



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

ANALÝZA NAMÁHÁNÍ VYBRANÝCH KONSTRUKČNÍCH ČÁSTÍ BAGRU PŘI PROVOZU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MICHAL BUSTA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR VOSYNEK, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Michal Busta
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce:	Ing. Petr Vosynek, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza namáhání vybraných konstrukčních částí bagru při provozu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Problematika je zaměřena na výpočtové modelování nabírání zeminy pomocí kompaktního bagru od firmy Bobcat CZ, a.s za účelem zjištění mechanického namáhání během děje (nabírání zeminy). Způsob řešení spočívá v sestavení sady výpočtových numerických modelů v softwarech Ansys Mechanical a Rocky DEM a jejich analyzování. Rozpojování modelu domény zeminy modelem geometrie lopaty (tuhé těleso) bude řešeno dynamicky v časové oblasti za pomocí programu Rocky DEM metodou DEM (Discrete Element Method). Dynamické chování konstrukce bagru během modelovaného děje bude řešeno na kinematickém modelu sestaveném v Ansys Mechanical, kdy zatížení v časové oblasti bude převzato z předešlého modelu rozpojování zeminy. Na základě velikosti výsledných sil ve styčnicích kinematického modelu budou vybrány kritické časy (stavy). Styčnickové síly ve vybraných časech výpočtu budou vneseny na detailní model vybraných konstrukčních částí bagru a bude provedená statická analýza mechanického namáhání těchto konstrukčních částí.

Cíle diplomové práce:

- Rešeršní studie.
- Tvorba výpočtových modelů pro modelování nabírání zeminy (DEM) a pro pevnostní analýzy vybraných konstrukčních částí.
- Analýza výsledků z jednotlivých výpočtových modelů.
- Hodnocení mezního stavu pružnosti a únavové pevnosti vybraných částí bagru.
- Posouzení výsledků a diskuze.

Seznam doporučené literatury:

ANSYS, INC. ANSYS Mechanical User's Guide: release 2020 R2, USA, 2020

Rocky DEM 4.4 user manual

Discrete Element Methods: Numerical Modeling of Discontinua Edited by Benjamin K. Cook; and Richard P. Jensen, GSP, 2002

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard Gordon BUDYNAS, HARTL, Martin a Miloš VLK, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUUM, 2010

DOWLING, Norman E. Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 4th ed. Boston: Pearson, c2013. ISBN 01-313-9506-8.

LEE, Yung-Li, Mark E. BARKEY a Hong-Tae KANG. Metal fatigue analysis handbook: Practical problem-solving techniques for computer-aided engineering. USA: Elsevier, 2012. ISBN 978-0-0-2-385204-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Práce se zabývá výpočtovým modelováním nabírání zeminy pomocí kompaktního rýpadla od firmy DOOSAN BOBCAT EMEA s.r.o. Způsob řešení spočívá v sestavení dvou výpočtových modelů v softwarech Rocky DEM a Ansys Mechanical. Program Rocky DEM je použit k řešení rozpojování zeminy konstrukcí bagru pomocí metody diskrétních prvků. Výstupem jsou průběhy sil a momentů v čase v jednotlivých styčnicích použitého modelu. Získané průběhy jsou následně, pomocí kinematického modelu v ANSYS Mechanical, aplikovány jako vnější zatížení do styčnicku u vybrané konstrukční části analyzovaného modelu. Kinematický model je tvořen zjednodušenými modely geometrie jednotlivých částí ramene bagru a detailnějším modelem geometrie analyzované části ramene. Všechny části jsou navzájem spojeny rotačními vazbami představujícími styčnicku. U takto připraveného modelu je v ANSYS Mechanical provedena statická strukturní analýza mechanického namáhání během simulovaného děje. Nakonec je vybraná konstrukční část posouzena vzhledem k meznímu stavu pružnosti a únavové pevnosti.

Abstract

This thesis is focused on the issue of computational modeling of soil harvesting while using the compact excavator from the company DOOSAN BOBCAT EMEA s.r.o.. The solution consists in creating two computational models in Rocky DEM and Ansys Mechanical. Rocky DEM software is used to solve the disconnection of soil by excavator components using the discrete element method. The outcome includes courses of forces and moments during the particular time of the individual joints of the model that was used. The obtained courses are then applied as an external load to the joint of a selected structural part of the analyzed model using a kinematic model in ANSYS Mechanical. The kinematic model consists of simplified geometry models of individual parts of the excavator arm, and a more detailed geometry model of the analyzed part of the arm. All the parts are connected to each other by rotational bonds representing joints. A static structural analysis of the mechanical stress is performed in ANSYS Mechanical for the prepared model during the simulated process. Finally, the selected structural part is assessed with respect to the elastic limit and fatigue strength.

Klíčová slova

kompaktní rýpadlo, Rocky DEM, metoda diskrétních prvků, metoda konečných prvků, kinematický model, únavová pevnost, částice

Keywords

compact excavator, Rocky DEM, discrete element method, finite element method, kinematic model, fatigue strength, particles

BUSTA, M. *Analýza namáhání vybraných konstrukčních částí bagru při provozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2021. 78 s. Vedoucí Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Vosynka, Ph.D. s využitím uvedené literatury a konzultací s firmami SVS FEM s.r.o. a DOOSAN BOBCAT EMEA s.r.o.

Bc. Michal Busta

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Petru Vosynkovi Ph.D za cenné připomínky k této práci. Dále bych chtěl poděkovat firmám DOOSAN BOBCAT EMEA s.r.o. a SVS FEM s.r.o. za konzultace v průběhu vypracování práce. Obzvláště bych pak chtěl poděkovat Ing. Zdeňku Čadovi, Ph.D. a Ing. Marku Šebíkovi za jejich ochotu a vstřícný přístup.

Bc. Michal Busta

Obsah

1	Úvod	4
2	Vymezení problémové situace	5
2.1	Formulace problému	5
2.2	Cíle řešení	5
3	Rešeršní studie	6
3.1	Metoda diskretních prvků	6
3.1.1	Spojité vs diskretní přístup	6
3.1.2	Základní princip DEM	7
3.1.3	Výhody a omezení zařazení DEM do návrhového procesu strojních zařízení	9
3.1.4	Příklady použití DEM	10
3.2	Prostředí Rocky DEM	12
3.2.1	Kalibrace vstupních parametrů pro DEM	12
3.2.2	Modely kontaktních sil	14
3.2.3	Modely adhezních sil	19
3.2.4	Modely valivého odporu	21
3.2.5	Další možnosti využití Rocky DEM	22
4	Praktická část	25
4.1	Poskytnutý model geometrie	25
4.2	Výpočtový model v Rocky DEM	26
4.2.1	Vstupní parametry pro DEM simulaci	27
4.2.2	Nastavení simulace	29
4.2.3	Analýza výsledků simulace	35
4.3	Propojení Rocky DEM a Ansys Mechanical	39
4.3.1	Plná integrace Rocky DEM v Ansys Workbench	39
4.3.2	Zvolený alternativní způsob propojení	40
4.4	Výpočtový model v Ansys Mechanical	42
4.4.1	Model materiálu	42
4.4.2	Model geometrie	43
4.4.3	Sít konečných prvků	44
4.4.4	Okrajové podmínky	45
4.4.5	Nastavení analýzy	49
4.4.6	Analýza výsledků simulace	49
4.4.7	Určení kritických míst	50
4.5	Vyhodnocení násady rýpadla vůči mezním stavům	52
4.5.1	Mezní stav pružnosti	52
4.5.2	MS únavové pevnosti	56
5	Závěr	69
5.1	Náměty pro další práci	70
	Literatura	71

Seznam obrázků	74
Seznam tabulek	77
Seznam použitých zkratek	78

1. Úvod

Společnost DOOSAN BOBCAT EMEA s.r.o. je výrobcem stavebních a zemědělských strojů a společnost Bobcat CZ, a.s. je autorizovaným prodejcem těchto strojů. Produkto-
vová nabídka zahrnuje: smykem řízené nakladače, pásové nakladače, kompaktní rýpadla, teleskopické manipulátory, příslušenství a náhradní díly značky Bobcat [4].

Kompaktní rýpadla jsou velmi užitečnými pomocníky pro výkopové a zemní práce, zejména v městské zástavbě, a patří do kategorie zemních strojů, jejichž náplní práce je rozpojování zeminy. Práci v omezeném prostoru usnadňuje nulový přesah kabiny. Vynikají především svými kompaktními rozměry a ovladatelností. Hlavní části kompaktního rýpadla jsou zobrazeny na obr. 1.1. Produkt na obr. 1.1 je jen ilustrační.

Již v úvodu mé práce je důležité poznamenat, že práce se nevěnuje analýze konkrétního modelu kompaktního rýpadla od firmy DOOSAN BOBCAT EMEA s.r.o., ale pracuje pouze s tzv. "dummy daty" (viz kapitola 4.1). Jedná se o veřejně přístupná data, která neuvádějí konkrétní typ rýpadla.

Hlavním výstupem mé práce je ukázka metodiky vyhodnocování konstrukčních částí, které přichází do kontaktu s různými sypkými hmotami, a způsobu, jak během tohoto procesu efektivně propojit dvě různé simulační metody (metodu diskrétních prvků a metodu konečných prvků). Metodika je ilustrována na příkladu nabírání zeminy pomocí kompaktního rýpadla.



Obrázek 1.1: Kompaktní rýpadlo, ilustrační obrázek [4]

2. Vymezení problémové situace

Numerické simulace v dnešní době hrají důležitou roli. Umožňují zefektivnění procesu návrhu strojních částí a celků, během kterého je možné produkt otestovat na předpokládané provozní podmínky. Dochází tak ke snížení nákladů a času potřebného na vývoj produktu.

Firma DOOSAN BOBCAT EMEA s.r.o. se v problematice návrhu strojních částí a celků obrátila na firmu SVS FEM s.r.o. a jejich společným cílem je zlepšit schopnost predikce únavové životnosti jejich produktů. Ty přicházejí v provozu do kontaktu s různými typy zemin. Aby mohlo být dosaženo přesnější predikce únavové životnosti produktů, tak je třeba do numerických simulací zahrnout i simulace za použití metody diskrétních prvků. Na této metodě je postaven software Rocky DEM, který zároveň nabízí plnou integraci s ANSYS Workbench. Plná integrace umožňuje do návrhového procesu efektivně zahrnout jak metodu diskrétních prvků, tak i metodu konečných prvků.

2.1. Formulace problému

Problém spočívá v sestavení dvou výpočtových modelů v prostředích Rocky DEM a ANSYS Mechanical a jejich vzájemném propojení. Výsledky z výpočtového modelu v Rocky DEM jsou aplikovány jako vstupní zatížení kinematického modelu v ANSYS Mechanical. Následně je vybraná konstrukční část posouzena vůči mezním stavům pružnosti a únavové pevnosti.

2.2. Cíle řešení

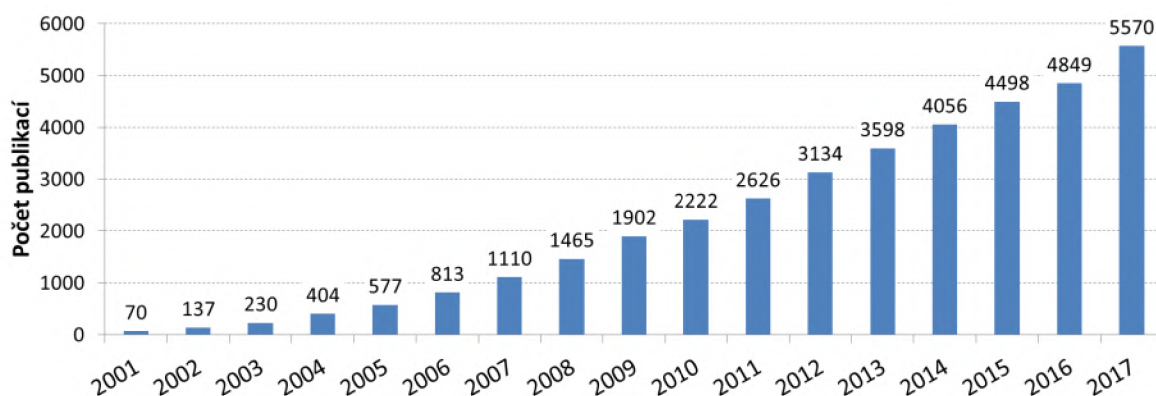
1. Rešeršní studie (metoda diskrétních prvků, Rocky DEM).
2. Tvorba výpočtových modelů v Rocky DEM a Ansys Mechanical.
3. Přenos výsledného zatížení z Rocky DEM na kinematický model v Ansys Mechanical a analýza výsledků z jednotlivých výpočtových modelů.
4. Hodnocení mezního stavu pružnosti a únavové pevnosti vybrané části rýpadla.

3. Rešeršní studie

V této kapitole je pro lepší pochopení problematiky uvedena podstata metody diskrétních prvků. Další část je věnována komerčnímu softwaru Rocky DEM, založenému na této metodě, a možnostem jeho využití. Zároveň jsou zde uvedeny modely kontaktních sil použité během výpočtového modelování, které jsou v Rocky DEM zabudované.

3.1. Metoda diskrétních prvků

Počátek metody diskrétních prvků (z anglického *discrete element method*, dále jen DEM) se datuje do roku 1979, kdy Cundall a Strack zveřejnili svou práci [7] pro modelování částicových systémů. Zásluhou zvyšování výpočetní síly a dostupností nových uživatelsky přívětivých komerčních softwarů v posledních letech se DEM stává stále více uznávaným numerickým nástrojem napříč různými průmyslovými odvětvími, které se zabývají sypkými hmotami, prášky, tabletami a jinými typy granulárních médií. Od počátečních 2D simulací se simulace vyvinuly do sofistikovanějších 3D simulací, které dávají schopnost řešit složitější problémy. Nárůst zájmu o DEM ukazuje obr. 3.1, na kterém je vývoj počtu publikací týkajících se simulací diskrétních částic v letech 2001 až 2017 [6][8].



Obrázek 3.1: Počet publikací na téma DEM mezi lety 2001 - 2017 [6]

3.1.1. Spojitý vs diskrétní přístup

Řešení problematiky toků a deformací nejen sypkých materiálů je zpravidla rozdělováno do dvou přístupů. Jedná se o tzv. spojitý a diskrétní přístup.

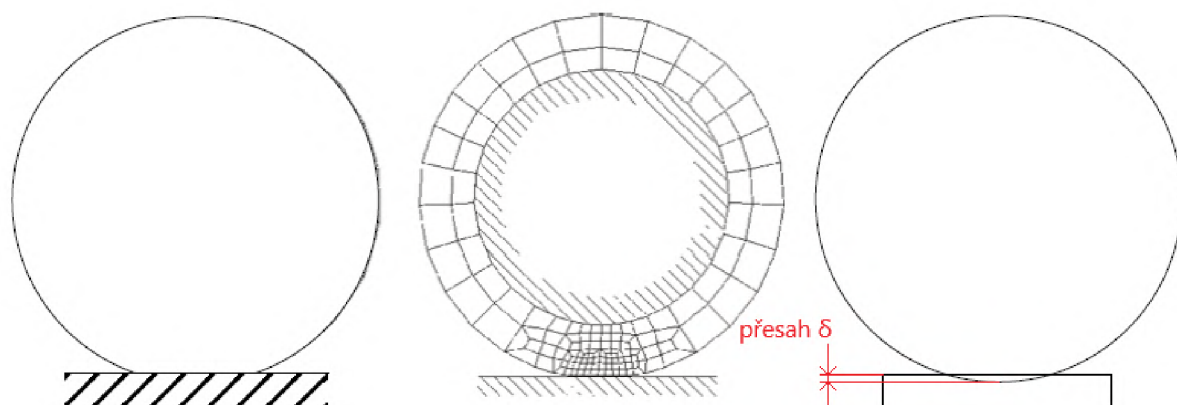
V případě spojitého přístupu je materiál popisován jako kontinuum a „*vliv orientace, tvaru a velikosti jednotlivých částic zde není uvažován*“ [8].

Naopak v rámci diskrétního přístupu je materiál popisován jako soustava konečného počtu částic s konkrétními rozměry, tvary a materiálovými vlastnostmi. DEM je vhodná pro popis chování jak homogenních, tak také nehomogenních materiálů [8].

3.1.2. Základní princip DEM

V DEM je každá částice modelována odděleně. Interakce mezi jednotlivými částicemi nebo částicemi a tuhými tělesy, například lžíce bagru, jsou počítány v diskrétních časových krocích na základě modelů kontaktních sil (kapitola 3.2.2) a řízeny fyzikálními zákony (především druhým Newtonovým pohybovým zákonem).

DEM model je v Rocky DEM založen na „soft-sphere“ metodě, což je nejběžnější typ metody u DEM simulací. U této metody (obr. 3.2) jsou deformace během kontaktu modelovány vzájemnou penetrací jednotlivých částic nebo částic a tuhých těles v simulaci. Nedochozí k žádné viditelné deformaci, částice zachovávají svůj tvar a „deformace“ jsou zahrnuty pouze v modelech kontaktních sil, kdy normálové síly jsou funkcí přesahu [18]. Hodnota přesahu δ by neměla být větší než 1 % průměru částice. Princip metody je podobný pokutovému přístupu pro modelování kontaktů v MKP, u kterého je také umožněna penetrace objektů v kontaktu. Přičemž na rozdíl od MKP, kde těleso je diskretizováno na konečný počet prvků a jako celek má velké množství stupňů volnosti, tak u DEM má částice pouze tři stupně volnosti pro 2D úlohy a šest stupňů volnosti pro 3D úlohy [2].



Obrázek 3.2: Kolize částice s tuhou podložkou (částice se vlivem nárazu na tuhou podložku deformuje, nalevo) a simulace této kolize pomocí MKP (deformovatelná částice s jemnou sítí v místě kontaktu, pro který byl použit jiný než pokutový přístup, uprostřed) a DEM (penetrace částice do podložky, napravo), upraveno podle [2]

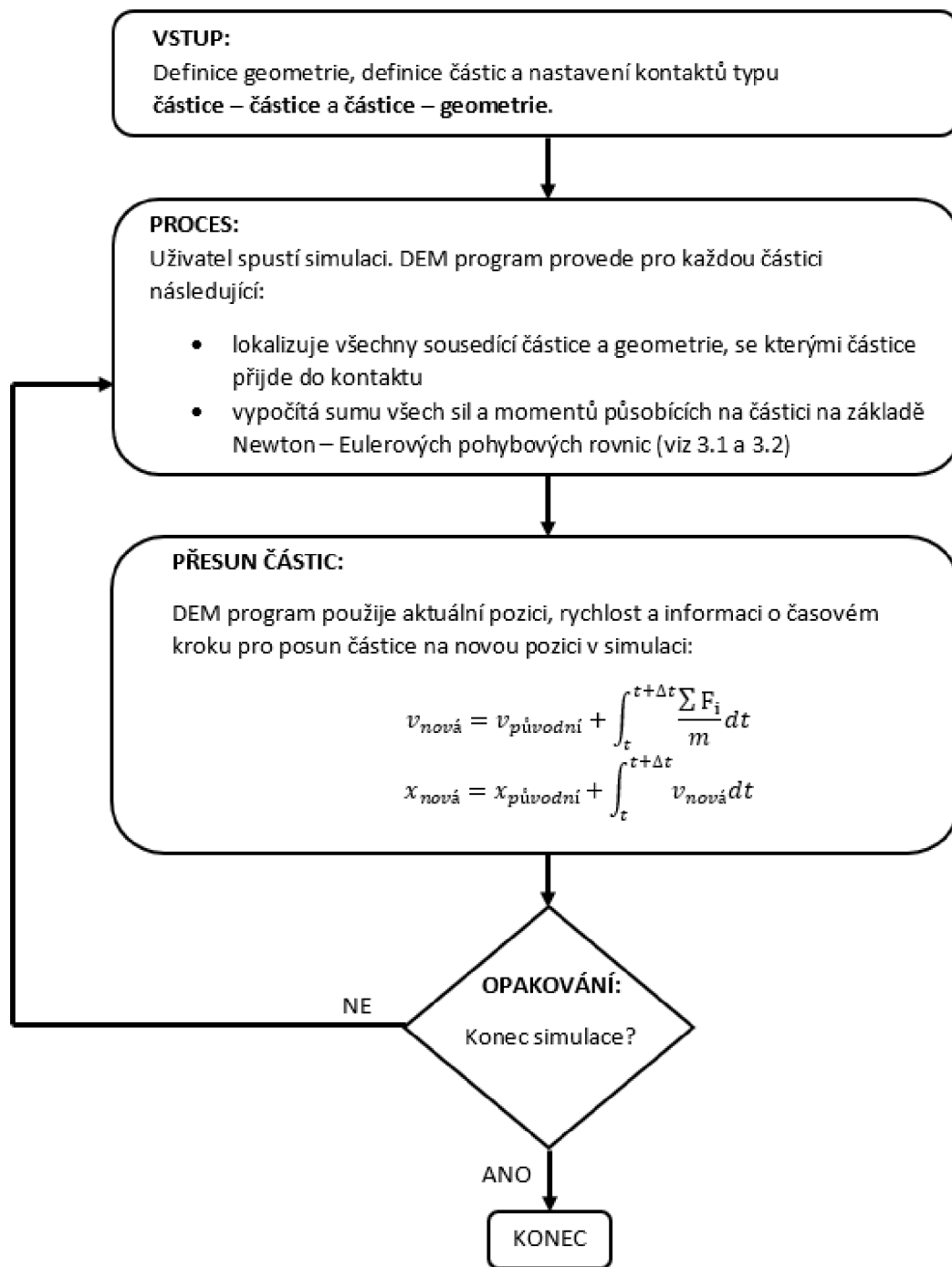
Algoritmus DEM

Základní výpočetní algoritmus DEM zobrazený na obr. 3.3 začíná importem geometrie do prostředí simulace, vytvořením částic, zadáním vstupních parametrů a nastavením kontaktů typu částice-částice a částice-geometrie. V programovém prostředí jsou k dispozici různé základní tvary částic (koule, mnohostěn, válec, brikety atd.) nebo Rocky DEM umožňuje vložit naskenovaný tvar reálné částice. Mezi vstupní parametry patří materiálové vlastnosti (hustota, Youngův modul, Poissonova konstanta, tepelná vodivost, měrné teplo) a kontaktní parametry (součinitelé statického a dynamického tření, koeficient restituce, parametry adheze). Dalším vstupem jsou i pohyby tuhých těles v simulaci [11].

Délka simulačního kroku Δt je vypočtena na základě materiálových vlastností částic a tuhých těles. Obecně platí, že čím větší je hodnota normálové tuhosti kontaktu K_n (K_n je funkcí průměru částice D , Youngova modulu E a Poissonovy konstanty ν), tím menší

3.1. METODA DISKRÉTNÍCH PRVKŮ

je hodnota časového kroku Δt . Časový krok Δt se zmenšuje i s klesající velikostí částic [11].



Obrázek 3.3: Vývojový diagram algoritmu DEM, kde F je síla, m je hmotnost, t je čas, v je rychlost a x je pozice, upraveno podle [1]

Následně jsou částice generovány a jsou jim přiřazeny počáteční souřadnice. Dále nastává proces detekce kontaktů mezi částicemi a částicemi a tuhými tělesy. Detekce kontaktů je časově nejnáročnější částí a podle textu [18] tvoří přibližně tři čtvrtiny celkového výpočtového času.

Jakmile jsou detekovány všechny kontakty, tak pro každý z nich je řešena kontaktní úloha na základě zvolených modelů kontaktních sil. Je stanovena suma všech sil a momentů působících na částice v daném čase t pomocí Newton-Eulerových pohybových rovnic: [3]

$$\sum \vec{F}_i = \vec{F}_{b,i} + \vec{F}_{s,i} = m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} \quad (3.1)$$

$$\sum \vec{M}_i = \vec{M}_{b,i} + \vec{M}_{s,i} = \vec{I}_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} + \vec{\omega}_i \times (\vec{I}_i \cdot \vec{\omega}_i) \quad (3.2)$$

kde $m_i, I_i, v_i, a \omega_i$ jsou hmotnost, moment setrvačnosti, rychlost pohybu a úhlová rychlost rotace částice i . M je moment a F je síla, index b (*body*) představuje objemové síly působící na částici a index s (*surface*) představuje kontaktní síly.

Výpočty jsou prováděny v diskrétních časových krocích. Z rovnic (3.1) a (3.2) jsou dále vypočítána dráhová a úhlová zrychlení částic a může být zahájena numerická integrace pohybových rovnic přes časový krok Δt pro získání dráhových a úhlových rychlostí částic v čase $t + \Delta t$. Po další integraci dostáváme nové pozice a natočení každé částice. V čase $t + \Delta t$ tedy známe nové pozice a rychlosti všech částic v simulaci. Poté je aktuální čas simulace navýšen o Δt , a pokud není dosaženo konce simulace, tak jsou znovu detekovány všechny kontakty v pozměněné konfiguraci částic a celý výpočet se opakuje až do konce simulace [11]. Mezi každým časovým krokem se částice pohybují po přímce na základě rychlosti a zrychlení v předchozím časovém kroku.

3.1.3. Výhody a omezení zařazení DEM do návrhového procesu strojních zařízení

Numerické modelování částicových systémů poskytuje možnost simulačně otestovat celkovou funkčnost zařízení ještě předtím, než je vyrobeno. Jsme schopni simulovat chování partikulárního materiálu v interakci s virtuálním modelem a ověřit jeho funkci. Stejně tak lze optimalizovat stávající inženýrská díla z hlediska geometrie, materiálu nebo provozních podmínek [6].

Mezi další výhody patří například: [6]

1. Zkoušení zařízení za kritických nebo destruktivních podmínek.
2. Možnost exportu výsledků DEM a následné použití jako vstupy pro FEM a CFD.
3. Možnost propojení s dalšími numerickými metodami.
4. Možnost programování vlastních kontaktních modelů nebo maker pro zautomatizování výpočtu.
5. Možnost nahlédnutí do toku granulárních hmot na mikromolekulární úrovni (na úrovni jednotlivých částic).
6. Možnost otestovat různá strojní zařízení za použití stejného modelu granulárního média. Během experimentů jsou vlastnosti granulárních médií ovlivněny například teplotou nebo vlhkostí.

3.1. METODA DISKRÉTNÍCH PRVKŮ

Omezení DEM:

1. Maximální počet částic, velikost částic a doba trvání simulace jsou omezeny dostupnými výpočetními možnostmi hardwaru.
2. Metoda je výpočtově náročná. Dříve probíhaly výpočty pouze na procesorech a rozsah simulace tak byl velmi omezen, nyní však Rocky DEM umožňuje provádět výpočty na několika grafických kartách současně a výrazně tak snížit výpočetní čas.
3. Přesnost této metody závisí na kalibraci vstupních parametrů. Neexistuje žádný univerzální postup, jak tyto vstupní parametry získat, ke každému problému musí být přistupováno individuálně.
4. Vhodnost použití této metody v její základní podobě závisí na předpokladu, že deformace jednotlivých částic jsou nepodstatné oproti deformaci posuzované soustavy jako celku [8].

3.1.4. Příklady použití DEM

Použití DEM bylo zatím experimentálně ověřeno v těchto odvětvích: [11],[5]

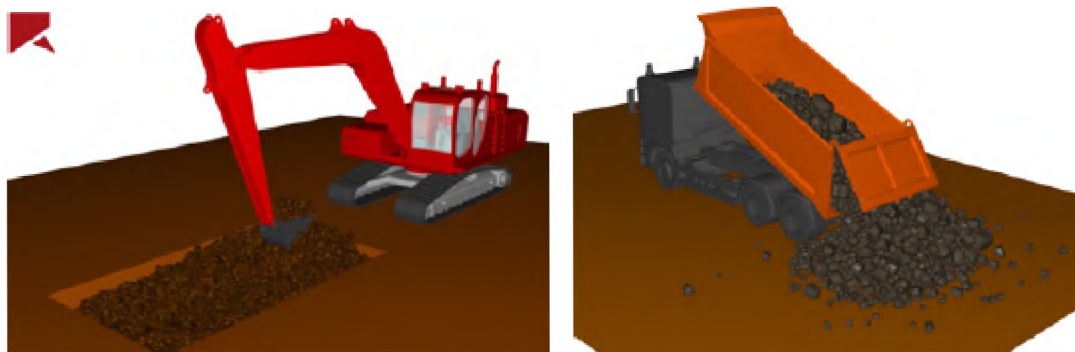
1. Těžební průmysl
 - Tok vsázky ve vysokých pecích
 - Mlýny a drtiče
 - Rýpadla a sklápěče (obr. 3.4) - návrh a optimalizace zařízení
 - Plnění lopaty rýpadla [12]
 - Simulace kulových mlýnů [13]
2. Zemědělství
 - Rozstřík hnojiva a simulace orby
 - Přeprava a manipulace s obilím
 - Zpracování půdy [14]
 - Efekt různých velikostí částic na podrývák [16]
 - Působení zeminy na nesený pluh [17]
3. Chemický průmysl
 - Rozpad tablet
4. Petrochemický průmysl
 - Opotřebení potrubí pískem
5. Životní prostředí, živé organismy
 - Čištění vody

6. Farmaceutický průmysl

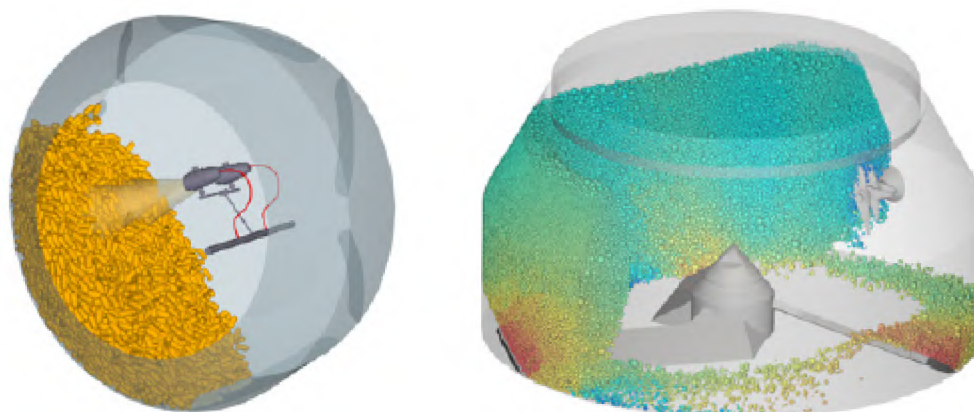
- Míchání sypkých hmot, mletí, potahování tablet a prášků (obr. 3.5), návrh inhalátoru

7. Potravinářský průmysl

- Kořenění chipsů, sušení fazolí, balení potravin
- Plnění forem [12]



Obrázek 3.4: Rýpadla a sklápěče [11]



Obrázek 3.5: Potahování tablet a mísení [11]

3.2. Prostředí Rocky DEM

Rocky DEM je komerční software od brazilské společnosti ESSS (Engineering Simulation and Scientific Software), která vznikla v roce 1995 a více než 25 let se zabývá simulacemi sypkých hmot.

V této kapitole je popsána kalibrační sada *Calibration suite* pro usnadnění kalibrace vstupních parametrů pro DEM simulace. Dále jsou popsány modely kontaktních sil (normálové, tečné) a modely adhezních sil, které jsou použity pro simulaci rozpojování zeminy konstrukcí rýpadla v softwaru Rocky DEM (viz Přehled modelů dostupných v Rocky DEM v 3.2.2). Okrajově je zmíněna i podstata modelů valivého odporu. Nakonec jsou uvedeny další možnosti využití tohoto softwaru.

3.2.1. Kalibrace vstupních parametrů pro DEM

Kalibrace vstupních parametrů pro DEM simulace je velmi důležitá, neboť bez ní nelze dosáhnout přesných výsledků. Aby bylo možné dosáhnout reálné reprezentace zeminy, je třeba provést kalibrační testy pro porovnání experimentu a simulace. U kalibračních testů je potřeba zajistit reprodukovatelnost a opakovatelnost. Vývojáři Rocky DEM vyvinuli ve snaze zjednodušit porovnání experimentů se simulacemi kalibrační sadu *Calibration suite*. Nejprve však budou objasněny základní pojmy jakými jsou sypný úhel a sypná hustota, které patří mezi parametry charakterizující vlastnosti sypkých hmot.

Vlastnosti partikulárních látek

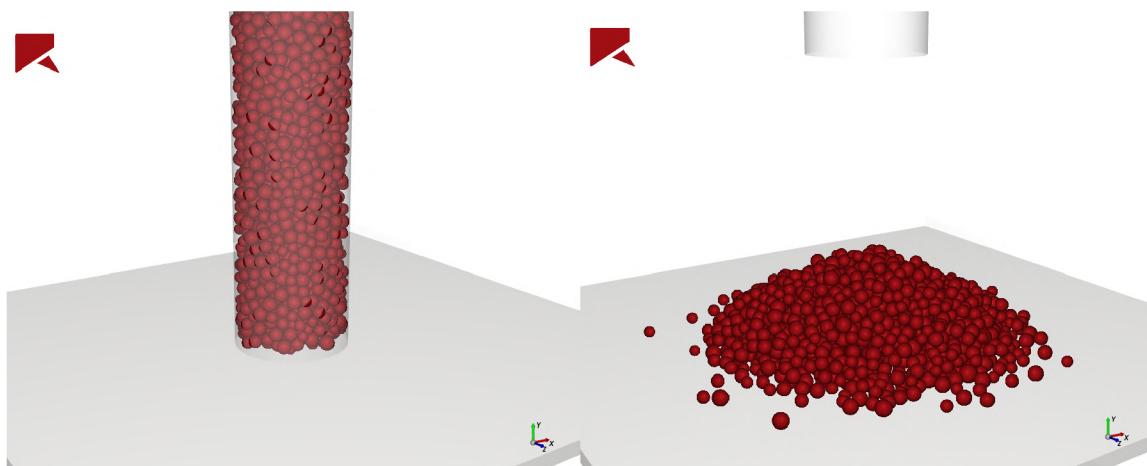
Partikulární látky jsou složeny ze vzájemně se dotýkajících částic pevné fáze a z fáze tekuté (plynné, kapalně), která zaplňuje mezery mezi jednotlivými částicemi – póry. Póry vznikající mezi částicemi jsou póry vnější a kromě nich se vyskytují také póry i v rámci jednotlivých částic. Pokud jsou tyto póry uvnitř částic a nesouvisí tedy s povrchem částice, jsou označovány jako póry uzavřené (vnitřní), naopak póry spojené s povrchem jsou nazývány jako póry otevřené (povrchové) [23].

