



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ZAŘÍZENÍ PRO ZÁSYP ODPICHOVÉHO OTVORU OBLOUKOVÉ PECE

DEVICE FOR FILLING TAP HOLE OF ARC FURNACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUKÁŠ JUDA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MALÁŠEK, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Juda

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zařízení pro zásyp odpichového otvoru obloukové pece

v anglickém jazyce:

Device for filling tap hole of arc furnace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proved'te návrh zařízení pro zásyp odpichového otvoru elektrické obloukové pece s excentrickým odpichovým otvorem. Zařízení musí umožňovat kontrolu průchodnosti odpichového otvoru, která bude prováděna vždy před zasypáním otvoru. Zadané technické parametry:

maximální výška zařízení: 1500 mm,

hloubka pece v místě odpichového otvoru: 1985 mm,

průměr odpichového otvoru min/max: 190 mm/250 mm,

hloubka odpichového otvoru: 1085 mm.

Cíle diplomové práce:

Vypracování technické zprávy obsahující řešerši i vhodné koncepce při výběru řešení, volbu návrhových výpočtů pro technologickou funkci zařízení, výpočtové návrhy jednotlivých komponentů zařízení.

Výkresovou dokumentaci obsahující celkovou sestavu zařízení pro zásyp odpichového otvoru obloukové pece, vybrané další výkresy podstatné pro funkci a konstrukci zařízení.

Seznam odborné literatury:

1. SHIGLEY, J.E. - MISCHKE, Ch.R. - BUDYNAS R.G.: Konstruování strojních součástí Vydalo VUT v Brně, nakladatelství VUTIUM 2010, ISBN 978-80-214-2629-0
2. MILLS, David. Pneumatic conveying design guide. 2nd ed. Oxford Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2004. ISBN 07-506-5471-6
3. V. Šmilauer, E. Catalano, B. Chareyre, S. Dorofeenko, J. Duriez, A. Gladky, J. Kozicki, C. Modenese, L. Scholt

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 20.11.2014

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

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



ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem a ověřením funkce zařízení pro zásyp odpichového otvoru elektrické obloukové pece s průměrem odpichového otvoru od 190 mm do 250 mm. Práce obsahuje základní návrhový výpočet pohonu kyvného pohybu skluzu a kontrolní výpočty ložisek. Další část práce se zabývá ověřením funkce zařízení, které je doplněno o popis postupu vytváření DEM simulace v programu YADE. V práci jsou také zahrnuty základní experimenty pro určení úhlu vnitřního tření, sypného úhlu, koeficientu restituace a úhlu tření materiálu o ocelovou podložku. Výkresová dokumentace vybraných konstrukčních celků je součástí práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektrická oblouková pec, odpichový otvor, úhel vnitřního tření, sypný úhel, koeficient restituace, DEM simulace, metoda diskrétních prvků, YADE

ABSTRACT

Diploma thesis describes design and function verification of device for filling tap hole of electric arc furnace with tap hole diameter from 190 mm to 250 mm. The theses includes drive design calculation of chute swinging movement and bearing calculations. Another part of the thesis deals with verification of device functions which it is completed with process description of creating DEM simulation in program YADE. The thesis also includes basic experiments for determination angle of internal friction, angle of repose, coefficient of restitution and angle of material friction on a steel surface. Drawing documentation of selected assemblies is part of the thesis.

KEYWORDS

electric arc furnace, tap hole, angle of internal friction, angle of repose, coefficient of restitution, DEM simulation, discrete element method, YADE



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JUDA, L. *Zařízení pro zásyp odpichového otvoru obloukové pece*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 79 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D..



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Maláška, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 29. května 2015

.....

Lukáš Juda



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Martinu Jonákovi za ochotu, odborné rady a pomoc při sestavování simulace v programu YADE. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jaroslavu Brhelovi a Ing. Aleši Koskovi za poskytnuté odborné informace, cenné rady a připomínky při zpracovávání této diplomové práce.



OBSAH

Úvod	11
1 Zařízení pro zásyp odpichového otvoru	12
1.1 FUCHS Technology	13
1.2 CHL Systems	14
1.3 Nucor Corporation	14
1.4 MORE	15
2 Návrh vlastní koncepce zařízení pro zásyp odpichového otvoru EAF	17
2.1 Definice cílů práce a požadavků na zařízení	17
2.2 Návrhové varianty	18
2.2.1 Varianta A	18
2.2.2 Varianta B	19
2.2.3 Varianta C	20
2.3 Zhodnocení jednotlivých variant	20
2.3.1 Zhodnocení finančních nákladů	21
2.3.2 Zhodnocení nevyčíslitelných účinků	21
2.4 Nejvhodnější návrhová varianta	23
3 Materiál pro zásyp odpichového otvoru	24
3.1 Stanovení sypného úhlu materiálu	25
3.2 Stanovení úhlu tření mezi materiálem a ocelí	27
3.3 Stanovení úhlu vnitřního tření materiálu	28
4 Předběžný návrh a výběr součástí zařízení	32
4.1 Uzavírací ventil zásobníku	32
4.2 Návrh rozměrů zásobníku zařízení	32
4.3 Kamerová jednotka	34
4.4 Prorážecí	35
4.4.1 Výběr přímočarého pneumatického motoru	35
4.4.2 Návrhová podoba prorážecího trnu	36
4.4.3 Určení celkové hmotnosti a momentu setrvačnosti prorážecí	36
4.5 Pohon pro pohyb skluzu	37
4.5.1 Určení ekvivalentního momentu setrvačnosti	38
4.5.2 Určení potřebného krouticího momentu pohonu	39
4.5.3 Výběr rotačního kyvného pohonu	40
4.6 Základní podoba navrženého zařízení	41
5 Ověření chování materiálu při procesu zasypání	42
5.1 Základní popis simulačního programu YADE	42



5.1.1	Struktura zdrojového kódu simulace	42
5.2	Určení vstupů simulace.....	43
5.2.1	Náhrada reálného tvaru zrn materiálu pro simulaci.....	43
5.2.2	Funkční geometrie zařízení	44
5.2.3	Materiálové vlastnosti pro funkční geometrii a pro zrna materiálu.....	46
5.3	Sestavení iteračního řešícího enginu.....	48
5.3.1	Funkce Ig2	48
5.3.2	Funkce Ip2	49
5.3.3	Funkce Law2	49
5.4	Stanovení koeficientu restituce	49
5.4.1	Koeficient restituce pro kontakt olivínu s ocelí.....	50
5.4.2	Koeficient restituce pro kontakt olivínu s olivínem	52
5.5	Porovnání metod omezení rotace pro materiálový model FrictMat	52
5.6	Validace materiálových vlastností olivínu.....	53
5.6.1	Ověření sypného úhlu materiálu.....	53
5.6.2	Ověření úhlu tření mezi olivínem a ocelí	54
5.6.3	Ověření odskoku částice materiálu od ocelové podložky	54
6	Simulace procesu zasypání odpichového otvoru s využitím programu YADE	57
6.1	Základní simulace sypání olivínu - pro 10 kg olivínu	57
6.2	Rozvaha nad možnými úprava geometrie skluzu	59
6.2.1	Maximální výška skluzu.....	59
6.2.2	Omezení dle řešení pohonu kyvného pohybu skluzu	60
7	Úpravy geometrie skluzu a ověření těchto úprav pomocí programu YADE	61
7.1	Varianta I	61
7.1.1	Ověření varianty I.....	61
7.2	Varianta II.....	63
7.2.1	Ověření varianty II.....	63
7.3	Vybraná varianta tvaru geometrie skluzu pro následné konstrukční řešení	64
8	Detailní konstrukční řešení zařízení pro zásyp odpichového otvoru.....	66
8.1	Otočné uložení skluzu.....	66
8.1.1	Navržené konstrukční řešení otočného uložení skluzu.....	67
8.1.2	Analýza možných zatížení působících na kluzná ložiska.....	67
8.1.3	Maximální síla v radiálních ložiscích.....	68
8.1.4	Maximální síla působící v axiálním ložisku.....	70
8.1.5	Kontrola radiálních kluzných ložisek	71
8.1.6	Kontrola axiálního kluzného ložiska	71



Závěr	73
Seznam použitých zkratek a symbolů	76
Seznam příloh	79



ÚVOD

Už od počátku lidské civilizace se člověk snaží zpracovávat nerostné suroviny a přetvářet je v předměty a nástroje, které mu následně usnadňují každodenní činnosti a zpracování dalších surovin. Pro výrobu těchto nástrojů a předmětů se v dnešní době používá široká škála konstrukčních materiálů (kovového i nekovového charakteru) od nejdéle používaného kamene a dřeva až po dnes hojně používané plasty, oceli (litiny), slitiny neželezných kovů, keramické materiály a kompozity. V oblasti strojírenské výroby má v dnešní době stále nezastupitelné postavení ocel a litina a to především díky svojí nízké ceně, širokému rozsahu mechanických vlastností a možnostem následného zpracování (obrábění, tváření, svařování).

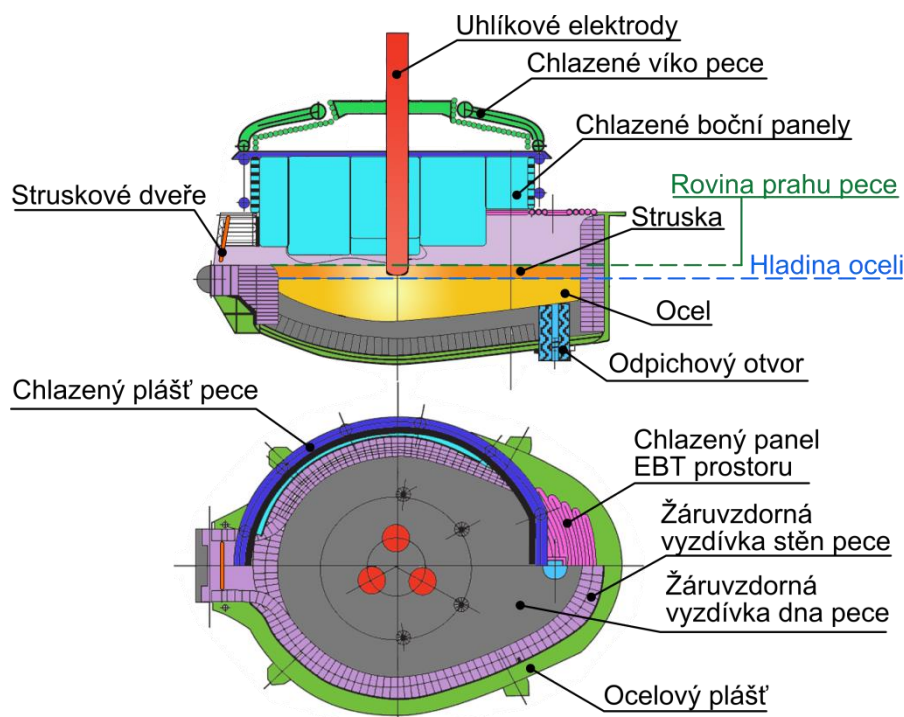
Hlavní surovinou pro výrobu oceli je surové železo a ocelový odpad. Surové železo se vyrábí ve vysokých pecích z železných rud (magnetit Fe_3O_4 , hematit FeO , limonit Fe_2O_3 , siderit FeCO_3), metalurgického koksu, struskotvorných látek (CaCO_3) a vzduchu. Ocel se následně vyrábí v kyslíkových konvertorech (v angličtině Basic oxygen furnace – BOF), elektrických obloukových pecích (v angličtině electric arc furnace – EAF) a indukčních pecích. Při úpravách a zdokonalování výrobního procesu oceli je snaha o co nejvyšší úroveň automatizace celého procesu. Této úrovni je dosahováno pomocí vhodně navržených zařízení, přípravků a strojů, které nahrazují daný pracovní úkon pracovníka – příkladem těchto zařízení jsou například vzorkovací manipulátory, zařízení pro injektáž kyslíku a uhlíku do oceli, zasýpací zařízení pro odpichový otvor, zařízení pro čištění odpichového otvoru. Cílem automatizace je tedy dosažení výrobního procesu s vysokou mírou efektivity a produktivity, s vysokou přesností výsledného chemického složení vyrobené oceli a s minimálními nároky na obsluhu a přítomnost pracovníků v nebezpečném prostoru v okolí pece (konvertoru), kde hrozí nebezpečí úrazu.

Při návrhu zařízení pro metalurgický průmysl je kladen důraz na vysokou spolehlivost zařízení z důvodu provozu zařízení v nepřetržitém provozu – 24 hodin 7 dní v týdnu. Dalším důležitým aspektem je poměr mezi pořizovací cenou a užitnými vlastnostmi $\Rightarrow$ zařízení musí splnit daný účel při přijatelné ceně, tak aby bylo zařízení konkurenceschopné. Při návrhu je také třeba myslet na provozní prostředí, v kterém zařízení bude pracovat, jelikož se jedná o prostředí s velkým výskytem prachu, zvýšených teplot a s možností odstříku roztavené strusky či oceli na zařízení. Pokud bude zařízení umístěno v těsné blízkosti pece, je navíc nutné zařízení vhodně chránit proti možnostem pádu částí vsázky (částí železného šrotu) na zařízení.



1 ZAŘÍZENÍ PRO ZÁSYP ODPICHOVÉHO OTVORU

Odpichový otvor pece je místo (otvor) sloužící k odpichu („vypuštění“) vyrobené oceli do předeřtáté lící pánve. Tento otvor se v případě elektrických obloukových pecí s excentrickým odpichovým otvorem nachází ve dně excentrické části a prochází skrz žáruvzdornou vyzdívku dna pece a skrz ocelový plášť pece. Otvor je během tavby uzavřen, aby nedocházelo k úniku oceli tímto otvorem. Volný objem v odpichovém otvoru nad uzavíracím šoupětem se následně před začátkem tavby vyplňuje vhodným sypkým žáruvzdorným materiálem, tak aby nedocházelo během tavby k zatékání oceli do odpichového otvoru, jejímu chladnutí a následnému ucpání odpichového otvoru ztuhlou ocelí. Sypký žáruvzdorný materiál se do volného objemu odpichového otvoru sype přes otvor v chladícím panelu excentrického prostoru obloukové pece (nazýváno také EBT prostor – zkratka vychází z anglického spojení eccentric bottom tap-hole). [1]



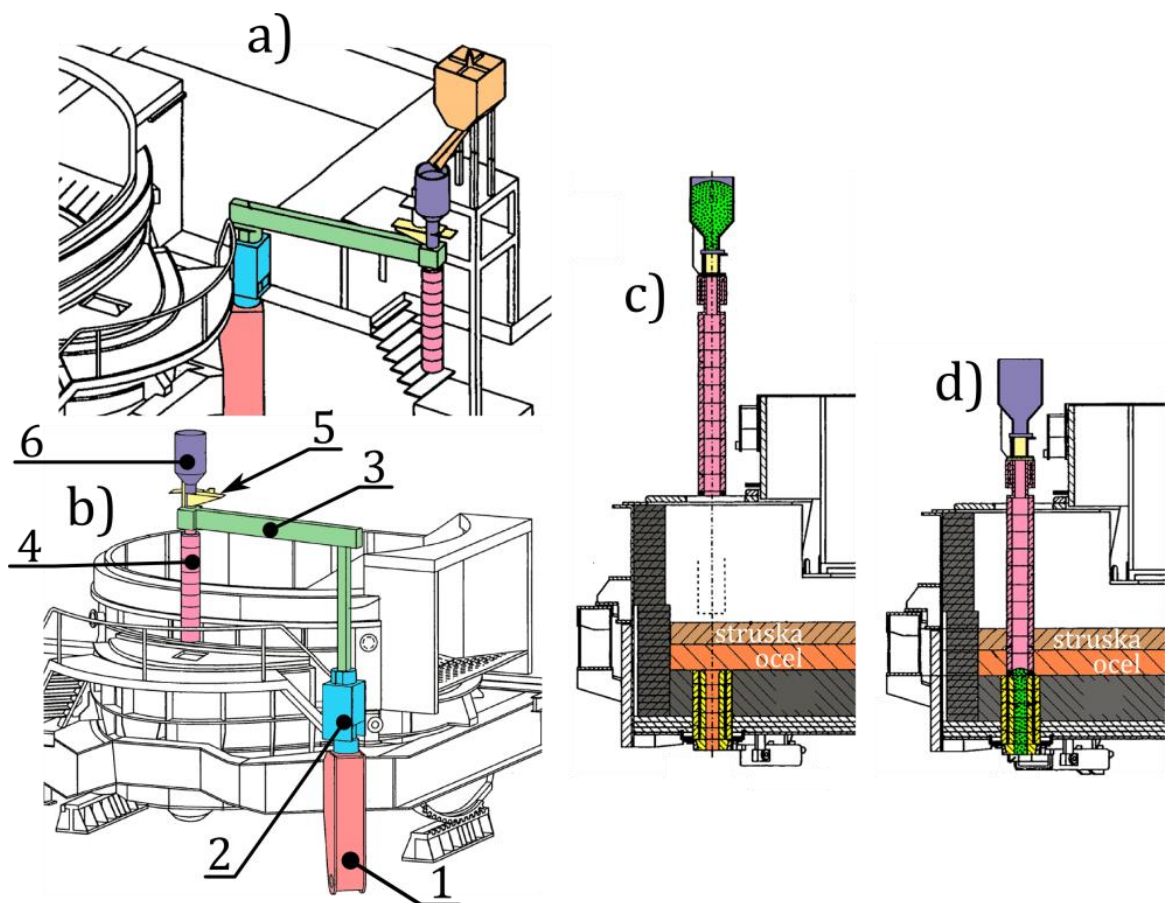
Obr. 1-1 Základní popis elektrické obloukové pece [1, s. 528]

Předchůdci zařízení pro zásyp odpichového otvoru měli nejčastěji podobu samotných malých zásobníků, nebo zásobníků doplněných o pohyblivý skluz. Zásobníky byly uloženy na otočných ramenech nebo napevno uchyceny k rámu pece. Tato „zařízení“ byla ovládána manuálně a pracovník se při zasypacím procesu musel pohybovat po chladícím panelu excentrické části obloukové pece – manuální obsluha obnášela např. otevření poklopu otvoru v chladícím panelu, zkontrolování průchodnosti odpichového otvoru, otočení zásobníku, či skluzu do polohy nad odpichový otvor a otvor v chladícím panelu, atd. => významné riziko vzniku úrazu pracovníka a nutnost použití většího množství materiálu pro zasypání odpichového otvoru z důvodu nepřesného umístění skluzu či zásobníku nad odpichovým otvorem. V posledních letech se proces zásypu začíná postupně automatizovat, čímž dochází ke snížení spotřeby zásypového materiálu, zkrácení délky celého procesu zásypu a zároveň hlavně k odstranění potenciálního rizika vzniku pracovního úrazu => postupný vývoj zařízení pro zásyp odpichového otvoru s různou konstrukcí a výbavou.



1.1 FUCHS TECHNOLOGY

Jedná se o zařízení, které slouží k dočasnému utěsnění odpichového otvoru a jeho zasypání žáruvzdorným sypkým materiálem. Funkce utěsnění odpichového otvoru slouží k možnosti přerušení odpichu oceli a zabezpečení toho, že dojde k odpichu pouze samotné oceli s minimální přítomností strusky. Toto zařízení je zobrazené na Obr.1-2. Patentová přihláška byla podána firmou FUCHS TECHNOLOGY v roce 2010. Zařízení se skládá z hlavního rámu (Obr.1-2 poz.1), zdvihacího mechanismu (Obr.1-2 poz.2), otočného ramene (Obr.1-2 poz.3), zásobníku (Obr.1-2 poz.6), uzavíracího zařízení zásobníku (Obr.1-2 poz.5) a z těsnící a plnicí trubky (Obr.1-2 poz.4). Hlavní rám je uchycen ke konstrukci haly. Základní parkovací pozice zařízení je zobrazena na Obr.1-2a, kde je světle oranžovou barvou vyznačen další zásobník pro plnění zásobníku zařízení. Přesun zásobníku a těsnící, plnicí trubky do pracovní pozice se děje rotací otočného ramene nad odpichový otvor s následným spuštěním ramene do pece přes otvor v chladicím panelu EBT prostoru. [2]



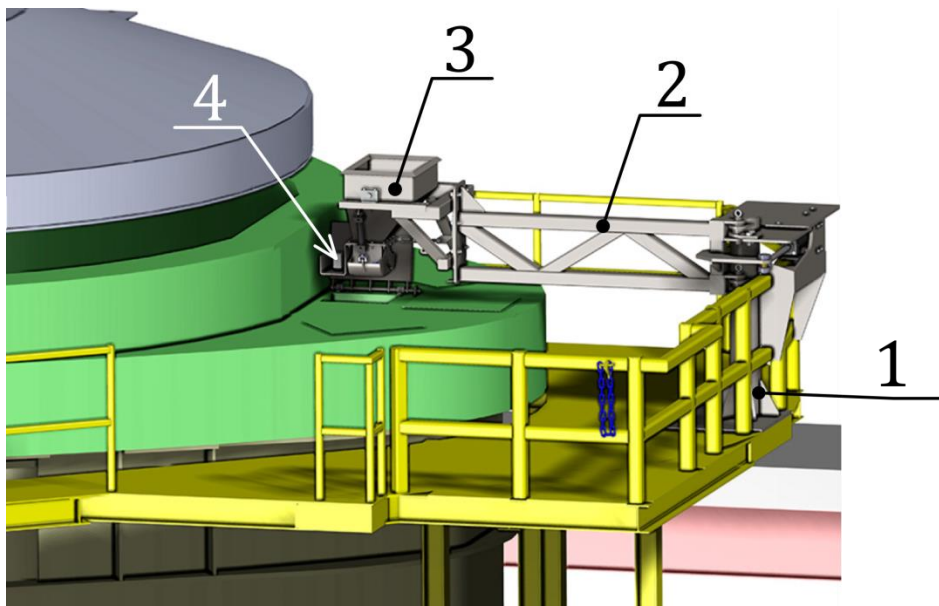
Obr.1-2 Zařízení pro zásyp odpichového otvoru od výrobce FUCHS Technology [2]

Výhodou tohoto zařízení je možnost kdykoliv přerušit odpich oceli a také jistota, že materiál určený k zasypání bude vždy umístěn přímo do odpichového otvoru. Nevýhodou jsou velké rozměry zařízení, z toho vyplývající velká hmotnost, velký pracovní prostor a opotřebení materiálu plnicí, těsnící trubky vlivem působení vysokých teplot a kontaktu s roztavenou ocelí.



1.2 CHL SYSTEMS

Zařízení od výrobce CHL Systems umožňuje kontrolu průchodnosti odpichového otvoru a následné zasypání odpichového otvoru. Zařízení může být uchyceno k plošině elektrické obloukové pece, nebo k plošině, která je součástí haly. Zařízení se skládá z pevného sloupu (Obr.1-3 poz.1), ke kterému je uchyceno rameno (Obr.1-3 poz.2), které vykonává kývavý pohyb z parkovací polohy do polohy pracovní. Tento pohyb je řízen přímočarým hydromotorem. Na konci ramene se nachází zásobník (Obr.1-3 poz.3) s uzavíracím mechanismem a kontrolním zařízením (Obr.1-3 poz.4), které se skládá z ochranného pouzdra a kamery. Součástí systému zásypu odpichového otvoru je také odklápěcí víko, které zakrývá otvor v chladícím panelu EBT prostoru.



Obr.1-3 Zařízení pro zásyp odpichového otvoru od výrobce CHL Systems [3]

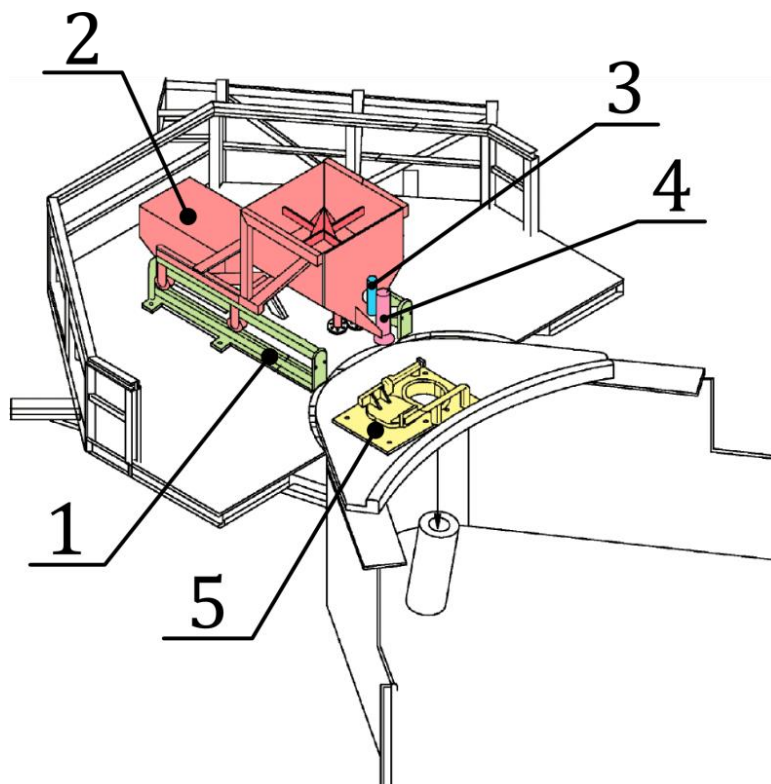
Mezi nevýhody lze zařadit chybějící zařízení pro čištění otvoru v EBT panelu (dále nazývané jako prorážecí), jelikož může docházet ke vzniku slabé struskové skořepiny v otvoru, kterou je třeba prolomit (prorazit), aby bylo možné provést zasypání odpichového otvoru. Další nevýhodou je velký pracovní prostor, v kterém se zařízení pohybuje => problematičtější umístění dalších technologických zařízení, která se montují do EBT panelu, např.: EBT hořáky. Naproti tomu parkovací poloha zařízení se nachází daleko od elektrické obloukové pece a tím je omezeno tepelné namáhání celého zařízení a snížené riziko možnosti pádu části ocelového šrotu na zařízení při plnění obloukové pece.

1.3 NUCOR CORPORATION

Zařízení pro zásyp odpichového otvoru EAF od výrobce Nucor Corporation umožňuje čištění otvoru v EBT panelu, zasypání, kontrolu průchodnosti a kontrolu zasypání odpichového otvoru. Patentová přihláška byla podána firmou Nucor Corporation v roce 2012. Zařízeno je uchyceno k plošině, která je spojena s EAF. Hlavním pracovním pohybem je translační pohyb, při kterém je sestava zásobníku vedena soustavou dvou kolejnicových vedení (Obr.1-4 poz.1) směrem do středu pece, tak aby vyústění zásobníku bylo v pozici nad odpichovým otvorem pece. Vyústění zásobníku se nachází v jeho spodní části a je opatřeno



uzavíracím zařízením. Před zásobníkem (Obr.1-4 poz.2) se následně může nacházet kamerová jednotka (Obr.1-4 poz.3) a zařízení pro čištění otvoru v EBT panelu (Obr.1-4 poz.4). Materiál je do zásobníku doplňován manuálně pracovníky a to z jednotlivých pytlů. Součástí systému zásypu odpichového otvoru je také posuvné uzavírací víko (Obr.1-4 poz.5) pro uzavření otvoru v EBT panelu během nečinnosti zařízení. [4]

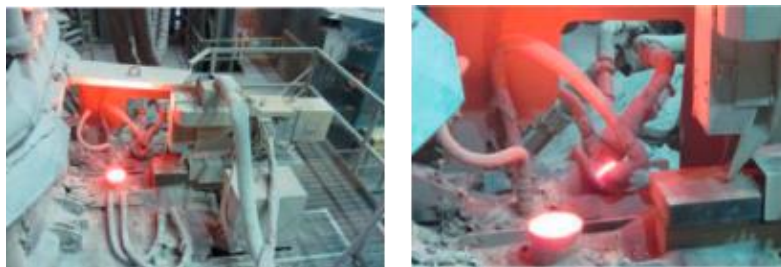


Obr.1-4 Zařízení pro zásyp odpichového otvoru od výrobce NUCOR Corporation [4]

Proti předchozím řešením se jedná o výrazně kompaktnější zařízení, které umožňuje provádět všechny potřebné úkony při zásypu odpichového otvoru. Nevýhoda tohoto zařízení je manuální plnění pomocí pytlů nebo z dodatečného zásobníku. Dále lze mezi nevýhodu této koncepce zařadit i nutnost přítomnosti plošiny uchycené k EAF, jelikož není zaručeno, že na tuto plošinu bude v okolí každé pece dostatek místa.

1.4 MORE

Výrobce MORE vyrábí zařízení pro zásyp odpichového otvoru pod označením AUTOSAND. Autosand byl firmou MORE prezentován v roce 2014 a koncepčně je velmi podobný zařízení od Nucor Corporation. Autosand umožňuje provádět zásyp odpichového otvoru, kontrolu průchodnosti a kontrolu zasypání odpichového otvoru, ovšem neumožňuje čištění otvoru v EBT panelu. Plnění zásobníku zařízení již není manuální, ale pro plnění je využit pneumatický dopravník. Zařízení je opět uchyceno k plošině, která je spojena s EAF. Všechny pohyby zařízení jsou zajišťovány pomocí pneumatických přímočarých motorů. [5]



Obr.1-5 Zařízení pro zásyp odpichového otvoru od výrobce MORE [5]

Mezi výhody lze zařadit přítomnost plnění zásobníku pomocí pneumatického dopravníku, kompaktnější rozměry než v případě zařízení od Nucor Corporation. Nevýhodou je nepřítomnost zařízení pro čištění otvoru v EBT panelu a opět nutnost přítomnosti plošiny spojené s EAF.



2 NÁVRH VLASTNÍ KONCEPCE ZAŘÍZENÍ PRO ZÁSYP ODPICHOVÉHO OTVORU EAF

2.1 DEFINICE CÍLŮ PRÁCE A POŽADAVKŮ NA ZAŘÍZENÍ

Cílem této práce je navrhnout zařízení pro zásyp odpichového otvoru obloukové pece a ověřit chování materiálu (při procesu zasypání) pomocí simulačního programu YADE.

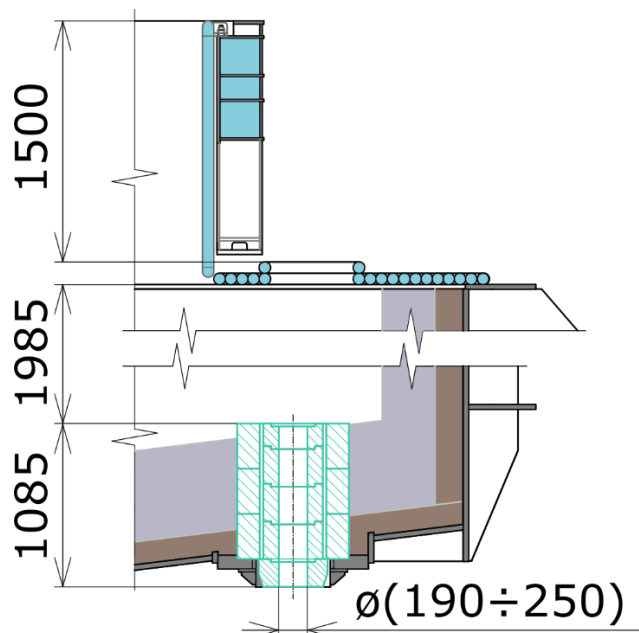
Zařízení musí být navrženo tak, aby splňovalo zadané parametry, umožňovalo provedení všech potřebných operací pro zásyp odpichového otvoru EAF, splňovalo podmínky vysoké spolehlivosti a životnosti a zároveň bylo co nejvíce univerzální (umožnění možnosti použití na různých pecích s co nejmenšími úpravami).

ZADANÉ PARAMETRY ZAŘÍZENÍ

- | | |
|---|---------------|
| - Maximální výška zařízení | 1 500 mm |
| - Hloubka pece v místě odpichového otvoru | 1 985 mm |
| - Průměr odpichového otvoru (min/max) | 190 mm/250 mm |
| - Hloubka odpichového otvoru | 1 085 mm |

OPERACE, KTERÉ MUSÍ ZAŘÍZENÍ UMOŽŇOVAT ¹

- Čištění otvoru v EBT panelu
- Kontrola průchodnosti odpichového otvoru
- Zasypání odpichového otvoru
- Kontrola zasypání odpichového otvoru
- Doplnění zásobníku zařízení pneumatickým dopravníkem



Obr. 2-1 Zobrazení zadaných parametrů zařízení – rozměry v [mm]

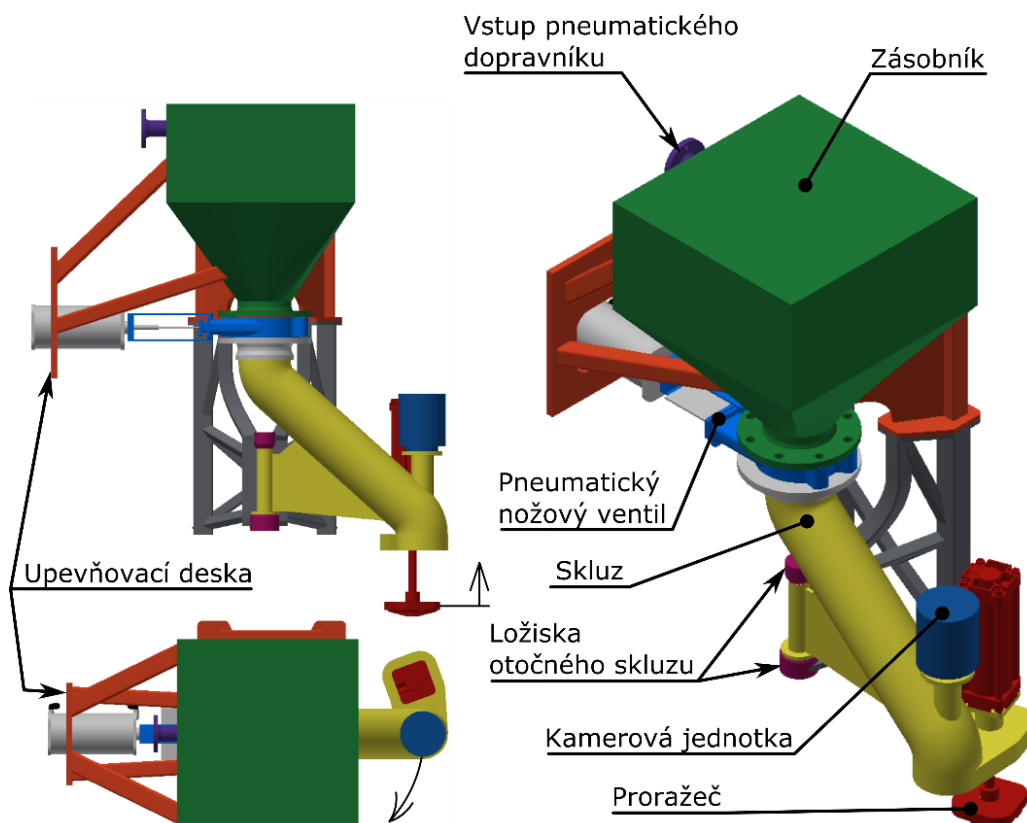
¹ Pořadí operací podle časového sledu jednotlivých operací



2.2 NÁVRHOVÉ VARIANTY

Na základě výše uvedených požadavků a provedené rešerše bylo navrženo několik variant koncepčního uspořádání. Tyto varianty jsou navrženy tak, aby v co nejvyšší míře splňovaly požadavky kladené na zařízení. Varianty jsou také navrženy s ohledem k již existujícím zařízením a příslušným patentům.

2.2.1 VARIANTA A

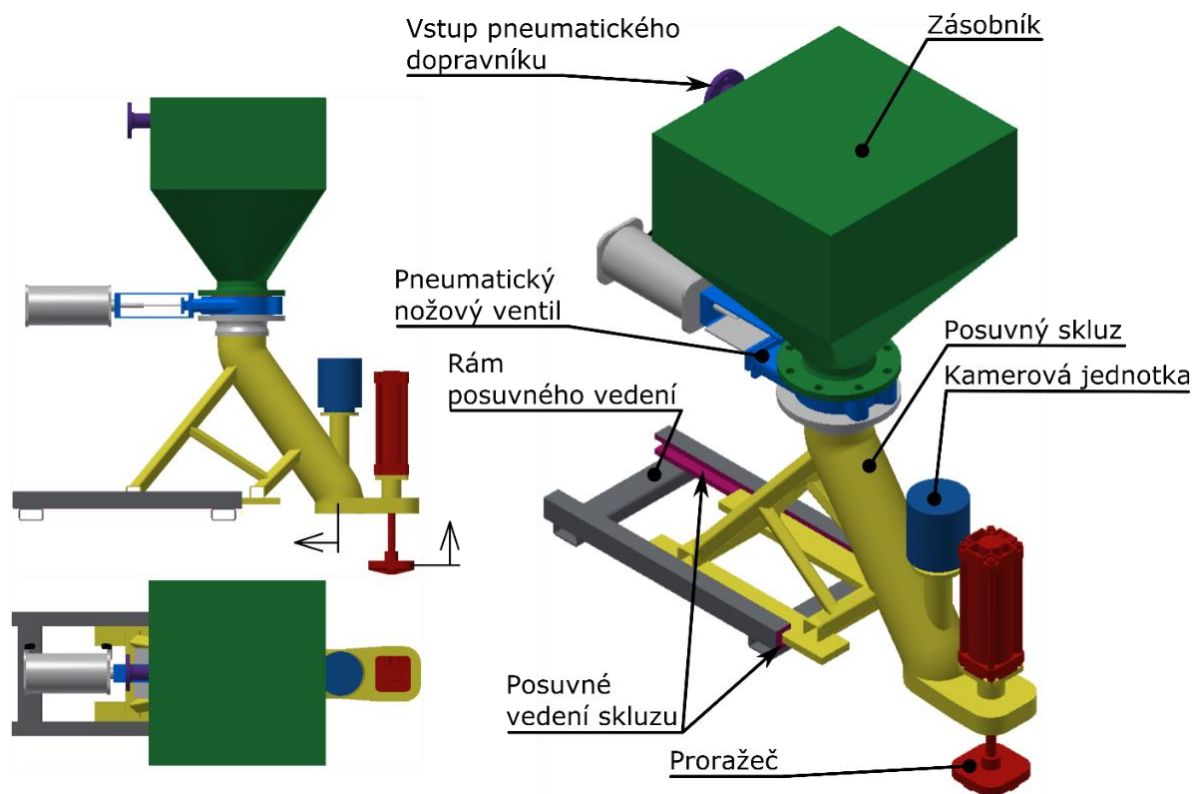


Obr. 2-2 Koncepční varianta A

Navržené zasýpací zařízení ve variantě A je k elektrické obloukové peci uchyceno pouze přes upevňovací desku. Mezi touto deskou a pecí se bude nacházet pevné nebo otočné rameno. Změnou geometrie a rozměrů ramene se docílí požadované polohy výstupního otvoru otočného skluzu nad odpichovým otvorem => pouze změnou ramene bude umožněna montáž na téměř jakoukoliv elektrickou obloukovou pec s excentrickým odpichovým otvorem. Pohyblivou částí této varianty je skluz, který vykonává kývavý pohyb v rozsahu přibližně 180° (rozsah pohybu z parkovací polohy do pracovní polohy). Kývavý pohyb bude zajišťován elektromotorem (popř. pneumatickým motorem) s převodovkou nebo pneumatickým rotačním pohonem umožňujícím kývavý pohyb. K uzavření zásobníku a umožnění jeho naplnění pomocí pneumatického dopravníku bude sloužit nožové šoupátko, které bude ovládáno pomocí dvojčinného přímočarého pneumatického motoru. Ložiska otočného skluzu budou realizována kluznými ložisky popř. vhodnou kombinací ložisek valivých.



