

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

**Simulace pohybu partikulární hmoty v zásobníku
v aplikaci na konstrukci modelu zásobníku**

Disertační práce

Studijní program:	P2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	2301V001 Dopravní a manipulační technika
Školitel:	prof. Ing. Jiří Zegzulka, CSc.
Doktorand:	Ing. Jan Vyletělek

Ostrava 2013

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou disertační práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením školitele disertační práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....

.....

podpis studenta

ANOTACE DISERTAČNÍ PRÁCE

Vyletělek, J. Simulace pohybu partikulární hmoty v zásobníku v aplikaci na konstrukci zásobníku. Ostrava: Institut dopravy, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013, školitel: Zegzulka, J.

Detailním sledováním a pochopením parametrů figurujících v procesu toku sypkého materiálu v nádobě, lze vyvíjet nové aplikace v zásobnících či procesních nádobách. Práce se zabývá optimalizací tvaru skladovací nádoby a jeho vlivu na dílčí parametry. Bylo pozorováno chování sypkého materiálu při změně mechanicko-fyzikálních vlastností materiálu a měřeny parametry toku vizuální metodou PIV s porovnáním nové simulační metody DEM.

Výsledkem pozorování a měření je zjištění průměrné rychlosti ve výpustném otvoru a času vyprázdnění nádoby s ohledem na změny tvaru nádoby a mechanicko-fyzikálních vlastností sypkého materiálu.

ANNOTATION OF THE DISSERTATION

Vyletělek, J. Particulate material movement simulation in silo in the applications for construction of silo model. Ostrava: Institute of transport, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2013, Thesis, head: Zegzulka, J.

By detailed monitoring and understanding of the parameters engaged in the bulk material flow process in a container, we can develop new applications in containers or process containers. The dissertations deals with the optimization of the storage container shape and its influence on the individual parameters. It was observed the behavior of bulk material at different mechanical and physical properties of the material and flow parameters measured using visual method PIV in comparison with the results of the new simulation method DEM.

The result of monitoring and measurement is to determine the average velocity at the drain hole and the container emptying time with regard to changes in container shape and mechanical properties of bulk material.

Obsah disertační práce

Seznam použitého značení.....	6
1. Úvod.....	9
2. Cíle disertační práce.....	10
3. Současný stav techniky a problematiky.....	11
3.1. Teorie konstruování skladovacích nádob	11
3.2. Problematika skladování a metodika řešení.....	14
3.3. Teorie pohybu částic a toku sypké hmoty	18
4. Sypká hmota	21
4.1. Klasifikace sypkých materiálů.....	21
4.2. Mechanicko-fyzikální vlastnosti.....	23
4.3. Zvolený materiál	31
5. Experimentální modely a zařízení	46
5.1. Návrh experimentálních modelů zásobníku	46
5.2. Verifikační zařízení.....	51
6. Virtuální modely zásobníků a simulace děje	53
6.1. Tvorba modelů.....	54
6.2. Počítačová simulace programem EDEM.....	56
7. Snímání experimentálního děje uvnitř modelu zásobníku.....	60
7.1. PIV metoda	60
7.2. Snímání pohybu materiálu	63
7.3. Výstupy z procesu snímání a měření dílčích hodnot.....	64
8. Měření mechanicko-fyzikálních vlastností namíchaného materiálu	68
8.1. Přístroj RST-01	69
8.2. Homogenní materiál	70
8.3. Míchání vzorků	71
8.4. Výsledky měření	75
9. Porovnání virtuálních simulací se zachycenými snímky	80
9.1. Model situovaný vertikálně bez naklápění	80
9.2. Model naklopený v ose x	93
9.3. Model nádoby s půlkruhovým průřezem.....	98
10. Závěr	107

11.	Seznam použité literatury a internetových zdrojů	109
12.	Seznam vlastních nebo spoluautorských prací	111
13.	Seznam příloh	111

Seznam použitého značení

A	namíchaný vzorek v poměru 50/50% částic průměru 2 a 3 mm	[-]
A ₁	namíchaný vzorek v poměru 25/75% částic průměru 2 a 3 mm	[-]
A ₂	namíchaný vzorek v poměru 75/25% částic průměru 2 a 3 mm	[-]
B	namíchaný vzorek v poměru 50/50% částic průměru 2 a 4 mm	[-]
B ₁	namíchaný vzorek v poměru 25/75% částic průměru 2 a 4 mm	[-]
B ₂	namíchaný vzorek v poměru 75/25% částic průměru 2 a 4 mm	[-]
C	namíchaný vzorek v poměru 50/50% částic průměru 2 a 5 mm	[-]
C ₁	namíchaný vzorek v poměru 25/75% částic průměru 2 a 5 mm	[-]
C ₂	namíchaný vzorek v poměru 75/25% částic průměru 2 a 5 mm	[-]
D	namíchaný vzorek v poměru 50/50% částic průměru 3 a 4 mm	[-]
D ₁	namíchaný vzorek v poměru 25/75% částic průměru 3 a 4 mm	[-]
D ₂	namíchaný vzorek v poměru 75/25% částic průměru 3 a 4 mm	[-]
E	namíchaný vzorek v poměru 50/50% částic průměru 3 a 5 mm	[-]
E ₁	namíchaný vzorek v poměru 25/75% částic průměru 3 a 5 mm	[-]
E ₂	namíchaný vzorek v poměru 75/25% částic průměru 3 a 5 mm	[-]
E _c	celková mechanická energie	[J]
E _k	kinetická energie	[J]
E _p	potencionální energie	[J]
F	namíchaný vzorek v poměru 50/50% částic průměru 4 a 5 mm	[-]
F ₁	namíchaný vzorek v poměru 25/75% částic průměru 4 a 5 mm	[-]
F ₂	namíchaný vzorek v poměru 75/25% částic průměru 4 a 5 mm	[-]
F _a	síla částice	[N]
F _t	síla elementu vyvozená vnitřním třením materiálu	[N]
G	tíhová síla elementu	[N]
O	obvod uvažovaného průřezu výpustného otvoru	[m]
P	hybnost soustavy	[kg·m·s ⁻¹]
R	hydraulický poloměr	[m]
S	plocha uvažovaného průřezu výpustného otvoru	[m ²]
V	objem nádoby	[m ³]
W	obsah vody	[%]
W _g	obsah přimíšené vody	[%]

W_{ex}	obsah vody hrubé	[%]
W_h	obsah vody zbylé	[%]
b_{min}	minimální šířka výpustného otvoru	[m]
d_{max}	maximální kusovitost materiálu	[m]
f	součinitel vnitřního tření materiálu	[-]
f_{fc}	tokový faktor	[-]
f_W	součinitel vnějšího tření	[-]
g	gravitační zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
h	výška elementu	[m]
h_a	potencionální výška částice	[m]
h_0	charakteristické výška materiálové vrstvy	[m]
k	součinitel sypnosti	[-]
k_c	součinitel provozní bezpečnosti dle Zenkova	[-]
k_N	součinitel nakypření	[-]
l	délka výpustného otvoru	[m]
m	hmotnost celého materiálu	[kg]
m_a	hmotnost částice	[kg]
r	poloměr nádoby	[m]
t	čas	[s]
v_a	rychlost částice	$[m \cdot s^{-1}]$
v_x	rychlost v ose x	$[m \cdot s^{-1}]$
v_y	rychlost v ose y	$[m \cdot s^{-1}]$
Δx	změna posunutí částic v ose x	[m]
Δy	změna posunutí částic v ose y	[m]
$\Delta \tau$	časový krok po sobě jdoucích snímků	[s]
α'	úhel smykové roviny	[°]
β	úhel sklonu stěny zásobníku	[°]
γ_s	sypná tíha materiálu	$[N \cdot m^{-3}]$
ε	úhel sklonu hrany zásobníku	[°]
π	Ludolfovo číslo	[-]
ρ_s	sypná hmotnost materiálu	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_v	objemová hmotnost materiálu	$[kg \cdot m^{-3}]$
σ_1	hlavní vertikální napětí	[Pa]
σ_2	hlavní horizontální napětí	[Pa]

σ_c	tlaková mez pevnosti	[Pa]
τ	smykové napětí	[Pa]
τ_0	počáteční smykové napětí	[Pa]
φ_e	efektivní úhel vnitřního tření materiálu	[°]
φ_{lin}	linearizovaný úhel vnitřního tření materiálu	[°]
φ_w	úhel vnějšího tření materiálu	[°]
Ψ_s	přirozený sypný úhel materiálu	[°]
Ψ_d	dynamický sypný úhel materiálu	[°]

1. Úvod

Lidstvo je i v dnešní době závislé na vytváření si zásob. Ať už ve formě surovinových zdrojů, nebo jako mezioperační proces logistického systému od zprostředkovatele ke spotřebiteli. Z toho vyvstává důležitost se problematikou spojenou se skladováním zabývat.

Rozsah skladovaných hmot, kterými se disertační práce zabývá se omezuje na hmoty partikulární neboli sypké.

Inženýrské dílo, které nám umožňuje skladovat sypké hmoty a chránit je před nepříznivými vlivy, se nazývá zásobník. K navržení zásobníku, který bude maximálně a bez problémů plnit svou funkci je důležité porozumět vlastnostem a chování sypkého materiálu.

Sypká hmota se skládá z jednotlivých částic ve vzájemném silovém působení a je ovlivňována vnějšími okrajovými podmínkami. Okrajovými podmínkami nazýváme geometrické parametry zásobníku, ale také veškeré vlivy, které na sypké těleso působí. Těmito vlivy mohou být tlaky, vlhkost, způsob dopravy, chemické vlivy, elektrostatické vlivy, ale také technologie výroby, která je hlavním aspektem pro tvar jednotlivých částic.

Tato disertační práce spadá do oblasti techniky dopravních a manipulačních zařízení a zabývá se sledováním dílčích parametrů s cílem kvalitativního vyhodnocení na procesech toku sypkého materiálu v nádobě. Mezi dílčí parametry můžeme zařadit rychlostní vektorové pole, segregaci a tokové profily. Díky získaným informacím dílčích parametrů lze vyvíjet nové aplikace v zásobnících či procesních nádobách. Řešenou problematikou je však udržení kontinuity toku a zabránění vzniku poruch toku sypké hmoty.

Metoda srovnávání experimentálních výsledků s novou simulační metodou otevírá dveře k novým aplikacím v oblasti skladování, ale především vede ke snížení finančních nákladů na konstrukce a zvýšení efektivity toku sypké hmoty.

V budoucnu se bude snižovat využívání experimentálních modelů pro získávání informací pro zdokonalování virtuálních modelů a veškerá problematika bude komplexně řešena virtuálně. Pomocí virtuálních modelů budou modelovány celé logistické procesy, které budou konstruovány na základě získaných informací.

2. Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je popsání chování partikulární hmoty v modelu zásobníku. Modely zásobníku jsou navrženy a koncipovány tak, aby bylo možné vymodelovat autentické modely pomocí programu EDEM a nasimulovat proces probíhající uvnitř zásobníku.

Na základě okrajových podmínek vytvořením modelů zásobníků lze pozorovat proces a popsat rychlosti pohybu jednotlivých částic sypké hmoty a zároveň změnou okrajových podmínek sledovat vznikající poruchy toku.

- 1) **Návrh a tvorba experimentálních modelů zásobníku** – návržení geometrie modelu ovlivňující chování materiálu a realizace pomocí dostupných materiálů
- 2) **Návrh a tvorba virtuálních modelů zásobníku** – v prostředí programu EDEM vytvořit modely autentické s experimentálními modely
- 3) **Snímání děje probíhajícího uvnitř modelu zásobníku** – připravit experimentální model zásobníku tak, aby bylo možné nasnímat děj probíhající uvnitř a vyhodnotit jednotlivé snímky
- 4) **Měření mechanicko-fyzikálních vlastností materiálu**- měnit homogenitu materiálu, proměřit mechanicko-fyzikální vlastnosti a porovnat případné změny s homogenními materiály
- 5) **Porovnání virtuálních simulací se zachycenými snímky** – porovnání jednotlivých výstupů pomocí vyhodnocovacího programu zařízení PIV a vyhodnocení virtuálních simulací v programu EDEM
- 6) **Závěr z dostupných vyhodnocení** – popsání stavů, kdy docházelo k jednotlivým poruchám toku

3. Současný stav techniky a problematiky

Doba kdy se kreslilo a navrhovalo na rýsovacích prknech už je dávno minulostí. Běžným konstrukčním prvkem je dnes počítač. Vývoj lepších a výkonnějších počítačů nelze zastavit a proto se k nám dostává nástroj umožňující množství operací a výpočtů za kratší dobu. Vznik internetových sítí umožňuje sdílení zdrojů dat, ale i vzájemnou komunikaci po celém světě, což z něj dělá nepostradatelný nástroj moderní informační společnosti.

S vývojem výkonnějších hardwarů se vyvíjí také softwarové produkty využívané k náročným výpočetním operacím využívající celý výkon počítače na maximum. Tyto produkty usnadňují práci konstruktérům při konstrukčních návrzích, ale také konstrukčních výpočtech. Tento stav techniky umožňuje předcházet kolizím.

V současnosti se dostáváme do fáze vývoje, kdy je možné celou navrženou konstrukci virtuálně zatížit a simulovat slabá místa. Simulací rozumíme napodobení nějaké skutečné věci, klíčových vlastností nebo abstraktního procesu. Simulace je dnes běžně používaná k modelování přírodních systémů s cílem získat poznatky o jejich fungování. Využití simulace se dnes rozrůstá v bezpečnostním inženýrství, testování, školení, vzdělávání a optimalizaci.

V této disertační práci je využíváno simulace k optimalizaci toku sypké hmoty.

3.1. Teorie konstruování skladovacích nádob

Skladovací nádoby pro skladování sypké hmoty nazýváme zásobníky, bunkry nebo sila. Tato zařízení slouží k uschování sypkého materiálu často na delší dobu, což může mít neblahý vliv na skladovaný materiál, ale také samotnou konstrukci zásobníku.

Na základě teoretických znalostí jsme schopni předejít mnoha problémům spojených se skladováním sypkých hmot.

Bunkry

Mají menší kapacitu a jsou určeny ke krátkodobému skladování. Mohou být nadzemní i podzemní. Bývají převážně betonové šterbinového typu s větším objemem pro velkokapacitní skladování paliva v koksovárnách. [2]

Sila

Slouží k vytvoření větší zásoby na delší dobu. Vhodné pro jemnozrnné dobře sypké materiály.

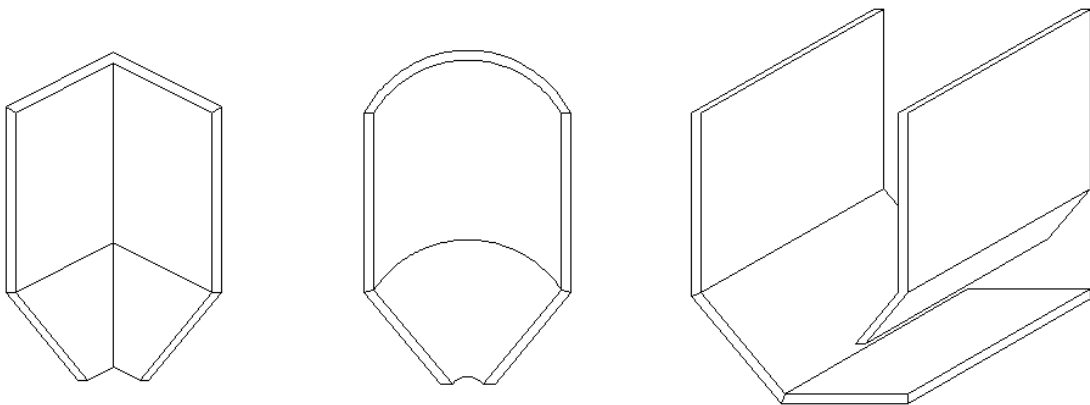
Bunkry a sila jsou zaplňovány shora a vyprazdňovány zdola, kam se přemísť materiál vlastní tíhou. Na plynulé vyprazdňování má vliv tvar výpusti, tvar nádoby, ale také materiál kontaktních ploch. [2]

Zásobníky

Zásobníky jsou nádrže geometrických tvarů sloužících k uskladnění sypkého materiálu. Mohou sloužit k vytvoření zásoby určitého množství materiálu na delší dobu, nebo k vyrovnávání navazující dopravy a tvořit tak operativní zásoby. [2]

Rozdělení dle tvaru:

- pravoúhlé (jehlancovité)
- kruhové (kuželovité)
- štěrbinové



Obr. 3.1: Pravoúhlý, kruhový a štěrbinový zásobník

Charakteristickými rozměry jsou rozměry samotné nádoby u kruhových zásobníků průměr D a u pravoúhlých délka stěn A , B . Dále pak rozměry výpustného otvoru d (kruhové) a a (pravoúhlé).

Chování materiálu je ovlivněno geometrickou stavbou:

- 1) úhlem sklonu stěny výpustného otvoru
- 2) úhlem sklonu hrany výpustného otvoru
- 3) velikostí výpustného otvoru

Doporučená podmínka pro návrh úhlu sklonu stěny:

$$\beta = \psi_s + (5 \div 15) \quad (3.1)$$

$$\beta > \varphi_w \quad (3.2)$$

Doporučená podmínka pro návrh úhlu sklonu hrany:

$$\varepsilon = \varphi_w + (5 \div 15) \quad (3.3)$$

$$\varepsilon > \psi_s \quad (3.4)$$

Velikost výpustného otvoru

Stanovení velikosti výpustného otvoru je nejdůležitější při návrhu zásobníku z důvodu poruch toku materiálu. Představme si element sypké hmoty nad výpustným otvorem a síly působící na něj. Pak z podmínky, aby tíha elementu dG byla větší než síla dF_t tvořená vnitřním třením materiálu, lze odvodit vztah pro minimální hydraulický poloměr výpustného otvoru R . [2]

$$dG > dF_t \quad (3.5)$$

$$S \cdot dh \cdot \gamma_s > \tau_o \cdot (1 + \sin \varphi_e) \cdot o \cdot dh \quad (3.6)$$

$$R = \frac{S}{o} > \frac{\tau_o \cdot (1 + \sin \varphi_e)}{\gamma_s} \quad (3.7)$$

Minimální velikost čtvercového otvoru:

$$a_{\min} = \frac{4 \cdot \tau_0 \cdot (1 + \sin \varphi_e)}{\gamma_s} \cdot k_C + d_{\max} \quad (3.8)$$

Velikost obdélníkového otvoru:

$$l = i \cdot b \quad i \in \langle 1; 2 \rangle \quad (3.9)$$

$$b_{\min} = \frac{1+i}{i} \cdot \frac{2 \cdot \tau_0 \cdot (1 + \sin \varphi_e)}{\gamma_s} \cdot k_C + d_{\max} \quad (3.10)$$

Velikost kruhového otvoru:

$$d_{\min} = \frac{4 \cdot \tau_0 \cdot (1 + \sin \varphi_e)}{\gamma_s} \cdot k_C + d_{\max} \quad (3.11)$$

3.2. Problematika skladování a metodika řešení

V důsledku nedostatečné znalosti teorie chování sypkých hmot dochází ke špatnému návrhu inženýrských děl a v závislosti na tom dochází k poruchám toku sypké hmoty v zásobnících. Odstraňování závad již na zhotoveném inženýrském díle je mnohdy finančně nákladnou záležitostí, proto je kladen důraz na rozvíjení znalostí v oblasti chování sypkých hmot.

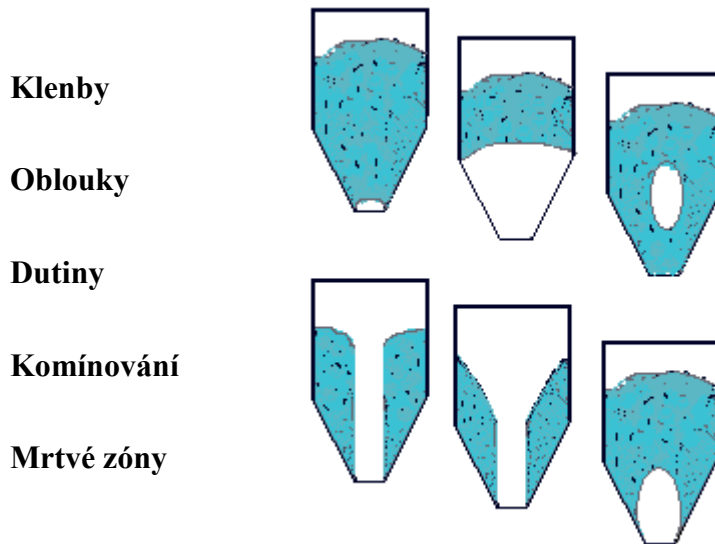
Prvním problémem bývá špatný návrh geometrie zásobníku, který nerespektuje vlastnosti skladovaného materiálu. Jde především o výpustný otvor, kde je klíčová jeho velikost, tvar a poloha vůči stěnám zásobníku. Z polohy výpustného otvoru vyplývají další důležité geometrické aspekty a to jsou úhly stěn, v případě jehlancovitého zásobníku také úhly hran zásobníku.

Druhým problémem může být špatně zvolený kontaktní materiál vnitřního povrchu stěn zásobníku.

Poruchy toku

Dojde-li k zástavě toku, je potřeba vnést do materiálu určité množství energie, která je schopna tok opět inicializovat. Energie se nejčastěji vnáší ve formě vibrací a

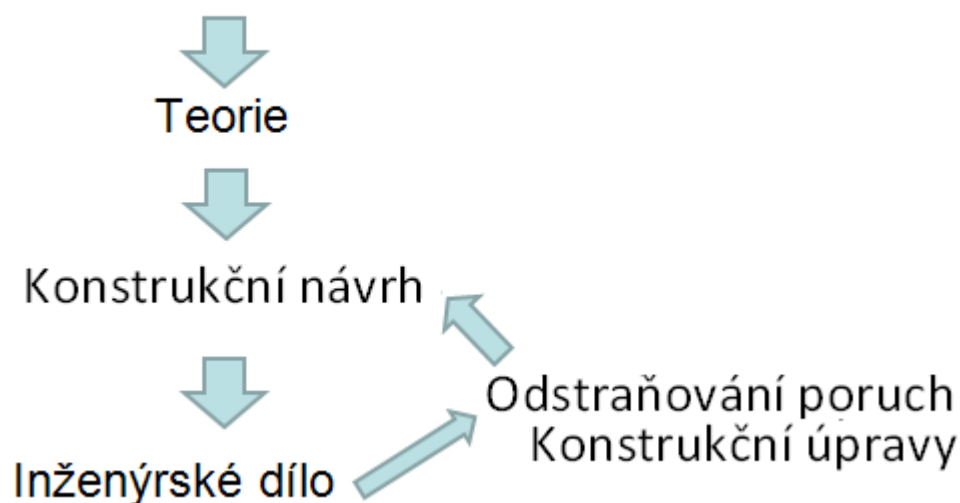
rázů nebo stlačeného vzduchu. Aplikace provzdušňování mění tokové vlastnosti jemnějších sléhavých sypkých hmot, což může mít za následek snížení funkčnosti navazující dopravy.



Obr. 3.2: Poruchy toku sypké hmoty

Návrh inženýrského díla pro skladovací nádoby je postavena na teoretických znalostech a konstrukčních zkušenostech konstruktérů. Metoda pokus omyl je v dnešní době finanční napjatosti zcela nepřijatelná. Přesto se stává, že dochází k nefunkčnosti nebo neideálnímu provozu inženýrského díla. To má za následek vznik procesu k odstraňování poruch nebo dokonce upravování konstrukčních návrhů s novou realizací inženýrských děl, z čehož vyplývá navyšování finančních prostředků na realizaci funkčního díla. Na obrázku (obr. 3.3) lze vidět metodiku procesu řešení konstrukčního návrhu, kdy po zhotovení inženýrského díla dle konstrukčního návrhu vznikají problémy funkčnosti a je třeba tyto problémy odstranit. Pokud lze funkčnost zařízení obnovit jednoduchou úpravou, nemusí se to významněji dotknout finančního rozpočtu inženýrského díla, ale v případě větších konstrukčních úprav může nastat komplikace. I ze schématu je patrné, že zpětné kroky v řešení problematiky naznačené šipkami směřujícími směrem nahoru na vyšší patra metodického schématu, jsou kroky zpochybňující proces od zadání úkolu k odevzdání funkčního inženýrského díla.