- „**Sypný úhel** je největší úhel, který může svírat vodorovná rovina a povrchová příčka kužele tvořeného sypkým materiálem.“ [21] Používá se pro posouzení sypných vlastností. Sypný úhel závisí na vlastnostech materiálu (hustota, velikost částic, obsah vlhkosti) a rozeznáváme dva základní druhy: statický a dynamický. Čím větší je hodnota sypného úhlu, tím horší je schopnost materiálu téci.
- **Sypná hustota** je určena jako poměr hmotnosti částic ku objemu, který zahrnuje jak objem částic samotných, tak objem pórů. Obecně existují tři typy hustoty: pravá, sypná a setřesná. Pravá hustota nezahrnuje žádné interpartikulární prostory a je výhradně hustotou materiálu. Objem, který zaujme jednotka hmotnosti, se u sypké hmoty ve stlačeném stavu a hmoty ve volně nasypaném stavu může velmi lišit. Setřesná hustota je teoreticky maximální sypná hustota, které lze ve stlačeném stavu dosáhnout, aniž by došlo k deformaci částic. Sypná hustota závisí na konsolidaci (zhuštění) zeminy, s nárůstem konsolidace klesá porozita a dochází ke zvýšení sypné hustoty vlivem zmenšení objemu pórů mezi částicemi [22].

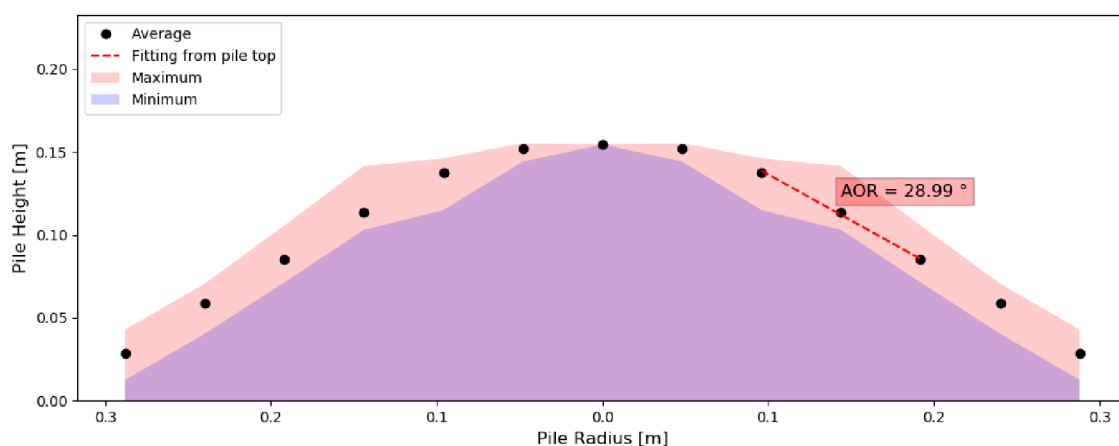
Rocky Calibration suite

Tato sada se skládá z osmi kalibračních testů sypkých hmot, jejichž přehled je uveden v tabulce 3.1. Všechny testy jsou vytvořeny v prostředí Rocky DEM, není třeba provádět je na externím softwaru. Každý test obsahuje i stručný návod, ve kterém jsou uvedeny informace ke vstupním parametrům nebo o způsobu vyhodnocení testu. Užívání je velmi jednoduché, neboť při spuštění simulace se uživateli objeví okno, do kterého je potřeba zadat požadované vstupní parametry, aby následně mohla proběhnout simulace. Díky zabudovaným pre a post procesingovým skriptům je výstupem každého testu graf, který obsahuje data potřebná pro porovnání s experimentem. Tyto skripty lze upravovat nebo vytvořit své vlastní.

Rozhodně není nutné provádět pro každý materiál celou sadu testů, protože většinou jsou experimentálně provedeny jen některé z nich nebo třeba jen jeden. Vždy se tedy simulují jen ty testy, které byly provedeny i experimentálně. Vhodnost testů závisí i na typu materiálu, například měření sypaného úhlu je vhodné pro volně tekoucí sypké hmoty, kdežto měření výpustného úhlu pro kohezní materiály. Na obrázcích 3.6 a 3.7 je ukázka kalibračního testu měření statického sypného úhlu pomocí válce v prostředí Rocky DEM.



Obrázek 3.6: Měření statického sypného úhlu pomocí válce



Obrázek 3.7: Výstupní graf z testu - hodnota statického sypného úhlu (AOR = angle of repose)

3.2. PROSTŘEDÍ ROCKY DEM

Tabulka 3.1: Přehled kalibračních testů v *Calibration suite*, převzato z [5]

Kalibrační test	Proces	Typ materiálu	Výstup
Měření statického sypného úhlu pomocí válce	Simulace statického úhlu pomocí zvedání válce a tření materiálu o stěny	Volně tekoucí	Statický sypný úhel
Měření výpustného úhlu	Simulace výpustného úhlu tření plněním obdélníkové nádoby a otevřením díry na dně nádoby	Kohezní	Výpustný úhel
Měření sypaného úhlu	Měření statického úhlu tření sypáním materiálu kruhovým vstupem z předepsané výšky	Volně tekoucí prášky	Sypný úhel
Sypná objemová hustota	Naplnění válce o známém objemu materiálem o známé hmotnosti	Sypký materiál	Průměrná objemová hustota
Smyková prášková cela	Zkoumá vnitřní tření materiálu při aplikování normálové síly	Práškové a jemné materiály	Mohrova kružnice, úhly vnitřního tření, mezní toková křivka
FT4 Rheometer	Výpočet odporu rotujícího sestupujícího kola uvnitř práškového lože	Volně tekoucí	Výkon, síla, moment a křivka tekutosti
Dynamický sypný úhel	Simulace dynamického sypného úhlu uvnitř otáčejícího se neklouzavého válce	Volně tekoucí	Dynamický sypný úhel
Nakloněná rovina	Simulace úhlu naklánějící se roviny, dokud materiál nezačne ujíždět	Sypký materiál	Úhel tření o stěnu

3.2.2. Modely kontaktních sil

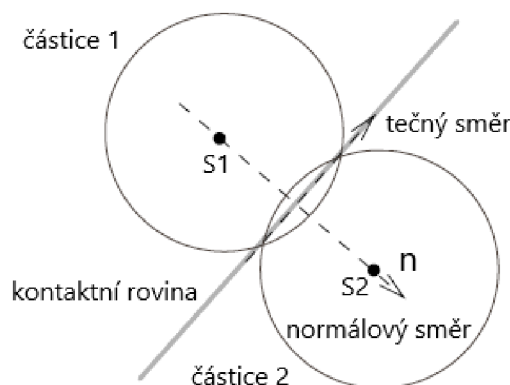
Veškeré informace a obrázky uvedené v této podkapitole a v podkapitolách 3.2.3, 3.2.4 vychází z technického manuálu pro Rocky DEM [1], pokud není uvedeno jinak.

Kontaktní modely popisují vzájemné silové působení mezi částicemi nebo mezi částicemi a jinými tělesy, se kterými přichází do kontaktu. Neexistuje nějaký univerzální model, který by dokázal popsat veškeré typy chování částic. Před každou aplikací je nutné zvážit, který model nejlépe odpovídá reálnému chování částic.

Kontaktní síly v jakémkoliv DEM kódu (včetně Rocky DEM) se dělí do dvou skupin (obr. 3.8):

- síly kolmé na kontaktní rovinu
- síly tečné ke kontaktní rovině

U kulových částic je kontaktní rovina kolmá na spojnici jejich středů. V případě nekulových částic je určení kontaktní roviny komplikovanější. Modely normálových sil mají dva základní předpoklady: síla musí být odpudivá a model musí umožnit disipaci energie, protože granulární média jsou extrémně disipativním systémem.



Obrázek 3.8: Definice normálového a tečného směru pro kontakt dvou částic ve 2D, upraveno podle [2]

Přehled modelů dostupných v Rocky DEM

Kromě klasických modelů kontaktních sil, jako jsou normálové a tečné síly, se v DEM kódech vyskytují i modely adhezních sil, valivého odporu, porušení, opotřebení a další. V této práci byly použity modely normálové, tečné a adhezní síly, proto byly z celkového přehledu všech modelů v Rocky DEM vybrány pouze tyto modely a následující přehled je neúplný. Kromě modelů použitých v této práci je okrajově popsána podstata modelů valivého odporu, které se používají zejména pokud jsou v simulaci použity pouze částice tvaru koule, a je potřeba zohlednit vliv nerovnosti nebo nepravidelnosti částic. Úplný přehled a popis všech modelů je k dispozici v technickém manuálu [1]. Modely použité v této práci jsou zapsány tučně a jsou popsány detailněji.

Přehled dostupných modelů:

1. Modely kontaktních sil
 - (a) Modely normálových sil
 - **Hysteretic linear spring model**
 - Linear spring-dashpot model
 - Hertzian spring-dashpot model
 - (b) Modely tečných sil
 - **Linear spring Coulomb limit model**
 - Coulomb limit model
 - Mindlin-Deresiewicz model
2. Modely adhezních sil
 - Constant adhesive force model
 - **Linear adhesive force model**
 - JKR adhesive force model
3. Modely valivého odporu
 - Type A: constant model
 - Type B: linear spring rolling limit

3.2. PROSTŘEDÍ ROCKY DEM

Modely normálových sil: Hysteretic linear spring model

Tento elasto-plastický model umožňuje simulovat disipaci plastické energie, aniž by se tím prodlužovala délka simulace. Kromě toho není přítomný žádný tlumící prvek, takže disipovaná energie není závislá na relativních rychlostech sousedících částic, nezávisí na kontaktech. Stlačitelné materiály mohou být přesně modelovány díky tomu, že kontaktní síly mohou být téměř nulové i při zbytkových přesazích. Model je implementován v Rocky DEM v inkrementální podobě pomocí následujících rovnic:

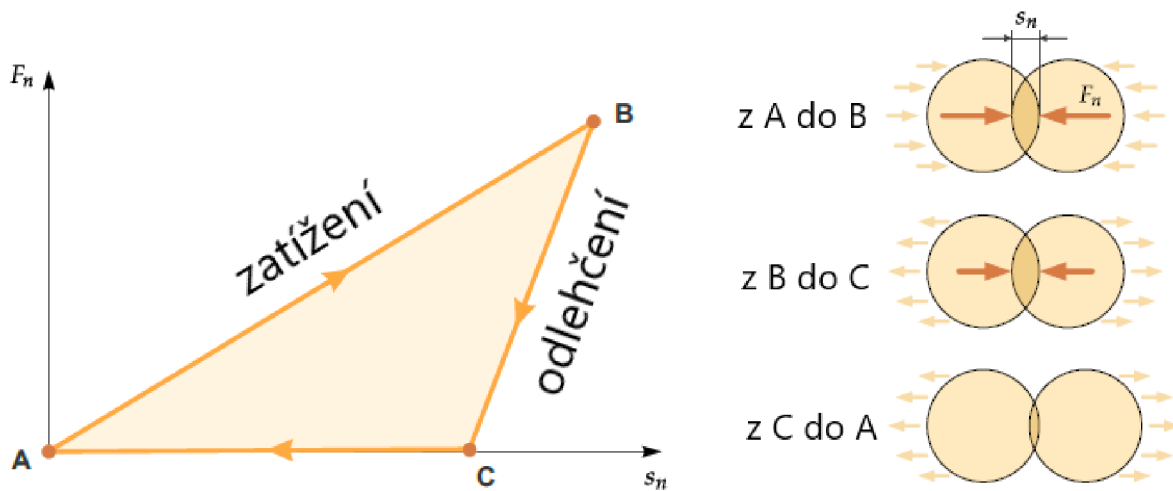
$$F_n^t \begin{cases} \min(K_{nl}s_n^t, F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n) & \text{když } \Delta s_n \geq 0 \\ \max(F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n, \lambda K_{nl}s_n^t) & \text{když } \Delta s_n < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$s_n = s_n^t - s_n^{t-\Delta t} \quad (3.4)$$

kde:

- F_n^t a $F_n^{t-\Delta t}$ jsou normálové síly v čase t a $t - \Delta t$, Δt je časový krok.
- Δs_n vyjadřuje změnu normálového přesahu během časového kroku. Při přibližování částic nabývá kladných hodnot a při oddalování záporných. s_n^t a $s_n^{t-\Delta t}$ jsou hodnoty normálového přesahu v čase t a $t - \Delta t$.
- K_{nl} a K_{nu} jsou hodnoty tuhostí kontaktu při zatěžování, respektive odlehčování.
- λ je bezrozměrná konstanta. Její hodnota v Rocky DEM je 0,001. Tato konstanta zajišťuje, že při odlehčování se hodnota normálové síly dostane na nulu, když přesah je nulový.

Typický cyklus zatížení a odlehčení je zobrazen na obr. 3.9.



Obrázek 3.9: Závislost síly na přesahu u modelu *Hysteretic linear spring*

Mezi body A a B probíhá zatížení, během kterého přesah normálové síly roste lineárně se sklonem K_{nl} a roste i hodnota normálové síly F_n . Po dosažení maximálního přesahu, který by ideálně neměl přesáhnout 5 % průměru částice, nastává odlehčování po strmější křivce mezi body B a C se sklonem K_{nu} . Vzdálenost mezi body A a C představuje tzv. trvalou plastickou deformaci v kontaktu. Plastická deformace v kontaktu existuje pouze

pokud kontakt trvá. Po úplném odlehčení (po dosažení bodu A) jsou zbytkový přesah (vzdálenost mezi body A a C) a trvalá plastická deformace „zapomenuty“. Energie disipovaná během kolize je rovna vystínované ploše pod křivkami zatížení a odlehčení na obr. 3.9.

Tuhosti při zatížení a odlehčení jsou definovány velikostí částic, Youngovým modulem částice, a koeficientem restituce. Koeficient restituce ϵ v Rocky DEM představuje míru disipované energie kontaktní dvojice materiálů. Pro kontakt dvou částic nebo částice a geometrie jsou tuhosti při zatížení a odlehčení definovány takto:

$$\frac{1}{K_{nl}} = \begin{cases} \frac{1}{K_{nl,p_1}} + \frac{1}{K_{nl,p_2}} & \text{pro kontakt částice – částice} \\ \frac{1}{K_{nl,p}} + \frac{1}{K_{nl,b}} & \text{pro kontakt částice – geometrie} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$K_{nu} = \frac{K_{nl}}{\epsilon^2} \quad (3.6)$$

kde indexy 1 a 2 označují jednotlivé částice v kontaktu. Jednotlivé tuhosti spojené s částicí a geometrií jsou vypočteny jako:

$$K_{nl,p} = E_p L \quad (3.7)$$

$$K_{nl,b} = E_b L \quad (3.8)$$

kde:

- E_p je Youngův modul materiálu částice, který může uživatel zadat jako materiálový parametr
- E_b je Youngův modul kolidující geometrie, který je také uživatelským vstupem
- L je velikost částice

U dlouhotrvajících kontaktů, například mezi částicemi, které jsou na hromadě, model *Hysteretic linear spring* může způsobit vznik oscilací o velmi malých výchylkách u normálové síly a přesahu. Ačkoliv jsou tyto oscilace téměř nepatrné, tak přesto mohou zabránit částicím v dosažení klidového stavu. Z tohoto důvodu byl v Rocky DEM přidán doplňkový mechanismus na disipaci energie za účelem potlačení těchto oscilací. Mechanismus spočívá v přidání viskózní síly, která se aktivuje pouze při sekundárních zátěžovacích cyklech u dlouhotrvajících kontaktů. Tato viskózní síla nepůsobí při běžných kolizích, takže disipovaná energie určená koeficientem restituce není v případě těchto kolizí ovlivněna. Definice viskózní síly v podobném významu jako u modelu *linear spring-dashpot* je následující:

$$F_{n,v} = C_n \dot{s}_n \quad (3.9)$$

kde \dot{s}_n časová derivace normálového přesahu a C_n je tlumící koeficient, definovaný rovnicí:

$$C_n = 2\eta\sqrt{m^*K_{nl}} \quad (3.10)$$

kde:

- η je poměr tlumení, bezrozměrný parametr, který souvisí s koeficientem restituce (obr. 3.10)

3.2. PROSTŘEDÍ ROCKY DEM

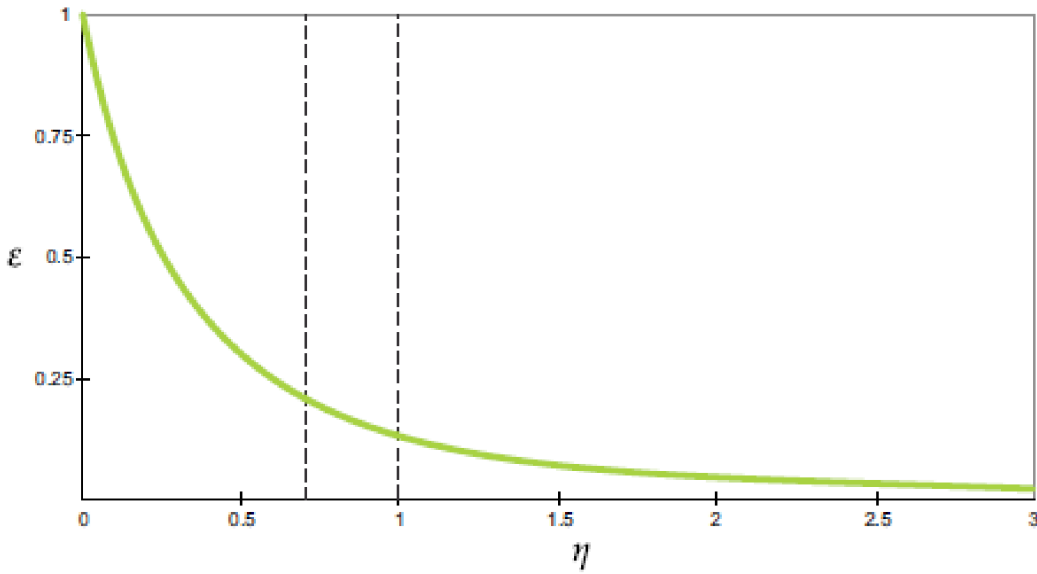
- m^* je efektivní hmotnost kontaktu, definovaná jako:

$$\frac{1}{m^*} = \begin{cases} \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} & \text{pro kontakt částice – částice} \\ \frac{1}{m} & \text{pro kontakt částice – geometrie} \end{cases} \quad (3.11)$$

kde m_1 a m_2 jsou hmotnosti částic v kontaktu a m je hmotnost částice při kontaktu částice-geometrie.

Hodnota tlumícího koeficientu může být zadána uživatelem a pohybuje se v rozmezí od 0 do 1. Funkční závislost mezi poměrem tlumení a koeficientem restituce je popsána v rovnici (3.12) a zobrazena na obr. 3.10. Rovnice (3.12) je řešena numericky za účelem zjištění hodnoty poměrného tlumení η , která odpovídá hodnotě koeficientu restituce ε , zadané uživatelem.

$$\varepsilon = \begin{cases} \exp \left[-\frac{\eta}{\sqrt{1-\eta^2}} \left(\pi - \arctan \frac{2\eta\sqrt{1-\eta^2}}{1-2\eta^2} \right) \right] & \text{když } 0 \leq \eta < \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \exp \left(-\frac{\eta}{\sqrt{1-\eta^2}} \arctan \frac{2\eta\sqrt{1-\eta^2}}{2\eta^2-1} \right) & \text{když } \frac{1}{\sqrt{2}} \leq \eta \leq 1 \\ \exp \left(-\frac{\eta}{\sqrt{\eta^2-1}} \ln \frac{\eta+\sqrt{\eta^2-1}}{\eta-\sqrt{\eta^2-1}} \right) & \text{když } \eta > 1 \end{cases} \quad (3.12)$$



Obrázek 3.10: Závislost mezi poměrem tlumení η a koeficientem restituce ε

Modely kompatibilní s tímto modelem jsou: *linear spring Coulomb limit model*, *Coulomb limit model constant adhesive force model* a *linear adhesive force model*.

Modely tečných sil: Linear spring Coulomb limit model

Tečná síla v tomto modelu je tzv. elasto-třecí. Pokud by tečná síla byla považována za čistě elastickou, její hodnota v čase t je dána rovnicí (3.13), kde záporné znaménko značí, že tečná síla působí vždy proti posuvu:

$$\mathbf{F}_{\tau,e}^t = \mathbf{F}_{\tau}^{t-\Delta t} - K_{\tau}\Delta\mathbf{s}_{\tau} \quad (3.13)$$

kde:

- $\mathbf{F}_{\tau}^{t-\Delta t}$ je hodnota tečné síly v předchozím časovém kroku
- $\Delta\mathbf{s}_{\tau}$ je relativní tečný posuv částic během časového kroku
- K_{τ} je tečná tuhost definovaná jako:

$$K_{\tau} = r_K K_{nl} \quad (3.14)$$

kde K_{nl} je normálová tuhost při zatěžování, určená rovnicí (3.5) a r_K je uživatelem definovaný parametr, uvedený jako *tangential stiffness ratio* v nastavení materiálových interakcí

V tomto modelu tečná síla nemůže překročit Coulombův limit (nemůže překročit hodnotu třecí síly μF_n^t). Proto úplý výraz pro tečnou sílu je:

$$\mathbf{F}_{\tau}^t = \min \left(\left| \mathbf{F}_{\tau,e}^t \right|, \mu F_n^t \right) \frac{\mathbf{F}_{\tau,e}^t}{\left| \mathbf{F}_{\tau,e}^t \right|} \quad (3.15)$$

kde:

- F_n^t je normálová kontaktní síla v čase t
- μ je koeficient tření, definovaný jako:

$$\mu = \begin{cases} \mu_s & \text{pokud v kontaktu nedochází k prokluzu} \\ \mu_d & \text{pokud v kontaktu dochází k prokluzu} \end{cases} \quad (3.16)$$

kde μ_s a μ_d jsou koeficienty statického, respektive dynamického tření. Toto jsou vlastnosti, které může uživatel v Rocky DEM definovat. K prokluzování v kontaktu dochází, jakmile absolutní hodnota tečné síly $\left| \mathbf{F}_{\tau,e}^t \right|$ překročí hodnotu třecí síly μF_n^t . Jakmile ovšem hodnota tečné síly poklesne pod hodnotu μF_n^t , tak v kontaktu už nedochází k prokluzování.

Tento model je kompatibilní se všemi modely normálových sil dostupných v Rocky DEM.

3.2.3. Modely adhezních sil

Model normálové síly, popsany v kapitole 3.2.2 je vhodný pro nepřilnavé a suché granulární částice. Nicméně sypké hmoty mohou mít často různý obsah vlhkosti, která může způsobit přilnutí částic k sobě nebo k objektům, se kterými přijdou během simulace do styku. Aby bylo zachyceno toto chování, tak odpuzivá normálová síla musí být doplněna o přitažlivou normálovou sílu pro přesnější reprezentaci adhezního chování.

3.2. PROSTŘEDÍ ROCKY DEM

Linear adhesive force model

Model vyžaduje kalibraci materiálového chování. Je vhodný pro zeminy, u kterých dochází ke změně napětí vlivem konsolidace (tzv. sedání) zeminy.

Linear adhesive force model je v Rocky DEM definovaný pomocí následujícího výrazu:

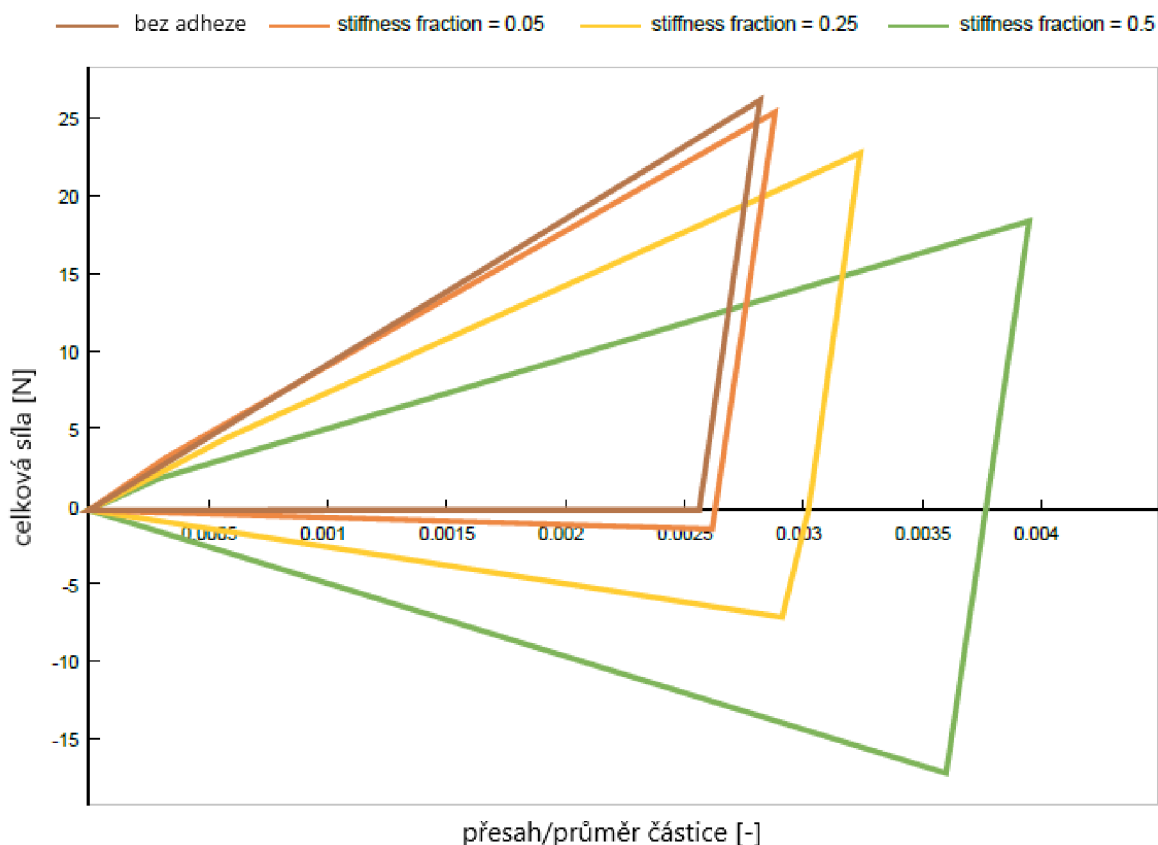
$$F_{n,adh} = \begin{cases} 0 & \text{pokud } s_n \geq \delta_{adh} \\ r_{adh}K_{nl}(s_n + \delta_{adh}) & \text{pokud } s_n < \delta_{adh} \end{cases} \quad (3.17)$$

kde:

- $F_{n,adh}$ je normálová adhezní kontaktní síla v aktuálním čase
- s_n je normálový kontaktní přesah v aktuálním čase, nabývá kladných hodnot, když se částice dotýkají a záporných hodnot, když jsou částice oddělené. Absolutní hodnota této konstanty pro případ, kdy částice nejsou v kontaktu, udává vzdálenost mezi těmito částicemi nebo částicemi a geometrií.
- δ_{adh} je parametr, uvedený jako tzv. adhezní vzdálenost, který je vstupním parametrem. Adhezní síla mezi dvěma sousedícími částicemi je větší než nula pokud vzdálenost mezi částicemi je menší než δ_{adh} .
- r_{adh} je parametr uvedený jako tzv. tuhostní poměr, definovaný jako poměr adhezní tuhosti ke kontaktní tuhosti při zatěžování.
- K_{nl} je normálová kontaktní tuhost při zatěžování, určená rovnicí (3.5).

Pokud jsou dvě částice nacházející se blízko sebe oddělené a jejich vzdálenost je větší než adhezní vzdálenost δ_{adh} , pak adhezní síla je nulová. Když je tato hranice překročena a dvě částice se k sobě přiblíží, adhezní síla se zvětšuje úměrně rozdílu mezi adhezní vzdáleností a aktuální vzdáleností mezi částicemi. Jakmile dojde ke kontaktu, adhezní síla se dále zvětšuje, tentokrát úměrně součtu adhezní vzdálenosti a přesahu (3.17).

Směrnice zatěžovacích křivek na obr. 3.11 je definovaná jako adhezní tuhost pomocí součinu $r_{adh}K_{nl}$. Obr. 3.11 ukazuje příklady odezvy srážky mezi částicemi a geometrií bez vlivu adheze i za působení adheze. Model *hysteretic linear spring* (3.2.2) je použit ve všech případech pro normálovou kontaktní sílu. Parametr *stiffness fraction* se pohybuje v rozmezí od 0 do 0,5.



Obrázek 3.11: Závislost síly na přesahu pro různé hodnoty parametru *stiffness fraction*

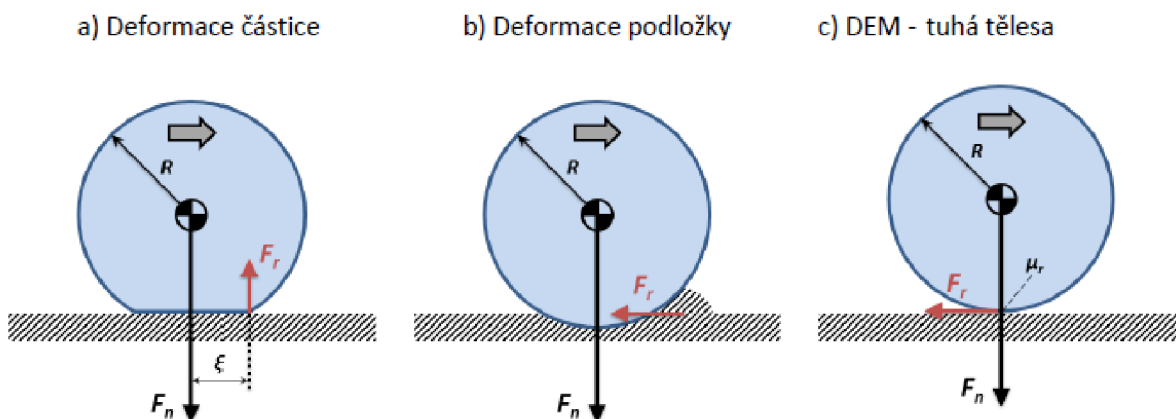
Linear adhesive model je kompatibilní se všemi modely normálových sil definovanými v Rocky DEM.

3.2.4. Modely valivého odporu

Valivý odpor je reprezentován momentem, který působí proti směru otáčení částic. V reálném světě je běžné, že kulové částice nejsou přesně kulové a že u ostatních tvarů částic se vyskytují různé nerovnosti na jejich povrchu. Tento moment tedy slouží v DEM simulacích k zahrnutí efektů nepravidelnosti nebo nerovností na povrchu částice, chování nekulových částic je simulováno i u těch kulových. V Rocky DEM jsou pro popis tohoto chování implementovány dva modely valivého odporu: *Type A: Constant moment* a *Type C: linear spring rolling limit*.

Součinitel valivého tření je v DEM definován jinak, než klasický součinitel valivého tření (rameno valivého odporu), používaný v běžné strojírenské praxi. V DEM nedochází k prohnutí podložky ani ke změně tvaru valeného tělesa, které způsobují vznik tření. Na obr. 3.12 jsou porovnány různé mechanismy valivého tření, kdy F_n je normálová síla působící v těžišti, F_r je reakční síla, R je poloměr částice, μ_r je součinitel valivého tření a ξ je rameno valivého odporu. Součinitel valivého odporu má obecně délkovou jednotku, ale v případě metody diskretních prvků vjadřuje úhel, při kterém dojde k odvalování částice [6].

3.2. PROSTŘEDÍ ROCKY DEM



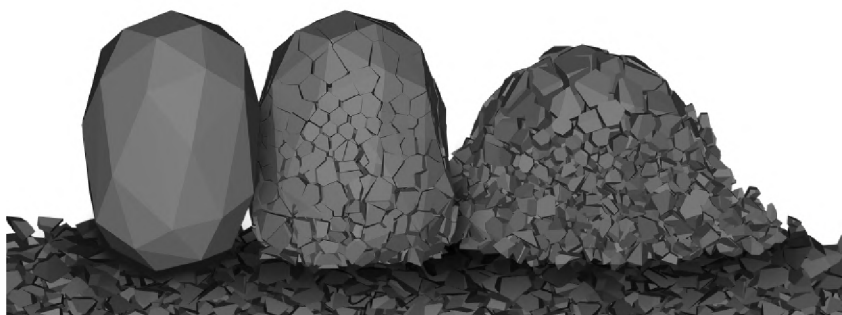
Obrázek 3.12: Schéma mechanismů valivého tření, převzato z [6]

3.2.5. Další možnosti využití Rocky DEM

V Rocky DEM existují kromě již zmíněných modelů kontaktních a adhezních sil a valivého odporu i další pokročilejší modely a možnosti. V následujícím textu je uveden jejich stručný přehled: [11]

1. Modely porušení

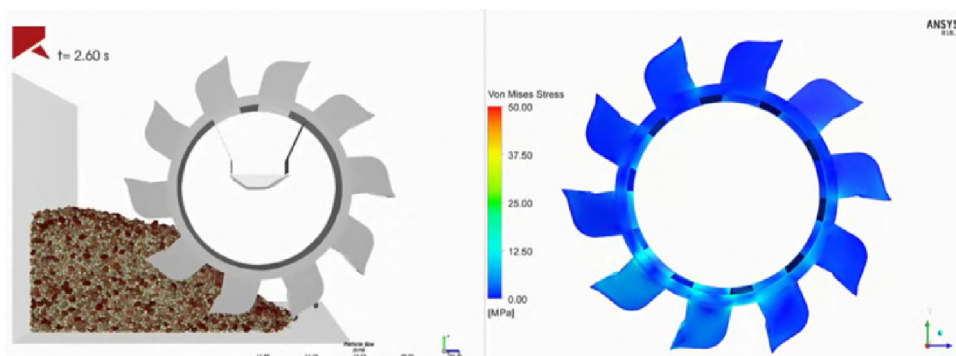
- Modely porušení (obr. 3.13) v Rocky DEM jsou dostupné pouze pro částice ve tvaru konvexního mnohostranu. Platí u nich zachování hmotnosti i objemu, tj. součet hmotností a objemů všech úlomků, na které se částice rozpadne, je roven původní hmotnosti a objemu částice před rozpadem.



Obrázek 3.13: Tavaresův model porušení [19]

2. Multifyzikální modelování

- Rocky DEM nabízí plnou integraci s Ansys Mechanical a Ansys Fluent. V případě propojení CFD-DEM je tok částic tekutiny získán na základě spojitěho přístupu pro zjištění sil působících na jednotlivé částice a pohyb částic je simulován použitím DEM. U propojení FEM-DEM jsou exportována zatížení získaná během simulace v Rocky DEM do FEM řešiče pro výpočet napětí. Na obr. 3.14 je ukázka propojení pro případ kolesového rýpadla.