2.2.2 VARIANTA B

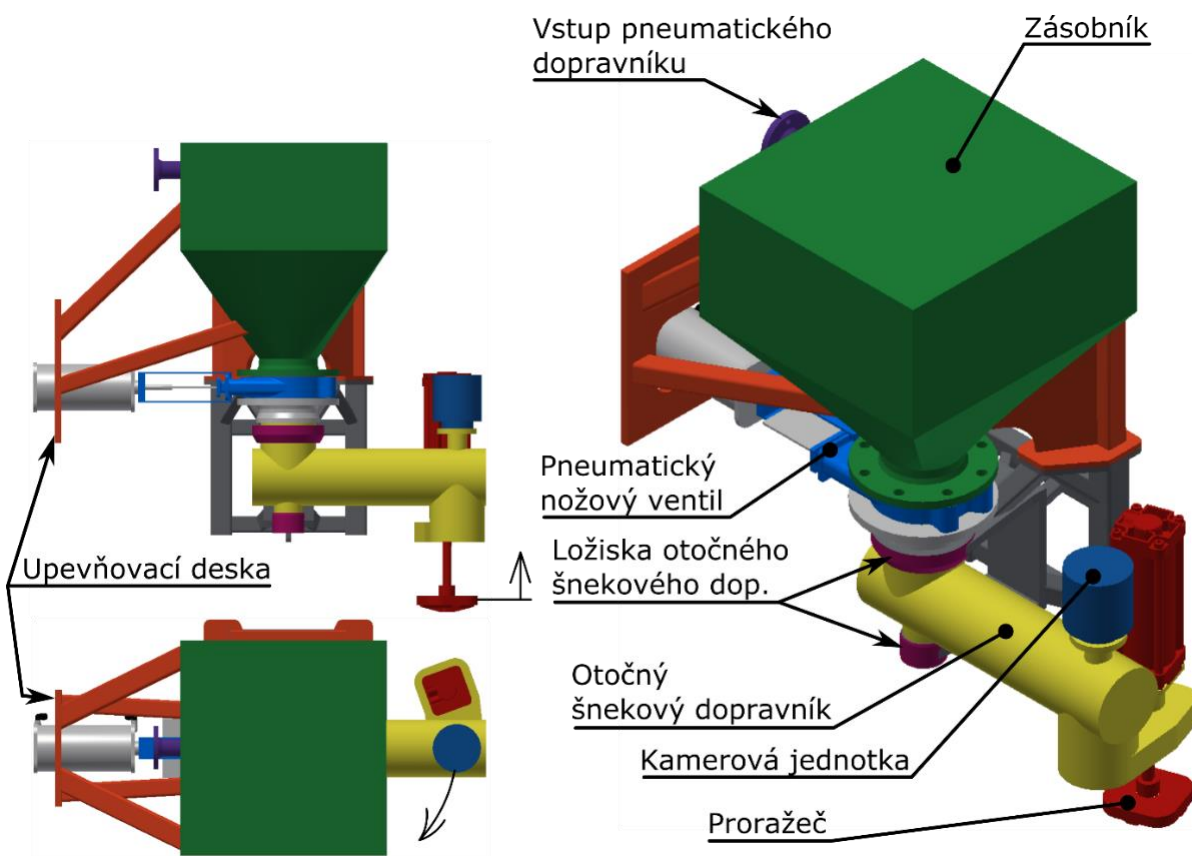


Obr. 2-3 Koncepční varianta B

Zařízení navržené ve variantě B má pevný zásobník, který je uchycen buď přímo, nebo přes rám posuvného vedení k elektrické obloukové peci. Rám posuvného vedení bude uchycen k EBT panelu popř. z části k tomuto panelu a z části k plošině, která by se u elektrické obloukové pece nacházela. Jak již Obr. 2-3 napovídá, tak skluz je u této varianty uložen v posuvném vedení a vykonává tedy přímočarý translační pohyb, který bude zajištěn přímočarým pneumatickým motorem popř. hydromotorem. O uzavírání zásobníku se bude opět jako ve variantě A starat nožové šoupátko ovládané přímočarým dvojčinným pneumatickým motorem. Posuvné vedení skluzu bude vzhledem k provozním podmínkám a okolnímu prostředí realizováno dvojicí materiálu ocel-ocel s dostatečnou vůlí v obou směrech kolmých na směr posuvu skluzu.



2.2.3 VARIANTA C



Obr. 2-4 Konceptní varianta C

Konceptní varianta je velice podobná variantě A. Je k peci také uchycena přes upevňovací desku a přes pevné či otočné rameno. Opět je možné použít zařízení v této variantě C na téměř jakoukoliv pec pouze pomocí změny geometrie a rozměrů ramene umístěného mezi upevňovací desku a elektrickou obloukovou pec. Vůči variantě A je u varianty C použit krátký otočný šnekový dopravník, který je opět uložen ve dvojici kluzných nebo valivých ložisek. Šnekový dopravník opět vykonává kývavý pohyb při pohybu z parkovací do pracovní polohy. Pohon šnekového dopravníku je realizován pomocí elektromotoru a převodovky. Pohon kývavého pohybu je realizován pomocí elektromotoru (popř. pneumatického motoru) s převodovkou, nebo pomocí pneumatického kyvného pohonu. K uzavření zásobníku je opět použito nožové šoupátko ovládané dvojčinným přímočarým pneumatickým motorem, které tak umožňuje naplnění zásobníku, rozběh šnekového dopravníku bez přítomnosti materiálu, a také snížení odporů vůči otáčení dopravníku z parkovací do pracovní polohy (nebude docházet k třecím ztrátám vlivem kontaktu částic materiálu).

2.3 ZHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT

Výběr vhodné varianty řešení zařízení pro zásyp odpichového otvoru elektrické obloukové pece je třeba realizovat s ohledem na finanční náklady a nevyčíslitelné účinky spojené s každou variantou. Vliv dále stanovených nevyčíslitelných účinků je zhodnocen pomocí metody vážených hodnot.



2.3.1 ZHODNOCENÍ FINANČNÍCH NÁKLADŮ

Porovnání jednotlivých variant podle finančních nákladů je provedeno pouze zjednodušeně a to na základě předpokládaných výrobních nákladů a předpokládaných nákladů na nakupované díly (pohony, převodovky, ložiska, ventily, senzory,...).

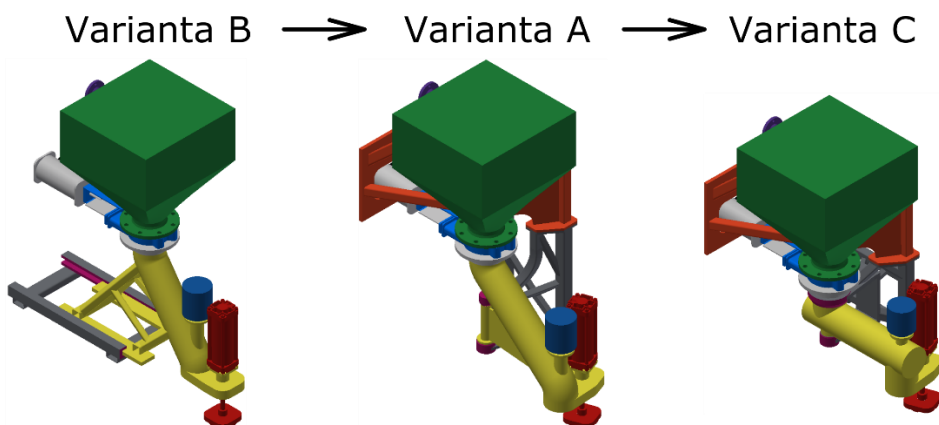
- **Výrobní náklady**

Při porovnání složitosti konstrukce a z toho vyplývajícího množství výrobních operací lze jednotlivé varianty seřadit v pořadí od varianty s nejmenšími náklady až po variantu s největšími náklady na výrobu – varianta B, varianta A, varianta C.

- **Náklady na nakupované díly**

Při porovnání složitosti a nároků na množství nákladných nakupovaných dílů, docházíme ke stejnému závěru jako v případě výrobních nákladů a to k pořadí od varianty s nejmenšími náklady na nakupované díly až po variantu s náklady nejvyššími – varianta B, varianta A, varianta C.

Z výše uvedených poznatků již lze snadno sestavit výsledné pořadí jednotlivých návrhových variant řešení, které jsou seřazeny od varianty s nejmenšími finančními náklady až po variantu s nejvyššími finančními náklady.



Obr. 2-5 Pořadí variant podle finančních nákladů

2.3.2 ZHODNOCENÍ NEVYČÍSLELÝCH ÚČINKŮ

Jak bylo zmíněno výše, tak pro zhodnocení nevyčíslitelných účinků je použita metoda vážených hodnot. Pro aplikaci této metody na jednotlivé varianty je nejdříve nutné sepsat jednotlivá kritéria, ke kterým je nutné doplnit hodnotu relativní důležitosti každého kritéria. Následně pro každou variantu ohodnotíme jednotlivá kritéria a stanovíme součin hodnoty relativní důležitosti kritéria a příslušného hodnocení. Výsledné součiny u každé varianty sečteme a dostáváme výsledné bodové hodnocení varianty. Nejvhodnější variantou z hlediska nevyčíslitelných účinků je následně ta varianta, která má celkové nejvyšší bodové hodnocení.



PŘEHLED JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Tab. 2-1 Seznam kritérií pro hodnocení nevyčíslitelných účinků

Hodnota kritéria	KRITÉRIUM	MOŽNÉ HODNOCENÍ			
		3 body	2 body	1 bod	0 bodů
11	Univerzálnost konstrukce	Plně univerzální	Univerzální s drobnými výhradami	Univerzálnost s velkými výhradami	Použitelnost pouze pro jednu aplikaci
10	Umístění poklopu EBT panelu	Kruhová výšeč 180°	Kruhová výšeč 90°	Kruhová výšeč 45°	Pouze v jednom místě
9	Manuální pohyb skluzu	S nízkým odporem	S vyšší ovládací silou	S nutným převodem síly	nerealizovatelný
8	Složitost konstrukce	Jednoduchá	Středně složitá	Složitá	-
7	Snadnost demontáže (výměna panelů)	Odklopení (odsunutí)	Demontáž části zařízení	Demontáž celého zařízení	Nelze demontovat
6	Rozsah pracovní plochy	S volným prostorem pod zařízením	Střední	-	Velký
5	Stavební výška	Do 1000 mm	(1000÷1250) mm	(1250÷1500) mm	Nad 1500 mm
4	Vedení kabelů a hadic	Bez kompenzace pohybu	Kompenzace translačního pohybu	Kompenzace rotačního pohybu	Kompenzace obecného pohybu, 3D pohybu
3	Rozsah provozní údržby	Bezúdržbové	Kontrola stavu hadic	Kontrola stavu hadic, čištění	Kontrola stavu hadic, čištění, mazání
2	Časová náročnost provozní údržby	Bezúdržbové	Do 5 minut	Do 30 minut	Déle jak 30 minut
1	Použití normalizovaných a katalogových dílů	Velké	Střední	Malé	Téměř žádné

PŘEHLED HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH NÁVRHOVÝCH VARIANT

Tab. 2-2 Hodnocení jednotlivých variant

Hodnota kritéria	KRITÉRIUM	Varianta A		Varianta B		Varianta C	
		Bodové hodnocení	Součin	Bodové hodnocení	Součin	Bodové hodnocení	Součin
11	Univerzálnost konstrukce	3	33	2	22	3	33
10	Umístění poklopu EBT panelu	3	30	2	20	3	30
9	Manuální pohyb skluzu	3	27	1	9	3	27
8	Složitost konstrukce	2	16	3	24	1	8
7	Snadnost demontáže (výměna panelů)	3	21	2	14	3	21
6	Rozsah pracovní plochy	2	12	2	12	2	12
5	Stavební výška	1	5	2	10	3	15
4	Vedení kabelů a hadic	1	4	2	8	1	4
3	Rozsah provozní údržby	2	6	2	6	1	3
2	Časová náročnost provozní údržby	2	4	2	4	1	2
1	Použití normalizovaných a katalog. dílů	2	2	1	1	2	2

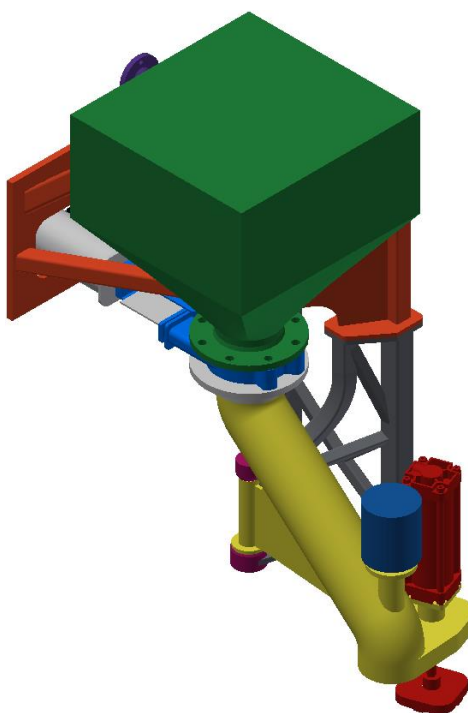


Dosažené celkové bodové hodnocení	Varianta A	Varianta B	Varianta C
	160	130	157

Po provedení metody vážených hodnot zjišťujeme, že nejvyšší bodové hodnoty dosáhla **varianta A**, která je tím pádem nejvhodnější variantou řešení konstrukce a uspořádání zařízení pro zásyp odpichového otvoru elektrické obloukové pece.

2.4 NEJVHODNĚJŠÍ NÁVRHOVÁ VARIANTA

Tak jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly 2.3, tak je třeba pro určení nejvhodnější varianty zkombinovat výsledky pro nevyčíslitelné účinky a finanční náklady. Při zkombinování těchto výsledků zjišťujeme, že nejméně vhodnou variantou je varianta C. Varianta B je vhodná z hlediska finančních nákladů, ale z hlediska nevyčíslitelných účinků skončila na posledním místě a je tedy z tohoto hlediska v podstatě nevhodná. Proto je pro další řešení a podrobnější rozpracování **vybrána Varianta A**, která je nejvhodnější možnou variantou z hlediska nevyčíslitelných účinků. Z hlediska finančních nákladů je varianta A již méně vhodná, ale stále má dobrý poměr finančních nákladů vůči nevyčíslitelným účinkům.



Obr. 2-6 Navržená podoba zařízení pro zásyp – varianta A



3 MATERIÁL PRO ZÁSYP ODPICHOVÉHO OTVORU

Pro zásyp odpichového otvoru se používají sypké materiály s vysokou teplotní odolností, s velikostí zrn ($2\div 10$) mm a s dobrou odolností proti sintrování (spékání) jednotlivých zrn při účinku vysokých teplot, které se v oblasti odpichového otvoru nacházejí. Odolnost vůči sintrování zrn je důležitá, aby bylo umožněno samovolně vysypat materiál z odpichového otvoru (po tavbě oceli a otevření uzavíracího šoupěte odpichového otvoru) a tím byl umožněn bezproblémový odpich oceli z elektrické obloukové pece. Tato schopnost odolávat spékání zrn je u materiálů popsána pomocí tzv. míry volného otevření, což je hodnota, která v procentech udává spolehlivost samovolného vysypání materiálu. Vysokoteplotní odolnosti je dosahováno přítomností oxidů MgO a SiO₂ ve stavební struktuře zrn materiálu.

Dle konzultace ve firmě HTT Engineering se nejčastěji pro zásyp odpichového otvoru používají sypké materiály z mineralogické kategorie olivínů, přičemž největšího zastoupení ve stavební struktuře dosahuje minerál Forsterit (Mg₂SiO₄). Materiály pro zásyp se u jednotlivých výrobců odlišují velikostí a tvarem výsledných zrn a také chemickým složením. Vzhledem k obecnosti produktových informací a nedostupnosti detailních mechanických vlastností dodávaných materiálů, byl vybrán materiál od výrobce ERYAS Mining. Tento materiál se skládá z Forsteritu (95 hm.%) a z Fayalitu (5 hm.%), přičemž dílčí chemické složení je následující: **MgO** (48 hm.%); **SiO₂** (42 hm.%); **Fe₂O₃** (7 hm.%); ostatní oxidy kovů do 3 hm.% [6].

VLASTNOSTI MATERIÁLU UDÁVANÉ VÝROBCEM

[6]

Objemová hmotnost olivínu	$\rho_{olB} = 1\,700\text{ kg} \cdot \text{m}^3$
Hustota zrn olivínu	$\rho_{ol} = 3\,300\text{ kg} \cdot \text{m}^3$
Youngův modul pro materiál zrn	$E_{ol} = 140\text{ GPa}$
Tvar zrn olivínu	Hranatá zrna – tupouhlá a ostroúhlá zrna
Rozměr zrn	(2 až 8) mm

Další vlastnosti důležité pro konstrukci zařízení (sypný úhel materiálu, úhel tření mezi materiálem a ocelí) nejsou dodavatelem materiálu specifikovány, proto je třeba tyto vlastnosti určit experimentálně.

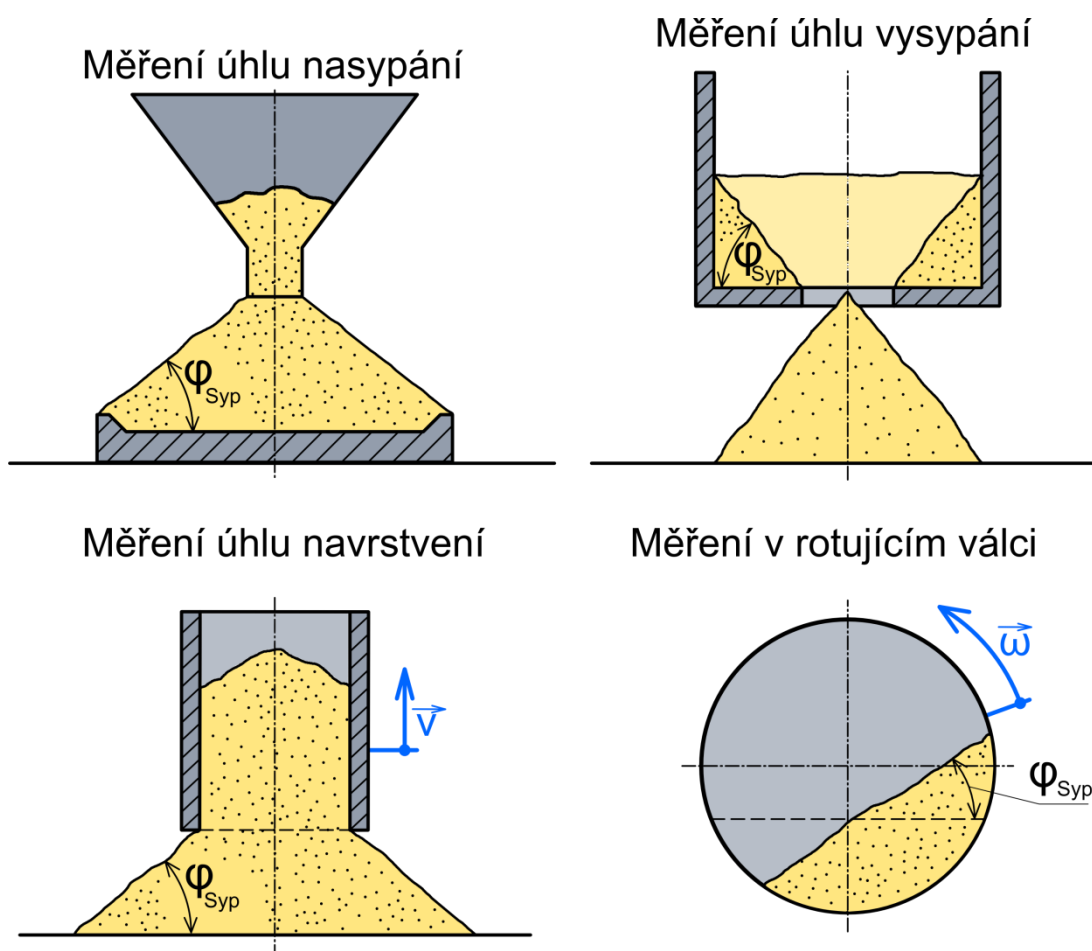


Obr. 3-1 Materiál pro zásyp odpichového otvoru



3.1 STANOVENÍ SYPNÉHO ÚHLU MATERIÁLU

Sypný úhel je definován jako úhel, který svírá rovina podložky s površkou volně sypaného kuželu materiálu. Pro experimentální určení velikosti sypného úhlu materiálu je možné použít jednu ze čtyř metod – metoda měření úhlu nasypání, metoda měření úhlu navrstvení, metoda měření úhlu vysypání a metoda měření v rotujícím válci. Velikosti sypného úhlu získané pomocí jednotlivých metod se vzájemně nepatrně liší, přičemž jsou tyto odlišnosti nejvíce ovlivněny rychlostí pohybu (sypaní) zrn materiálu. [7, s. 5-10]

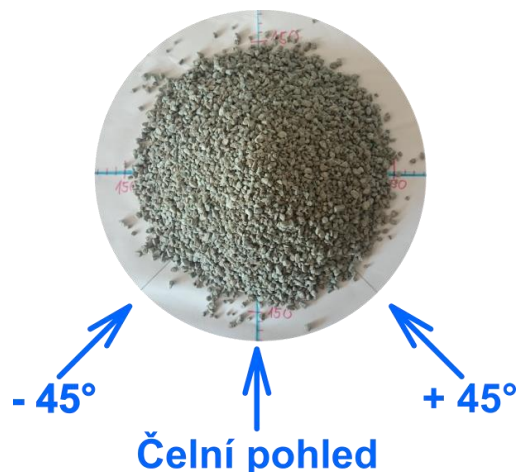


Obr. 3-2 Metody měření sypného úhlu materiálu [7]

Pro experimentální určení sypného úhlu je vybrána metoda měření úhlu navrstvení, která vychází ze všech metod jako nejjednodušší. Při experimentu je třeba, aby rychlost zdvihání trubky byla malá a tím došlo k co nejmenšímu zkreslení hodnoty sypného úhlu (sypný úhel je závislý na rychlosti nasypání kužele). Pro experiment je proto použita rychlost zdvihání trubky přibližně $0,008 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro realizaci experimentu byly použity dvě plastové trubky o světlostech DN50 (vnější průměr 50 mm a tloušťka stěny 1,8 mm) a DN110 (vnější průměr 110 mm a tloušťka stěny 2,7 mm) s délkou trubek 250 mm. Dalšími pomůckami byl fotoaparát Nikon D3200, který byl použit pro záznam průběhu experimentu. Následná úprava pořízených fotografií byla provedena v programu Adobe Photoshop. K vyhodnocení a určení jednotlivých úhlů povrchů vzniklých kuželů byl použit software Autodesk Inventor ve verzi 2015.



Při experimentu byla na podložku položena trubka s danou světlostí (DN50, DN110) a byla naplněna zkoumaným materiálem. Po naplnění se trubka zdvihala rychlostí přibližně $0,008 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ směrem vzhůru a tím docházelo k vytvoření volně sypaného kužele materiálu. Takto vniklý kužel byl zaznamenán (pomocí fotoaparátu) ze tří různých směrů – z čelního pohledu a z pohledů skloněných o úhel $+45^\circ$ a -45° od čelního pohledu.



Obr. 3-3 Směry vyhodnocování sypného úhlu materiálu

Získané fotografie byly následně graficky upraveny a v softwaru Autodesk Inventor došlo k odměření experimentálních úhlů jednotlivých površků vzniklých kuželů, přičemž velikost sypného úhlu pro daný pohled byla určena jako polovina součtu příslušných úhlů površků vztažených k hraně fotografie. Velikost výsledného experimentálně stanoveného sypného úhlu materiálu se určí na základě aritmetického průměru z naměřeného souboru hodnot.

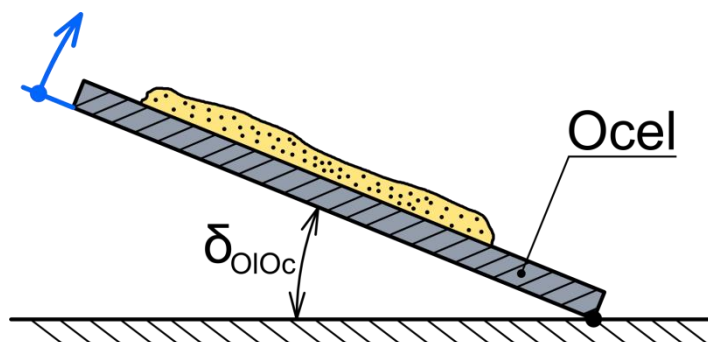
Tab. 3-1 Experimentálně naměřené hodnoty sypného úhlu¹

Číslo experimentu	Světlost trubky	Sypný úhel [°]		
		pohled pod -45°	pohled pod 0°	pohled pod $+45^\circ$
1	DN 50	40,6	40	40,5
2	DN 50	40,9	40	39,7
3	DN 50	41,4	40,9	41,1
4	DN 50	40,2	39,8	40
5	DN 50	39,7	40,1	39,5
1	DN 110	38,5	37,1	36,8
2	DN 110	40	40,7	40,8
3	DN 110	36,7	37,6	38,9
4	DN 110	40,2	40,7	40,3
5	DN 110	38,5	39,3	38,9
Experimentálně stanovený sypný úhel materiálu		$\varphi_{SypEx} = 39,6^\circ$		

¹ Přehled vyhodnocovaných fotografií z jednotlivých experimentů přiložen v Přílohách A a B

3.2 STANOVENÍ ÚHLU TŘENÍ MEZI MATERIÁLEM A OCELÍ

Úhel tření mezi materiálem a ocelí je možné stanovit pomocí jednoduchého experimentu, který spočívá v umístění zkoumaného materiálu na ocelovou nakloněnou rovinu a následném měření úhlu, při kterém dojde ke skluzu zrn materiálu po ocelové ploše. Hledaný úhel tření materiálu o ocel je úhel, který svírá nakloněná rovina s podložkou v okamžiku počátku skluzu částic materiálu po plechu. [8, s. 136]



Obr. 3-4 Zobrazení úhlu tření mezi materiálem a ocelí

Pro experimentální určení úhlu tření mezi materiálem a ocelí byl použit ocelový plech o tloušťce 1,0 mm, který byl vyroben z oceli DC01. Mezi další pomůcku použitou při měření patřil fotoaparát Nikon D3200, který byl využit pro záznam průběhu experimentu. Pro zpracování a vyhodnocení experimentu byl použit program Adobe Photoshop a Autodesk Inventor 2015.

Při experimentu byl na volně položený pás plechu nanesen zkoumaný materiál ve vrstvě o tloušťce 10 až 20 mm. Následně byl na jedné straně postupně pozvolně přizdvihován plech, tak aby docházelo k pozvolnému nárůstu sklonu nakloněné roviny. Během zvyšování sklonu nakloněné roviny byl pozorován zkoumaný materiál, a jakmile začalo docházet ke skluzu částic materiálu po plechu, tak bylo pozastaveno zdvihání plechu – pro lepší následné odměření velikosti úhlu tření. Celý průběh experimentu byl zaznamenán pomocí fotoaparátu. Získaný záznam byl následně zpracován v programu Adobe Photoshop a vlastní odměření velikostí úhlu tření proběhlo v programu Autodesk Inventor. Velikost výsledného experimentálně stanoveného úhlu tření mezi materiálem a ocelí se určí jako aritmetický průměr ze souboru naměřených hodnot úhlů tření.

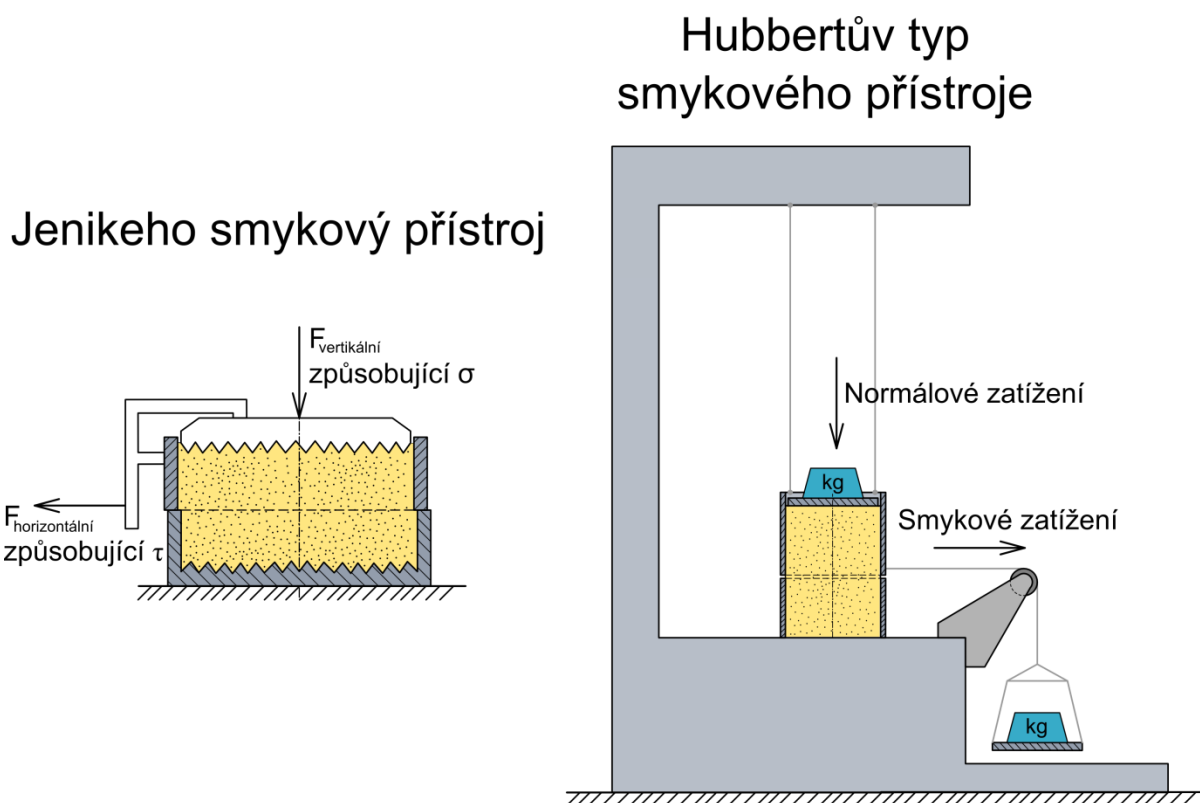
Tab. 3-2 Experimentálně naměřené hodnoty úhlu tření mezi materiálem a ocelí

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Úhel tření [°]	22,7	23,8	22,8	23,5	23,8	22,7	23,7	24,2	22,7	23,5
Experimentálně stanovený úhel tření mezi materiálem a ocelí				$\delta_{OIOc} = 23,4^\circ$						

3.3 STANOVENÍ ÚHLU VNITŘNÍHO TŘENÍ MATERIÁLU

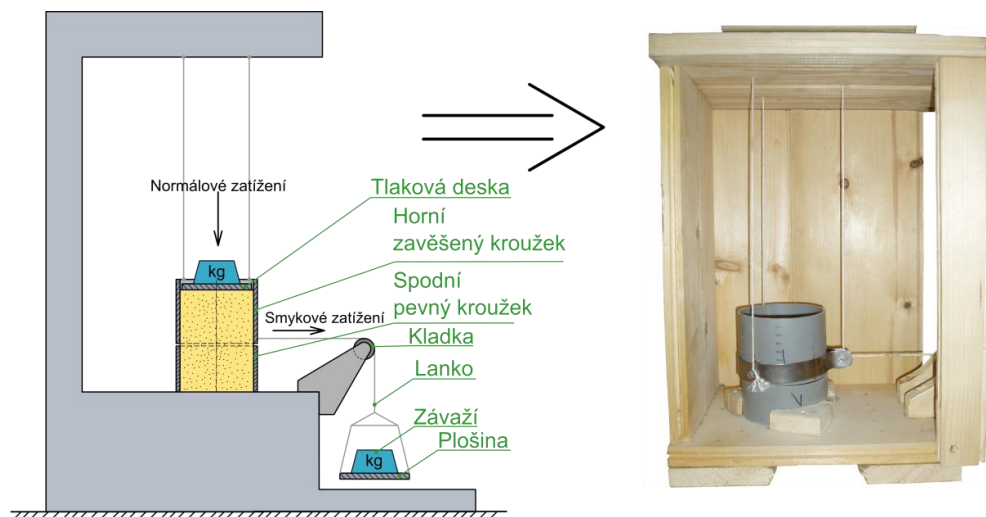
[9]

Určení úhlu vnitřního tření je možné realizovat několika způsoby, mezi které patří například i měření na Jenikeho smykových přístrojích využívajících posuvný pohyb. Na obdobném principu je také založeno měření na Hubbertově typu smykového přístroje, který bude využit při experimentálním měření a u kterého je horní pohyblivý kroužek zavěšen nad spodním pevným kroužkem se zanecháním malé mezery mezi kroužky. Prostor uvnitř kroužků (trubek) je vyplněn měřeným materiálem, který je nasypán do určité výšky nad dělicí rovinu kroužků (smyková rovina). Na povrchu naspaného materiálu je umístěna tlaková deska, na kterou se následně umísťují příslušná závaží, která vyvolávají normálové tlakové napětí v testovaném materiálu. K hornímu zavěšenému kroužku je upevněno lanko, které je přes kladku vedeno k plošině, na kterou se umísťují závaží, která vlivem své tíhové síly vyvozují příslušné smykové napětí v místě dělicí roviny kroužků. Podstatou měření je tedy postupné zvyšování smykového napětí až do okamžiku, kdy dojde ke smyku materiálu a vzájemnému posunutí kroužků.



Obr. 3-5 Jenikeho smykový přístroj [10, s. 28] a Hubbertův typ smykového přístroje [9, s. 5]

S využitím schématu přístroje uvedeného na Obr. 3-5 byl přístroj postaven v podobě uvedené na Obr. 3-6. Vzhledem k velikosti zrn testovaného materiálu byla v dělicí rovině použita mezera mezi válci o velikosti přibližně 0,8 mm a průměr kroužku je odvozen od použité trubky – $D_{inkr} = 105,4 \text{ mm}$. Vůle mezi zavěšenou plošinou a pevnou podložkou byla navržena na 10 mm, tak aby bylo zajištěno vždy stejně velké posunutí kroužků vůči sobě.



Obr. 3-6 Aparatura pro určení mezní čáry a stanovení úhlu vnitřního tření

Pro měření úhlu vnitřního tření byla použita sada závaží o různých jmenovitých hmotnostech, sestavené zařízení pro smykovou zkoušku (viz Obr. 3-6) a digitální váha Soehnle EXACTA Touch 65108. Při měření byl spodní pevný kroužek naplněn až po okraj testovaným vzorkem olivínu. Poloha horního kroužku byla vymezena, tak aby byl soustředný se spodním kroužkem a následně do vnitřního prostoru bylo pozvolně vsypáno předem odvážené množství olivínu z výšky přibližně 70 mm nad horní hranou horního kroužku. Na povrch nasypaného materiálu byla přiložena tlaková deska a na ní poté položeno závaží, které dále zvyšuje velikost normálového napětí působícího v materiálu. Po zatížení v normálovém směru se postupně na zavěšenou plošinu pozvolna přidává závaží a sleduje se pohyb kroužků. Jakmile dojde k pohybu kroužků a vymezení vůle mezi zavěšenou plošinou a podložkou, tak odstraníme závaží ze zavěšené plošiny a z tlakové desky, příslušné hmotnosti zvážíme a zapíšeme do příslušné tabulky. Tento proces měření následně několikrát opakujeme pro různé hodnoty normálového zatížení (normálového napětí).