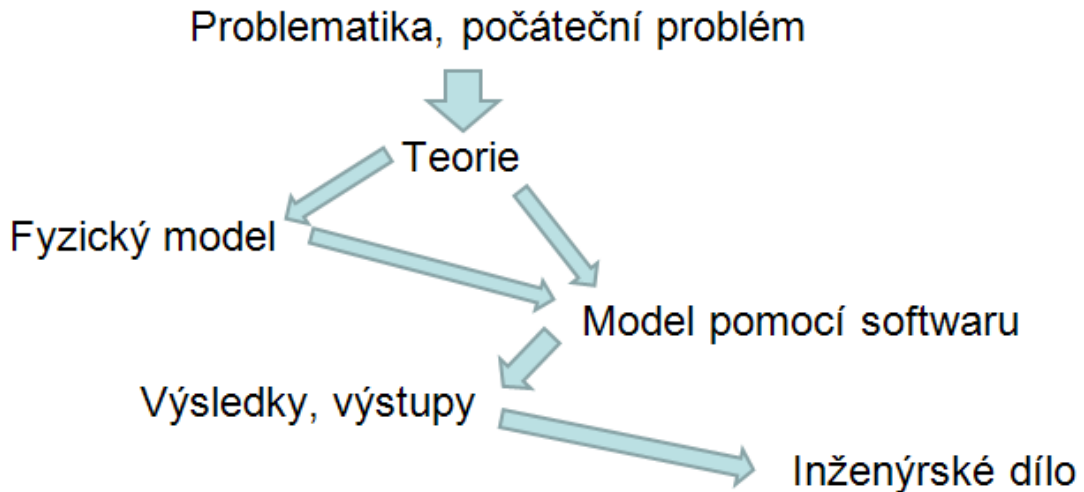
Problematika, počáteční problém



Obr.3.3: Schéma metodiky konstrukčního návrhu

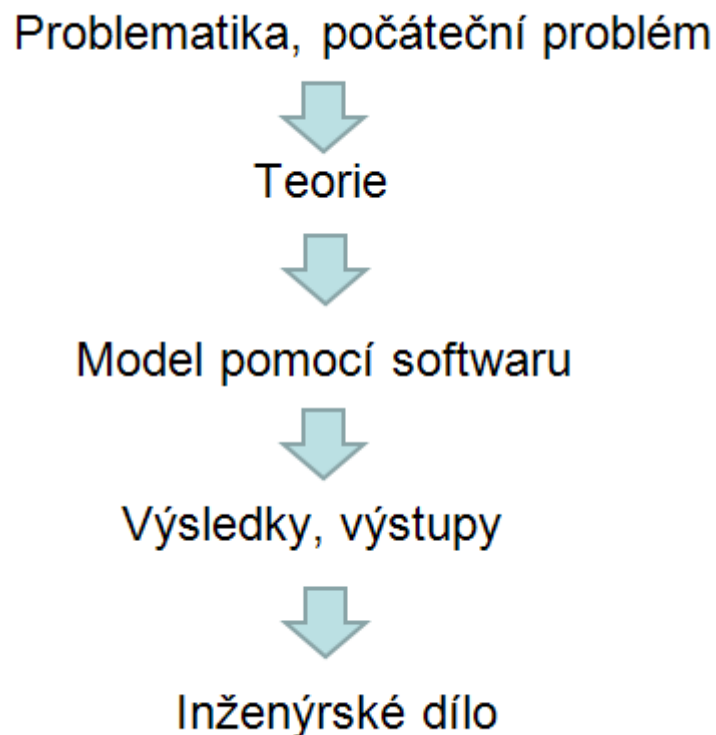
Nyní se dostáváme do vývojové fáze člověka, kdy po nástupu počítačů se vyvíjí stále nové softwarové programy, kterými můžeme vyřešit problematiku vyvstávající, někdy až při uvedení inženýrského díla do provozu.

Tato metodika znázorněná na obrázku (obr. 3.4) probíhá tak, že jakmile zadaný úkol rozklíčujeme pomocí teoretických znalostí, vytvoříme zmenšený experimentální model, na kterém můžeme testovat různé procesy chování vstupních prvků v závislosti na měnících se okrajových podmínkách daného procesu. Na základě informací získaných experimentálně z modelu se sestaví autentický model v softwarovém programu a experimentální proces se nasimuluje. Bude-li při porovnání výsledků experimentálních a virtuálně nasimulovaných docházet ke shodě, budeme moci využívat simulace k optimalizaci procesu.



Obr. 3.4: Schéma metodiky řešení s využitím experimentů

V budoucnu by se měl proces tvorby experimentálních modelů zcela vynechat. Řešení problematiky bude pak pomocí teoretických znalostí, databáze získaných informací z experimentálních měření a softwarového programu navrhováno s větší efektivitou a menší finanční náročností.



Obr. 3.5: Schéma metodiky řešení s využitím softwarových modelů

3.3. Teorie pohybu částic a toku sypké hmoty

Mechanika pohybu jedné částice se dá popsat základními vzorci mechaniky a fyziky. Částice má svou hmotnost, polohový vektor, rychlost a hybnost. Pro náš případ platí, že částice není volná, ale vázaná gravitačním polem planety Země.

V soustavě částic pak platí zákon síly pro každou částici, kde působí vnitřní a vnější síly. Vnitřní síly jsou ty, kterými působí částice mezi sebou a vnější jsou ty, kterými na soustavu částic působí jiná tělesa. [23]

$$F_a^i = \sum_{b=1}^n F_{ab} \quad (3.12)$$

$$F_a^i + F_a^e = \sum_{b=1}^n F_{ab} + F_a^e \quad (3.13)$$

Vzorec lze také zapsat jako:

$$\frac{dP_a}{dt} = F_a^i + F_a^e \quad (3.14)$$

Celková hybnost soustavy bude mít tvar:

$$P = \sum_{a=1}^n P_a \quad (3.15)$$

Energii soustavy částic lze zapsat viz.(3.14), když vynásobíme pohybovou rovnicí každé částice její rychlostí.

$$\frac{dp}{dt} \cdot v_a = F_a^i \cdot v_a + F_a^e \cdot v_a \quad (3.16)$$

Po sečtení.

$$\sum_{a=1}^n \frac{dp_a}{dt} \cdot v_a = \sum_{a=1}^n F_a^i \cdot v_a + \sum_{a=1}^n F_a^e \cdot v_a \quad (3.17)$$

$$\sum_{a=1}^n \frac{dp_a}{dt} \cdot v_a = \sum_{a=1}^n m_a \frac{dv_a}{dt} \cdot v_a \quad (3.18)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{a=1}^n m_a \cdot v_a^2 \quad (3.19)$$

Což představuje celkovou kinetickou energii. Nacházejí-li se částice v homogenním tíhovém poli lze vyjádřit potenciální energii vztahem.

$$E_p = g \sum_{a=1}^n m_a \cdot h_a \quad (3.20)$$

Celková mechanická energie soustavy částic bude.

$$E_c = E_k + E_p = \frac{1}{2} \sum_{a=1}^n m_a \cdot v_a^2 + g \sum_{a=1}^n m_a \cdot h_a \quad (3.21)$$

Jeden ze základních a nejpoužívanějších zákonů zvaný zákon zachování energie stanovuje, že energii nelze vyrobit ani zničit, ale pouze přeměnit na jiný druh energie. Dnes však tato definice podléhá řadě nedostatků a nepřesností. Mnohem obecnější definice zákona zachování energie zní:

Nechť je obecný systém symetrický vůči operaci časového posunutí. Pak se v tomto systému zachovává aditivní fyzikální veličina, která se nazývá energie.[25]

Výše uvedené vzorce a zákony jsou respektovány programem EDEM využívající pro výpočet simulace pohybu částic diskretních prvků.

Teorie toku sypké hmoty

Tok sypké hmoty byl rozdělen do dvou pohybů. První pohyb je nazýván primárním a vyznačuje se svislou trajektorií pohybu a bývá vykonáván současně více částicemi. Druhým pohybem se částice může vychylovat z primární trajektorie nebo otáčet kolem vlastních os, aniž by respektovala pohyb sousedních částic, i když tento pohyb má na ně částečný vliv. Sekundární pohyb přispívá ke sblížení jednotlivých částic což způsobuje zhuštění sypké hmoty. Na základě zkoušek bylo zjištěno, že objem elipsoidu primárního pohybu je patnáctkrát větší než objem elipsoidu sekundárního pohybu viz [6,16].

Na tuto teorii bylo navázáno prof. Ing. Jiřím Zegzulkou CSc., který pohyb sypké hmoty rozdělil a popsal jako dva mechanismy toku píستový a plášťový. Píستový

mechanismus je charakterizován translačním pohybem a plášťový mechanismus translačně rotačním pohybem.

Pístový mechanismus je popisován jako současně translačně vtékající blok částic. Ostatní částice kolem nichž se blok částic pohybuje jsou brána jako tuhý blok vymezující trajektorii pohybu.

Plášťový mechanismus toku je popsán jako vtok částice do pláště válce. Částice v oblasti okolo válce vtlačí vrstvu částic na plášti dovnitř a zaujmou její původní polohu na plášti válce. Okolní částice jsou potom brána jako tuhá tělesa, která musí uvolnit svou polohu pohybující se částici.

Tok sypké hmoty v zásobníku je odrazem její vlastní struktury (vlastností) a tvaru zásobníku. V zásobnících dochází ke dvěma druhům mechanismů toku označovaných jako hmotový a jádrový mechanismus toku.

Hmotový tok je popisován jako stav, kdy je celý objem skladovaného materiálu v pohybu. Materiál nasypaný do zásobníku jako první z něj bude jako první vyprázdněný se zachováním časové posloupnosti.

Jádrový tok je často nežádoucím mechanismem toku, protože materiál nasypaný do zásobníku jako první jej opustí jako poslední a to v případě úplného vyprázdnění, když není zásobník průběžně doplňován. Pokud je zásobník u nějž probíhá mechanismus toku jádrový v průběhu doplňovaný, materiál umístěný v mrtvé zóně může podléhat degradaci a zhutňování.

Těmto problémům se skladováním a ideálním tokem sypké hmoty lze předejít správným konstrukčním návrhem, přesto se v praxi stává, že jsou některé konstrukční prvky poddimenzovány a tím dochází ke kolizím toku i samotného inženýrského díla.

4. Sypká hmota

Sypká hmota je složena z jednotlivých partikulí (částic), které jsou ve vzájemném silovém působení. Chování partikulární hmoty je odrazem struktury a závisí na tvaru a velikosti jednotlivých částic. Tvar a velikost částice jsou důležité parametry pro pohyb částice prostředím jiných částic, ale také pro komplexní chování sypké hmoty. Proto je znalost vlastností sypké hmoty a jejich klasifikace základním klíčem k porozumění chování materiálů. [1, 6]

Z autorů zabývajících se problematikou chování sypkých hmot bych uvedl A. Katerfelda [16,17], S. Ludinga [18], U. Tüzüna [19], D. Schulzeho [8, 9, 10, 11, 12] a J. Zegzulku.

4.1. Klasifikace sypkých materiálů

V zájmu výrobců dopravních zařízení byl jedním z návrhů třídění sypkých materiálů způsob pomocí FEM (Fédération Européenne de la Manutention). [1]

Podle tohoto návrhu je sypká hmota charakterizována pěti údaji:

- a) Zrnistostí
- b) Soudržností
- c) Chováním během dopravy
- d) Objemovou hmotností
- e) Teplotou

Zrnitost je udávána dvěma znaky A-K a I-IV. První znak udává velikost zrna roztrháných do deseti skupin (tab. 4.1) a druhý znak udává tvar zrna (tab. 4.2).

Zrnitost		
označení	rozměr většiny zrn [mm]	
A	0	0,4
B	0,4	1
C	1	3
D	3	10
E	10	25
F	25	50
G	50	75
H	75	150
J	150	300
K	300	

Tab. 4.1: Klasifikace zrnitosti materiálu podle velikosti částic dle FEM [1]

Tvar zrna	
označení	kategorie
I	ostré hrany s přibližně stejnými rozměry ve všech dimenzích (kostky)
II	ostré hrany u nichž je jeden rozměr zřetelně větší než ostatní (hranoly)
III	ostré hrany u nichž je jeden rozměr menší než ostatní (desky, šupiny)
IV	oblé hrany s přibližně stejnými rozměry ve všech dimenzích (kulové tvary)
V	oblé hrany mající jeden rozměr větší než ostatní (válece, tyče)

Tab. 4.2: Klasifikace tvaru zrna materiálu dle FEM [1]

Soudržnost je udávána arabskými číslicemi 1-6 (tab. 4.3).

Soudržnost	
označení	Kategorie
1	ve vzduchu se vznášející a tekoucí
2	lehce tekoucí, ψ_s menší než 30°
3	normálně tekoucí, ψ_s 30° až 45°
4	těžko tekoucí, ψ_s 45° až 60°
5	soudržný, ψ_s větší než 60°
6	netekoucí, těžko od sebe oddělitelný

Tab. 4.3: Klasifikace soudržnosti materiálu dle FEM [1]

Chování během dopravy se označuje malými písmeny rozdělených do deseti skupin (tab. 4.4) a udává významnost pro dopravu.

Chování materiálu	
označení	vlastnost
o	abrazivní (obrusivý) (př. koks, křemen, struska)
p	korozivní (př. kuchyňská sůl)
q	rozbitelný (př. mýdlové vločky)
r	explozivní (př. uhelný prach)
s	hořlavý (př. hobliny, třísky)
t	prachovitý (př. cement)
u	vlhký
v	lepivý (př. vlhká hlína)
w	hygroskopický (př. sádra, kuchyňská sůl)
x	páchnoucí (př. odpadky)

Tab.-4.4: Klasifikace chování materiálu během dopravy dle FEM [1]

Objemová hmotnost sypkého materiálu se vyjadřuje jako podíl hmotnosti a objemu [t.m^3].

Teplota se měří přímo u vybraného materiálu [$^{\circ}\text{C}$].

4.2. Mechanicko-fyzikální vlastnosti

Vlastnosti sypkých materiálů jsou měřeny nepřímou. Mechanicko-fyzikální vlastnosti jsou získávány vyhodnocením měření z větší části na smykových strojích. Principem měření na smykových strojích je vyvození a snímání hodnot smykových sil, které jsou potřebné ke vzniku smykové roviny. Zde dochází k prokluzu mezi vrstvami sypkého materiálu, popř. k deformaci daného objemu sypkého materiálu ve smykové komoře, nebo v případě měření úhlu vnějšího tření k prokluzu sypkého materiálu v závislosti na typu kontaktního materiálu. Mezi mechanicko-fyzikální vlastnosti řadíme:

- zrnitost [%]
- vlhkost W [%]
- objemovou hmotnost ρ_v [kg.m^{-3}]
- sypnou hmotnost ρ_s [kg.m^{-3}]
- přirozený sypný úhel ψ_s [$^{\circ}$]

- úhel vnějšího tření φ_w [°]
- úhel vnitřního tření efektivní φ_e [°]
- úhel vnitřního tření linearizovaný φ_{lin} [°]
- počáteční smykové napětí τ_0 [Pa]
- hlavní vertikální napětí σ_1 [Pa]
- hlavní horizontální napětí σ_2 [Pa]
- tlaková mez pevnosti σ_c [Pa]
- tokový faktor f_{fc} [-]

Zrnitost nám udává složení materiálu dle tříd velikosti zrn a každá třída zaujímá procentuální obsah daného vzorku materiálu. Rozsah jednotlivé třídy je stanoven podle velikosti oka dvou po sobě následujících sít. Síta se řadí vzestupně od nejmenší okatosti po největší a k přesívání se využívá vibrační zařízení. Vibrace přenesené na vzorek materiálu prostřednictvím celého kompletu sestavených sít usnadňuje vstup materiálových částic menších rozměrů. Menší částice takto prostupují do nižších pater sestaveného síťového kompletu. Znázornění síťového rozboru se provádí pomocí grafu rozsévových křivek.

Vlhkost značíme písmenem W a hodnoty obsahu vlhkosti ve vzorku sypkého materiálu udáváme v procentech hmotnosti. Vzhledem k tomu, že obsah vody v sypkém materiálu se v průběhu jednotlivých logistických procesů může měnit, rozdělujeme obsah vody ve vzorku na tři základní: [1]

voda přimíšená W_g	[%]
voda hrubá W_{ex}	[%]
voda zbylá W_h	[%]

Za vodu přimíšenou považujeme množství vody, které lze ze sypkého materiálu oddělit jednoduše mechanicky. Mezi mechanické oddělování přimíšené vody z materiálu zahrnujeme především způsob filtrace nebo odstředování.

Po odstředění přimíšené vody nám v sypkém materiálu zůstane ještě voda hrubá, která se volně vypaří do vzduchu.

Zbylá voda v materiálu je kapilárně vázaná a tu lze odstranit pouze sušením. Sušení sypkého materiálu za účelem odstranění zbylé vody se provádí při teplotách okolo 110 °C. [1]

Objemová hmotnost sypkého materiálu vyjadřuje hmotnost známé objemové jednotky v rostlém stavu. Rostlým stavem se rozumí, že materiál může mít skryté dutiny nebo póry. U sypkých materiálů již v rozpojeném stavu lze tuto veličinu stanovit v závislosti na vlhkosti, neboli obsažené vodě v daném vzorku, kdy voda vyplní póry vzorku. Změříme-li objemovou hmotnost materiálu s přimíšeným obsahem vody a po vysušení můžeme poměrem těchto hodnot určit pórovitost materiálu.

Sypná hmotnost sypkého materiálu vyjadřuje hmotnost nasypaného materiálu do známé objemové jednotky, přičemž materiál musí být volně nasypáný, nikterak spěchovaný či udusaný.

Známe-li obě hodnoty hmotnosti objemové a sypné, lze si dopočítat součinitel nakypření, který zahrnuje poměr mezi objemovou hmotností (celistvý stav materiálu) a sypnou hmotností (rozpojený stav materiálu).

Součinitel nakypření:

$$k_N = \frac{\rho_v}{\rho_s} \quad (4.1)$$

Pro konstrukční návrhy je často využíváno veličiny sypné tíhy. Tato veličina označuje hmotnost rozpojeného materiálu ovlivněnou gravitačním polem.

Sypná tíha:

$$\gamma_s = \rho_s \cdot g \quad (4.2)$$

Přirozený sypný úhel je stanoven tečnou k svahu sypkého materiálu a vodorovnou rovinou, na kterou je sypký materiál volně nasypán. Způsob demonstrace pozvolným zvedáním válcové nádoby bez dna do níž byl sypký materiál nasypán je do jisté míry ovlivněn plněním válcové nádoby. Vezmeme-li v úvahu výšku nasypávání sypkého materiálu do válce, bude docházet u kompresibilních materiálů k poměrnému spěchování sypkého materiálu ve válci v závislosti na výšce nasypávání. Z praktických demonstrativních pokusů je patrné, že nasypávání objemu sypkým materiálem a pozvolným zvedáním válce může připomínat měření počátečního soudržného napětí. A právě počáteční soudržné napětí určuje výšku, do které se musí zaplněný válec zvednout, aby došlo k utržení materiálové vrstvy. Po takovém to utržení materiálové

vrstvy, kdy byl sypký materiál spěchován, se rozsype pod odlišným sypným úhlem než při volném nasypávání sypkého materiálu na vodorovnou rovinu.

Budeme-li působit vibracemi na volně nasypaný materiál prostřednictvím podložky, změní se přirozený sypný úhel na sypný úhel dynamický, který bývá menší.

$$\psi_s > \psi_d \quad (4.3)$$

Úhel vnějšího tření si lze představit jako úhel sklonu nakloněné roviny při sklouznutí sypkého materiálu, umístěného na nakloněnou rovinu. Jakmile se materiál začne po podložce pohybovat byly překonány tzv. klidové odpory. Ovšem při klouzání sypkého materiálu se nevyhneme působení tzv. pohybových odporů. Klidové odpory jsou větší než pohybové a proto také klidový úhel vnějšího tření je větší než pohybový úhel vnějšího tření. Do konstrukčních výpočtů se zahrnuje součinitel vnějšího tření, který se určí jako tangenta úhlu vnějšího tření.

Součinitel vnějšího tření:

$$f_w = \operatorname{tg} \varphi_w \quad (4.4)$$

Měření úhlu vnějšího tření se provádí na smykovém stroji. Reprezentativní vzorek sypkého materiálu se nasype do smykové cely a zatíží normálovou silou. Takto naplněnou a zatíženou celu uvedeme do pohybu smykovou silou a snímáme odpor, který sypký materiál při daném normálovém zatížení klade. Při změně normálového zatížení se nám mění také odpory kladené sypkým materiálem a s tím i smyková síla. Pro každé normálové zatížení dostaneme jednu průměrnou hodnotu smykové síly. Každá naměřená hodnota určuje jeden bod vnesený do grafu a propojením všech vnesených bodů dostaneme zpravidla lineární průběh, pouze u polymerních materiálů kontaktní podložky může vykazovat průběh křivkového charakteru.

Kontaktní materiál a jejich povrchová úprava má zásadní vliv na výsledky měření úhlu vnějšího tření, a také na konstrukční návrhy inženýrských děl, při kterých dochází ke kontaktu sypkého materiálu s kontaktním materiálem.

Úhel vnitřního tření efektivní zohledňuje tření mezi jednotlivými zrny sypkého materiálu a vyjadřuje úhel sklonu mezní tokové čáry v rovině σ - τ za klidu. Efektivní mezní toková čára vychází z počátku souřadného systému a je tečnou největší Mohrově

kružnici. Vzhledem k tomu, že se lineární křivka vynáší z počátku souřadného systému a je tečná k největší Mohrově kružnici, je směrodatné pro vynesení efektivního úhlu vnitřního tření velikost a počátek Mohrové kružnice, která se konstruuje na základě naměřených hodnot.

Měření se provádí obdobně jako u měření úhlu vnějšího tření. Pro konstrukční návrhy se využívá součinitele úhlu vnitřního tření, který se vyjadřuje vztahem:

$$f = \operatorname{tg} \varphi_e \quad (4.5)$$

Úhel vnitřního tření linearizovaný vyjadřuje úhel sklonu mezní tokové čáry v rovině σ - τ , která nahrazuje skutečnou mezní tokovou čáru přímkou, která je tečnou k nejmenší a největší Mohrově kružnici. Linearizovaný úhel se značí φ_{lin} . Linearizovaný úhel vnitřního tření je využíván k odečtení hodnoty počátečního smykového napětí τ_0 z grafu Mohrových kružnic.

Počáteční smykové napětí udává mezní hodnotu napětí při níž dochází k počátečnímu samovolnému smyku sypké hmoty. V jiné literatuře se lze setkat s označením tohoto napětí, jako počáteční soudržné. Tato hodnota je mezní, proto v případě nižší hodnoty než mezní udržuje sypký materiál pohromadě. Schopnost udržovat sypký materiál pohromadě pomocí vnitřního tření, má také vliv na přenášení smykových a tlakových namáhání, které se vztahuje zejména na ideální sypké materiály. Ostatní sypké materiály mají také schopnost přenášet malé tahové a krutové namáhání.

Samostatné měření se provádělo pomocí upravené nádoby s posuvnou deskou, kde posunutím jedné postranní desky směrem dolů se zvyšovala charakteristická výška materiálového klínu h_0 do momentu, kdy se materiálový klín sesunul pod úhlem smykové roviny α' . Charakteristická výška materiálového klínu a úhel sklonu smykové roviny je závislý na sypné tíze a součiniteli vnitřního tření materiálu. Vztah jednotlivých veličin a hodnota počátečního soudržného napětí může po dílčích úpravách nabýt výsledného tvaru:.

$$\tau_0 = \frac{\gamma_s \cdot h_0}{2} \cdot \frac{1 - \sin \varphi_e}{\cos \varphi_e} \quad (4.6)$$

Měřením na přístroji RST-01 [8], který je součástí vybavení laboratoře sypkých hmot, lze tuto hodnotu vyčíst po dokončeném měření v průvodní zprávě o měření, nebo také odečíst z grafu hlavních Mohrových kružnic. Hodnota počátečního soudržného napětí je dána výškou průniku vertikální osy smykového napětí τ a linearizované křivky úhlu vnitřního tření φ_{lin} .

Hlavní vertikální napětí vzniká působením vlastní tíhy sypkého materiálu na dno nádoby. Toto napětí je z velké části ovlivněno výškou materiálové vrstvy h a součinitelem úhlu vnitřního tření sypkého materiálu. Z důvodu vlastností sypkého materiálu nelze pro výpočet těchto tlaků použít Pascalova zákona, uvažujícího rovnoměrné šíření tlaků všemi směry. Sloupec materiálové vrstvy v nádobě je zavěšen na ostatních vrstvách materiálu a jejich prostřednictvím na stěnách nádoby. Proto je důležité zahrnout do výpočtu hlavního vertikálního napětí vnitřní i vnější tření materiálu. Tyto aspekty jsou zahrnovány v teorii dle Jansena a vyjadřují se vzorcem:

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_s \cdot R}{f \cdot k} \cdot \left(1 - e^{\frac{-k \cdot f \cdot h}{R}} \right) \quad (4.7)$$

Po vyhodnocení měření na přístroji RST-01 [8] lze tuto hodnotu vyčíst v průvodní zprávě měření, jinak bývá tato hodnota počítána pro pevnostní kontrolu konstrukčních návrhů dle výše uvedeného vztahu.

Hlavní horizontální napětí také vzniká působením vlastní tíhy sypkého materiálu, ale ne na dno nádoby nýbrž na stěny nádoby. Toto napětí je z velké části ovlivněno výškou materiálové vrstvy h a součinitelem úhlu vnitřního tření sypkého materiálu. Výpočet horizontálního napětí vychází z rovnice vertikálního napětí, avšak je zde zahrnut materiálový součinitel sypanosti sypkého materiálu k .

Součinitel sypanosti:

$$k = \frac{1 - \sin \varphi_e}{1 + \sin \varphi_e} \quad (4.8)$$

Součinitel sypanosti může nabývat hodnot v intervalu (0;1) ,kdy hodnota 1 odpovídá úhlu vnitřního tření pro kapaliny a hodnota 0 odpovídá úhlu vnitřního tření pro tuhé materiály.

Výsledný vzorec pro hlavní horizontální napětí je:

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot k \quad (4.9)$$

V případě dosazení hlavního napětí vertikálního bude vzorec pro hlavní napětí horizontální změněn na:

$$\sigma_2 = \frac{\gamma_s \cdot R}{f} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot f \cdot h}{R}} \right) \quad (4.10)$$

Po dosazení okrajových hodnot nespádajících do intervalu součinitele sypanosti lze potvrdit, že napětí vertikální a horizontální se budou rovnat v případě $k=1$ (kapalina) a při dosazení součinitele sypanosti $k=0$ (pevný materiál), bude horizontální napětí nulové, proto bude stěna nádoby zcela nezatižená.