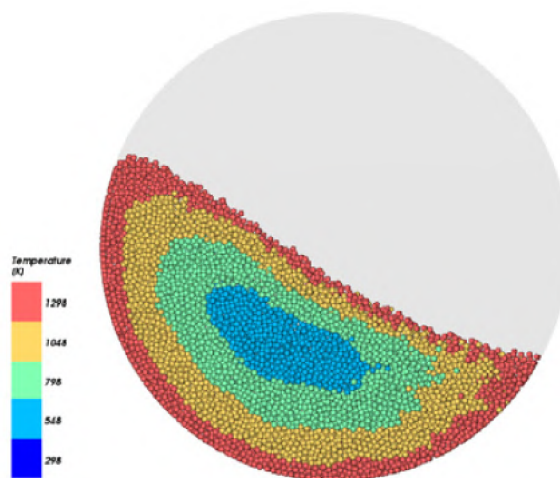
Obrázek 3.14: DEM-FEM propojení - kolesové rypadlo [11]

3. Energy spectra

- Tento nástroj poskytuje detailní přehled o tom, jak se energie přenáší mezi částicemi v simulaci. Důležitou aplikací je například kolik energie spotřebované při procesu drcení částic se ve skutečnosti spotřebuje na drcení.

4. Teplotní modely

- U teplotních simulací je spolu s rovnicemi pro pohyb částic řešena i rovnice pro tepelnou bilanci. Na obr. 3.15 je zobrazeno vedení tepla mezi částicemi v rotačním bubnu.



Obrázek 3.15: Vedení tepla v rotačním bubnu [11]

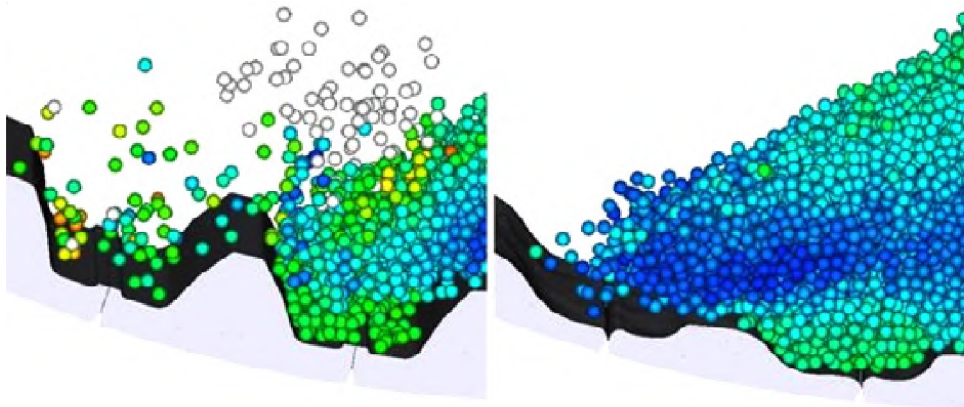
5. Modely pružných částic

- V Rocky DEM jsou tři kategorie pružných částic: vlákno, skořepinu a pevné těleso. Pružné částice jsou ve skutečnosti tvořeny spojením jednoduchých tvarů. U vláken to jsou sférické válce, u skořepin trojúhelníkové hranoly a čtyřstěny u pevných těles. Deformace je umožněna pouze v místech spojů, jednotlivé prvky zůstávají tuhé tak jako všechny částice v Rocky DEM.

3.2. PROSTŘEDÍ ROCKY DEM

6. Opotřebení těles

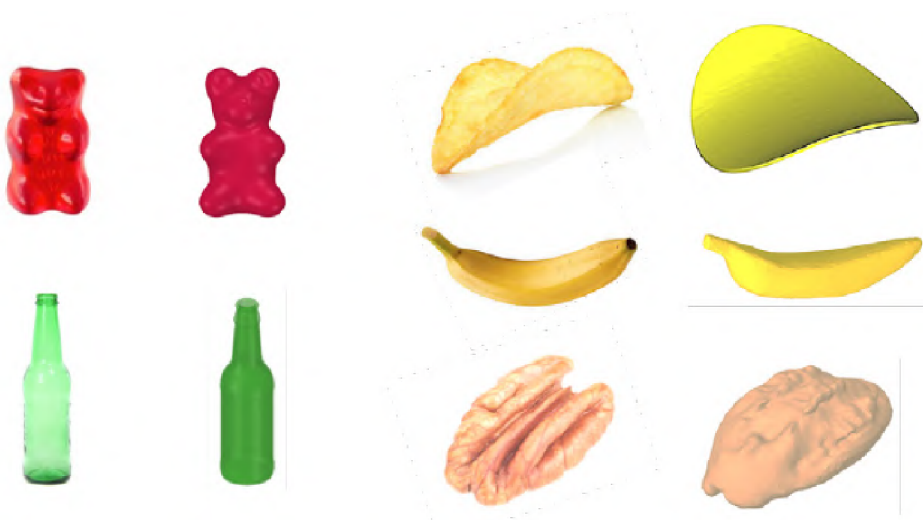
- Jako nástroj pro predikci abrazivního opotřebení povrchu součásti se používá model Archardova zákona opotřebení [20]. Na obr. 3.16 je ukázka vývoje opotřebení u vložky kulového mlýnu.



Obrázek 3.16: Opotřebení vložky kulového mlýnu [11]

7. Reálné tvary částic

- Rocky umožňuje reprezentaci částic pomocí 3D tvarů, 2D skořepin nebo vláken, která mohou být tuhá či ohebná. Dále mohou být vloženy nejruznější uživatelem definované tvary (obr. 3.17).



Obrázek 3.17: Příklady různých tvarů částic v Rocky DEM [11]

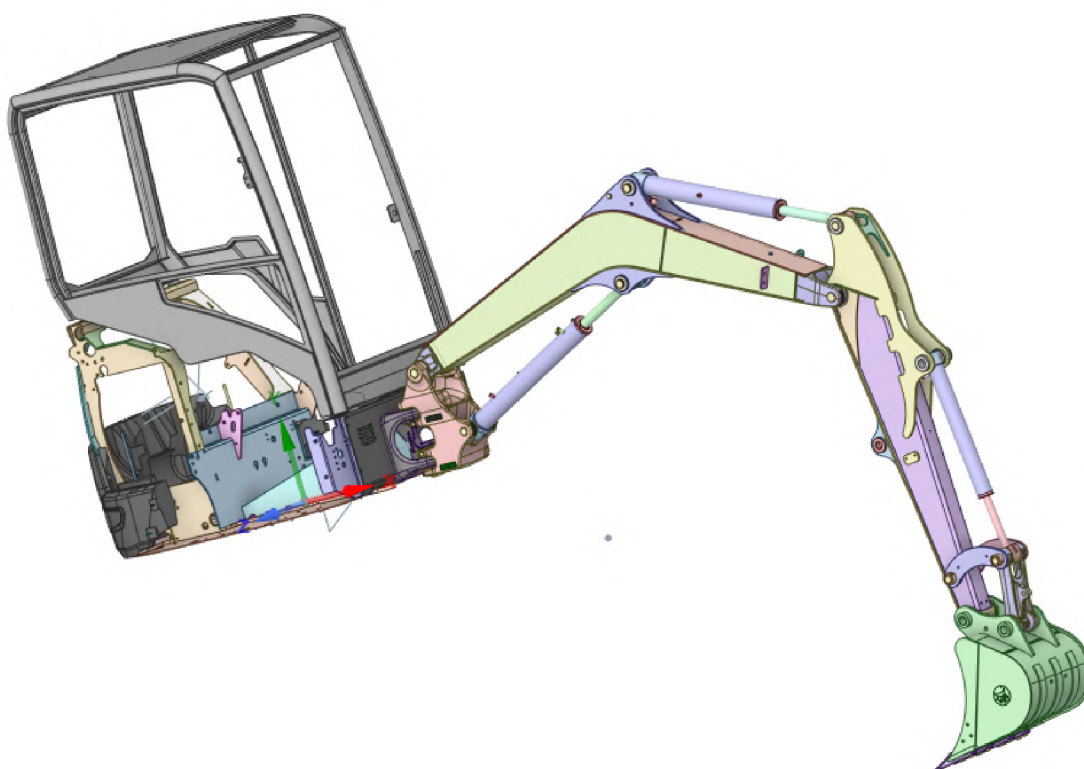
4. Praktická část

Hlavním výstupem této práce je ukázka metodiky jak efektivně propojit dva komerční softwary, přičemž každý je založený na jiné metodě. K řešení problému jsou zvoleny metoda konečných prvků a metoda diskrétních prvků. Analýza namáhání kompaktního rýpadla při provozu je tedy řešena pomocí dvou výpočtových modelů ve dvou různých prostředích (Rocky DEM - metoda DEM, ANSYS Mechanical - metoda MKP). Výstupní data z výpočtového modelu v Rocky DEM jsou potom použita do výpočtového modelu v ANSYS Mechanical, do něhož jsou aplikována jako vstupy.

V této kapitole je popsána tvorba výpočtových modelů, výsledky z těchto modelů jsou analyzovány a v závěru je provedeno posouzení vůči mezním stavům. Vzhledem k omezenému počtu prvků u studentské verze ANSYS Mechanical a složitosti modelu geometrie ramene rýpadla není provedeno posouzení celého ramene rýpadla. Vůči mezním stavům je vyhodnocena pouze násada ramene kompaktního rýpadla.

4.1. Poskytnutý model geometrie

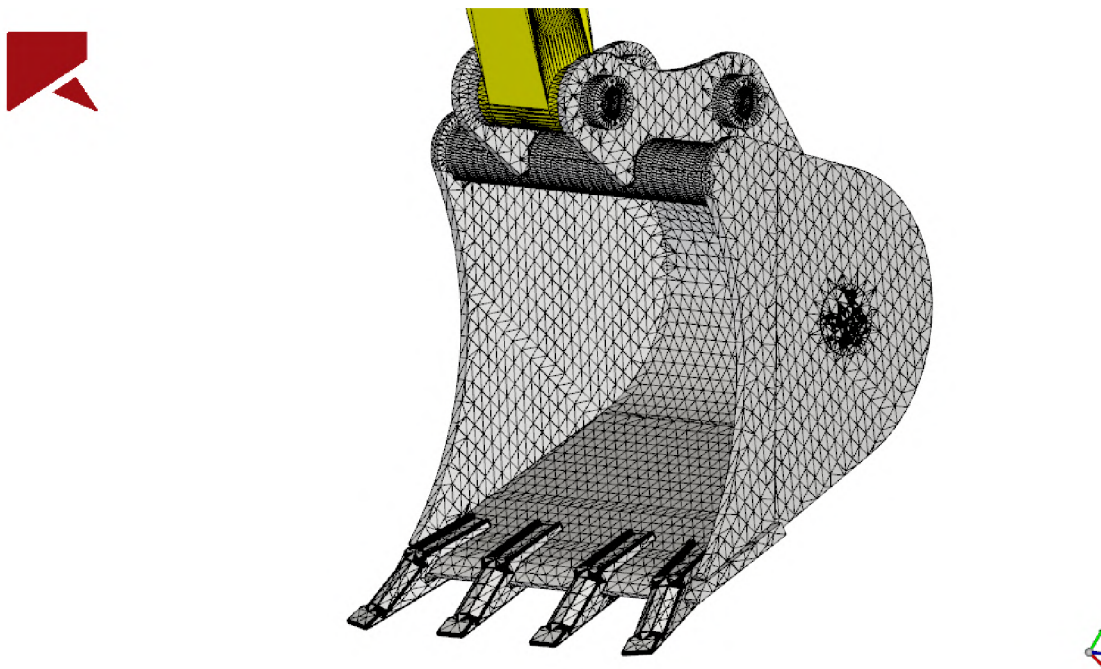
Model geometrie, tedy tzv. „dummy data“ jak již bylo zmíněno v úvodu, byl poskytnut firmou DOOSAN BOBCAT a je zobrazen na obr. 4.1. Obsahuje však mnoho detailů, které nejsou pro výpočet podstatné. Například různé ventily, šrouby, těsnění a další. Konkrétní úpravy a zjednodušení, které byly provedeny na tomto modelu geometrie jsou popsány u každého výpočtového modelu zvlášť.



Obrázek 4.1: Poskytnutý model geometrie od firmy DOOSAN BOBCAT

4.2. Výpočtový model v Rocky DEM

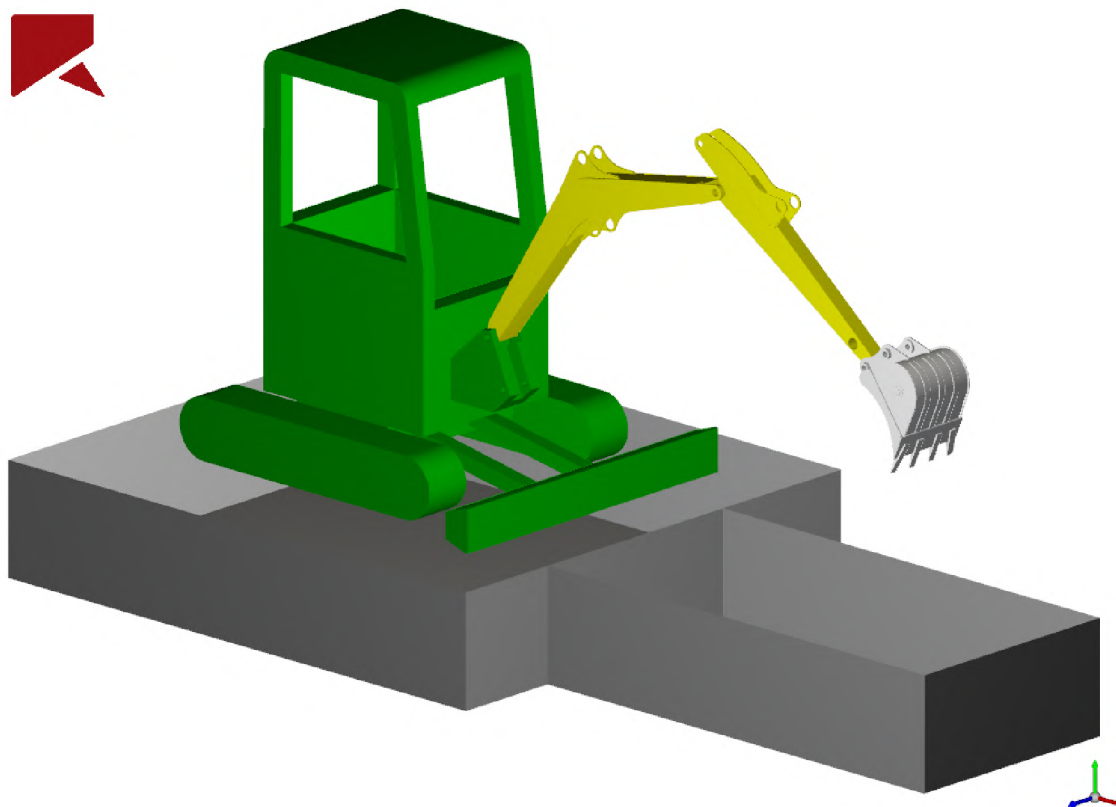
V prostředí Rocky DEM není obsažen žádný modelář. Jsou zde k dispozici pouze modely dopravníků, další geometrie musí být do prostředí importována. Nejvhodnějším formátem pro import geometrie je formát STL. Tento formát popisuje pouze geometrii povrchu trojrozměrného objektu bez informace o reprezentaci barev nebo textur. To však u simulací pomocí DEM vůbec nevádí, protože všechna tělesa jsou považována za tuhá. Ukázka ploškové reprezentace pomocí trojúhelníků pro model geometrie lžice je na obr. 4.2.



Obrázek 4.2: Plošková reprezentace lžice rýpadla

Pro zjednodušení poskytnutého modelu geometrie (obr. 4.1) pro potřeby simulace je použit externí modelář SpaceClaim od společnosti ANSYS. Na základě údajů od DOOSAN BOBCAT je poskytnutý model geometrie doplněn o podvozek a opěry. Je tedy vytvořen jednoduchý model kabiny, podvozku a opěr, který je napojen na výložník. Během simulace jsou v kontaktu s modelem zeminy pouze lžice, podvozek rýpadla a jeho opory. Ostatní části, které nepřichází do kontaktu s modelem zeminy, lze velmi zjednodušit.

Model geometrie, připravený pro simulaci v prostředí Rocky DEM, je zobrazen na obr. 4.3, pro přehlednost jsou jednotlivé části barevně odlišeny. Skládá se pouze ze 4 částí: těla stroje (tvořeného kabinou, podvozkem a opěrami), výložníku, násady a lžice. Kromě částí týkajících se rýpadla byly importovány ještě i dva boxy. První pod podvozek rýpadla a druhý do pracovní oblasti před rýpadlem. Do těchto boxů jsou na začátku simulace vygenerovány částice představující model zeminy.



Obrázek 4.3: Model geometrie pro simulaci v Rocky DEM

4.2.1. Vstupní parametry pro DEM simulaci

Přesnost výsledků je závislá na přesnosti vstupních parametrů. V praxi vždy volbě vstupních parametrů předchází kalibrace. Pro vypracování této práce však bohužel nebyly poskytnuty žádné kalibrační testy reálné zeminy. Nicméně vzhledem k metodickému charakteru práce není tato absence zásadní a vstupní parametry jsou zvoleny na základě odborného článku [24] od autorů Katinas, Chotěborský, Linda a Jankauskas. V tomto článku bylo analyzováno opotřebení půdního rozrývače a DEM parametry odpovídají písčité hlíně.

V podkapitole 3.2.1 již byla zmíněna kalibrační sada *Calibration suite*, která napomáhá urychlit kalibrační proces a získání vstupních parametrů. U sypkých hmot bohužel neexistuje žádná univerzální knihovna různých typů zemin, a proto je kalibrační proces důležitou součástí.

Přehled všech vstupních parametrů použitých v simulaci je uveden v tabulce 4.1. Jak je z dané tabulky patrné, vstupních parametrů je poměrně hodně a v následujícím textu jsou některé z nich ještě stručně okomentovány.

4.2. VÝPOČTOVÝ MODEL V ROCKY DEM

Tabulka 4.1: DEM parametry použité v simulaci

DEM parametry použité v simulaci			
Fyzikální parametry			Zdroj
Model normálové síly	Hysteretic linear spring		[24]
Model tečné síly	Linear spring Coulomb limit		[24]
Model adhezní síly	Linear		[24]
Gravitační zrychlení [m/s ²]	9,81		[24]
Numerical softening factor [-]	1		[24]
Materiálové vlastnosti:	částice	rýpadlo	-
Sypná hustota (hustota) [kg · m ⁻³]	1560	7850	[24]
Youngův modul [MPa]	40	200 000	[24]
Poissonova konstanta [-]	0,3	0,3	[24]
Velikost částic [mm]	20 a 150	-	zvoleno
Počet částic v simulaci [-]	397 093	-	zvoleno
Kontaktní parametry:	částice - částice	částice - rýpadlo	-
Součinitel statického tření [-]	0,6	0,5	[24]
Součinitel dynamického tření [-]	0,3	0,5	[24]
Tangential stiffness ratio [-]	1	1	[24]
Adhezní vzdálenost [m]	0,0001	0,0001	[24]
Stiffness fraction [-]	0,035	0	[24]
Koeficient restituce [-]	0,2	0,3	[24]

Modely kontaktních sil

Modely normálové, tečné a adhezní síly již byly detailněji popsány v podkapitolách 3.2.2 a 3.2.3.

Velikost částic

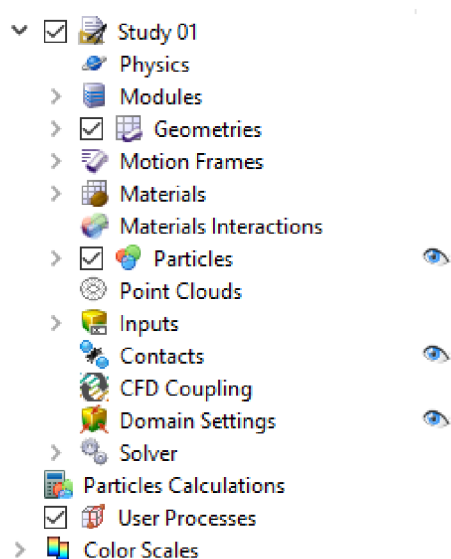
Velikost částic je důležitý parametr, který ovlivňuje čas výpočtu. Pro úsporu výpočetního času jsou částice pod bagrem výrazně větší, konkrétně o velikosti 150 mm. U částic před rýpadlem je konstantní velikost částic 20 mm. V reálném světě nebývají velikosti částic konstantní, ale konstantní velikost byla opět zvolena kvůli úspoře výpočetního času.

Numerical softening factor

Tento parametr se u DEM simulací používá pro jejich urychlení pomocí snížení tuhosti v kontaktu. Jsou jím pronásobeny všechny hodnoty tuhostí stanovené na základě různých modelů kontaktních sil. Například změna tohoto parametru z hodnoty 1 na hodnotu 0,01 zvýší hodnotu časového kroku přibližně desetkrát. Uživatel však musí tento parametr volit opatrně, protože příliš malá hodnota by mohla způsobit problémy se s stabilitou a přesností výpočtu [1].

4.2.2. Nastavení simulace

Nastavení simulace se řídí stromovou strukturou (obr. 4.4), jejíž jednotlivé části jsou uvedeny níže.



Obrázek 4.4: Stromová struktura v prostředí Rocky DEM

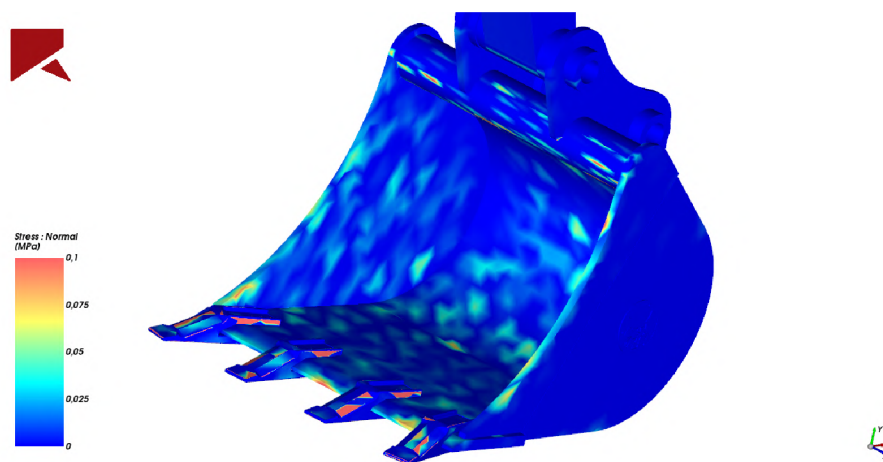
Proces nastavení lze shrnout do následujících kroků:

1. Nastavení fyzikálních parametrů

- Výběr modelu pro normálovou, tečnou a adhezní sílu.
- Určení gravitačního zrychlení a hodnoty *numerical softening factor*.

2. Výběr dat, která se budou ukládat

- Rocky poskytuje širokou škálu různých statistik. V modulu *Boundary collision statistics* lze například exportovat síly působící na model tělesa nebo výběrem možnosti *napětí* je možné po skončení výpočtu zobrazit hodnoty normálových napětí na povrchu tělesa. Působení částic na lžici rýpadla je na obrázku 4.5.



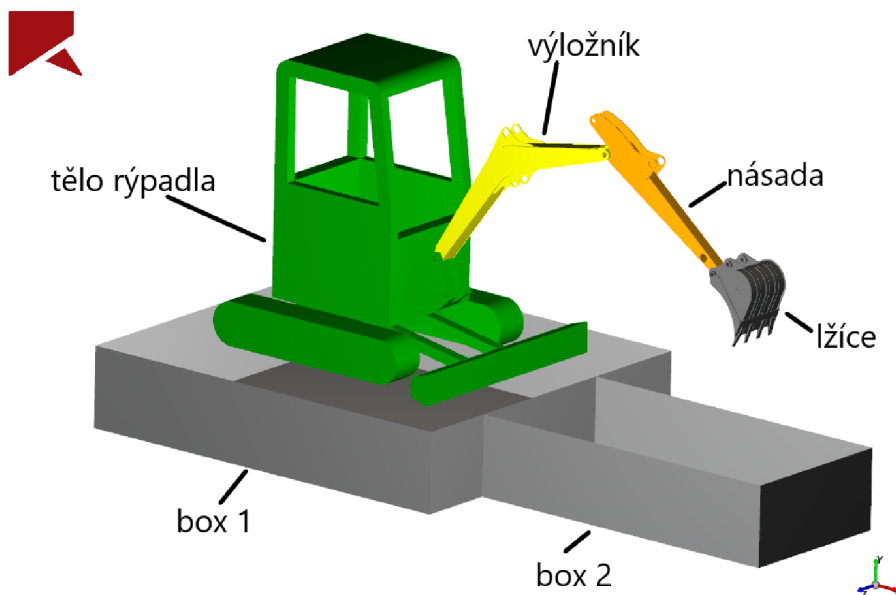
Obrázek 4.5: Normálové napětí na lžici rýpadla od působení částic

4.2. VÝPOČTOVÝ MODEL V ROCKY DEM

- Nicméně v této práci je analyzována násada rýpadla, která nepřichází přímo do kontaktu s částicemi, této možnosti by bylo využito, pokud by objektem zájmu bylo namáhání lžice.

3. Import a nastavení geometrie

- Byla importována všechna tělesa vstupující do simulace: tělo rýpadla, výložník, násada, lžice a dva boxy (obr. 4.6).



Obrázek 4.6: Jednotlivá tělesa v simulaci

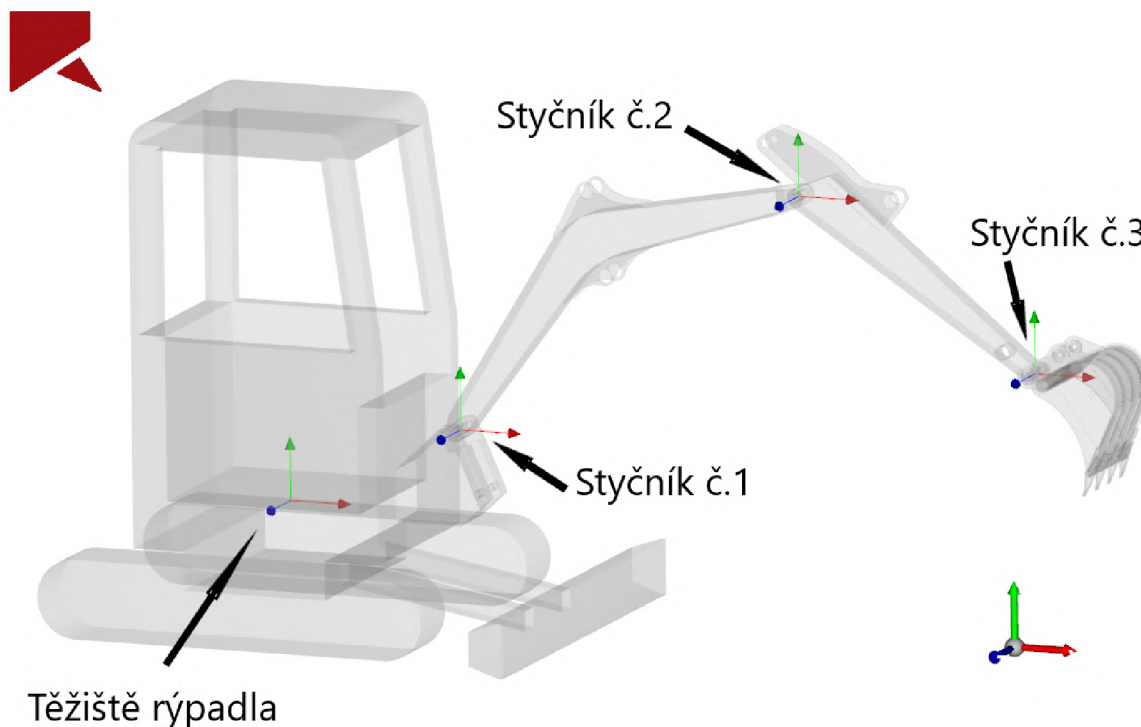
- Každému tělesu byl přiřazen materiál (ocel), který byl pro všechna tělesa stejný a tzv. *motion frame*. *Motion frame* definuje pohyb tělesa a jeho význam bude vysvětlen u nastavení pohybu. U těles, které mají umožněné volné posuvy nebo rotace je nezbytné zadat i jejich hmotnost, souřadnici těžiště a momenty setrvačnosti. V našem případě se to týká pouze těla rýpadla. Hmotnost a souřadnice těžiště byly poskytnuty firmou DOOSAN BOBCAT a momenty setrvačnosti byly určeny pomocí ANSYS Workbench. Na obr. 4.7 jsou tyto údaje uvedeny.

Geometry	Mass	Wear	Replication
Boundary Mass:	2338,3	kg	▼
Gravity Center:	0	0	0 m ▼
Moment of Inertia			
Principal Moment of Inertia:	1624	1135,6	1739,5 kg.m ² ▼
X direction:	1	0	0
Y direction:	0	1	0
Z direction:	0	0	1

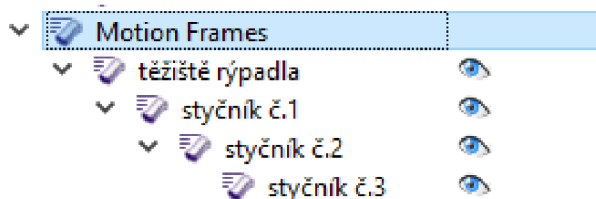
Obrázek 4.7: Hmotnost, souřadnice těžiště a momenty setrvačnosti těla rýpadla v prostředí Rocky DEM

4. Nastavení pohybu

- Nastavení pohybu probíhá za použití již zmíněných *motion frames*. *Motion frame* je souřadnicový systém, který se přiřazuje k jednotlivým tělesům v simulaci a definuje jejich pohyb. Schéma jednotlivých *motion frames* je na obrázku 4.8.

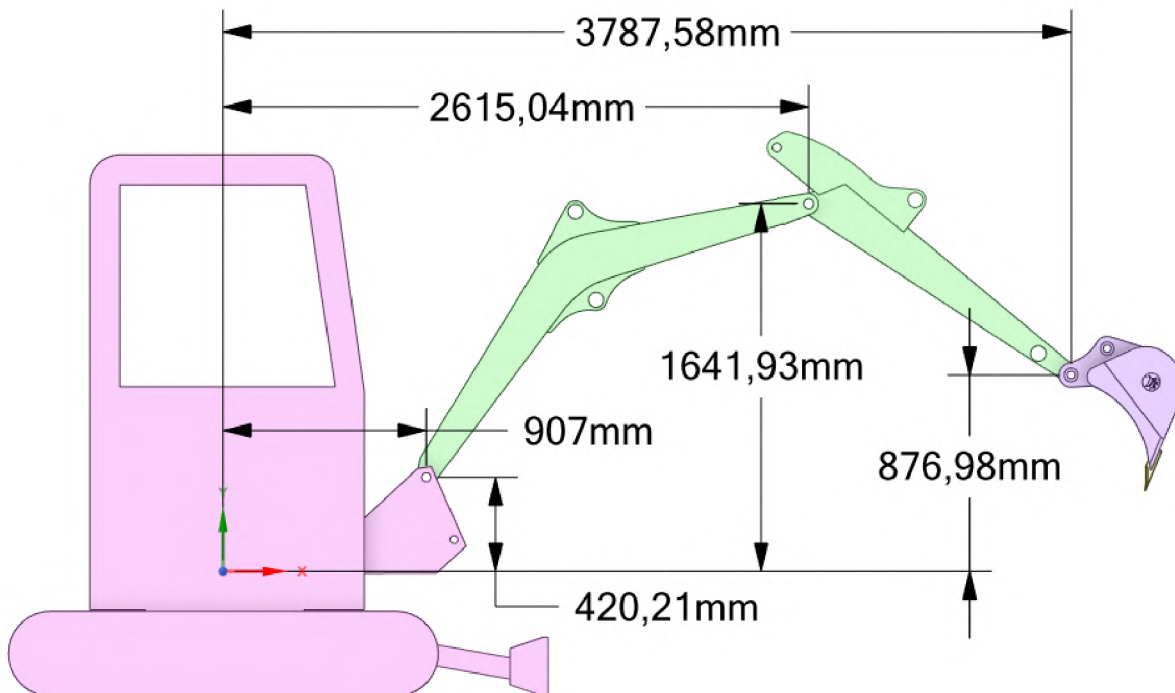
Obrázek 4.8: Schéma *motion frames* v prostředí Rocky DEM

- Původní myšlenkou bylo importovat do simulace i jednotlivé válce a tyče a definovat pohyb pomocí posuvů ve válcích. Tato myšlenka zatím bohužel nemůže být v prostředí Rocky DEM realizována. Vývojáři však pracují na propojení pohybů mezi Rocky DEM a ANSYS Mechanical a v budoucnu by to mělo být možné. U *motion frames* musí být dodržována hierarchie, *motion frames*, které jsou výše ve stromové struktuře, jsou nadřazené *motion frames* pod nimi. Tím je zajištěno propojení pohybu jednotlivých těles. Dalším omezením je i to, že každému tělesu může být přiřazen pouze jeden *motion frame*, takže například u válce, který by potřeboval předepsat do jednoho *motion frame* translační pohyb a do druhého rotační pohyb toto není možné. Hierarchie použitá pro definování pohybu je na obr. 4.9.

Obrázek 4.9: Hierarchie *motion frames* v prostředí Rocky DEM

4.2. VÝPOČTOVÝ MODEL V ROCKY DEM

- Po vložení všech potřebných *motion frames* jsou každému z nich přiřazeny jeho souřadnice, které byly určeny pomocí modeláře SpaceClaim (obr. 4.10).