Z naměřených hodnot normálových a smykových zatížení se pomocí jednoduchých rovnic (3.2) a (3.3) určí hodnota normálového a smykového napětí vyvolaného v olivínu příslušným zatížením. Jednotlivé naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce v Příloze C.

$$S_{inkr} = \frac{\pi \cdot D_{inkr}^2}{4} \quad (3.1)$$

$$\sigma_n = \frac{m_{nz} \cdot g}{S_{inkr}} \quad (3.2)$$

$$\tau_s = \frac{m_{sz} \cdot g}{S_{inkr}} \quad (3.3)$$

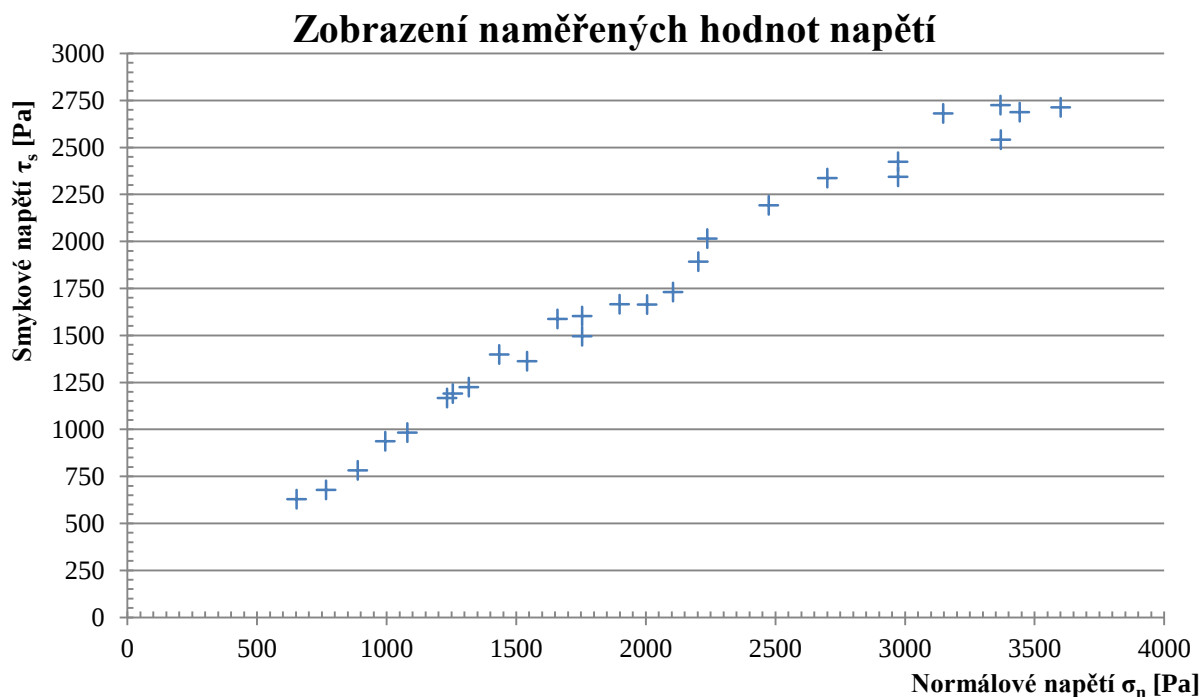
kde:

σ_n	[Pa]	normálové napětí ve smykové rovině mezi kroužky
τ_s	[Pa]	smykové napětí ve smykové rovině mezi kroužky
m_{nz}	[kg]	normálové zatížení působící na materiál
m_{sz}	[kg]	smykové zatížení působící na materiál
g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení
S_{inkr}	[m ²]	vnitřní plocha kroužku
D_{inkr}	[m]	vnitřní průměr kroužku

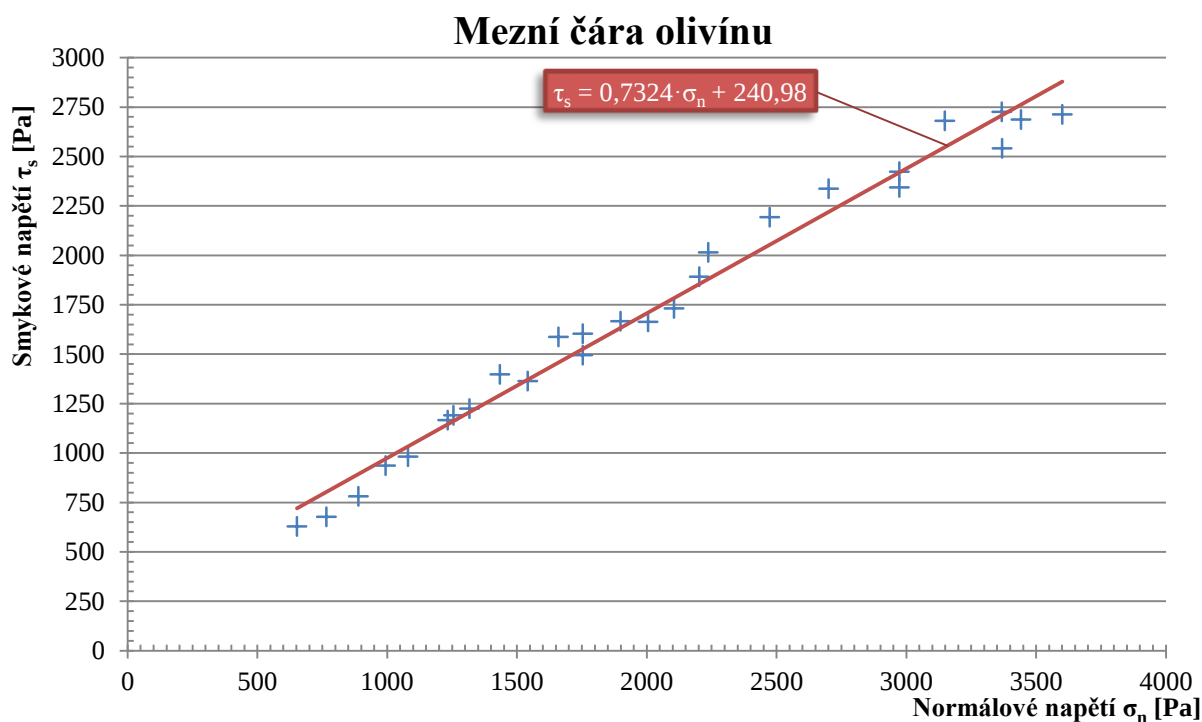


Ze získaných hodnot normálových a smykových napětí již lze jednoduše sestavit graf (viz Obr. 3-7) a získanou množinu bodů proložit vhodnou křivkou. V daném případě získané body v grafu vykazují lineární závislost a proto je pro proložení množiny bodů využita přímka (viz Obr. 3-8), která je definována pomocí rovnice (3.4) a představuje mezní čáru testovaného olivínu v rozmezí normálových napětí 650 Pa až 3600 Pa.

$$\tau_s = 0,7324 \cdot \sigma_n + 241 \quad (3.4)$$



Obr. 3-7 Graf zobrazující naměřené hodnoty napětí



Obr. 3-8 Mezní čára olivínu - proložení naměřených dat přímkou



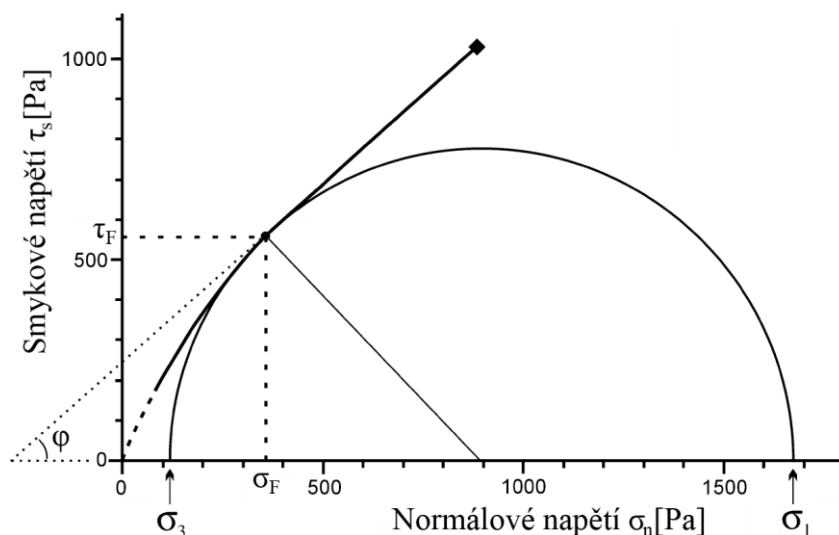
Rovnici mezní čáry materiálu, která je tvořena přímkou, lze obecně zapsat dle Mohr-Coulombova kritéria ve tvaru:

$$\tau_{SMC} = \mu_{ifr} \cdot \sigma_{nMC} + C_{ch} \quad (3.5)$$

kde:

τ_{SMC}	[Pa]	mezní smykové napětí materiálu
σ_{nMC}	[Pa]	mezní normálové napětí materiálu
μ_{ifr}	[-]	koeficient vnitřního tření materiálu
C_{ch}	[Pa]	koheze materiálu

Při porovnání rovnice (3.4) a rovnice (3.5) zjistíme, že hodnota koeficientu vnitřního tření $\mu_{ifr} = 0,7324$ a velikost koheze materiálu C_{ch} je přibližně rovna 241 Pa. Takto určenou kohezi materiálu C_{ch} nelze považovat za reálnou hodnotu a pro její ověření a zpřesnění by bylo třeba realizovat měření pro hodnoty normálových napětí menších než 650 Pa, protože u nízkých hodnot normálových napětí se výrazně mění charakter mezní čáry (viz Obr. 3-9).



Obr. 3-9 Podoba mezní čáry pro malá normálová napětí [9, s. 11]

Na základě stanovené rovnice mezní čáry olivínu a určené hodnoty koeficientu vnitřního tření lze již z rovnice (3.6) určit hodnotu hledaného úhlu vnitřního tření.

$$\mu_{ifr} = \tan \varphi_{ol} \quad (3.6)$$

$$\varphi_{ol} = \arctan \mu_{ifr} \quad (3.7)$$

$$\varphi_{ol} = \arctan 0,7324 = 36,22^\circ$$

$$\varphi_{ol} \cong 36,2^\circ$$

kde:

φ_{ol}	[°]	úhel vnitřního tření olivínu
----------------	-----	------------------------------

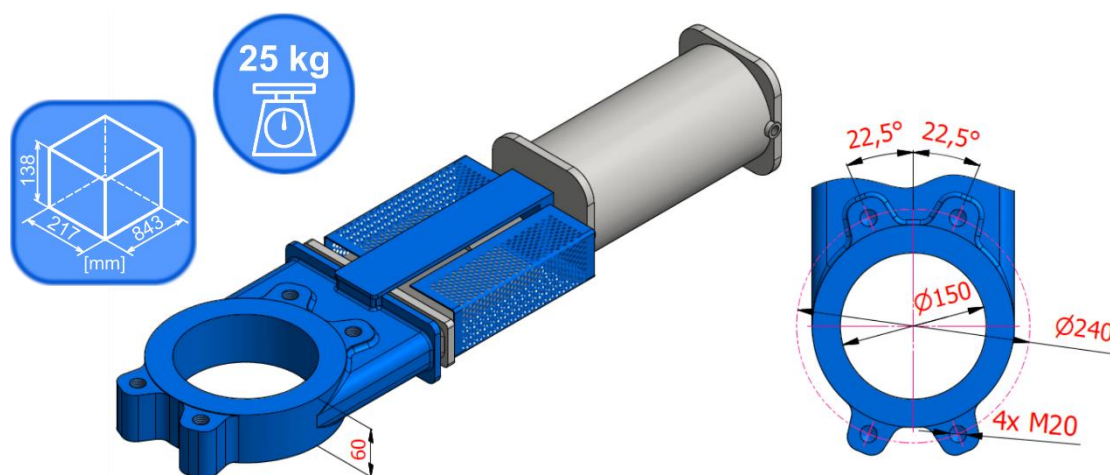


4 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH A VÝBĚR SOUČÁSTÍ ZAŘÍZENÍ

Při předběžném návrhu budou stanoveny základní rozměry důležitých funkčních součástí tak, aby bylo možné sestavit model funkčních ploch a provést simulaci chování materiálu v programu YADE. V případě kladných výsledků budou jednotlivé funkční součásti navrženy detailněji a adekvátně zkontrolovány. V případě nevyhovujících výsledků budou provedeny vhodné změny pro dosažení vyhovujících výsledků. Vůči těmto změnám budou ostatní komponenty vhodně upraveny a zkontrolovány.

4.1 UZAVÍRACÍ VENTIL ZÁSOBNÍKU

Jak již bylo zmíněno při návrhu variant v kapitole 2.2, tak je pro uzavření zásobníku vybráno nožové šoupátko, které je ovládáno pomocí dvojčinného přímočarého pneumatického motoru. Tento typ ventilu je vybrán vzhledem k nízkým zástavbovým rozměrům, snadnosti ovládání a malému opotřebení vnitřních částí, které jsou v kontaktu s materiálem. Pro počáteční návrh je vybráno nožové šoupátko s typovým označením L20N se světlostí DN 150 od výrobce LUCAVAL, které je dodáváno firmou FLUIDTECHNIK BOHEMIA. [11]



Obr. 4-1 Základní přípojovací rozměry nožového šoupátka L20N [11, s. 4]

4.2 NÁVRH ROZMĚRŮ ZÁSOBNÍKU ZAŘÍZENÍ

Po stránce konstrukčního řešení zásobníku je možné navrhnout zásobník s kruhovým, nebo čtvercovým (obdélníkovým) půdorysem.

Výhodou kruhového půdorysu je snadnější výroba zásobníku a z toho vyplývající nižší cena. Nevýhodou je problematičtější výroba kónické části v případě potřeby umístit výpustný otvor mimo středovou osu zásobníku. Výhodou hranatého zásobníku je možnost posunutí výpustného otvoru ze středu zásobníku a tím dosáhnout lepších zástavbových rozměrů zásobníku. Další výhodou hranatého zásobníku je větší užitečný objem vůči zásobníku s kruhovým půdorysem¹ => získání menších zástavbových rozměrů při stejném užitečném objemu. Nevýhodou hranatého zásobníku je složitější konstrukce a tedy i dražší výroba.

¹ Při stejných maximálních půdorysných rozměrech a zachování stejných výšek jednotlivých částí zásobníků.



Pro zařízení je vybrán zásobník s hranatým půdorysem, který umožní dosažení dobrých zástavbových rozměrů a umožní lepší přístup k otvoru v EBT panelu.

STANOVENÍ UŽITEČNÉHO OBJEMU ZÁSOBNÍKU

Pro stanovení velikosti užitečného objemu zásobníku je určujícím kritériem maximální objem odpichového otvoru. Takto získaný objem je nutné ještě navýšit přibližně o 30%, aby došlo k zakrytí horní plochy žáruvzdorné vyzdívky odpichového otvoru a tím došlo k správnému zasypání odpichového otvoru.

$$V_{MAXodp} = \frac{\pi \cdot D_{MAXodp}^2}{4} h_{odp} \quad (4.1)$$

$$V_{MAXodp} = \frac{\pi \cdot 0,25^2}{4} \cdot 1,085 = 0,0533 \text{ m}^3$$

$$V_{MAXodp} = 0,0533 \text{ m}^3 = 53,3 \text{ l}$$

kde:

D_{MAXodp} [m] maximální průměr odpichového otvoru – zadaný parametr viz kapitola 2.1

h_{odp} [m] hloubka odpichového otvoru - zadaný parametr viz kapitola 2.1

V_{MAXodp} [m³] maximální objem odpichového otvoru - zadaný parametr viz kapitola 2.1

$$V_{už} = V_{MAXodp} \cdot 1,3 \quad (4.2)$$

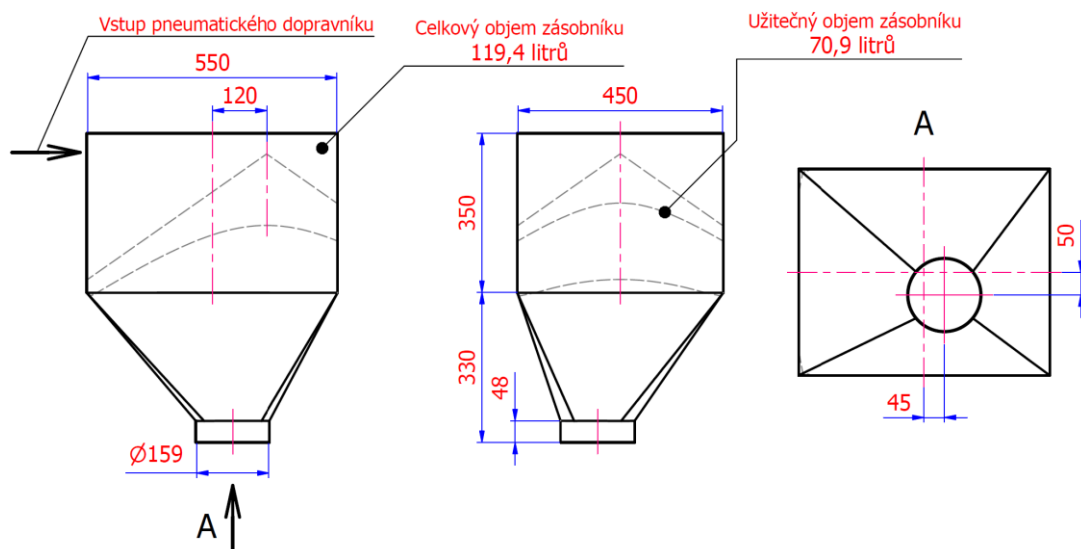
$$V_{už} = 0,0533 \cdot 1,3 = 0,06929 \text{ m}^3$$

$$V_{už} = 0,0693 \text{ m}^3 = 69,3 \text{ l}$$

kde:

$V_{už}$ [m³] potřebný užitečný objem zásobníku

NAVRŽENÁ PODOBA VNITŘNÍHO PROSTORU ZÁSOBNÍKU



Obr. 4-2 Předběžně navržené vnitřní rozměry zásobníku



Na základě určeného potřebného užitečného objemu zásobníku byl navržen zásobník s obdélníkovým půdorysem o celkovém objemu 0,1194 m³. Užitečný objem navrženého zásobníku je 0,0709 m³. Velikost a připojovací rozměry výpustného otvoru zásobníků jsou odvislé od vybrané velikosti (světlosti) uzavíracího nožového šoupátka - viz kapitola 4.1.

4.3 KAMEROVÁ JEDNOTKA

Kamerová jednotka se skládá z ochranného chladicího pouzdra a vlastní kamery. Ochranné pouzdro má za úkol chránit citlivou optiku kamery před znečištěním a také musí chránit kameru před účinkem vysokých teplot. Kamera slouží k pořízení obrázků, či videozáznamu odpichového otvoru a oblasti kolem odpichového otvoru. Tyto obrázky se následně využijí pro vyhodnocení průchodnosti odpichového otvoru a pro kontrolu správnosti zasypání odpichového otvoru.

Při snímání odpichového otvoru kamerou se mezi kamerou a otvorem bude téměř vždy nacházet prostředí se zhoršenou vizuální viditelností. Tato zhoršená viditelnost je z velké části způsobena přítomností pecních plynů, které vznikly během tavby, nebo vznikají po odpichu oceli vlivem reakcí zbytkové oceli s okolní atmosférou uvnitř pece. K viditelnosti nepřispívá ani občasná přítomnost plamenů a vysoký teplotní rozdíl mezi teplotou uvnitř pece (na hladině roztavené oceli) a teplotou mimo pec. Z výše uvedených důvodů je vybrána termovizní infračervená kamera od výrobce Micro-Epsilon s typovým označením thermoIMAGER TIM 400, která umožňuje snímání teplot až do teploty 1 800°C.

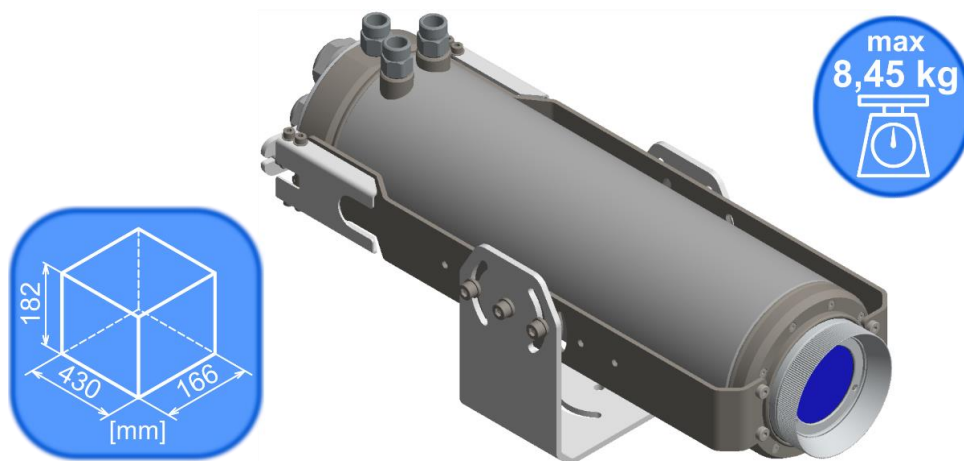


Obr. 4-3 Termovizní infračervená kamera thermoIMAGER TIM 400 [12]

Jako ochranné pouzdro je vybráno vodou chlazené pouzdro v prodloužené verzi, které vyrábí výrobce Micro-Epsilon pod označením TM-CJAS4xx-TIM. Ochranné pouzdro obsahuje vstup pro tlakový vzduch, který slouží k udržení přetlaku uvnitř pouzdra tak, aby nedošlo k znečištění objektivu kamery, a zároveň slouží k ochlazení a čištění ochranného skla pouzdra. Prodloužená verze pouzdra je zvolena z důvodu použití USB-Ethernet serveru a jeho umístění uvnitř pouzdra. USB-Ethernet server je použit, protože ovládací počítač pro kameru je umístěn v řídicí místnosti elektrické obloukové pece a následná délka kabelu potřebného pro propojení kamery s řídicím počítačem kamery dosahuje délky v řádu desítek metrů => komplikovanější propojení pomocí několika USB kabelů² s přídatnými zdroji napájení, nebo jednodušší propojení pomocí Ethernet kabelu³ s využitím USB-Ethernet serveru.

² Pro USB kabel platí standardní délkový limit 5 m [22]

³ Pro Ethernetový kabel platí standardní délkový limit 100 m [21]



Obr. 4-4 Ochranné vodou chlazené pouzdro

4.4 PRORÁŽEČ

Jak již bylo zmíněno dříve, tak prorážecí je zařízení určené k čištění otvoru v EBT panelu od ulpělé struskové skořepiny. Tuto skořepinu je nutné odstranit, popř. prolomit, aby bylo možné provést následné zasypání odpichového otvoru. Toto prolomení bude prováděno pomocí prorážecího trnu, který bude vykonávat přímočarý pohyb, jehož zdrojem bude přímočarý pneumatický motor.

4.4.1 VÝBĚR PŘÍMOČARÉHO PNEUMATICKÉHO MOTORU

Na základě konzultace ve firmě HTT Engineering, byl pro pohon prorážecího trnu vybrán dvojčinný přímočarý pneumatický motor od výrobce Stránský a Petržík s označením:

1010150111000250

TECHNICKÉ PARAMETRY VYBRANÉHO PŘÍMOČARÉHO PNEUMATICKÉHO MOTORU [13, s. 4]

Průměr pístu	100 mm
Zdvih	250 mm
Hmotnost	$m_{prop} = 6,95 \text{ kg}$
Moment setrvačnosti ⁴	$J_{prop} = 0,012 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Vysouvací síla při tlaku 0,6 MPa	$F_{pr} = 4\,713 \text{ N}$
Zasouvací síla při tlaku 0,6 MPa	4 418 N
Maximální provozní tlak	1,0 MPa

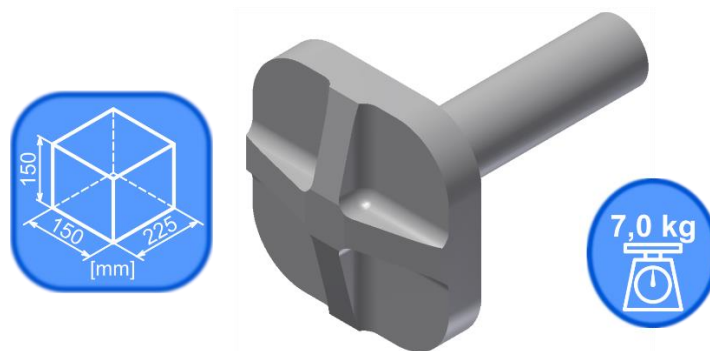
⁴ Moment setrvačnosti určen na základě 3D modelu přímočarého pneumatického motoru v programu Autodesk Inventor 2015. Moment setrvačnosti je vztažen k ose pístní tyče.



Obr. 4-5 Dvojčinný přímočarý pneumatický motor pro pohon prorážecího trnu [13, s. 4-5]

4.4.2 NÁVRHOVÁ PODOBA PRORÁŽECÍHO TRNU

Pro následný návrh pohonu pohybu skluzu je třeba ještě předběžně stanovit podobu prorážecího trnu, který bude uchycen k pístní tyči přímočarého pneumatického motoru. Pro tyto účely byla navržena základní podoba prorážecího trnu s čtvercovým půdorysem o rozměru strany 150 mm, celkové výšce 225 mm, hmotnosti $m_{protn} = 7,0 \text{ kg}$ a s momentem setrvačnosti prorážecího trnu⁵ o velikosti $J_{prot} = 0,016 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.



Obr. 4-6 Předběžná podoba prorážecího trnu

4.4.3 URČENÍ CELKOVÉ HMOTNOSTI A MOMENTU SETRVAČNOSTI PRORÁŽEČE

$$m_{pron} = m_{prop} + m_{protn} \quad (4.3)$$

$$m_{pron} = 6,95 + 7,0 = 13,95 \text{ kg}$$

$$m_{pron} = 13,95 \text{ kg}$$

kde:

m_{pron} [kg] návrhová hmotnost prorážče

m_{prop} [kg] hmotnost pohonu prorážecího trnu

m_{protn} [kg] návrhová hmotnost prorážecího trnu

⁵ Hmotnost a moment setrvačnosti prorážecího trnu určeny na základě 3D modelu prorážecího trnu v programu Autodesk Inventor 2015. Moment setrvačnosti je vztažen k ose závitové díry, která slouží pro připojení k pístní tyči.



$$J_{pron} = J_{prop} + J_{prot} \quad (4.4)$$

$$J_{pron} = 0,012 + 0,016 = 0,028 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{pron} = 0,028 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

kde:

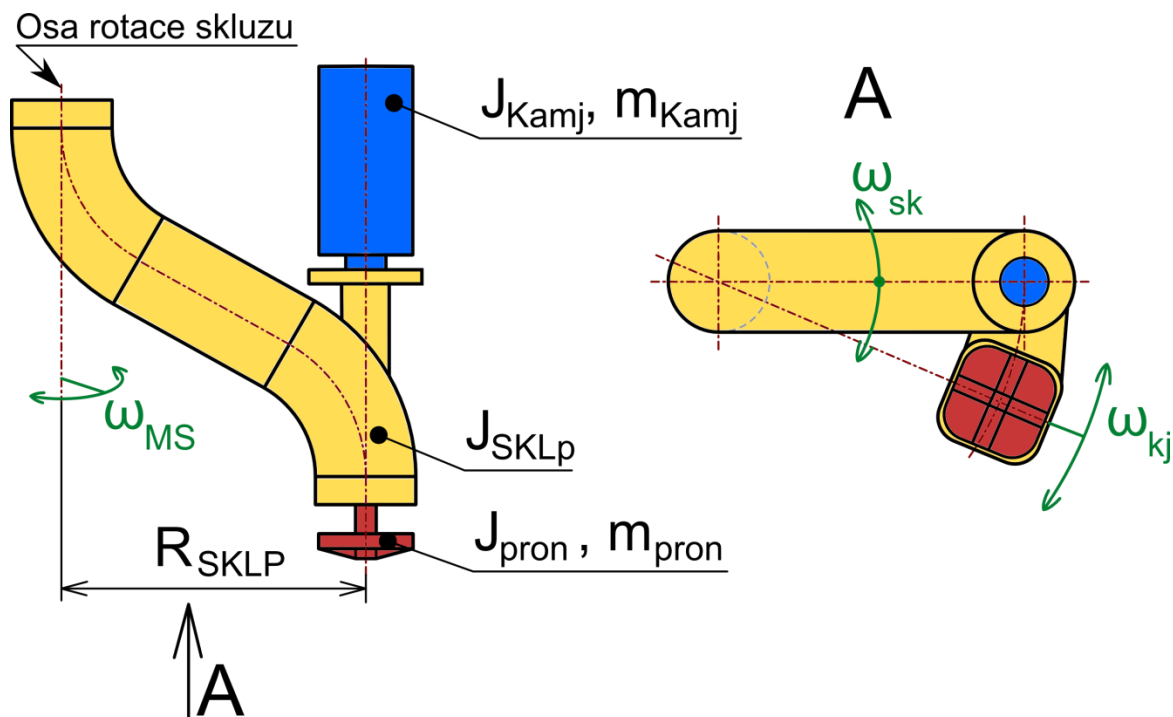
J_{pron} [kg·m²] návrhový moment setrvačnosti prorážče – vzhledem k ose pístní tyče

J_{prop} [kg·m²] moment setrvačnosti pohonu prorážecího trnu

J_{prot} [kg·m²] návrhový moment setrvačnosti prorážecího trnu

4.5 POHON PRO POHYB SKLUZU

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.1, tak je možné pro pohon pohybu skluzu z parkovací polohy do polohy pracovní a zpět použít buď řešení pohonu pomocí elektromotoru (popř. pneumatického rotačního motoru) s převodovkou, nebo pomocí rotačního kyvného pneumatického pohonu. Z hlediska výše nákladů na nákup jednotlivých prvků pohonu a podle výše výrobních nákladů na výrobu jednotlivých částí pohonu vychází výhodněji varianta s pohonem pomocí rotačního kyvného pneumatického pohonu, protože při zástavbě tohoto pohonu nebude třeba použít žádnou převodovku či dodatečně vyrábět ozubená soukolí => pro prvotní návrh uvažujeme použití právě rotačního kyvného pneumatického pohonu.



Obr. 4-7 Schéma pro návrh pohonu

Při návrhu pohonu je třeba určit potřebnou hodnotu krouticího momentu na hřídeli, či náboji motoru. Tato hodnota je potřeba pro překonání setrvačných a pasivních odporů působících při zrychlování a zpomalování skluzu a to při pohybu z parkovací do pracovní polohy a zpět. Při prvotním návrhu pohonu je pohon dimenzován pouze vůči setrvačným odporům, přičemž



pasivní odpory jsou zanedbány. Pro určení potřebného minimálního krouticího momentu na náboji kyvného pohonu je využita metoda redukce. Podstata této metody spočívá v nahrazení původní soustavy jednoduchou soustavou, jejímž základním parametrem je ekvivalentní moment setrvačnosti pro rotační pohyb vztažného členu (pro translační pohyb vztažného členu je základní parametr ekvivalentní hmotnost).

4.5.1 URČENÍ EKVIVALENTNÍHO MOMENTU SETRVAČNOSTI

Za vztažný člen je zvolen náboj kyvného pohonu, ke kterému jsou následně vztaženy ostatní prvky soustavy (skluz, kamerová jednotka, prorážec) => *kinematické vazby ve tvaru:*

$$\omega_{sk} = \omega_{MS} \quad (4.5)$$

$$\omega_{kj} = \omega_{MS} \quad (4.6)$$

kde:

ω_{sk}	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost rotace skluzu
ω_{kj}	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost rotace kamerové jednotky
ω_{MS}	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost rotace kyvného pohonu

SESTAVENÍ ROVNICE ENERGETICKÉ ROVNOVÁHY

$$\frac{1}{2}J_{ep}\omega_{MS}^2 = \frac{1}{2}(J_{SKLP}\omega_{sk}^2 + J_{Kamp}\omega_{kj}^2 + J_{prp}\omega_{sk}^2) \quad (4.7)$$

$$J_{ep}\omega_{MS}^2 = J_{SKLP}\omega_{sk}^2 + (J_{Kamj} + m_{Kamj}R_{SKLP}^2)\omega_{kj}^2 + (J_{pron} + m_{pron}R_{SKLP}^2)\omega_{sk}^2$$

$$J_{ep}\omega_{MS}^2 = (J_{SKLP} + J_{pron} + m_{pro}R_{SKLP}^2)\omega_{MS}^2 + (J_{Kamj} + m_{Kamj}R_{SKLP}^2)\omega_{MS}^2 \quad (4.8)$$

Při podělení rovnice (4.8) členem ω_{MS}^2 získáme rovnici pro hledaný *ekvivalentní moment setrvačnosti* ve tvaru

$$J_{ep} = J_{SKLP} + J_{pron} + J_{Kamj} + (m_{pron} + m_{Kamj})R_{SKLP}^2 \quad (4.9)$$

$$J_{ep} = 2,172 + 0,028 + 0,028 + (13,95 + 8,77) \cdot 0,45^2 = 6,8288 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{ep} = 6,829 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

kde:

J_{ep}	[kg·m ²]	předběžný ekvivalentní moment setrvačnosti
J_{SKLP}	[kg·m ²]	předběžný moment setrvačnosti skluzu
J_{Kamp}	[kg·m ²]	předběžný moment setrvačnosti kamerové jednotky – vzhledem k ose rotace skluzu
J_{prp}	[kg·m ²]	předběžný moment setrvačnosti prorážече – vzhledem k ose rotace skluzu
J_{Kamj}	[kg·m ²]	moment setrvačnosti kamerové jednotky – vzhledem ke středové ose kamerové jednotky
m_{Kamj}	[kg]	hmotnost kamerové jednotky
R_{SKLP}	[m]	předběžný poloměr skluzu



4.5.2 URČENÍ POTŘEBNÉHO KROUTICÍHO MOMENTU POHONU

Velikost potřebného krouťicího momentu pohonu se určí na základě součinu předběžného ekvivalentního momentu setrvačnosti J_{ep} a velikosti úhlového zrychlení pohonu ε_{MS} při zrychlování, nebo zpomalování pohybu skluzu na začátku nebo konci každého pohybu.

STANOVENÍ VELIKOSTI ÚHLOVÉHO ZRYCHLENÍ POHONU

Pro stanovení úhlového zrychlení je třeba nejdříve znát úhlovou rychlost rovnoměrného pohybu po kružnici (úhlová rychlost rotace skluzu). Tuto rychlost stanovíme z předpokladu, že celkovou úhlovou dráhu o délce 180° urazí skluz za dobu 4 sekund a to s využitím pouze rovnoměrného pohybu po kružnici.

$$\omega_{sk} = \frac{\varphi_{sk}}{t_{nc}} \quad (4.10)$$

$$\omega_{sk} = \frac{\pi}{4} = 0,7854 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\omega_{sk} = 0,785 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

φ_{sk} [rad] celková úhlová dráha pohybu skluzu – její velikost odpovídá úhlu $180^\circ \Rightarrow \varphi_{sk} = \pi \cong 3,14 \text{ rad}$

t_{nc} [s] celkový návrhový čas pohybu skluzu – při návrhu uvažována hodnota celkového návrhového času pohybu skluzu $t_{nc} = 4 \text{ s}$

Velikost úhlového zrychlení určíme z úhlové rychlosti rotace skluzu a z délky úhlové dráhy, po které bude probíhat zrychlování, nebo zpomalování rotačního pohybu. Pro zrychlování i zpomalování uvažujeme úhlovou dráhu o stejné velikosti, která odpovídá úhlu 10° .

$$\omega_{sk} = \varepsilon_{MS} t_{nzp} \quad (4.11)$$

$$\varphi_{skr} = \frac{1}{2} \varepsilon_{MS} t_{nzp}^2 \quad (4.12)$$

Po vyjádření času t_{nzp} z rovnice (4.11) jej dosadíme do rovnice (4.12), kterou následně vhodně upravíme, čímž získáme rovnici pro určení velikosti hledaného úhlového zrychlení pohonu.

$$\varepsilon_{MS} = \frac{\omega_{sk}^2}{2 \cdot \varphi_{skr}} \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_{MS} = \frac{0,785^2}{2 \cdot 0,1745} = 1,76569 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\varepsilon_{MS} = 1,766 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

kde:

ε_{MS} [rad·s⁻²] úhlové zrychlení pohonu

t_{nzp} [s] návrhová doba zrychlování pohybu



φ_{skr} [rad] úhlová dráha při rozběhu nebo brzdění – její velikost odpovídá úhlu $10^\circ \Rightarrow \varphi_{skr} \cong 0,1745 \text{ rad}$

STANOVENÍ POTŘEBNÉHO KROUTICÍHO MOMENTU POHONU

$$M_{ppk} = J_{ep} \varepsilon_{MS} \quad (4.14)$$

$$M_{ppk} = 6,829 \cdot 1,766 = 12,060 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{ppk} = 12,1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

kde:

M_{ppk} [N·m] Potřebný krouticí moment pohonu

4.5.3 VÝBĚR ROTAČNÍHO KYVNÉHO POHONU

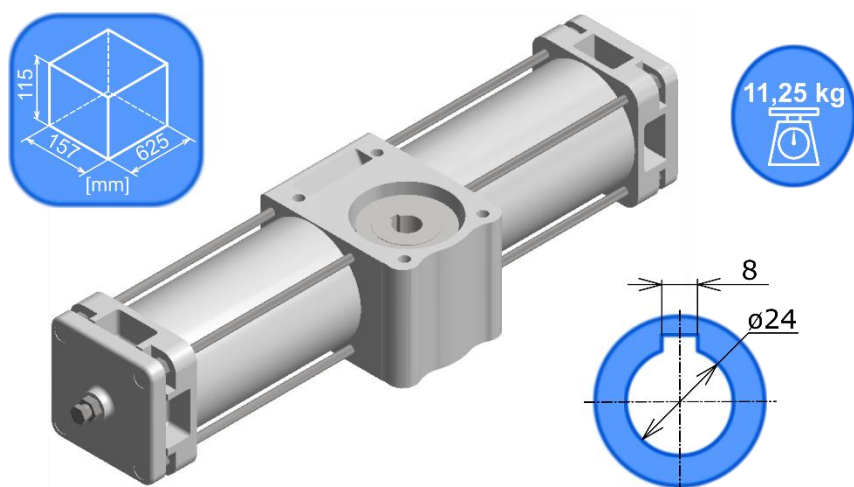
Na základě stanoveného potřebného krouticího momentu pohonu a s přihlédnutím k požadavkům vysoké spolehlivosti a odolnosti je vybrán dvojčinný rotační kyvný pneumatický pohon od výrobce Stránský a Petržík s označením:

1500151111000180

TECHNICKÉ PARAMETRY VYBRANÉHO ROTAČNÍHO KYVNÉHO POHONU

[13, s. 34]

Průměr pístu	100 mm
Krouticí moment při tlaku 0,6 MPa	173 N·m
Úhel natočení výstupního hřídele	180°
Hmotnost	11,25 kg
Regulace koncové polohy	±5°
Maximální provozní tlak	1,0 MPa

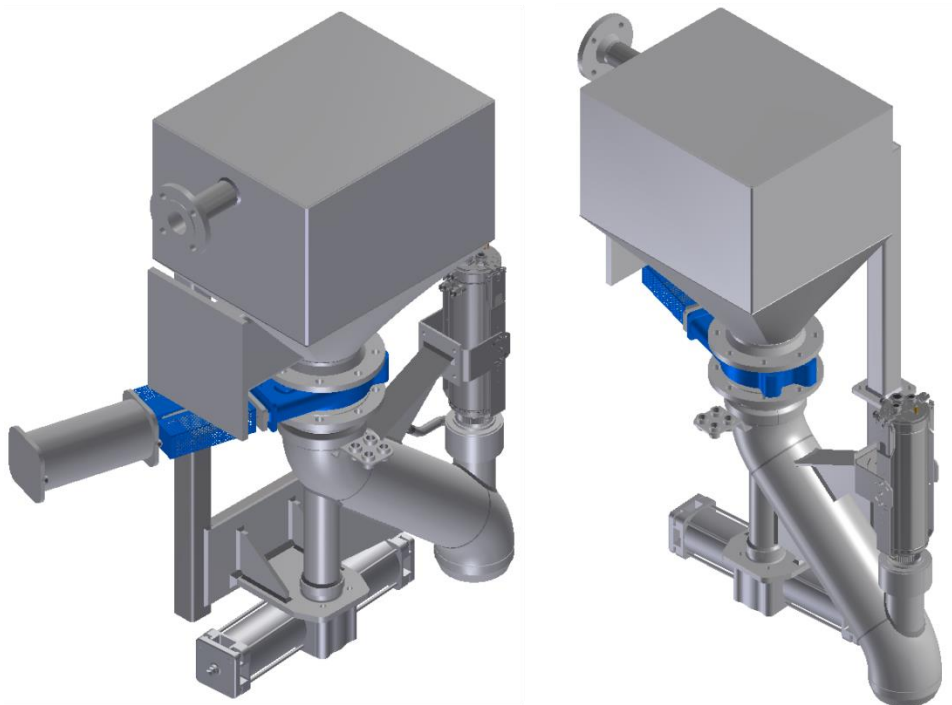


Obr. 4-8 Vybraný rotační kyvný pohon [13, s. 34-35]



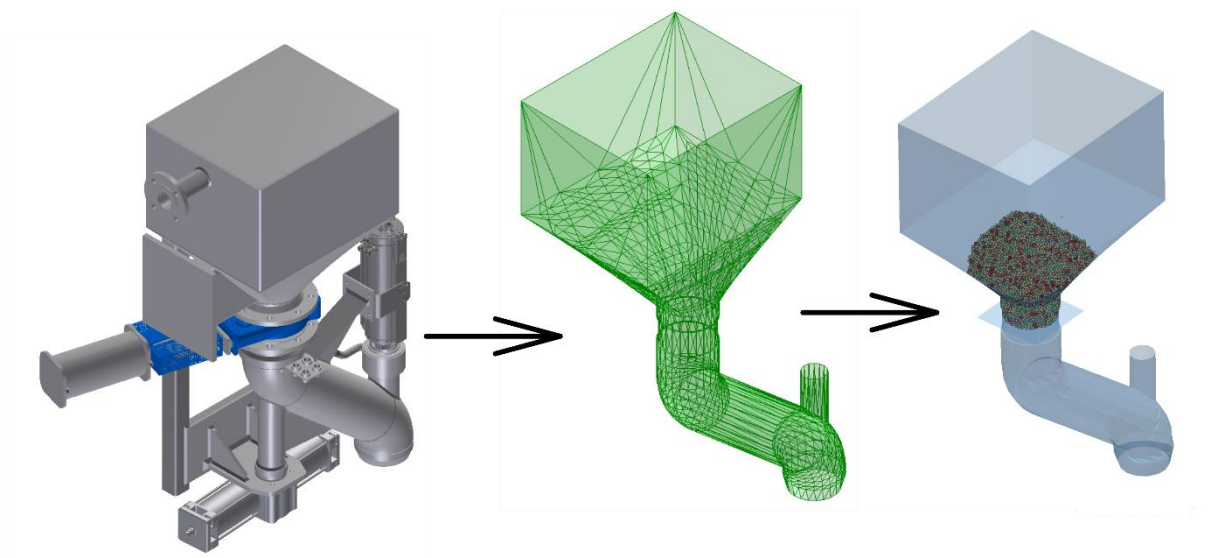
4.6 ZÁKLADNÍ PODOBA NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ

Na základě dříve určených komponent a možných prostorových dispozic bylo navrženo zařízení odpovídající vybrané variantě v následující podobě:



Obr. 4-9 Navržená podoba zařízení pro zásyp odpichového otvoru

Po získání základního modelu zařízení bylo možné vytvořit geometrii funkčních ploch, které jsou ve styku s materiálem a které budou následně důležité při ověření chování materiálu v simulačním programu YADE.