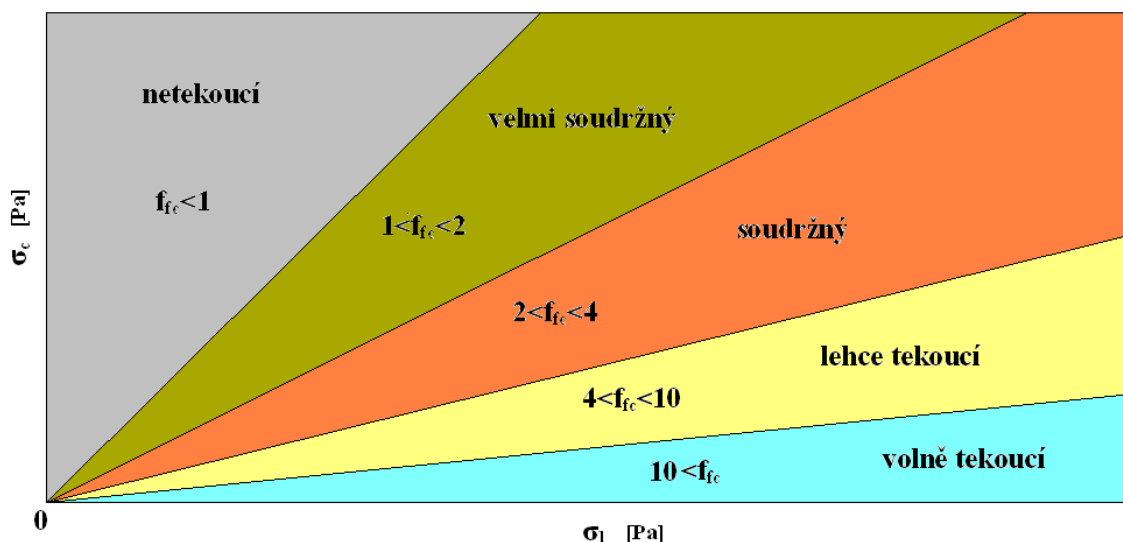
Tlaková mez pevnosti označována σ_c představuje nejmenší napětí, při kterém dochází k vytvoření smykových rovin a sypký materiál začíná téct.

Tokový faktor značený f_{fc} udává poměr hlavního vertikálního napětí σ_1 na největší Mohrově kružnici a tlakové mezi pevnosti σ_c , také jako hlavnímu napětí na nejmenší Mohrově kružnici.

$$f_{fc} = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (4.11)$$

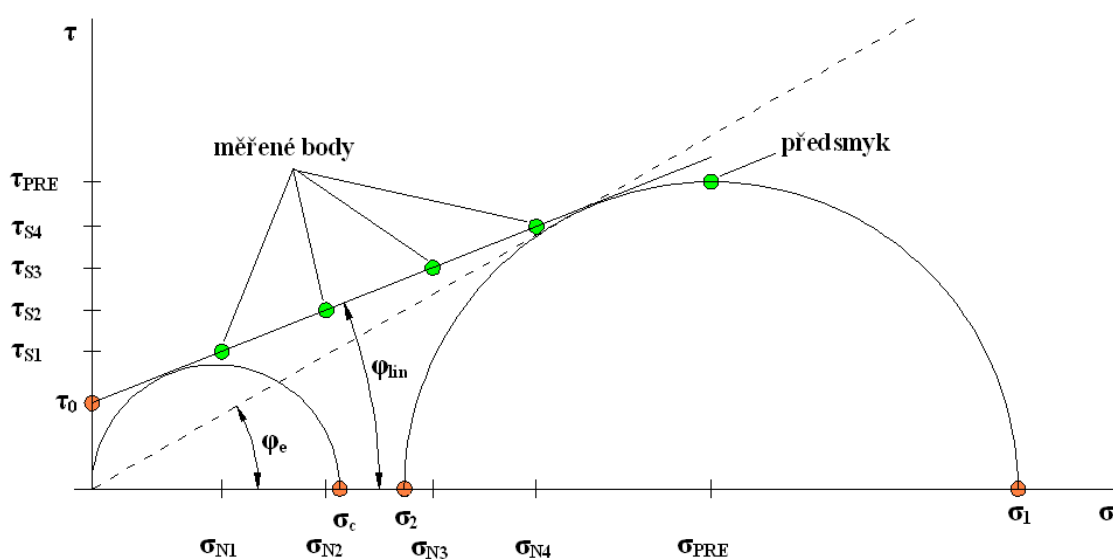
Podle hodnoty tokového faktoru je pak danému sypkému materiálu přiřazen přívlastek tekutosti: [24]

- $f_{fc} < 1$ netekoucí
- $1 < f_{fc} < 2$ velmi soudržný
- $2 < f_{fc} < 4$ soudržný
- $4 < f_{fc} < 10$ vysoce tekoucí
- $10 < f_{fc}$ volně tekoucí



Obr. 4.1: Graf tekutosti dle rozsahu faktoru tekutosti

Výstupní zprávou měření vzorku materiálu na smykovém stroji je graf Mohrových kružnic (obr. 4.2). Z grafu lze vyčíst výstupní hodnoty tlakových a smykových napětí (vyznačených na obrázku oranžovou barvou) i hodnoty jednotlivých bodů pro konstrukci tokových křivek (vyznačených zelenou barvou).



Obr. 4.2: Graf Mohrových kružnic s vyznačením vstupních a výstupních hodnot

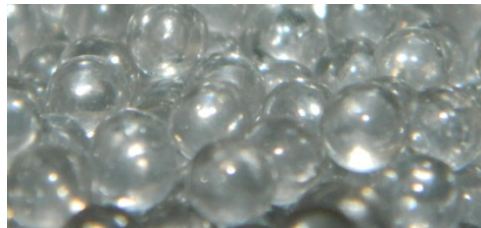
Z grafu lze okamžitě vyčíst o jak tekoucí materiál se jedná. Víme-li, že tokový faktor je poměr hlavního vertikálního napětí σ_1 a tlakové meze pevnosti σ_c . Je možné pak porovnat poměr vzdáleností σ_1 a σ_c na ose x a při znalosti rozsahu faktoru tekutosti zařadit tento materiál mezi $2 < f_{fc} < 4$ odpovídající soudržnému materiálu.

4.3. Zvolený materiál

Volba materiálu byla jedním z prvních úkolů, který se vyskytl při plánování disertační práce. Důležité aspekty, které měl daný materiál splňovat byly:

- 1) dostupnost materiálu v dostatečném množství pro měření a zkoušení
- 2) tuhé částice o dobře snímatelné velikosti
- 3) odolné vůči degradaci částic z důvodu opakovatelnosti stejného měření
- 4) kulovitý tvar pro možnost porovnávání s metodou DEM

Z dostupných materiálů, které byly v dostatečném množství k dispozici musely být vyřazeny materiály, které nesplňovaly druhou a třetí podmínku. Dostatečnou tuhost a odolnost vůči degradaci nesplňovaly zejména všechny zemědělské plodiny (zrní, hrách a rýže), ale také airsoftové kuličky u kterých bylo zjištěno odlupování svrchních vrstev a tím docházelo ke zmenšování průměru částice. Čtvrtou podmínku už splňovaly pouze dva materiály ocelové a skleněné kuličky. Výběrem jsem se přiklonil ke skleněným kuličkám (obr. 4.3), kterých bylo dostatečné množství i v jiných velikostech částic a tím se rozšiřovala zkoumaná oblast.



Obr. 4.3: Skleněné kuličky

Materiálem z něhož byly jednotlivé částice sypkého materiálu tvořeny bylo sklo. Sklo je anorganický amorfní materiál, vyrobený tavením surovin (sklářské písky) a následným řízeným ochlazováním, kdy skelný stav nastává plynulým přechodem z kapalného do krystalického stavu. Tavicí proces se provádí v tavicích pecích ve třech hlavních fázích: [21]

- 1) tavení
- 2) tvarování
- 3) chlazení

Přičemž tavení se provádí při teplotách 1400 – 1600 °C. Tvarování se provádí s využitím viskózní deformace jedním ze způsobů jako foukáním, tažením, válcováním, litím nebo lisováním. Chlazení se provádí v chladících pecích při řízených teplotách 400-700°C. Řízeným ochlazováním se zabraňuje vzniku vnitřního pnutí.

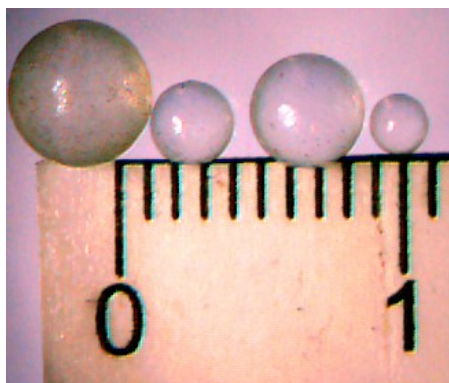
vlastnost	jednotka	rozpětí hodnot
hustota	kg·m ⁻³	2200 - 6000
pevnost v tlaku	MPa	700 - 1200
pevnost v tahu	MPa	30 - 90
pevnost v ohybu	MPa	40 - 190
modul pružnosti	GPa	50 - 90
součinitel délkové teplotní roztažnosti	K ⁻¹	6·10 ⁻⁶ - 9·10 ⁻⁶
součinitel tepelné vodivosti	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	0,6 - 0,9
měrná tepelná kapacita	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	850 - 1000
Poissonův součinitel	-	0,14 - 0,32
tvrdost podle Mohse	-	6 - 7
index lomu	-	1,5 - 2,25

Tab. 4.5: Mechanické vlastnosti skla [21]

Mezi výhodné vlastnosti skla řadíme jeho vysokou tuhost a tvrdost.

Tvar částic byl zvolen kulový. Koule je symetrické rotační těleso s nejmenší plochou uzavírající daný objem a s daným obsahem uzavírá kulová plocha největší objem [21]. Koule se často vyskytuje v přírodě ve formě kapek nebo bublin, protože jejich povrch je minimalizován povrchovým napětím.

Zvoleným materiálem byly skleněné kuličky o velikostech částic 2mm, 3mm, 4mm a 5mm (obr. 4.4).

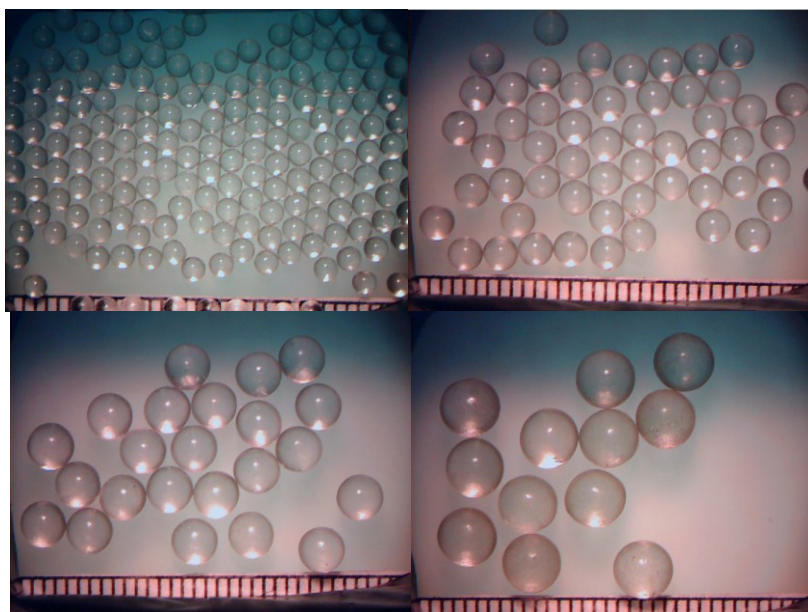


Obr. 4.4: Velikost částic zvoleného materiálu

Jednotlivé materiály se liší ve velikosti částic a z toho vyplývajících mechanicko-fyzikálních vlastnostech sypkého materiálu. Zvolené vzorky materiálu o stejné hmotnosti čítají rozdílné množství částic (obr. 4.5). Hmotnosti jednotlivých částic materiálů jsou uvedeny v tabulce (tab. 4.6).

velikost	částice [g]
5mm	0,16
4mm	0,08
3mm	0,04
2mm	0,01

Tab. 4.6: Hmotnost částic materiálů



Obr. 4.5: Homogenní materiály o hmotnosti 2g

Zvolený materiál byl klasifikován dle třídění FEM:

1) Zrnitost

Dle tabulky (4.1) byl zvolený materiál klasifikován:

2mm=**C**
3mm=**C**
4mm=**D**
5mm=**D**

Dle tab. (4.2) bylo označení římskou číslicí **IV.** pro částice kulového tvaru

2) Soudržnost

Dle tab. (4.3) je soudržnost klasifikovaná arabskou číslicí **2**, jako lehce tekoucí materiál, sypný úhel menší než 30°.

3) Chování během dopravy

Dle tab. (4.4) označení **o** abrazivní materiál.

4) Objemová hmotnost

Zde je uváděna hmotnost objemu materiálu ve stavu v jakém se dopravuje, můžeme tedy říci, že se jedná o sypnou hmotnost (volně sypaný materiál).

2mm=1,61 [t.m⁻³]
3mm=1,57 [t.m⁻³]
4mm=1,54 [t.m⁻³]
5mm=1,5 [t.m⁻³]

5) Teplota

Teplota materiálu je teplota blízká okolnímu prostředí.

Kompletní klasifikace materiálu pro dopravu dle třídění FEM (tab. 4.7):

Klasifikace dle FEM	
materiál	označení
2mm	C IV 2 o 1,61 t.m ⁻³ 21°
3mm	C IV 2 o 1,57 t.m ⁻³ 21°
4mm	D IV 2 o 1,54 t.m ⁻³ 21°
5mm	D IV 2 o 1,5 t.m ⁻³ 21°

Tab. (4.7): Klasifikace dle FEM

Zvolené materiály byly také podrobeny měření mechanicko-fyzikálních vlastností a porovnány mezi sebou.

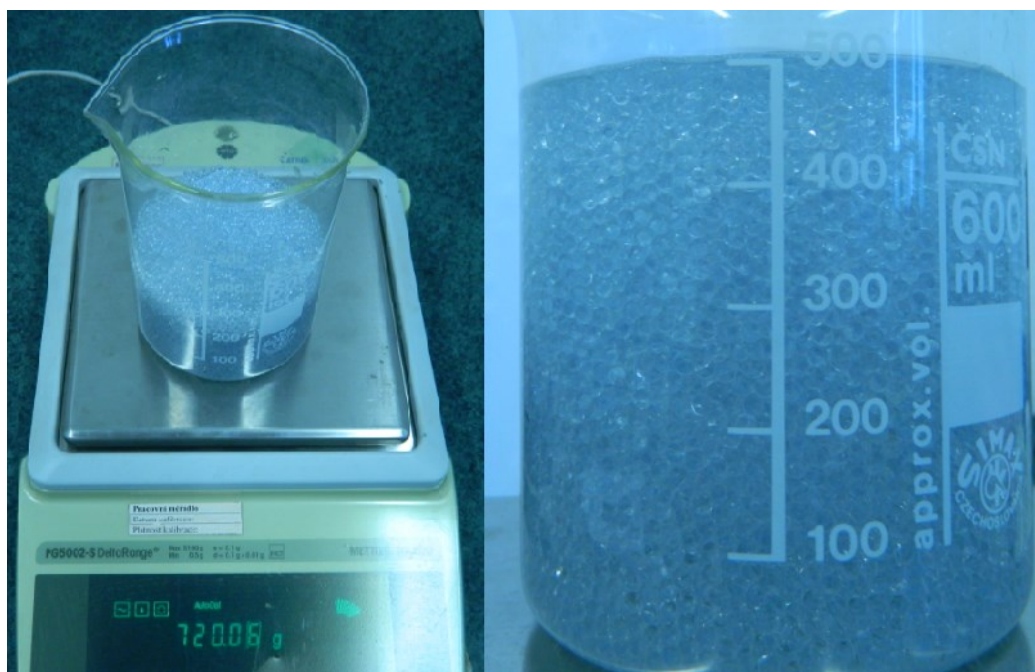
Zrnitost byla měřena pomocí sítové analýzy s využitím sít, která jsou vybavením laboratoře sypkých hmot o okatosti jednotlivých sít 1,8mm, 2,24mm, 3,15mm a 4,5mm. Každý vzorek byl měřen samostatně a vzhledem k rozsahu sít byl každý vzorek vyhodnocen jako nadsítné ve 100% vzorku (tab. 4.8).

Zrnitost [%]				
materiál	Ø oka síta [mm]			
	1,8	2,24	3,15	4,5
2mm	100	0	0	0
3mm	0	100	0	0
4mm	0	0	100	0
5mm	0	0	0	100

Tab. 4.8: Zrnitost zvolených vzorků materiálu

Vlhkost je v průběhu měření u všech vzorků stejná a dbá se na to, aby ve vzorku nebyla obsažena žádná přimíšená a hrubá voda. Pokud se materiál namočí, další měření probíhá, až se z něj přimíšená voda odstraní a hrubá voda odpaří.

Objemová hmotnost zvolených vzorků se měřila pomocí odměrného válce do kterého se nasypal materiál a póry mezi jednotlivými částicemi vyplnili přimíšenou vodou. Takto připravený vzorek byl zvážen pomocí laboratorní váhy a hodnoty zapsány do tabulky (tab. 4.9).



Obr. 4.6: Měření objemové hmotnosti materiálu

Měření bylo opakováno pětkrát pro různé známé objemy válce. Přepočtením hodnot měření jako podíl hmotnosti k danému objemu, byl určen rozsah v kterém se objemová hmotnost může pohybovat, avšak pro výpočty je většinou používána střední hodnota.

materiál	hmotnost materiálu [g]					Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
	objem nádoby [cm^3]					
	100	200	300	400	500	
2mm	361	576	791	996	1209	2132-2173
3mm	352	570	762	984	1170	2054-2136
4mm	348	548	749	959	1166	2020-2052
5mm	344	543	736	932	1143	1973-2011

Tab. 4.9: Naměřené hodnoty objemové hmotnosti

Sypná hmotnost byla měřena tak, že do známého objemu nádoby se volně nasypal materiál a nádoba se zvažila. Takto se postupovalo pro pět známých objemů nádoby a hodnoty byly zapisovány do tabulky (tab. 4.10). Sypná hmotnost se pak dopočítá podílem hmotnosti a daného objemu. Výsledný rozsah sypné hmotnosti je dán největší a nejmenší naměřenou hodnotou.

materiál	hmotnost materiálu [g]					Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]
	objem nádoby [cm ³]					
	100	200	300	400	500	
2mm	159	323	480	642	807	1599-1619
3mm	157	311	471	626	784	1558-1574
4mm	153	305	461	617	774	1528-1549
5mm	150	300	446	597	746	1486-1501

Tab. 4.10: Sypná hmotnost materiálu daného objemu

Pro výpočty je brána hodnota sypké hmotnosti jako průměrná hodnota naměřeného rozsahu, proto hodnoty sypné hmotnosti budou:

$$2\text{mm}=1608 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$$

$$3\text{mm}=1568 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$$

$$4\text{mm}=1538 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$$

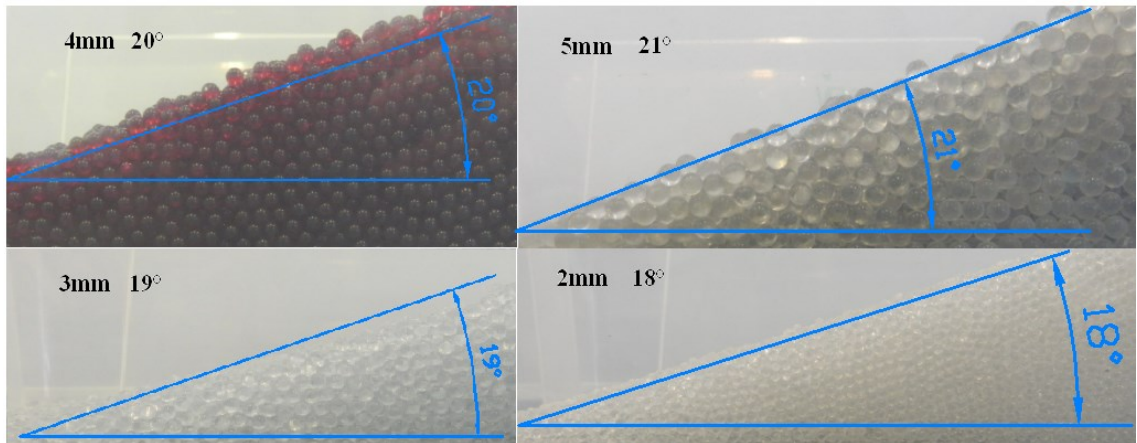
$$5\text{mm}=1495 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$$

Známe-li hodnoty sypné hmotnosti je možné dopočítat sypnou tíhu materiálu, která je vyvolána gravitačním polem.

materiál	Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	Sypná tíha [N.m ⁻³]
2mm	1608	15774
3mm	1568	15382
4mm	1538	15088
5mm	1495	14666

Tab. 4.11: Tabulka vypočtených hodnot sypné tíhy materiálu

Přirozený sypný úhel se odečetl pomocí vynesené křivky v programu AutoCad, kdy byla pořízená fotografie přirozeně sesypaného materiálu vložena do programu viz. obrázek (4.7). Fotografie byla pořízena tak, že se nádoba naplněná materiálem natáčí a v této závislosti se materiál sesypává pod přirozeným sypným úhlem. Jakmile se nádoba přestane otáčet přestane se v této závislosti sesypávat materiál v nádobě a pořídí se snímek ustáleného sesypání materiálové vrstvy.



Obr. 4.7: Měření přirozeného sypného úhlu

Z naměřených hodnot vyplývá, že sypný úhel roste se zvětšujícím se průměrem částic homogenního materiálu.

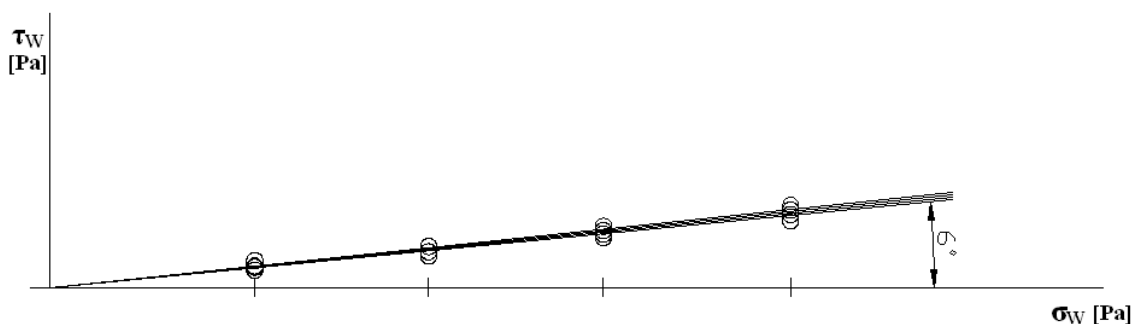
materiál	Sypný úhel [°]
2mm	18
3mm	19
4mm	20
5mm	21

Tab. 4.12: Naměřené hodnoty přirozeného sypného úhlu

Úhel vnějšího tření byl měřen na Jenikeho smykovém stroji [5] laboratoře sypkých hmot. Pro vyhodnocení byly zvoleny standardně čtyři měřené body pro čtyři různé druhy závaží k vyvození normálového napětí na smykovou celu. Kontaktním materiálem byla skleněná tabulka. Výsledné hodnoty jsou zapsány v tabulce (tab. 4.13) a znázorněny v grafu na obrázku (obr. 4.8).

materiál	Úhel vnějšího tření φ_w [°]
2mm	6,3
3mm	6
4mm	6,4
5mm	6,2

Tab. 4.13: Hodnoty úhlu vnějšího tření

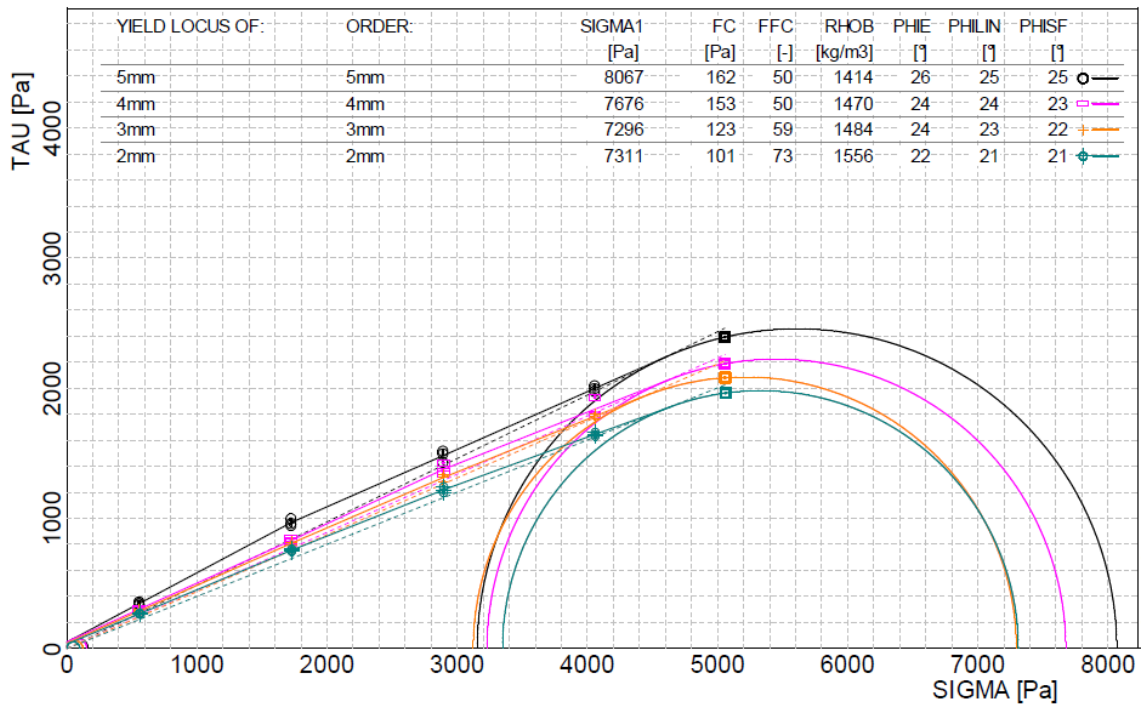


Obr. 4.8: Smyková zkouška úhlu vnějšího tření

V grafu je vidět úhel vnějšího tření skleněných kuliček. Zrnitost v tomto případě nehraje velkou roli a jednotlivé úhly se liší pouze v desetínách stupňů. Průměrný úhel vnějšího tření skleněných kuliček na kontaktním materiálu skla byl naměřen kolem 6,2°.

