikální vlastnosti. Tato problematika byla v této práci nastíněna vytvořením 2D modelu a simulací fyzikálních jevů.

Program COMSOL Multiphysics může být díky svým vlastnostem pro zemědělství velkým přínosem a předejít tak nevratnému znehodnocení půdy, které by mohlo mít fatální následky na celou lidskou populaci.

Seznam použité literatury

- [1] [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/definice_pudy/\\$FILE/OOHPP-Definice_pudy-20080820.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/definice_pudy/$FILE/OOHPP-Definice_pudy-20080820.pdf) „Staženo dne: 12.11.2016“
- [2] ŠIMEK M. (2005): *Základy nauky o půdě: 1., Neživé složky půdy*. 2. vyd. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Biologická fakulta. 159 s., ISBN: 80-7040-747-6
- [3] BARDGETT R. D. (2005): *Biology of Soil*. Oxford University Press. 256 s., ISBN13 (EAN): 9780198525035, ISBN10: 0198525036
- [4] BRTNICKÝ M. (2015): *Půdoznalství v kostce*. Mendelova Univerzita. 80 s., ISBN: 978-80-7509-283-0
- [5] http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=jak_vznika_a_kde_se_ztraci_pud_a&site=puda „staženo dne: 10.1.2017“
- [6] HLADKÝ J. (2015): *Aplikované půdoznalství*. Mendelova Univerzita. 24 s., ISBN 978-80-7509-269-4
- [7] ŠARAPATKA B. (2014): *Pedologie a ochrana půdy*. Univerzita Palackého v Olomouci. 232 s., ISBN13 (EAN): 9788024437361, ISBN10: 978-80-244-3736-1
- [8] Tomášek M. (2014): *Půdy České republiky*. Česká geologická služba. 112 s., ISBN 978-80-7075-861-8
- [9] http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=pudni_druhy_podle_zrnitostiho_slozeni&site=puda „staženo dne: 15.1.2017“
- [10] http://galerie.gymjil.cz/zahradnik/pedosfera/pudni_druhy_pudni_typy.htm „staženo dne: 20.1.2016“
- [11] http://www.vseweb.cz/svet_prace_krajina/024.pdf „staženo dne 6.2.2017“
- [12] <http://web.ead.anl.gov/resrad/datacoll/soildens.htm> „staženo dne: 12.2.2017“
- [13] <http://www.agriinfo.in/?page=topic&superid=4&topicid=271> „staženo dne: 15.2.2017“
- [14] http://www.sefindia.org/forum/files/appc_soil_properties_718.pdf „staženo dne: 20.3.2017“
- [15] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/permot3.html> „staženo dne: 4.3.2017“

- [16] <https://www.nrc.gov/docs/ML1015/ML101580051.pdf> „staženo dne: 15.3.2017“
- [17] http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/7_vol3_475.pdf
„staženo dne: 15.3.2017“
- [18] <http://pedologie.czu.cz/prednasky/zpop/zpop11.pdf> „staženo dne: 20.3.2017“
- [19] <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:24435/eth-24435-01.pdf>
„staženo dne: 20.3.2017“
- [20] <http://uroda.cz/technogenni-zhutnovani-pudy-nezadouci-jev/>
„staženo dne: 20.3.2017“
- [21] <http://www.ochrana-pudy.cz/hrozby-pro-pudu/zhutneni/zhutneni/2014/09/06/>
„staženo dne: 20.3.2017“
- [22] <http://www.ochrana-pudy.cz/hrozby-pro-pudu/zhutneni/utuzeni-pudy-limituje-ekonomiku-vsech-plodin/2014/09/09/> „staženo dne: 25.3.2017“
- [23] <https://leporelo.info/utuzeni-pudy> „staženo dne: 28.3.2017“
- [24] http://aa.ecn.cz/img_upload/7331e1faea7fac726e0197358f83ecdd/bio0901_zpravodaj.pdf „staženo dne: 29.3.2017“
- [25] <http://www.humusoft.cz/comsol/> „staženo dne: 22.3.2017“
- [26] <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> „staženo dne: 22.3.2017“
- [27] <http://www.scienceworld.cz/ostatni/comsol-multiphysics-3-4-resi-ulohy-na-viceprocesorovych-pocitacich-811/> „staženo dne: 24.3.2017“
- [28] <https://www.comsol.com/structural-mechanics-module> „staženo dne: 25.3.2017“
- [29] <http://www.humusoft.cz/comsol/structural-mechanics-module/>
„staženo dne: 25.3.2017“
- [30] <http://www.humusoft.cz/comsol/geomechanics-module/>
„staženo dne: 28.3.2017“
- [31] https://www.comsol.com/story/download/131843/Georg_August_CN12.pdf
„staženo dne: 1.4.2017“
- [32] <http://www.zetor.cz/zetor-proxima-technicke-parametry#obsah>
„staženo dne: 1.4.2017“

[33] <http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/cueddatabooks/materials.pdf> „staženo dne: 6.4.2017“

[34] http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf „staženo dne: 10.4.2017“

[35] <http://www.goodfellow.com/E/Polystyrene.html> „staženo dne: 10.4.2017“

Seznam obrázků

Obr č. 1: Půdní horizont	13
Obr č. 2: Grafické znázornění zrnitostních skupin.....	15
Obr č. 3: Schéma modelu	26
Obr č. 4: Grafické znázornění zrnitostních skupin.....	15
Obr č. 5: Výběr pracovního prostoru	29
Obr č. 6: Výběr dimenze	30
Obr č. 7: Výběr fyzikálního rozhraní	31
Obr č. 8: Výběr studie	32
Obr č. 9: Lišta geometry.....	33
Obr č. 10: Nastavení objektu znázorňující půdu.....	34
Obr č. 11: Nastavení objektu znázorňující kolo.....	35
Obr č. 12: Cesta k materiálu půda	36
Obr č. 13: Lišta nastavení půdy	36
Obr č. 14: Cesta k materiálu kaučuk	37
Obr č. 15: Lišta nastavení kaučuku	36
Obr č. 16: Nabídka Domains.....	39
Obr č. 17: Nabídka Boundaries a zafixované hrany	40
Obr č. 18: Vygenerovaná síť	41
Obr č. 19: Vytvořená studie	42
Obr č. 20: Panel nastavení exportu dat.....	43
Obr č. 21: Detail zatížení	45
Obr č. 22: Vyhodnocený model pro přední kolo	47
Obr č. 23: Vyhodnocený model pro zadní kolo	47

Seznam tabulek

Tab. č. 1: Klasifikační stupnice půdních druhů.....	14
Tab. č. 2: Hustoty půdních druhů.....	16
Tab. č. 3: Modul pružnosti půdních druhů.....	16
Tab. č. 4: Poissonovy konstanty půdních druhů	18
Tab. č. 5: Tepelné kapacity různých složek půdy	18
Tab. č. 6: Tepelné vodivosti různých složek půdy.....	19
Tab. č. 7: Snížení výnosu různých druhů plodin.....	20
Tab. č. 8: Parametry kol	27
Tab. č. 9: Hodnoty Young. Modulu a Poissonovy konstanty pro kaučuk	27
Tab. č. 10: Hodnoty fyz. veličin charakterizující půdu.....	28
Tab. č. 11: Odečtené hodnoty zatížení	46

Seznam použitých grafů

Graf č. 1: Zastoupení minerálních složek	11
--	----