Obr. 4-10 Převod funkční geometrie do programu YADE



5 OVĚŘENÍ CHOVÁNÍ MATERIÁLU PŘI PROCESU ZASÝPÁNÍ

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4, tak simulace chování materiálu při procesu zasýpání, která bude provedena v programu YADE, je použita, aby bylo známo ještě před vlastní výrobou zařízení, jestli navržený koncept a funkční tvary umožní zasýpání odpichového otvoru pece s co nejmenším možným podílem materiálu, který spadne mimo odpichový otvor. Při správně sestavené simulaci, bude v případě špatného plnění odpichového otvoru možné geometrii vhodně upravit ještě před vlastní výrobou zařízení a tím snížit dobu a náklady potřebné na výrobu, úpravu a testování prototypu zařízení. Ze simulace je následně možné vytvořit animaci, která může být použita při propagaci a prezentaci zařízení zákazníkům.

5.1 ZÁKLADNÍ POPIS SIMULAČNÍHO PROGRAMU YADE

YADE je open-source softwarová struktura určená pro řešení modelů diskretních prvků pomocí metody diskretních prvků. Výpočtové části struktury jsou zapsány v jazyku C++, přičemž je využíváno flexibilních objektů, čímž je umožněna nezávislá implementace nových rozhraní a výpočtových algoritmů. Pro tvorbu simulace, zpracování výsledků, odlaďování a ovládání simulace není použito grafické rozhraní, ale vše je řešeno pomocí zápisu příslušných operací v programovacím jazyku Python.

Zápis jednotlivých operací je možné provádět postupně přímo v programu YADE, ovšem častěji se používá zápis příkazů do textového souboru (tzv. zdrojový kód simulace), který se následně v programu YADE otevře a spustí.

5.1.1 STRUKTURA ZDROJOVÉHO KÓDU SIMULACE

[14]

```
import time
from yade import qt
from yade import ymport
## PhysicalParameters
Density=2400
frictionAngle=radians(35)
tc = 0.001
en = 0.3
es = 0.3

## Import wall's geometry
facetMat=0, materials.append(ViscElMat(frictionAngle=frictionAngle,tc=tc,en=en,et=es))
sphereMat=0, materials.append(ViscElMat(density=Density,frictionAngle=frictionAngle,tc=tc,en=en,et=es))
fctIds=0, bodies.append(ymport.stl('baraban.stl',color=(1,0,0),material=facetMat))
## Spheres
sphereRadius = 0.1
nbSpheres = (10,10,10)
for i in xrange(nbSpheres[0]):
    for j in xrange(nbSpheres[1]):
        for k in xrange(nbSpheres[2]):
            x = (i*2 - nbSpheres[0])*sphereRadius*1.1
            y = (j*2 - nbSpheres[1])*sphereRadius*1.1
            z = (k*2 - nbSpheres[2])*sphereRadius*1.1
            s=sphere([x,y,z],sphereRadius,material=sphereMat)
            O.bodies.append(s)

## Timestep
O.dt=.2*tc

## Engines
O.engines=[
    ## Resets forces and momenta the act on bodies
    ForceResetter(),
    ## Using bounding boxes find possible body collisions.
    InsertionSortCollider([Bo1_Sphere_Aabb(),Bo1_Facet_Aabb()]),
    ## Interactions
    InteractionLoop(
        ## Create geometry information about each potential collision.
        [Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(), Ig2_Facet_Sphere_ScGeom()],
        ## Create physical information about the interaction.
        [Ip2_ViscElMat_ViscElMat_ViscElPhys()],
        ## Constitutive law
        [Law2_ScGeom_ViscElPhys_Basic()],
    ),
    ## Apply gravity
    ## Cundall damping must be disabled!
    NewtonIntegrator(damping=0,gravity=[0,-9.81,0]),
    ## Apply kinematics to walls
    RotationEngine(ids=fctIds,rotationAxis=[0,0,1],rotateAroundZero=True,angularVelocity=1.9)
    ## Saving results
    VTKRecorder(virtPeriod=0.04,filename='/tmp/stlmp-',recorders=['spheres','facets']),
]

qt.View()
O.saveTmp()
O.run()
```

použité knihovny

vstupy simulace

iterační řešící engine

výstupy simulace

Obr. 5-1 Základní části zdrojového kódu



Základní podoba zápisu zdrojového kódu je společně s vyznačenými základními částmi zobrazena na Obr. 5-1. V úvodu zdrojového kódu se nachází část zdrojového kódu, kde dochází ke specifikování názvů jednotlivých knihoven, které obsahují přídatné funkce, které jsou dále použity při tvorbě vstupů simulace, iteračního řešícího enginu, či při tvorbě výstupů simulace. Mezi tyto knihovny patří např. knihovna TIME, QT, UTILS, PACK, PLOT.

V druhé části zdrojového kódu se nacházejí vstupy simulace, které zahrnují definici částic simulovaného materiálu a definici funkční geometrie, která je v kontaktu s materiálem. Specifikace materiálů ploch funkční geometrie a jednotlivých částic materiálu je také zahrnuta v této části kódu. Určení velikosti časového kroku iterace může probíhat v této části kódu, nebo ji lze zařadit až do poslední části zdrojového kódu (do výstupů simulace). Jednotlivé částice je možné generovat přímo, nebo je načíst z předem vytvořeného textového souboru. Podobně je také možné vytvořit geometrii zápisem ve zdrojovém kódu s využitím vestavěných funkcí, nebo lze geometrii načíst z externího souboru s formátu souboru STL.

Třetí část zdrojového kódu popisuje iterační řešící engine, který slouží k sestavení základních vlastností simulace. Tento engine se skládá z funkcí zjišťujících existenci kontaktu mezi prvky simulace, funkcí popisujících interakce mezi jednotlivými prvky a funkcí popisujících vnější působení na prvky simulace. Engine může být dále doplněn o prvek sloužící k exportu průběžných dat, která lze následně použít pro vizualizaci průběhu simulace v příslušných programech. Funkce popisující interakce mezi prvky simulace se skládají ze tří základních typů funkcí:

- **Ig2** – Řeší přesnou konfiguraci kolize a vytváří IGeom instanci asociativní s interakcí, pokud existuje kolize příslušných dvou prvků.
- **Ip2** – Na základě kombinace dvou materiálů prvků, které jsou v kolizi, vytváří IPHys instanci, která popisuje fyzikálně mechanické vlastnosti prvků v kolizi.
- **Law2** – Funkce založená na kombinaci IGeom a IPHys instancí pro každý partikulární kontakt. Law2 představuje konstitutivní zákon, který řeší interakci výpočtem sil na interagujících prvcích, nebo jinak aktualizuje interakční stavové veličiny.

V poslední části zdrojového kódu se nachází prvky určené ke generování výstupů simulace v podobě grafů, či pozic jednotlivých prvků simulace. Také se zde nachází blok funkcí k otevření ovládacího grafického rozhraní pro ovládání chodu simulace a zobrazení průběžných výsledků.

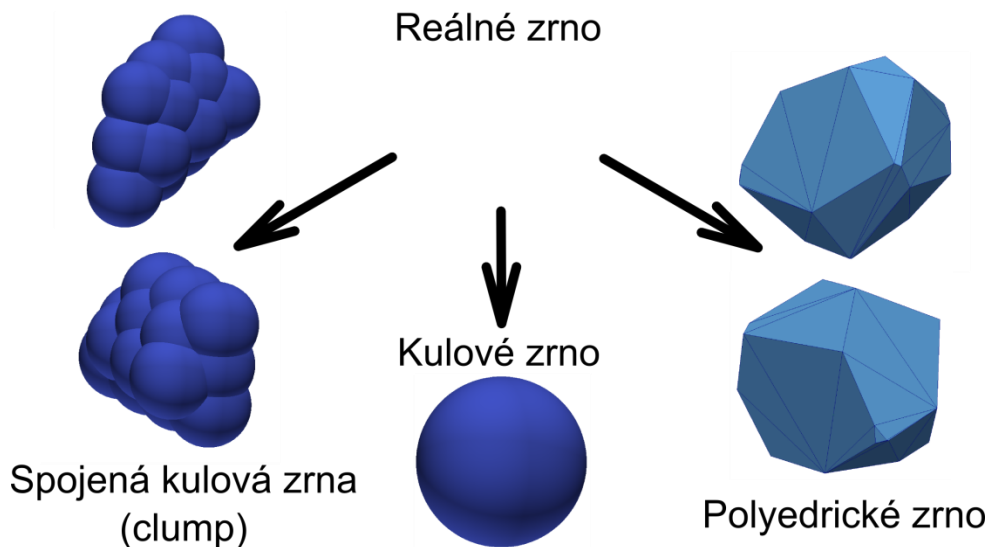
5.2 URČENÍ VSTUPŮ SIMULACE

Před vlastním vytvářením iteračního řešícího enginu, je důležité stanovit všechny potřebné vstupy simulace, především vhodně vybrat náhradu reálného zrna materiálu a definovat potřebné materiálové vlastnosti pro materiál funkční geometrie a zrn simulovaného materiálu.

5.2.1 NÁHRADA REÁLNÉHO TVARU ZRN MATERIÁLU PRO SIMULACI

Náhrady reálných tvarů zrn je třeba volit vhodně s ohledem k tvarům zrn reálného materiálu a s ohledem k účelu a použití simulace. Pro náhradu zrn je možné použít tři základní tvary zrn:

- kulové zrno
- zrno tvořené spojením více koulí – tzv. clump
- polyedrické zrno



Obr. 5-2 podoba náhrad reálného tvaru zrn materiálu

Pokud by zrna reálného materiálu měla oválný tvar, tak se za náhradu použije clump popř. kulové zrno. Ovšem zrna reálného zásypového materiálu mají tupouhý až ostrouhý tvar zrn => nejreálnějšího chování materiálu lze dosáhnout při vhodně definovaných náhradách pomocí polyedrických zrn, u kterých ovšem nastává určitý problém s výraznou výpočetní náročností a tím i s prodloužením výpočetního a simulačního času. Pro získání nižší výpočetní náročnosti a zkrácení simulačních časů je možné použít jako náhrady vhodně sestavené clumpy, které vykazují podobné chování jako částice s polyedrickými zrny.

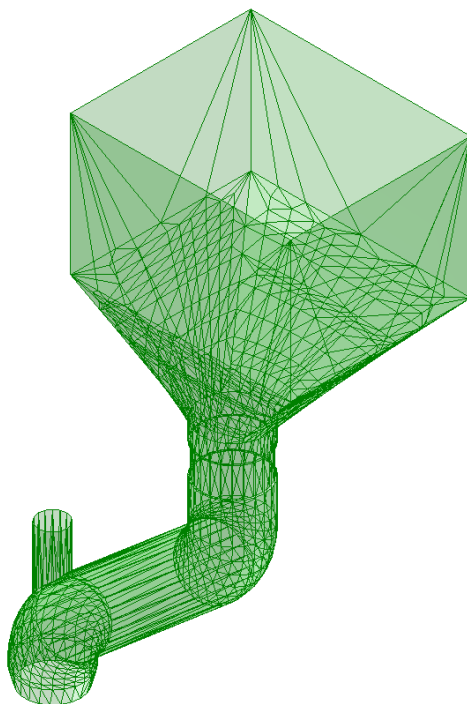
Vzhledem k výpočetní náročnosti simulace s polyedrickými zrny či zrny typu clump a s přihlédnutím k faktu, že simulace je určena pouze pro ověření chování materiálu, přičemž není kladen zásadní důraz na co nejlepší popsání reálného chování materiálu, je tedy možné jako náhradu materiálu použít kulová zrna. Použití kulových zrn sebou přináší i jisté nevýhody, jako je snížená přesnost výsledků, a výrazný vliv rotace kuličky v kontaktu s druhou kuličkou, či rovinnou plochou. Aby bylo možné kuličku jako náhradu použít, je třeba omezit rotaci v kontaktu kulička-kulička a kulička-plocha. Toto omezení rotačního pohybu je možné realizovat přímo omezením počtu stupňů volnosti jednotlivých kuliček (funkce BlockedDOFs), nebo rotaci omezit pomocí parametrů uvnitř iteračního řešícího enginu (porovnání jednotlivých možností omezení rotace kuličky provedeno v kapitole 5.5).

5.2.2 FUNKČNÍ GEOMETRIE ZAŘÍZENÍ

Základním stavebním prvkem každé geometrie je plocha omezená trojúhelníkem, což umožňuje definici plochy právě pomocí tří rohových bodů trojúhelníku. Jak již bylo naznačeno v kapitole 4.6, byla podoba funkční geometrie vytvořena na základě předběžného návrhu v programu Autodesk Inventor a následně exportována do souboru ve formátu STL, který obsahuje seznam jednotlivých trojúhelníkových ploch. Tento soubor je následně využit pro import funkční geometrie do simulačního prostředí programu YADE. Při exportu do formátu STL je možné zvolit si výslednou přesnost („hladkost“) vzniklé geometrie a tomu odpovídající počet trojúhelníkových prvků příslušné geometrie. Přesnost exportované geometrie je třeba volit s ohledem k požadavkům na přesnost výsledků simulace a s ohledem k výpočtové náročnosti (čím více trojúhelníkových ploch, tím přesnější geometrie je, ovšem

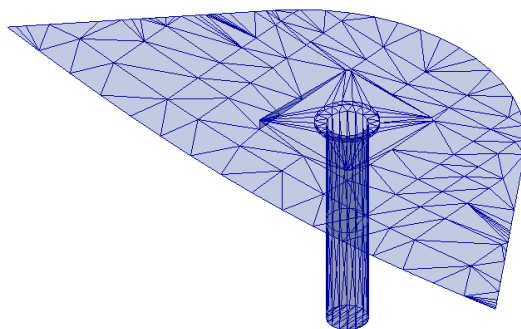


zvyšuje se tím výpočtová náročnost). Pro model zařízení byla vyexportována geometrie s celkovým počtem 1956 trojúhelníkových ploch.

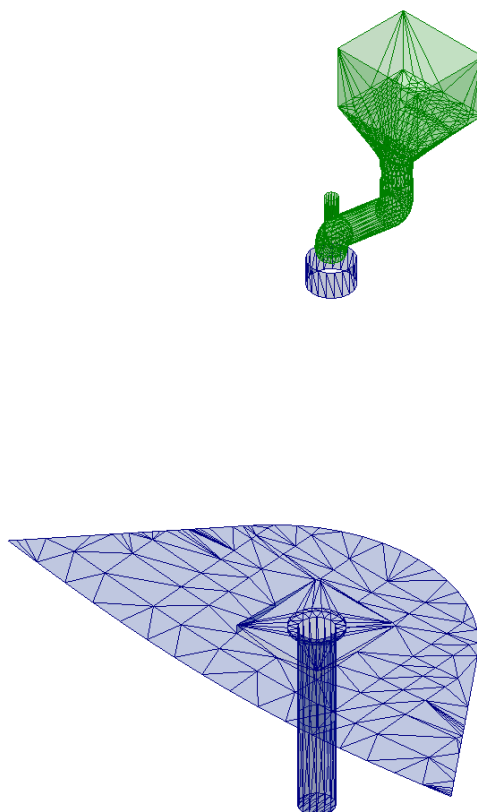


Obr. 5-3 Funkční plochy zařízení pro zásyp odpichového otvoru

Funkční geometrie zařízení je dále doplněna o geometrii odpichového otvoru s částí dna elektrické obloukové pece, přičemž model byl opět vytvořen v programu Autodesk Inventor a následně uložen do souboru ve formátu STL, který obsahuje 423 trojúhelníkových ploch.



Obr. 5-4 Funkční plochy části elektrické obloukové pece



Obr. 5-5 Kompletní podoba sítě funkčních ploch pro simulaci

5.2.3 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI PRO FUNKČNÍ GEOMETRII A PRO ZRNA MATERIÁLU

Pro zadání jednotlivých materiálových vlastností je nejdříve nutné vytvořit příslušný materiálový model pro každý druh materiálu. Tento materiálový model sdružuje příslušné mechanicko-fyzikální vlastnosti důležité pro daný typ materiálového modelu. YADE nabízí na výběr ze 14 různých materiálových modelů, ovšem pro případ sypání materiálu a jeho pohyb po skluzu jsou nejvíce vhodné dva následující materiálové modely s označením:

- FrictMat – elastický model materiálu s kontaktním třením
- ViscElMat – viskoelastický model materiálu

Každý z materiálových modelů umožňuje popis materiálu na základě rozdílných parametrů. Jednotlivé parametry těchto dvou materiálových modelů jsou uvedeny v příloze D. Pro účel simulování sypání a pohybu materiálu po skluzu je vybrán materiálový model FrictMat, u kterého je nezbytné definovat modul pružnosti v tahu, hustotu materiálu částic, Poissonovu konstantu a velikost úhlu vnitřního tření materiálu. V případě, že by některý z parametrů nebyl definován, bude pro něj automaticky použita přednastavená výchozí hodnota (modul pružnosti $30 \cdot 10^9$ Pa, hustota materiálu $2\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, úhel vnitřního tření $0,5236 \text{ rad}$, Poissonova konstanta $0,3$) [14, s. 41].

Při zásypu odpichového otvoru obloukové pece dochází ke kontaktu olivínu (zásypový materiál) s ocelovými částmi zařízení a ke kontaktu s žáruvzdornou vyzdívkou pece a odpichového otvoru, přičemž materiál žáruvzdorné vyzdívky je nejčastěji založen na bázi MgO a Al_2O_3 => nutná definice tří materiálů s rozdílnými vlastnostmi.



OLIVÍN

Již v kapitole 3 byly určeny základní materiálové vlastnosti olivínu. Z těchto jsou použity pouze Youngův modul (140 GPa) a hustota částic olivínu ($3\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^3$). Úhel vnitřního tření materiálu byl určen v kapitole 3.3 a jeho hodnota dosahuje $36,2^\circ$. Jediným neznámým parametrem je prozatím poissonova konstanta, která je ovšem určena dle [15, s. 2] pro olivín obsahující 90% Forsteritu na hodnotu 0,251.

OCEL

Pro ocel s hustotou $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^3$ a Poissonovou konstantou o velikosti 0,3 byl uvažován modul pružnosti oceli o velikosti 210 GPa. Jelikož ocelový materiál bude v simulaci použit pouze jako materiál funkčních ploch, tak je možné velikost úhlu vnitřního tření položit rovnu hodnotě experimentálně stanoveného úhlu tření mezi ocelí a materiálem, který je roven úhlu o velikosti $23,4^\circ$ určeného v kapitole 3.2.

ŽÁRUVZDORNÁ VYZDÍVKA

Kontakt olivínu s žáruvzdornou vyzdívkou odpichového otvoru může být ovlivněn několika faktory. Mezi tyto faktory lze zařadit možnost přítomnosti zbytkové roztavené oceli v místě kontaktu olivínu s žáruvzdornou vyzdívkou (toto způsobí výrazné ovlivnění chování materiálu a výrazně změni kontaktní síly) a také nerovnoměrný vysokoteplotní opal, který má za následkem vznik hrboлатého povrchu žáruvzdorné vyzdívky (ovlivnění směru odrazu olivínu od vyzdívky). Vzhledem k těmto faktorům je pro materiál vyzdívky stanovena přibližná hodnota modulu pružnosti a hustoty na základě produktového listu MgO tvárníc [16, s. 2-3]. Modul pružnosti je tedy roven 25 GPa a hustota materiálu vyzdívky je rovna $2\,950\text{ kg}\cdot\text{m}^3$. Úhel tření mezi materiálem vyzdívky odpichového otvoru a olivínem by se velmi těžko definoval, jelikož je závislý na stavu opotřebovaného povrchu vyzdívky a kontaminaci povrchu roztavenou ocelí. Navíc olivín bude dopravován do odpichového otvoru, kterým byla odpíchována roztavená ocel $\Rightarrow$ ovlivnění vlastností povrchové vrstvy vyzdívky právě případnými zbytky roztavené oceli a zvýšenou teplotou vlivem kontaktu vyzdívky s roztavenou ocelí. Experimentální určení příslušného třecího úhlu by proto bylo velmi náročné a z toho důvodu je hodnota úhlu tření stanovena pro potřeby simulace pouze orientačně a to na hodnotu úhlu 30° , která je větší než hodnota úhlů tření olivínu o ocelový materiál a zároveň je menší než hodnota syného úhlu olivínu. Pro případ Poissonovy konstanty je situace obdobná, jako u úhlu tření mezi materiálem vyzdívky a olivínem. Poissonova konstanta je tedy rovna hodnotě 0,3.

Jednotlivé parametry pro materiál žáruvzdorné vyzdívky jsou zvoleny orientačně, přičemž by jejich hodnoty neměli zásadně ovlivnit výsledky simulace.

```
idsteel=0.materials.append(FrictMat(density=7850,frictionAngle=radians(23.4)\
                                   ,poisson=0.3,young=210e9,label='steel')

idolivine=0.materials.append(FrictMat(density=3300,frictionAngle=radians(36.2)\
                                   ,poisson=0.251,young=140e9,label='olivine')

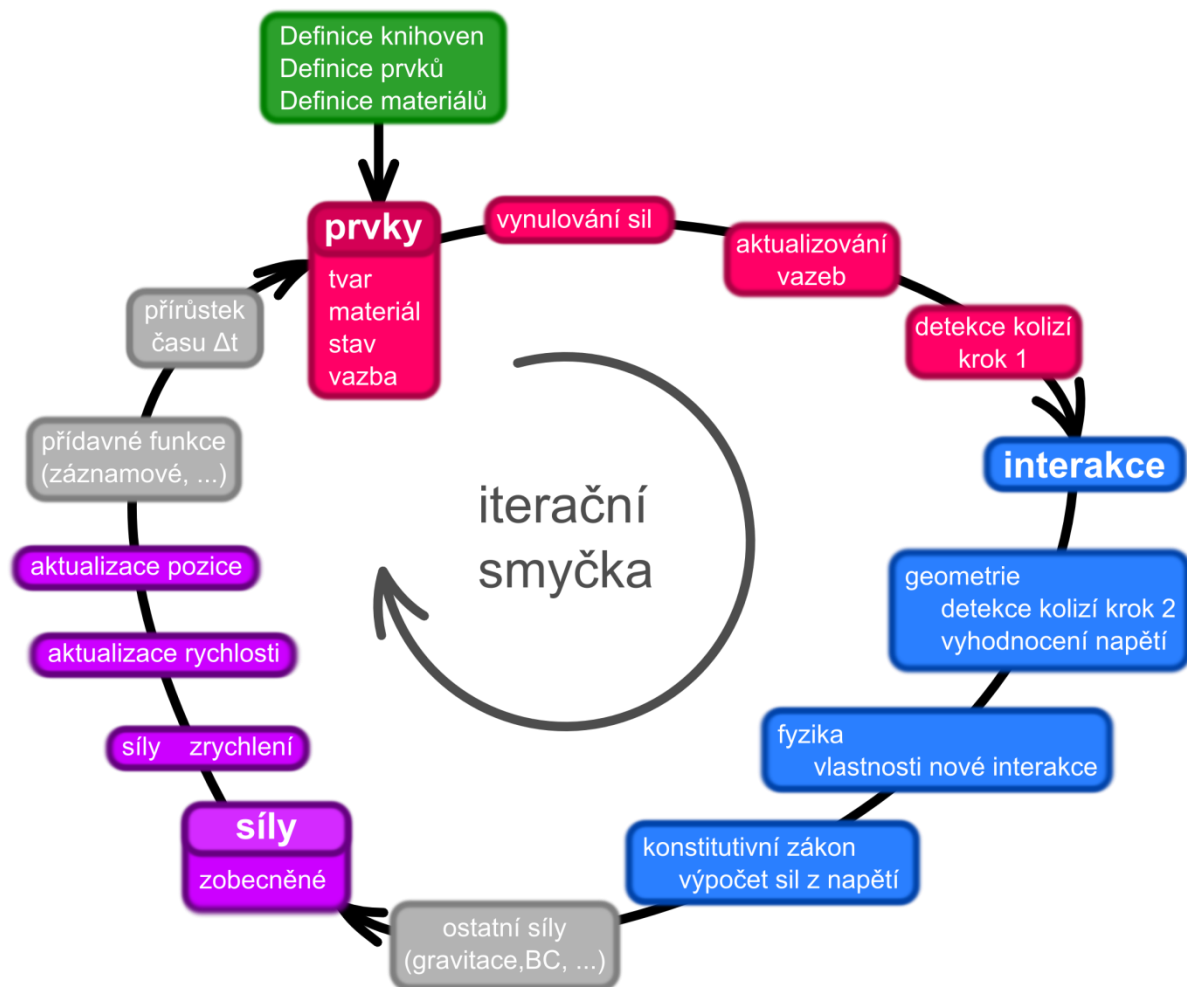
idMgOBrick=0.materials.append(FrictMat(density=2950,frictionAngle=radians(30)\
                                   ,poisson=0.3,young=25e9,label='MgOBrick')
```

Obr. 5-6 Podoba zápisu jednotlivých materiálů ve zdrojovém kódu simulace



5.3 SESTAVENÍ ITERAČNÍHO ŘEŠÍČÍHO ENGINEU

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.1.1, tak v řešícím engineu jsou popsány jednotlivé funkce, které popisují geometrické vazby, fyzikální charakter vzniklého kontaktu mezi prvky simulace a vnější silové působení na jednotlivé prvky simulace. Podobu postupu každého iteračního kroku lze popsat pomocí následujícího obrázku:



Obr. 5-7 Schéma iterační smyčky [14, s. 11]

5.3.1 FUNKCE Ig2

[14]

Použití funkce typu Ig2 je závislé na typu použitých prvků v simulaci a také musí být v souladu s použitou funkcí Law2. Vzhledem k použití pouze kulových zrn a rovinných ploch jsou použity následující dvě funkce:

- **Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom** – funkce řešící dvojici kontaktů koule-koule
- **Ig2_Facet_Sphere_ScGeom** – funkce popisující kontakt dvojice koule-rovinná plocha



5.3.2 FUNKCE Ip2

[14]

YADE nabízí na výběr velký počet typů Ip2 funkcí (celkem 22 typů), ovšem jen některé jsou vhodné pro použití při simulaci sypání materiálu a jeho pohybu po skluzu. O vhodnosti jednotlivých typů rozhoduje především druh použitého materiálového modelu a také to zda je funkce v souladu s použitým konstitutivním zákonem (Law2 funkce). Vzhledem k vybranému materiálovému modelu FrictMat je možné použít následující Ip2 funkce:

- **Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys** - Vytváří FrictPhys ze dvou materiálových modelů FrictMat.
- **Ip2_FrictMat_FrictMat_MindlinPhys** – Vytváří FrictPhys ze dvou materiálových modelů FrictMat. Některé fyzikální parametry potřebné pro získání normálové a smykové tuhosti jsou počítány dle Hertz-Mindlinkovi formulace.
- **Ip2_FrictMat_FrictMat_ViscoFrictPhys** – Vytváří FrictPhys ze dvou materiálových modelů FrictMat.

Z výše zmíněného seznamu Ip2 funkcí je vybrána (v návaznosti na Law2 funkci) funkce s názvem **Ip2_FrictMat_FrictMat_MindlinPhys**¹, která umožňuje přesnou definici úhlu tření mezi jednotlivými kombinacemi materiálů, definici koeficientu restituce pro jednotlivé kombinace materiálů a také umožňuje definici odporu proti rotaci prvků simulace.

5.3.3 FUNKCE LAW2

[14]

Tyto funkce jsou základním kritériem při výběru Ig2 a Ip2 funkcí, přičemž neexistuje vnitřní omezení pro výběr funkce Law2, protože tato funkce pouze aplikuje síly bez toho, aby vytvářela nové objekty. Jediným určitým omezením při výběru typu funkce je vhodnost a použitelnost funkce pro daný simulační úkon. U velkého počtu simulací se používá převážně jedna Law2 funkce, ovšem je možné použít i kombinaci několika Law2 funkcí v jedné simulaci, ale tím dochází ke zvýšení výpočetní náročnosti a tím i k prodloužení simulačních časů. V programu YADE je prozatím sepsáno celkem 26 různých typů Law2 funkcí, přičemž pro aplikaci na simulaci pohybu materiálu při procesu zasypání byla vybrána funkce s označením **Law2_ScGeom_MindlinPhys_Mindlin**, která představuje konstitutivní zákon založený na Hertz-Mindlinově teorii. Zvolená Law2 funkce zahrnuje nelineární pružnost v normálovém směru, jak předpovídá Hertz pro dva neshodné pružné kontaktní prvky. Naproti tomu se ve směru smyku sestavuje zjednodušený případ bez skluzu, který je popsán v Mindlinově teorii, kde je zajištěn lineární vztah mezi posouvající silou a tangenciálním posunutím. Dále je ve funkci zakomponováno Mohr-Coulombovo kritérium pro určení maximální třecí síly, která může být vytvořena v kontaktu. Kromě tohoto je možné do výpočtu zahrnout vliv lineárního viskózního tlumení prostřednictvím definování parametrů β_n a β_s .

5.4 STANOVENÍ KOEFICIENTU RESTITUCE

[17]

Při vzájemné srážce dvou těles pohybujících se rychlostí v dochází k jejich odrazu a následnému pohybu rychlostí v' , přičemž platí $v > v'$. Tento jev je popsán v Newtonově teorii rázů, která říká, že relativní rychlost těles po srážce je menší než rychlost těles

¹ Podrobnější popis Ip2 funkce včetně popisu jednotlivých argumentů funkce přiložen v příloze E



před rázem a to vlivem ztráty části energie plastickou deformace (popř. jiným nevratným dějem v dotykové ploše). Poměr relativní rychlosti po rázu k relativní rychlosti před rázem vyjadřuje koeficient restituce, který následně umožňuje vypočítat, jak bude vypadat pohyb těles po srážce, pokud jsou známy podmínky před srážkou těles.

$$\varepsilon_{res} = \frac{v'_1 + v'_2}{v_1 + v_2} \quad (5.1)$$

kde:

ε_{res}	[-]	koeficient restituce
v'_1	[m·s ⁻¹]	rychlost tělesa 1 po srážce
v'_2	[m·s ⁻¹]	rychlost tělesa 2 po srážce
v_1	[m·s ⁻¹]	rychlost tělesa 1 před srážkou
v_2	[m·s ⁻¹]	rychlost tělesa 2 před srážkou

Pro základní experimentální stanovení koeficientu restituce, bude vždy docházet ke kontaktu jednoho pohybujícího se tělesa s druhým tělesem, které bude v klidu => zjednodušení rovnice (5.1) pouze na rovnici popisující změnu rychlosti pohybujícího se tělesa.

$$\varepsilon_{res} = \frac{v'_1}{v_1} \quad (5.2)$$

Rovnice (5.2) se dá následně dále upravit, protože určení dopadové a odrazové rychlosti je poměrně obtížné, je možné velikosti dopadové a odrazové rychlosti vyjádřit pomocí rovnic pro volný pád těles, čímž získáme rovnici pro koeficient restituce, který je funkcí pouze výšky pádu a výšky prvního odrazu.

$$\varepsilon_{res} = \frac{v'_1}{v_1} = \frac{\sqrt{2gH_{odr}}}{\sqrt{2gH_{dop}}} \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_{res} = \sqrt{\frac{H_{odr}}{H_{dop}}}$$

kde:

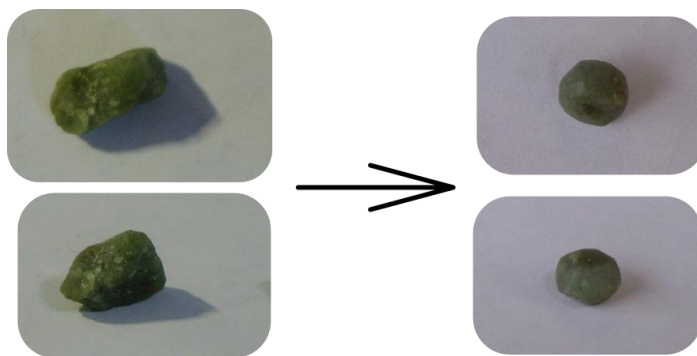
H_{odr}	[m]	výška odrazu tělesa
H_{dop}	[m]	výška pádu tělesa

Protože koeficient restituce není konstantní materiálová charakteristika, ale je závislý na materiálu jednotlivých těles, dopadové rychlosti (výšce pádu) těles a v neposlední řadě také na tvaru a stavu povrchu těles, tak je nutné stanovit koeficient restituce pro kontakt olivín-ocel a olivín-olivín.

5.4.1 KOEFICIENT RESTITUCE PRO KONTAKT OLIVÍNU S OCELÍ

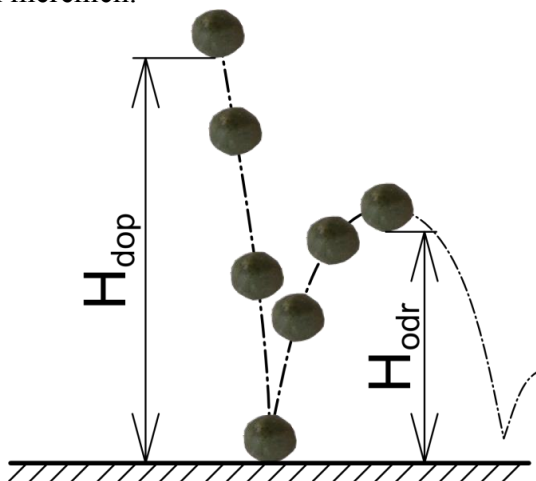
Koeficient restituce pro srážku částice olivínu s ocelovou částí zařízení je možné stanovit právě pomocí měření výšky pádu a výšky odrazu částice od ocelové podložky. Z takto získaných výšek se pomocí rovnice (5.3) snadno určí hledaný koeficient restituce. Určitou

překážkou při měření je tvar zrn materiálu, protože zrna olivínu jsou hranatá s ostrými a tupými úhly mezi jednotlivými plochami povrchu zrna. Při pádu takového zrna dojde téměř ve většině případů k odrazu pod výrazným úhlem od vertikálního pohybu zrna před dopadem, navíc je pohyb zrna ovlivněn rotací způsobenou aerodynamickým odporem a kontaktem s podložkou. Aby mohla být velikost koeficientu restituce určena při experimentu, bylo několik zrn materiálu upraveno do podoby blízké se kulovému tvaru o průměru zrn 6 mm.



Obr. 5-8 Úprava tvaru zrn pro měření koeficientu restituce

Takto upravená zrna již vykazují o poznání menší úhlovou odchylku pohybu po odrazu od vertikálního pohybu před dopadem na podložku. Při měření bylo tedy „kulové“ zrn umístěno do výšky H_{dop} a následně volně puštěno směrem na ocelovou podložku od které se odrazilo. Ocelová podložka byla tvořena plochou ocelovou tyčí s průřezem o rozměrech 45 mm x 6 mm a délce 200 mm, která byla vyrobena z materiálu S235JR. Celý průběh pohybu zrna při pádu a odrazu byl zaznamenáván pomocí outdoorové kamery GoPro Hero4, aby bylo následně možné na pořízeném videozáznamu vyhodnotit výšku odrazu H_{odr} zrna materiálu při jednotlivých měřeních.



Obr. 5-9 Princip měření koeficientu restituce

Velikost dílčích koeficientů restituce pro každé měření je stanovena na základě vzorce (5.3). Výsledný koeficient restituce pro kontakt olivín-ocel je stanoven jako aritmetický průměr z dílčích koeficientů restituce určených při jednotlivých měřeních. Pro informaci jsou v tabulce uvedeny hodnoty koeficientu restituce pro každou výšku pádu zrn, které jsou opět určeny pomocí aritmetického průměru z hodnot koeficientů pro příslušnou výšku pádu. Podrobná tabulka naměřených hodnot je uvedena v příloze F.