Úhel vnitřního tření byl měřen na smykovém měřicím přístroji RST-01 [8], který je vybavením laboratoře sypkých hmot. Měřicí přístroj využívá Jenikeho principu [5], kdy je snímán odpor materiálu proti smyku prostřednictvím tahových čidel. Způsob měření je rotační a zatěžování normálovou silou je prováděno automaticky, což usnadňuje práci a zvyšuje přesnost měření.

Byly zvoleny čtyři hodnoty normálového zatížení a hodnota před smyku 5000Pa. Pro zvýšení přesnosti měření bylo nastaveno opakování měření tři krát, což znamená, že v jednom výsledném grafu měření se zobrazí dvanáct naměřených bodů, kterými se proloží lineární křivka udávající úhel vnitřního tření linearizovaný. Softwarová funkce programu umožňuje automatické vykreslení grafů i s Mohrovými kružnicemi, kde lze zvolit vynesení tečné přímkou největší Mohrovi kružnice z počátku grafu (obr. 4.9).



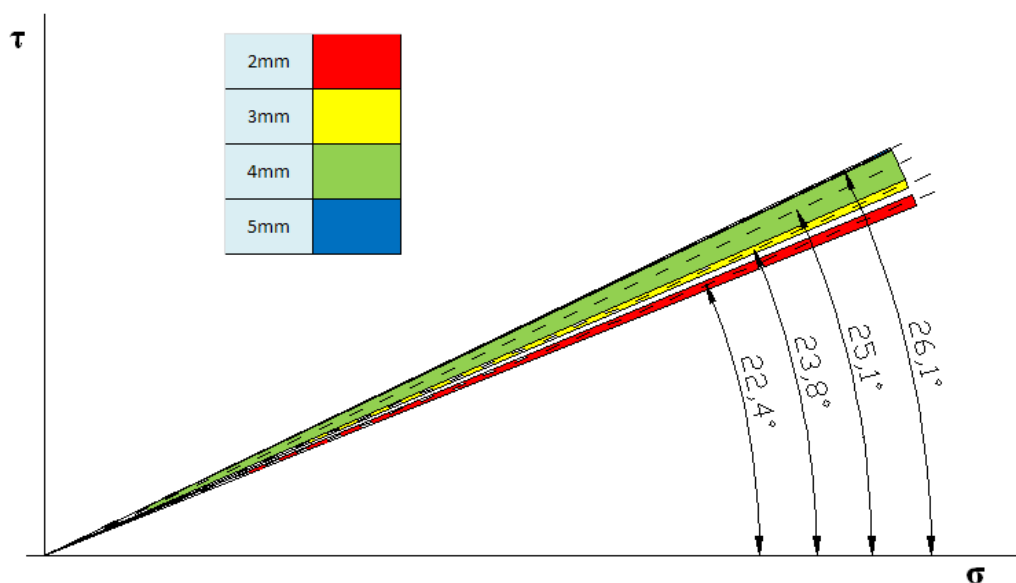
Obr. 4.9: Výsledný graf Mohrových kružnic pro porovnání zvolených materiálů

Celé měření bylo opakováno ještě jednou pro ověření přesnosti měření, případně určení rozsahu ve kterém se může úhel vnitřního tření materiálu pohybovat. Obě měření pro všechny čtyři druhy materiálů čítající dohromady kolem sta naměřených bodů si lze detailněji prohlédnout v příloze disertační práce, neboť rozsah měření překračuje stanovený rámec disertační práce. Hodnoty úhlu vnitřního tření efektivního a lineárního jsou uvedeny v tabulce (tab. 4.14).

materiál	úhel vnitřního tření efektivní φ_e [°]	úhel vnitřního tření lineární φ_{lin} [°]	průměrné hodnoty	
	2mm	23,0	22,4	22,4
	21,8	21,5		
3mm	24,0	23,5	23,8	23,4
	23,6	23,2		
4mm	24,1	23,5	25,1	24,5
	26,0	25,4		
5mm	26,2	25,5	26,1	25,5
	26,0	25,4		

Tab. 4.14: Tabulka naměřených hodnot efektivního a lineárního úhlu vnitřního tření

Pro lepší přehlednost a pro představu v jakém rozsahu se dané materiály pohybují byl vytvořen graf zahrnující naměřené tabulkové hodnoty.



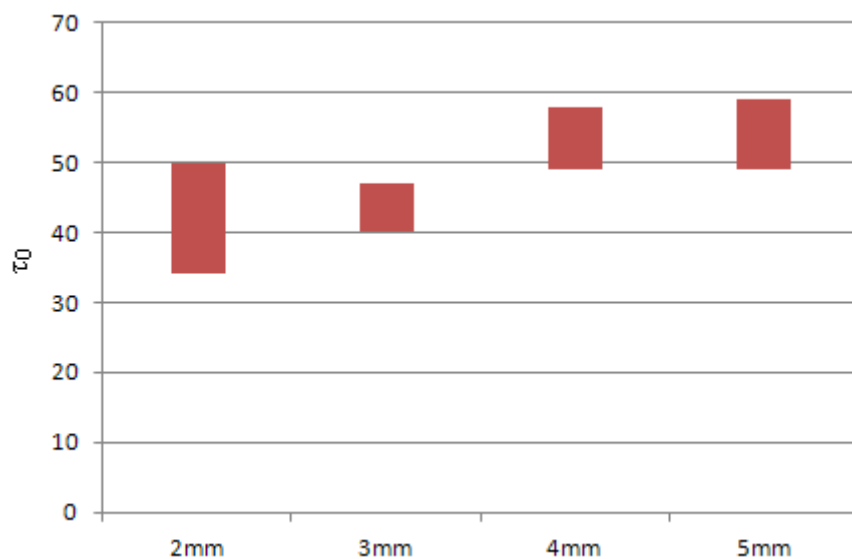
Obr. 4.10: Graf průměrných hodnot a rozsahu úhlu vnitřního tření

Z grafu je patrná průměrná hodnota úhlu vnitřního tření efektivního a barevným odlišením zdůrazněný rozsah v jakém se naměřené hodnoty pohybovaly. Do konstrukčních návrhů se zahrnuje úhel vnitřního tření efektivní. Přímou do vzorců pro výpočet tlaků, na základě kterých se inženýrské dílo navrhuje, se však dosazují hodnoty součinitele úhlu vnitřního tření.

Počáteční smykové napětí lze vyčíst z měření na přístroji RST-01 [8] viz příloha č.1. Hodnoty počátečního smykového napětí v případě skleněných kuliček se pohybuje mezi 100 až 200Pa. Jednotlivé rozsahy dílčích homogenních materiálů jsou uvedeny v tabulce (tab. 4.15).

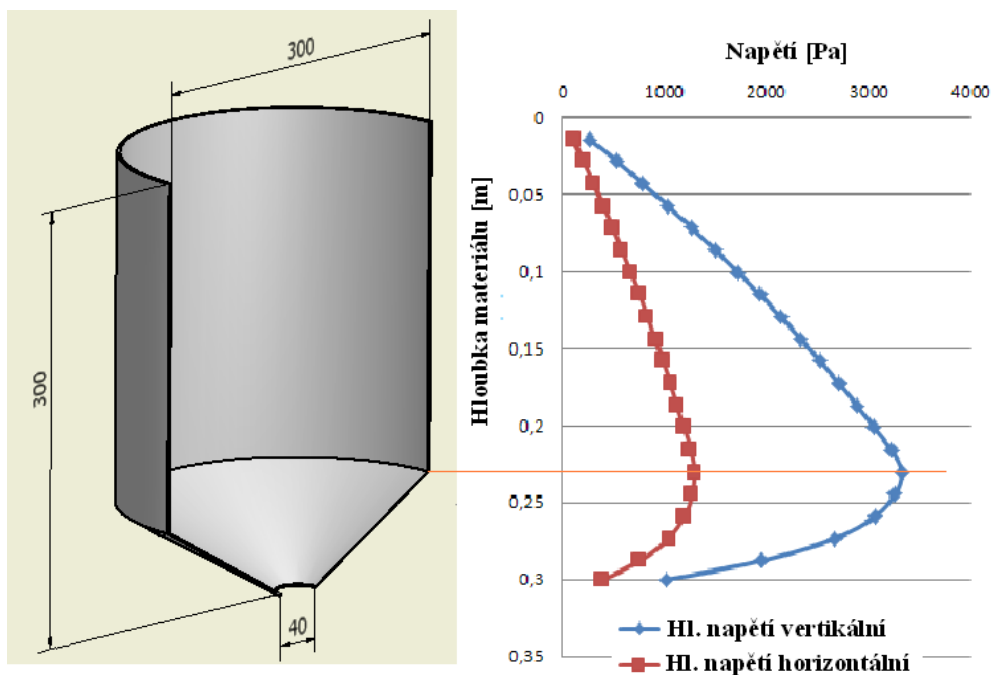
materiál	Počáteční smykové napětí τ_c [Pa]
2mm	34-50
3mm	40-47
4mm	49-58
5mm	49-59

Tab. 4.15: Naměřený rozsah hodnot počátečního smykového napětí



Obr. 4.11: Rozsah hodnot počátečního smykového napětí pro jednotlivé materiály

Hlavní vertikální napětí působící na dno nádoby lze vyčíst z materiálových listů viz. příloha č.1. Přístroj RST-01 [8] vyhodnocuje hodnotu hlavního vertikálního napětí a uvádí ji jako součást výstupní zprávy o měření. Tato hodnota je však závislá na geometrii skladovací nádoby. Proto je nutné tuto hodnotu přepočítat dle Jansenovy teorie, která předpokládá, že materiál je zavěšen na ostatních vrstvách materiálu a jejich prostřednictvím na stěnách nádoby. Veličiny, které popisují geometrii nádoby jsou hydraulický poloměr a výška skladovací nádoby. Hydraulický poloměr zahrnuje poměr obsahu k obvodu vypustného otvoru. Tvar zvolené nádoby je válcovitý (obr. 4.12). Pro tento tvar byly spočteny napětí pro všechny čtyři druhy zvolených materiálů (tab. 4.16).



Obr. 4.12: Model nádoby pro experimentální měření s grafem průběhu tlaku v celé nádobě se sklonem výsypky 30°

Dosazované hodnoty $h=0,3\text{m}$

$$R = \frac{S}{o} = \frac{\pi \cdot r^2}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{r}{2} = \frac{0,15}{2} = 0,075 \quad (4.12)$$

Po dosazení vypočteného hydraulického poloměru do vzorce (4.7), lze spočítat napěťové špičky pro hlavní vertikální napětí všech druhů homogenních materiálů (tab. 4.16).

materiál	Napěťové špičky hlavního vertikálního napětí σ_1 [Pa]
2mm	3345
3mm	3238
4mm	3155
5mm	3076

Tab.4.16 Spočtené hodnoty napěťových špiček hlavního vertikálního napětí

Materiál , který má menší průměr částic vytváří na dno nádoby větší tlakové napětí než materiály o průměru částic větších, ale také do stejného objemu zásobníku se vejde větší počet částic.

Hlavní horizontální napětí není uvedeno ve výstupní zprávě měření a proto je počítáno dle Jansenovy teorie. Lze využít přepočtu hlavního vertikálního napětí pomocí koeficientu sypanosti daného materiálu dle vztahu (4.9).

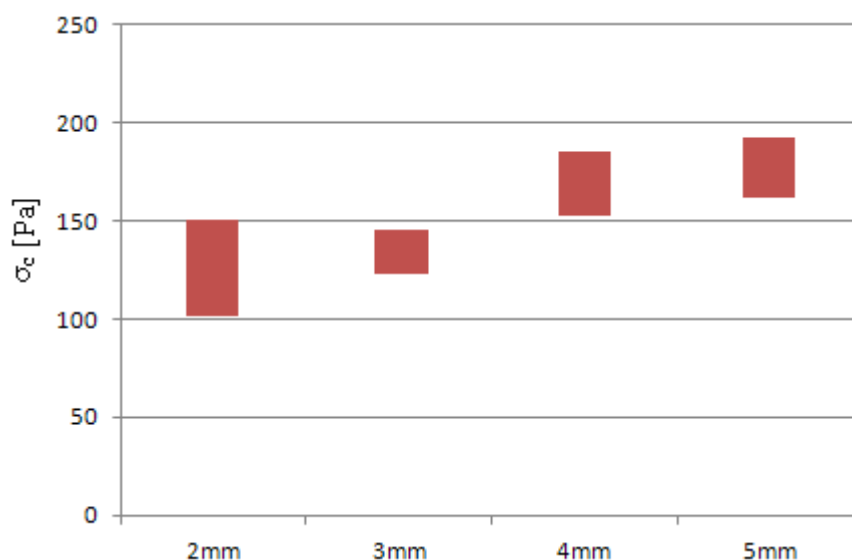
materiál	Napěťové špičky hlavního horizontálního napětí σ_2 [Pa]
2mm	1472
3mm	1360
4mm	1293
5mm	1200

Tab. 4.17: Spočtené hodnoty napěťových špiček hlavního horizontálního napětí

Tlaková mez pevnosti udává nejmenší hodnotu napětí, kdy materiál začíná téct. Hodnoty lze vyčíst z výstupních zpráv měření na přístroji RST-01 [8] viz příloha č.1.

materiál	Tlaková mez pevnosti σ_c [Pa]
2mm	101-151
3mm	123-145
4mm	153-185
5mm	162-193

Tab. 4.18: Naměřené hodnoty tlakové meze pevnosti



Obr. 4.13: Graf rozsahu tlakové meze pevnosti homogenních materiálů

Tokový faktor lze určit (obr. 4.1) známe-li hlavní vertikální napětí σ_l a tlakovou mez pevnosti σ_c . Tyto hodnoty lze vyčíst z průvodní zprávy o měření, nebo také z materiálových listů, kde jsou tyto hodnoty spočteny a po zaokrouhlení se tyto hodnoty shodují s hodnotami naměřenými pomocí přístroje RST-01 [8].

materiál	Naměřené hodnoty tokového faktoru f_{fc} [-]		Analýza tekutosti
	1	2	
2mm	48	73	$f_{fc} > 10$ - volně tekoucí
3mm	50	59	$f_{fc} > 10$ - volně tekoucí
4mm	42	50	$f_{fc} > 10$ - volně tekoucí
5mm	39	50	$f_{fc} > 10$ - volně tekoucí

Tab. 4.19: Tabulka naměřených hodnot s analýzou tokového faktoru

5. Experimentální modely a zařízení

Modelování je často používanou metodou v odborné a vědecké praxi v mnoha oborech. Obecně napomáhá vytvářet a testovat různé hypotézy o funkci daných systémů. Díky modelování lze zdokonalit nové návrhy, vyzkoušet různé vlivy zásahů do systému a předvídat vývoj systémů.

Model bývá pouze přiblížením skutečnosti. Reálný systém může být složitější a model mu nemusí zcela odpovídat. Proto se provádí ověřovací experimenty, které se dále doplňují a zpřesňují.

Modelování slouží nejen k řešení problematiky z praxe, ale také k provádění nejrůznějších výzkumů a vědeckých experimentů pro simulaci jevů. Využití modelů a simulací je vhodné pro případy, kdy by při experimentu na reálném zařízení hrozilo poškození zařízení nebo újma na zdraví. Při testování této problematiky na reálném zařízení zásobníku, by bylo náročné nejen finančně, ale i časově.

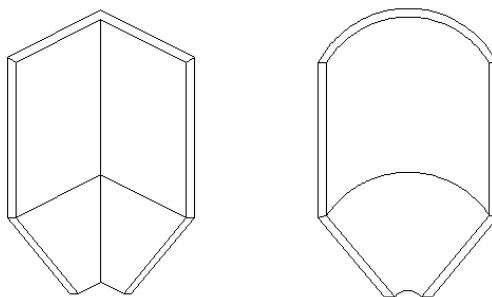
5.1. Návrh experimentálních modelů zásobníku

Konstrukční návrh obecně respektuje teoretické znalosti. Teorie návrhu geometrických částí skladovací nádoby byl přiblížen v kapitole tři. Návrh experimentálního modelu vycházel z návrhu celého zásobníku a dále byl upravován z hlediska zkoumané problematiky.

Pro návrh skladovací nádoby je nutné znát mechanicko-fyzikální vlastnosti skladovaného materiálu. Dílčí parametry mechanicko-fyzikálních vlastností byly vysvětleny v kapitole čtyři a jejich naměřené hodnoty uvedené v příloze č. 1.

Návrh tvaru zásobníku

Před samotným výpočetním návrhem se volí tvar nádoby, z čehož se pak odvíjejí použité vzorce.



Obr. 5.1: Volba tvaru experimentální nádoby

V této části návrhu byl zvolen válcovitý tvar nádoby o průměru $D=0,3\text{m}$. Následoval výpočet úhlu sklonu stěny výpustného otvoru. Návrh byl počítán pro všechny homogenní materiály, ale dosažené hodnoty do vzorce (3.1) jsou pouze pro materiál o průměru částice 5mm .

$$\beta = 21 + (5 \div 15) = 26^\circ \div 36^\circ$$

materiál	úhel sklonu stěny nádoby β [°]
5	26-36
4	25-35
3	24-34
2	23-33

Tab. 5.1: Vypočtený rozsah hodnoty úhlu sklonu stěny výsyvky

Vypočtené hodnoty úhlu sklonu stěny splňují podmínku (3.2) a navržený minimální úhel sklonu pro všechny materiály byl zvolen 30° .

Návrh velikosti výpustného otvoru

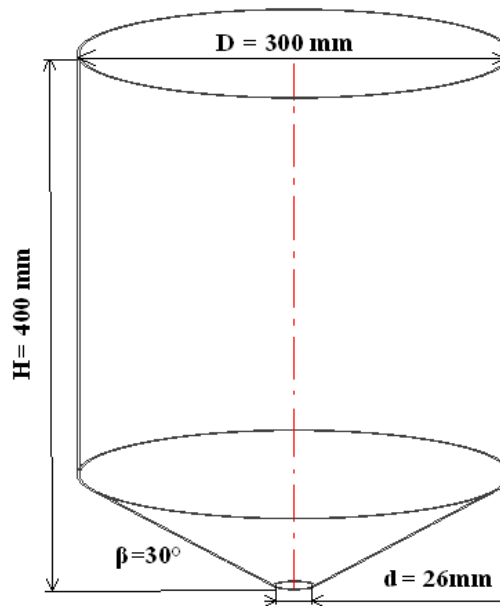
Pro výpočet velikosti výpustného otvoru byl použit vzorec pro kruhový otvor (3.11). Přičemž součinitel provozní bezpečnosti byl zvolen jedna.

$$d_{\min} = \frac{4 \cdot 54 \cdot (1 + \sin 26,1)}{14666} \cdot 1 + 0,005 = 0,026 \text{ m}$$

materiál	velikost výpustného otvoru d_{min} [m]
5	0,026
4	0,024
3	0,019
2	0,017

Tab. 5.2: Vypočtené hodnoty minimální velikosti výpustného otvoru

Na základě teoretických výpočtů byl navržen experimentální model (obr. 5.2).

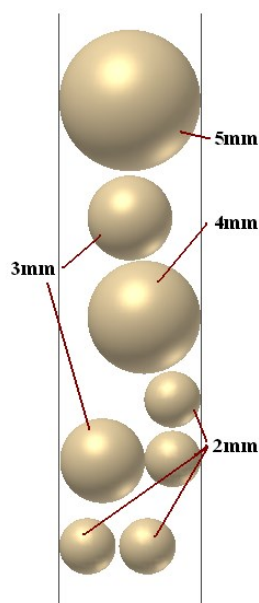


Obr. 5.2: Teoretický návrh experimentálního modelu

Úprava experimentálního modelu

Navržený experimentální model musel být upraven z důvodu snímání metodou PIV tak, aby bylo možné natáčet děj probíhající uvnitř nádoby. K dalším úpravám docházelo z důvodu uchycení na verifikačním zařízení.

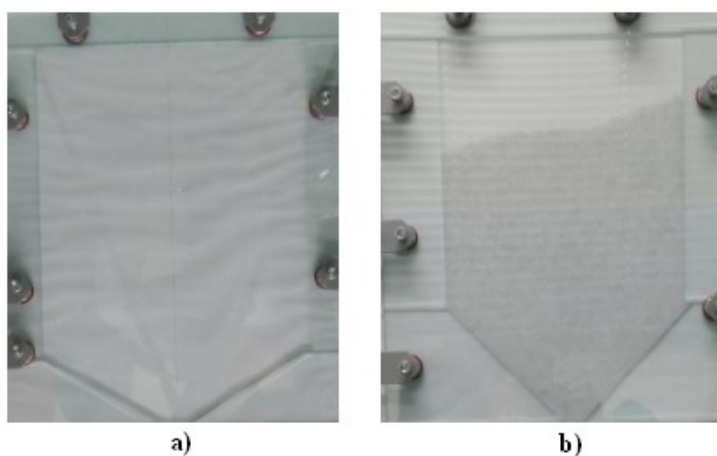
Experimentální modely byly rozděleny do dvou skupin. První skupinou byly skleněné modely s různým sklonem stěny výsypky 30° a 45° (obr. 5.4), přičemž šířka vnitřního prostoru byla dimenzována na průměr největší částice $d=5\text{mm}$ (obr. 5.3). Ve druhé skupině experimentálních modelů byla navržena nádoba s vyměnitelnými výsypkami. Výsypky byly navrženy se sklonem stěny 30° , 60° a speciálními tvary konvexním a konkávním (obr. 5.5).



Obr. 5.3: Šířka skleněného modelu se zobrazením částic materiálu

Zhotovené experimentální modely

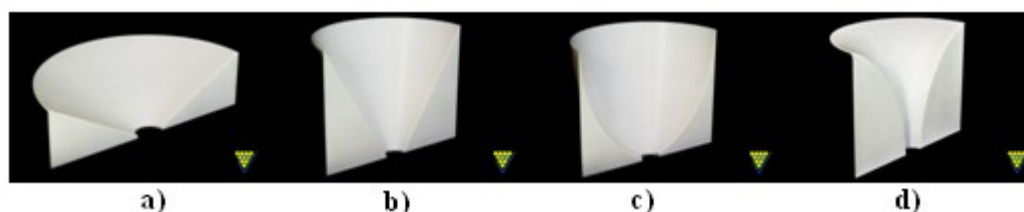
K simulaci pohybu partikulární hmoty v zásobníku byly zhotoveny dva skleněné modely s úhlem sklonu výsypky 30° a 45° . Tyto modely umožňují nastavitelnou velikost výpustného otvoru. Celý model se skládal ze zadní skleněné desky, na které byly umístěny šikmé části výsypky. Nad šikmými částmi byly umístěny části vytvářející kolmé stěny nádoby. Z přední strany modelu byla umístěna skleněná deska umožňující snímání děje uvnitř nádoby. Takto sestavený model byl pomocí rychloupínacích prvků připevněn na verifikační zařízení. Rychloupínací prvky zkracovaly čas výměny modelu, ale také umožňovaly rychle nastavit velikost výpustného otvoru.



Obr.5.4: Skleněné modely s proměnnou velikostí výpustného otvoru a) 30° a b) 45°

Ve druhé skupině experimentálních modelů byla vytvořena nádoba, která umožňovala vyměňování jednotlivých výsypek. Nádoba měla průřez půl kruhu a byla vyrobena z nerezového plechu.

Výsypky byly zhotoveny z plastu používaného pro tisk pomocí 3D tiskárny. Pomocí 3D tiskárny byly vyrobeny čtyři výsypky s výpustným otvorem 40mm se sklonem stěny 30° , 60° a tvarem konvexním a konkávním (obr. 5.5).



Obr.5.5: Plastové modely výsypek a) 30° , b) 60° , c) konvexní a d) konkávní

Celý model byl vytvořen tak, že nerezový plech byl připevněn pomocí šroubů k verifikačnímu zařízení. Dovnitř nádoby byly umístěny výsypky, které se upevnily k plechu. Nakonec se z přední strany upevnila skleněná deska pomocí rychloupínacích prvků (obr. 5.6).



Obr. 5.6: Sestavení experimentálního modelu se všemi výsypkami

Změna výpustného otvoru experimentálních modelů v první skupině

V první skupině experimentálních modelů se jednalo o skleněné modely. Při provedeném experimentálním měření pro spočtenou a navrženou velikost výpustného otvoru však docházelo k poruše toku.

Na základě vznikající poruchy toku se experimentálně zkoušelo, při jakých velikostech výpustného otvoru k poruše toku dochází a při kterých nedochází (tab. 5.3).

Experimentální měření toku a snímání metodou PIV s proměnnou velikostí výpustného otvoru pro skleněný model								
materiál D [mm]	2D 30° [mm]				2D 45° [mm]			
	4,5D	5D	5,5D	6D	4,5D	5D	5,5D	6D
2	9	10	11	12	9	10	11	12
3	13,5	15	16,5	18	13,5	15	16,5	18
4	18	20	22	24	18	20	22	24
5	22,5	25	27,5	30	22,5	25	27,5	30

■ nevznikla porucha toku ■ vznikla klenba

Tab. 5.3: Měření při jaké velikosti výpustného otvoru dochází k poruše toku

Experimentem bylo zjištěno při jakých velikostech výpustného otvoru docházelo k poruše toku a nádoba se nevyprázdnila. Z tabulky (tab. 5.3) je patrné, že při šestinásobku největší částice materiálu k poruše toku nedocházelo. Proto byly velikosti výpustných otvorů díky tomuto experimentu dimenzovány na šestinásobek průměru největší částice měřeného materiálu.

5.2. Verifikační zařízení

Zařízení je zkonstruováno z lehkých hliníkových profilů německé firmy Item, který využívá variability ukotvení pomocí profilových drážek, z čehož vyplývá jednoduchá upravitelnost zařízení.

Zařízení je vybaveno kolečky s aretací sloužící k jednoduchému transportu a dále pak ke stabilnímu ustavení, aby nedocházelo v průběhu měření k nežádoucím posunutím.