Obrázek 4.10: SpaceClaim - souřadnice *motion frames*

- Jakmile jsou určeny pozice jednotlivých *motion frames* (v našem případě představujících styčníky a u těla rýpadla těžiště), tak jim může být předepsán pohyb. U *motion frame* v těžišti rýpadla jsou předepsány volné rotace a posuvy po celou dobu trvání simulace, tedy po dobu šesti sekund. Díky tomu může být simulován i odskok rýpadla během pracovního pohybu. Pohyb každého styčníku je definován v časových úsecích. V každém časovém úseku je zadána počáteční hodnota úhlové rychlosti a hodnota úhlového zrychlení. Pro lepší představivost nejsou hodnoty veličin v základních jednotkách (rad/s , respektive rad/s^2), ale ve stupních za sekundu pro úhlovou rychlost, respektive sekundu na druhou pro úhlové zrychlení. Údaje jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tabulka 4.2: Pohyb těžiště rýpadla

Tělo rýpadla		
Čas		-
Start	Stop	Druh pohybu
0 s	6 s	Volné rotace ve všech směrech
0 s	6 s	Volné posuvy ve všech směrech

Tabulka 4.3: Pohyb styčnicku č.1

Styčnick č.1			
Čas		-	
Start	Stop	Počáteční úhlová rychlost	Úhlové zrychlení
0 s	2 s	0 deg/s	-8 deg/s ²
2 s	3 s	-16 deg/s	15 deg/s ²
3 s	6 s	-1 deg/s	-4 deg/s ²

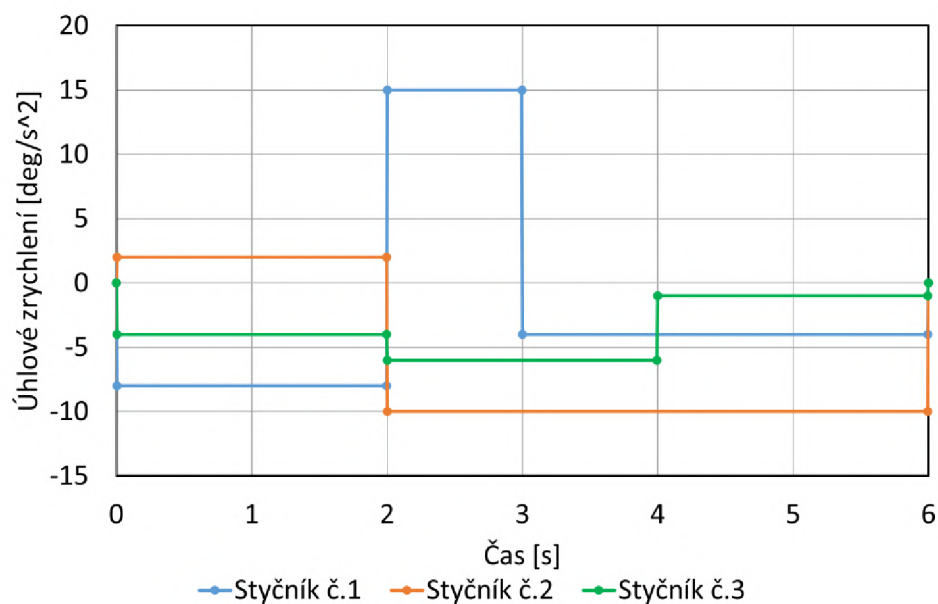
Tabulka 4.4: Pohyb styčnicku č.2

Styčnick č.2			
Čas		-	
Start	Stop	Počáteční úhlová rychlost	Úhlové zrychlení
0 s	2 s	0 deg/s	2 deg/s ²
2 s	4 s	4 deg/s	-10 deg/s ²
4 s	6 s	-16 deg/s	-10 deg/s ²

Tabulka 4.5: Pohyb styčnicku č.3

Styčnick č.3			
Čas		-	
Start	Stop	Počáteční úhlová rychlost	Úhlové zrychlení
0 s	2 s	0 deg/s	-4 deg/s ²
2 s	4 s	-8 deg/s	-6 deg/s ²
4 s	6 s	-20 deg/s	-1 deg/s ²

- Takto zadaný pohyb odpovídá průběhu úhlových zrychlení, která jsou po částech konstantní. Jednotlivé části konstrukce tedy neustále zrychlují nebo zpomalují. Průběhy úhlových zrychlení styčnicků jsou zobrazeny na obr. 4.11. Jedná se o vymyšlený pohyb, ale hodnoty zrychlení byly konzultovány s DOOSAN BOBCAT, aby odpovídaly realitě.



Obrázek 4.11: Průběhy úhlových zrychlení jednotlivých styčnicků

4.2. VÝPOČTOVÝ MODEL V ROCKY DEM

5. Nastavení materiálu

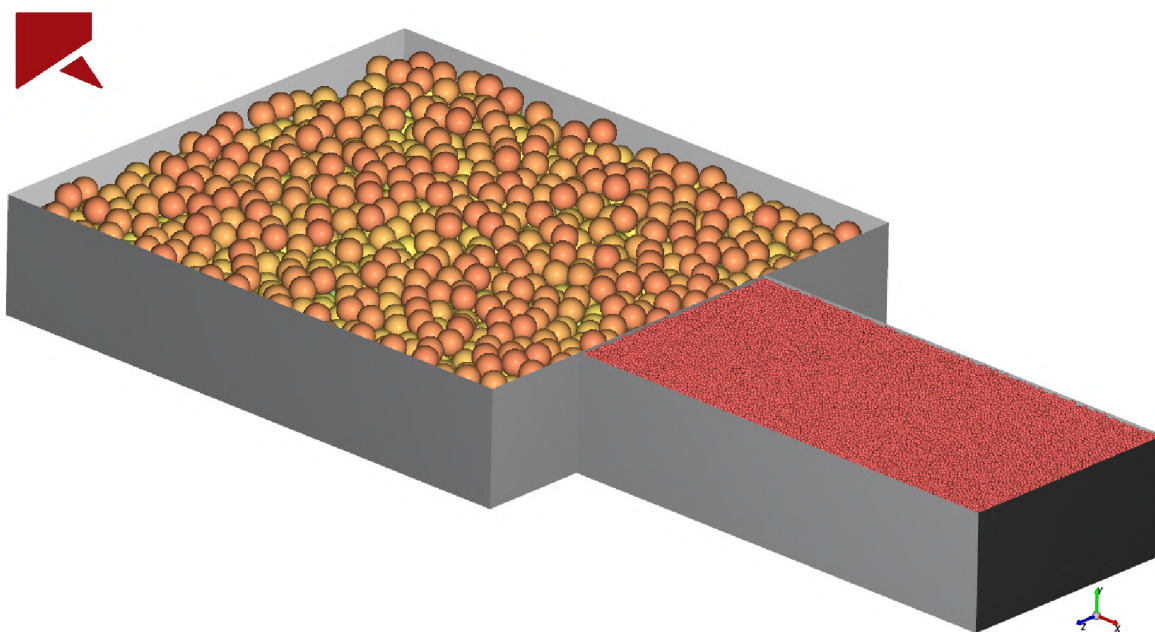
- Na základě již zmíněných materiálových vlastností v tabulce 4.1.
- Rýpadlo: hustota, Youngův modul a Poissonova konstanta.
- Částice: sypaná hustota, Youngův modul a Poissonova konstanta.

6. Nastavení kontaktních parametrů

- Podle kontaktních parametrů v tabulce 4.1.

7. Nastavení částic

- Částice mohou do simulace vstoupit tak, že jsou na začátku vygenerovány v předem zvolené oblasti nebo tak, že je určen otvor, ze kterého částice proudí na základě zvoleného hmotnostního toku.
- Boxy jsou využity pro vygenerování částic do námi zvolených oblastí. Jak již bylo zmíněno, v boxu pod bagrem jsou částice výrazně větší (průměr 150 mm), avšak hlavní oblastí zájmu je interakce mezi lžící a částicemi v pracovním prostoru před rýpadlem, kde už jsou pro zvýšení přesnosti výpočtu částice naopak výrazně menší (průměr 20 mm). Na obr. 4.12 jsou zobrazeny vygenerované částice v připravených boxech.



Obrázek 4.12: Částice vygenerované v připravených boxech

8. Nastavení řešiče

- Koncový čas simulace byl nastaven na 6 sekund. Frekvence vypisování výsledků je 200 Hz, což odpovídá časovému kroku 0,005 sekund. Tato frekvence byla zvolena na doporučení od firmy DOOSAN BOBCAT, bývá používána pro vzorkování signálu naměřeného pomocí tenzometrů. Časový krok simulace je

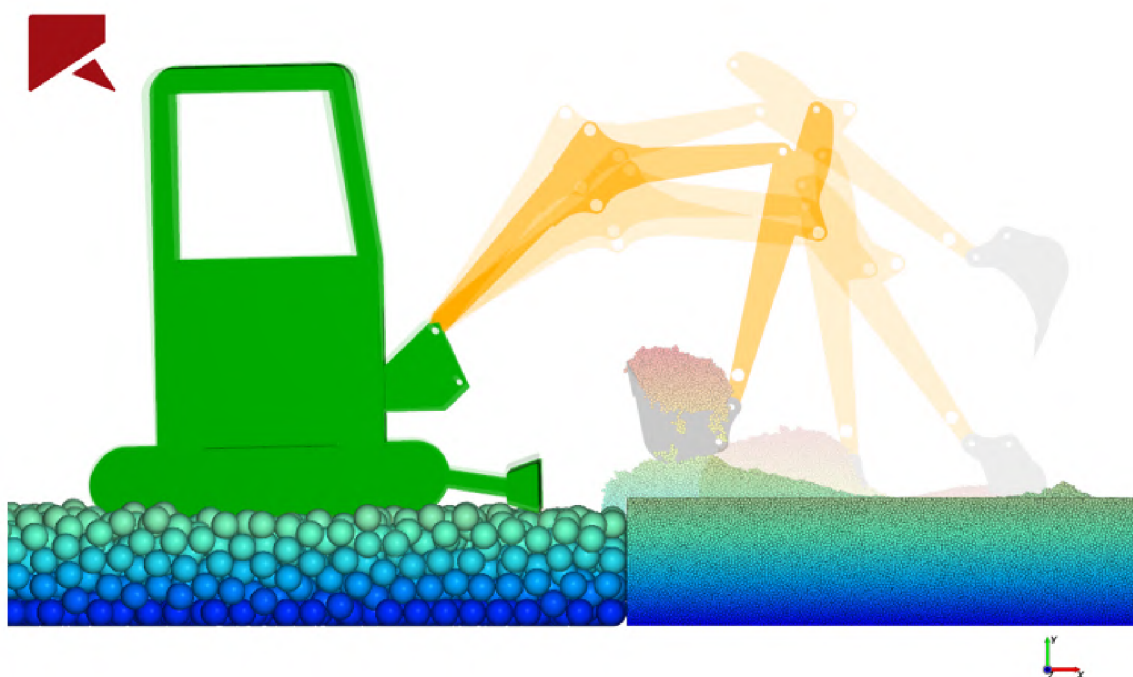
$9,16 \cdot 10^{-6}$ sekund, to je výrazně menší hodnota než u vypisování výsledků, hodnoty výsledků jsou tedy zprůměrovány.

- Kromě frekvence vypisování výsledků se volí i to, zda je výpočet proveden na procesorech nebo na grafických kartách. Pomocí grafických karet jsou výpočty mnohem rychlejší, výpočet byl proveden na grafické kartě NVIDIA GeForce GTX 1650. V současné době už jsou možné i výpočty na více grafických kartách.

4.2.3. Analýza výsledků simulace

Rocky DEM nabízí široké možnosti post-processingu (analýzy výsledků). U částic lze pomocí barevné škály zobrazit jejich rychlosti v různých směrech, souřadnice vzhledem ke globálnímu souřadnicovému systému, trajektorie jednotlivých částic atd. Naznačení pohybu během simulace je na obr. 4.13, viditelnost boxů je vypnuta. Pohyb rýpadla odpovídá jednomu kopnutí, při kterém je do lžice nabráno maximální množství zeminy, které je lžice schopna pojmout.

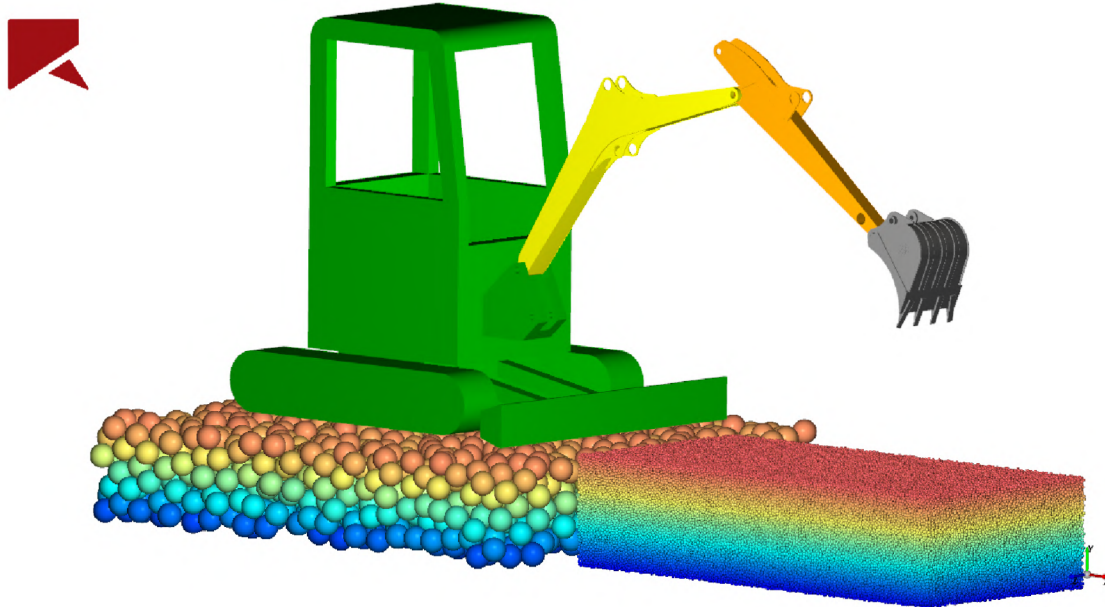
Pokud by se jednalo o posouzení namáhání nějakého konkrétního modelu rýpadla z praxe, tak by bylo nutné nasimulovat několik kopacích režimů a případně i měnit parametry zeminy v simulaci (výskyt kamenů, zahrnutí vlhkosti, složení a tloušťka vrstev zeminy, sypná hustota). Jednotlivé kopací režimy a různé parametry zeminy by byly posléze vyhodnoceny ze statistického hlediska. Analýza namáhání na základě jednoho kopnutí není objektivní, ale slouží pouze jako ukázka metodiky.



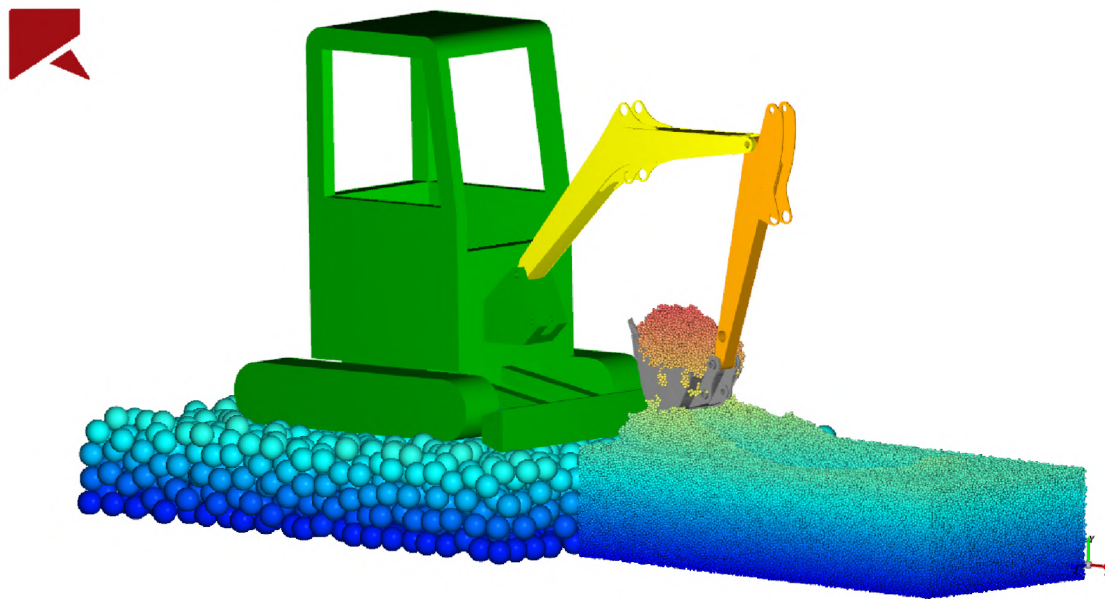
Obrázek 4.13: Simulace nabírání zeminy

Na dalších obrázcích (obr. 4.14 a 4.15) jsou zobrazeny okamžiky na začátku a na konci simulace.

4.2. VÝPOČTOVÝ MODEL V ROCKY DEM

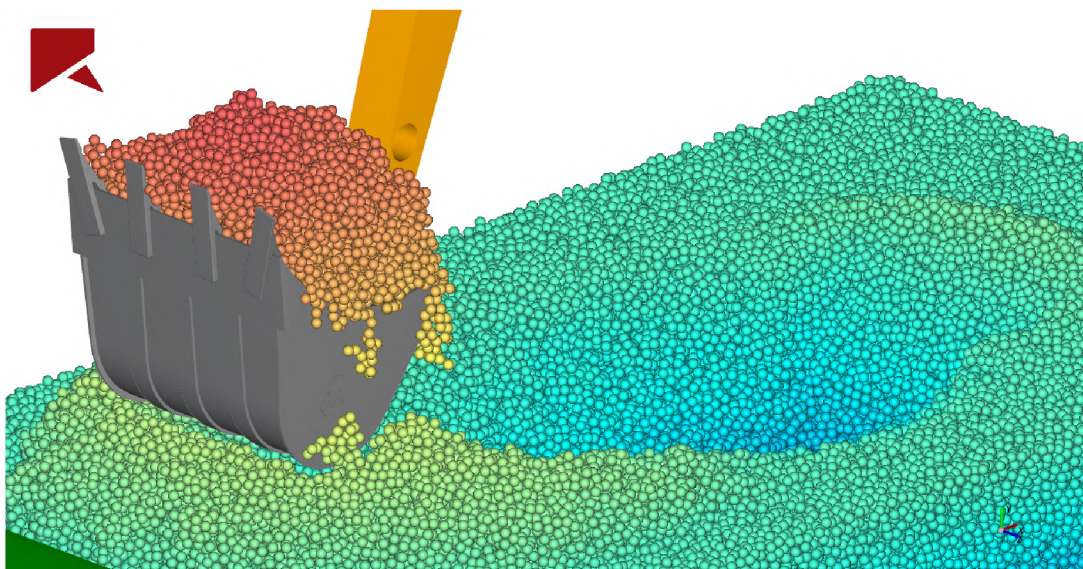


Obrázek 4.14: Simulace nabírání zeminy - začátek simulace (čas 0 s)



Obrázek 4.15: Simulace nabírání zeminy - konec simulace (čas 6 s)

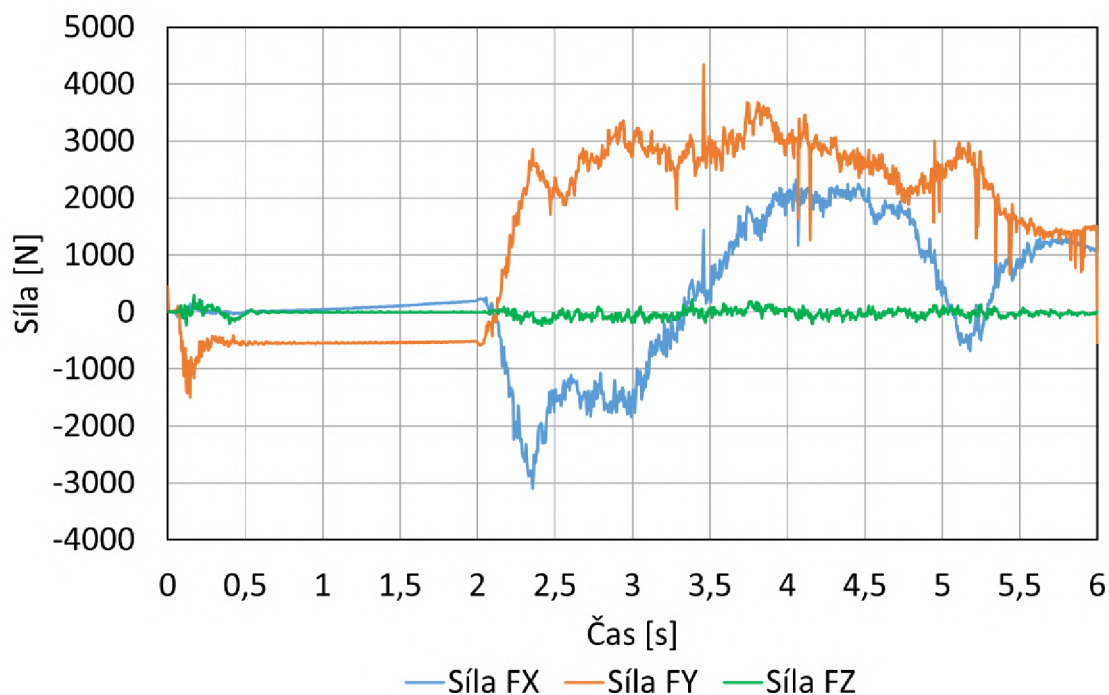
Na obr. 4.16 je zobrazen detail na vyhloubenou jámu. Mimo jiné je na tomto obrázku vidět vliv adhezních sil, který je patrný u částic, které na tomto obrázku padají ze lžíce. Padající částice jsou spojeny v menší celky, které drží pohromadě adhezní síly a připomínají svým tvarem hrozny vína. Barva použitá u částic odpovídá poloze částic ve směru osy Y. Částice zabarvené červeně jsou ve směru osy Y nejvýše a částice zabarvené modře naopak nejniže.



Obrázek 4.16: Simulace nabírání zeminy - detail

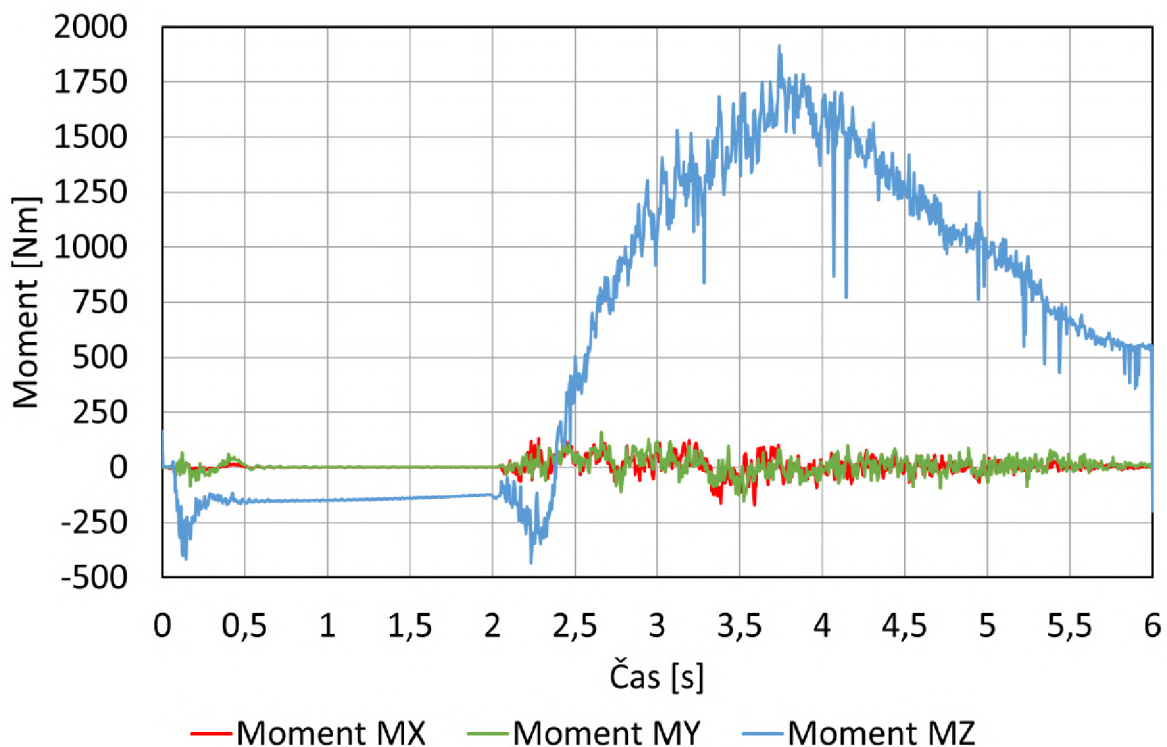
Vstupy pro ANSYS Mechanical

Pro následný přenos zatížení na kinematický model v ANSYS Mechanical jsou nejpodstatnější průběhy sil a momentů v čase ve styčnicku č.3, který určuje rotační pohyb lžice rýpadla (obr. 4.8). Tyto průběhy jsou aplikovány jako zatížení do styčnicku kinematického modelu v ANSYS Mechanical. Průběhy jednotlivých sil a momentů v tomto styčnicku jsou zobrazeny na obrázcích 4.17 a 4.18. Průběhy síly F_z a momentů M_x a M_y jsou výrazně menší než hodnoty ostatních složek, a proto jsou při přenosu na kinematický model v ANSYS Mechanical zanedbány.



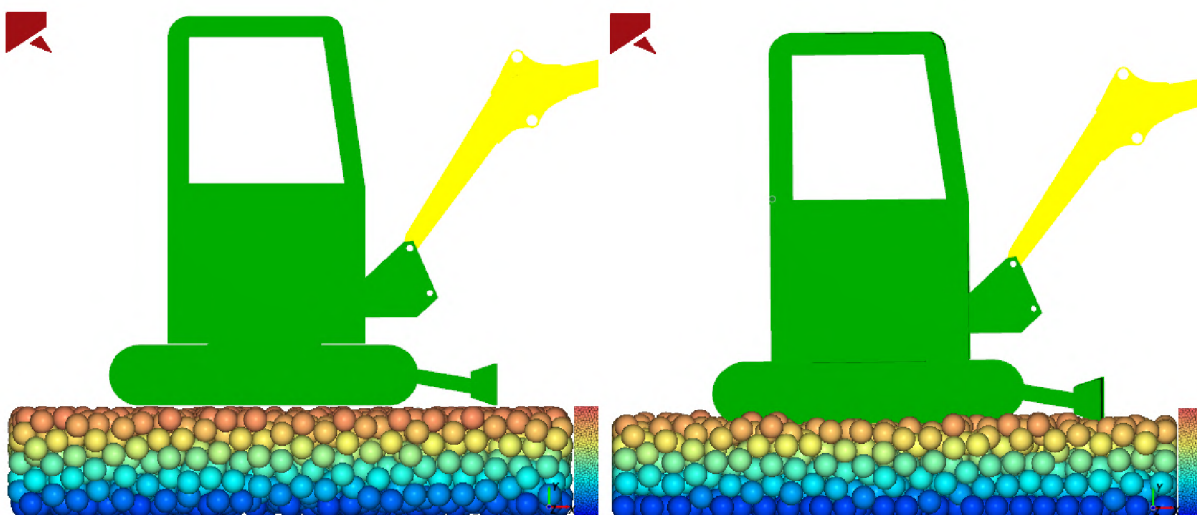
Obrázek 4.17: Průběhy sil ve styčnicku č.3

4.2. VÝPOČTOVÝ MODEL V ROCKY DEM



Obrázek 4.18: Průběhy momentů ve styčníku č.3

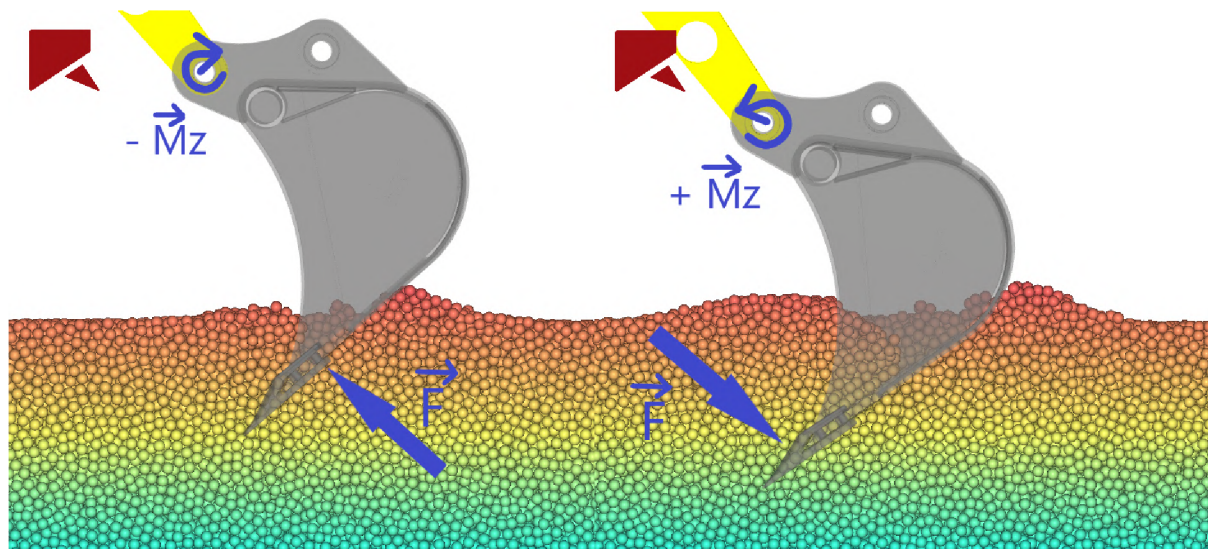
Z těchto průběhů je patrných hned několik věcí. Propad u průběhu sil a momentů, který je vidět na začátku v intervalu 0 - 0,5 s, je způsobený tzv. „dosednutím“ bagru a částic vlivem gravitační síly a vlivem tíhy rýpadla. Tento jev je ilustrován na obr. 4.19. Síla F_x během svého průběhu nabývá záporných i kladných hodnot díky tomu, že lžíce v místě styčníku rotuje a mění tím tak směr působení síly F_x .



Obrázek 4.19: Rýpadlo před „dosednutím“ (nalevo) a po „dosednutí“ (napravo)

Dále je z průběhu momentu M_z patrný drobný pokles v intervalu 2 - 2,4 s, což je interval, ve kterém přichází lžíce rýpadla do kontaktu s částicemi. Nejprve částice působí

na lžíci zvenku a jakmile se lžíce více „zaryje“ do částic, tak začnou převažovat síly působící na vnitřní stranu lžíce a tím pádem dojde i ke změně znaménka u průběhu momentu (obr. 4.20).



Obrázek 4.20: Nalevo je časový okamžik 2,3 s, kdy převažují síly působící na vnější stranu lžíce a vytváří záporný moment M_z a napravo časový okamžik 2,7 s, kdy již převažují síly působící na vnitřní stranu lžíce a moment M_z je již kladný

4.3. Propojení Rocky DEM a Ansys Mechanical

Nejprve jsou popsány možnosti přímého propojení v projektu v ANSYS Workbench a následně je uveden zvolený alternativní způsob propojení a tato volba je zdůvodněna.

4.3.1. Plná integrace Rocky DEM v Ansys Workbench

Každý uživatel, který má zakoupený software Rocky DEM, má možnost jednoduše jej použít jako jeden z toolboxů projektu v ANSYS Workbench a propojit s požadovanou analýzou. Ukázka propojení s transientní analýzou je na obr. 4.21.

Další výhodou, kterou umožňuje toto propojení, je možnost využití parametrizace. Do parametrizace lze zahrnout jak parametry vyskytující se v modeláři SpaceClaim nebo v nějaké analýze, tak i parametry z Rocky DEM jako například velikost částic nebo pozice těles v simulaci. Dále lze zvolenou sadu parametrů použít pro parametrickou analýzu pomocí modulu Ansys DesignExplorer, který zahrnuje metodu odezvové plochy nebo „*siz sigma*“ analýzu.

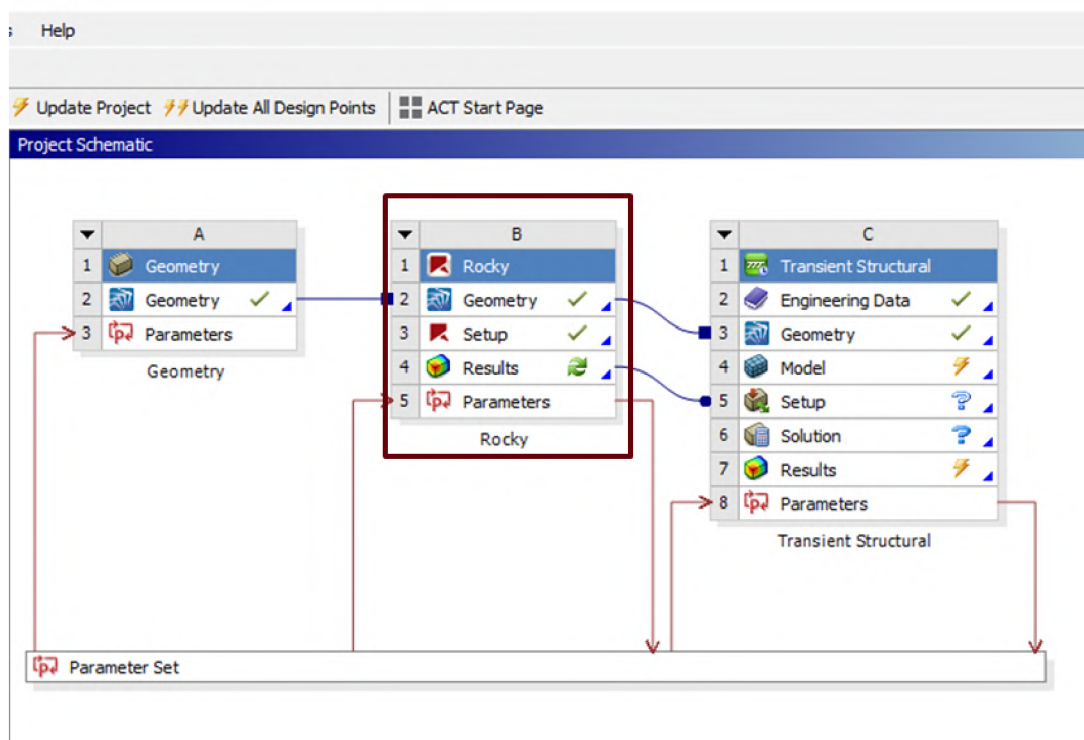
Propojení se statickou strukturální analýzou

Během DEM simulace jsou zjištěny síly působící v jednotlivých uzlech ploškové sítě. Silové působení je přepočítáno na tlak, působící na jednotlivé trojúhelníky ploškové reprezentace, a tento tlak je poté exportován do ANSYS Workbench. Je žádoucí, aby si plošková síť a síť konečných prvků co nejvíce odpovídaly, ale není to nutnou podmínkou. Při aplikaci tlaku na síť v MKP dochází k interpolaci.