Tab. 5-1 Hodnoty koeficientu restituce pro jednotlivé výšky pádu zrna

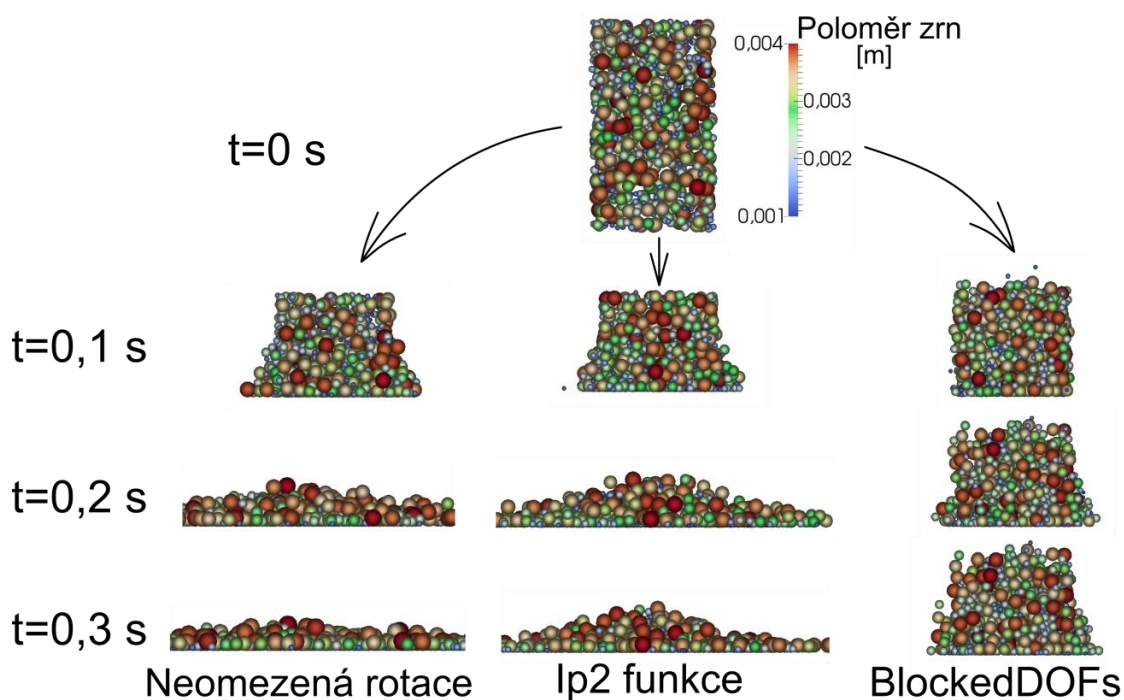
Koeficient restituce pro $H_{dop} = 0,35 \text{ m}$	Koeficient restituce pro $H_{dop} = 0,46 \text{ m}$	Koeficient restituce pro $H_{dop} = 0,51 \text{ m}$	Koeficient restituce pro $H_{dop} = 0,62 \text{ m}$	Koeficient restituce pro $H_{dop} = 0,78 \text{ m}$
0,445	0,418	0,436	0,441	0,513
Experimentálně stanovený koeficient restituce pro kombinaci olivín-ocel			$\varepsilon_{oloc} = 0,4559 \approx 0,46$	

5.4.2 KOEFICIENT RESTITUCE PRO KONTAKT OLIVÍNU S OLIVÍNEM

Určení koeficientu restituce pro kontaktu olivínu s olivínem lze realizovat velice obtížně a to z důvodu malé velikosti zrn a nedostupnosti rovinné plochy vyrobené z olivínu => nemožnost použití stejné metody jako u kontaktu olivín-ocel. Proto je hodnota koeficientu restituce zvolena odhadem na hodnotu 0,3. Hodnota koeficientu je odhadnuta s ohledem k faktu, že olivín bude do odpichového otvoru dopadat vysokou dopadovou rychlostí odpovídající výšce pádu z cca 3,0 m.

5.5 POROVNÁNÍ METOD OMEZENÍ ROTACE PRO MATERIÁLOVÝ MODEL FRICTMAT

Při omezení rotace jednotlivých kuliček je vhodné brát zřetel na reálnost následného chování materiálu. Rotace kuliček by měla být omezena jen do jisté míry a při jejím překročení by měla být rotace umožněna. Pro porovnání možností byl sestaven jednoduchý simulační model, který spočíval ve volném pádu kuliček umístěných v kvádru (podstava (60 x 60) mm a výška 100 mm) na ocelovou podložku, s tím že podstava kvádru náležela ocelové podložce. Jako parametry materiálů a simulace byly použity dříve určené parametry. Při jednotlivých simulacích byla použita časová diference o velikosti $\Delta t = 6,49 \cdot 10^{-7} \text{ s}$.



Obr. 5-10 Porovnání metod omezení rotace prvků



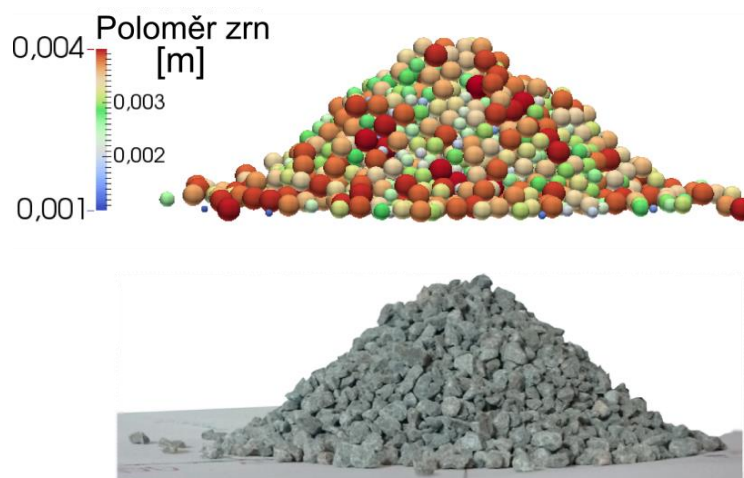
Při porovnání jednotlivých možností omezení rotace je patrné, že při úplném uzamčení rotace (pomocí funkce BlockedDOFs) dochází ke ztrátě části energie, respektive k zanedbání tečné složky působící na kuličku a způsobující její rotaci, což má za následek nereálné chování pohybu kuliček. Naopak v případě omezení rotace pomocí parametrů uvnitř `Ip2_FrictMat_FrictMat_MindlinPhys` funkce dojde pouze k částečnému omezení rotace, které je závislé na velikosti nastavených parametrů (*krot* a *eta*) a materiál následně vykazuje výrazně reálnější chování než v případě uzamčení rotace pomocí BlockedDOFs. Pokud jsou vhodně nastaveny parametry *eta* a *krot*, tak je možné docílit útlumu rotace při delší době trvání kontaktu těles (kulička se kutálí po rovině). Z výše uvedených poznatků vyplývá, že pro další validaci a finální simulaci je využito omezení rotace pomocí vnitřních parametrů výše zmíněné `Ip2` funkce.

5.6 VALIDACE MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ OLIVÍNU

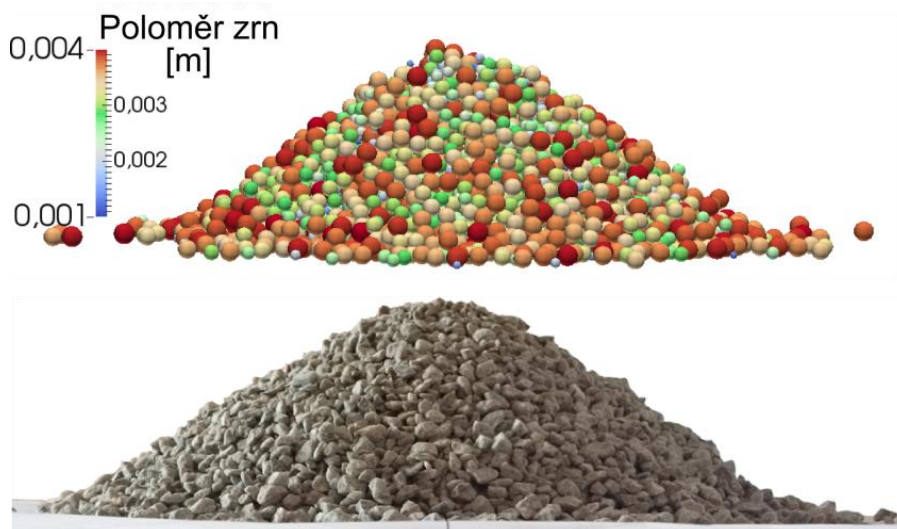
Validace materiálových vlastností a parametrů simulace slouží k tomu, aby došlo k upravení parametrů simulace a tím došlo k přiblížení simulace reálnému chování materiálu. Pro přesnou validaci a popsání chování materiálu je nejvhodnější využít co nejvíce možných dílčích experimentů, které jsou následně doplněny experimenty provedenými přímo na zkušebních prototypích a modelech odpovídajících částem reálného zařízení. Jelikož reálné prototypy ani modely popisující zařízení pro zásyp odpichového otvoru nejsou dostupné, bude validace provedena pouze na základě provedených experimentálních měření jednotlivých vlastností materiálů. Při validaci bylo úkolem optimalizování parametrů *krot* a *eta* funkce `Ip2` tak, aby materiál v jednotlivých simulačních experimentech vykazoval stejné, nebo co nejvíce podobné chování jako při reálných experimentech. Při dílčích optimalizacích popsáných v následujících kapitolách bylo následně dosaženo parametru *krot* = 0,05 a parametru *eta* = 0,3.

5.6.1 OVĚŘENÍ SYPNÉHO ÚHLU MATERIÁLU

Na základě provedeného experimentu byla sestavena simulace odpovídající průběhu reálného experimentálního měření sypného úhlu pro válce o světlostech DN50 a DN110. V obou případech byla použita stejná velikost časové difference jednotlivých iteračních kroků o velikosti $\Delta t = 7,54 \cdot 10^{-7} \text{ s}$.



Obr. 5-11 Porovnání sypných kuželů pro simulační (horní část obrázku) a reálný (dolní část obrázku) experiment – světlost válce DN50



Obr. 5-12 Porovnání sypných kuželů pro simulační (horní část obrázku) a reálný (dolní část obrázku) experiment - světlost válce DN110

Při porovnání tvaru vzniklého kužele při simulaci a při reálném experimentu vidíme, že tvary navrstvených kuželů jsou si velice podobné. Sypný úhel určený experimentálně je pro nasypaný kužel olivínu $\varphi_{SypEx} = 39,6^\circ$. Pro případ sypného úhlu určeného pomocí simulace dostáváme úhel o velikosti $\varphi_{SypSm} = 40,5^\circ$, který se liší od reálného sypného úhlu o pouhých $0,9^\circ$, což je stále přijatelná hodnota odchylky simulační hodnoty od reálné hodnoty sypného úhlu (při porovnání s možnými nepřesnostmi získaných hodnot vlivem nepřesností experimentálního měření a nepřesností vnesených do simulačního modelu vlivem nahrazení hranatých zrn kulovými zrny).

5.6.2 OVĚŘENÍ ÚHLU TŘENÍ MEZI OLIVÍNEM A OCELÍ

Úkolem této validační simulační úlohy bylo ověření, zda parametry *krot* a *eta* jsou schopny dostatečně omezit rotaci, aby nedošlo ke skluzu a rotaci zrn materiálu, dokud nedojde k překročení experimentálně stanoveného úhlu tření mezi olivínem a ocelí δ_{oloc} (úhel stoupání nakloněné roviny). Při simulačních pokusech byla zjištěna minimální hodnota parametru $\eta = 0,29$. Při dalším snížení velikosti tohoto parametru již dojde k samovolnému rotačnímu pohybu zrn olivínu i v případě, že není překročen úhel $\delta_{oloc} = 23,4^\circ$. Dle několika desítek provedených simulačních pokusů bylo zjištěno, že parametr *krot* ve své podstatě ovlivňuje přenos rotačního pohybu mezi zrny materiálu² a s jeho rostoucí hodnotou se snižuje přenos a vliv rotace na jednotlivá zrna a zároveň dochází k pozvolnému nárůstu výpočetní náročnosti simulace. Dále společná kombinace parametrů *eta* a *krot* ovlivňuje délku dráhy, na které dojde k zastavení valící se kuličky.

5.6.3 OVĚŘENÍ ODSKOKU ČÁSTICE MATERIÁLU OD OCELOVÉ PODLOŽKY

Tato validační úloha byla vložena pouze pro ověření správné funkce koeficientu restituce v rámci simulaci a v případě potřeby byla upravena hodnota koeficientu restituce

² Parametr *krot* je možné zadávat také v záporných hodnotách. Při zadání záporného parametru nedochází k tlumení, ale naopak k zesilování rotace prvků simulace, které jsou v kontaktu.



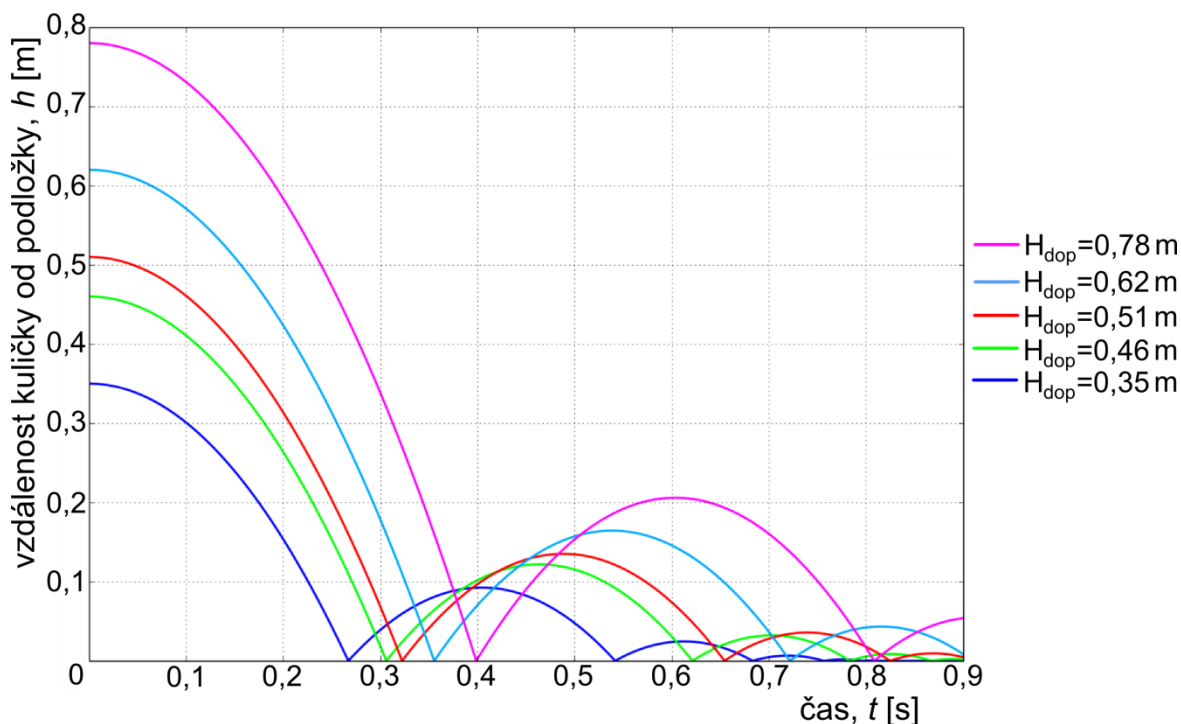
tak, aby odpovídala hodnotám zjištěným při experimentálním měření. Při simulačním experimentu padala kulička o průměru 6 mm ze stejných výšek jako při reálném experimentu. Pro jednoduché ověření správnosti parametru popisujícího koeficient restituce, byla sestavena tabulka pro výšku odrazu částic H_{odr} v závislosti na jednotlivých výškách pádu částic H_{dop} s využitím upravené rovnice (5.3).

$$H_{odr} = H_{dop} \varepsilon_{res}^2 \quad (5.4)$$

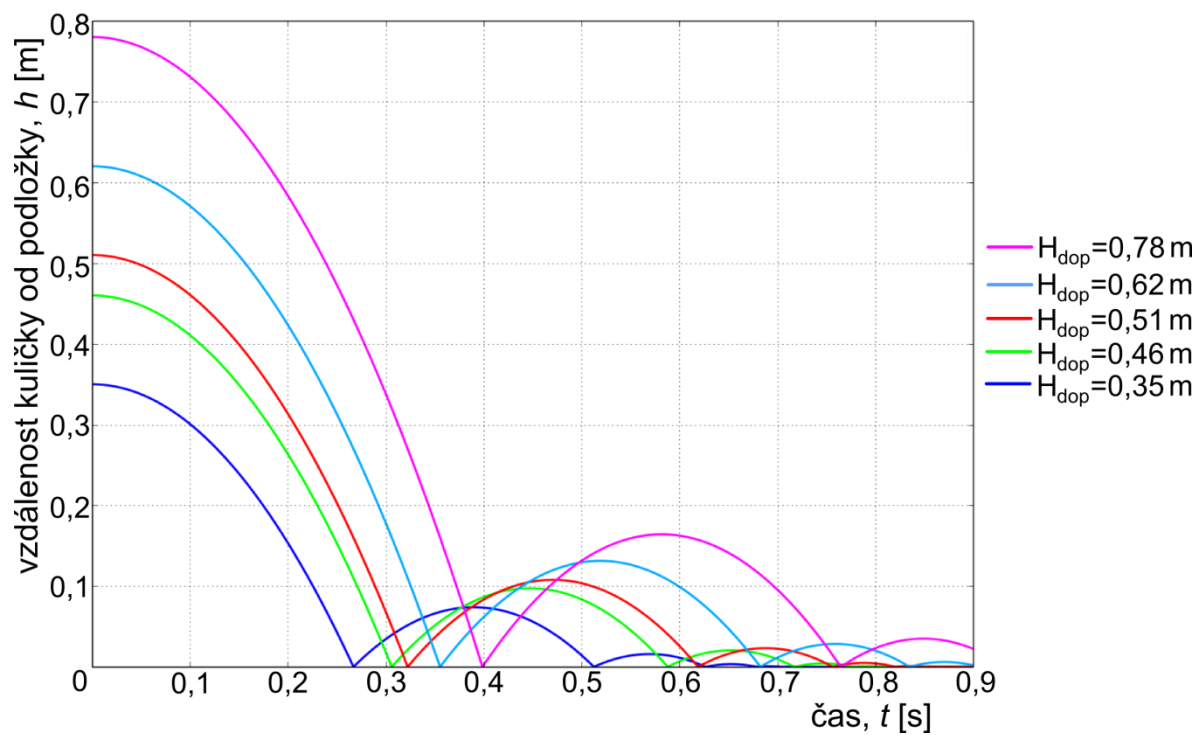
Tab. 5-2 Předpokládaná výška odrazu zrn materiálu

Koeficient restituce ε_{res} [-]	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Výška pádu zrna H_{dop} [m]	0,35	0,46	0,51	0,62	0,78
Výška odrazu zrna H_{odr} [m]	0,074	0,097	0,108	0,131	0,165

Po prvním ověřovacím experimentu bylo zjištěno, že při zadání koeficientu restituce $\varepsilon_{oloc} = 0,46$, dostaneme při interakci kuličky a jejím odrazu simulační hodnotu koeficientu restituce o hodnotě $\varepsilon_{olocs} = 0,51$ (průběh pádu kuličky viz Obr. 5-13). Na základě těchto faktů byla hodnota vstupního simulačního koeficientu restituce vhodně upravena na hodnotu $\varepsilon_{olocsv} = 0,39$, která způsobuje při simulaci odrazy požadovaných výšek určených v Tab. 5-1.



Obr. 5-13 Graf pádu kuliček pro vstupní simulační koeficient restituce 0,46

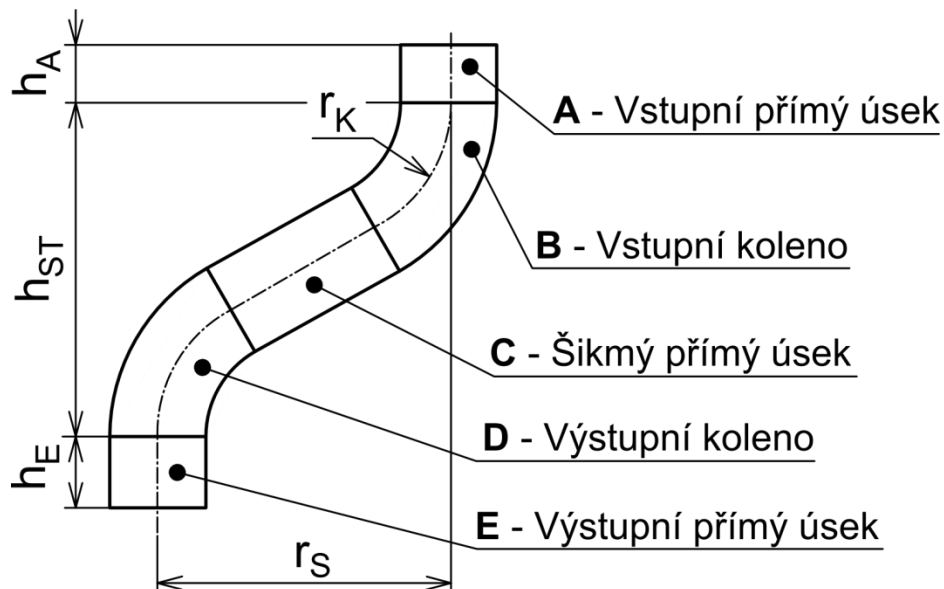


Obr. 5-14 Graf pádu kuličky pro vstupní simulační koeficient restituce 0,39



6 SIMULACE PROCESU ZASYPÁNÍ ODPICHOVÉHO OTVORU S VYUŽITÍM PROGRAMU YADE

Zdrojový kód simulace byl sestaven na základě informací určených a zjištěných v kapitole 5. Pro „rychlé“ získání náhledu na chování materiálu při zásypu odpichového otvoru bylo do násypky zařízení umístěno 10 kg olivínu a následně byla provedena vlastní simulace sypání materiálu do odpichového otvoru. Použití menšího množství materiálu v násypce je možné využít pro to, abychom dostali podstatně rychleji základní náhled chování materiálu a uspořili tak čas potřebný pro simulaci a tím i zkrátili čas potřebný pro vývoj zařízení a byly případně umožněny rychlejší úpravy tvarů funkční geometrie. Při vlastním procesu sypání materiálu skluzem a výtoku materiálu ze skluzu lze definovat tři základní fáze (počátek výtoku materiálu ze skluzu – fáze 1, střední část výtoku materiálu ze skluzu – fáze 2 a konec výtoku materiálu ze skluzu – fáze 3), které rozhodují o úhlu výstupu materiálu ze skluzu a o tvaru průřezu výtoku materiálu a tím následně o množství olivínu, který padne mimo odpichový otvor. Tyto tři základní fáze jsou tedy nejdůležitějšími pro posouzení chování materiálu a efektivitě zásypu odpichového otvoru => vyhodnocení bude probíhat právě na výstupu ze skluzu s vazbou na místo dopadu na dně pece. V případě, že dojde k zasypání odpichového otvoru s malým množstvím materiálu, který padne mimo odpichový otvor, tak budou navržené tvary skluzu uznány za vyhovující a bude proveden detailní konstrukční návrh zařízení. Pokud by ale došlo k vysypání velkého množství materiálu mimo odpichový otvor, bude nutné změnit funkční tvary skluzu a simulaci opakovat => získání jedné vhodné varianty, nebo několika vhodných variant tvarů funkční geometrie. Pro jednodušší popis a odkazování se na části a rozměry skluzu jsou jednotlivé rozměry a části označeny dle následujícího obrázku:



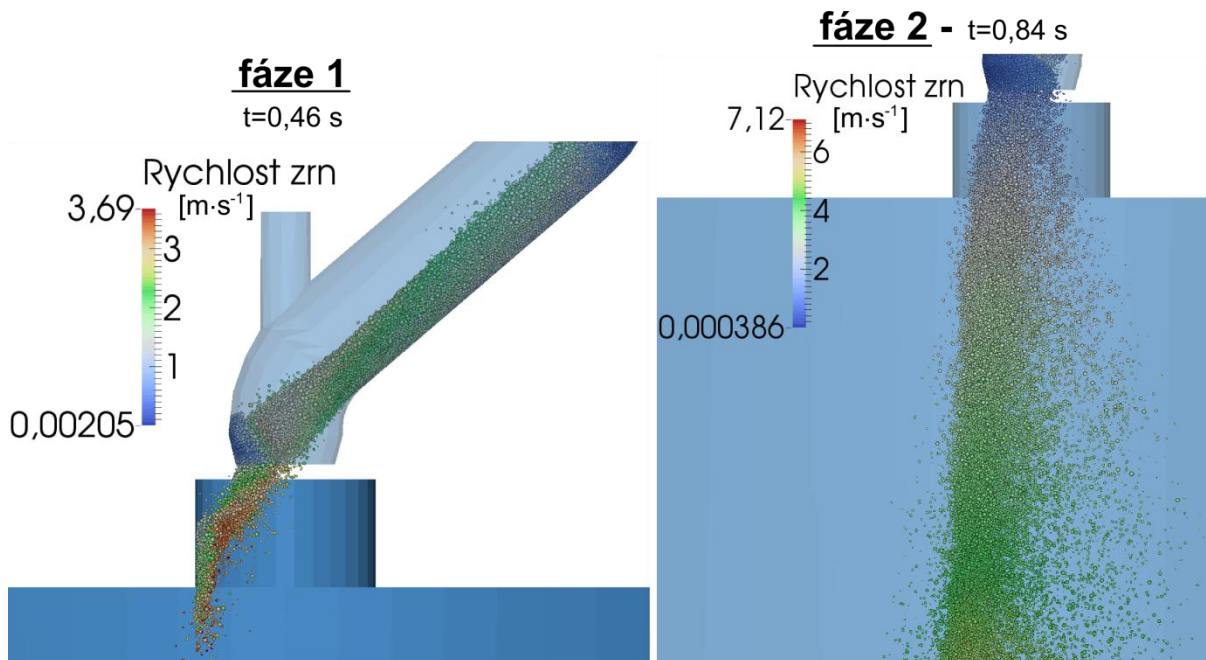
Obr. 6-1 Popis částí skluzu

6.1 ZÁKLADNÍ SIMULACE SYPÁNÍ OLIVÍNU - PRO 10 KG OLIVÍNU

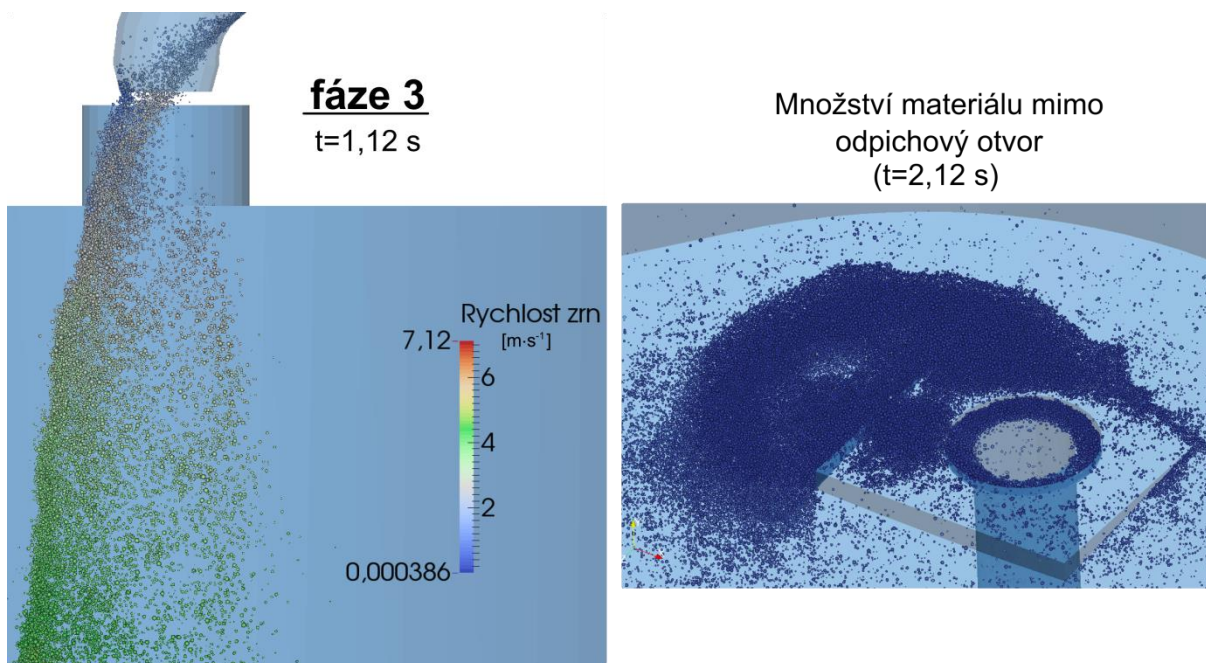
Simulace byla realizována pro časovou diferenci o velikosti $\Delta t = 2,12 \cdot 10^{-7} \text{ s}$. Pomocí simulace byl simulován děj sypání 10 kg olivínu do odpichového otvoru, který byl simulován



po dobu 2,2 s, přičemž výpočetní simulační čas činil 8 dnů a 18 hodin¹. Do simulace byl zahrnut i pohyb břitu při otevírání nožového šoupěte, kde bylo nastaveno, že k plnému otevření dojde za 0,1 s. Na jednotlivých obrázcích zobrazujících chování materiálu je zapsán čas t , který je vztažen k okamžiku plného otevření nožového šoupátka.



Obr. 6-2 Chování olivínu při výstupu ze skluzu ve fázi 1 a ve fázi 2



Obr. 6-3 Chování olivínu při výstupu ze skluzu ve fázi 3 a rozložení olivínu na dně pece

¹ Simulace byla provedena na počítači s procesorem Intel Core i7-4710MQ s 8 jádry a frekvencí 2,5 GHz na jedno jádro. Simulační výpočet byl spuštěn na 7 jádrech procesoru.



Pokud se na výsledky simulace a chování materiálu podíváme podrobněji (obrázkový záznam ze simulace přiložen v příloze G), vidíme zásadní nedostatek v místě ukončení skluzu, kde se nachází přímý úsek skluzu doplněný sražením, které zmenšuje průměr výstupu skluzu a mělo by sloužit k usměrnění toku vystupujícího materiálu. Při jednotlivých fázích sypání lze pozorovat následující chování materiálu:

- *fáze 1* – Část materiálu na výstupu ze skluzu není zachycena úsekem E skluzu a pohybuje se po křivce odpovídající šikmému vrhu => náraz této části olivínu do stěny otvoru v EBT panelu a následný dopad olivínu mimo odpichový otvor.
- *fáze 2* – Tok olivínu ze skluzu nevykazuje svislý směr toku, ale svírá se svislým směrem ostrý úhel, který vyplývá ze součtu rychlostí zrn usměrněných výstupní částí skluzu se zrny, která nebyla usměrněna a pohybovala se po trajektorii odpovídající šikmému vrhu. Dále lze pozorovat rozptýlení toku olivínu v místě výstupu ze skluzu do kuželu o vrcholovém úhlu přibližně 30° => opět velká část materiálu dopadne mimo odpichový otvor
- *fáze 3* – Dochází k postupnému poklesu množství materiálu a tím i snižování podílu materiálu, který je usměrňován úsekem E skluzu => podobné chování materiálu jako při fázi 1.

Z výše popsanych poznatků a výsledného rozložení a množství olivínu mimo odpichový otvor (viz Obr. 6-3), lze jednoznačně konstatovat, že funkční tvary skluzu byly navrženy chybně, jelikož dochází k velmi obtížnému plnění odpichového otvoru s větším množstvím olivínu mimo odpichový otvor, než v odpichovém otvoru => pro správnou funkci zařízení je třeba navrhnout úpravu/y tvarů skluzu, a opět je ověřit pomocí simulace.

6.2 ROZVAHA NAD MOŽNÝMI ÚPRAVA GEOMETRIE SKLUZU

Během návrhu úprav geometrie skluzu je třeba brát ohled na základní požadavky na zařízení a na prostorové dispozice. Při řešení nových tvarů skluzu se vychází z původního návrhu zařízení, z kterého bude vždy použita navržená násypka a vybrané pneumaticky ovládané nožové šoupátko o světlosti DN150. Z limitních rozměrových parametrů zde vystupuje především maximální výška zařízení. Při návrhu tvarů je třeba brát v potaz i následné konstrukční provedení uložení skluzu a řešení pohonu kyvného pohybu skluzu.

6.2.1 MAXIMÁLNÍ VÝŠKA SKLUZU

Hodnota maximální výšky skluzu vychází ze zadané maximální výšky zařízení, z výšek násypky a nožového šoupátka. Dále je třeba také zohlednit jistou rezervu pro spojení skluzu s nožovým šoupátkem a zajistit případnou rezervu v místě nad násypkou pro umístění filtru násypky.

$$h_{skmx} = h_{stav} - h_{nas} - h_{ns} - h_{skns} - h_{flt} \quad (6.1)$$

$$h_{skmx} = 1,5 - 0,68 - 0,064 - 0,08 - 0,1 = 0,576 \text{ m}$$

$$h_{skmx} = 0,57 \text{ m}$$

kde:

h_{skmx} [m] maximální výška skluzu

h_{stav} [m] maximální výška zařízení – hodnota viz zadání práce



h_{nas}	[m]	výška násypky – hodnota určena na $h_{nas} = 0,68$ m dle Obr. 4-2
h_{ns}	[m]	zástavbová výška nožového šoupátka – hodnota určena na $h_{nas} = 0,064$ m pro nožové šoupátko (viz Obr. 4-1) doplněné dvěma těsněními o tloušťkách 2 mm
h_{skns}	[m]	rezerva pro napojení skluzu na nožové šoupátko
h_{flt}	[m]	rezerva pro případné umístění filtru násypky

6.2.2 OMEZENÍ DLE ŘEŠENÍ POHONU KYVNÉHO POHYBU SKLUZU

Na druhu použitého pohonu pro kyvný pohyb skluzu je závislá především vzdálenost r_s (vzdálenost výstupního otvoru skluzu od osy rotace skluzu).

Pokud bude uvažováno použití kyvného pohonu určeného v kapitole 4.5.3, tak následné úpravy rozměrů skluzu nenabízí mnoho možností. Prodloužení části E skluzu je relativně obtížné, protože při prodloužení dochází ke snížení sklonu skluzu a tím částečnému zpomalení sypání materiálu a přiblížení se hodnotě úhlu $\delta_{oloc} = 23,4^\circ$. Aby byl zachován dostatečný úhel klesání skluzu (cca min 32°) bylo by zapotřebí zmenšit vzdálenost r_s skluzu. Toto by bylo umožněno při zmenšení průměru skluzu, ale došlo by tak pouze k posuvu o polovinu změny průměru skluzu. Lepší možnosti změny by přinesl výběr kratšího a tedy i slabšího kyvného pohonu, jenže tím by došlo ke snížení momentové rezervy a mohlo by dojít k tomu, že se za určitých podmínek² skluz neotočí do požadované polohy, nebo se při pohybu zastaví.

Dalším možným řešením pohonu kyvného pohybu skluzu je kombinace elektromotoru (popř. pneumatického rotačního motoru) s převodovkou. Toto řešení ovšem vychází výrazně drahé při porovnání s kyvným pneumatickým pohonem a je také konstrukčně složitější, ale umožňuje v podstatě libovolný tvar skluzu, který je limitován pouze tím, aby bylo možné mezi násypku a skluz vhodně instalovat kamerovou jednotku a úhel klesání skluzu byl opět minimálně 32° .

Poslední možností řešení pohonu kyvného pohybu je použití přímočarého pneumatického motoru. Tato varianta je konstrukčně jednoduchá, má nízké pořizovací náklady, ale možnosti úprav tvaru skluzu jsou omezeny dvěma hlavními faktory. Prvním faktorem je maximální možná hodnota úhlu otočení skluzu, která se pro případ přímočarého pohonu pohybuje do hodnoty přibližně 110° . Z tohoto důvodu je nutné zajistit, aby kamerová jednotka byla v parkovací poloze dostatečně kryta a tím ochráněna před poškozením způsobeným pádem části vsázky (kusu železného šrotu) => použití malé vzdálenosti r_s . Druhým faktorem, který ovlivňuje minimální hodnotu vzdálenosti r_s , je požadavek na zajištění volného prostoru nad otvorem v EBT panelu, aby byl umožněn obsluze EAF přístup k tomu otvoru => násypka nesmí zasahovat do otvoru v EBT panelu.

Z výše uvedeného přehledu variant pohonů bude při návrhu úprav tvarů skluzu respektováno řešení pro případ kyvného pneumatického pohonu a pohonu pneumatickým přímočarým motorem. Pokud bude skluz navrhnout pro jednu z těchto variant, nebude následně problém jako pohon v případě potřeby použít elektromotor s převodovkou.

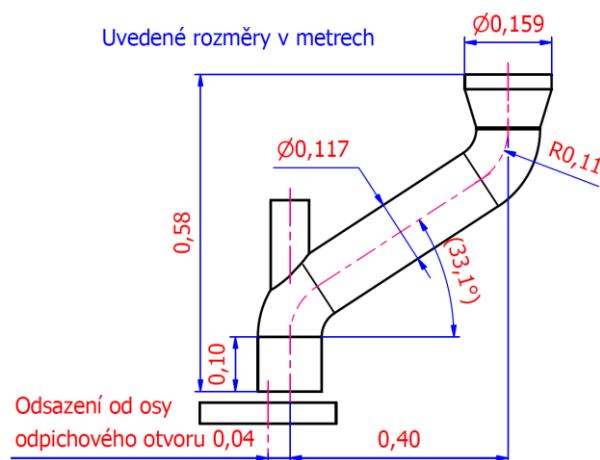
² Mezi tyto nenadálé podmínky může patřit přítomnost vrstvy prachu na EBT panelu v dráze skluzu, přidření ložisek skluzu vlivem vniku prachu do ložisek, přítomnost kusu vsázky (ocelového šrotu) v dráze skluzu,...



7 ÚPRAVY GEOMETRIE SKLUZU A OVĚŘENÍ TĚCHTO ÚPRAV POMOCÍ PROGRAMU YADE

Podle zjištěných informací a faktů v kapitole 6.2 bylo navrženo 8 různých variant úprav tvarů geometrie skluzu a jednotlivé varianty byly podrobeny ověření v simulačním programu YADE. Jednotlivé navržené varianty a jejich ověřování není v této práci dále blíže popsáno, ale jsou zde dále blíže rozvedeny pouze dvě vybrané varianty, u kterých bylo zaznamenáno nejlepší naplnění odpichového otvoru. Základní schémata zbývajících šesti variant úprav geometrie skluzu jsou pro informaci uvedeny v příloze H.