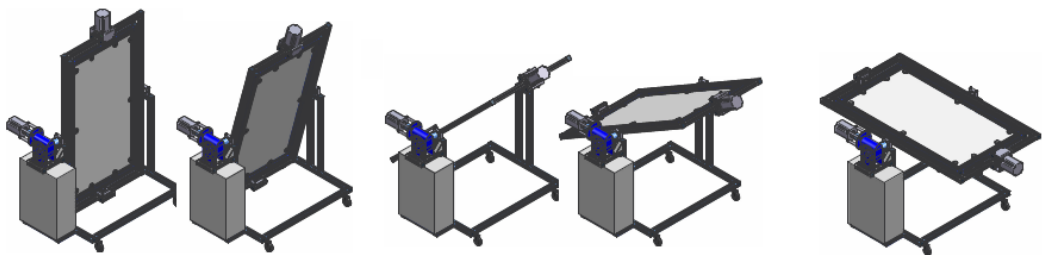
Snímaný prostor tvoří pevná deska, na kterou lze pomocí jednoduchých upínacích prvků přichytit jakýkoli vytvořený experimentální model.

Zařízení umožňuje natáčení ve dvou na sebe kolmých osách x a y pomocí dvou pohonů, které jsou tvořeny asynchronním motorem fa. Siemens a dvěma šnekovými převodovkami fa. TOS-Znojmo s převodovým poměrem 1:10 000. Motory jsou řízeny frekvenčními měniči fa. Siemens. Takto vytvořený pohon nám umožňuje naklápění rychlostí $\omega=2,7 \cdot 10^{-3} \text{ [s}^{-1}\text{]}$ (obr. 5.7).

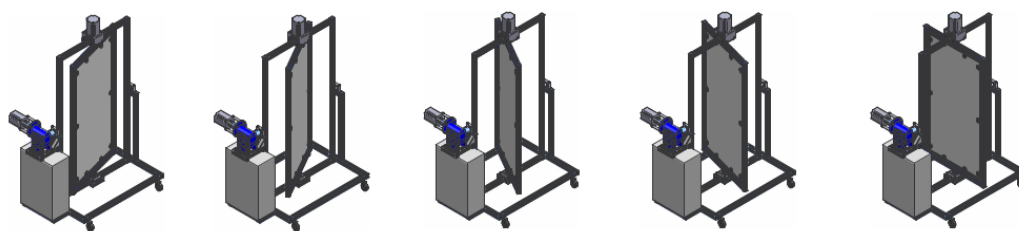


Obr. 5.7: Verifikační zařízení

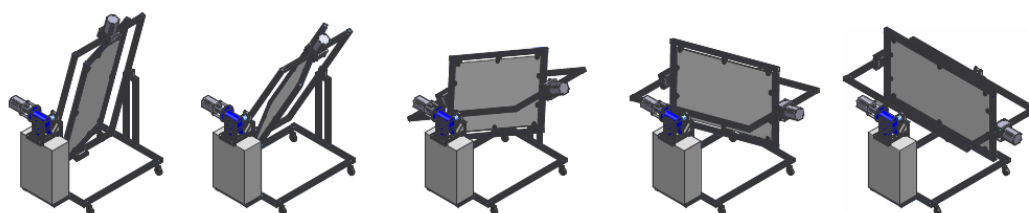
Validační zařízení bylo přihlášeno k národní patentové ochraně jako **způsob simulace kinetiky pohybu částic sypké hmoty a zařízení k provádění způsobu**. Tento patent byl přihlášen v roce 2008 a lze jej vyhledat pod číslem přihlášky **2008-302**. [26]



Obr. 5.8: Simulace pohybu natáčení v ose x [26]



Obr. 5.9: Simulace pohybu natáčení v ose y[26]



Obr. 5.10: Simulace pohybu natáčení současně v ose x a y[26]

Verifikačního zařízení bylo využíváno ke každému experimentu. Experimenty byly rozděleny do tří skupin. U dvou bylo zařízení využito jen ke stabilizaci modelů a v jednom případě měření bylo celým modelem natáčeno v ose x .

Díky tomuto naklápění lze zvyšovat míru ztrátové práce při toku sypké hmoty. Zvýšením ztrátové práce lze simulovat snížení gravitačního zrychlení. Tímto je pak možné vytvářet přibližné simulace vypouštění nádoby na planetách s menším gravitačním zrychlením.

6. Virtuální modely zásobníků a simulace děje

K tvorbě virtuálních modelů bylo využito počítačového programu zvaného Autodesk Inventor. Pracovní plocha programu umožňuje vytvářet jednotlivé prvky modelu a skládat jednotlivé komponenty do celých sestav. Všechny virtuální modely byly tvarově podobné jako vyrobené experimentální modely. V programu Inventor nebylo třeba těmto modelům přiřazovat materiálové vlastnosti, neboť ty se přiřazovaly v programu EDEM, do něhož byly virtuální modely importovány.

Simulace je ve vědě a technice používána k napodobování určitých fyzikálních dějů nebo chování technického zařízení. Možnosti simulace se s vývojem počítačů značně rozrostly, neboť umožňují velký počet operací. Tímto se složitější matematické modely nemusejí zjednodušovat, jak tomu bylo dříve a díky tomu se nesečkáváme s velkými odchylkami.

Hlavní přínos simulace je však v rozkrývání děje jež si nelze představit. Tímto odhalením neznáma jsou vyvolány nové myšlenky a souvislosti, které by jinak nemusely být vůbec zřejmé.

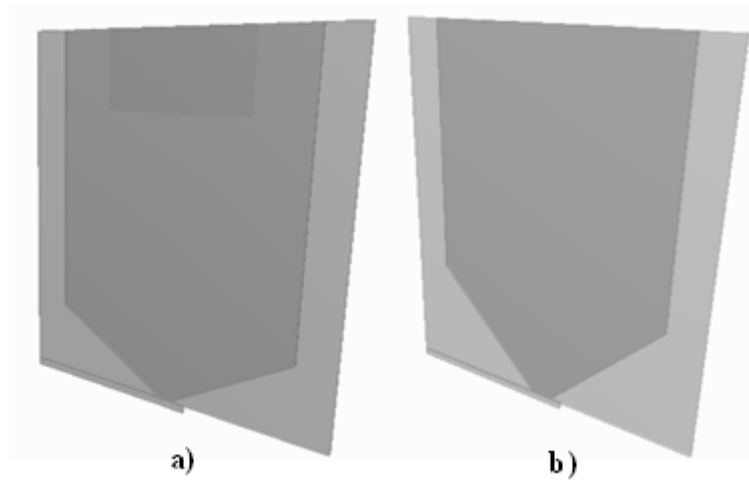
6.1. Tvorba modelů

Veškeré modely byly nejprve vytvořeny pomocí programu Autodesk Inventor. Tento program umožňuje vytvářet modely jednoduchých součástí. Těmto součástem přiřadit materiálové vlastnosti včetně barevného designu, odpovídající povrchu zvoleného materiálu z databáze materiálů. Spolu s materiálovými vlastnostmi materiálu lze přiřadit také fyzikální vlastnosti, díky kterým je možné provést pevnostní analýzu součástí. Program umožňuje vytvářet sestavy skládající se z jednotlivých součástí.

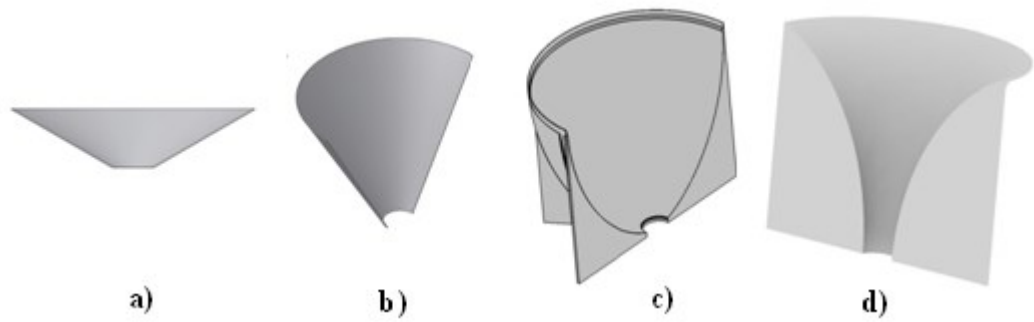
Kreslení a modelování ve 3D usnadňuje konstruktérům kontrolovat komplexní návrh a lépe vyhodnotit řešení problematiky. Systém umožňuje rozkrývat kolize jednotlivých prvků a tím předcházet konstrukčním závadám.

Proces navrhování

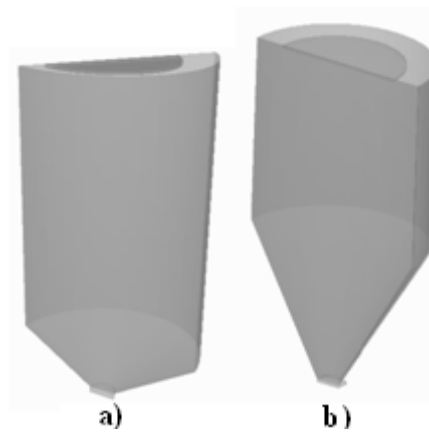
Návrh virtuálních modelů vycházel z návrhu experimentálních modelů. Virtuální model obsahoval plášť nádoby, výsypku a uzávěr výpustného otvoru. Dále bylo potřeba opatřit model zepředu deskou, které byly později v programu EDEM přiřazeny vlastnosti průhledného skla. Na konec musel být ještě vytvořen prvek nazývaný v programu EDEM generační plochou, umístěný v ose nádoby v horní části nádoby. Umístění generační plochy bylo záměrně ve středu nádoby, aby při generování částic simulovalo plnění nádoby, jako při experimentálním plnění modelu.



Obr. 6.1: Modely nádob se sklonem stěny výsypky a) 30° a b) 45°



Obr. 6.2: Modely výsypek a) 30° , b) 60° , c) konvexní a d) konkávní



Obr. 6.3: Modely nádob s umístěním generační plochy a uzávěry a) 30° a b) 60°

6.2. Počítačová simulace programem EDEM

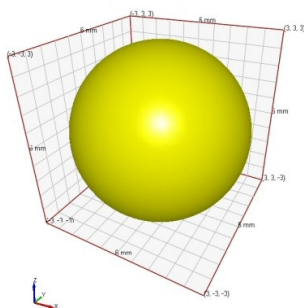
Počítačovou simulací obecně se rozumí vymodelování skutečného děje pomocí počítačového programu. Počítačová simulace se takto stává užitečným nástrojem při studování chování přirozených systémů. Chování systému pak lze změnou vstupních parametrů nebo okrajových podmínek předpovídat.

EDEM je světovou softwarovou platformou. DEM (Discrete Element Method) je metoda schopná vytvářet simulace a analýzy potřebné pro řešení složitých problémů v konstrukci, prototypování a optimalizaci manipulace se sypkým materiálem. Pomocí programu lze vytvořit parametrický model granulárního systému.

EDEM pracuje s informací každé jednotlivé částice (hmotnost, teplota, rychlost atd.) a silami působící na ni. Pro další zpracování EDEM poskytuje nástroje pro analýzu a vizualizaci dat.

Postup tvorby simulace

Tvorba simulace v programu EDEM začíná importováním vytvořeného 3D CAD modelu. V prostředí DEM je důležité zadat jednotky, v jakých má být model importován. Doporučuje se zadávat jednotky stejné, v jakých je model vytvořen, ale je možné nastavením jednotek model velikostně měnit. Následuje vytvoření sypkého materiálu. Model částice vychází z kulového tvaru s možností změny její velikosti. Takto lze vytvořit homogenní materiál o daném počtu částic. Požadavek tvorby heterogenního materiálu je možné řešit generováním více skupin homogenních materiálů z jedné generační plochy, nebo procesem simulace míchání.

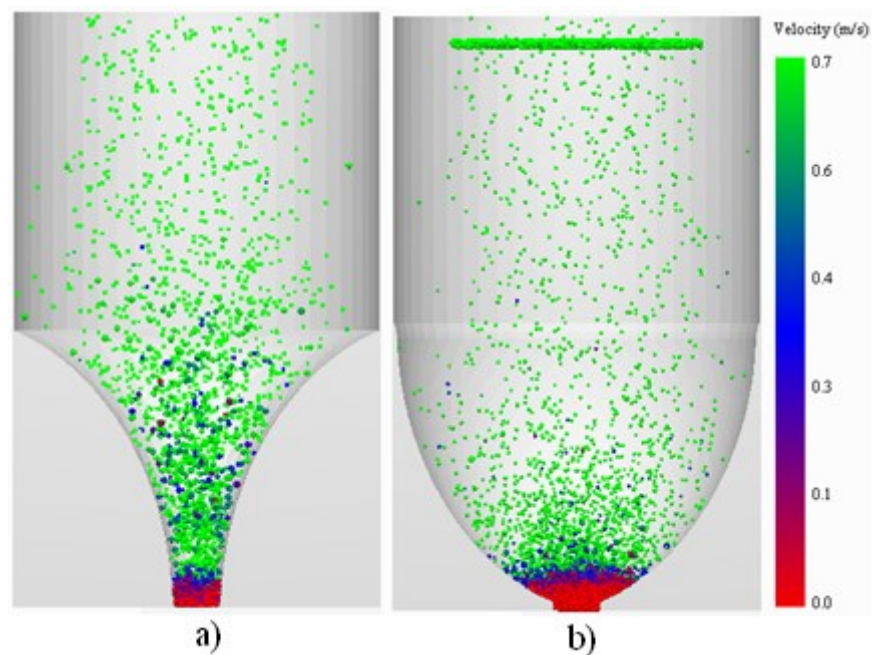


Obr. 6.4: Vytvořená kulová částice v programu EDEM [22]

Jsou-li zadány geometrie modelu a částic lze na základě souřadného systému přiřadit působení gravitačního zrychlení na celou soustavu. Přiřadí se materiálové vlastnosti částicím i geometrii modelu. Vytvoří se nadefinování procesu tvorby částic, kde se uvádí z jaké generační plochy budou částice generovány, jakou rychlostí budou z plochy vypouštěny a kolik částic má být celkem vygenerováno.

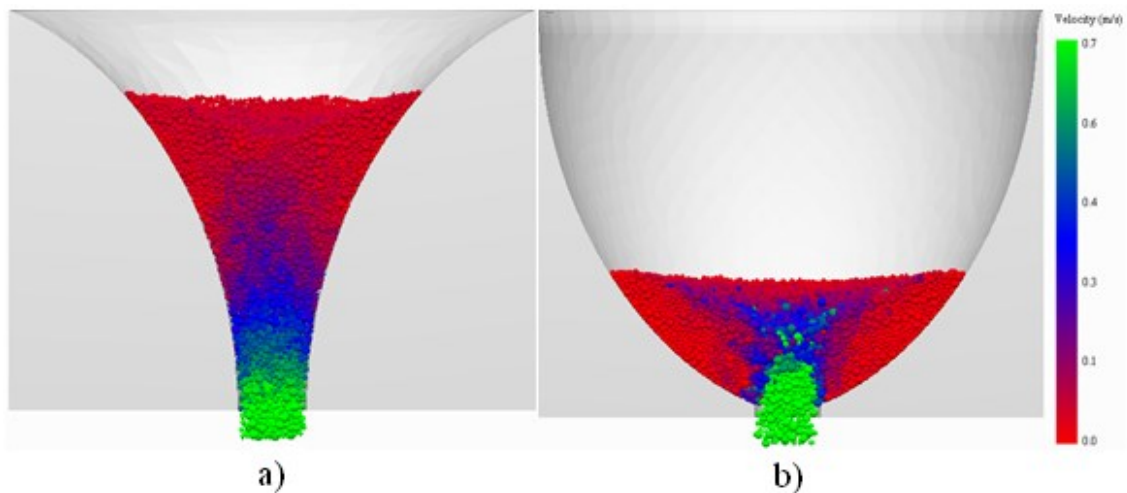
Posledním prvkem při nastavování simulace je přiřadit pohyb jednotlivých geometrií v soustavě modelu. V této práci se jedná pouze o lineární pohyb uzávěru výpustného otvoru a naklopení modelu při simulaci vyprazdňování nádoby při sklonu v ose x o 45° .

V simulátoru programu EDEM je možné před spuštěním simulace nastavit časový krok pro ukládání jednotlivých snímků. Průběh simulace začíná generováním částic a plněním nádoby (obr. 6.5).



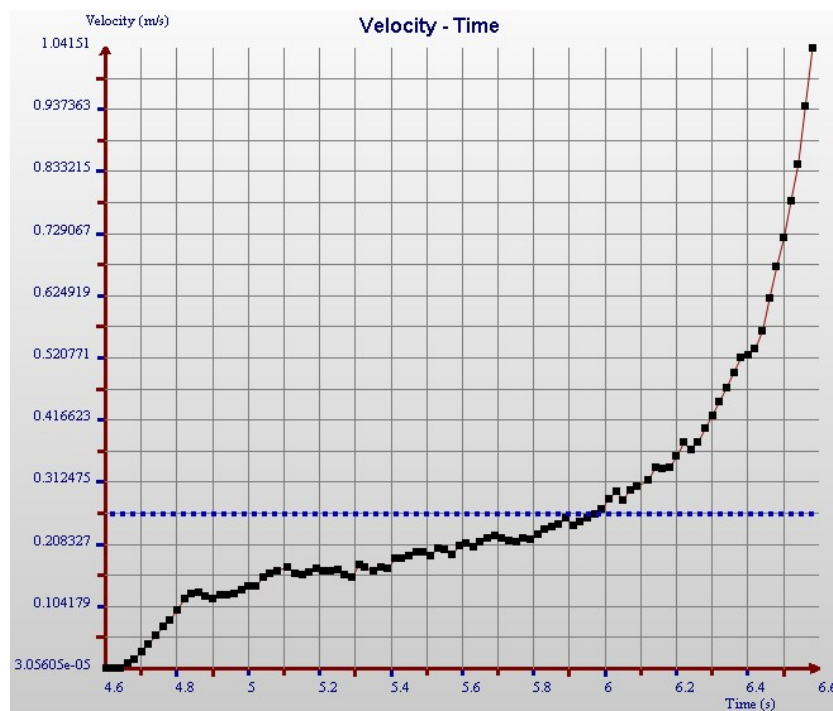
Obr. 6.5: Plnění virtuální nádoby s výsypkou a) konkávní b) konvexní

Po naplnění modelu zvoleným počtem částic se vysune uzávěr a tím se spustí výpočet simulace vyprazdňování nádoby. Po ukončení procesu vyprazdňování je nutné vše uložit pro vytváření dalších analýz simulace.



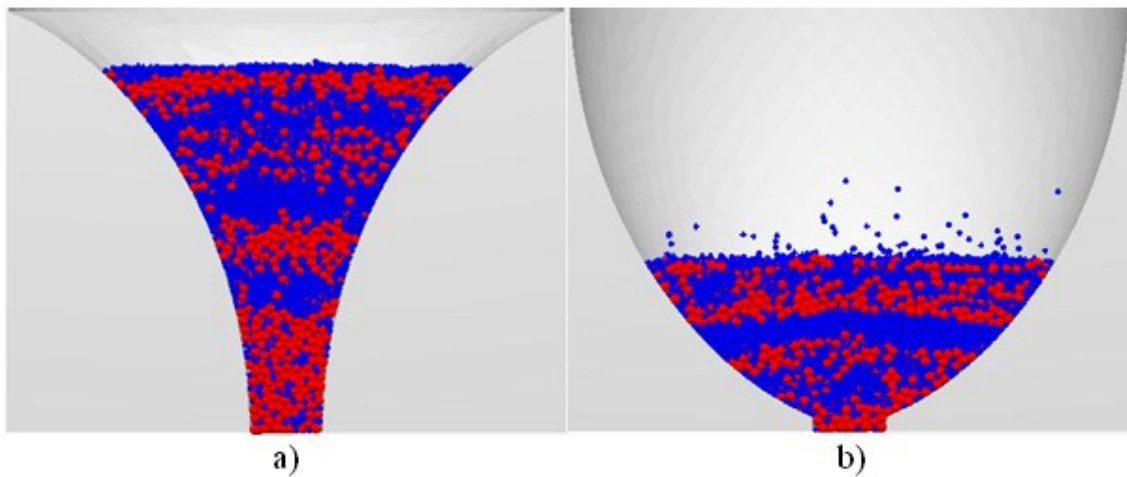
Obr. 6.6: Simulace vyprazdňování nádoby s výsypkou a) konkávní b) konvexní

Analyzátor programu EDEM umožňuje získávat informace o simulovaném procesu. Informace lze získat ve formě histogramu, lineárního grafu nebo tabulkových hodnot. Analýzou mohou být sledovány rychlosti, síly i energie.



Obr. 6.7: Graf průměrné rychlosti v celé nádobě s vyznačením průměru

Barevným odlišením lze také pozorovat segregaci materiálu přiřazením různých barev pro různé frakce generovaného materiálu.



Obr. 6.8: Simulace segregace materiálu přiřazením barev pro každou frakci

7. Snímání experimentálního děje uvnitř modelu zásobníku

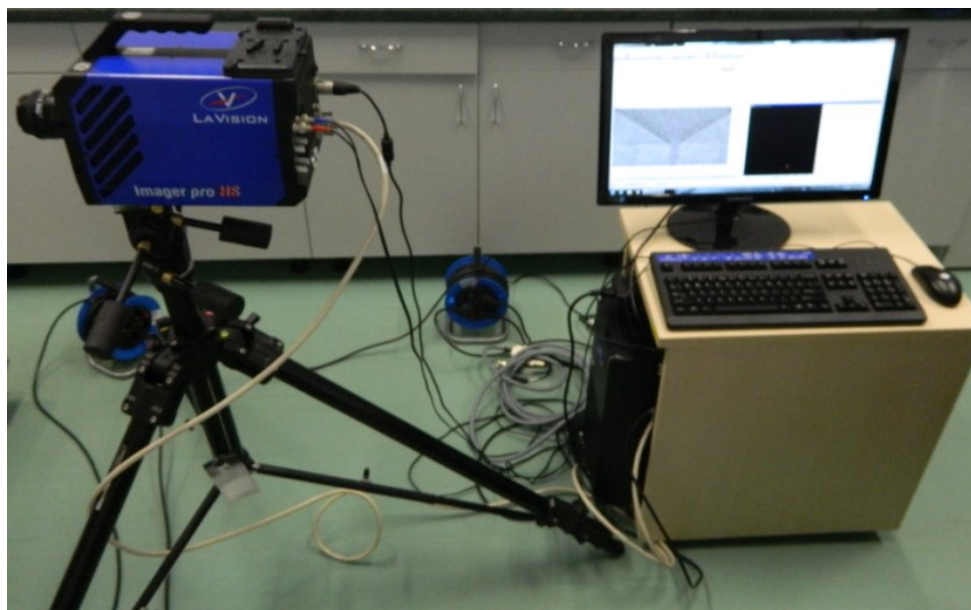
Děj probíhající uvnitř uzavřených inženýrských děl je obestřen různými vlivy a okrajovými podmínkami. Pro bližší pochopení probíhajícího děje byly vytvořeny experimentální modely umožňující nahlédnutí dovnitř nádoby. K lepšímu pochopení a analyzování děje je důležité pořídít kvalitní záznam pro vyhodnocování. Vzhledem k rychlosti pohybu jednotlivých částic partikulární hmoty je vhodné využít technologii vysokorychlostního snímání.

U vysokorychlostního snímání je rozhodujícím parametrem rychlost snímání, tedy kolik snímků je schopno zařízení pořídít za sekundu označováno FPS (frame per second).

Laboratoř sypkých hmot je vybavena vysokorychlostním kamerovým systémem využívající metody PIV (particle image velocimetry), která byla zvolena pro snímání děje probíhajícího uvnitř modelu zásobníku.

7.1.PIV metoda

PIV (Particle Image Velocimetry) [7] je optická metoda využívaná k vizualizaci proudění plynů nebo kapalin. Jedná se o vizualizaci okamžité rychlosti pohybu částic unášených kapalinou nebo plynem, ale lze ji také využít k vizualizaci pohybu částic v sypké hmotě. U optických metod je vždy důležité dobré nasvětlení snímaného modelu pro následné počítačové zpracování obrazu. Díky tomu získáme vektorovou mapu rychlostí proudového pole.



Obr. 7.1: PIV zařízení pro snímání

Princip funkce je založen na světelném svazku, který je válcovou čočkou upraven do tvaru světelného nože, kterým se osvětluje rovina měřicího prostoru.

Data z několika měření ve stejné rovině nebo data z několika měření v paralelních rovinách je možné dále zpracovávat pomocí datového procesoru. Tím dostaneme střední hodnoty rychlostí v dané rovině (s vyšší přesností než z jednoho měření).

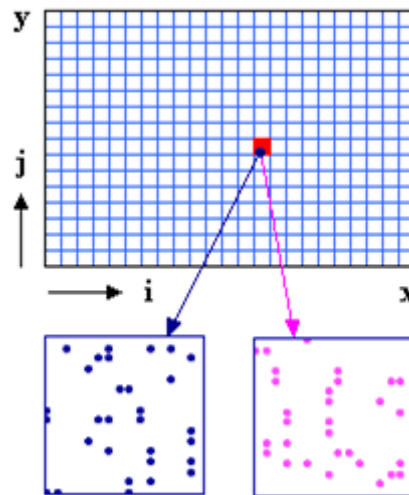
Měření se provádí dvěma nebo i více krátkými po sobě jdoucími pulzy se známou frekvencí, čímž lze získat záběry pulzů v postupně navazujících časových intervalech. PIV procesor určí polohy částic v každém záběru (z jednoho měření) a vyhodnotí posunutí částic Δx a Δy ve dvou na sebe kolmých směrech. Pro vyhodnocení posunutí částic Δx a Δy je však nutné znát také měřítko zobrazení. Ze známého časového intervalu mezi snímky $\Delta \tau$ a z posunutí částic Δx a Δy určí procesor složky rychlostí v_x a v_y v daném místě, a to dle vztahů (7.1 a 7.2). [7]

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta \tau} \quad (7.1)$$

$$v_y = \frac{\Delta y}{\Delta \tau} \quad (7.2)$$

Celý proces zpracování jednoho měření PIV procesorem trvá jen několik milisekund. Tímto způsobem lze vizualizovat vektorovou mapu rychlostního pole v reálném čase.