4.3. PROPOJENÍ ROCKY DEM A ANSYS MECHANICAL

Propojení s transientní strukturální analýzou

U transientní strukturální analýzy propojení funguje tak, že tělesa, která se v simulaci v prostředí Rocky DEM pohybovala, se v Ansys Workbench nepohybují a dochází pouze k pohybu zatížení. Tělesu v Ansys Workbench jsou tedy pouze nastaveny okrajové podmínky a v průběhu simulace dochází k pohybu zatížení po tomto tělese. Exportovaný datový soubor s tlakovým zatížením obsahuje údaje o složkách tlaku v jednotlivých osách souřadného systému pro každý časový krok.



Obrázek 4.21: Propojení s Rocky DEM v prostředí ANSYS Workbench [25]

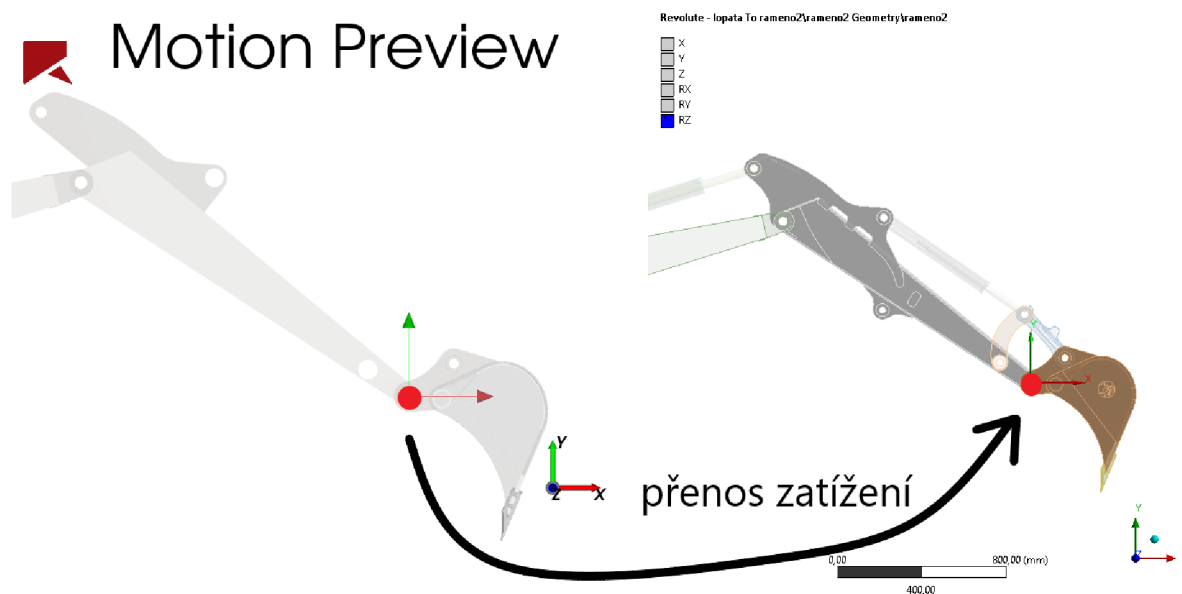
4.3.2. Zvolený alternativní způsob propojení

Výše popsáný způsob propojení je výhodný, pokud chceme analyzovat zatížení konstrukce, která během simulace přichází přímo do kontaktu s částicemi. Na začátku kapitoly 4 je uvedeno, že pro analýzu namáhání je z celé konstrukce rýpadla vybrána pouze násada rýpadla. Násada do přímého kontaktu s částicemi nepřichází, a pokud by měla být analyzována na základě exportovaného tlakového zatížení z Rocky DEM, tak by muselo být tlakové zatížení přeneseno na lžici rýpadla, což by způsobilo i namáhání násady.

Zvolený způsob řešení spočívá v přenosu zatížení ze styčnicku kinematického modelu v Rocky DEM do styčnicku kinematického modelu v ANSYS Mechanical (obr. 4.22). Styčnick v Rocky DEM je reprezentován pomocí *motion frames* a v ANSYS Mechanical pomocí tzv. *joints*. Obecně bývá kinematický model tvořen jednotlivými pruty a styčníky. V našem případě pruty představují jednotlivá tělesa v simulaci a styčníky vazby mezi nimi. Takto zvolený způsob řešení přináší hned řadu výhod oproti postupu popsanému v podkapitole 4.3.1 u integrace Rocky DEM v ANSYS Workbench. Nejvýznamnější z nich je ta, že oba kinematické modely se v průběhu simulace pohybují a je možné zobrazit si konfiguraci

kinematického modelu pro jakýkoliv časový krok simulace, a zároveň i například vykreslit hodnoty napětí v daném časovém kroku na násadě rýpadla.

Detailnější popis propojení je uveden v následující podkapitole 4.4.



Obrázek 4.22: Naznačení přenosu zatížení mezi styčníky kinematického modelu v Rocky DEM (nalevo) a kinematického modelu v ANSYS Mechanical (napravo)

4.4. Výpočtový model v Ansys Mechanical

Kromě metody diskretních prvků je k řešení problému zvolena i metoda konečných prvků. K analýze namáhání násady rýpadla pomocí MKP je použita studentská verze softwaru ANSYS Mechanical.

Prvním typem použité analýzy je *Rigid dynamics* pro dynamiku tuhých těles. Ta slouží pouze pro sjednocení pohybu mezi kinematickými modely v Rocky DEM a ANSYS Mechanical. Z *Rigid dynamics* jsou získány závislosti posuvů v jednotlivých válcích na čase. Průběhy posuvů ve válcích jsou zadány jako vstupní parametry pro definování pohybu kinematického modelu u další provedené analýzy, kterou je statická strukturální analýza. U té jsou navíc aplikovány jako zatížení do styčnicku průběhy sil a momentu z předchozí simulace v Rocky DEM. Obě analýzy a nastavení, které jim předchází jsou popsány níže.

4.4.1. Model materiálu

Pro analýzu je použit homogenní, izotropní, lineárně elastický model materiálu. Materiálem násady rýpadla je konstrukční ocel, která má na základě doporučení od firmy DOOSAN BOBCAT následující materiálové vlastnosti (tab. 4.6).

Tabulka 4.6: Materiálové charakteristiky

Modul pružnosti - E	200 000 MPa
Poissonova konstanta - μ	0,3
Hustota - ρ	7850 kg/m ³
Mez kluzu - R_e	350 MPa
Mez pevnosti - R_m	500 MPa
Amplituda napětí hladkého vzorku pro 10^7 cyklů - σ_a	162 MPa
Exponent únavové křivky před 10^7 cyklů - w_1	10
Exponent únavové křivky za 10^7 cyklů - w_2	22

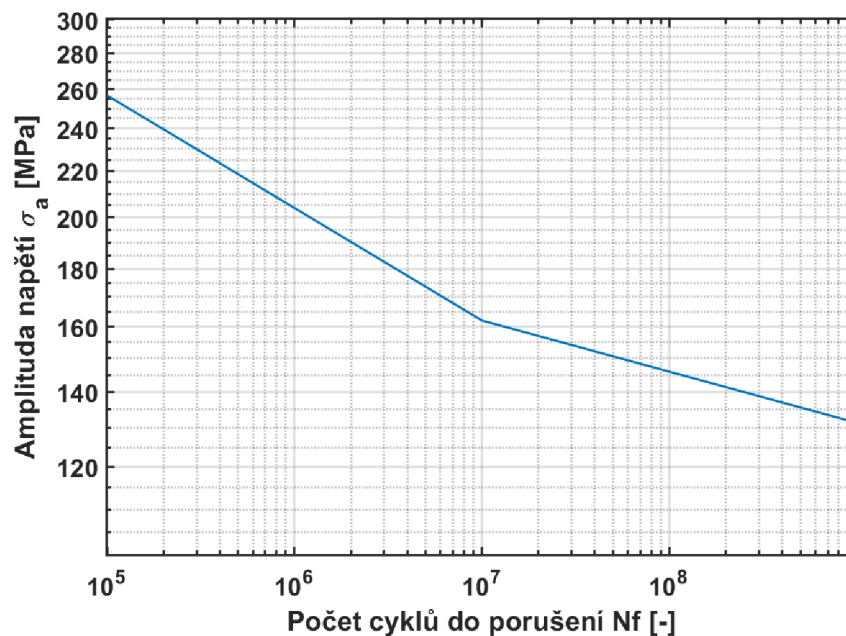
Na základě poskytnutých materiálových charakteristik je sestrojena Wöhlerova křivka (obr. 4.23). Wöhlerova křivka také bývá označována jako S-N křivka, tedy závislost amplitudy napětí na počtu cyklů do porušení a je důležitou materiálovou charakteristikou v oblasti vysokocyklové únavy, kdy součást je navržena na více než 10^5 cyklů, což je i případ řešený v této práci.

Existuje několik modelů pro popis Wöhlerovy křivky, z nichž nejjednodušší je popsán rovnicí:

$$\sigma_a^w \cdot N = C \quad (4.1)$$

kde:

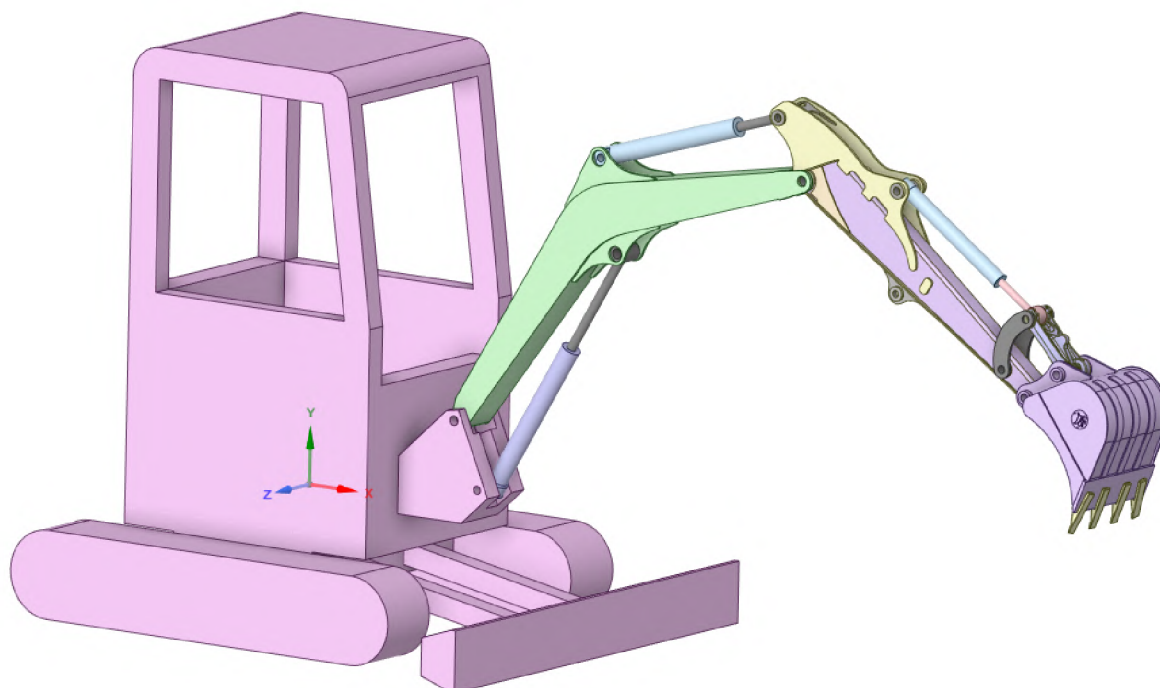
- σ_a je amplituda zatěžujícího napětí [MPa]
- w je exponent šikmé větve únavové křivky [-]
- N je počet cyklů do porušení při konstantní amplitudě napětí σ_a
- C je konstanta [-]



Obrázek 4.23: Wöhlerova křivka únavy

4.4.2. Model geometrie

Oproti modelu geometrie v předchozím výpočtovém modelu (obr. 4.3) je model geometrie doplněn o hydraulické válce s tyčemi a o kloubový mechanismus u lžice rýpadla (obr. 4.24).



Obrázek 4.24: Model geometrie v ANSYS SpaceClaim

4.4. VÝPOČTOVÝ MODEL V ANSYS MECHANICAL

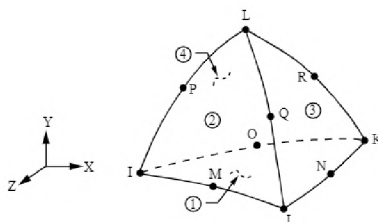
Tentokrát tedy kinematický model obsahuje všechny části, které obsahuje i reálné rameno rýpadla (pokud neuvažujeme čepy, hadičky a další komponenty, které byly pro výpočet zanedbány). Detailněji je modelována především násada ramene rýpadla, která je v další kapitole vyhodnocena vůči mezním stavům pružnosti a únavové pevnosti, takže pro tento výpočet nemůže být příliš zjednodušena jako u předchozího výpočtového modelu.

4.4.3. Síť konečných prvků

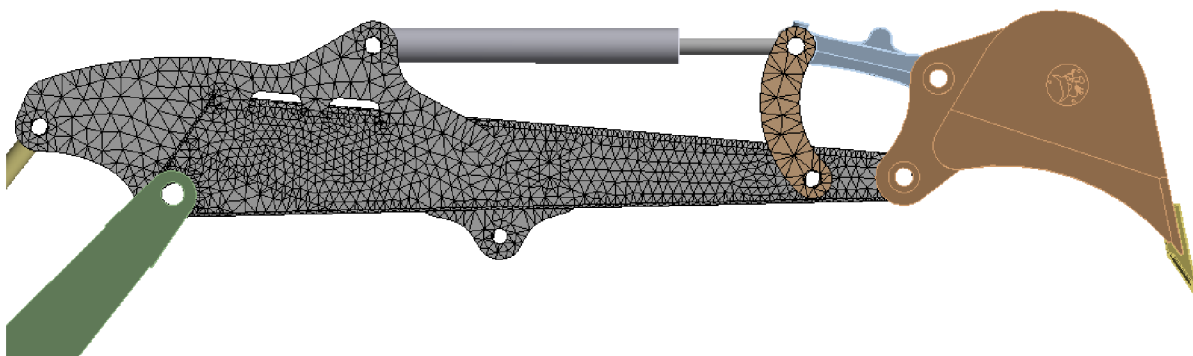
Síť (obr. 4.26) je z důvodu složitosti geometrie tvořena kvadratickými prvky SOLID187 (obr. 4.25), které obsahují mezi vrcholovými uzly i tzv. meziuzly. Celkem prvek obsahuje deset uzlů a každý uzel má definovány tři stupně volnosti (posuvy x , y a z).

Síť je vytvořena pouze u násada rýpadla a prutu z kloubového mechanismu u lžice. Ostatní tělesa jsou nastavena jako tuhá. Především je tomu tak, protože hlavní oblast zájmu je právě násada rýpadla a také kvůli úspoře výpočetního času a omezenému počtu prvků u studentské verze ANSYS Mechanical. Pokud by bylo použito propojení, kdy by bylo na model lžice v ANSYS Mechanical přeneseno zatížení od působení částic z Rocky DEM, tak by musela být vysítována i lžice rýpadla, aby mohlo být zatížení namapováno na uzly na lžici. Došlo by tak k navýšení výpočetního času. Použitá varianta, ve které je zatížení aplikováno do styčnicku násady ramene rýpadla, je časově úspornější.

- Počet prvků sítě: 25 440
- Počet uzlů sítě: 51 296



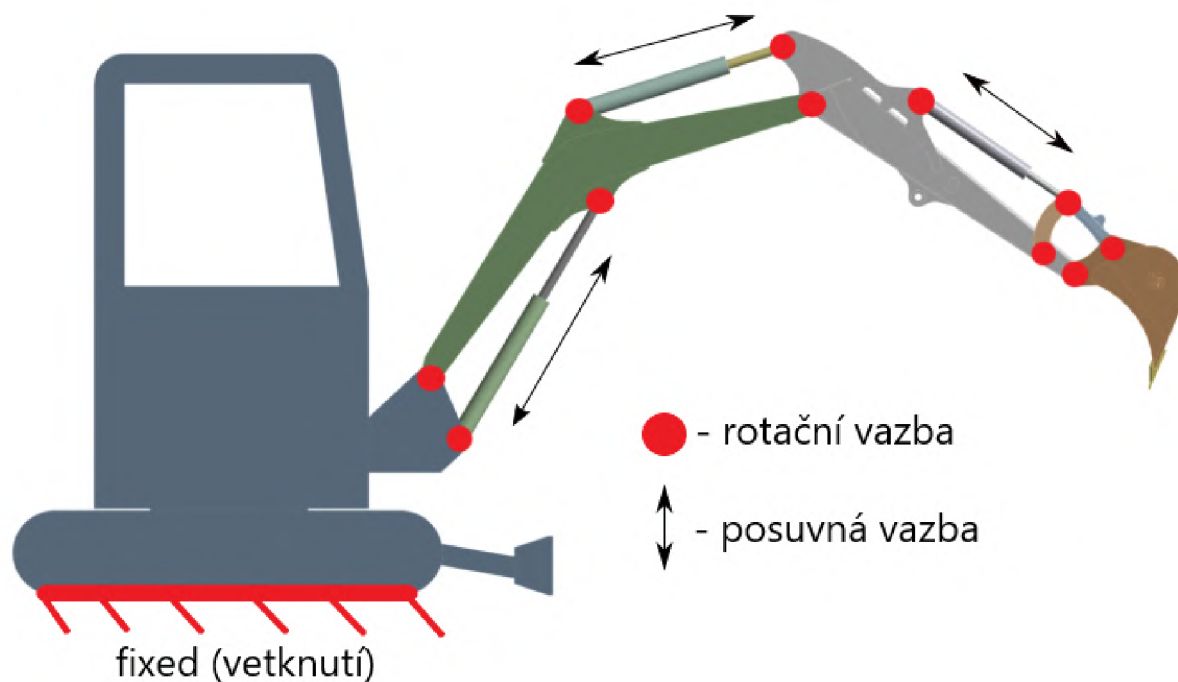
Obrázek 4.25: Prvek SOLID187 [26]



Obrázek 4.26: Síť konečných prvků v ANSYS Mechanical

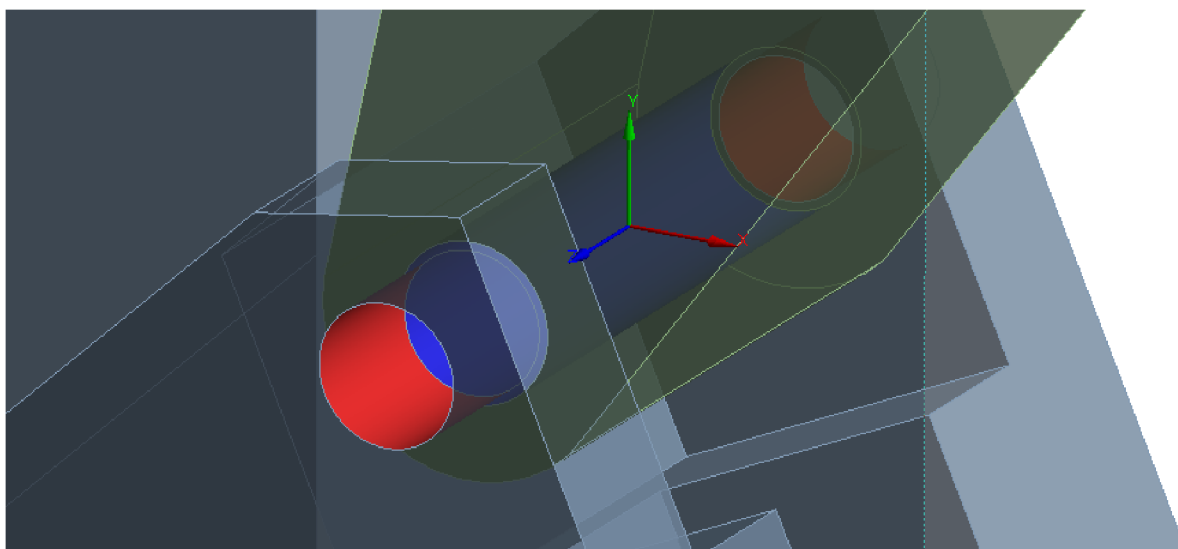
4.4.4. Okrajové podmínky

Vazby mezi jednotlivými tělesy jsou definovány pomocí spojení typu *joint*. Tělo rýpadla je vetknuto a *joints* v místech čepů, kde jsou rotační vazby, představují styčníky kinematického modelu. Dalším použitým typem vazby je vazba posuvná, kterou jsou svázány pohyby tyčí v hydraulických válcích. Naznačení všech typů vazeb aplikovaných na kinematický model je na obr. 4.27.



Obrázek 4.27: Zavazbení jednotlivých částí rýpadla

Detail spojení typu *joint* je na obr. 4.28, kde je zobrazena rotační vazba mezi tělem rýpadla a výložníkem.



Obrázek 4.28: Rotační vazba mezi tělem rýpadla a výložníkem

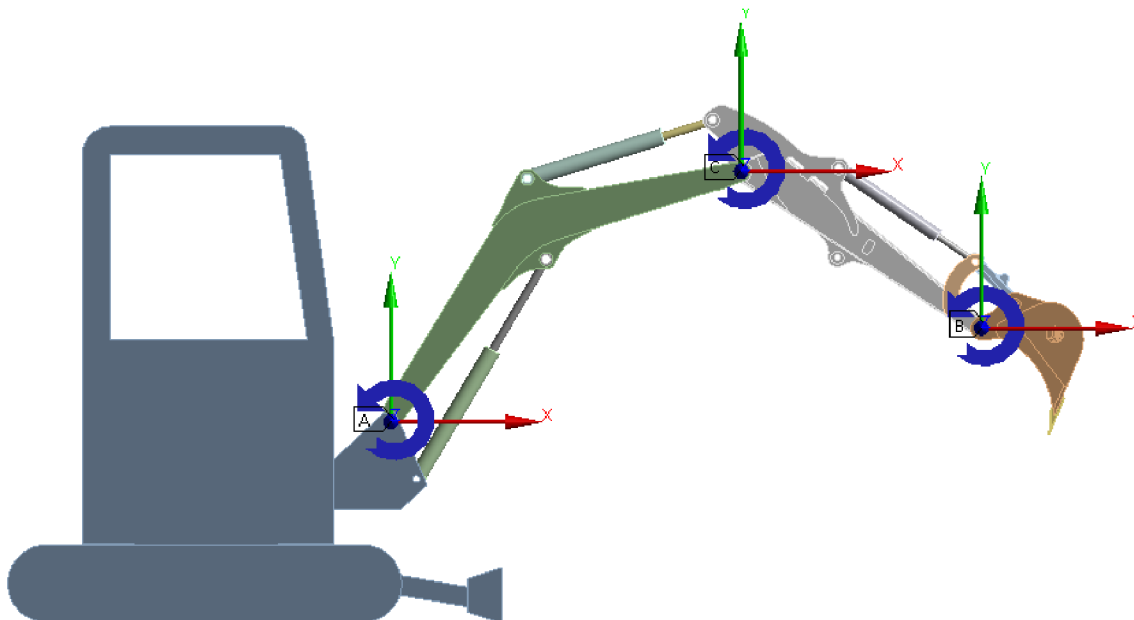
4.4. VÝPOČTOVÝ MODEL V ANSYS MECHANICAL

Červeně jsou označeny referenční plochy a modře plocha mobilní. Uzly, které se nachází na označených plochách, se nazývají *závislé* a jsou svázané s *nezávislým* uzlem, který se nachází ve středu souřadnicového systému uvedeného na obrázku. Všechny použité vazby jsou nastaveny jako tuhé, nedochází k deformaci referenčních a mobilních ploch. *Závislým* uzlům na těchto plochách jsou zamezeny posuvy vůči *nezávislému* uzlu uprostřed souřadnicového systému pro danou vazbu.

Sjednocení pohybu mezi Rocky DEM a ANSYS Mechanical

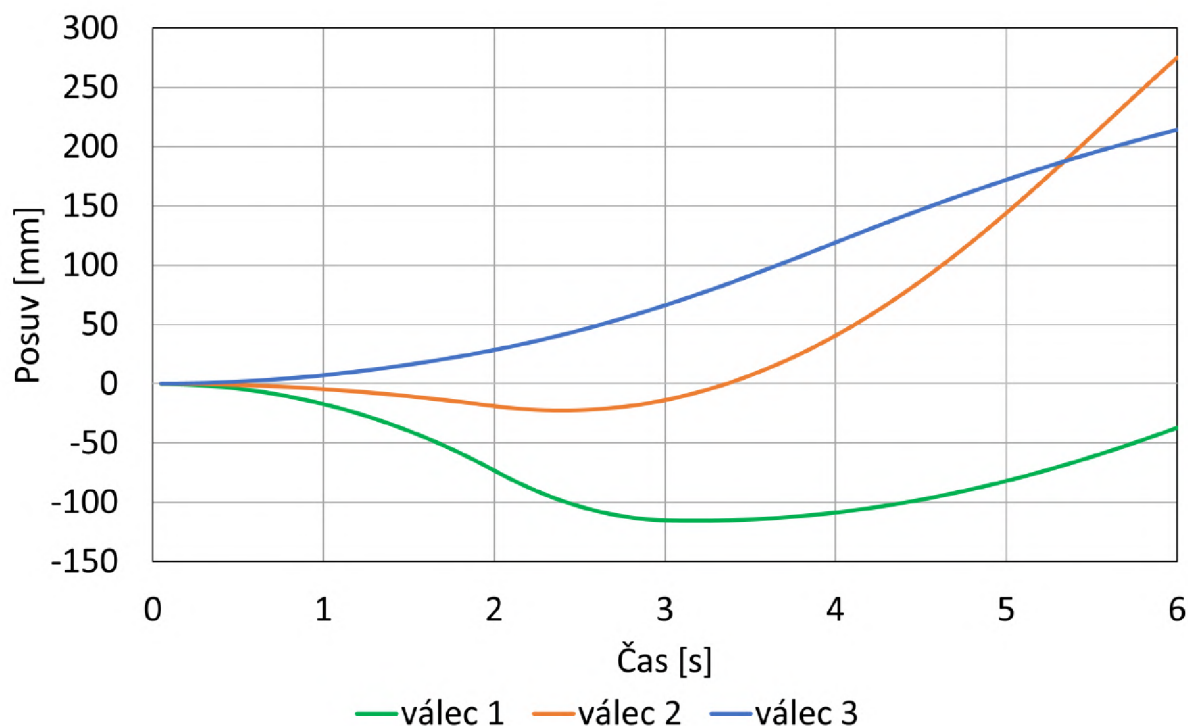
Jakmile jsou nastaveny vazby mezi tělesy, tak je nutné zajistit, aby kinematický model rýpadla v prostředí ANSYS konal stejný pohyb jako kinematický model v prostředí Rocky DEM. To je nutné zejména z toho důvodu, že do styčnicku kinematického modelu v prostředí ANSYS jsou aplikována časově proměnná zatížení (průběhy sil a momentu v čase). Tím pádem hodnoty zatížení v každém časovém okamžiku odpovídají dané konfiguraci kinematického modelu a sjednocením pohybů je zatížení přeneseno korektně.

Pro sjednocení pohybů je využito analýzy *Rigid dynamics*, která umožňuje řešit dynamiku mechanismů složených z tuhých těles propojených kinematickými vazbami a je dostupná v prostředí ANSYS Workbench. Analýza je využita k tomu, abychom předepsáním stejného pohybu jako u kinematického modelu v prostředí Rocky DEM získali závislosti posuvů ve válcích na čase a tyto závislosti potom použili pro předepsání pohybu u statické strukturální analýzy. Pomocí již zmíněných *joints* jsou definovány kinematické vazby a stejně jako u předešlého kinematického modelu v Rocky DEM je pohyb rýpadla určen pomocí průběhů úhlových zrychlení zadaných do styčnicků (*joints*) (obr. 4.29). Průběhy úhlových zrychlení ve styčnicích jsou totožné s těmi, které již byly uvedeny na obr. 4.11 v kapitole 4.2.2 u předchozího výpočtového modelu.



Obrázek 4.29: Zrychlení zadaná do styčnicků v *Rigid dynamics*

Získané průběhy posuvů v hydraulických válcích v závislosti na čase jsou na obrázku níže.

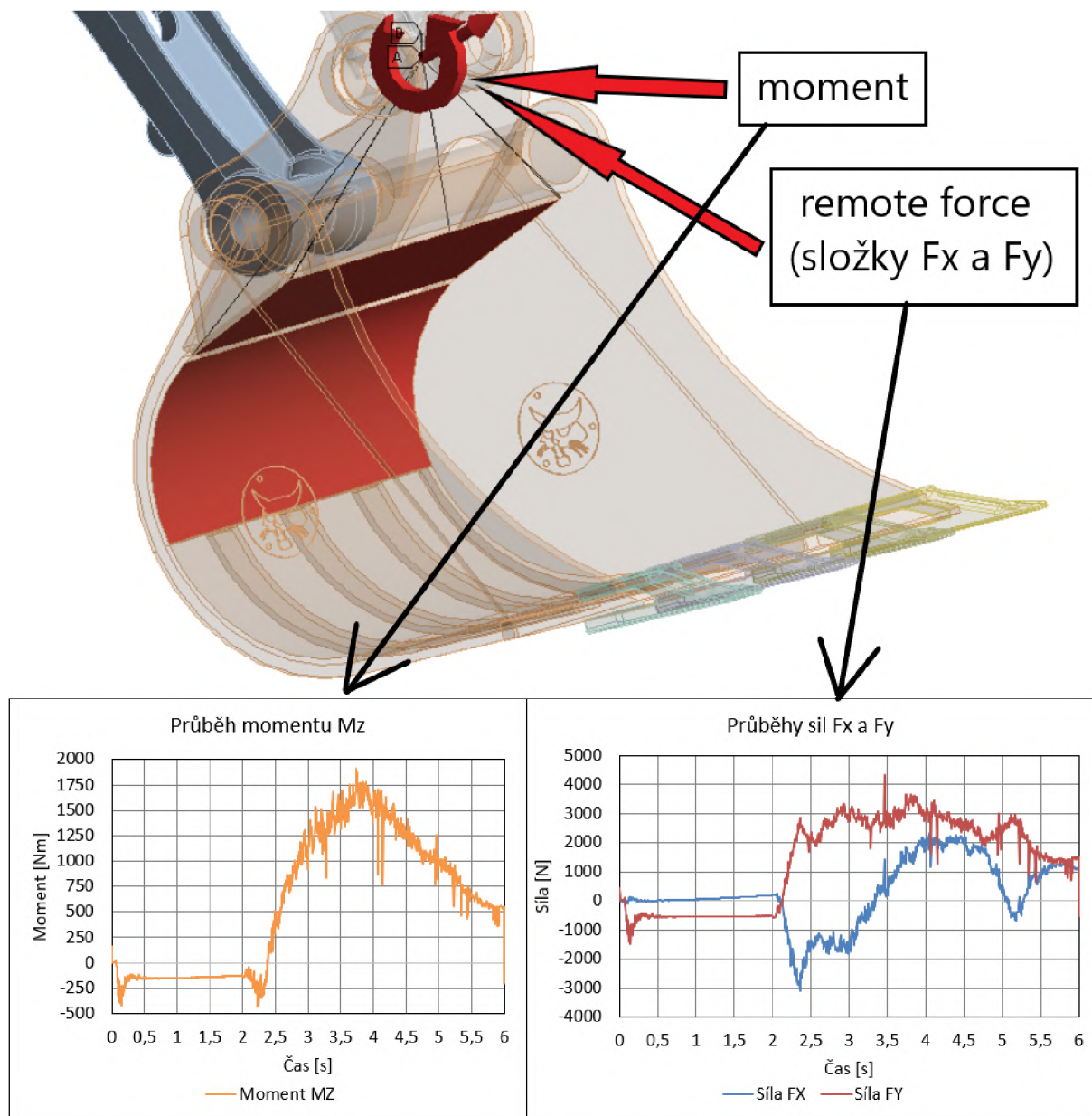


Obrázek 4.30: Průběhy posuvů v hydraulických válcích v čase

Aplikace zatížení

Na obr. 4.22 již bylo naznačeno, že zatížení bude aplikováno do styčnicku kinematického modelu. Konkrétně se jedná o styčnicku u lopaty rýpadla. V tomto místě je vytvořen tzv. *remote point*, který je spojen s červeně vyznačenými plochami na lopatě rýpadla (obr. 4.31) a přenáší tak zatížení na konstrukci rýpadla. Tento *remote point* je použit pro vložení průběhu momentu M_z a složek sil F_x a F_y . V části 4.2.3 už bylo uvedeno, že složka síly F_z a složky momentu M_x a M_y , které jsou řádově menší než ostatní, jsou zanedbány. Kromě zatížení od složek sil a momentu na konstrukci působí i tíhová síla. Grafické znázornění působícího zatížení ve styčnicku kinematického modelu je na obr. 4.31.