7.1 VARIANTA I

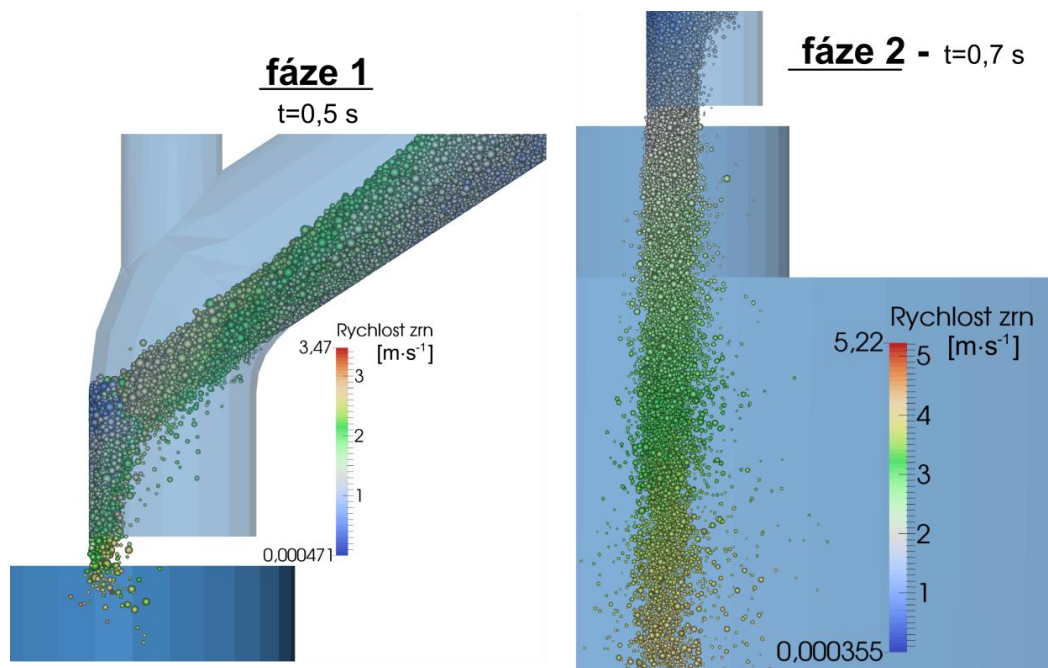


Obr. 7-1 Náčrt upravené geometrie skluzu - varianta I

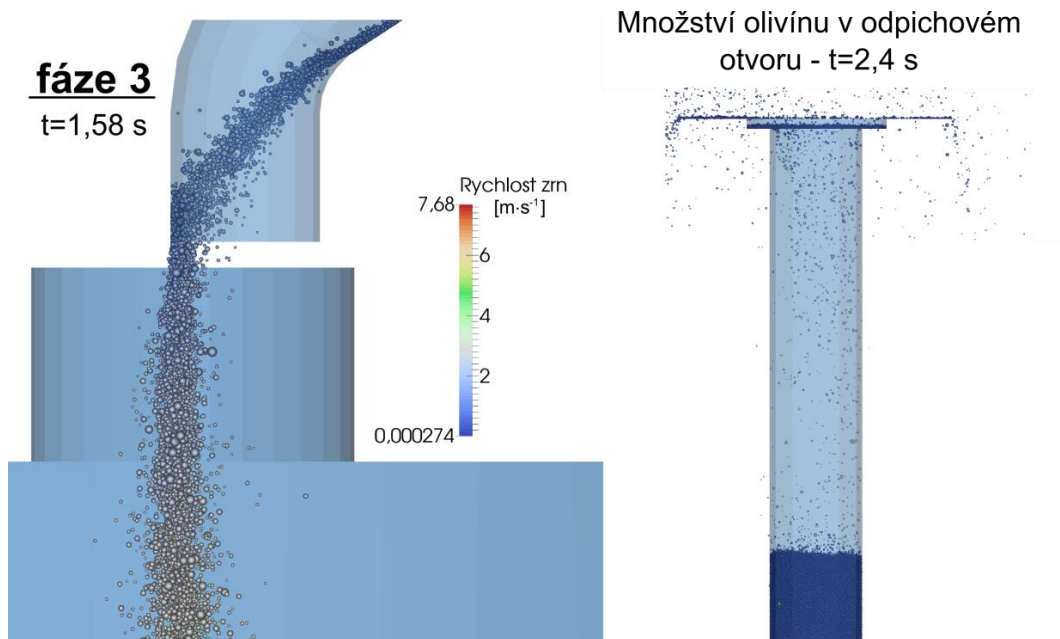
Jedná se o variantu tvaru skluzu, kde dochází k zúžení toku materiálu do průměru 0,117 m proto, aby se zmenšilo množství materiálu dopadající mimo odpichový otvor a bylo zajištěno dobré plnění odpichového otvoru s minimálním průměrem 190 mm. Tato varianta je spíše vhodná pro realizování pohonu kyvného pohybu skluzu pomocí elektromotoru s převodovkou nebo pomocí menší verze kyvného pneumatického rotačního pohonu.

7.1.1 OVĚŘENÍ VARIANTY I

Dle náčrtu geometrie byl sestaven model funkční geometrie a následně implementován do původního zdrojového kódu simulace v programu YADE. Základní model použitý v předchozí simulaci byl dále pro potřeby urychlení ověřování jednotlivých návrhů dále zjednodušen. Některé plochy geometrie pece byly vymazány, a celková síť byla dále zjednodušena => zkrácení výpočetního času simulace. Pro ověření varianty I byla použita opět STL geometrie, která obsahovala celkem 1 510 trojúhelníkových ploch (zásobník 933 ploch, skluzu 436 ploch, pec 141 ploch). Simulace byla opět provedena pro stejnou velikost časové difference jako v kapitole 6.1 ($\Delta t = 2,12 \cdot 10^{-7} s$), přičemž byla simulace provedena pro děj zasypávání odpichového otvoru s 10 kg olivínu a s reálnou délkou děje omezenou na 2,4 s. Podrobnější obrázkový záznam ze simulace je přiložen v příloze I.



Obr. 7-2 Chování olivínu při výstupu ze skluzu ve fázi 1 a ve fázi 2 – varianta I

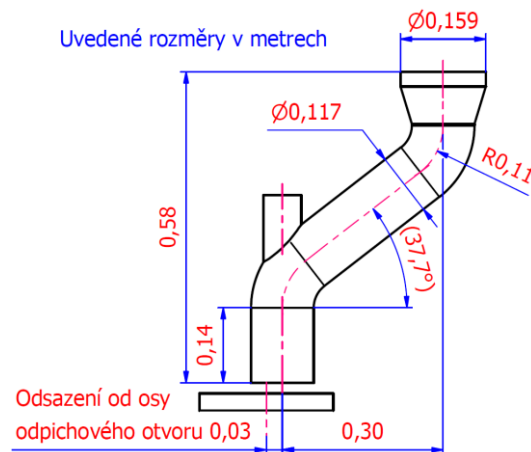


Obr. 7-3 Chování olivínu při výstupu ze skluzu ve fázi 3 a množství olivínu v odpichovém otvoru – varianta I

Při bližším pozorování chování materiálu a finálního množství olivínu v odpichovém otvoru, je vidět výrazný posun k lepšímu. Pomocí výsledků simulace bylo zjištěno, že při použití 10 kg olivínu dopadne mimo odpichový otvor přibližně 0,5 kg olivínu. Pokud budeme tedy předpokládat přímou úměrnost mezi použitým množstvím olivínu a množstvím olivínu mimo odpichový otvor, tak dostáváme, že pro 100 kg použitého olivínu dopadne přibližně 5 kg olivínu mimo odpichový otvor => tedy lze předběžně predikovat, že hmotnost materiálu, který dopadne mimo odpichový otvor, bude odpovídat přibližně 5 % použitého materiálu pro zásyp odpichového otvoru.



7.2 VARIANTA II

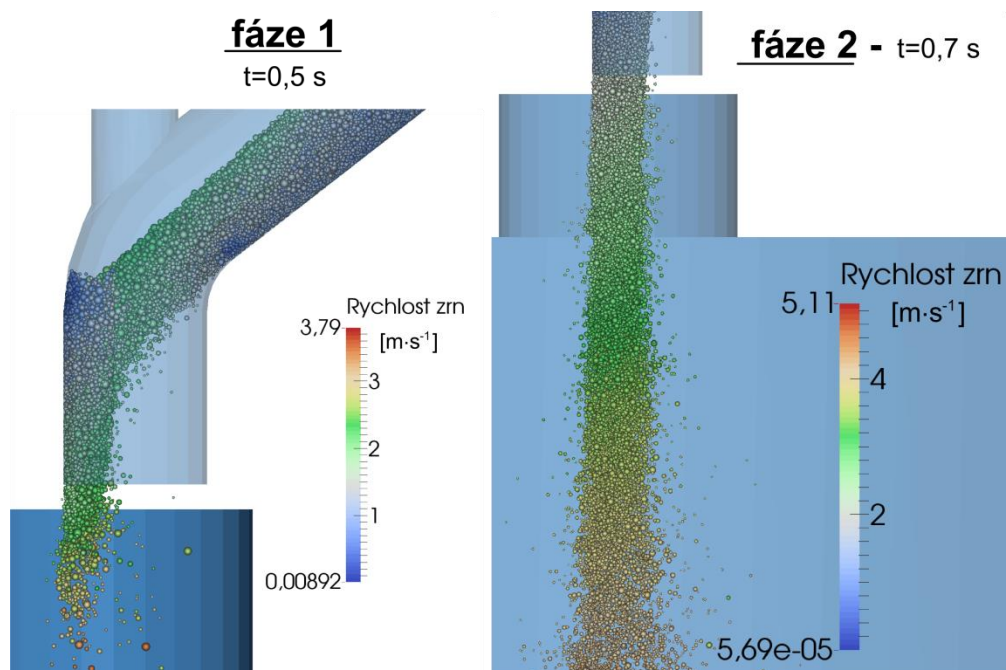


Obr. 7-4 Náčrt upravené geometrie skluzu - varianta II

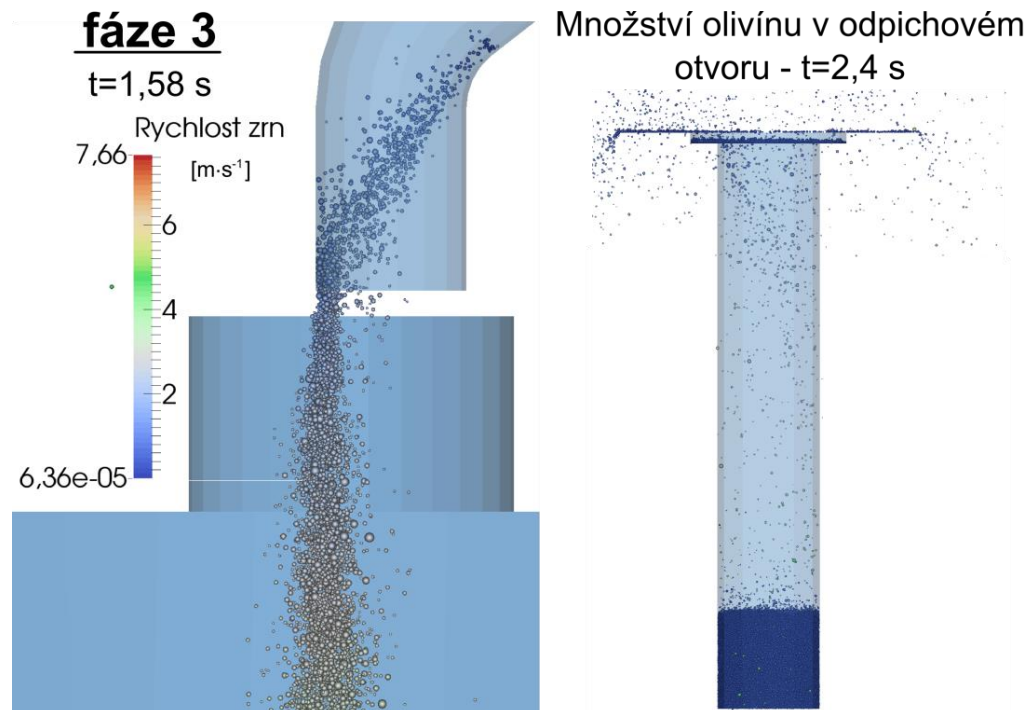
Tato varianta je tvarově velice podobná variantě I. Rozdíl mezi variantami I a II je v délce části E skluzu a ve vzdálenosti r_s , čímž tato varianta získává větší úhel klesání skluzu a tím se olivín pohybuje ve skluzu rychleji. Varianta je vhodná pro řešení pohonu kyvného pohybu pomocí elektromotoru s převodovkou nebo pomocí přímočarého pneumatického motoru.

7.2.1 OVĚŘENÍ VARIANTY II

Podobně jako pro variantu I byl z náčrtu sestaven model funkční geometrie, který byl následně pomocí STL geometrie importován do prostředí programu YADE. STL geometrie pro tuto variantu obsahovala celkem 1 625 trojúhelníkových ploch (zásobník 933 ploch, skluzu 557 ploch, pec 135 ploch). Simulace byla opět (stejně jako v předchozích případech) provedena pro stejnou velikost časové difference ($\Delta t = 2,12 \cdot 10^{-7} s$), přičemž byla simulace provedena pro děj zasypání odpichového otvoru s 10 kg olivínu a reálnou délkou děje omezenou na 2,4 s. Podrobnější obrázkový záznam ze simulace přiložen v příloze J.



Obr. 7-5 Chování olivínu při výstupu ze skluzu ve fázi 1 a ve fázi 2 - varianta II

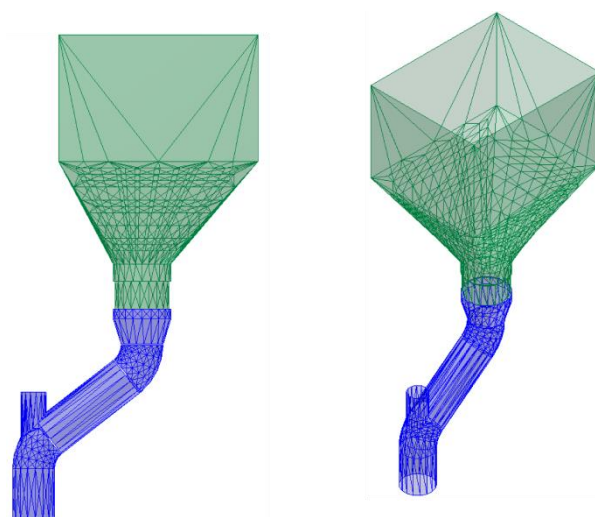


Obr. 7-6 Chování olivínu při výstupu ze skluzu ve fázi 3 a množství olivínu v odpichovém otvoru – varianta II

Pokud se na pohyb olivínu při zasypání podíváme podrobněji a srovnáme jej s pohybem materiálu u varianty I, tak zjistíme, že u varianty II je plocha toku olivínu (plocha vzniklá řezem toku ve směru kolmém na směr pohybu toku) větší než u varianty I a to jak uvnitř skluzu, tak i v oblasti výstupu olivínu ze skluzu. Tento rozdíl v plochách je způsoben rozdílným úhlem klesání u varianty I a II. Z výsledků bylo také zjištěno, že hmotnost materiálu, který dopadl mimo odpichový otvor, byla velice podobná hmotnosti u varianty I. Tyto hodnoty se navzájem lišily pouze o 0,028 kg $\Rightarrow$ opět lze konstatovat, že při zásypu bude docházet k dopadu 5 % hmotnosti olivínu mimo odpichový otvor.

7.3 VYBRANÁ VARIANTA TVARU GEOMETRIE SKLUZU PRO NÁSLEDNÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Pro další konstrukční rozpracování je vybrána varianta II. Určitou nevýhodou této varianty bude nutnost přepracování části koncepce, z důvodu změny druhu pohonu. Na druhou stranu bude zajištěna dostatečná momentová rezerva pro případně vzniklé odpory při pohybu skluzu z parkovací do pracovní polohy – při použití varianty I by bylo nutné využít menší kyvný rotační pohon, nebo k násypce upevnit rozsáhlejší kryt, který by chránil kamerovou jednotku. Změnou druhu pohonu dojde zároveň k částečnému uvolnění prostoru pod skluzem, do kterého bude moct zajíždět popř. se odklápět poklop otvoru EBT panelu. Základní podoba navržených funkčních ploch pomocí simulačního programu YADE je uveden na Obr. 7-7. Z této podoby funkčních ploch a jejich rozměrů se vychází při detailním konstrukčním řešení návrhu zařízení.



Obr. 7-7 Podoba navržených tvarů funkční geometrie ověřená pomocí programu YADE



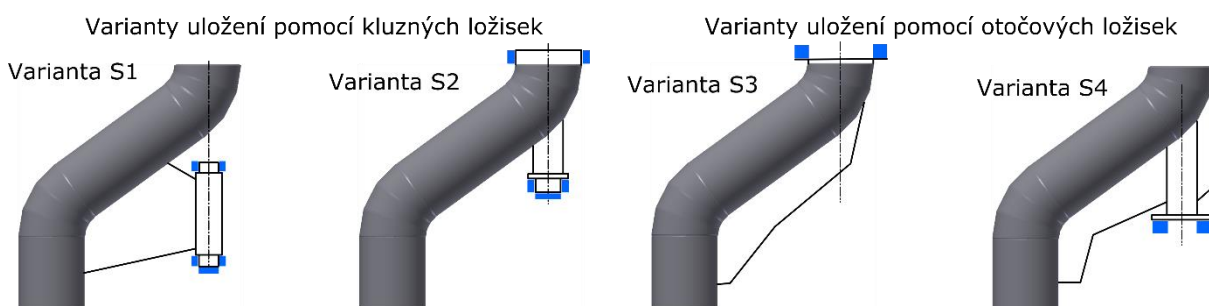
8 DETAILNÍ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ ZAŘÍZENÍ PRO ZÁSYP ODPICHOVÉHO OTVORU

Při detailním řešení konstrukce zařízení byla snaha navrhnout konstrukci co nejjednodušeji a co nejkompaktněji. Zároveň bylo nutné dodržet požadavky na robustnost, odolnost a životnost konstrukce. Dále bylo třeba zařízení navrhnout tak, aby výsledné tvary funkčních ploch co nejvíce respektovaly tvary a rozměry funkčních ploch zobrazených na Obr. 7-7.

Při řešení konstrukce a jednotlivých celků zařízení vystalo několik zásadních problémů, které bylo třeba vyřešit. Mezi tyto problémy patřilo například otočné uložení skluzu, umístění pohonu kyvného pohybu skluzu, umístění a výběr filtru zásobníku, přívody vzduchu a vody na otáčející se skluz. Dále si v této kapitole podrobněji rozebereme pouze problém otočného uložení skluzu.

8.1 OTOČNÉ ULOŽENÍ SKLUZU

Pro otočné uložení skluzu se nabízí čtyři druhy řešení, jejichž základní myšlenka je zobrazena na Obr. 8-1.



Obr. 8-1 Varianty otočného uložení skluzu

Z Obr. 8-1 je patrné, že uložení pomocí otočových ložisek je konstrukčně jednoduché, ale cena otočových ložisek je výrazně vyšší než cena ložisek kluzných¹. Dále zde hrozí, že může dojít ke kontaktu ohřátých plynů z pece s otočovým ložiskem, což může mít za následek ohřátí ložiska a vysušení plastického maziva v ložisku => zadření otočového ložiska. Z těchto důvodů budou dále uvažovány pouze varianty S1 a S2, u kterých budou použita kluzná ložiska, která dokáží pracovat bez přídavného plastického maziva.

Varianty S1 a S2 pro uložení skluzu na kluzných ložiscích se navzájem odlišují pouze v umístění a průměru horního kluzného ložiska. U varianty S1 jsou použita obě radiální ložiska o stejném průměru => rovnoměrné opotřebení obou ložisek. Na druhou stranu zde nastává určitý problém s bezproblémovou montáží skluzu do kluzných ložisek. Další nevýhodou je obsazení prostoru pod skluzem a tím omezení popř. úplné zabránění prostoru, kam by se mohl zasouvat poklop otvoru EBT panelu. U varianty S2 je použito horní kluzné ložisko o výrazně větším průměru, než má ložisko spodní => rozdílný tlak a kluzné rychlosti v ložiscích => nerovnoměrné opotřebení ložisek. Na druhou stranu získáme více volného prostoru pod skluzem. Pro další rozpracování a otočné uložení skluzu je vybrána **varianta S2**.

¹ Při detailním porovnání rozdílů v ceně při použití otočových ložisek a ložisek kluzných je třeba brát v úvahu nárůst ceny uložení pomocí kluzných ložisek způsobený větším počtem obráběcích operací po svařování a použitím rozsáhlejšího svařence rámu pro uložení skluzu na dvou místech.



8.1.1 NAVRŽENÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ OTOČNÉHO ULOŽENÍ SKLUZU

Pro otočné uložení skluzu byla vybrána kompozitní kluzná ložiska zakružovaná z pásů oceli, na které je nanесena vrstva porézního bronzu společně s PTFE, který vyplňuje příslušné póry a při běhu ložiska působí jako mazivo. Axiální ložisko je vyrobeno ze stejného materiálu jako ložiska radiální.

ZÁKLADNÍ PARAMETRY MATERIÁLU LOŽISEK

[18]

Přípustné statické zatížení ložiska	$p_{stlim} = 250 \text{ MPa}$
Přípustné dynamické zatížení ložiska	$p_{dynlim} = 140 \text{ MPa}$
Maximální provozní teplota	280°C
Minimální provozní teplota	-200°C
Součinitel tření	$0,02 \div 0,25$

Navržená podoba uložení skluzu je zobrazena v příloze K, přičemž základní rozměrové parametry navrženého uložení jsou následující:

Vnitřní průměr horního radiálního ložiska	$D_{hl} = 140 \text{ mm}$
Šířka horního radiálního ložiska	$B_{hl} = 20 \text{ mm}$
Vnitřní průměr dolního radiálního ložiska	$D_{dl} = 55 \text{ mm}$
Šířka dolního radiálního ložiska	$B_{dl} = 30 \text{ mm}$
Střední vzdálenost mezi radiálními ložisky	$a_{svl} = 284 \text{ mm}$
Vnitřní průměr axiálního ložiska	$D_{inal} = 60 \text{ mm}$
Vnější průměr axiálního ložiska	$D_{outal} = 90 \text{ mm}$

8.1.2 ANALÝZA MOŽNÝCH ZATÍŽENÍ PŮSOBÍCÍCH NA KLUZNÁ LOŽISKA

Pro stanovení maximální velikosti sil působících v jednotlivých ložiscích, je nejdříve nutné stanovit všechna možná zatížení, která mohou v ložiscích působit a následně stanovit tabulku, která popisuje jejich vzájemné kombinace. Následně se vyhodnotí jednotlivé kombinace zatížení a určí se příslušné maximální hodnoty sil působících v ložiscích.

Možná zatížení vyvolávající síly v ložiscích:

- Tíhové zatížení* – zatížení působí přímo v axiálním směru. V radiálním směru je zachycován příslušný momentový účinek.
- Zatížení od olivínu* – zatížení působí v axiálním i radiálním směru (obdobné jako v případě tíhového zatížení).
- Zatížení od pohonu pohybu skluzu* – zde uvažujeme případ, kdy dojde k zablokování pohybu skluzu v nejméně vhodné pozici => přímočarý pneumatický motor působí maximální silou a vznikají reakční síly pouze v radiálním směru.
- Zatížení od pracovního pohybu prorážče* – opět uvažujeme případ, kdy nedošlo k otevření poklopu otvoru v EBT panelu a prorážčec působí plnou silou proti pevné překážce – vznik axiální síly a radiálních sil.



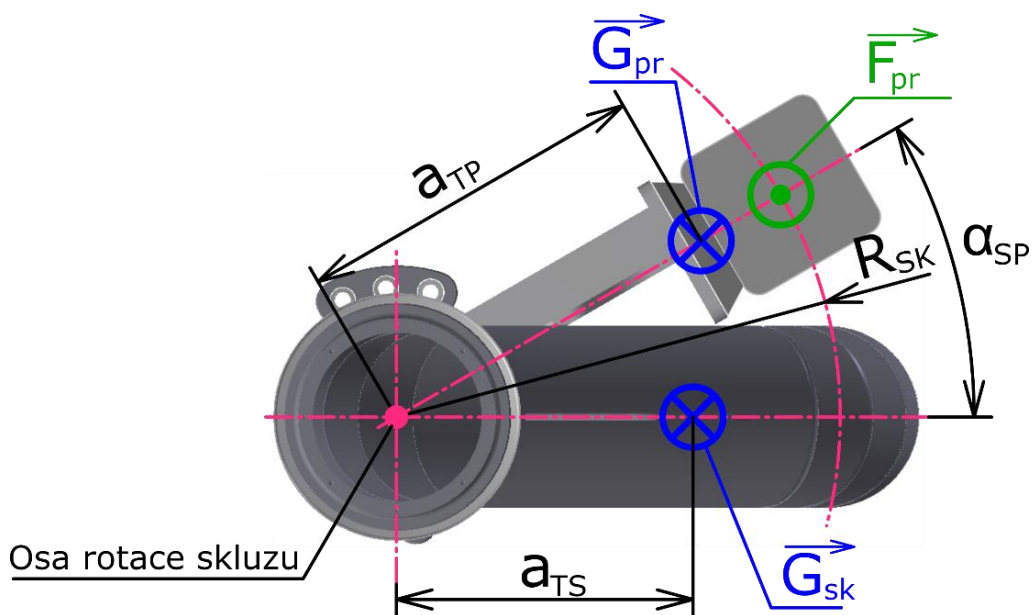
- e) *Neočekávané zatížení na konci skluzu* – předpokládejme přítomnost zatížení v ložiscích, které odpovídá zatížení od hmotnosti 80 kg, jejíž těžiště se nachází v ose výstupní trubky skluzu.

Tab. 8-1 Možné kombinace zatížení namáhajících kluzná ložiska při činnosti zařízení

Činnost zařízení	Možné kombinace zatížení				
	a)	b)	c)	d)	e)
Skluz v parkovací poloze	X				X
Kyvný pohyb skluzu	X		X		
Prorážec v činnosti	X			X	
Skluz v pracovní pozici	X	X			

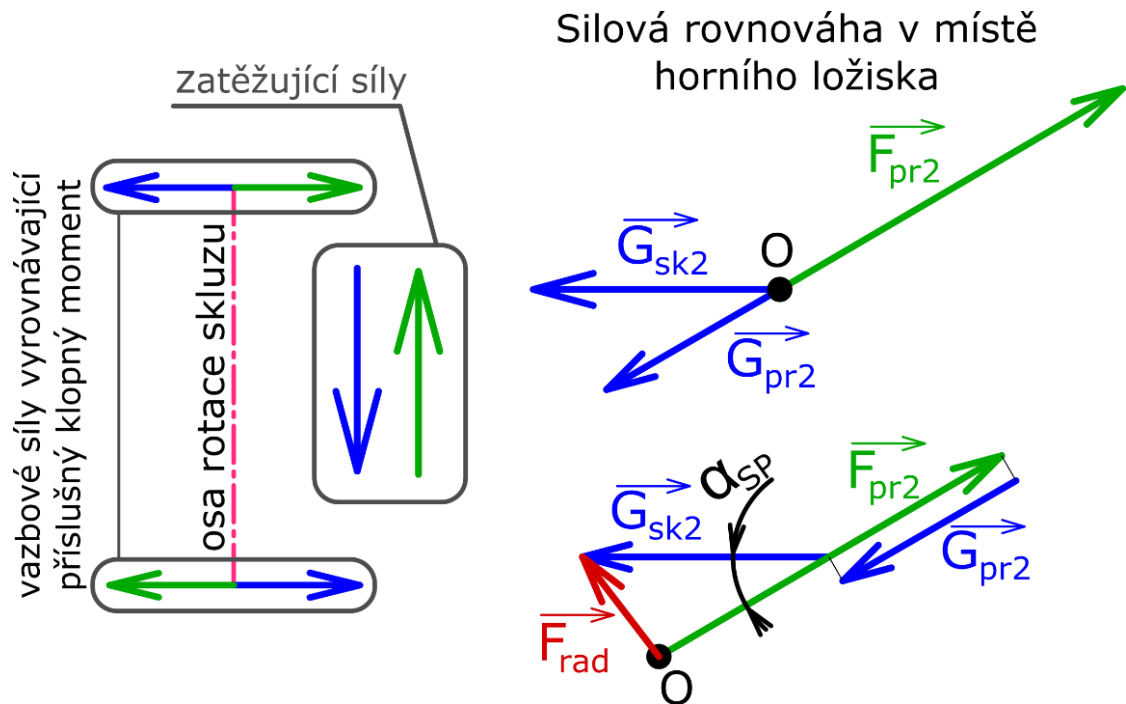
8.1.3 MAXIMÁLNÍ SÍLA V RADIÁLNÍCH LOŽISCÍCH

U radiálních ložisek bude síla v ložisku dosahovat maxima pro případ kombinace zatížení při činnosti prorážec (kombinace tíhového zatížení a zatížení od pracovního pohybu prorážec). Při určování velikostí výsledných sil v ložiscích pro radiální i axiální směr zavedme základní předpoklad, že přenos momentových účinků je zajišťován pouze pomocí radiálních ložisek.



Obr. 8-2 Zobrazení poloh a směrů zatížení vyvolávajícího maximální síly v radiálních ložiscích

Na základě Obr. 8-2 je následně možné zakreslit podobu jednotlivých vazbových sil v obou radiálních ložiscích. Vzhledem k tomu, že velikosti výsledných sil v ložiscích bude stejná (síly budou mít pouze opačný směr), tak je možné případ zredukovat a řešit velikost výsledné síly pouze v jednom z ložisek – v horním ložisku.



Obr. 8-3 Vazbové síly a příslušný silový obrazec pro horní ložisko

URČENÍ VELIKOSTÍ SIL G_{SK2} , G_{PR2} , F_{PR2}

$$G_{sk2} = \frac{G_{sk} a_{TS}}{a_{svl}} = \frac{m_{sk} g a_{TS}}{a_{svl}} \quad (8.1)$$

$$G_{sk2} = \frac{31,5 \cdot 9,81 \cdot 0,2025}{0,284} = 220,336 \text{ N}$$

$$G_{sk2} = 220,3 \text{ N}$$

$$G_{pr2} = \frac{G_{pr} a_{TP}}{a_{svl}} = \frac{m_{pp} g a_{TP}}{a_{svl}} \quad (8.2)$$

$$G_{pr2} = \frac{25 \cdot 9,81 \cdot 0,25}{0,284} = 215,889 \text{ N}$$

$$G_{pr2} = 215,9 \text{ N}$$

$$F_{pr2} = \frac{F_{pr} R_{SK}}{a_{svl}} \quad (8.3)$$

$$F_{pr2} = \frac{4713 \cdot 0,3}{0,284} = 4978,521 \text{ N}$$

$$F_{pr2} = 4978,5 \text{ N}$$

kde:

 G_{sk2} [N] síla od tíhy skluzu působící v místě radiálního ložiska

 G_{sk} [N] tíhová síla sestavy skluzu (působí v těžišti sestavy skluzu)



a_{TS}	[m]	vzdálenost těžiště sestavy skluzu od osy otáčení skluzu – vzdálenost určena na základě 3D modelu sestavy skluzu v programu Autodesk Inventor 2015 na hodnotu $a_{TS} = 202,5 \text{ mm} = 0,2025 \text{ m}$
a_{svl}	[m]	střední vzdálenost mezi radiálními ložisky – vzdálenost vychází z navrženého konstrukčního řešení – viz kapitola 8.1.1
m_{sk}	[kg]	hmotnost sestavy skluzu – hmotnost určena na základě 3D modelu sestavy skluzu na hodnotu $m_{sk} = 31,5 \text{ kg}$
G_{pr2}	[N]	síla od tíhy prorážče působící v místě radiálního ložiska
G_{pr}	[N]	tíhová síla prorážče (působí v těžišti prorážče)
a_{TP}	[m]	vzdálenost těžiště prorážče od osy otáčení skluzu – předběžná poloha těžiště prorážče stanovená odhadem na hodnotu $a_{TP} = 0,25 \text{ m}$
m_{pp}	[kg]	hmotnost prorážče – hmotnost i s potřebnou nosnou konstrukcí odhadnuta předběžně na hodnotu $m_{pp} = 25 \text{ kg}$
F_{pr2}	[N]	síla od vysouvací síly prorážče působící v místě radiálního ložiska
F_{pr}	[N]	vysouvací síla při tlaku 0,6 MPa – hodnota odvislá od vybraného přímočarého pneumatického motoru v kapitole 4.4.1 – $F_{pr} = 4\,713 \text{ N}$
R_{SK}	[m]	vzdálenost osy výstupní trubky skluzu od osy rotace skluzu – vzdálenost vychází z rozměrů skluzu vybrané varianty – viz Obr. 7-4

STANOVENÍ MAXIMÁLNÍ SÍLY V RADIÁLNÍCH LOŽISCÍCH

Pro stanovení maximální radiální síly v ložiscích je s výhodou použita kosinová věta. Při úpravě kosinové věty a dosazení příslušných sil získáváme následující rovnici:

$$F_{rad} = \sqrt{G_{sk2}^2 + (F_{pr2} - G_{pr2})^2 - 2G_{sk2}(F_{pr2} - G_{pr2}) \cdot \cos \alpha_{SP}} \quad (8.4)$$

$$F_{rad} = \sqrt{220,3^2 + (4\,978,5 - 215,9)^2 - 2 \cdot 220,3 \cdot (4\,978,5 - 215,9) \cdot \cos 30}$$

$$F_{rad} \cong 4\,573,141 \text{ N} \cong 4\,573 \text{ N}$$

kde:

F_{rad}	[N]	maximální síla v radiálních ložiscích
α_{SP}	[°]	úhel mezi skluzem a prorážčem – velikost úhlu vychází z konstrukčního řešení skluzu a předběžně navrženého držáku pro uchycení prorážče ke skluzu => $\alpha_{SP} = 30^\circ$

8.1.4 MAXIMÁLNÍ SÍLA PŮSOBÍCÍ V AXIÁLNÍM LOŽISKU

Axiální ložisko je umístěného ve spodní části nad spodním radiálním ložiskem a přenáší pouze axiální síly působící směrem dolů. Z tohoto důvodu bude síla v ložisku dosahovat maxima pro kombinace zatížení v parkovací poloze skluzu (zatížení od vlastní tíhy a neočekávané zatížení na konci skluzu – viz Tab. 8-1).



$$F_{ax} = G_{sk} + G_{pr} + G_{nz} \quad (8.5)$$

$$F_{ax} = (m_{sk} + m_{pp} + m_{nnz})g$$

$$F_{ax} = (31,5 + 25 + 80) \cdot 9,81 = 1\,339,065\,N$$

$$F_{ax} \cong 1\,340\,N$$

kde:

F_{ax} [N] maximální síla působící v axiálním ložisku

G_{nz} [N] tíhová síla neočekávaného zatížení

m_{nnz} [N] hmotnost vyvolávající neočekávané zatížení – velikost stanovena v kapitole 8.1.2 na hodnotu $m_{nnz} = 80\,kg$

8.1.5 KONTROLA RADIÁLNÍCH KLUZNÝCH LOŽISEK

[19, s. 707]

Jelikož je průměr horního ložiska větší než průměr ložiska spodního, tak následně i kontaktní plocha horního ložiska (průmět plochy ložiska do plochy kolmé ke směru zatěžující síly) bude větší => v horním ložisku bude vždy nižší kontaktní tlak než v dolním ložisku => při kontrole kluzného ložiska bude kontrolováno pouze spodní ložisko. Pokud spodní ložisko vyhoví, tak automaticky vyhoví i ložisko horní a nemusí být kontrolováno. Pokud by však dolní ložisko nevyhovělo, je třeba kontrolu horního ložiska provést. Při kontrole bude zjištěný tlak v ložisku porovnán s přípustným statickým zatížením ložiska ($p_{stlim} = 250\,MPa$ – viz kapitola 8.1.1). Přípustné statické zatížení ložiska je využito jako limitní hodnota pro maximální kontaktní tlak, protože kývavý pohyb skluzu bude probíhat za pomalých rychlostí a bez výrazných rázových namáhání během pohybu.

$$p_{rmd} = \frac{4}{\pi} \frac{F_{rad}}{D_{dl} B_{dl}} \quad (8.6)$$

$$p_{rmd} = \frac{4}{\pi} \frac{4573}{0,055 \cdot 0,03} = 3,529 \cdot 10^6\,Pa$$

$$p_{rmd} = 3,5\,MPa$$

Podmínka:

$$p_{stlim} \geq p_{rmd} \quad (8.7)$$

$$250\,MPa \gg 3,5\,MPa \Rightarrow \text{spodní ložisko vyhovuje}$$

kde:

p_{rmd} [MPa] kontaktní tlak ve spodním ložisku

D_{dl} [m] vnitřní průměr dolního radiálního ložiska

B_{dl} [m] šířka dolního radiálního ložiska

8.1.6 KONTROLA AXIÁLNÍHO KLUZNÉHO LOŽISKA

[20, s. 10]

Při kontrole bude opět zjištěný kontaktní tlak v ložisku porovnáván s přípustným statickým zatížením ložiska a to ze stejných důvodů jako u kontroly radiálních ložisek.



$$p_{ax} = \frac{4}{\pi} \frac{F_{ax}}{D_{outal}^2 - D_{inal}^2} \quad (8.8)$$

$$p_{ax} = \frac{4}{\pi} \frac{1\,340}{0,09^2 - 0,06^2} = 0,379 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$p_{ax} = 0,4 \text{ MPa}$$

Podmínka:

$$p_{stlim} \geq p_{ax} \quad (8.9)$$

$$250 \text{ MPa} \gg 0,4 \text{ MPa} \Rightarrow \text{axiální ložisko vyhovuje}$$

kde:

p_{ax} [MPa] kontaktní tlak působící na axiální ložisko

D_{inal} [m] vnitřní průměr axiálního ložiska

D_{outal} [m] vnější průměr axiálního ložiska



ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zpracovat rešerši existujících řešení zařízení pro zásyp odpichového otvoru, následně navrhnout vlastní koncepci zařízení, provést příslušné návrhové výpočty a zhotovit výkresy vybraných konstrukčních celků. Hlavní nosnou částí diplomové práce se stala simulace chování materiálu při zasypání odpichového otvoru, která byla realizována v programu YADE. Simulace sloužila pro ověření a úpravu tvarů geometrie skluzu, přičemž hlavním hodnotícím kritériem bylo množství olivínu nacházejícího se v odpichovém otvoru po dokončení procesu zasypání.