Vyhodnocování posunutí částic Δx a Δy se může provádět různými způsoby. První a druhý záběr obrazu se rozdělí na elementy. Element představuje malou část obrazu s dostatečným počtem obrazových bodů. Je-li v obrazovém elementu jen jedna zřetelná částice, lze Δx a Δy stanovit snadno z rozdílu polohy částice v záběru II oproti poloze částice v záběru I. Je-li v obrazovém elementu více zřetelných částic, lze Δx a Δy stanovit z četností vzdáleností částic v záběru II oproti částicím v záběru I. Výsledný posuv částic Δx a Δy ve vyšetřovaném elementu je pak dán vzdáleností, která má největší četnost. Je-li v obrazovém elementu více nezřetelných částic, lze Δx a Δy stanovit např. pomocí Fourierovy transformace.



Obr. 7.2: Rozdělení obrazu na elementy i, j ze záběru I a II [7]

Výsledkem aplikace metody PIV jsou jednak obrazy z vizualizace pohybujících se částic ve 2D, ale především je možné získat v reálném čase vektorovou mapu rychlostí. Procesor pro zpracování dat může také generovat barevnou mapu rozložení rychlostí, čáry konstantních rychlostí a umožňuje různé úpravy výsledných dat pro prezentaci.

Výhodou této metody je vysokorychlostní zpracování dat umožňujících generování velkého počtu obrazových párů v reálném čase. Vzhledem k tomu, že každý výsledný rychlostní vektor je statistickým průměrem velkého počtu částic v rámci jednoho obrazového elementu, lze PIV metodu považovat za velice přesnou.

7.2. Snímání pohybu materiálu

Snímání pohybu sypkého materiálu bylo aplikováno na experimentálních modelech sestavených dle kapitoly pět. Zvolenými materiály pro snímání byly skleněné kuličky o velikosti částic 2mm, 3mm, 4mm a 5mm.

Proces snímání byl pro jednotlivé snímání rozdělen do jednotlivých kroků:

- 1) Sestavení experimentálního modelu a upevnění na verifikační zařízení
- 2) Naplnění modelu sypkým materiálem o známém objemu
- 3) Nastavení snímacího prvku (vysokorychlostní kamery)
- 4) Spuštění snímání a následně otevření výpustného otvoru experimentálního modelu

Sestavení experimentálních modelů bylo prováděno pro modely s úhlem sklonu výsypky 30° a 45°. Tyto skleněné modely byly pomocí upínacích prvků nainstalovány na verifikační zařízení. Sestavení modelů nádob s půlkruhovým průřezem a úhlem sklonu výsypky 30°, 60° a pro konvexní a konkávní tvar probíhalo tak, že výsypky byly namontovány do nádoby z nerezového plechu a celý takto sestavený model upevněn na verifikační zařízení. Snímací rovina byla k modelu připevněna pomocí rychloupínacích prvků.

Naplnění modelu sypkým materiálem o známém objemu probíhalo tak, že se zvolilo množství materiálu, které bylo možné vygenerovat v programu EDEM z důvodu časové náročnosti při výpočtu vyprazdňování nádoby. Pro modely bylo zvoleno množství materiálu odpovídající objemu 0,3dm³ pro všechny velikosti částic homogenních materiálů. Pro tento objem byla spočtena hmotnost materiálu pro každý homogenní materiál (tab. 7.1).

$$m = \rho_s \cdot V = 1608 \cdot 0,0003 = 0,48kg \quad (7.3)$$

materiál	Hmotnost materiálu o objemu 0,3 dm ³ [Kg]
2mm	0,48
3mm	0,47
4mm	0,46
5mm	0,45

Tab. 7.1: Tabulka spočtených hodnot

Hmotnost daného materiálu byla vždy zvážena a nasypána do sestaveného experimentálního modelu.

Nastavení snímacího prvku vždy respektovalo kolmé postavení snímacího aparátu k snímací rovině modelu. Vzdálenost aparátu byla nastavena tak, aby bylo možné snímat celý experimentální model s vysokým zaostřením pro pořízení kvalitních snímků k vyhodnocování.

Spuštění snímání a následně otevření výpustného otvoru experimentálního modelu, spustilo proces vyprazdňování materiálu se zachycením tohoto procesu v jednotlivých krocích v závislosti na počtu snímků za sekundu. Celý záznam byl uložen a vyhodnocován pro požadované výstupní informace.

7.3. Výstupy z procesu snímání a měření dílčích hodnot

Metody PIV bylo využito k zachycení děje, který probíhá rychlostí, které lidské oko není schopno dostatečně přesně pozorovat. Pomocí této metody byl děj zachycený a vyhodnocen. Vyhodnocována byla průměrná rychlost pozorována v čase při změně tvaru výsypek a modelových materiálů.

Každý experiment probíhal samostatně a bylo třeba PIV metodu před každým jednotlivým snímáním kalibrovat. Kalibraci předcházelo sestavení experimentálního modelu a ustavení do snímací polohy. Naplnění modelu nádoby materiálem bylo posledním krokem před spuštěním snímání. Když bylo spuštěno snímání byl spuštěn proces vyprazdňování nádoby otevřením výpustného otvoru. Pořízený videozáznam byl z kapacitních důvodů ořezán tak, aby zachycoval pouze samotný děj vyprazdňování.

Proces vyhodnocování hodnot z pořízeného videozáznamu byl časově náročný v trvání dvou hodin při vyhodnocování přes dva tisíce snímků. Z každého procesu bylo vygenerováno sto hodnot pro vytvoření tabulky a následných grafů viz příloha č. 2.

Celé měření bylo rozděleno do tří skupin.

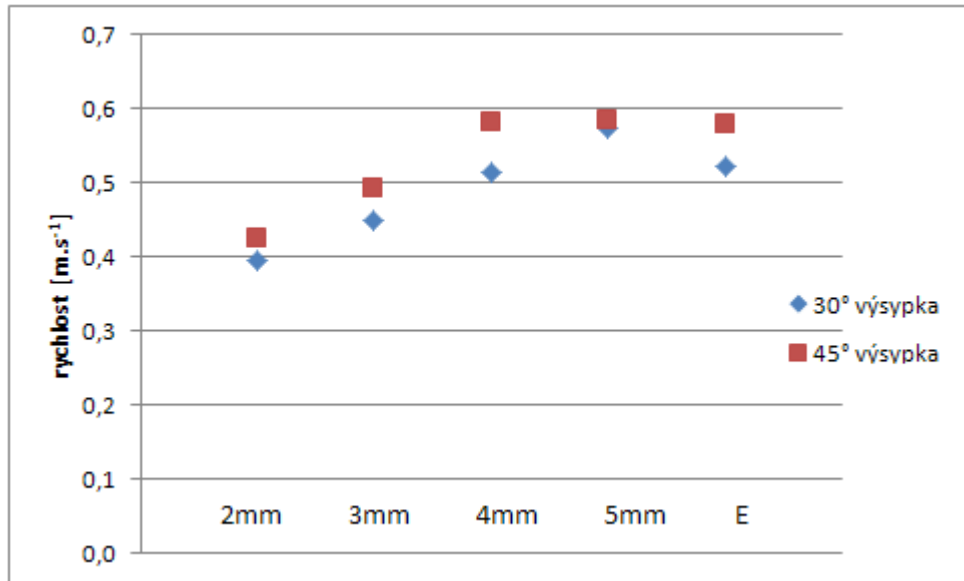
- 1) Měření na modelu situovaném vertikálně
- 2) Měření na modelu naklopeném o 45° v ose x
- 3) Měření modelů půl nádob

Měření v první skupině bylo navrženo pro dvě vyměnitelné výsyvky s úhlem sklonu 30° a 45°. Na těchto výsypkách bylo testováno chování homogenních materiálů o zrnitosti 2,3,4 a 5mm a namíchaný vzorek typu E viz kapitola osm. Výsledky naměřené v první skupině jsou porovnány v tabulce (tab. 7.2).

průměrné rychlosti ve výpusti [$m \cdot s^{-1}$]						
	vzorek	2mm	3mm	4mm	5mm	E
výsyпка	metoda					
30°	PIV	0,39	0,45	0,51	0,57	0,52
45°	PIV	0,42	0,49	0,58	0,59	0,58

Tab. 7.2: Naměřené hodnoty metodou PIV v první skupině měření

Z tabulky vyplývají základní informace průměrné rychlosti ve výpustném otvoru nádoby. Je patrné, že zvýšení úhlu sklonu výsyvky o 15° urychlí materiál v řádu setin sekundy bez ohledu na jeho zrnitost. Vliv materiálu na rychlost je také zřejmý, kdy se zvětšující se velikostí částice se rychlost materiálu zvyšuje. Namíchaný materiál typu E viz kapitola osm nenabývá ani rychlosti naměřené pro materiál o zrnitosti 3mm ani 5mm ze kterých je smíchán, ale blíží se hodnotě pro homogenní materiál o 4mm částicích.



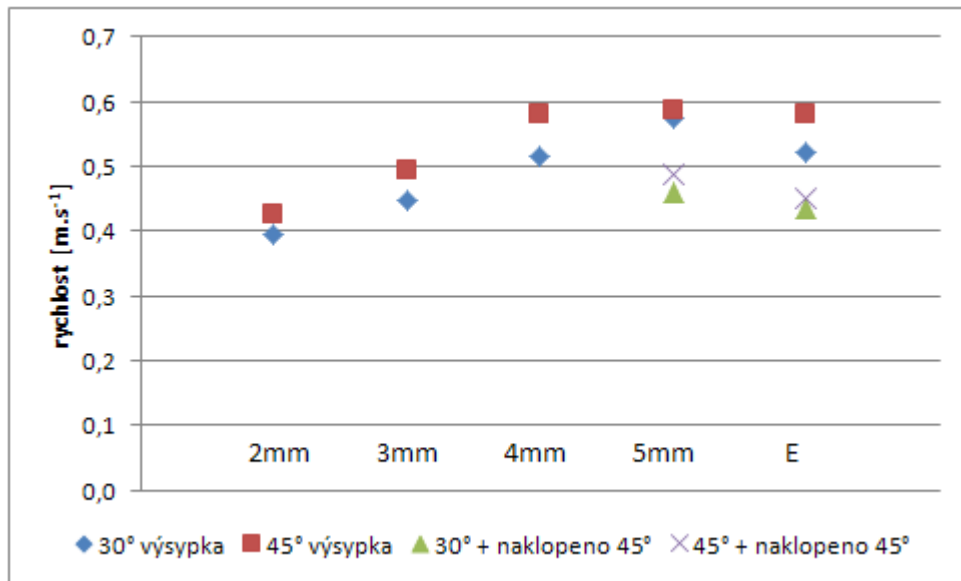
Obr. 7.3: Graf naměřených hodnot průměrné rychlosti pro dané materiály

V druhé skupině se zabývalo změnou chování vybraných materiálů při naklopení modelu nádoby v ose x o 45° . Naklopením se změni silové působení v gravitačním poli Země rozkladem dle goniometrických funkcí díky náklonu modelu a tím dojde ke zvýšení míry ztrátové práce. Porovnávána byla změna průměrné rychlosti ve výpusti nádoby.

rychlost při naklopení v ose x pod úhlem 45° [m.s ⁻¹]				
	30° výsypka		45° výsypka	
metoda	5mm	E	5mm	E
PIV	0,46	0,43	0,49	0,45

Tab. 7.3: Naměřené hodnoty metodou PIV v druhé sekci měření

I při naklopeném modelu má úhel stěny výsypky vliv na zvýšení průměrné rychlosti materiálu ve výpustném otvoru nádoby v řádech setin metrů za sekundu. Avšak naklopením celého modelu v ose x o úhel 45° se průměrná rychlost snížila v průměru u každého materiálu o jednu desetinu metrů za sekundu.



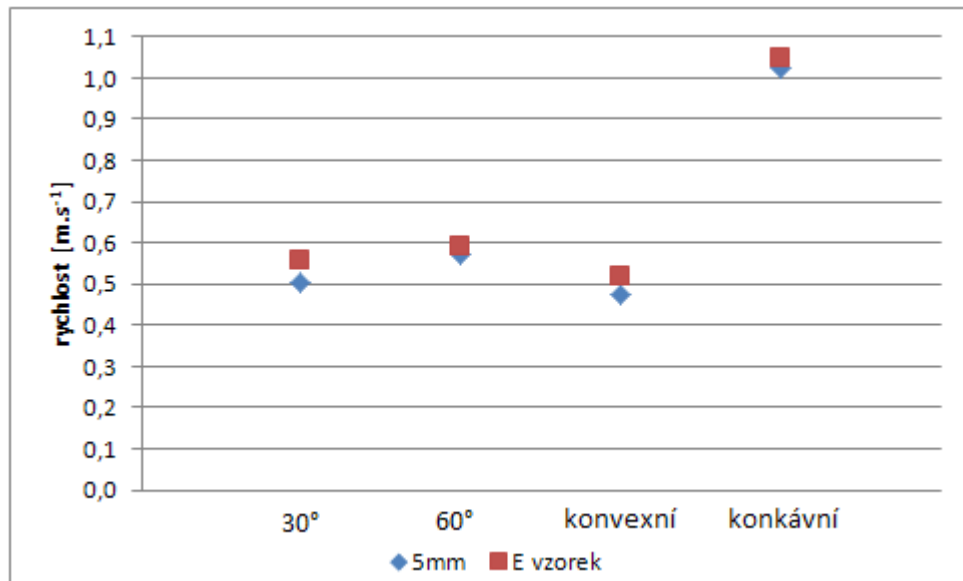
Obr. 7.4: Graf porovnávající průměrné rychlosti sekce 1 a sekce 2

Pro třetí skupinu byly navrženy modely s průřezem nádoby půlkruhu se sklonem výsypky 30°, 60°, konvexní a konkávní. Naměřené hodnoty jsou uvedené v tabulce (tab. 7.4) a na základě těchto hodnot byl vytvořen graf porovnávající průměrné rychlosti ve výpusti nádoby.

rychlosti pro různé tvary výsypek [m.s ⁻¹]					
vzorek	metoda	30°	60°	konvexní	konkávní
5mm	PIV	0,51	0,57	0,47	1,03
E	PIV	0,56	0,59	0,52	1,05

Tab. 7.4: Tabulka průměrných hodnot rychlostí pro různé tvary výsypek

Z výsledků v tabulce vyplývá, že hodnoty průměrné rychlosti ve výpusti nádoby pro namíchaný materiál typu E jsou vyšší než u homogenního materiálu o zrnitosti 5mm. Oproti skupině měření jedna, kdy homogenní materiál o zrnitosti 5mm nabýval rychlostí vyšších oproti materiálu typu E.



Obr. 7.5: Graf průměrných rychlostí v závislosti na tvaru výsyvky

Graf popisuje vliv tvaru výsyvky na průměrnou rychlost ve výpustném otvoru. Nejnižší hodnoty rychlosti byly naměřeny u konvexního tvaru výsyvky, přičemž dle teorie jedné částice umožňující rotaci pohybující se po trajektorii opisující konvexní křivku nabyde nejvyšší rychlosti oproti zbývajícím třem trajektoriím (lineární trajektorie se sklonem 30° a 60°, konkávní trajektorie). Není tomu tak v prostředí jiných částic, kdy je částice umožňující rotaci omezoována kontaktem s dalšími částicemi. Při této skutečnosti byly naměřeny nejvyšší hodnoty průměrné rychlosti ve výpusti u konkávního tvaru výsyvky. Naměřená hodnota je téměř dvojnásobná oproti zbývajícím třem tvarům výsyvky.

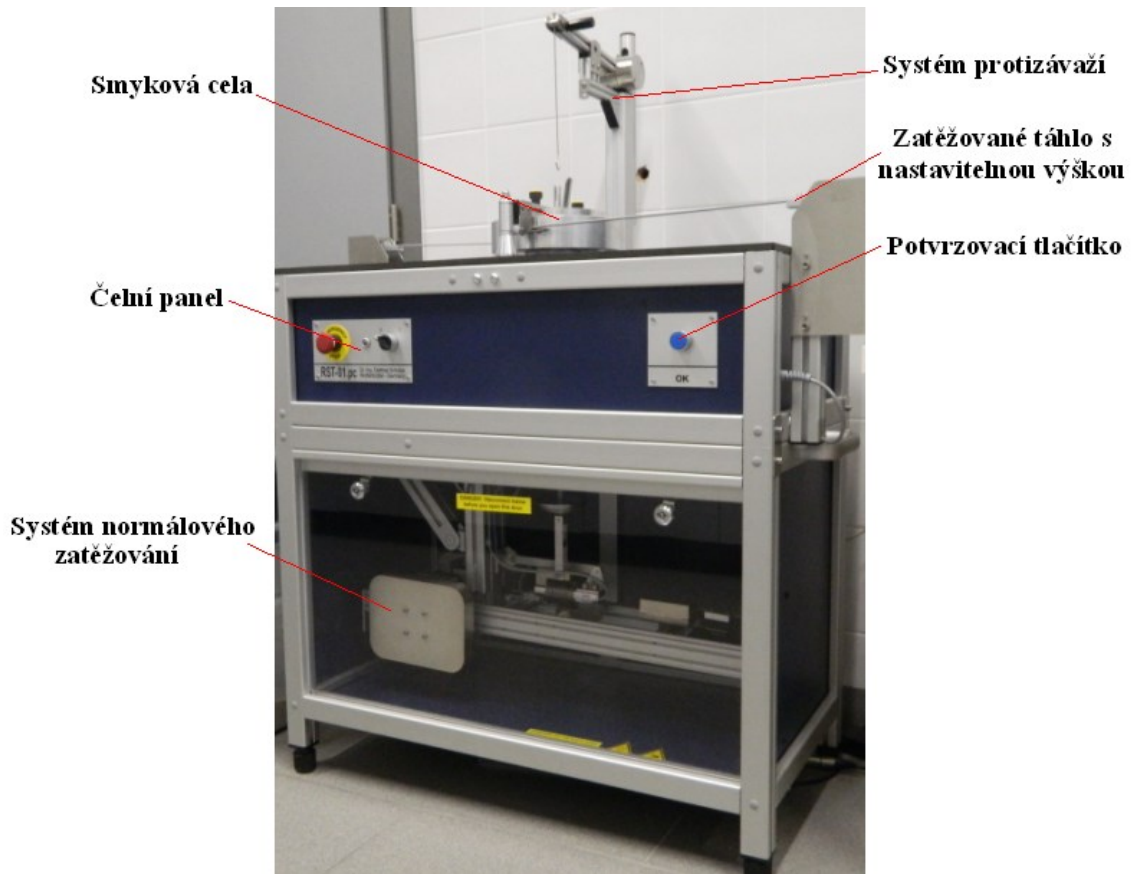
8. Měření mechanicko-fyzikálních vlastností namíchaného materiálu

Měření bylo prováděno na přístroji RST-01 [8] v laboratoři sypkých hmot. Které vychází z Jenikeho [5] principu měření.

Standard měření na Jenikeho přístroji v laboratoři je stanoven počtem čtyř závaží. Pomocí kterých se vytváří normálové zatížení měřeného vzorku materiálu uvnitř smykové cely. Proto byl zvolen také na přístroji RST-01 počet čtyř závaží pro jednotlivé hodnoty normálového zatížení, ale pro přesnější měření, byl nastaven proces měření s trojnásobným opakováním. Můžeme tedy říci, že každé měření vyhodnotilo dvanáct bodů pro zhotovení Mohrových kružnic.

8.1. Příklad RST-01

Příklad RST-01 (Ring Shear Tester) je součástí vybavení laboratoře sypkých hmot. Tento německý přístroj od vynálezce Dr. Dietmara Schulzeho [8, 28] byl navržen v souladu s uznávanými standardy smykových zkoušek sypkých materiálů využívající automatické ovládání počítačem (obr. 8.1).



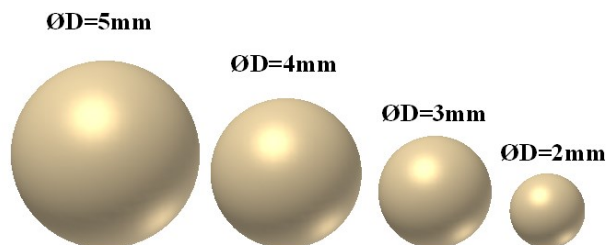
Obr. 8.1: Zobrazení smykového stroje RST-01 [8, 28]

Měření na přístroji RST probíhá obdobně jako na přístrojích využívající smykové zkoušky. Nejprve se měřený materiál nasype do smykové cely, nazývané také spodní kroužek. Následně se materiálová vrstva zarovná s okrajem měřicí cely a tato cely se i s materiálem zváží pomocí váhy. Zvážená hodnota materiálu i s měřicí celou se zapíše do počítače přístroje RST-01. Měřicí cely s materiálem se umístí na trn přístroje procházejícího středem pracovní desky, přiklopí se smykovým víkem a k víku se uchytí táhlo vytvářející normálovou sílu. Následně se k víku uchytí táhlo protizávaží a po stranách se k smykovému víku nasunou dvě spojovací tyče, které spojují smykové víko se snímači tahové síly. Smykovou celou je pomocí trnu otáčeno ve směru hodinových

ručiček. K zabránění otáčení smykového víka prostřednictvím sypkého materiálu je využito spojovacích tyčí, které přenášejí vznikající síly na snímač.

8.2. Homogenní materiál

Jako homogenní materiály byly zvoleny čtyři materiály o velikostech částic 2mm, 3mm, 4mm a 5mm. Materiály byly podrobeny měření, které bylo nastaveno na normálové napětí předsmyku 5000Pa. Jednotlivá měření byla nastavena pro čtyři hodnoty smykového napětí a celý proces nastaven pro trojnásobné opakování. Každý výsledek měření měl takto dvanáct bodů vnesených do grafů, viz příloha č.1. Vzhledem k tomu, že materiálové vlastností nelze striktně určit jednou závaznou hodnotou, uvádíme jako výsledek měření rozsah, ve kterém se mohou materiálové hodnoty pohybovat. Proto bylo měření provedeno ještě jednou, a každý materiál byl podroben dvojímu procesu po dvanácti naměřených bodech. Výsledné naměřené hodnoty jsou zaznamenány v příloze v materiálových listech příslušných materiálů. Pro podrobnější informace jsou také v příloze zprávy z měření na přístroji RST-01, kde lze vyhledat podrobnější povědomí o průběhu měření daného materiálu.



Obr.8.2: Částice jednotlivých materiálů

Pohlédneme-li podrobněji na strukturu jednotlivých homogenních materiálů, dojdeme k závěru, že faktor velikosti jednotlivých částic je směrodatný pro všechny vztahující se hodnoty materiálových vlastností. Proto vyvstává otázka, jak se budou měnit vlastnosti materiálů, budeme-li míchat jednotlivé materiály v různých poměrech.

8.3. Míchání vzorků

Míchání vzorků materiálu probíhalo vážením jednotlivých příměsných frakcí. A díky znalosti hodnoty sypné hmotnosti jednotlivých homogenních materiálů, byly připraveny vzorky o množství odpovídající objemu měřicí cely přístroje. Celý takto namíchaný objem se vejde do měřicí cely, což odstraňuje pochybnosti, že objem použitý k měření v cele není dostatečně reprezentativní. Důkladné promíchání bylo prováděno míchací lopatkou po nasypání všech přimísených frakcí do nádoby. Označení jednotlivých druhů namíchaných materiálů je uvedeno v tabulce (tab. 8.1).

Míchání v %	25/75	50/50	75/25	rozdí [mm]
2mm/3mm	A1	A	A2	1
2mm/4mm	B1	B	B2	2
2mm/5mm	C1	C	C2	3
3mm/4mm	D1	D	D2	1
3mm/5mm	E1	E	E2	2
4mm/5mm	F1	F	F2	1

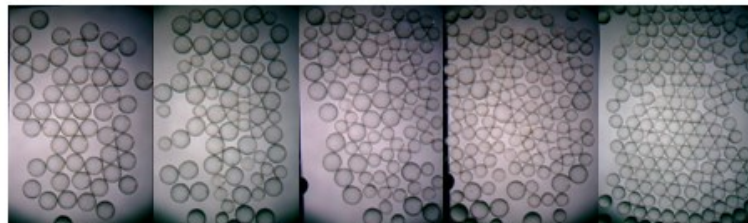
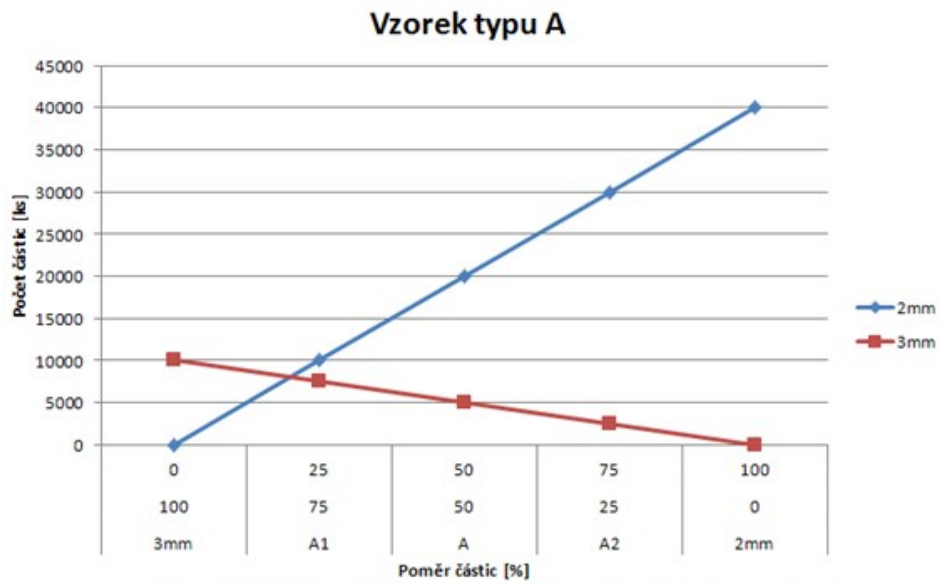
Tab. 8.1: Tabulka označení jednotlivých namíchaných vzorků

Jednotlivé vzorky byly označeny písmenem A-F, kde složení jednotlivých frakcí činilo 50% hmotnosti namíchaného vzorku což odpovídá 200g. Dále byl poměr částic změněn na 25% a 75% hmotnosti namíchaného vzorku a označen doplňkovou číslicí 1. Pro vzorek s poměrem opačným, tudíž 75% a 25% byla přiřazena doplňková číslice 2. Každý namíchaný vzorek vážil 400g.