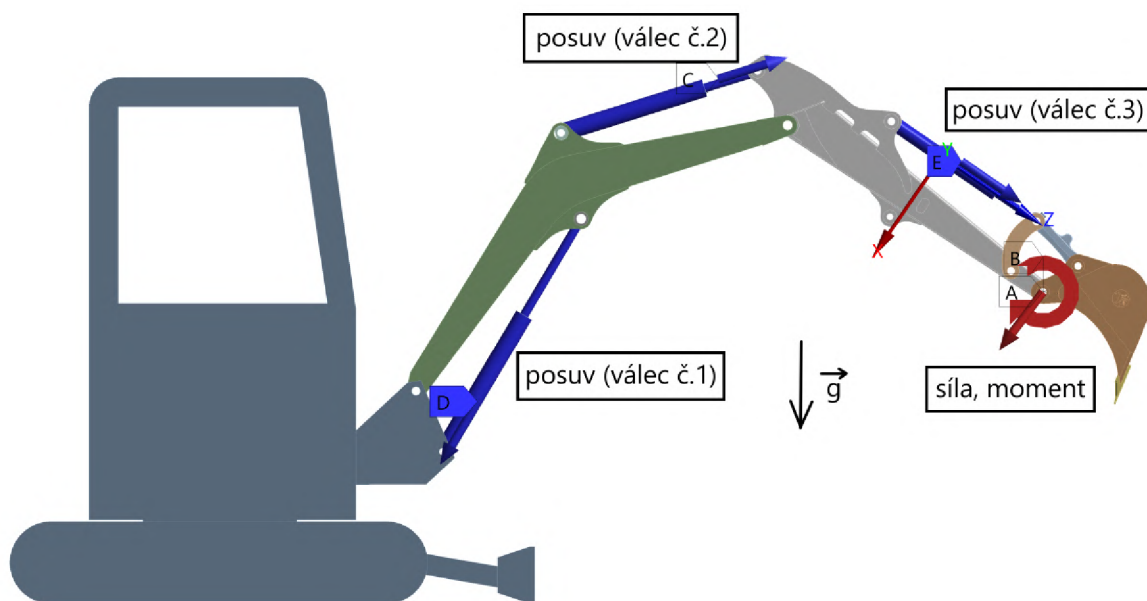
4.4. VÝPOČTOVÝ MODEL V ANSYS MECHANICAL



Obrázek 4.31: Průběhy sil a momentu vložené do styčnicku u lopaty rýpadla v ANSYS Mechanical

Shrnutí použitých okrajových podmínek

Pro lepší přehlednost jsou zde shrnuty okrajové podmínky, kterou jsou použity pro kinematický model. Na zavazbený kinematický model dle obr. 4.27 jsou aplikovány okrajové podmínky zobrazené na obr. 4.32. Do posuvných vazeb mezi válci a tyčemi jsou zadány získané průběhy posuvů v čase (obr. 4.30) a do styčnicku u lopaty rýpadla jsou zadány průběhy sil a momentu. Zároveň na konstrukci rýpadla působí po celou dobu simulace tíhová síla.



Obrázek 4.32: Okrajové podmínky

4.4.5. Nastavení analýzy

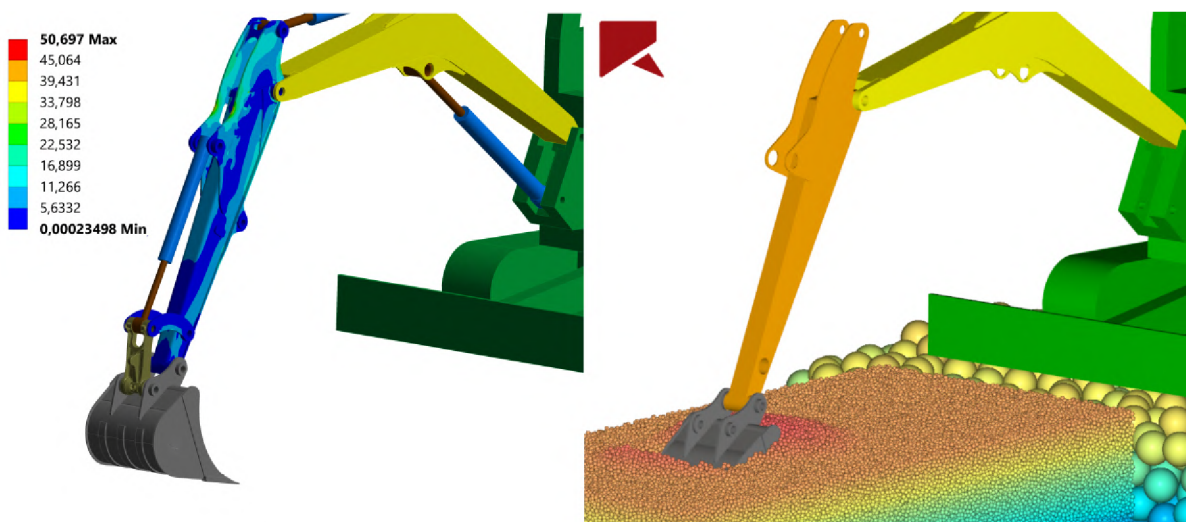
Přestože je konstrukce rýpadla zatížena časově proměnnými složkami sil a momentu, tak pro výpočet mechanického namáhání násady rýpadla byla zvolena statická strukturální analýza. Jsou tedy zanedbány vlivy setrvačných sil a tlumení, které jsou pro námi řešený problém zanedbatelné. Výpočet je proveden v jednom zátěžném kroku. Čas na konci zátěžného kroku je nastaven na 6 sekund a časový krok výpočtu je 0,005 sekund, což odpovídá frekvenci, se kterou byly vypisovány výsledky z výpočtového modelu v Rocky DEM. Je důležité mít časový krok výpočtu nastavený na tuto hodnotu, protože kdyby hodnota časového kroku byla vyšší, tak by nemusely být zohledněny všechny lokální extrémy u průběhů zatěžujících veličin.

4.4.6. Analýza výsledků simulace

Díky zvolenému způsobu propojení mezi Rocky DEM a ANSYS Mechanical je možné analyzovat namáhání násady rýpadla v libovolném časovém okamžiku během simulace nabírání zeminy. Na obr. 4.33 je zobrazeno porovnání obou simulací pro časový okamžik 3,74 sekund, kdy hodnota redukovaného napětí von-Mises dosahuje na modelu násady maximální hodnoty.

Detailněji jsou kritická místa, ve kterých se na modelu násady rýpadla objevují maximální hodnoty redukovaného napětí, analyzována v následující části 4.4.7. Protože je u globálního modelu použita poměrně hrubá síť konečných prvků, tak ji nelze považovat za reprezentativní. Dostatečně jemné sítě v kritických místech globálního modelu nebylo možné dosáhnout zejména kvůli limitu počtu prvků studentské verze ANSYS Mechanical. Pro vyhodnocení kritických míst na modelu násady rýpadla vůči mezním stavům je využito submodelingu (pojem je objasněn v kapitole 4.5).

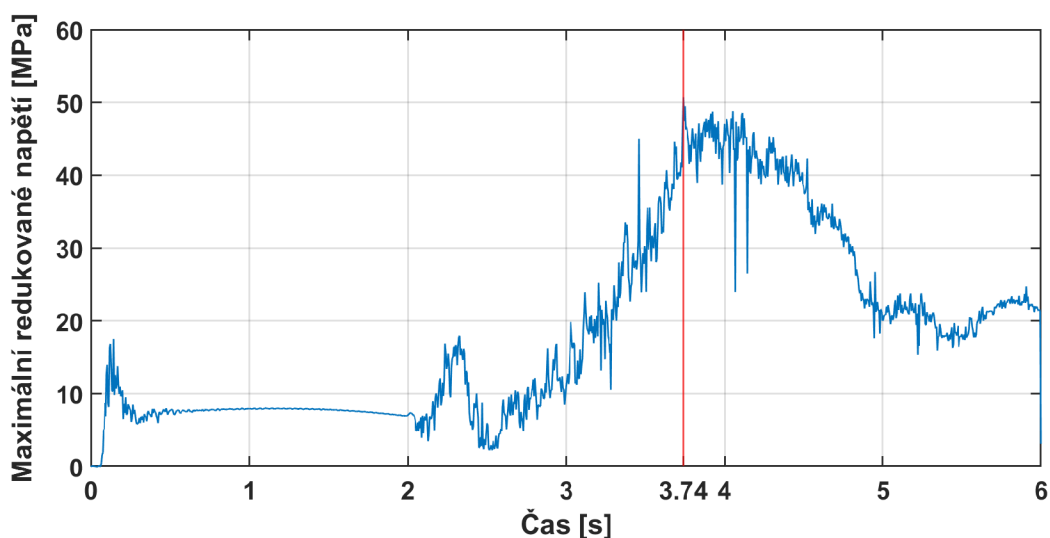
4.4. VÝPOČTOVÝ MODEL V ANSYS MECHANICAL



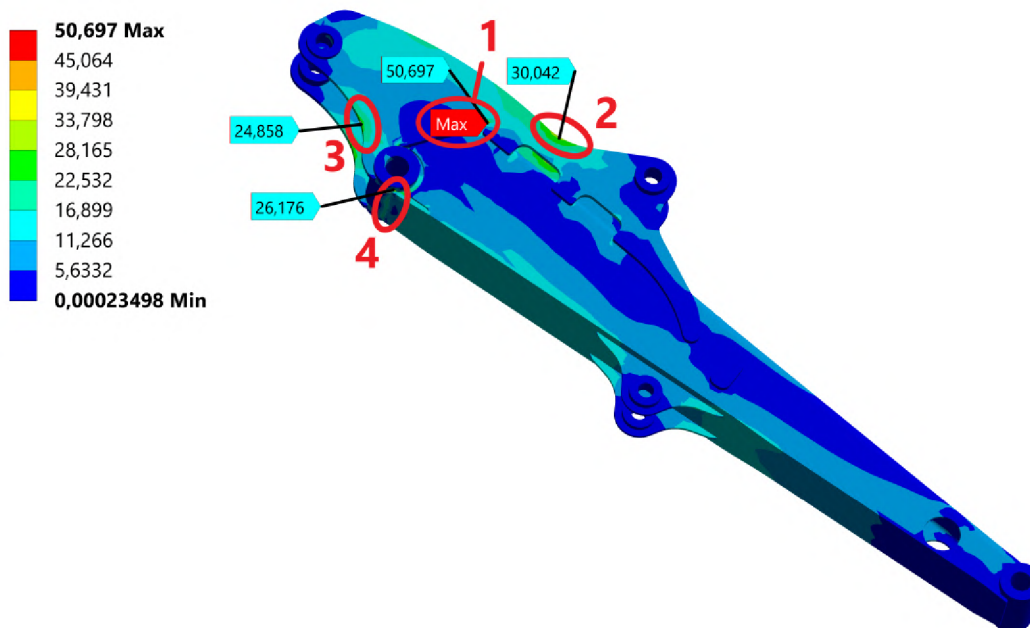
Obrázek 4.33: Porovnání simulací v ANSYS Mechanical (redukováné napětí von-Mises, nalevo) a Rocky DEM (napravo) pro časový okamžik 3,74 s

4.4.7. Určení kritických míst

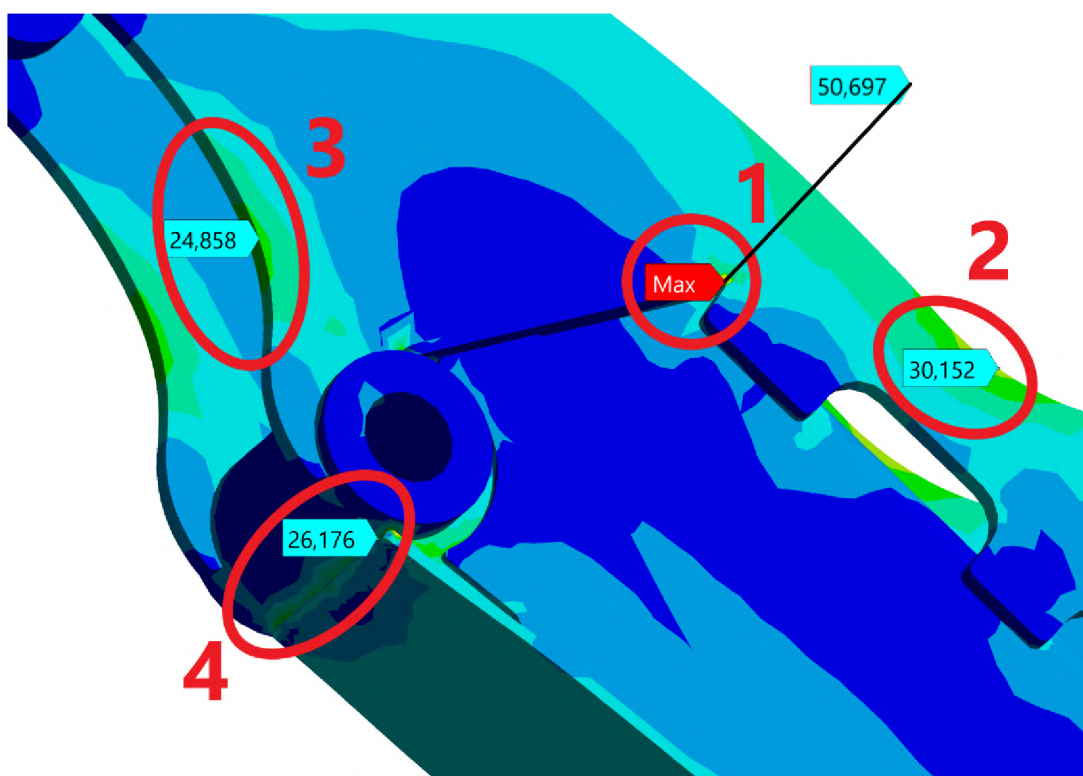
Na základě deformačně napěťové analýzy globálního modelu násady rýpadla jsou vybrána kritická místa, která jsou v průběhu simulace nabírání zeminy nejvíce namáhána. Tato místa jsou vybrána z časového okamžiku 3,74 sekund, kdy redukováné napětí von-Mises na násadě rýpadla nabývá maximální hodnoty. Průběh maximálních hodnot redukováného napětí na modelu násady rýpadla v průběhu celé simulace s vyznačením času 3,74 sekund je na obr. 4.34 a kritická místa jsou zobrazena na obr. 4.35 a 4.36.



Obrázek 4.34: Průběh maximálních hodnot redukováného napětí von-Mises s vyznačením časového okamžiku 3,74 sekund, kdy redukováné napětí nabývá maximální hodnoty



Obrázek 4.35: Redukované napětí von-Mises s vyznačením kritických míst



Obrázek 4.36: Redukované napětí von-Mises s vyznačením kritických míst - detail

V následující kapitole jsou kritická místa na modelu násady rýpadla vyhodnocena vůči mezním stavům pružnosti a únavové pevnosti.

4.5. Vyhodnocení násady rýpadla vůči mezním stavům

Po určení kritických míst následuje jejich posouzení vůči mezním stavům. Kritická místa číslo jedna až tři jsou vyhodnocena vůči MS pružnosti. Pro vyhodnocení MS únavové pevnosti jsou podstatná tahová napětí, ovšem kritická místa jedna a dva jsou namáhána dominantně na tlak (obr. 4.43, kapitola 4.5.2), takže únava je posouzena pouze u kritického místa číslo tři. V kritickém místě číslo čtyři se nachází svarový spoj a je posouzen také vůči MS únavové pevnosti v kapitole 4.5.2.

4.5.1. Mezní stav pružnosti

Jak již bylo zmíněno dříve, k vyhodnocení kritických míst na modelu násady je použito *submodelingu*. Z globálního modelu, ve kterém je zahrnuta celá geometrie a všechny okrajové podmínky, je lokálně vyříznuta malá oblast (tzv. submodel). Ten je zatížen posuvy z uzlů globálního modelu v místě řezu. Sít konečných prvků může být dostatečně zjemněna pro vyhodnocení hodnot napětí.

Princip využívání *submodelingu* je založen na Saint Venantově principu. Hodnota napětí je ovlivněna pouze v blízkém okolí hranice submodelu. Pokud je vyšetřovaná oblast v dostatečné vzdálenosti od hranice submodelu, tak lze v této oblasti dosáhnout přesných výsledků [26].

MS pružnosti nastává, jestliže v tělese vznikají první makroplastické deformace. Tyto deformace vzniknou, jestliže je překročena hodnota meze kluzu daného materiálu. Bezpečnost vůči MS pružnosti je určena podle následujícího vzorce:

$$k = \frac{R_e}{\sigma_{\max}} > 1 \quad (4.2)$$

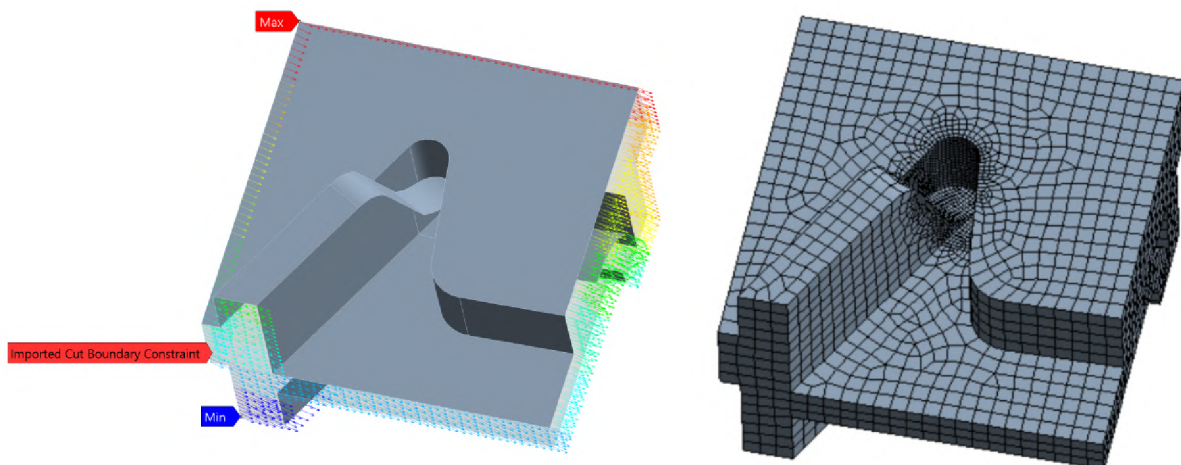
kde:

- k je součinitel bezpečnosti [-]
- R_e je mez kluzu materiálu [MPa]
- σ_{\max} je maximální hodnota napětí [MPa]

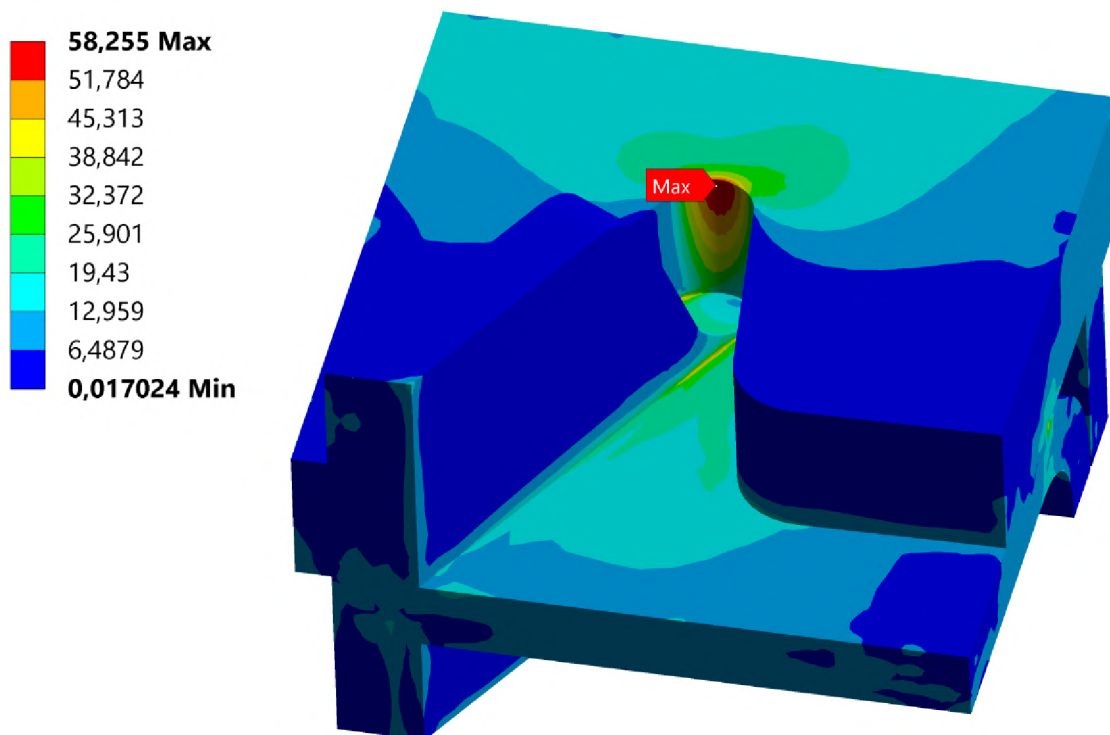
U každého kritického místa je zobrazeno zatížení, síť konečných prvků a maximální hodnoty redukovaného napětí von-Mises v průběhu simulovaného děje nabírání zeminy. Vzhledem k symetrii jsou tato kritická místa vyhodnocena pouze na jedné straně násady, protože na druhé bychom dostali stejné hodnoty redukovaného napětí.

Kritické místo č.1:

První submodel v kritickém místě č. 1 (obr. 4.37) je vytvořen v okolí vrubu, kde redukované napětí dosahuje maximální hodnoty. V místě vrubu je síť zjemněna.



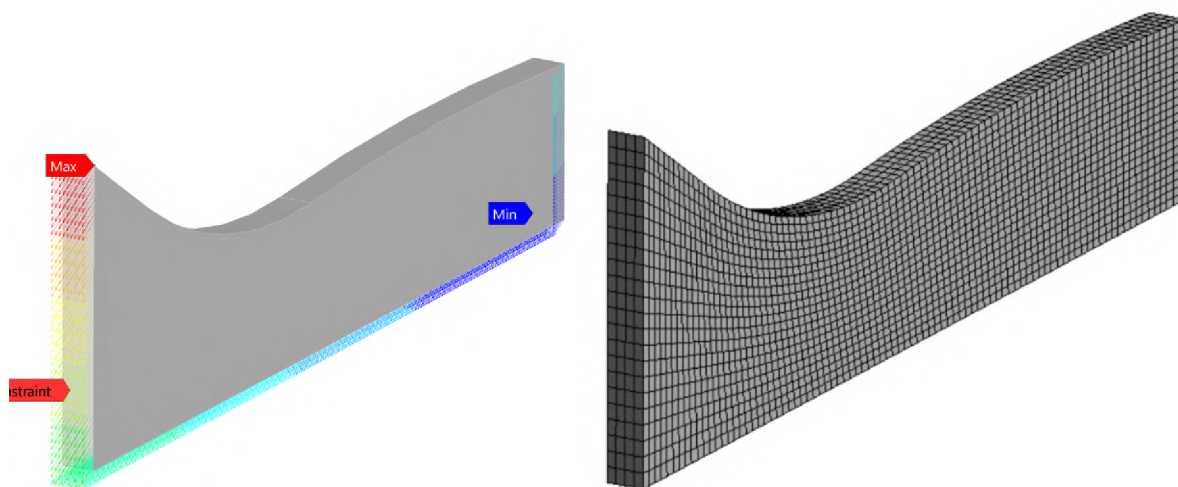
Obrázek 4.37: Zatížení a síť konečných prvků, kritické místo č.1



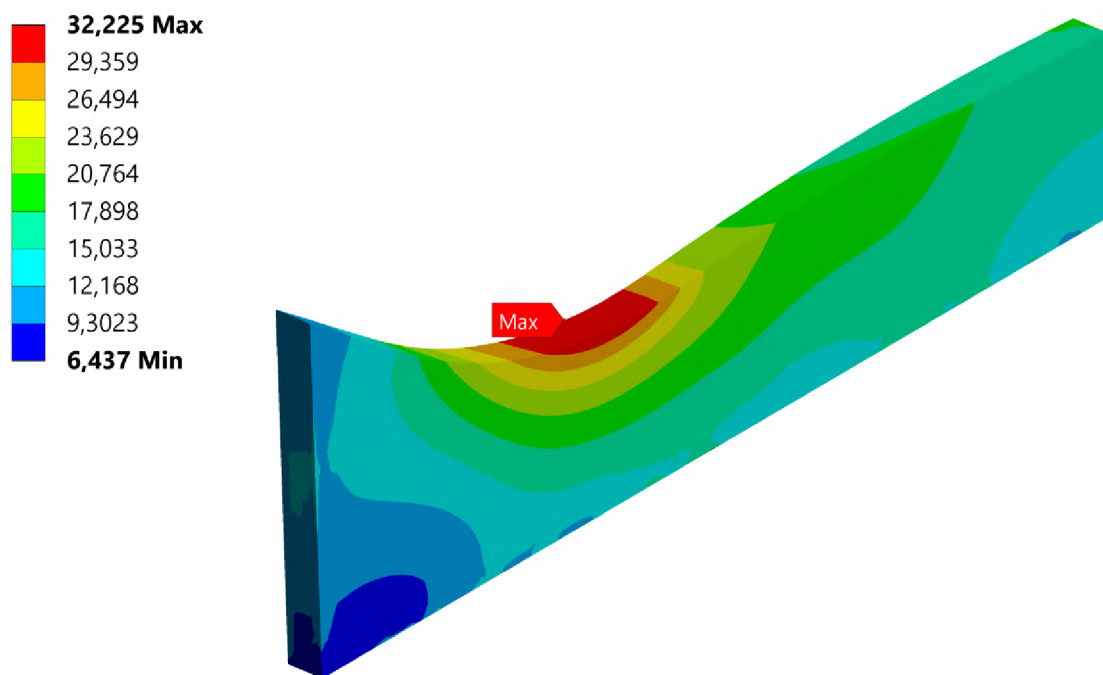
Obrázek 4.38: Redukované napětí von-Mises, kritické místo č.1

4.5. VYHODNOCENÍ NÁSADY RÝPADLA VŮČI MEZNÍM STAVŮM

Kritické místo č.2:

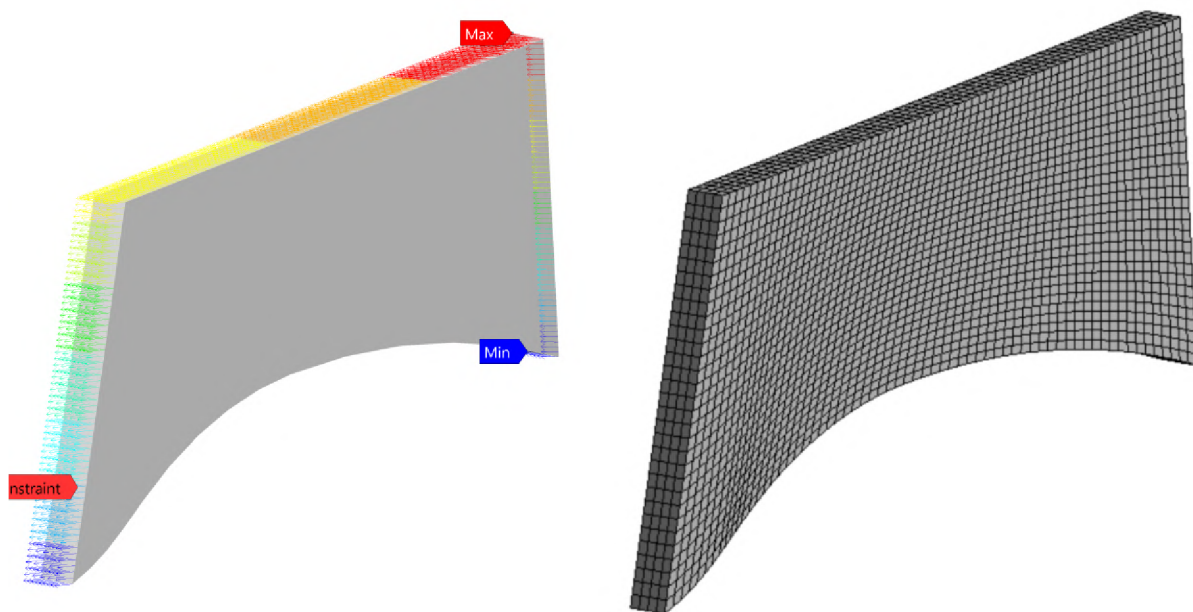


Obrázek 4.39: Zatížení a síť konečných prvků, kritické místo č.2

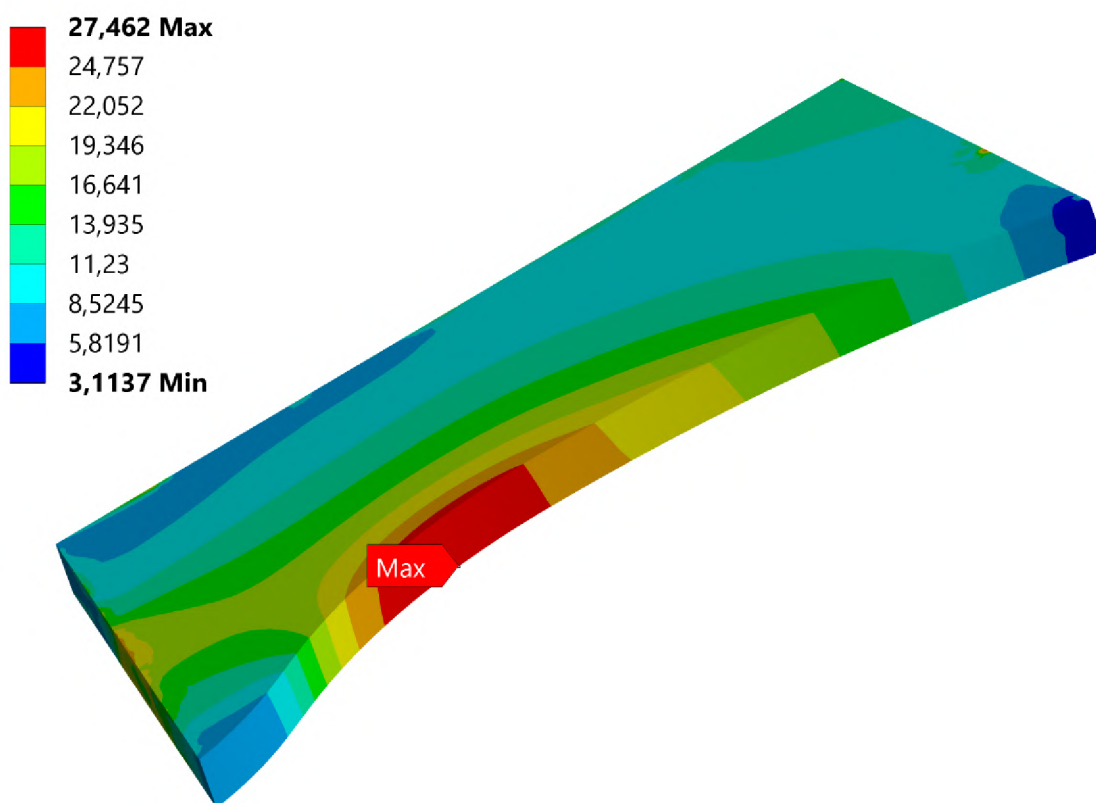


Obrázek 4.40: Redukované napětí von-Mises, kritické místo č.2

Kritické místo č.3:



Obrázek 4.41: Zatížení a síť konečných prvků, kritické místo č.3



Obrázek 4.42: Redukované napětí von-Mises, kritické místo č.3

4.5. VYHODNOCENÍ NÁSADY RÝPADLA VŮČI MEZNÍM STAVŮM

Určení bezpečnosti vůči MS pružnosti

Hodnoty součinitele bezpečnosti podle vzorce (4.49) vůči MS pružnosti pro jednotlivá kritická místa na modelu násady jsou uvedeny v tabulce 4.7. U kritických míst číslo jedna a dva se jedná o tlakové hodnoty napětí a u kritického místa číslo tři se jedná o napětí tahové. Jako maximální hodnota redukovaného napětí je uvažována maximální hodnota dosažená v průběhu simulovaného děje.

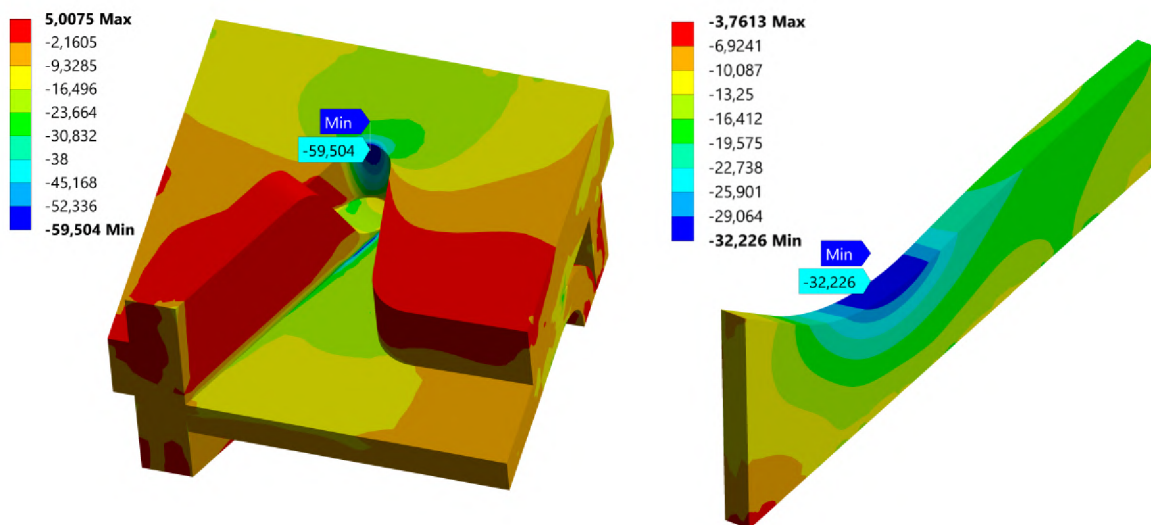
Tabulka 4.7: Bezpečnost vůči MS pružnosti

Číslo detailu	1	2	3
Maximální hodnota redukovaného napětí [MPa]	58,3	32,2	27,5
Součinitel bezpečnosti vůči MS pružnosti [-]	6,0	10,9	12,7

Z tabulky vyplývá, že během simulovaného děje nabírání zeminy nedojde u modelu násady rýpadla k dosažení MS pružnosti, protože všechny součinitelé bezpečnosti mají hodnotu větší než jedna.

4.5.2. MS únavové pevnosti

Jelikož kritická místa číslo jedna a dva jsou po celou dobu simulovaného děje namáhána dominantně na tlak (obr. 4.43) a hodnoty napětí se pohybují pod mezí kluzu, tak je z hlediska únavového posouzení můžeme považovat za bezpečná.