Určitým úskalím DEM simulací reálných partikulárních materiálů je nedostupnost materiálových knihoven obsahujících základní parametry a vlastnosti materiálů potřebné při simulování pochodů a dějů partikulárních látek a proto byla provedena experimentální měření, která měla za úkol určit potřebné parametry (synný úhel, úhel vnitřního tření, úhel tření o ocelovou stěnu, koeficient restituace), které byly použity jako vstupní parametry simulovaného materiálu, nebo byly použity pro validaci ostatních parametrů simulace. Všechny simulace chování materiálu byly provedeny pro případ, kdy se pec při zasypání odpichového otvoru nachází ve vodorovné pozici. Pokud by se pec při zasypání nacházela v jiné poloze než vodorovné, tak by bylo třeba pouze posunout vyústění skluzu dál od středu pece (popř. blíže ke středu pece) v závislosti na úhlu naklopení elektrické obloukové pece, ale na globální chování materiálu nebude mít toto naklopení zásadní vliv.

S využitím simulace byly upraveny základní rozměry skluzu a následně proveden detailní konstrukční návrh zařízení, které svým uspořádáním respektuje vybranou koncepci a skládá se z pevného zásobníku, děleného nosného rámu, otočného skluzu, kamerové jednotky a uzavíracího šoupátka zásobníku. Konstrukce skluzu je samozřejmě uzpůsobena tak, aby bylo možné ke skluzu instalovat prorážec, jehož úkolem je čištění otvoru v EBT panelu. Nosný rám zařízení je proveden v dělené podobě, aby byla usnadněna montáž jednotlivých konstrukčních celků a aby bylo umožněno rozdělení zařízení na dva celky => nižší transportní výška při přepravě zařízení.

Aby mohlo být zařízení vyrobeno a instalováno na elektrické obloukové peci, tak je třeba ještě sestavit pneumatický obvod pro řízení pohybu skluzu a uzavíracího šoupátka násypky, dořešit vedení stlačeného vzduchu od skluzu a jednotlivých pohonů k pneumatickému rozvaděči, dále dořešit vedení chladicí vody od skluzu k upevňovací desce a navrhnout schéma elektroinstalace. Vytvořený materiálový model a zdrojový kód simulace je možné v budoucnu dále používat, jak pro simulace zasypání odpichového otvoru, tak i pro jiné případy zařízení a dopravních systémů, kde bude docházet k sypání olivínu, či jiného typu materiálu. Ovšem stále bude třeba brát výsledky simulací s určitou rezervou a to hlavně z důvodu nahrazení reálných zrn zrny kulovými a také z toho důvodu, že pro validaci materiálových a simulačních parametrů nebyly dostupné výsledky z měření a pozorování na reálném zařízení popř. na jeho prototypu. Aby tedy mohli být výsledky simulace prohlášeny za směrodatné, bylo by v budoucnu vhodné uskutečnit dílčí experimentální měření na prototypu či reálném zařízení a na základě těchto výsledků zpětně upravit parametry simulace, tak aby se simulace přiblížila zjištěnému reálnému chování materiálu.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

1. JONES, J. A. T. B. BOWMAN a P. A. LEFRANK. Electric Furnace Steelmaking. In: FREUHAN, R. J. *The making, shaping, and treating of steel: Steelmaking and Refining Volume..* Pittsburgh, PA: AISE Steel Foundation, 1998, s. 525-660.
2. FUCHS TECHNOLOGY HOLDING AG. *Sealing and filling device for a metallurgical furnace, metallurgical furnace, and method for ...* [online]. Vynálezce: FUCHS, G. Int. Cl.: B22D 41/14, B22D 41/46, F27D 3/15. Německo. Přihláška, WO/2011/009579. 2011-01-27 [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2011009579>
3. Melt Shop. *CHL Systems* [online]. © 2013 [cit. 2014-11-28]. Dostupné z: <http://chlsystems.com/p-78-Melt-Shop>
4. NUCOR CORPORATION. *Automatic sanding hopper systems and methods* [online]. Int. Cl. F27D 99/00, F27D 21/02. United States. Patent Application Publication, US20130320601 A1. 2013-12-05 [cit. 2014-12-05]. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US20130320601>
5. MORE S.R.L. *Newsletter August 2014* [online]. [cit. 2014-12-06]. Dostupné z: http://www.more-oxy.com/sites/default/files/downloads/mor_newslettere_august_2014_web.pdf
6. ERYAS MINING. WHAT IS OLIVINE? *ERYAS MINING: Olivine , Olivine Sand* [online]. Ankara: © 2010 [cit. 2015-01-21]. Dostupné z: <http://www.eryas.com/index2.html>
7. MACURA, J. *Sypnost práškových látek I.* Hradec Králové: 2006. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Farmaceutická fakulta v Hradci Králové, Katedra farmaceutické technologie. Vedoucí práce doc. RNDr. Zdenek Zatloukal, CSc. [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/download/120021354/?lang=cs>
8. ROZBROJ, J. a J. ZEGZULKA. Simulace (DEM) pohybu partikulární hmoty ve šnekovém dopravníku v aplikaci na konstrukci svislého In: ČERMÁK, R. *XXXVIII. mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012, s. 135 - 138. ISBN 978-80-261-0141-3.
9. SCHELLART, W. P. Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling *Tectonophysics* [online]. 2000, **324** (1), 1-16 [cit. 2015-04-22]. ISSN 00401951. DOI: 10.1016/S0040-1951(00)00111-6. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195100001116>
10. MALÁŠEK, J. *Stroje pro výrobu stavebních materiálů a stavebních dílců*. 2004.



11. FLUIDTECHNIK BOHEMIA S.R.O. *Lucaval L20 CZ* [online]. [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: http://www.fluidbohemia.cz/resources/upload/data/17_Lucaval_L20_CZ_120805.pdf
12. MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH. *Instruction Manual thermoIMAGER TIM* [online]. [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <http://www.micro-epsilon.cz/download/manuals/man--thermoIMAGER-TIM--en.pdf>
13. STRÁNSKÝ A PETRŽÍK. *Katalog pneumatických prvků: Pneumatické válce* [online]. 2012 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: http://www.stranskyapetrzik.cz/objekty/katalog_stransky_a_petrzik_13_150401.pdf
14. ŠMILAUER, V. et al. Yade Documentation. *The Yade Project* [online]. 2015, verze 2015-01-09.git-b8ef0c8 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <https://yade-dem.org/doc/Yade.pdf>
15. JACOBSEN, S. D. et al. Effects of hydration on the elastic properties of olivine. *Geophysical Research Letters* [online]. 2008, 35 (14) [cit. 2015-04-16]. ISSN 00948276. DOI: 10.1029/2008GL034398. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008GL034398/epdf>
16. HÖGANÄS BJUF AB. *Bricks: MgO Bricks* [online]. 2014 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: http://cement.hoganasbjuf.com/en/Products/~media/Files/HoganasBjufCement/Downloads2/Bricks_Magnus_MgO_v1_screen.pdf
17. HÖSCHL, C. *Rázová pevnost těles* [online]. Praha: ČVTS - Dům techniky Praha, 1977, 119 s. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.it.cas.cz/files/skripta/06_RAZOVA_PEVNOST_TELES-ocr.pdf
18. JINPO SPOL. S R.O. *ZAKRUŽOVANÁ POUZDRA KU/JU* [online]. [cit. 2015-05-08].
19. SHIGLEY, J. E. C. R. MISCHKE a R. G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s.. ISBN 978-80-214-2629-0.
20. SCHAEFFLER TECHNOLOGIES AG & CO. KG. *Metal/Polymer Composite Plain Bearings: Maintenance-free, Low-maintenance, Special designs, special ...* [online]. 2012 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_211_de_en.pdf
21. ODVÁRKA, P. Ethernet. *Svět sítí: Informace ze světa počítačových sítí* [online]. 2000 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.svetsiti.cz/clanek.asp?cid=Ethernet-1992000>
22. USB.ORG. *USB On-The-Go* [online]. 2002 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: http://www.usb.org/developers/onthego/london/OTG_mechanical.pdf



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a_{svl}	[m]	střední vzdálenost mezi radiálními ložisky
a_{TP}	[m]	vzdálenost těžiště prorážče od osy otáčení skluzu
a_{TS}	[m]	vzdálenost těžiště sestavy skluzu od osy otáčení skluzu
B_{dl}	[m]	šířka dolního radiálního ložiska
B_{hl}	[m]	šířka horního radiálního ložiska
C_{ch}	[Pa]	koheze materiálu
D_{dl}	[m]	vnitřní průměr dolního radiálního ložiska
D_{hl}	[m]	vnitřní průměr horního radiálního ložiska
D_{inal}	[m]	vnitřní průměr axiálního ložiska
D_{inkr}	[m]	vnitřní průměr kroužku
D_{MAXodp}	[m]	maximální průměr odpichového otvoru
D_{outal}	[m]	vnější průměr axiálního ložiska
E_{ol}	[GPa]	Youngův modul pro materiál zrn olivínu
F_{ax}	[N]	maximální síla působící v axiálním ložisku
F_{pr}	[N]	síla od vysouvací síly prorážče působící v místě radiálního ložiska
F_{pr2}	[N]	vysouvací síla při tlaku 0,6 MPa
F_{rad}	[N]	maximální síla v radiálních ložiscích
g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení
G_{nz}	[N]	tíhová síla neočekávaného zatížení
G_{pr}	[N]	tíhová síla prorážče
G_{pr2}	[N]	síla od tíhy prorážče působící v místě radiálního ložiska
G_{sk}	[N]	tíhová síla sestavy skluzu
G_{sk2}	[N]	síla od tíhy skluzu působící v místě radiálního ložiska
h_{flt}	[m]	rezerva pro případné umístění filtru násypky
h_{nas}	[m]	výška násypky
h_{ns}	[m]	zástavbová výška nožového šoupátka
h_{odp}	[m]	hloubka odpichového otvoru
h_{skmx}	[m]	maximální výška skluzu
h_{skns}	[m]	rezerva pro napojení skluzu na nožové šoupátko
h_{stav}	[m]	maximální výška zařízení
H_{dop}	[m]	výška pádu tělesa
H_{odr}	[m]	výška odrazu tělesa



J_{ep}	[kg·m ²]	předběžný ekvivalentní moment setrvačnosti
J_{Kamj}	[kg·m ²]	moment setrvačnosti kamerové jednotky
J_{Kamp}	[kg·m ²]	předběžný moment setrvačnosti kamerové jednotky
J_{pron}	[kg·m ²]	návrhový moment setrvačnosti prorážече
J_{prop}	[kg·m ²]	moment setrvačnosti pohonu prorážecího trnu
J_{prot}	[kg·m ²]	návrhový moment setrvačnosti prorážecího trnu
J_{prp}	[kg·m ²]	předběžný moment setrvačnosti prorážече
J_{SKLP}	[kg·m ²]	předběžný moment setrvačnosti skluzu
m_{Kamj}	[kg]	hmotnost kamerové jednotky
m_{nnz}	[kg]	hmotnost vyvolávající neočekávané zatížení
m_{nz}	[kg]	normálové zatížení působící na materiál
m_{pp}	[kg]	hmotnost prorážече
m_{pron}	[kg]	návrhová hmotnost prorážече
m_{prop}	[kg]	hmotnost pohonu prorážecího trnu
m_{protn}	[kg]	návrhová hmotnost prorážecího trnu
m_{sk}	[kg]	hmotnost sestavy skluzu
m_{sz}	[kg]	smykové zatížení působící na materiál
M_{ppk}	[N·m]	potřebný krouticí moment pohonu
p_{ax}	[MPa]	kontaktní tlak působící na axiální ložisko
p_{dynlim}	[MPa]	přípustné dynamické zatížení ložiska
p_{rmd}	[MPa]	kontaktní tlak ve spodním ložisku
p_{stlim}	[MPa]	přípustné statické zatížení ložiska
r_s	[m]	vzdálenost výstupního otvoru skluzu od osy rotace skluzu
R_{SK}	[m]	vzdálenost osy výstupní trubky skluzu od osy rotace skluzu
R_{SKLP}	[m]	předběžný poloměr skluzu
S_{inkr}	[m ²]	vnitřní plocha kroužku
t	[s]	čas simulace
t_{nc}	[s]	celkový návrhový čas pohybu skluzu
t_{nzp}	[s]	návrhová doba zrychlování pohybu
v_1	[m·s ⁻¹]	rychlost tělesa 1 před srážkou
v'_1	[m·s ⁻¹]	rychlost tělesa 1 po srážce
v_2	[m·s ⁻¹]	rychlost tělesa 2 před srážkou
v'_2	[m·s ⁻¹]	rychlost tělesa 2 po srážce



V_{MAXodp}	[m ³]	maximální objem odpichového otvoru
$V_{už}$	[m ³]	potřebný užitečný objem zásobníku
α_{SP}	[°]	úhel mezi skluzem a prorážecem
δ_{OLOc}	[°]	experimentálně stanovený úhel tření mezi materiálem a ocelí
ε_{MS}	[rad·s ⁻²]	úhlové zrychlení pohonu
ε_{OLOc}	[-]	Experimentálně stanovený koeficient restituce pro kombinaci olivín-ocel
ε_{OLOcS}	[-]	Simulační hodnota koeficientu restituce pro kontakt olivín-ocel
ε_{OLOcSv}	[-]	Vstupní simulační koeficient restituce pro kontakt olivín-ocel
ε_{res}	[-]	koeficient restituce
μ_{ifr}	[-]	koeficient vnitřního tření materiálu
ρ_{ol}	[kg·m ⁻³]	hustota zrn olivínu
ρ_{olB}	[kg·m ⁻³]	objemová hmotnost olivínu
σ_n	[Pa]	normálové napětí ve smykové rovině mezi kroužky
σ_{nMC}	[Pa]	mezní normálové napětí materiálu
τ_s	[Pa]	smykové napětí ve smykové rovině mezi kroužky
τ_{sMC}	[Pa]	mezní smykové napětí materiálu
φ_{ol}	[°]	úhel vnitřního tření olivínu
φ_{sk}	[rad]	celková úhlová dráha pohybu skluzu
φ_{skr}	[rad]	úhlová dráha při rozběhu nebo brzdění
φ_{SypEx}	[°]	experimentálně stanovený sypný úhel materiálu
φ_{SypSm}	[°]	Sypný úhel určený při simulačním experimentu
ω_{kj}	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost rotace kamerové jednotky
ω_{MS}	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost rotace kyvného pohonu
ω_{sk}	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost rotace skluzu
Δt	[s]	časová diference



SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Záznam z měření sypného úhlu materiálu pro trubku DN50

Příloha B: Záznam z měření sypného úhlu materiálu pro trubku DN110

Příloha C: Naměřené hodnoty úhlu vnitřního tření olivínu

Příloha D: Parametry materiálových modelů FrictMat a ViscELM

Příloha E: Argumenty funkce Ip2_FrictMat_FrictMat_MindlinPhys

Příloha F: Tabulka naměřených hodnot koeficientu restituce pro kombinaci olivín-ocel

Příloha G: Obrázkový záznam ze simulace chování materiálu pro prvotní návrh tvaru skluzu

Příloha H: Zbývající varianty úprav geometrie skluzu

Příloha I: Obrázkový záznam ze simulace chování olivínu pro variantu I

Příloha J: Obrázkový záznam ze simulace chování olivínu pro variantu II

Příloha K: Konstrukční řešení otočného uložení skluzu

Výkresová dokumentace

Zařízení pro zásyp odpichového otvoru	EM-C-001
Sestava spodní části zařízení	EM-C-002
Sestava skluzu	EM-C-003
Svařenec skluzu	EM-C-004

Příloha A: Záznam z měření sypného úhlu materiálu pro trubku DN50

Experiment č.1



Pohled pod -45°



Pohled pod +45°



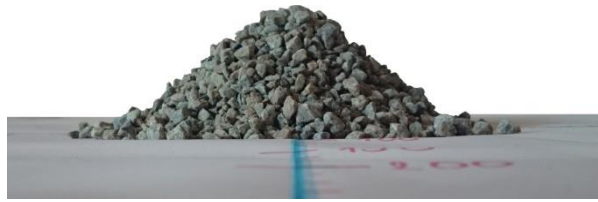
Experiment č.2



Experiment č.3



Experiment č.4



Experiment č.5



Příloha B: Záznam z měření sypného úhlu materiálu pro trubku DN110

Experiment č.1



Pohled pod -45°



Pohled pod $+45^\circ$



Experiment č.2



Experiment č.3



Experiment č.4



Experiment č.5



Příloha C: Naměřené hodnoty úhlu vnitřního tření olivínu

Vnitřní průměr trubky	D_{inkr}=0,1046 m
Plocha trubky	S_{inkr}=0,008593 m²

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Normálové zatížení m _{nz} [kg]	0,5720	0,6710	0,7790	0,8710	0,9465	1,1535	1,0805	1,0995	1,2565
Smykové zatížení m _{sz} [kg]	0,5510	0,5940	0,6850	0,8210	0,8610	1,0735	1,0220	1,0440	1,2250
Normálové napětí σ _n [Pa]	653,0	766,0	889,3	994,3	1080,5	1316,8	1233,5	1255,2	1434,4
Smykové napětí τ _s [Pa]	629,0	678,1	782,0	937,3	982,9	1225,5	1166,7	1191,8	1398,5

Číslo měření	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Normálové zatížení m _{nz} [kg]	1,3505	1,4535	1,5365	1,5365	1,6635	1,7565	1,8435	1,9595	1,9295
Smykové zatížení m _{sz} [kg]	1,1950	1,3910	1,3100	1,4050	1,4600	1,4580	1,5170	1,7660	1,6580
Normálové napětí σ _n [Pa]	1541,7	1659,3	1754,1	1754,1	1899,1	2005,2	2104,5	2237,0	2202,7
Smykové napětí τ _s [Pa]	1364,2	1588,0	1495,5	1604,0	1666,7	1664,5	1731,8	2016,1	1892,8

Číslo měření	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Normálové zatížení m _{nz} [kg]	2,1670	2,3655	2,6045	2,6045	2,7575	2,9505	3,1545	3,0155	2,9515
Smykové zatížení m _{sz} [kg]	1,9210	2,0480	2,0530	2,1230	2,3490	2,3880	2,3770	2,3550	2,2270
Normálové napětí σ _n [Pa]	2473,9	2700,5	2973,3	2973,3	3148,0	3368,3	3601,2	3442,5	3369,4
Smykové napětí τ _s [Pa]	2193,0	2338,0	2343,7	2423,6	2681,6	2726,2	2713,6	2688,5	2542,4

FrictMat((object)arg1)

density – hustota materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^3$]

dict – vrátí přehled atributů

dispIndex – vrátí třídni index této instance.

frictionAngle – úhel kontaktního tření v radiánech (úhel vnitřního tření)

id – číselné id tohoto zadávaného materiálu, je použito jen tehdy, když je zadávaný materiál sdílen (např. pomocí O.materials), jinak je parametru přiřazena hodnota -1. Tato hodnota je nastavena automaticky při vložení materiálu do simulace pomocí O.materials.append.

label – Textový identifikátor pro zadávaný materiál; může být použito pro sdílení materiálů - viz. využití s MaterialContainer

newAssocState – vrátí novou stavovou instanci, která je asociativní se zadávaným materiálem. Některé materiály mají speciální požadavky na stav částice a volání této funkce když je vytvářena příslušná částice uajistí jejich vzájemnou shodu (Toto je automaticky prováděno při zadávání a definici kulové částice).

poisson – Poissonova konstanta nebo poměr mezi smykovou a normálovou tuhostí [-]. Příkaz má rozdílný význam v závislosti na použité Ip2 funkci

updateAttrs – Aktualizuje objektové atributy z daného slovníku

young – elastický modul [Pa]. Má rozdílný význam v závislosti na použité Ip2 funkci.

ViscElMat((object)arg1)

cn – Normálová viskózní konstanta. Upozornění: Tento parametr nemůže být zadán, pokud je zadán parametr tc, en, nebo es!

cs – Smyková viskózní konstanta. Upozornění: Tento parametr nemůže být zadán, pokud je zadán parametr tc, en, nebo es!

density – hustota materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^3$]

dict – vrátí přehled atributů

dispIndex – vrátí třídni index této instance.

en – Koeficient restituce pro normálový směr

et – Koeficient restituce pro tangenciální směr

frictionAngle – úhel kontaktního tření v radiánech (úhel vnitřního tření)

id – číselné id tohoto zadávaného materiálu, je použito jen tehdy, když je zadávaný materiál sdílen (např. pomocí O.materials), jinak je parametru přiřazena hodnota -1. Tato hodnota je nastavena automaticky při vložení materiálu do simulace pomocí O.materials.append.

kn – Normálová elastická tuhost. Upozornění: Tento parametr nemůže být zadán, pokud je zadán parametr tc, en, nebo es!

ks – Smyková elastická tuhost. Upozornění: Tento parametr nemůže být zadán, pokud je zadán parametr tc, en, nebo es!

label – Textový identifikátor pro zadávaný materiál; může být použito pro sdílení materiálů - viz. využití s MaterialContainer

mR – Odolnost proti valení

mRtype – Typ odolnosti proti valení

newAssocState – vrátí novou stavovou instanci, která je asociativní se zadávaným materiálem. Některé materiály mají speciální požadavky na stav částice a volání této funkce když je vytvářena příslušná částice uajistí jejich vzájemnou shodu (Toto je automaticky prováděno při zadávání a definici kulové částice).

poisson – Poissonova konstanta nebo poměr mezi smykovou a normálovou napjatostí [-]. Příkaz má rozdílný význam v závislosti na použité Ip2 funkci

tc – Kontaktní čas

updateAttrs – Aktualizuje objektové atributy z daného slovníku

young – elastický modul [Pa]. Má rozdílný význam v závislosti na použité Ip2 funkci.

Jedná se o funkci, která počítá některé fyzikální parametry potřebné pro stanovení normálové a smykové tuhosti podle Hertz-Mindlinovi formulace.

Viskózní parametry mohou být zadány buď pomocí koeficientů restituce (e_n, e_s) nebo pomocí viskózního tlumícího poměru (β_n, β_s). Na tyto parametry jsou aplikována tyto pravidla:

- Když je zadán poměr β_n (β_s), tak je přímo zapsán tento poměr do argumentu *betan* (*betas*).
- Pokud je zadáno e_n , tak parametr *betan* je spočten s využitím vzorce $\beta_n = -(\log e_n) / \sqrt{\pi^2 + (\log e_n)^2}$. Stejný postup je aplikován i v případě zadání parametru e_s .
- Nesmí být nikdy zadány parametry e_n, e_s a β_n, β_s současně, jinak dojde k chybě, neproběhne výpočet a simulace se přeruší
- Pokud nebude zadán ani jedna z dvojic parametrů, budou parametry položeny rovny nule.

Přehled argumentů funkce

betan – Normálový viskózní tlumící poměr β_n

betas – Smykový viskózní tlumící poměr β_s

dict – vrátí přehled atributů

en – Normálový koeficient restituce e_n

es – smykový koeficient restituce e_s

eta – koeficient k určení plastického ohybového momentu

frictAngle – Instance MatchMaker určuje jak spočítat třecí úhel při interakci. Pokud není zadáno, je použita minimální hodnota.

gamma – parametr povrchové energie [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$] pro každý prvek kontaktního povrchu

krot – rotační tuhost pro momentové kontaktní pravidlo

ktwist – Torzní tuhost pro momentové kontaktní pravidlo

label – Textový identifikátor pro zadávanou funkci, umožňuje přímý přístup k parametrům funkce při výpočtu simulace

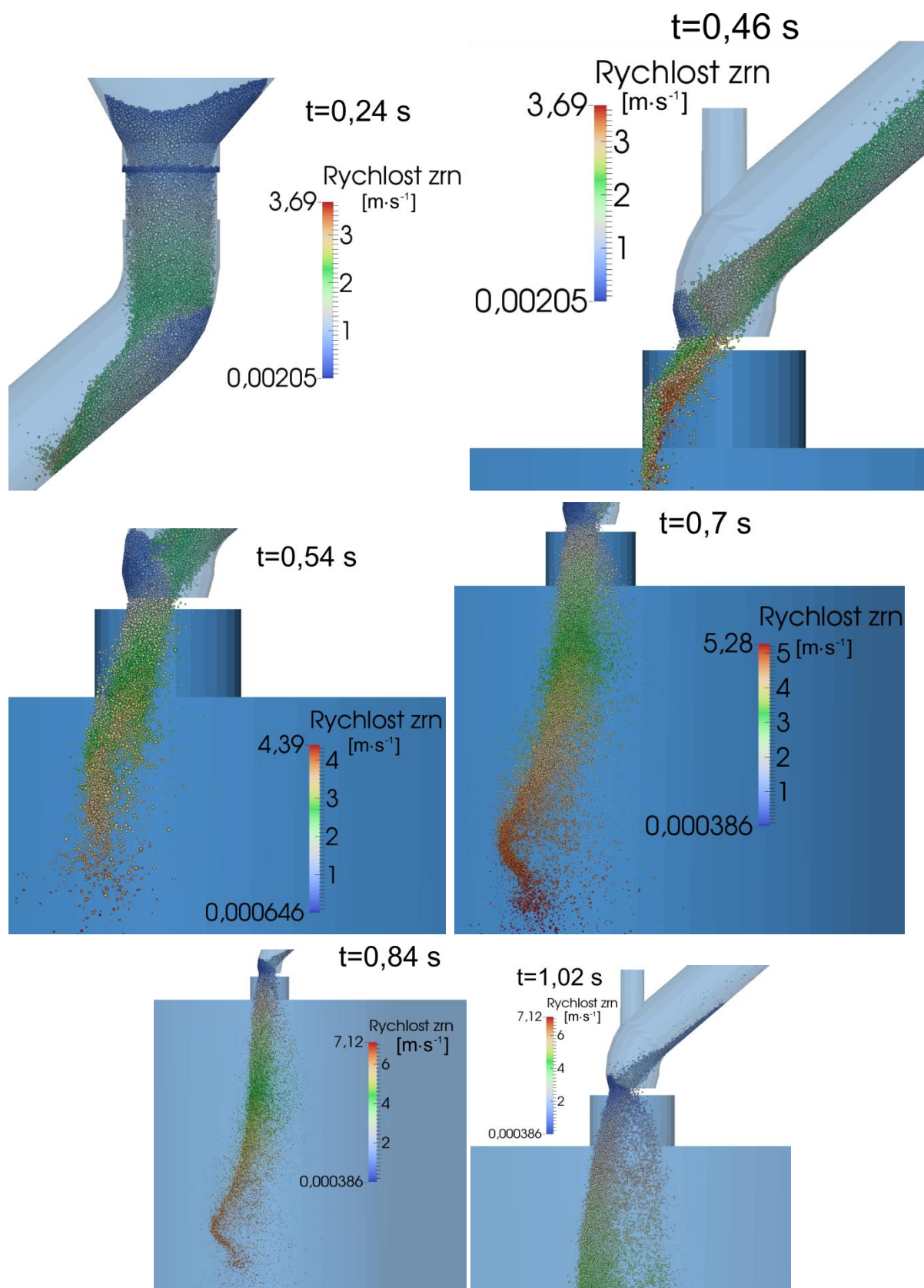
updateAttrs – Aktualizuje objektové atributy z daného slovníku

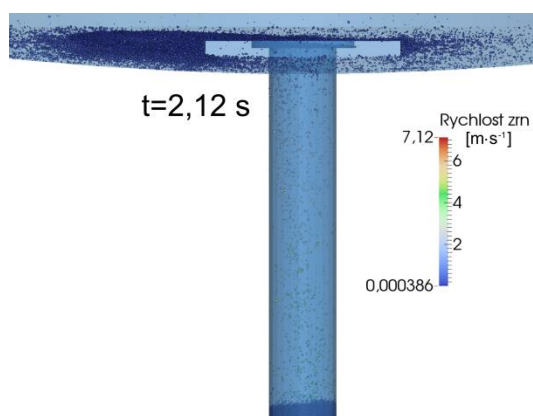
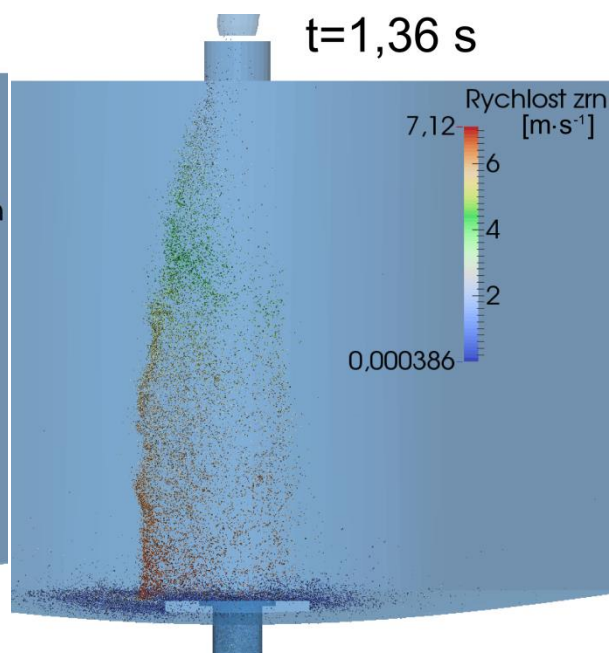
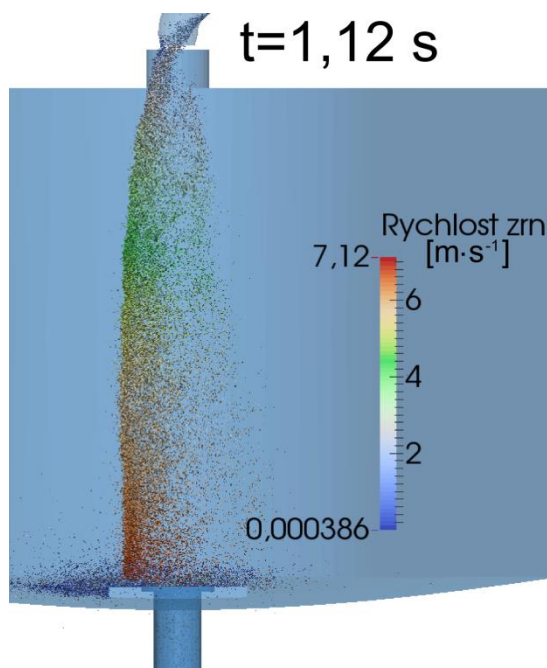
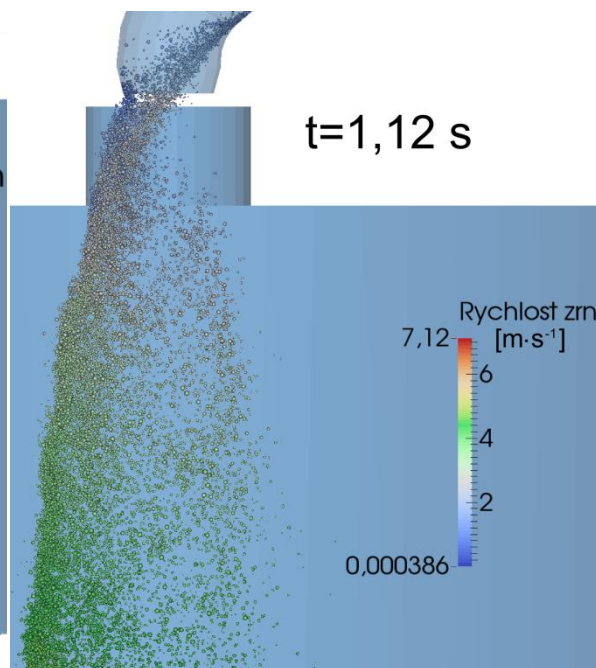
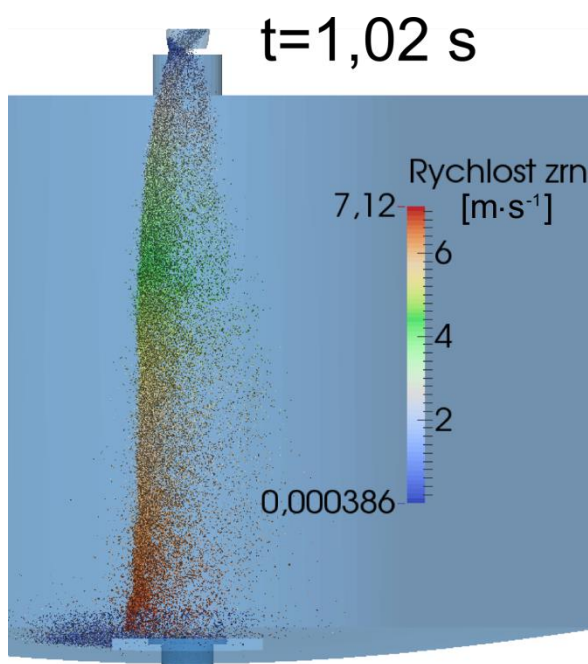
Příloha F: Tabulka naměřených hodnot koeficientu restituce pro kombinaci olivín-ocel

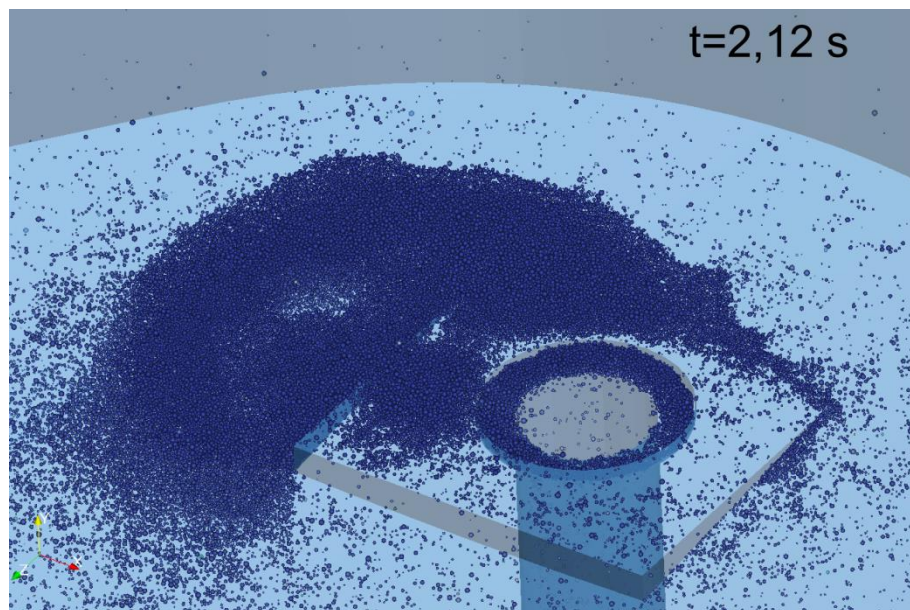
Číslo měření	Výška dopadu H_{dop} [m]	Výška odrazu H_{odr} [m]	Koeficient restituce [-]	Průměrný koeficient restituce pro jednotlivé H_{dop} [-]
1	0,35	0,068	0,441	0,445
2	0,35	0,07	0,447	
3	0,35	0,081	0,481	
4	0,35	0,078	0,472	
5	0,35	0,056	0,4	
6	0,35	0,059	0,411	
7	0,35	0,063	0,424	
8	0,35	0,083	0,487	
9	0,46	0,078	0,412	0,418
10	0,46	0,07	0,39	
11	0,46	0,073	0,398	
12	0,46	0,068	0,384	
13	0,46	0,11	0,489	
14	0,46	0,086	0,432	
15	0,51	0,086	0,411	0,436
16	0,51	0,103	0,449	
17	0,51	0,093	0,427	
18	0,51	0,107	0,458	
19	0,62	0,128	0,454	0,441
20	0,62	0,131	0,46	
21	0,62	0,092	0,385	
22	0,62	0,121	0,442	
23	0,62	0,136	0,468	
24	0,62	0,129	0,456	
25	0,62	0,108	0,417	
26	0,62	0,121	0,442	
27	0,78	0,156	0,447	0,513
28	0,78	0,181	0,482	
29	0,78	0,281	0,6	
30	0,78	0,261	0,578	
31	0,78	0,183	0,484	
32	0,78	0,208	0,516	
33	0,78	0,223	0,535	
34	0,78	0,213	0,523	
35	0,78	0,162	0,456	


 $\varepsilon_{oloc} = 0,4559 \cong \mathbf{0,46}$

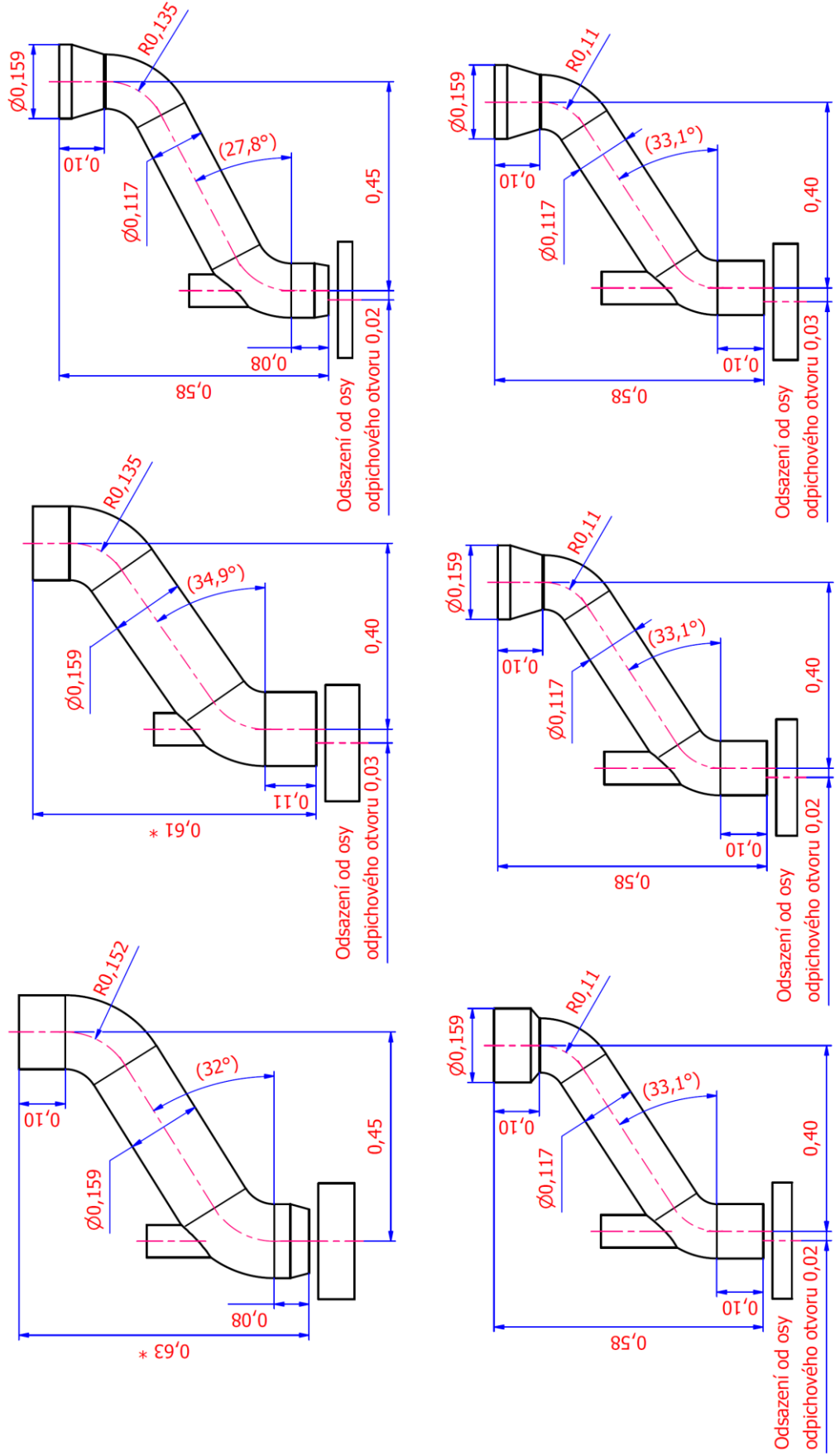
Příloha G: Obrázkový záznam ze simulace chování materiálu pro prvotní návrh tvaru skluzu