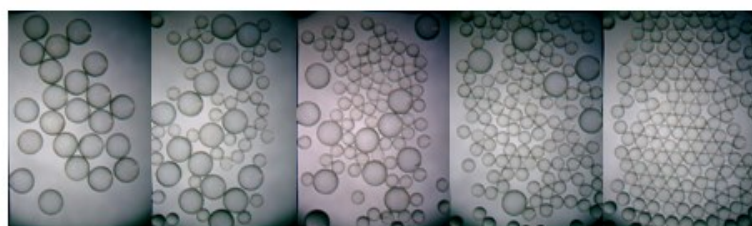
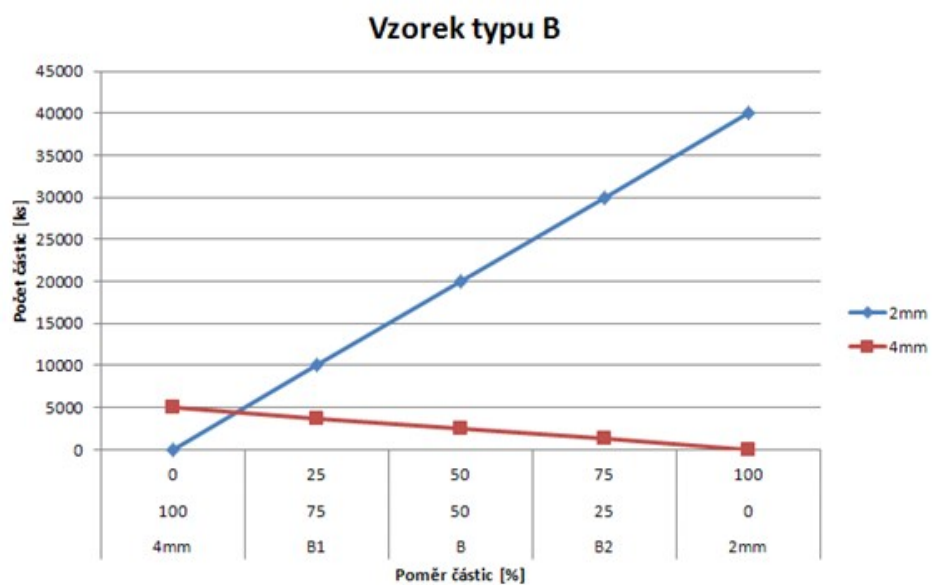
$$25\% = 100\text{g}$$

$$50\% = 200\text{g}$$

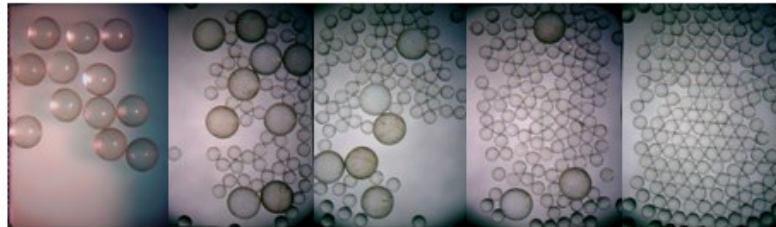
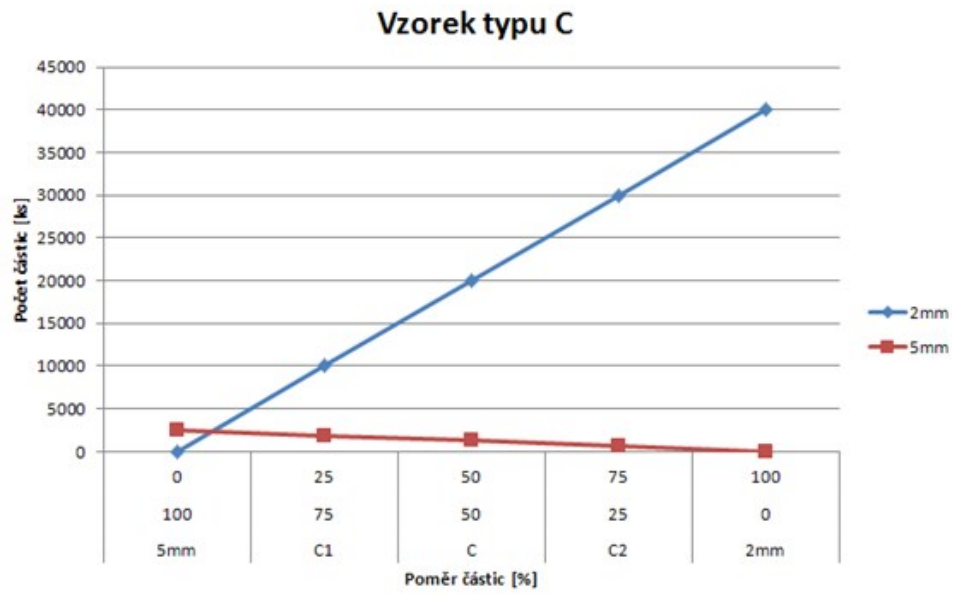
$$75\% = 300\text{g}$$



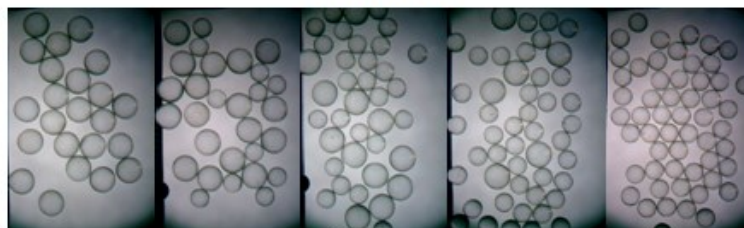
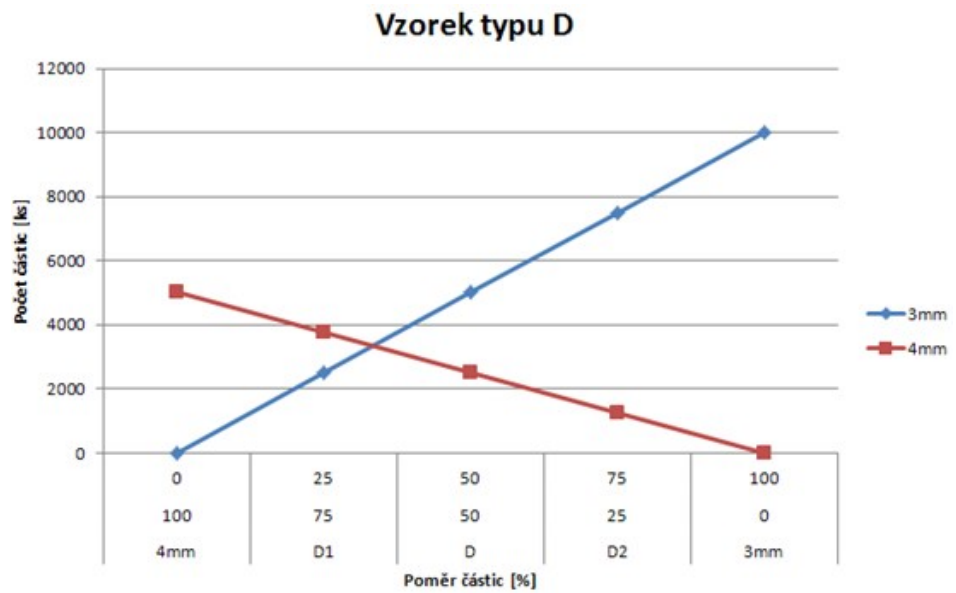
Obr. 8.3: Procentuální míchání vzorku A se zobrazením jednotlivých struktur



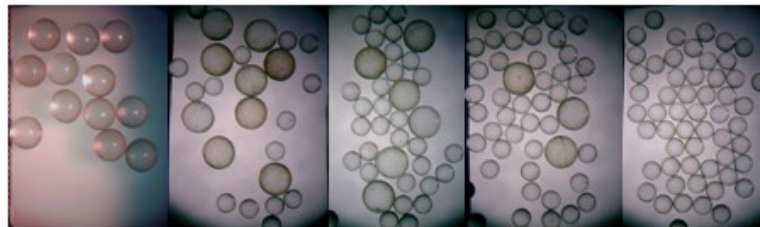
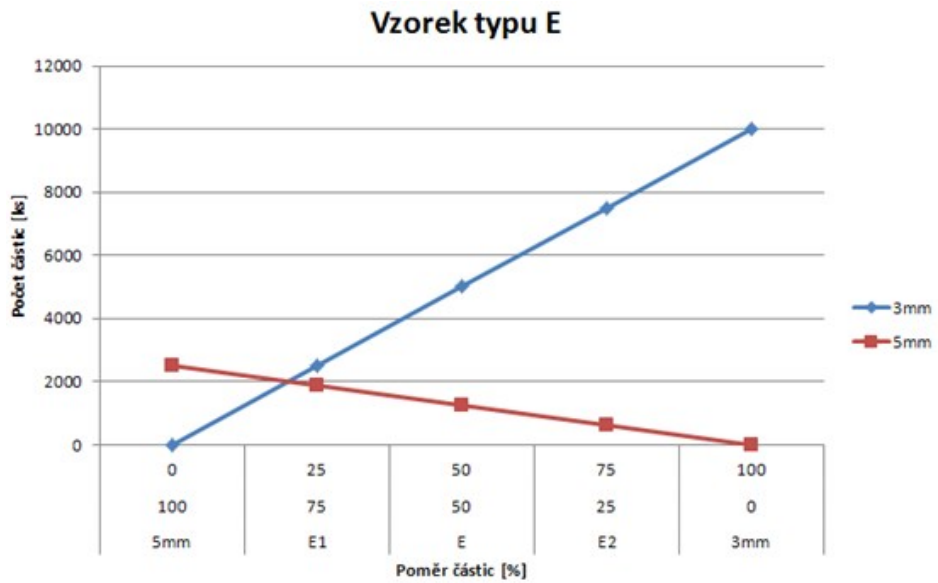
Obr. 8.4: Procentuální míchání vzorku B se zobrazením jednotlivých struktur



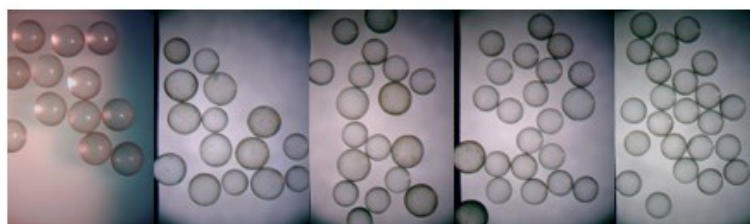
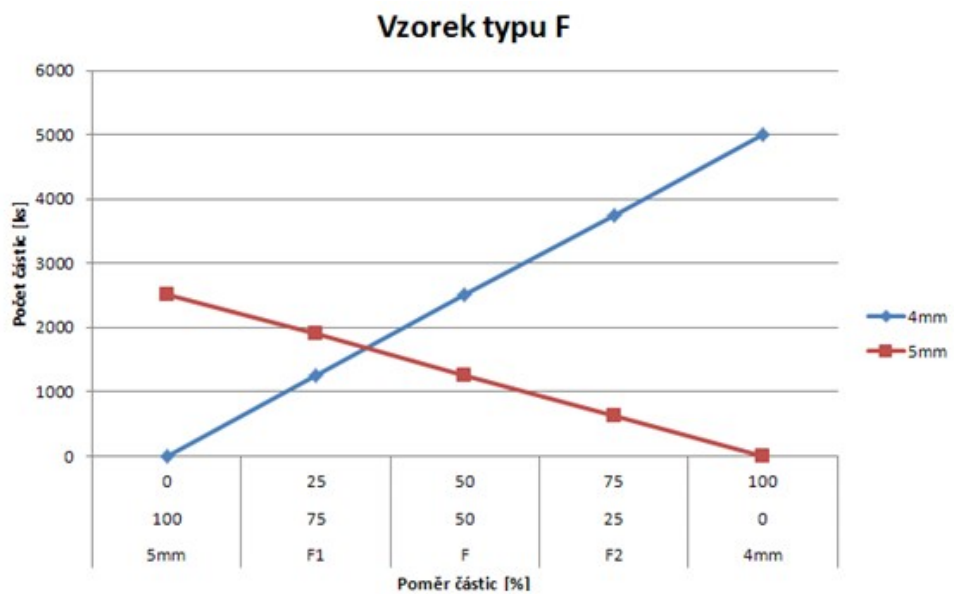
Obr. 8.5: Procentuální míchání vzorku C se zobrazením jednotlivých struktur



Obr. 8.6: Procentuální míchání vzorku D se zobrazením jednotlivých struktur



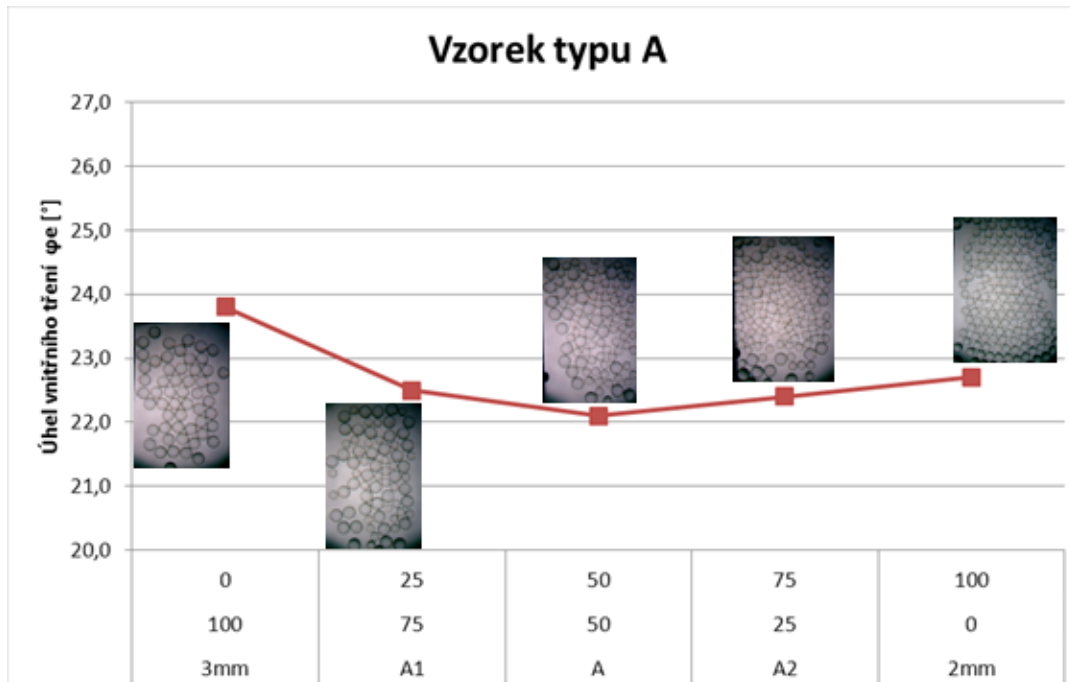
Obr. 8.7: Procentuální míchání vzorku E se zobrazením jednotlivých struktur



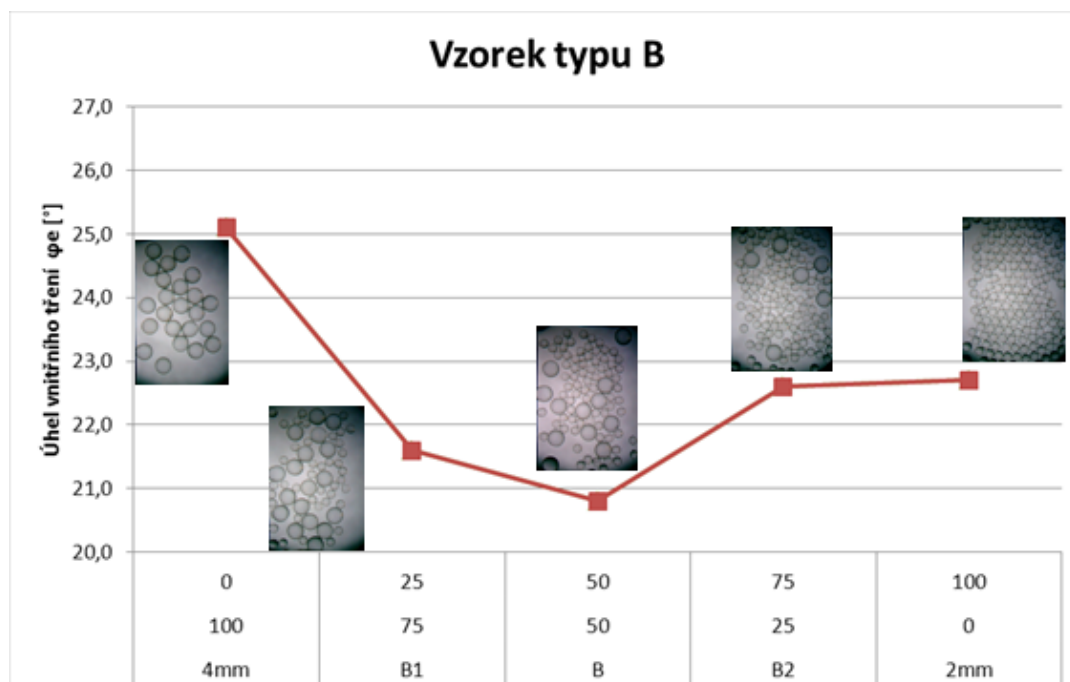
Obr. 8.8: Procentuální míchání vzorku F se zobrazením jednotlivých struktur

8.4. Výsledky měření

Jednotlivé vzorky byly analyzovány pro konkrétní poměry namíchání. Z grafů je patrné, snížení hodnoty úhlu vnitřního tření přimícháním do homogenního materiálu jiný homogenní materiál o rozdílné velikosti částic.

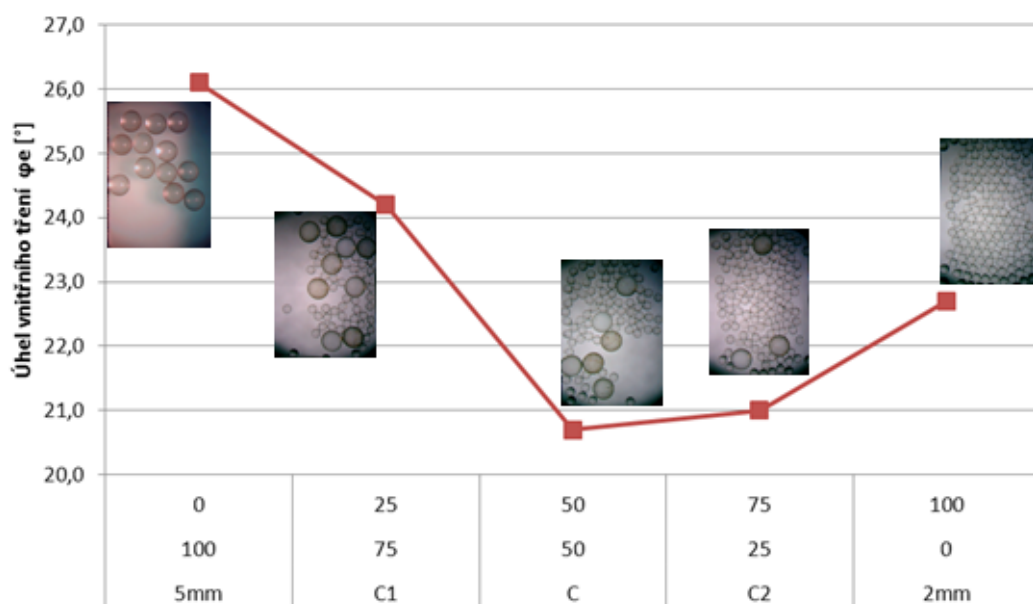


Obr. 8.9: Graf naměřených hodnot vzorku A se zobrazením struktur



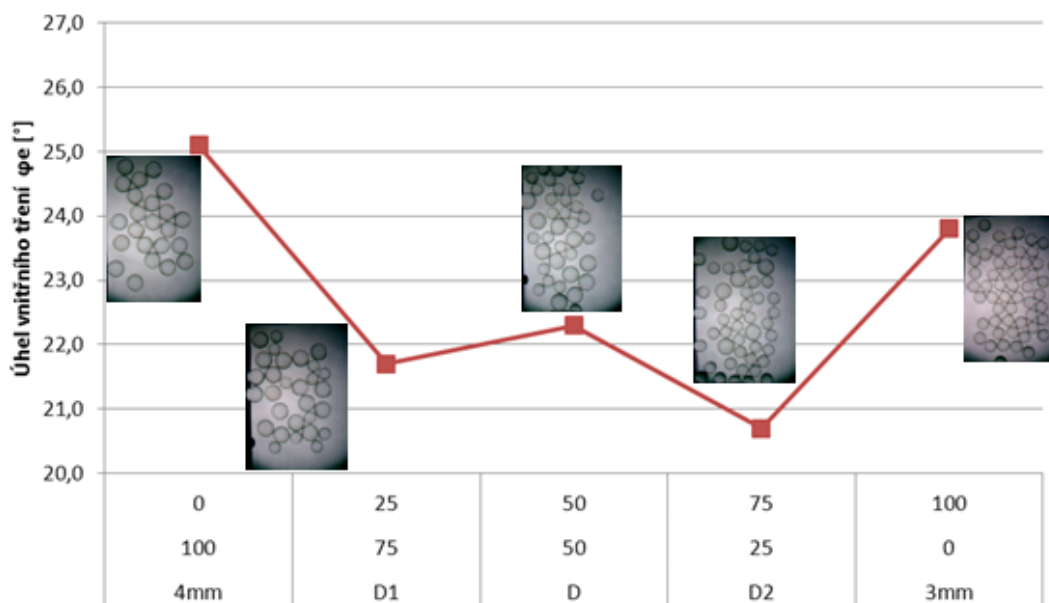
Obr. 8.10: Graf naměřených hodnot vzorku B se zobrazením struktur

Vzorek typu C



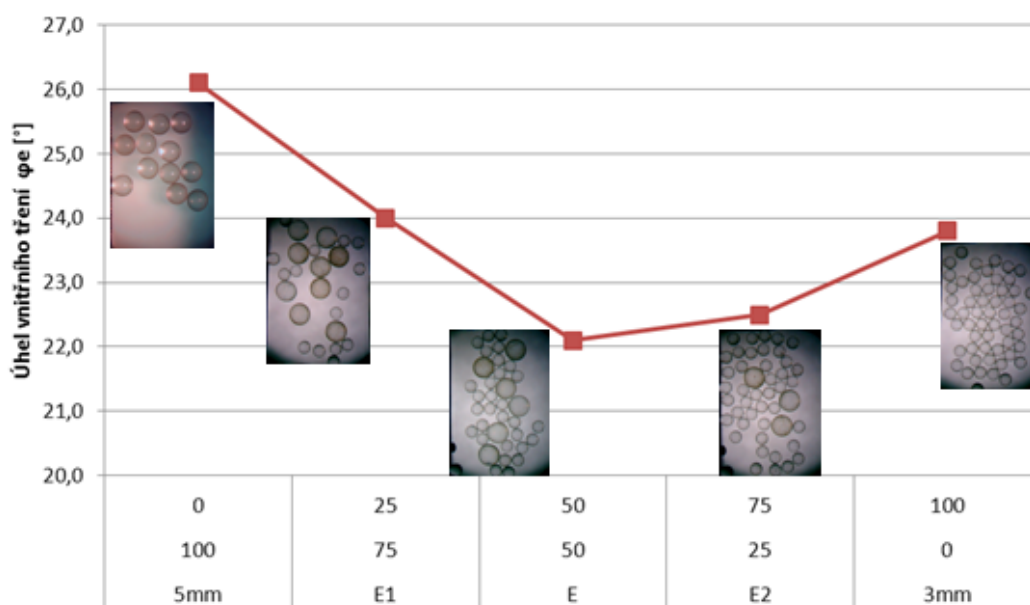
Obr. 8.11: Graf naměřených hodnot vzorku C se zobrazením struktur

Vzorek typu D



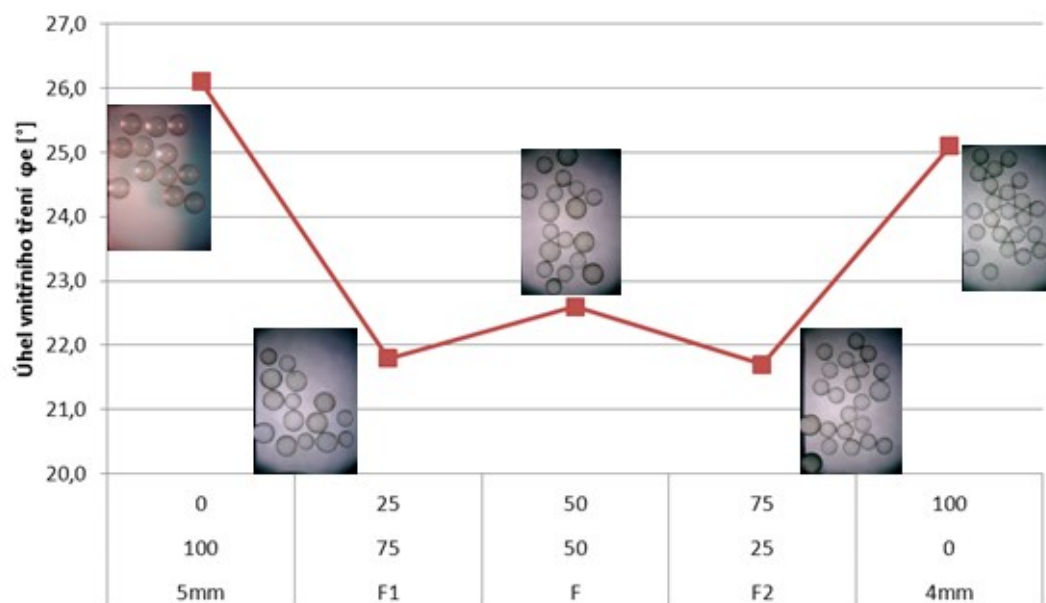
Obr. 8.12: Graf naměřených hodnot vzorku D se zobrazením struktur

Vzorek typu E



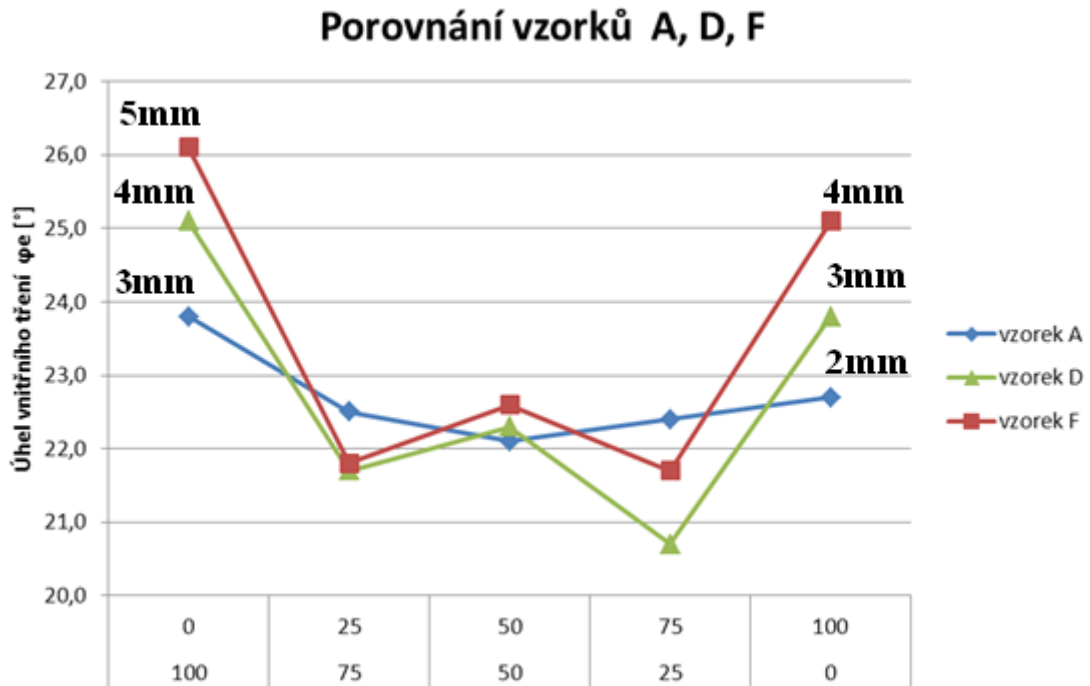
Obr. 8.13: Graf naměřených hodnot vzorku E se zobrazením struktur

Vzorek typu F



Obr. 8.14: Graf naměřených hodnot vzorku F se zobrazením struktur

Z grafu porovnávajícího namíchané materiály s rozdílem velikosti částic jednotlivých frakcí 1mm je zřejmé snížení úhlu vnitřního tření s obdobným charakterem..