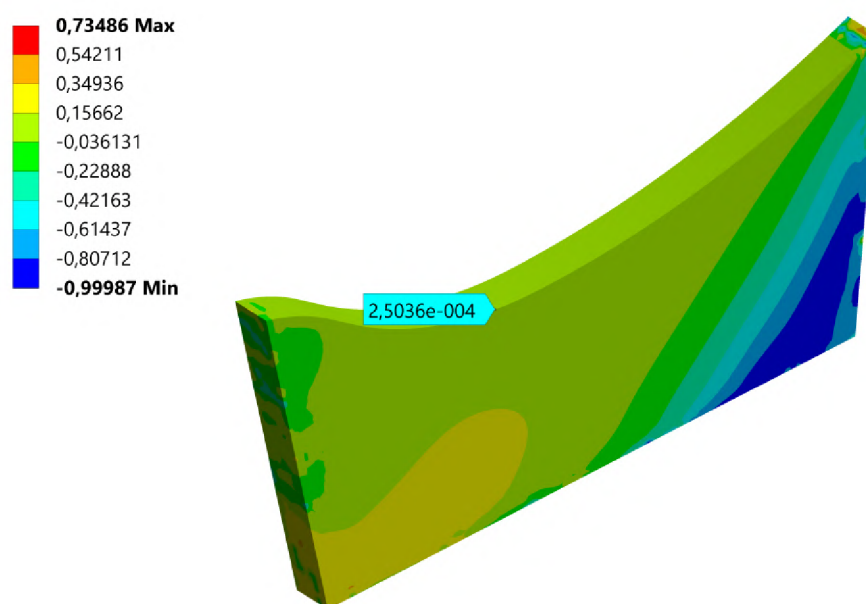


Obrázek 4.43: Hodnoty hlavního napětí σ_3 , nalevo kritické místo č.1 a napravo č.2

Pro posouzení únavy mimo oblast svarového spoje je vybráno pouze kritické místo číslo 3, kde dochází k tahovému namáhání, které bývá podstatné pro vznik únavové trhliny a případné porušení tělesa.

Kritické místo je posouzeno pomocí nástroje *Fatigue tool*, který slouží pro jednoduché posouzení jednoosé únavy. Na začátku je velmi důležité přesvědčit se o tom, že v posuzovaném místě nastává pouze jednoosý stav napjatosti, protože jinak bychom museli použít kritéria pro posouzení víceosé únavy. K tomu slouží tzv. faktor biaxility, u kterého platí:

- Biaxility indication = 1 (dvouosá napjatost)
- Biaxility indication = 0 (jednoosá napjatost)
- Biaxility indication = -1 (smyková napjatost)



Obrázek 4.44: Hodnoty *biaxility indication*, kritické místo č.3

Na obr. 4.44 je vidět, že v posuzovaném místě dochází pouze k jednoosé napjatosti, hodnota *biaxility indication* je téměř rovna nule. Dále je potřeba zadat S-N křivku, jejíž nejdůležitějším bodem je hodnota amplitudy napětí pro počet cyklů 10^7 , za kterou dochází ke změně sklonu únavové křivky. Tento bod odpovídá smluvní mezi únavy, u které je provedena korekce na vliv povrchu. Podle skript *Dynamická pevnost a životnost* [28] je mez únavy skutečného povrchu o 20 % nižší než mez únavy hladkého vzorku. Na základě již uvedené tabulky 4.6 je hodnota smluvní meze únavy po korekci na vliv povrchu následující:

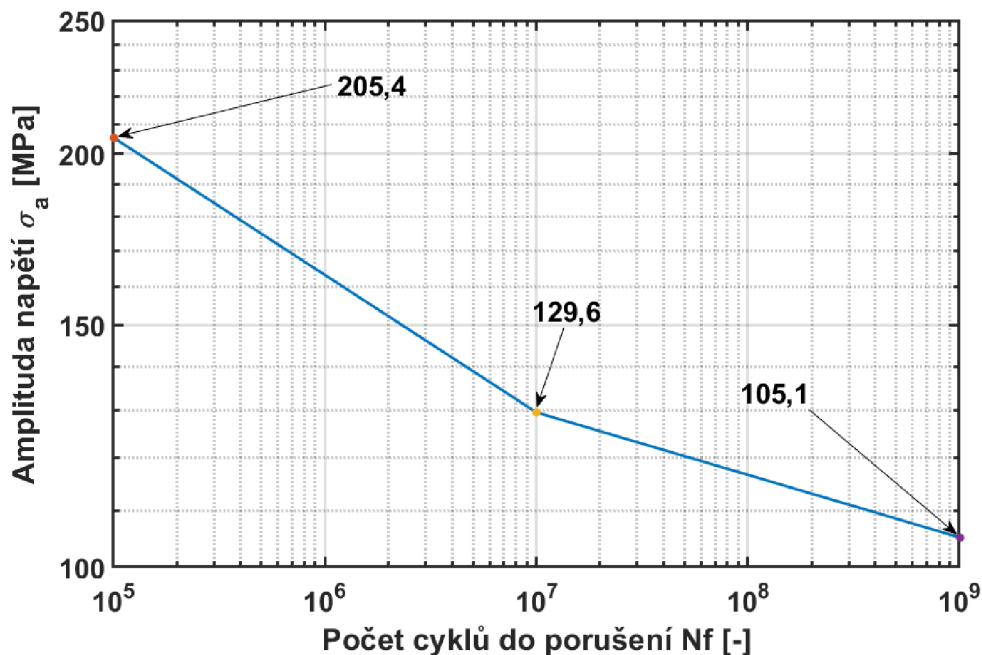
$$\sigma_c^* = \sigma_c \cdot 0,8 = 162 \cdot 0,8 = 129,6 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

kde:

- σ_c^* je korigovaná mez únavy na vliv povrchu
- σ_c je smluvní mez únavy hladkého vzorku

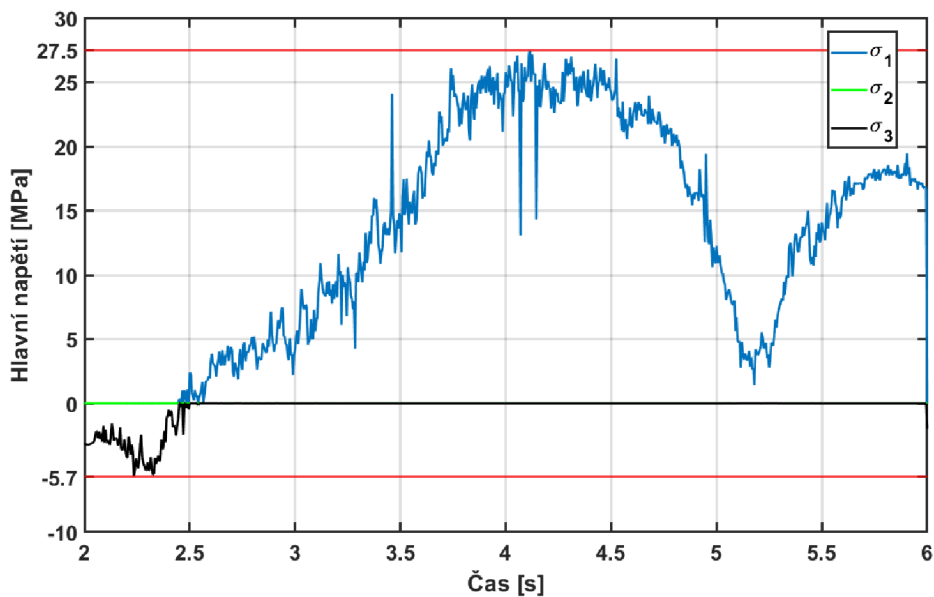
S-N křivka (obr. 4.45) je sestrojena stejně jako v části 4.4.1 podle vzorce (4.1) pomocí třech bodů, akorát je posunuta do oblasti nižších hodnot napětí vlivem korekce na vliv povrchu.

4.5. VYHODNOCENÍ NÁSADY RÝPADLA VŮČI MEZNÍM STAVŮM



Obrázek 4.45: S-N křivka s vyznačenými body

Z průběhů hlavních napětí v místě s maximálním napětím na obr. 4.46 je dále patrné, že je třeba provést i korekci na vliv asymetrie cyklu, jelikož střední napětí nabývá nenulové hodnoty. Průběhy jsou vykresleny až od okamžiku 2 sekundy, který odpovídá prvnímu kontaktu lžice s modelem zeminy. Od začátku simulace po čas 2 sekundy se jedná pouze o volný pohyb ramene rýpadla. Vzhledem k průběhu napětí na obr. 4.46 je průběh napětí zjednodušen na nesouměrný střídavý harmonický cyklus, jehož maximální a minimální hodnoty napětí jsou vyznačeny červenými čarami. Takové řešení je možné označit za konzervativní.



Obrázek 4.46: Průběhy hlavních napětí ve vyšetřovaném místě, červeně jsou vyznačeny hodnoty maximálního a minimálního napětí

Součinitel asymetrie cyklu pro nesouměrný střídavý cyklus na základě minimální a maximální hodnoty napětí (obr. 4.46) je určen dle vztahu:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{-5,7}{27,5} = -0,2 \quad (4.4)$$

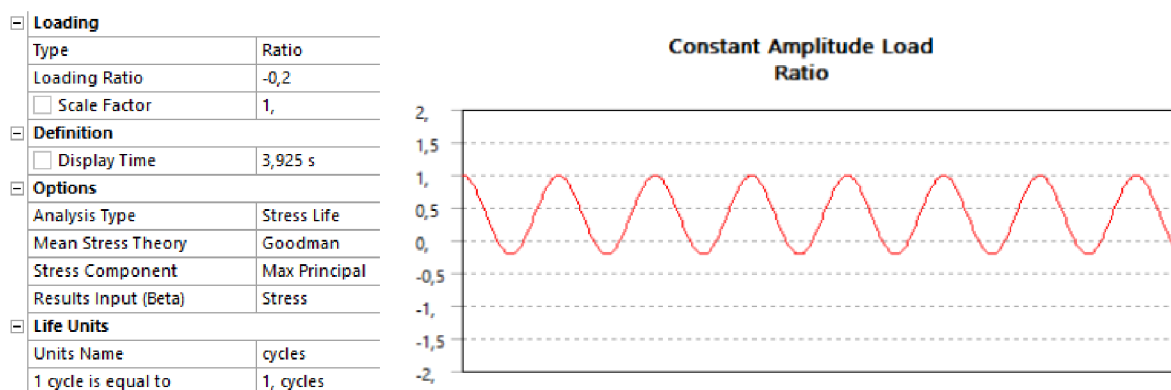
Pro zahrnutí vlivu nenulového středního napětí je použito Goodmanovo kritérium, vyjádřené vztahem:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma'_a} + \frac{\sigma_m}{R_m} = 1 \quad (4.5)$$

kde:

- σ_a je amplituda napětí nesouměrného cyklu
- σ'_a je ekvivalentní amplituda napětí, stejně poškozující jako σ_a
- σ_m je amplituda napětí
- R_m je mez pevnosti

Nastavení nástroje *fatigue tool* a naznačení nastaveného zátěžného cyklu je na obrázku níže.



Obrázek 4.47: Nastavení *fatigue tool* (nalevo) a naznačení zátěžného cyklu (napravo)

Ještě než bude vyhodnocena bezpečnost, tak je dobré si ověřit, zda ANSYS na základě nastavení nástroje *fatigue tool* správně určil hodnotu ekvivalentní amplitudy napětí. K tomu jsou dle průběhu na obr. 4.46 určeny hodnoty amplitudy napětí a středního napětí cyklu podle těchto vztahů:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{27,5 - (-5,7)}{2} = 16,6 \text{ MPa} \quad (4.6)$$

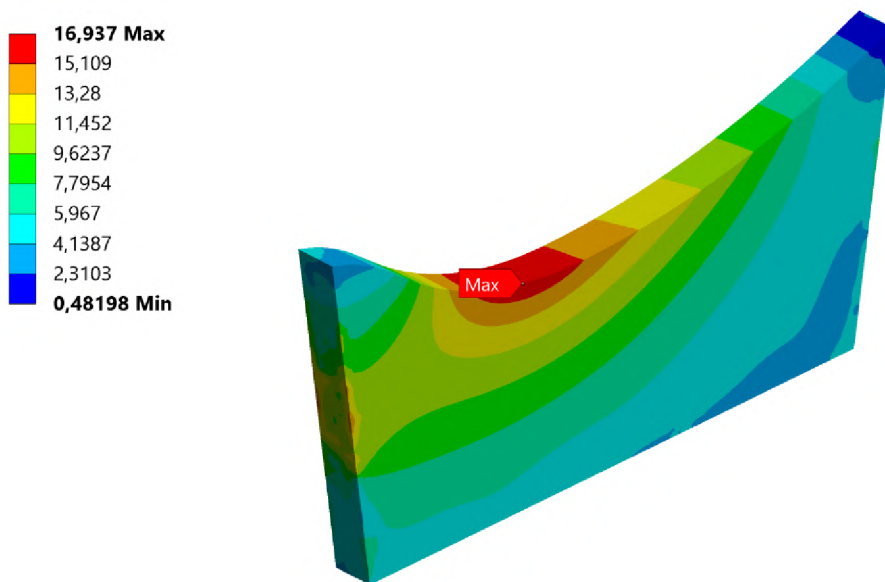
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{27,5 + (-5,7)}{2} = 10,9 \text{ MPa} \quad (4.7)$$

4.5. VYHODNOCENÍ NÁSADY RÝPADLA VŮČI MEZNÍM STAVŮM

Z rovnice (4.5) lze vyjádřit vztah pro ekvivalentní amplitudu napětí, která způsobuje stejné únavové poškození jako amplituda napětí nesouměrného cyklu a dosazením hodnot amplitudy napětí σ_a , středního napětí σ_m a meze pevnosti R_m dostáváme:

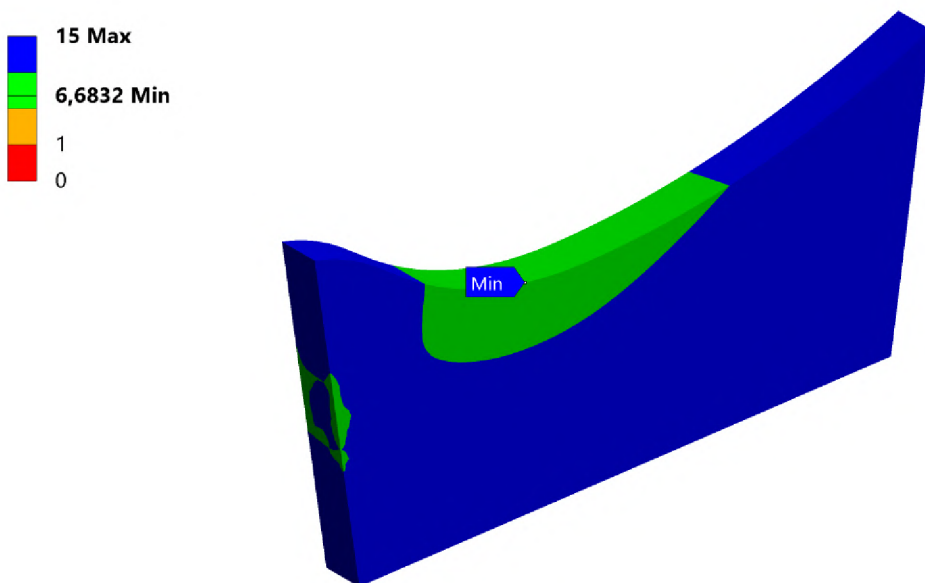
$$\sigma'_a = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{R_m}} = \frac{16,6}{1 - \frac{10,9}{500}} = 17 \text{ MPa} \quad (4.8)$$

Hodnota ekvivalentní amplitudy napětí z prostředí ANSYS je na obr. 4.48.



Obrázek 4.48: Ekvivalentní amplituda napětí σ'_a

Z obrázku je vidět, že hodnota ekvivalentní amplitudy napětí se shoduje s analytickým výpočtem. Bezpečnost vůči MS únavové pevnosti je na obr. 4.49. Součinitel bezpečnosti nabývá v kritickém místě hodnoty 6,68. Násada rýpadla tedy vydrží více než 10^7 cyklů a životnost lze považovat za neomezenou.



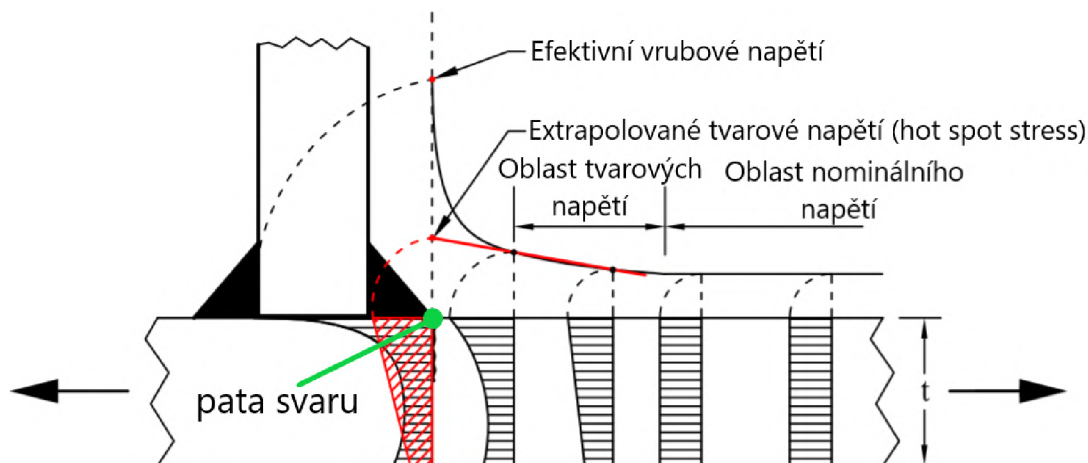
Obrázek 4.49: Bezpečnost vůči MS únavové pevnosti

Vyhodnocení svarového spoje - kritické místo č.4

Nakonec je vyhodnoceno i kritické místo číslo čtyři, ve kterém se nachází svarový spoj. Jedná se o koutový svar, který však v tomto místě není namodelován, jednotlivé části jsou pouze spojeny dohromady. Pro vyhodnocení únavové pevnosti svarových spojů existuje několik předpisů. V této práci je zvoleno vyhodnocení pomocí dokumentu zpracovaného institucí IIW (International Institute of Welding) [27], dále jen IIW. Vyhodnocení na základě tohoto dokumentu je vyučováno i na Ústavu mechaniky těles v průběhu studia. Dokument ovšem obsahuje pouze doporučení jak postupovat při analýze svarových spojů. Tento dokument nabízí čtyři metody pro vyhodnocení únavové pevnosti svaru:

- Metoda nominálních napětí
- Metoda extrapolace tvarového napětí (hot spot stress)
- Metoda efektivního vrubového napětí
- Metoda součinitele intenzity napětí

Typy napětí, které se u těchto metod používají, jsou zobrazeny na obr. 4.50.



Obrázek 4.50: Průběh napětí k patě svaru, upraveno podle [29]

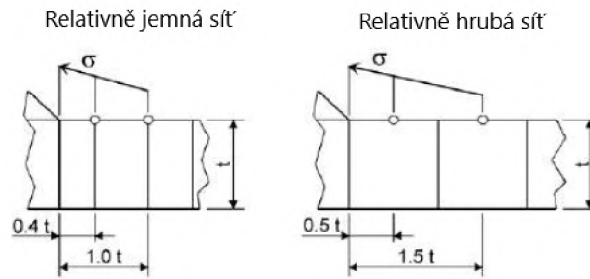
Z metod, které byly uvedeny, byly pro posouzení únavové pevnosti svaru vybrány metoda extrapolace tvarového napětí a metoda efektivního vrubového napětí.

Metoda extrapolace tvarového napětí

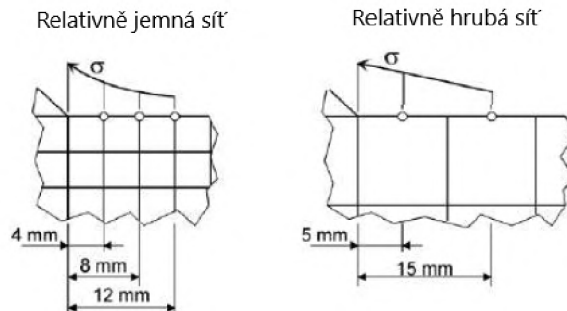
Metoda extrapolace tvarového napětí neboli *structural hot spot stress* se používá pokud není možné analyticky určit hodnotu nominálního napětí nebo pokud je geometrie svaru příliš složitá. Metoda hodnotí svar pouze na poškození v patě svaru.

Extrapolované napětí je určeno na povrchu součásti. Aby však mohlo být určeno, je třeba vytvořit relevantní síť konečných prvků. Dokument od IIW obsahuje doporučení pro velikosti prvků sítě. Doporučené velikosti prvků se dále dělí i podle dvou typů hodnocení: hodnocení typu a) a hodnocení typu b). U typu a) závisí na rozložení napětí po tloušťce svařovaného tělesa. U typu b) jsou extrapoláčnící body definovány v přesně daných vzdálenostech od paty svaru. Oba typy a doporučené velikosti prvků jsou na obrázcích 4.51 a 4.52.

4.5. VYHODNOCENÍ NÁSADY RÝPADLA VŮČI MEZNÍM STAVŮM



Obrázek 4.51: Extrapolované body napětí, hodnocení typu a) [27]

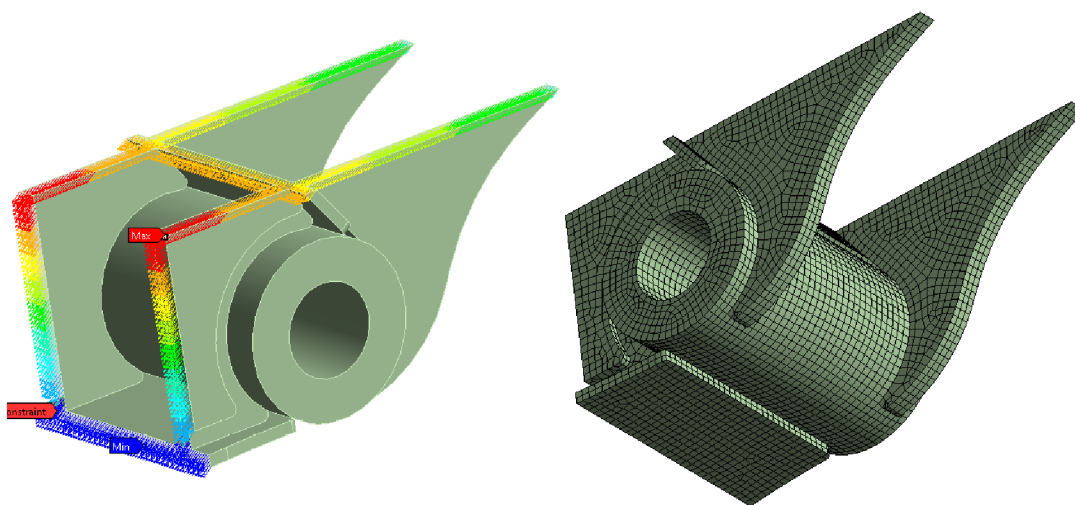


Obrázek 4.52: Extrapolované body napětí, hodnocení typu b) [27]

Pro svarový spoj na násadě rýpadla je použito hodnocení typu b) pro relativně jemnou síť. Hodnota extrapolovaného tvarového napětí je určena pomocí třech referenčních bodů ve vzdálenostech 4 mm, 8 mm a 12 mm od paty svaru. Jedná se o kvadratickou extrapolaci pomocí tohoto vztahu:

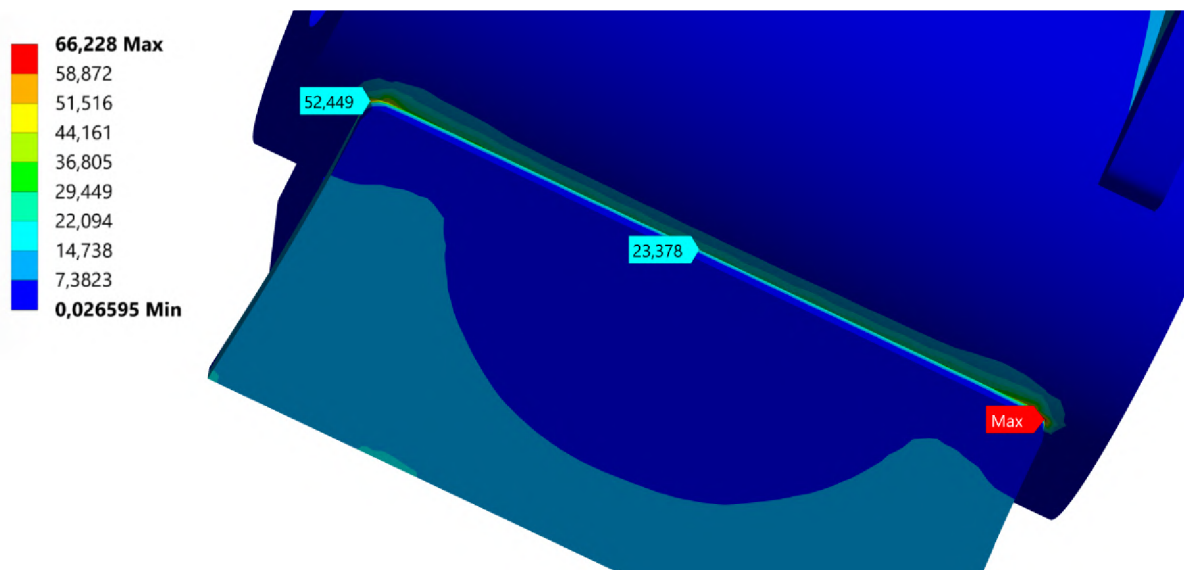
$$\sigma_{hs} = 3 \cdot \sigma_{4mm} - 3 \cdot \sigma_{8mm} + \sigma_{12mm} \quad (4.9)$$

K samotnému vyhodnocení je použito submodelu v oblasti kolem svarového spoje, submodel se nachází v místě čepového spoje výložníku a násady rýpadla (obr. 4.36). Zatížení submodelu a síť konečných prvků jsou zobrazeny na obr. 4.53.



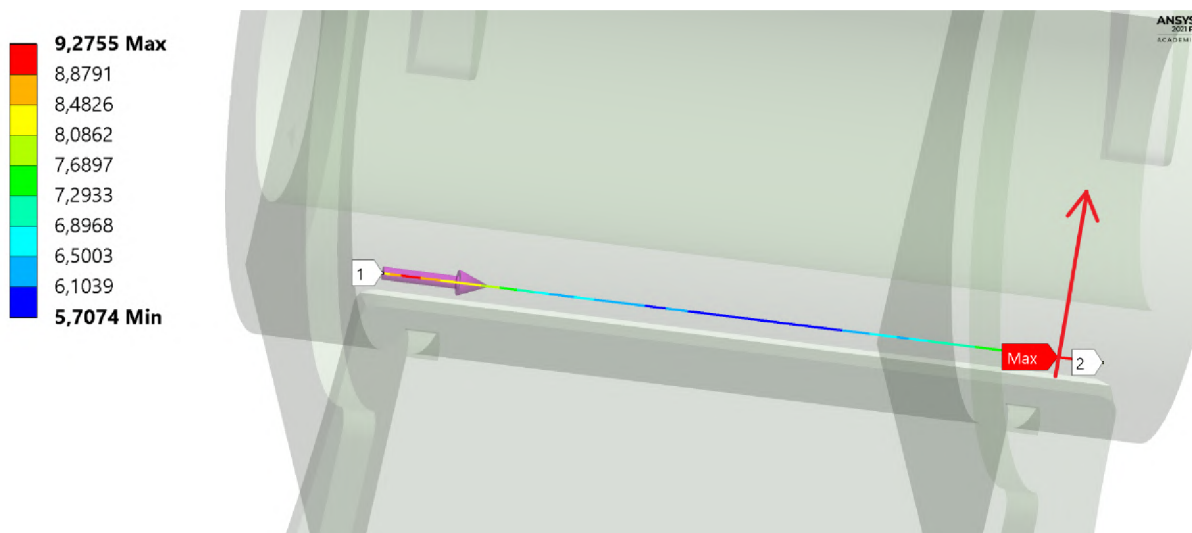
Obrázek 4.53: Zatížení a síť konečných prvků submodelu svarového spoje

Hodnoty největšího hlavního napětí σ_1 v místě svaru pro časový okamžik 4,055 sekund, kdy hlavní napětí σ_1 dosahuje maximální hodnoty v průběhu simulace jsou zobrazeny na obr. 4.54.



Obrázek 4.54: Hodnoty hlavního napětí σ_1

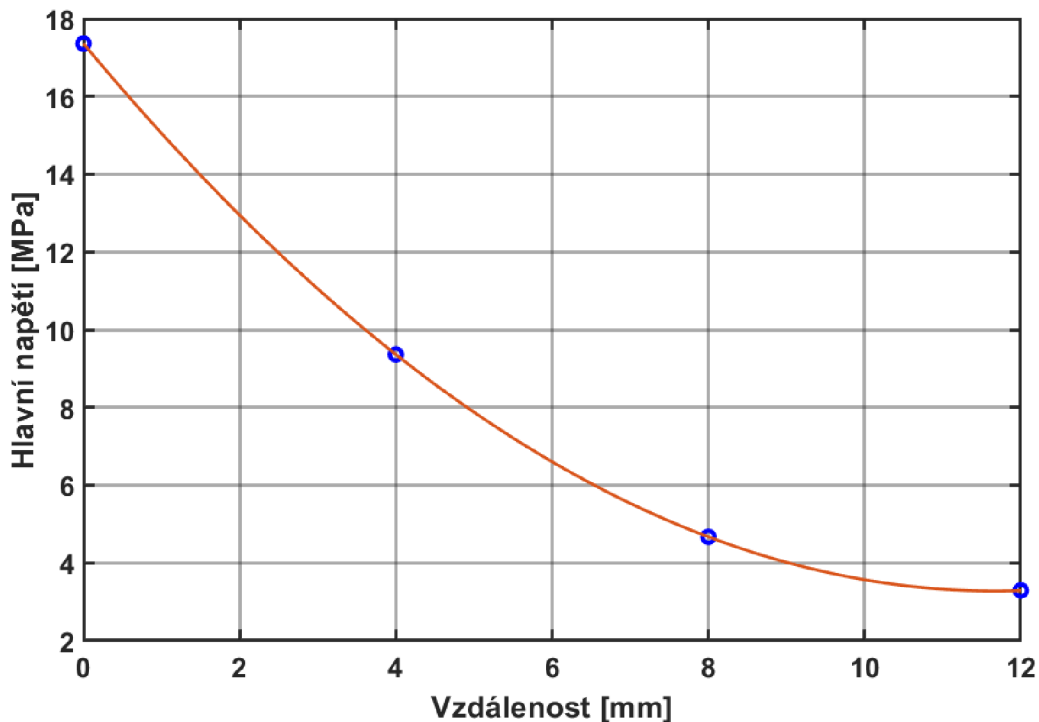
Na obrázku je vidět, že největší napětí se objevují v místě zaoblení v rozích svarového spoje. Pro určení ve kterém místě se bude nacházet cesta pro odečtení napětí je vykreslen průběh hlavního napětí σ_1 ve vzdálenosti 4 mm od společné hrany mezi plechem a válcovou částí (obr. 4.55).



Obrázek 4.55: Vykreslení hlavního napětí σ_1 po cestě a naznačení cesty pro odečtení napětí

Směr cesty pro odečtení hodnot hlavního napětí σ_1 odpovídá i směru hlavního napětí, který se v průběhu celé simulace nemění. Průběh napětí v blízkosti hrany spoje včetně vynesení a kvadratické extrapolace hodnot hlavního napětí po cestě ve vzdálenostech 4 mm, 8 mm a 12 mm je vykreslen na obr. 4.56.

4.5. VYHODNOCENÍ NÁSADY RÝPADLA VŮČI MEZNÍM STAVŮM



Obrázek 4.56: Průběh hlavního napětí σ_1 od místa spoje, vyznačeny jsou hodnoty hlavního napětí σ_1 v referenčních bodech

Hodnota extrapolovaného tvarového napětí σ_{hs} (hot spot stress) je určena podle již zmíněného vztahu (4.9) a dosahuje hodnoty 17,4 MPa. V tabulce níže jsou hodnoty hlavního napětí v referenčních vzdálenostech podél zvolené cesty.

Tabulka 4.8: Hodnoty hlavních napětí v referenčních bodech

Hodnoty prvních hlavních napětí [MPa]			
σ_{4mm}	σ_{8mm}	σ_{12mm}	σ_{hs}
9,4	4,7	3,3	17,4

K vyhodnocení je dále třeba určit tzv. FAT třídu. FAT třída charakterizuje hodnotu rozkmitu napětí pro $2 \cdot 10^6$ cyklů, při které nastane mezní stav únavové pevnosti. FAT třída se určuje na základě kategorie detailu. Vybraná kategorie svarového detailu a její stručný popis podle dokumentu od IIW je v tabulce 4.9. Hodnota rozkmitu napětí pro ocel u zvoleného detailu je FAT 90.