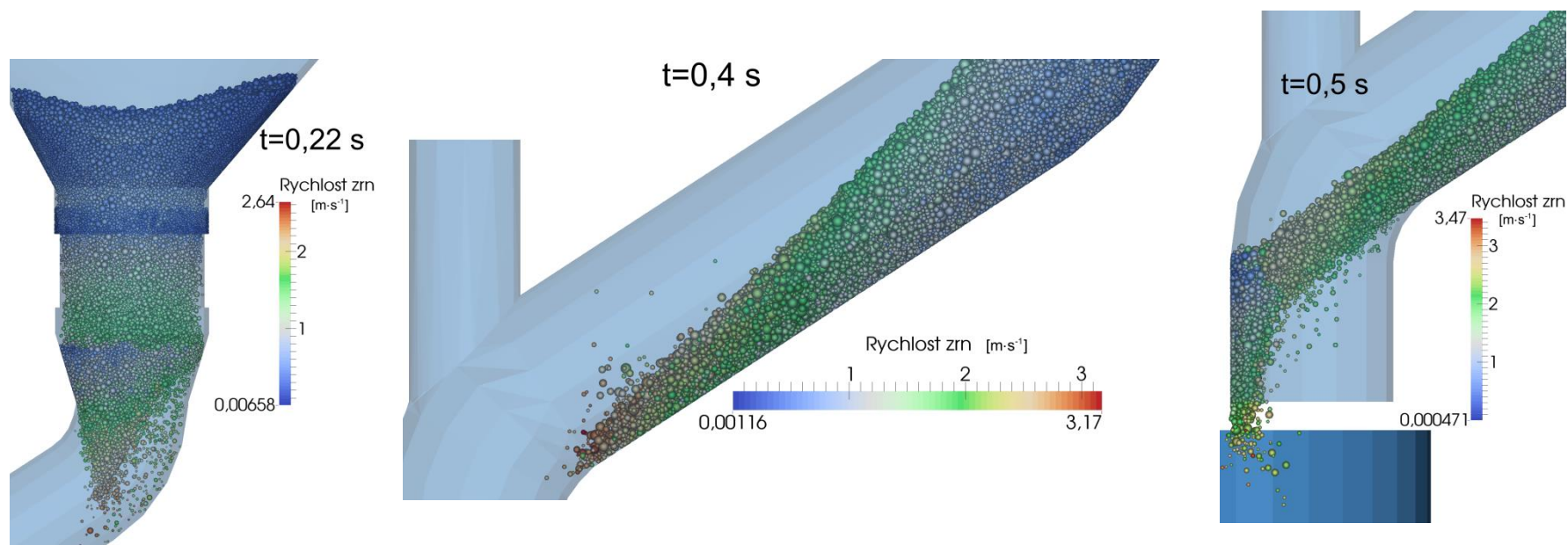


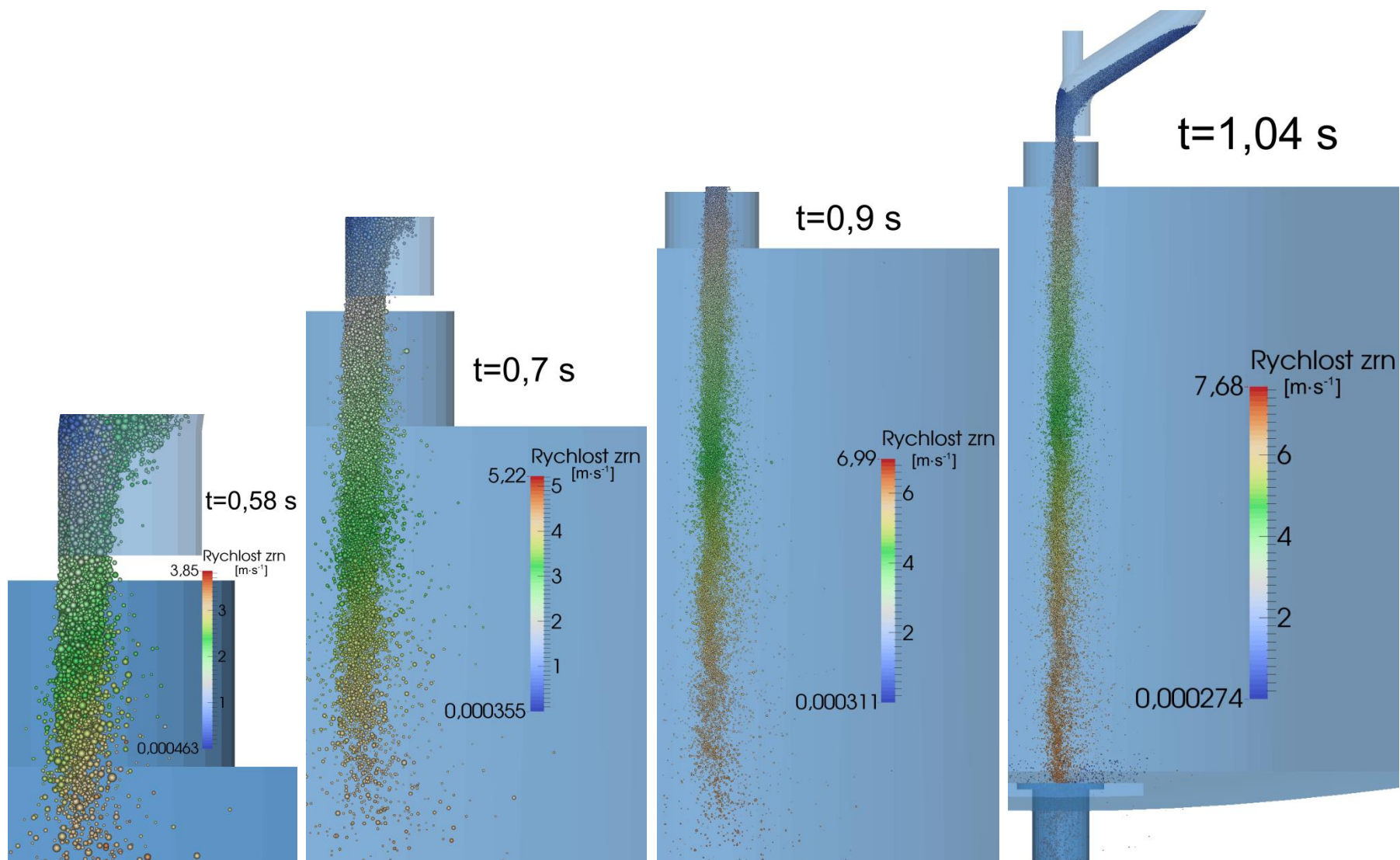
Příloha H: Zbývající varianty úprav geometrie skluzu

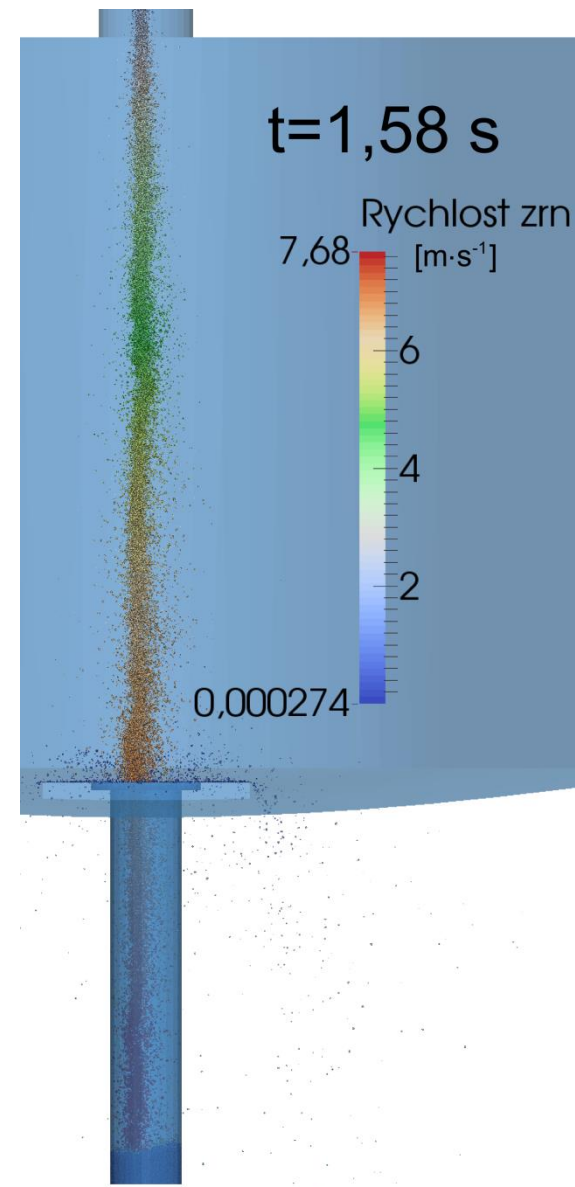
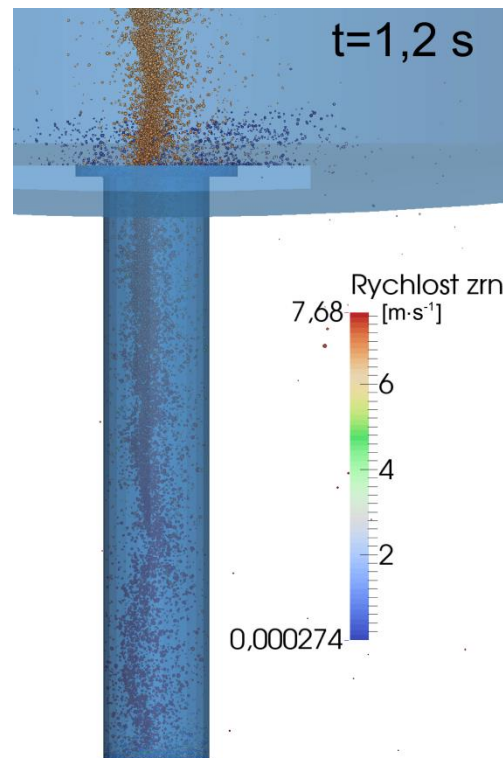
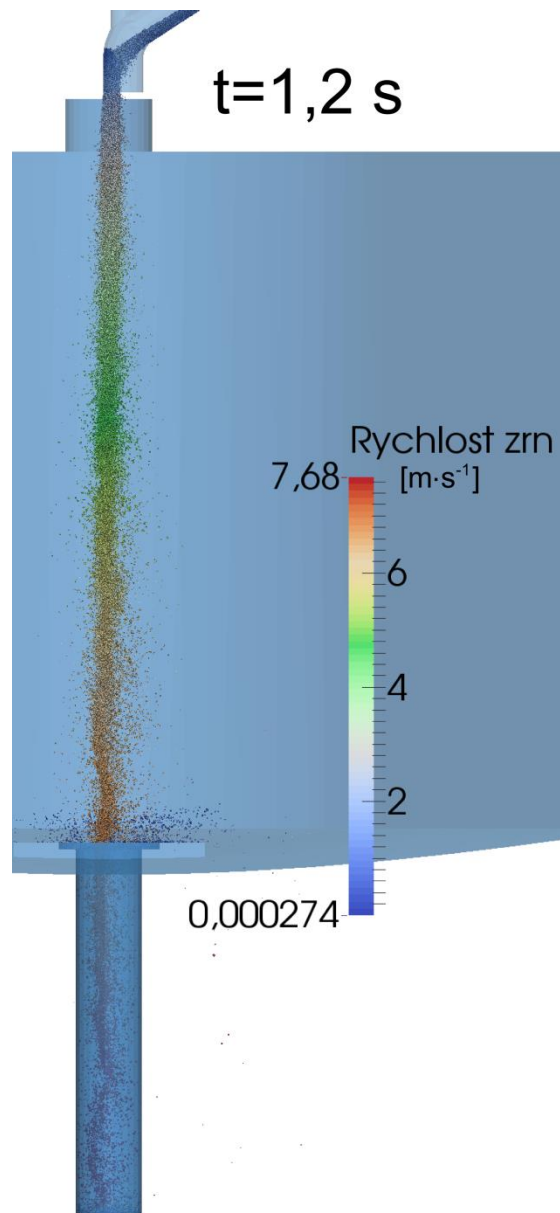


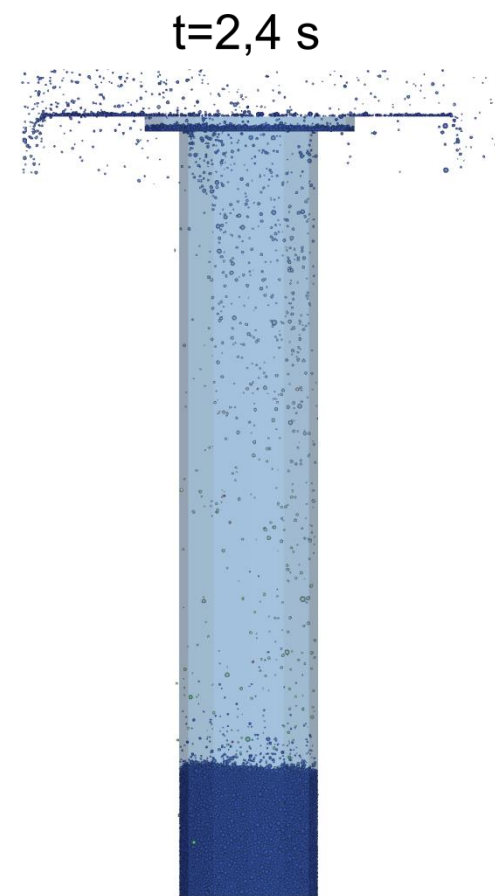
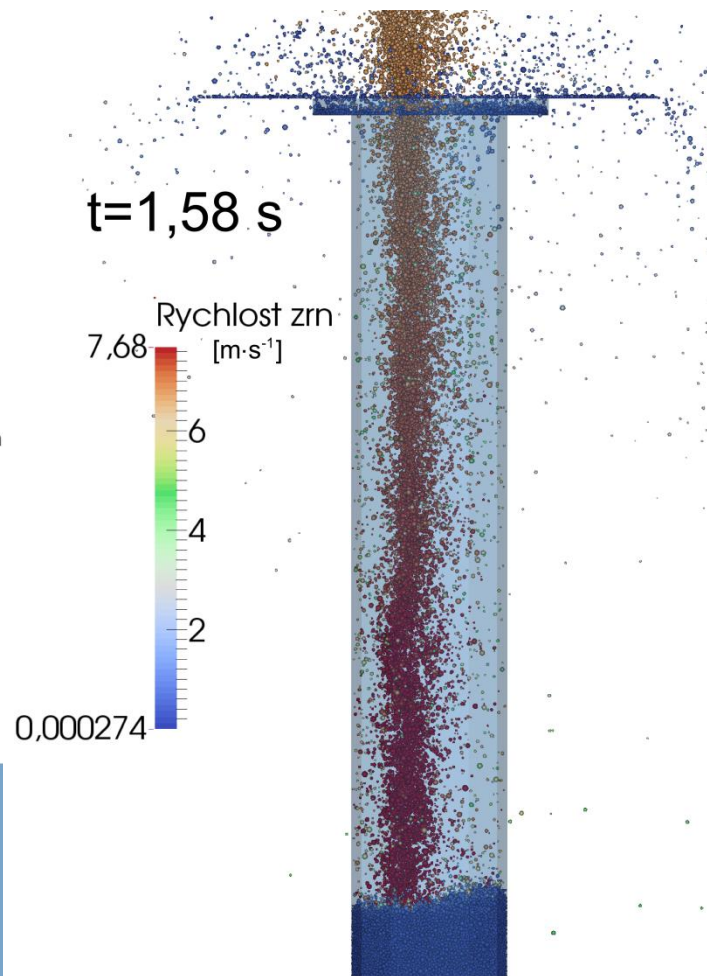
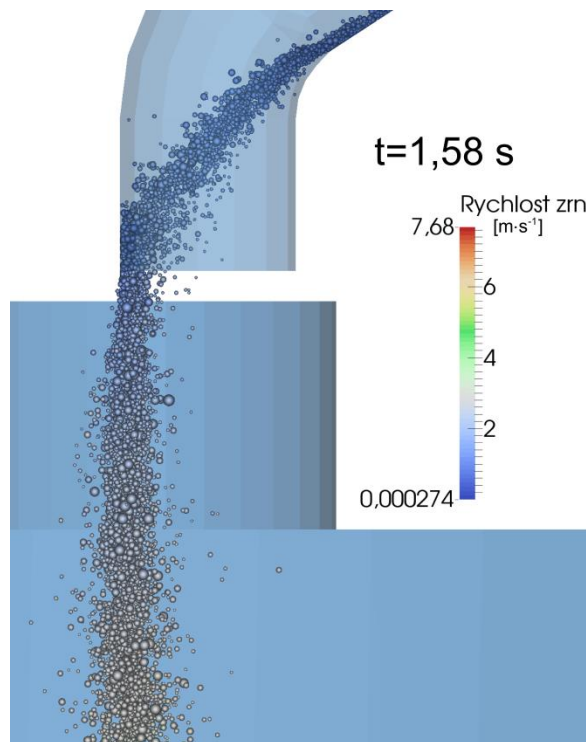
Uvedené rozměry v metrech ; * pro doaznění větší výšky skluzu byla snížena rezerva pro napojení skluzu na nožové šoupátko

Příloha I: Obrázkový záznam ze simulace chování olivínu pro variantu I

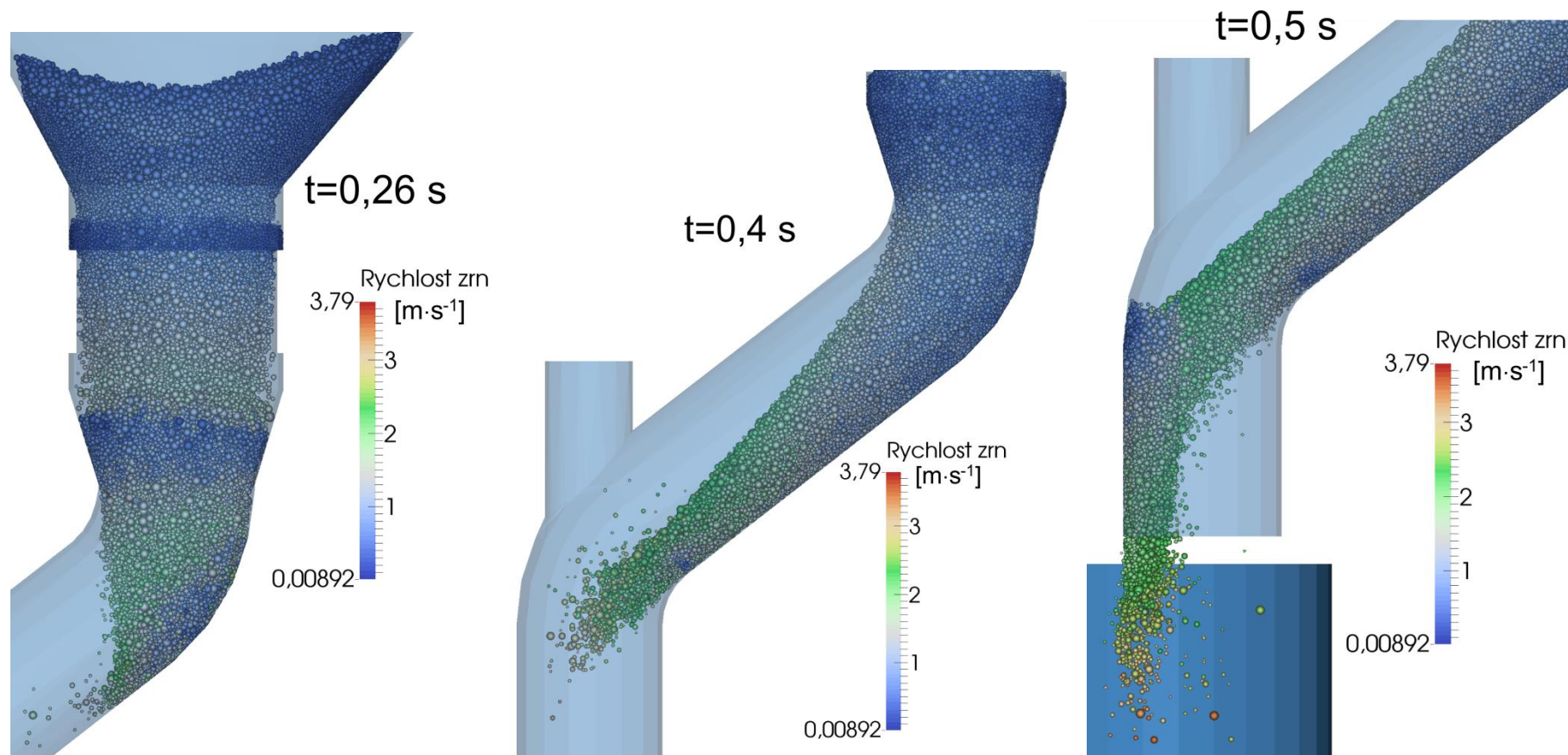


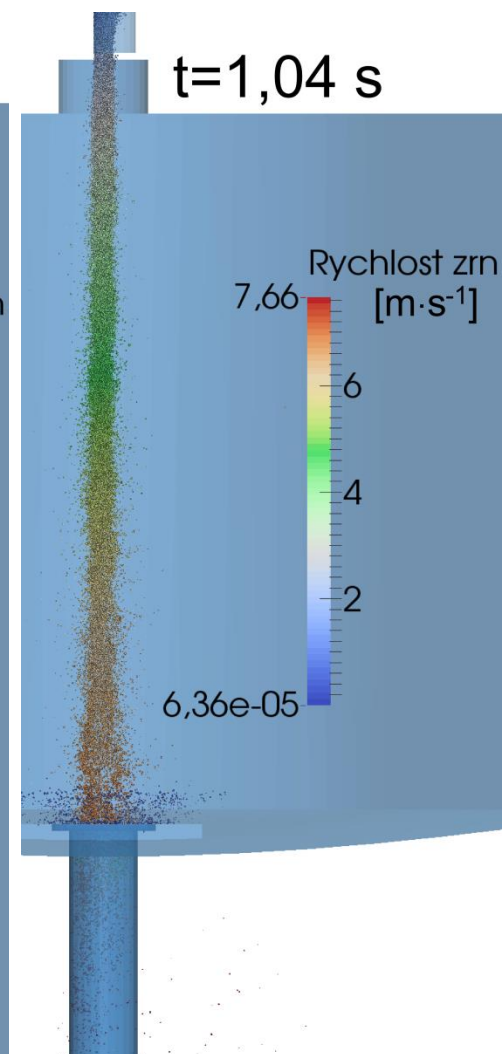
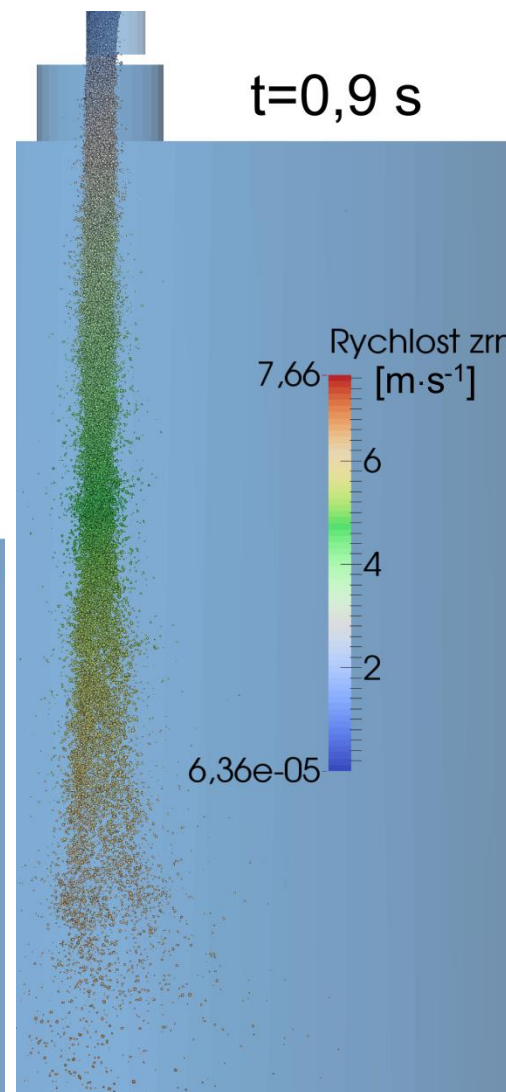
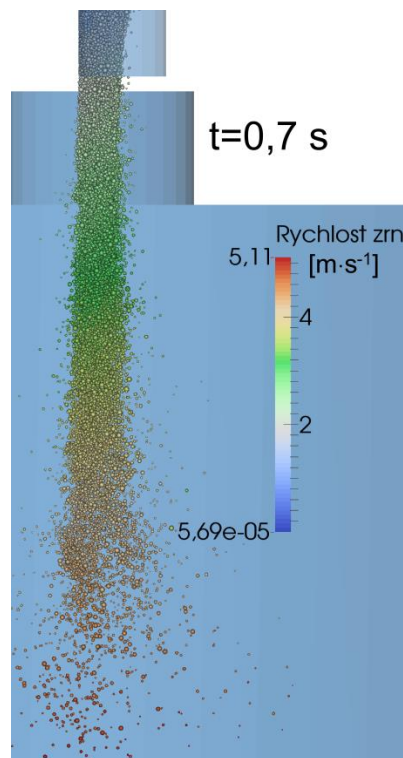
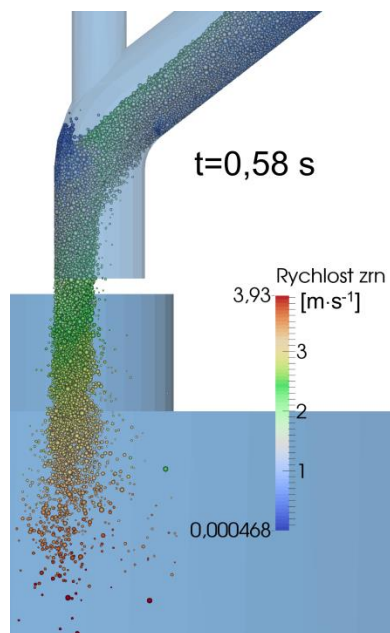


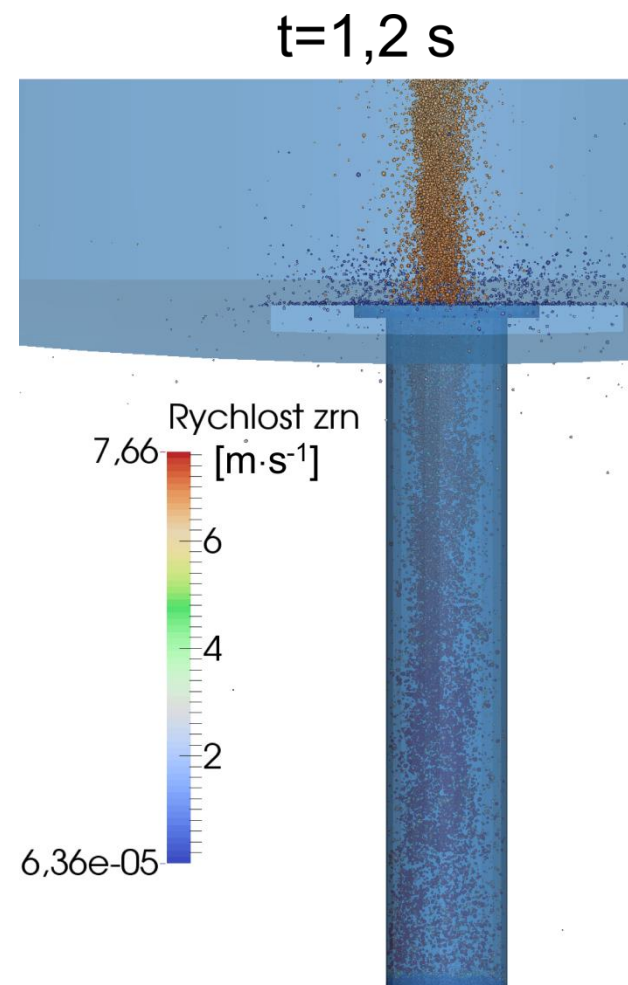
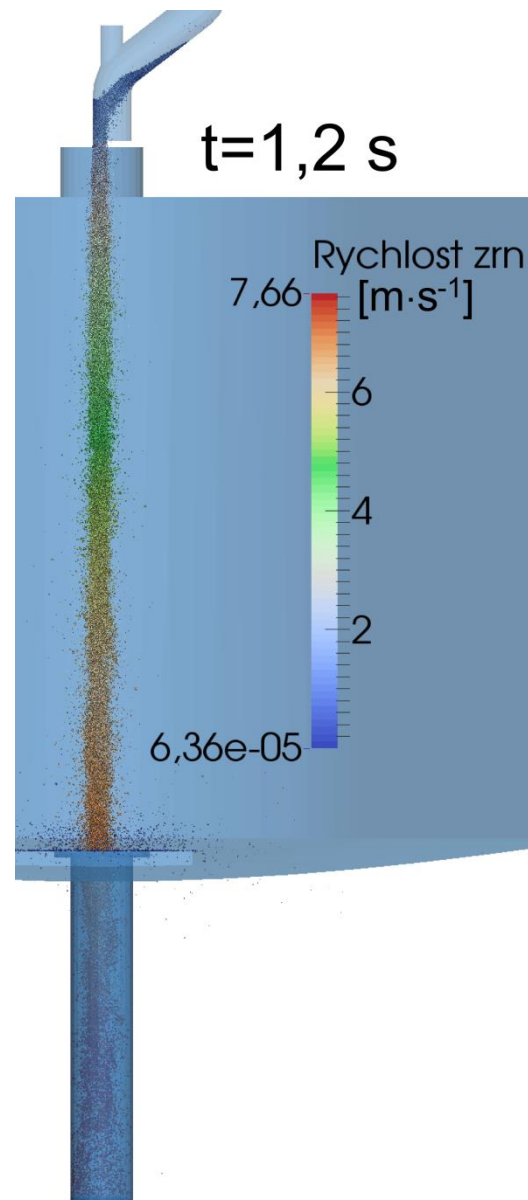
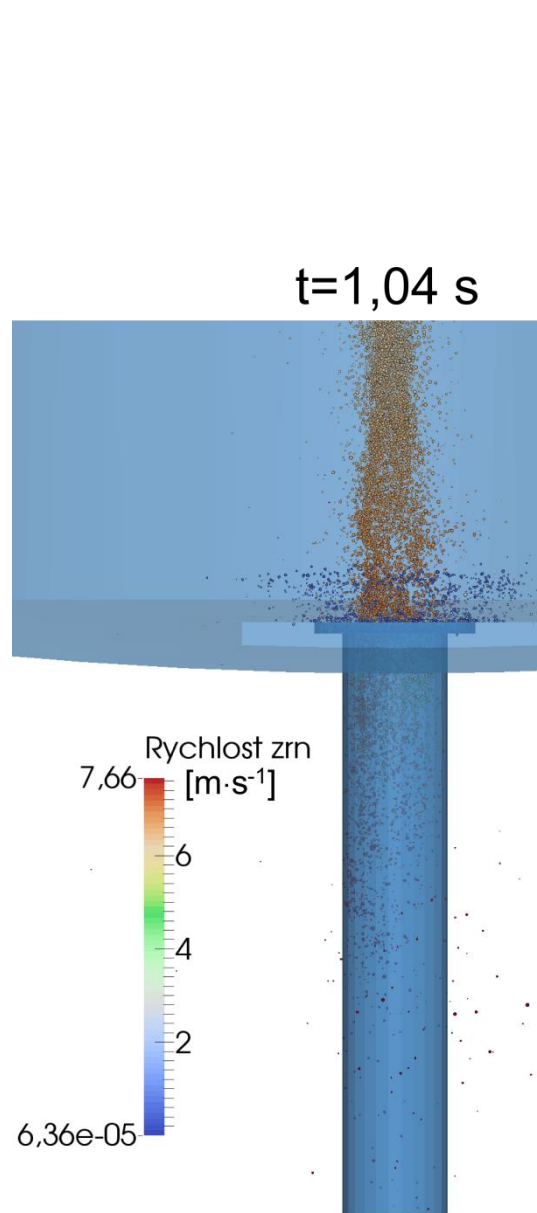


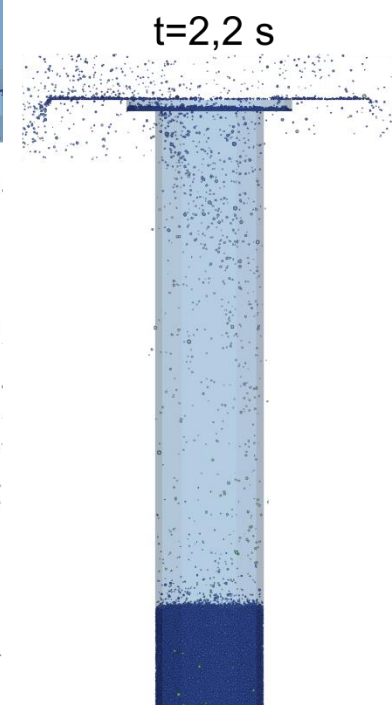
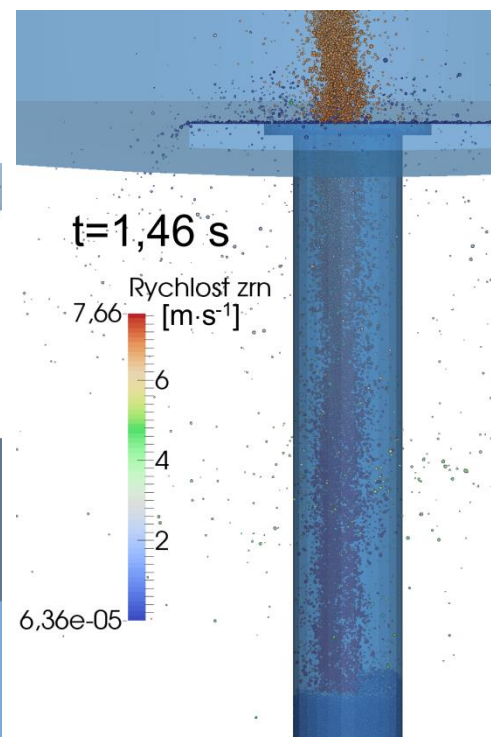
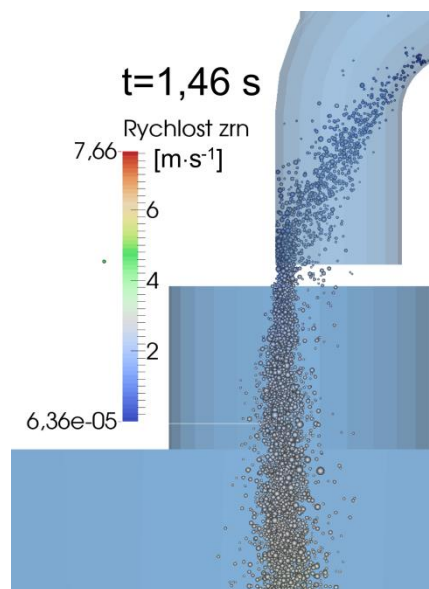
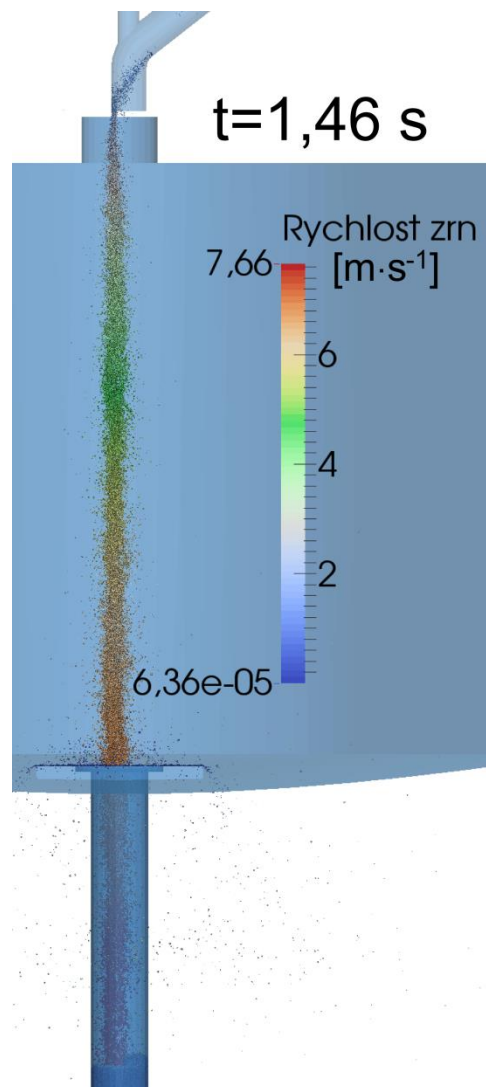


Příloha J: Obrázkový záznam ze simulace chování olivínu pro variantu II









Příloha K: Konstrukční řešení otočného uložení skluzu