Tabulka 4.9: Svarový detail, upraveno podle [27]

Svarový detail	Popis svaru	Požadavky	FAT ocel	FAT hliník
	Koutový svar, přenášející zatížení	Plně provařený	90	40

K vyhodnocení je přistoupeno velmi konzervativně, získaná maximální amplituda extrapolovaného napětí σ_{hs} je považována za amplitudu napětí souměrně střídavého cyklu. Hodnota bezpečnosti vůči meznímu stavu únavové pevnosti je určena podle následujícího vztahu:

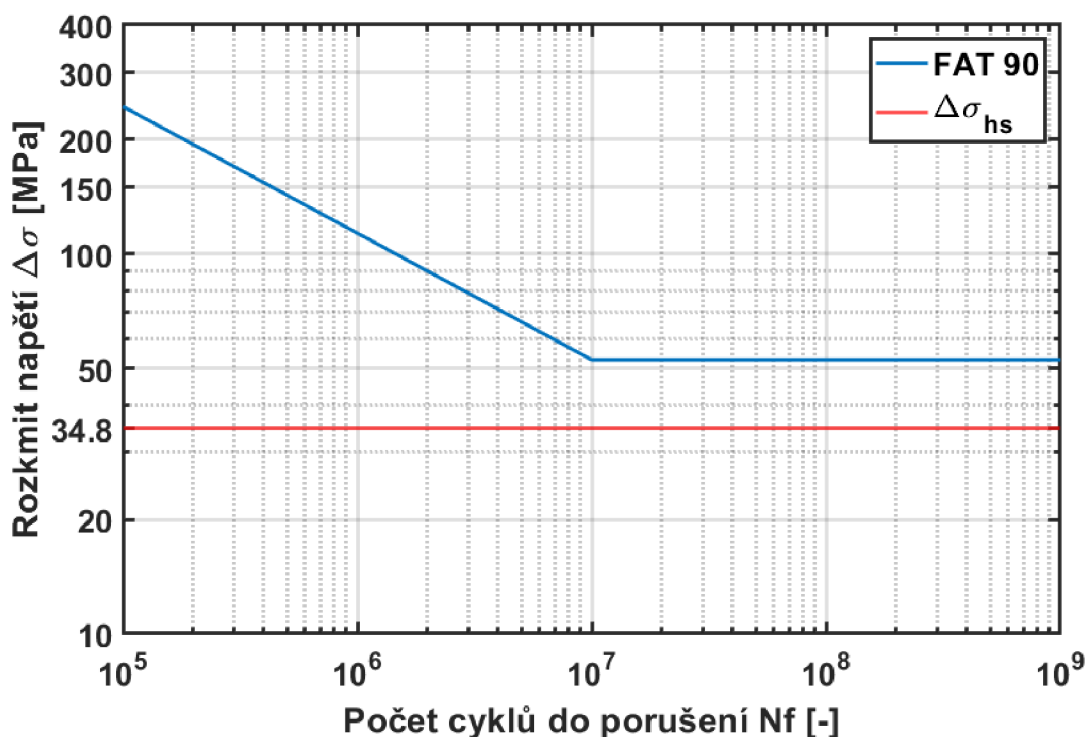
$$k_u = \frac{\sigma_{a,FAT}}{\sigma_{a,hs} \cdot \gamma_M} = \frac{45}{17,4 \cdot 1,3} = 1,99 \quad (4.10)$$

kde:

- k_u je součinitel bezpečnosti
- $\sigma_{a,FAT}$ je amplituda napětí zvolené FAT třídy, tzn. poloviční hodnota rozkmitu napětí
- $\sigma_{a,hs}$ je amplituda extrapolovaného tvarového napětí (hot spot stress)
- γ_M je koeficient bezpečnosti pro „mírné“ následky, který je roven 1,3

Pro určení životnosti svarového spoje je porovnávána S-N křivka odpovídající FAT třídě 90 a rozkmit extrapolovaného napětí $\Delta\sigma_{hs}$ (obr. 4.57). Rozkmit extrapolovaného napětí $\Delta\sigma_{hs}$ je určen jako:

$$\Delta\sigma_{hs} = \sigma_{hs,max} - \sigma_{hs,min} = 17,4 - (-17,4) = 34,8 \text{ MPa} \quad (4.11)$$



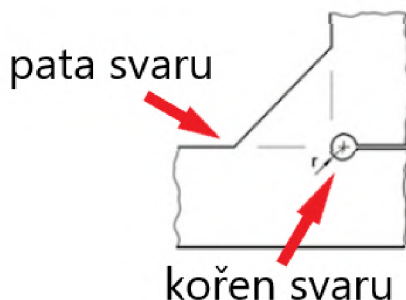
Obrázek 4.57: S-N křivka pro FAT třídu 90 s vyznačením rozkmitu napětí $\Delta\sigma_{hs}$

Z obrázku 4.57 je patrné, že není třeba provádět výpočet pro určení počtu cyklů do porušení, daný rozkmit napětí $\Delta\sigma_{hs}$ odpovídá neomezené životnosti.

4.5. VYHODNOCENÍ NÁSADY RÝPADLA VŮČI MEZNÍM STAVŮM

Metoda efektivního vrubového napětí

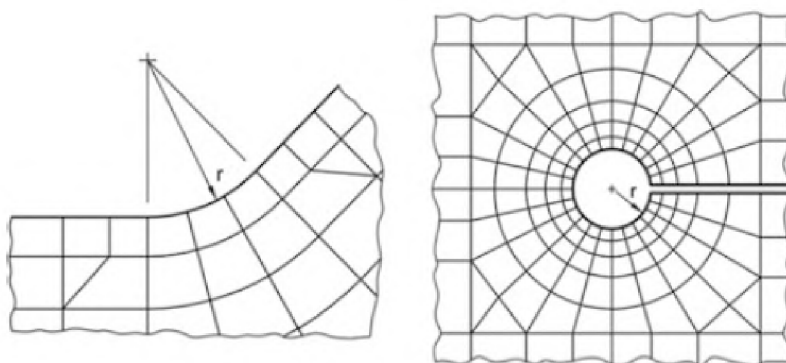
Pro ověření je únavová pevnost svarového spoje vyhodnocena i metodou efektivního vrubového napětí. Ta hodnotí svarový spoj na základě detailního modelu geometrie v oblasti paty a kořene svaru. Efektivní vrubové napětí je vyhodnocováno v patě a kořeni svaru (obr. 4.58), kde potenciálně může dojít ke vzniku trhliny a následnému poškození svaru.



Obrázek 4.58: Pata a kořen svaru, upraveno podle [27]

Metodu nelze použít, pokud je přítomna významná složka zatížení ve směru rovnoběžném se svarovým spojem. Dále je omezena tloušťkou spojovaného materiálu, použitelná je pouze pro tloušťky větší nebo rovny 5 mm (tloušťka plechu u svarového spoje v této práci je 6 mm).

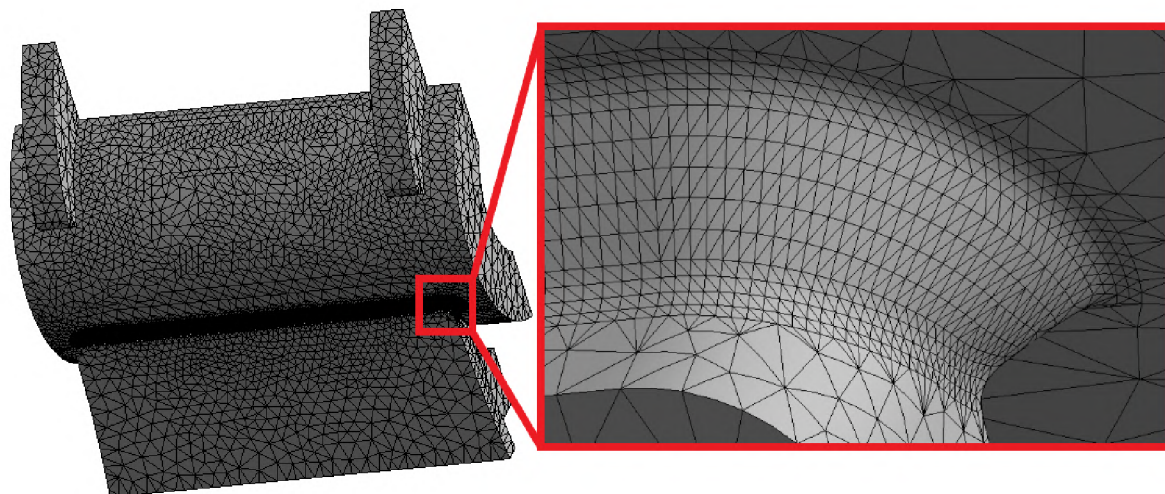
Pro oceli a hliníkové slitiny je experimentálně ověřeno, že zaoblení o velikosti poloměru $r = 1 \text{ mm}$ v místě paty nebo kořene dává konzistentní výsledky. Požadavky na síť konečných prvků se liší v závislosti na typu použitých prvků sítě. Pro lineární prvky je požadavek minimálně pět prvků na poloměru vrubu a u kvadratických minimálně tři prvky [27]. Ukázka sítě konečných prvků v oblasti paty a kořene svaru s poloměrem vrubu $r = 1 \text{ mm}$ je na následujícím obrázku.



Obrázek 4.59: Síť konečných prvků v oblasti paty (nalevo) a kořene svaru (napravo) [27]

Z informací o metodě uvedených výše je zřejmé, že submodel použitý u předchozí metody musí být upraven. V místě svaru je namodelován idealizovaný koutový svar o tloušťce 3 mm a v patě svaru je na doporučení podle IIW zaoblení o poloměru 1 mm. Jsou použity kvadratické prvky a v místě zaoblení vrubu v patě svaru se nachází čtyři prvky o velikosti 0,25 mm. Jedná se o koutový svar, který je plně provařený, a tím pádem je napětí

vyhodnoceno v místě paty svaru. Síť konečných prvků s detailem na jemnou síť v místě svarového spoje dle doporučení IIW je zobrazena níže.

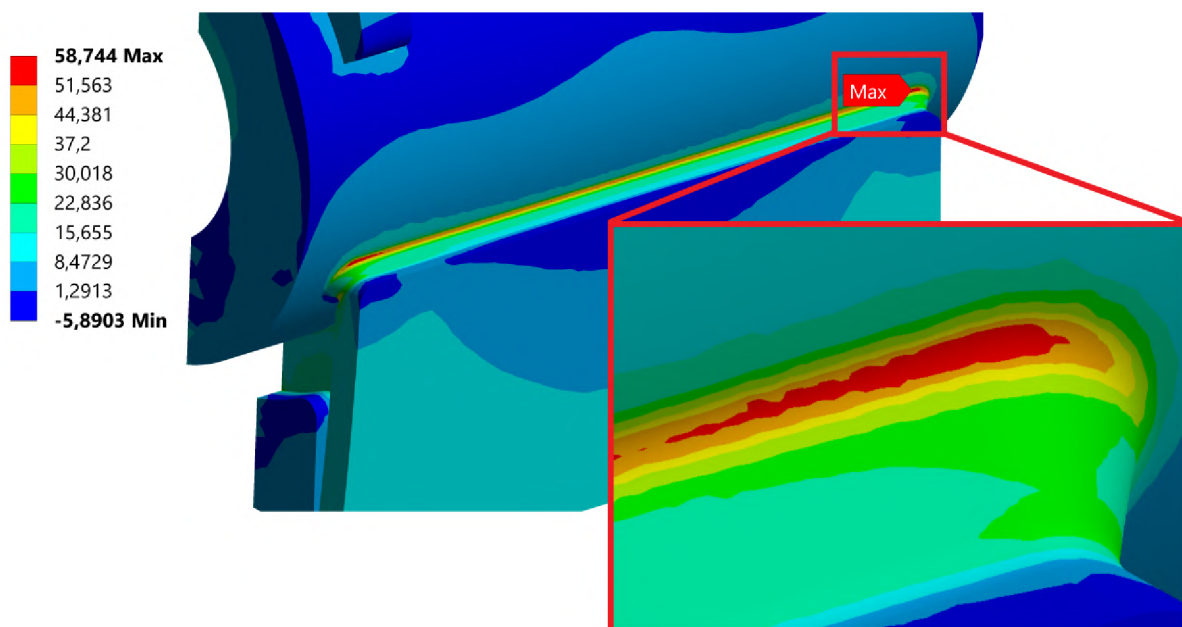


Obrázek 4.60: Síť konečných prvků submodelu s detailem na koutový svar

Na obr. 4.61 je zobrazena maximální hodnota prvního hlavního napětí σ_1 v průběhu simulovaného děje:

$$\sigma_{1,max} = 58,7 \text{ MPa} \quad (4.12)$$

První hlavní napětí σ_1 nabývá největší hodnoty v místě paty svaru na podobném místě jako v případě vyhodnocení pomocí metody extrapolovaného tvarového napětí (obr. 4.55).



Obrázek 4.61: Hodnoty hlavního napětí σ_1 s detailem na kritické místo

4.5. VYHODNOCENÍ NÁSADY RÝPADLA VŮČI MEZNÍM STAVŮM

U této metody je pro posouzení únavové pevnosti svarového spoje pro ocelové součásti k dispozici pouze FAT třída 225. Bezpečnost vůči MS únavové pevnosti je určena stejně jako u předchozí metody podle vztahu:

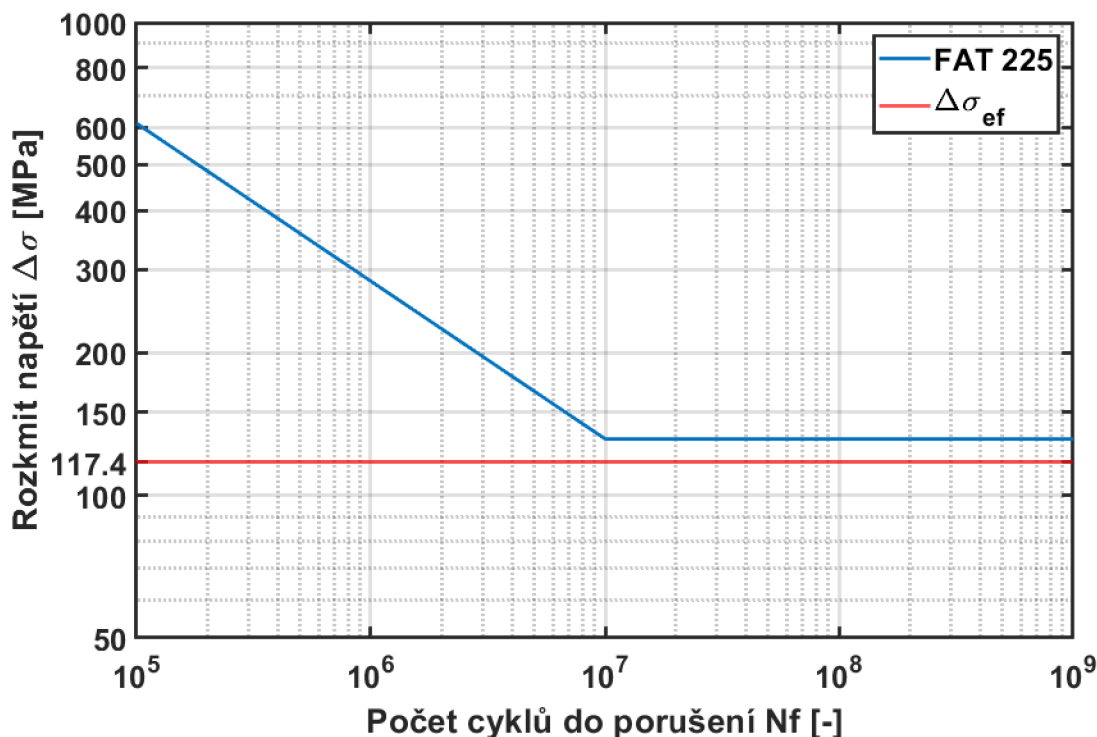
$$k_u = \frac{\sigma_{a,FAT}}{\sigma_{a,ef} \cdot \gamma_M} = \frac{112,5}{58,7 \cdot 1,3} = 1,47 \quad (4.13)$$

kde:

- k_u je součinitel bezpečnosti
- $\sigma_{a,FAT}$ je amplituda napětí zvolené FAT třídy, tzn. poloviční hodnota rozkmitu napětí
- $\sigma_{a,ef}$ je amplituda efektivního vrubového napětí
- γ_M je koeficient bezpečnosti pro „mírné“ následky, který je roven 1,3

Stejně jako u předchozí metody je i tady konzervativně uvažován souměrně střídavý cyklus napětí a rozkmit efektivního vrubového napětí $\Delta\sigma_{ef}$ je určen jako:

$$\Delta\sigma_{ef} = \sigma_{ef,max} - \sigma_{ef,min} = 58,7 - (-58,7) = 117,4 \text{ MPa} \quad (4.14)$$



Obrázek 4.62: S-N křivka pro FAT třídu 225 s vyznačením rozkmitu napětí $\Delta\sigma_{ef}$

Z obr. 4.62 je vidět, že i podle této metody vychází pro svarový spoj neomezená životnost.

5. Závěr

Předložená práce se zabývala výpočtovým modelováním nabírání zeminy pomocí kompaktního rýpadla od společnosti DOOSAN BOBCAT EMEA s.r.o. a jejím hlavním cílem byla tvorba výpočtových modelů v komerčních softwarech Rocky DEM a ANSYS Mechanical a jejich vzájemné propojení. Poté následovalo vyhodnocení vybrané konstrukční části vůči mezním stavům.

Hned v úvodu byly popsány základní části rýpadla a bylo upozorněno na fakt, že se nejedná o žádný konkrétní model rýpadla od firmy DOOSAN BOBCAT EMEA s.r.o., ale jde pouze o tzv. „dummy data“.

Rešeršní část se zabývala základním principem metody diskrétních prvků, která na ústavu mechaniky těles není v průběhu studia vyučována, ale bylo vhodné objasnit její podstatu pro lepší pochopení řešené problematiky. Zároveň byly tyto poznatky uplatněny i při tvorbě výpočtového modelu v prostředí Rocky DEM. Na konci této první části rešerše byly ještě uvedeny příklady použití metody DEM a výhody a nevýhody jejího zařazení do návrhového procesu strojních součástí.

Druhá část rešerše byla věnována prostředí Rocky DEM. Nejprve byla zmíněna kalibrační sada *Rocky Calibration suite*, která je dostupná pro všechny zákazníky Rocky DEM. Ta výrazně usnadňuje kalibrační proces, který je nezbytnou součástí pro přiblížení se reálnému chování zeminy a dosažení přesných výsledků. V této práci byl kalibrační proces z důvodu absence kalibračních testů reálné zeminy vynechán. Dále také kvůli tomu, že šlo spíše o ukázkou metodiky, jak zahrnout DEM do procesu vyhodnocení namáhání násady rýpadla, než o co nejvěrnější přiblížení se reálné zemině. Následně byly uvedeny modely kontaktních sil, které byly na základě technického manuálu pro Rocky DEM okomentovány.

V praktické části byl jako první vytvořen výpočtový model v prostředí Rocky DEM. Model geometrie, který poskytla firma DOOSAN BOBCAT EMEA s.r.o., byl doplněn o podvozek a opěry a pro potřeby simulace mohl být zjednodušen. Vstupní parametry pro DEM simulaci byly převzaty z odborného článku, který se zabýval opotřebením půdního rozrývače. Kromě doplněného modelu geometrie byly do simulace importovány i dva boxy, které určily oblasti, do kterých mají být částice reprezentující model zeminy generovány. Kinematický model byl vytvořen ze zjednodušených částí rýpadla a spojen pomocí tzv. *motion frames* - představujících styčnicků. Pohyb byl definován zadáním hodnot úhlových zrychlení do styčnicků. Z výsledků byly nejpodstatnější průběhy sil a průběhy momentů u styčnicku poblíž lžice rýpadla, které byly následně použity jako vstupní zatížení do styčnicku kinematického modelu v ANSYS Mechanical.

Abyste mohlo být zatížení přeneseno mezi jednotlivými kinematickými modely, bylo nutné nejdříve sladit jejich pohyby, aby byly totožné, což bylo provedeno díky analýze *rigid dynamics* pro dynamiku tuhých těles. V ANSYS Mechanical je možné zadat složitější pohyb než v Rocky DEM, a proto byl kinematický model doplněn o hydraulické válce s tyčemi a kloubový mechanismus u lžice rýpadla. Do styčnicků připraveného kinematického modelu v ANSYS Mechanical byly zadány stejné hodnoty úhlových zrychlení jako u simulace v Rocky DEM. Výsledkem analýzy bylo získání průběhů posuvů v jednotlivých válkách, které mohly být použity pro definování pohybu kinematického modelu u statické strukturální analýzy.

Po sjednocení pohybů mezi kinematickými modely byla dalším krokem statická strukturální analýza v ANSYS Mechanical. Do styčnicku kinematického modelu u lžice rýpadla

5.1. NÁMĚTY PRO DALŠÍ PRÁCI

byly aplikovány průběhy sil a průběh momentu, které byly získány z předchozí simulace v Rocky DEM a pohyb byl definován zadáním posuvů do jednotlivých válců získaných z analýzy *rigid dynamics*. Vzhledem k omezenému počtu prvků u studentské verze ANSYS Mechanical byla pro analýzu namáhání vybrána pouze násada ramene rýpadla. Sít konečných prvků tedy byla vytvořena pouze u násady rýpadla a ostatní tělesa byla nastavena jako tuhá.

Na modelu násady rýpadla byla po dokončení výpočtu určena čtyři kritická místa a za použití submodelingu byla vytvořena jemnější síť pro vyhodnocení hodnot napětí. Tato místa byla vyhodnocena vůči mezním stavům pružnosti a únavové pevnosti. Mezní stav pružnosti v žádném z těchto míst v průběhu simulace nenastal a vůči meznímu stavu únavové pevnosti bylo posouzeno pouze kritické místo č. 3, ve kterém docházelo k tahovému namáhání, a svarový spoj v oblasti kritického místa č. 4.

Kritické místo č. 3 bylo vyhodnoceno použitím nástroje *fatigue tool* a byla určena hodnota součinitele bezpečnosti vůči meznímu stavu únavové pevnosti. Svarový spoj v místě č. 4 byl posouzen na základě doporučení obsažených v dokumentu od IIW. Byly použity metody extrapolovaného tvarového napětí a efektivního vrubového napětí. Obě metody určily životnost svarového spoje jako neomezenou. Konzervativnější výsledek, co se týče hodnot součinitele bezpečnosti, přinesla metoda efektivního vrubového napětí.

Tato diplomová práce může sloužit jako ukázka metodiky, jakým způsobem postupovat při posuzování namáhání nějaké konstrukční součásti, která během své pracovní činnosti přichází do kontaktu se zeminou. Pro použití v praxi a pro posouzení konkrétního výrobku by musela být věnována větší pozornost kalibraci vstupních parametrů pro DEM simulaci. Tato kalibrace je pro přesnost výsledků a pro přiblížení se reálné zemině klíčová.

Nakonec lze konstatovat, že všechny cíle, které byly v úvodu práce formulovány, byly v plném rozsahu splněny.

5.1. Náměty pro další práci

V této práci bylo analyzováno namáhání násady rýpadla na základě jednoho typu „kopnutí“. Námětem k další práci by mohlo být zahrnutí více typů „kopnutí“ a zahrnutí proměnlivé velikosti částic, jelikož v reálném světě velikost částic není konstantní. Dále by bylo vhodné ověřit metodiku, která byla v této práci použita a porovnat výsledky s experimentálním měřením.

Literatura

- [1] ROCKY, E.S.S.S. Rocky DEM technical manual. 2020.
- [2] MATUTTIS, Hans-Georg a Jian CHEN. *Understanding the Discrete Element Method: Simulation of Non-Spherical Particles for Granular and Multi-body Systems* [online]. Wiley, 2014 [cit. 2021-5-20]. ISBN 978-1118567203. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/>
- [3] *Webinar: What is DEM?* [online]. ROCKY, E.S.S.S., 2021 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://rocky.esss.co/library/webinar-what-is-dem/>
- [4] *Bobcat CZ, a.s.* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.bobcat.cz/>
- [5] *SVS FEM s.r.o.* [online]. [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/>
- [6] HLOSTA, Jakub. *Vybrané aplikace modelování procesů mísení pomocí DEM simulací*. Ostrava, 2019. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava. Vedoucí práce Doc. Jan Nečas, Ph.D.
- [7] CUNDALL, P. A. a O. D. L. STRACK. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*. 1979, 29(1), 47-65. Dostupné z: doi:10.1680/geot.1979.29.1.47
- [8] JONÁK, M. *Optimalizace konstrukce korečkových dopravníků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 137 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.
- [9] ANTYPPOV, D. a J. A. ELLIOTT, On an analytical solution for the damped Hertzian spring. *EPL (Europhysics Letters)*, 2011, 94.5: 504.
- [10] WENSRICH, C.M. a A. KATTERFELD. Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM. *Powder Technology* [online]. 2012, 217, 409-417 [cit. 2021-4-15]. ISSN 0032-5910. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S00325910111006000>
- [11] *Discrete element method (DEM): Basic theory and utility* [online]. ROCKY, E.S.S.S., 2021 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://rocky.esss.co/typ/164b1d44dd394e3939cb215aba4e07fb/>
- [12] COETZEE, C.J. a D.N.J. ELS. The numerical modelling of excavator bucket filling using DEM. *Journal of Terramechanics* [online]. 2009, (5), 217-227 [cit. 2021-04-04]. ISSN 0022-4898. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jterra.2009.05.003>
- [13] WENSRICH, C.M. a A. KATTERFELD. The discrete element method for the simulation of ball mills. *Applied Mathematical Modelling* [online]. 1992, 16(11), 598-604 [cit. 2021-4-20]. ISSN 0307-904X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0307904X92900352>
- [14] BRAVO, Elvis López, et al. Prediction model for non-inversion soil tillage implemented on discrete element method. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2014, 106, 120-127 [cit. 2021-4-21]. ISSN 0168-1699. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169914001306>

LITERATURA

- [15] TSUNAZAWA, Yuki, et al. Numerical simulation of industrial die filling using the discrete element method. *Chemical Engineering Science* [online]. 2015, 138, 791-809 [cit. 2021-4-15]. ISSN 0009-2509. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250915006363>
- [16] WANG, Xuezheng, et al. Effect of soil particle size on soil-subsoiler interactions using the discrete element method simulations. *Biosystems Engineering* [online]. 2019, 182, 138-150 [cit. 2021-4-15]. ISSN 1537-5110. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511019300820>
- [17] UCGUL, Mustafa, Ch. Saunders, J. M.Fielke. Discrete element modelling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field conditions. *Biosystems Engineering* [online]. 2017, 160, 140-153 [cit. 2021-4-10]. ISSN 1537-5110. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511017302209>
- [18] Discrete Element Method (DEM) Course Module. *PharmaHUB* [online]. 2008 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://pharmahub.org/resources/113>
- [19] *Tavares Breakage Model in Rocky DEM* [online]. ROCKY, E.S.S.S., 2021 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://rocky.esss.co/blog/tavares-breakage-model-in-rocky-dem/>
- [20] ARCHARD, J.F. *Wear Control Handbook: Wear Theory and Mechanisms*. New York: American Society Of Mechanical Engineers, 1981, s. 35-80. ISBN 978-0317336405.
- [21] Sypný úhel. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sypný_úhel
- [22] DOSTÁLOVÁ, Eliška. *Studium sypných a konsolidačních vlastností velikostních frakcí bezvodé laktosy*. Hradec Králové, 2018. Rigorózní práce. Univerzita Karlova, Farmaceutická fakulta v Hradci Králové, Katedra farmaceutické technologie. Vedoucí práce Šklubalová, Zdeňka.
- [23] ZUBEK, P. *Sypné vlastnosti jemných práškovitých materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 88 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Tomáš Svěrák, CSc.
- [24] KATINAS, Egidijus, et al. Wear modelling of soil ripper tine in sand and sandy clay by discrete element method. *Biosystems Engineering* [online]. 2019, 188, 305-319 [cit. 2021-4-5]. ISSN 1537-5110. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511019308694>
- [25] *DEM-FEA: realistic representations of granular materials loads on equipment*. [online]. ROCKY,ESSS, 2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://rocky.esss.co/blog/why-use-dem-fea/>
- [26] *Ansys Help* [online]. ANSYS, Inc., 2021 [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://ansyshelp.ansys.com>

- [27] HOBACHER, A. F. *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. Second edition. Springer International Publishing Switzerland, 2016. ISBN 978-3-319-23757-2.
- [28] VLK, Miloš. *Dynamická pevnost a životnost*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1992. ISBN 80-214-0427-2
- [29] AYGÜL, MUSTAFA. *Fatigue Analysis of Welded Structures Using the Finite Element Method* [online]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2012 [cit. 2021-05-10]. ISSN 1652-9146. Dostupné z: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/155710.pdf>

Seznam obrázků

1.1	Kompaktní rýpadlo, ilustrační obrázek [4]	4
3.1	Počet publikací na téma DEM mezi lety 2001 - 2017 [6]	6
3.2	Kolize částice s tuhou podložkou (částice se vlivem nárazu na tuhou podložku deformuje, nalevo) a simulace této kolize pomocí MKP (deformovatelná částice s jemnou sítí v místě kontaktu, pro který byl použit jiný než pokutový přístup, uprostřed) a DEM (penetrace částice do podložky, napravo), upraveno podle [2]	7
3.3	Vývojový diagram algoritmu DEM, kde F je síla, m je hmotnost, t je čas, v je rychlost a x je pozice, upraveno podle [1]	8
3.4	Rýpadla a sklápěče [11]	11
3.5	Potahování tablet a mísení [11]	11
3.6	Měření statického sypného úhlu pomocí válce	13
3.7	Výstupní graf z testu - hodnota statického sypného úhlu (AOR = angle of repose)	13
3.8	Definice normálového a tečného směru pro kontakt dvou částic ve 2D, upraveno podle [2]	15
3.9	Závislost síly na přesahu u modelu <i>Hysteretic linear spring</i>	16
3.10	Závislost mezi poměrem tlumení η a koeficientem restituce ε	18
3.11	Závislost síly na přesahu pro různé hodnoty parametru <i>stiffness fraction</i>	21
3.12	Schéma mechanismů valivého tření, převzato z [6]	22
3.13	Tavaresův model porušení [19]	22
3.14	DEM-FEM propojení - kolesové rýpadlo [11]	23
3.15	Vedení tepla v rotačním bubnu [11]	23
3.16	Opotřeбенí vložky kulového mlýnu [11]	24
3.17	Příklady různých tvarů částic v Rocky DEM [11]	24
4.1	Poskytnutý model geometrie od firmy DOOSAN BOBCAT	25
4.2	Plošková reprezentace lžice rýpadla	26
4.3	Model geometrie pro simulaci v Rocky DEM	27
4.4	Stromová struktura v prostředí Rocky DEM	29
4.5	Normálové napětí na lžici rýpadla od působení částic	29
4.6	Jednotlivá tělesa v simulaci	30
4.7	Hmotnost, souřadnice těžiště a momenty setrvačnosti těla rýpadla v prostředí Rocky DEM	30
4.8	Schéma <i>motion frames</i> v prostředí Rocky DEM	31
4.9	Hierarchie <i>motion frames</i> v prostředí Rocky DEM	31
4.10	SpaceClaim - souřadnice <i>motion frames</i>	32
4.11	Průběhy úhlových zrychlení jednotlivých styčníků	33
4.12	Částice vygenerované v připravených boxech	34
4.13	Simulace nabírání zeminy	35
4.14	Simulace nabírání zeminy - začátek simulace (čas 0 s)	36
4.15	Simulace nabírání zeminy - konec simulace (čas 6 s)	36
4.16	Simulace nabírání zeminy - detail	37
4.17	Průběhy sil ve styčniku č.3	37
4.18	Průběhy momentů ve styčniku č.3	38
4.19	Rýpadlo před „dosednutím“ (nalevo) a po „dosednutí“ (napravo)	38

4.20	Nalevo je časový okamžik 2,3 s, kdy převažují síly působící na vnější stranu lžice a vytváří záporný moment M_z a napravo časový okamžik 2,7 s, kdy již převažují síly působící na vnitřní stranu lžice a moment M_z je již kladný	39
4.21	Propojení s Rocky DEM v prostředí ANSYS Workbench [25]	40
4.22	Naznačení přenosu zatížení mezi styčníky kinematického modelu v Rocky DEM (nalevo) a kinematického modelu v ANSYS Mechanical (napravo)	41
4.23	Wöhlerova křivka únavy	43
4.24	Model geometrie v ANSYS SpaceClaim	43
4.25	Prvek SOLID187 [26]	44
4.26	Sít konečných prvků v ANSYS Mechanical	44
4.27	Zavazbení jednotlivých částí rýpadla	45
4.28	Rotální vazba mezi tělem rýpadla a výložníkem	45
4.29	Zrychlení zadaná do styčniců v <i>Rigid dynamics</i>	46
4.30	Průběhy posuvů v hydraulických válcích v čase	47
4.31	Průběhy sil a momentu vložené do styčniců u lopaty rýpadla v ANSYS Mechanical	48
4.32	Okrajové podmínky	49
4.33	Porovnání simulací v ANSYS Mechanical (redukované napětí von-Mises, nalevo) a Rocky DEM (napravo) pro časový okamžik 3,74 s	50
4.34	Průběh maximálních hodnot redukovaného napětí von-Mises s vyznačením časového okamžiku 3,74 sekund, kdy redukované napětí nabývá maximální hodnoty	50
4.35	Redukované napětí von-Mises s vyznačením kritických míst	51
4.36	Redukované napětí von-Mises s vyznačením kritických míst - detail	51
4.37	Zatížení a síť konečných prvků, kritické místo č.1	53
4.38	Redukované napětí von-Mises, kritické místo č.1	53
4.39	Zatížení a síť konečných prvků, kritické místo č.2	54
4.40	Redukované napětí von-Mises, kritické místo č.2	54
4.41	Zatížení a síť konečných prvků, kritické místo č.3	55
4.42	Redukované napětí von-Mises, kritické místo č.3	55
4.43	Hodnoty hlavního napětí σ_3 , nalevo kritické místo č.1 a napravo č.2	56
4.44	Hodnoty <i>biaxility indication</i> , kritické místo č.3	57
4.45	S-N křivka s vyznačenými body	58
4.46	Průběhy hlavních napětí ve vyšetřovaném místě, červeně jsou vyznačeny hodnoty maximálního a minimálního napětí	58
4.47	Nastavení <i>fatigue tool</i> (nalevo) a naznačení zátěžného cyklu (napravo)	59
4.48	Ekvivalentní amplituda napětí σ'_a	60
4.49	Bezpečnost vůči MS únavové pevnosti	60
4.50	Průběh napětí k patě svaru, upraveno podle [29]	61
4.51	Extrapolované body napětí, hodnocení typu a) [27]	62
4.52	Extrapolované body napětí, hodnocení typu b) [27]	62
4.53	Zatížení a síť konečných prvků submodelu svarového spoje	62
4.54	Hodnoty hlavního napětí σ_1	63
4.55	Vykreslení hlavního napětí σ_1 po cestě a naznačení cesty pro odečtení napětí	63
4.56	Průběh hlavního napětí σ_1 od místa spoje, vyznačeny jsou hodnoty hlavního napětí σ_1 v referenčních bodech	64
4.57	S-N křivka pro FAT třídu 90 s vyznačením rozkmitu napětí $\Delta\sigma_{hs}$	65

SEZNAM OBRÁZKŮ

4.58	Pata a kořen svaru, upraveno podle [27]	66
4.59	Sít konečných prvků v oblasti paty (nalevo) a kořene svaru (napravo) [27] .	66
4.60	Sít konečných prvků submodelu s detailem na koutový svar	67
4.61	Hodnoty hlavního napětí σ_1 s detailem na kritické místo	67
4.62	S-N křivka pro FAT třídu 225 s vyznačením rozkmitu napětí $\Delta\sigma_{ef}$	68

Seznam tabulek

3.1	Přehled kalibračních testů v <i>Calibration suite</i> , převzato z [5]	14
4.1	DEM parametry použité v simulaci	28
4.2	Pohyb těžiště rýpadla	32
4.3	Pohyb styčnicku č.1	33
4.4	Pohyb styčnicku č.2	33
4.5	Pohyb styčnicku č.3	33
4.6	Materiálové charakteristiky	42
4.7	Bezpečnost vůči MS pružnosti	56
4.8	Hodnoty hlavních napětí v referenčních bodech	64
4.9	Svarový detail, upraveno podle [27]	64

Seznam použitých zkratek

DEM	discrete element method (metoda diskrétních prvků)
MKP	metoda konečných prvků
FEM	finite element method (metoda konečných prvků)
CFD	computer fluid dynamics (počítačová mechanika tekutin)
AOR	angle of repose (sypný úhel)
STL	stereolitografie
IIW	International Institute of Welding (mezinárodní institut svařování)
MS	mezní stav