Obr. 8.15: Graf porovnání naměřených hodnot vzorků A, D, F

Rozmezí naměřených hodnot se pohybuje od 20,7° do 26°. Při každém smíchání homogenních částic došlo ke snížení úhlu vnitřního tření, přičemž charakter lineárního spojení měřených bodů má vzorek D a F podobný, ale odlišný od vzorku A.

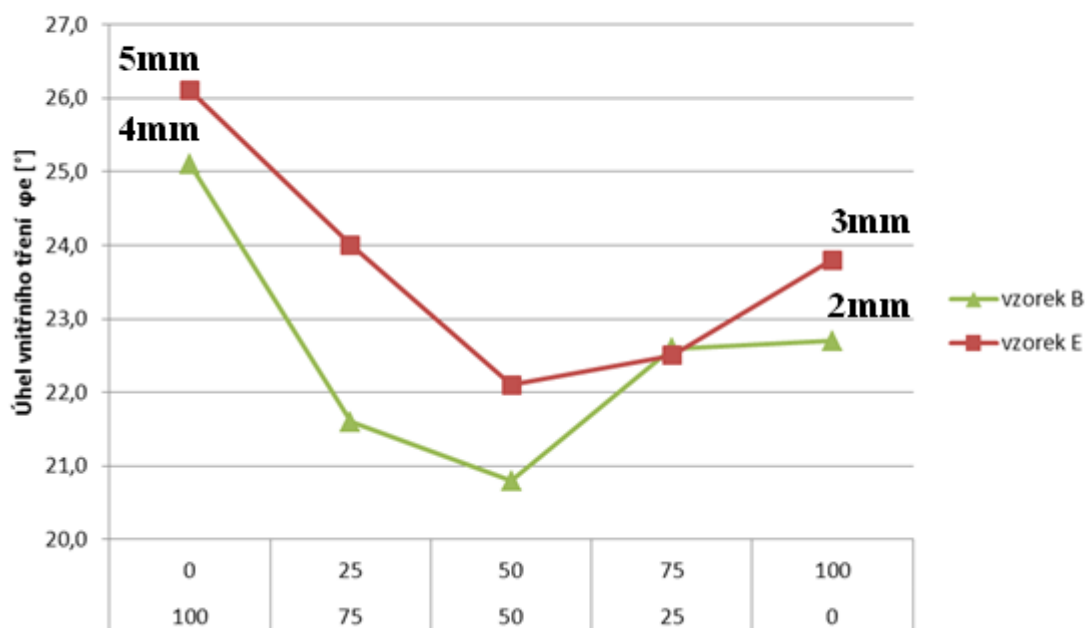
Vzorek A je také odlišný oproti vzorku D a F v poměru, kdy je počet částic obou materiálů v namíchané směsi stejný viz. kapitola 8.3.

A 20/80%

D 28/72%

F 28/72%

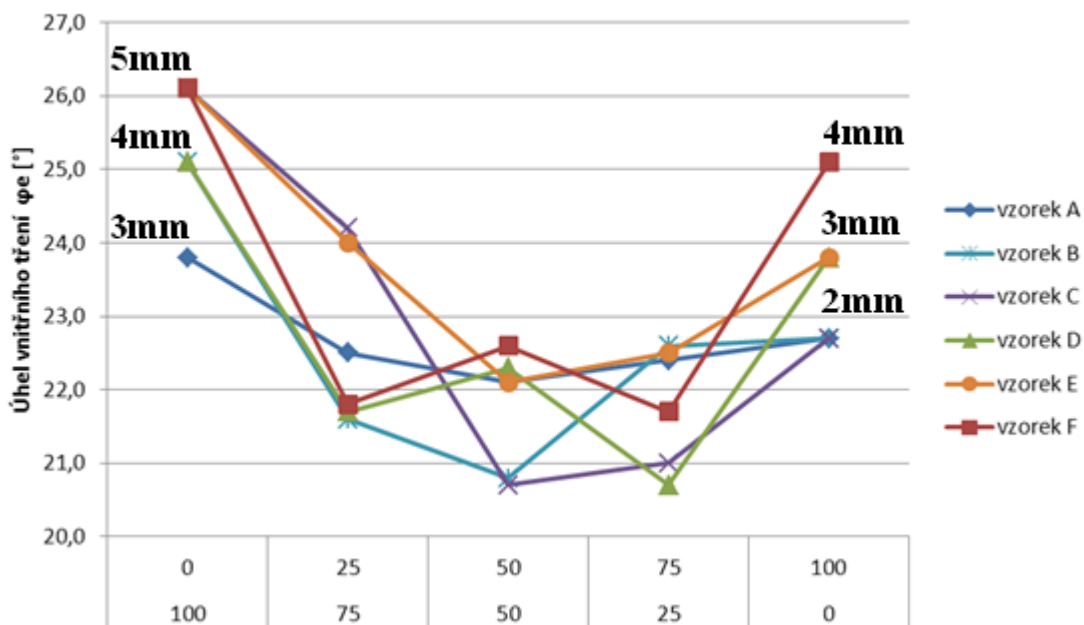
Porovnání vzorků B a E



Obr. 8.16: Graf porovnání naměřených hodnot vzorků B a E

V grafu je znázorněno porovnání neměřených hodnot úhlu vnitřního tření vzorků s rozdílem částic 2mm. Rozmezí naměřených hodnot se pohybuje od 20,8° do 26°.

Komplexní porovnání vzorků



Obr. 8.17: Graf porovnání naměřených hodnot všech namíchaných vzorků

Z komplexního porovnání všech namíchaných vzorků materiálu je zřejmé, že úhel vnitřního tření se sníží do oblasti 20,7° až 24,5°. Mícháním různých velikostí částic směsí materiálu lze úhel vnitřního tření homogenních materiálů snižovat v závislosti na procentuálním přimíšení jiné frakce u materiálu s kulovitým tvarem částic.

9. Porovnání virtuálních simulací se zachycenými snímky

Naměřené hodnoty metodou PIV a DEM jsou podrobně uvedeny v příloze č. 2. V této kapitole jsou porovnány průměrné rychlosti pro všechny měřené experimenty.

9.1. Model situovaný vertikálně bez naklápění

Experimentální model byl nejprve sestaven se sklonem výsypky 30° a poté se sklonem 45°. Model byl plněn zvoleným materiálem a následně vyprazdňován při snímání metodou PIV. Touto metodou byl proces vyprazdňování vyhodnocován a naměřené hodnoty průměrné rychlosti ve výpusti jsou uvedené v tabulce (tab. 9.1). Na základě naměřených hodnot byl vytvořen graf pro přehlednost průběhu rychlosti ve výpusti pro každý materiál a zvolenou metodu viz. příloha č.2.

Pro porovnání byly spočteny průměrné hodnoty rychlosti ve výpustném otvoru. Pro průměrování byla vybrána střední oblast čítající osmdesát hodnot v průběhu toku.

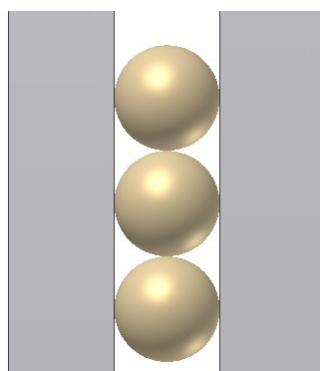
Hodnoty jsou zaznamenány do tabulky (tab. 9.1).

průměrné rychlosti ve výpusti [m.s ⁻¹]						
	vzorek	2mm	3mm	4mm	5mm	E
výsypka	metoda					
30°	PIV	0,39	0,45	0,51	0,57	0,52
	DEM	0,41	0,45	0,51	0,58	0,52
45°	PIV	0,42	0,49	0,58	0,59	0,58
	DEM	0,42	0,47	0,57	0,61	0,57

Tab. 9.1: Průměrné hodnoty rychlosti ve výpustném otvoru

Průběh rychlostí byl vyneseno do jednotlivých grafů porovnávací metodu PIV s metodou DEM. Z vynesných grafů na základě naměřených hodnot lze pozorovat podobnost průměrné výtokové rychlosti, jak na vytvořeném experimentálním modelu, tak na virtuálním modelu.

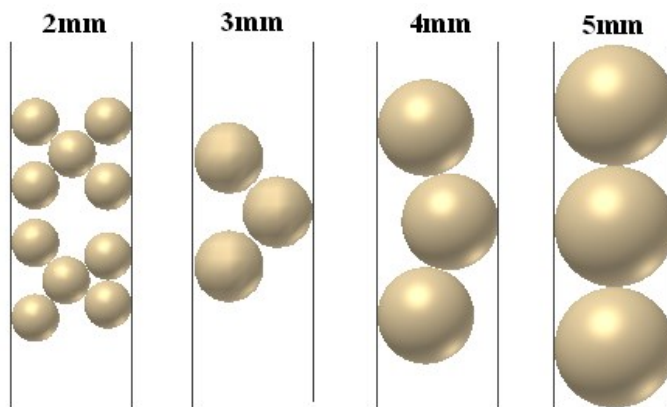
Tento experiment popisuje změnu chování materiálu o různé granulometrii při stejné geometrii nádoby. Model byl rozměrově dimenzován na velikost částice 5mm (obr. 9.1).



Obr. 9.1: Uspořádání částic o průměru 5 mm v modelu

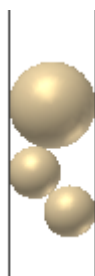
Výtoková rychlost homogenního materiálu o granulometrii 5mm je ze všech zkoušených materiálů nejvyšší. Z obrázku je patrné uspořádání částic a jejich vzájemné působení, což má zásadní vliv na rychlost ve výpusti.

Stejný model zásobníku byl naplněn materiálem o granulometrii 4mm, 3mm a 2mm. Možné uspořádání částic dalších materiálů je zcela odlišné a s tím i silové působení mezi jednotlivými částicemi (obr. 9.2).



Obr. 9.2: Možné uspořádání materiálu v modelu nádoby

Měřením průměrné výtokové rychlosti bylo zjištěno že, rychlost se snižuje se zmenšující se granulometrií téměř lineárně v závislosti na zmenšující se velikosti částice materiálu.



Obr. 9.3: Možné umístění namíchaného materiálu typu E v modelu nádoby

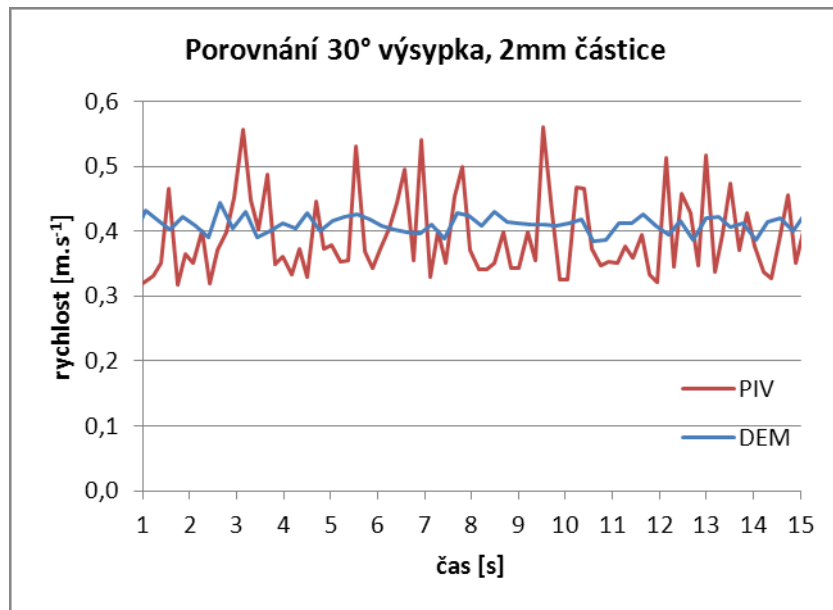
Pro porovnávání grafů byl sjednocen rozsah na osmdesát naměřených hodnot, které byly také použity pro výpočet průměrné rychlosti ve výpusti.

Po srovnání výše uvedených výsledků metodou PIV bylo konstatováno, že velikost zrn sypkého materiálu umístěného do geometricky stejné nádoby má vliv na rychlost pohybu sypkého materiálu ve výpustném otvoru. Rychlosti provnávaných materiálů mají vzestupnou tendenci se zvětšující se velikostí částice, podobně jako úhel vnitřního tření materiálů. Také nemíchaný vzorek materiálu skládající se ze dvou frakcí homogenních materiálů má rychlost nižší, což odpovídá také jeho úhlu vnitřního tření. Změnou úhlu sklonu stěny výsypky došlo také ke změně rychlosti vyprazdňování. Lze tedy říci, že sklon výsypky má také vliv na rychlost pohybu materiálu při vyprazdňování zásobníku.

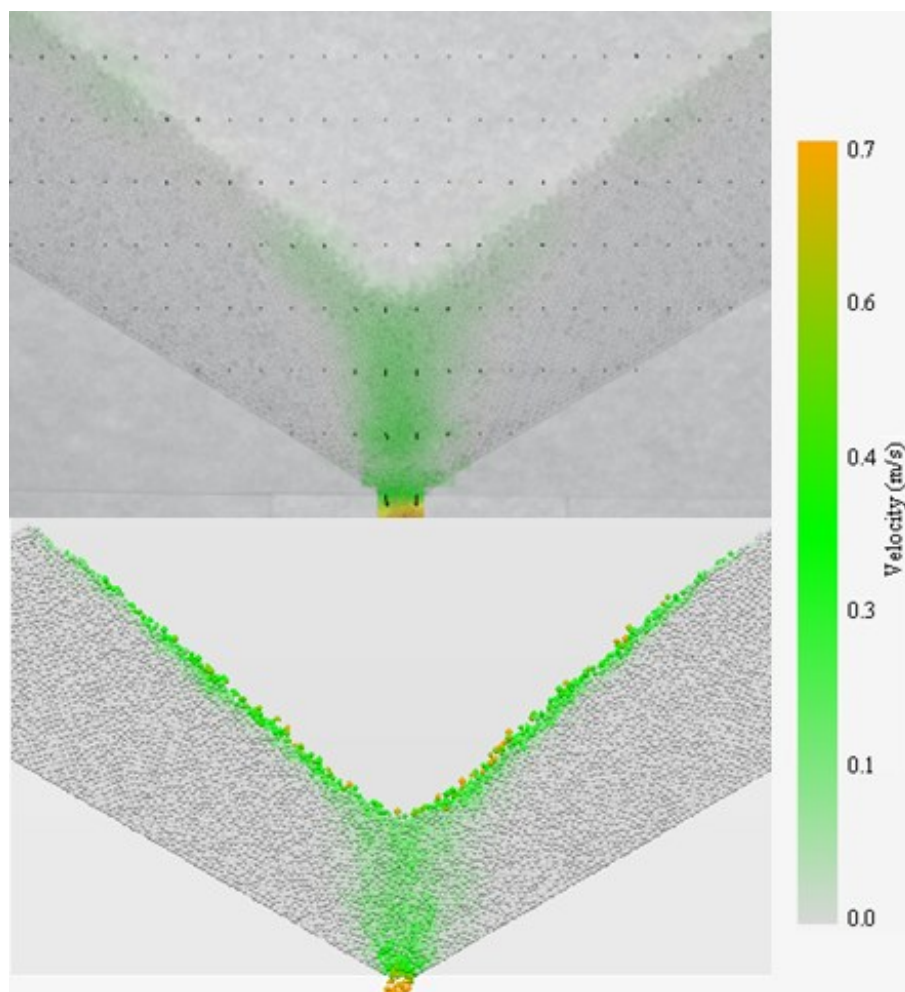
Na materiálu použitém k experimentům byly provedeny měření k zjištění materiálových hodnot potřebných k vytvoření počítačové simulace v programu EDEM.

Po srovnání počítačových simulací s experimenty lze říci, že hodnoty rychlosti materiálu ve výpustném otvoru jsou téměř shodné a vytvořené simulace odpovídají skutečným experimentům.

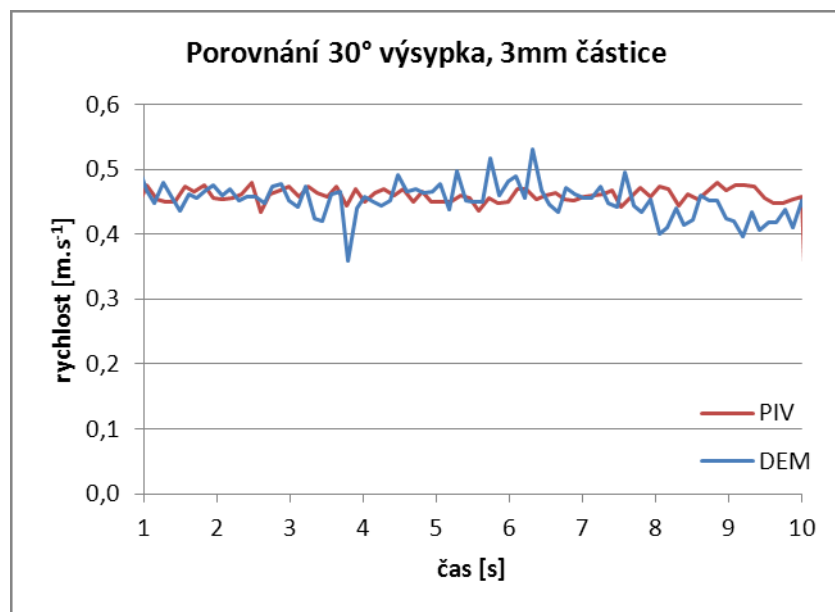
Díky těmto výsledkům lze nahlížet na problematiku skladování pomocí simulací děje, který nelze pozorovat pomocí experimentů.



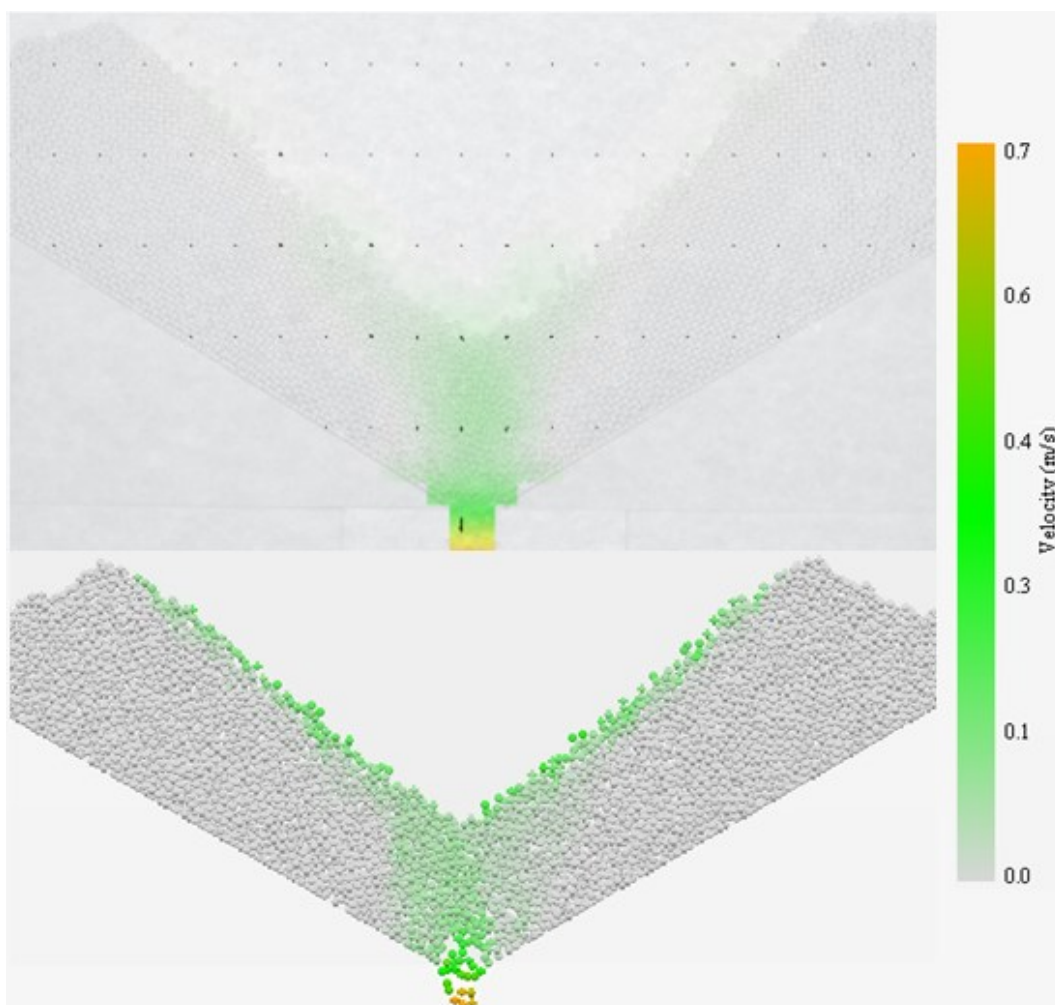
Obr. 9.4: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 2mm



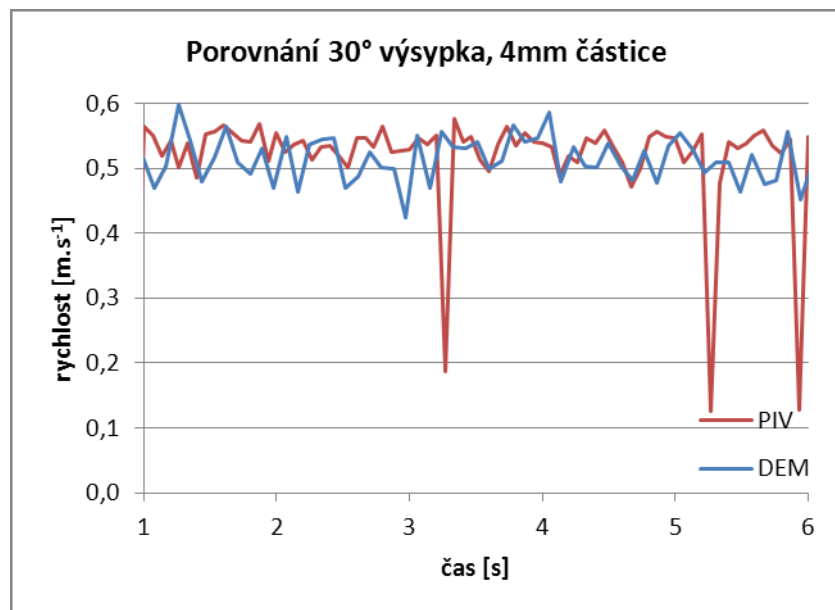
Obr. 9.5: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 30° výsyпка a materiál o 2mm částicích ve stejném čase vyprazdňování



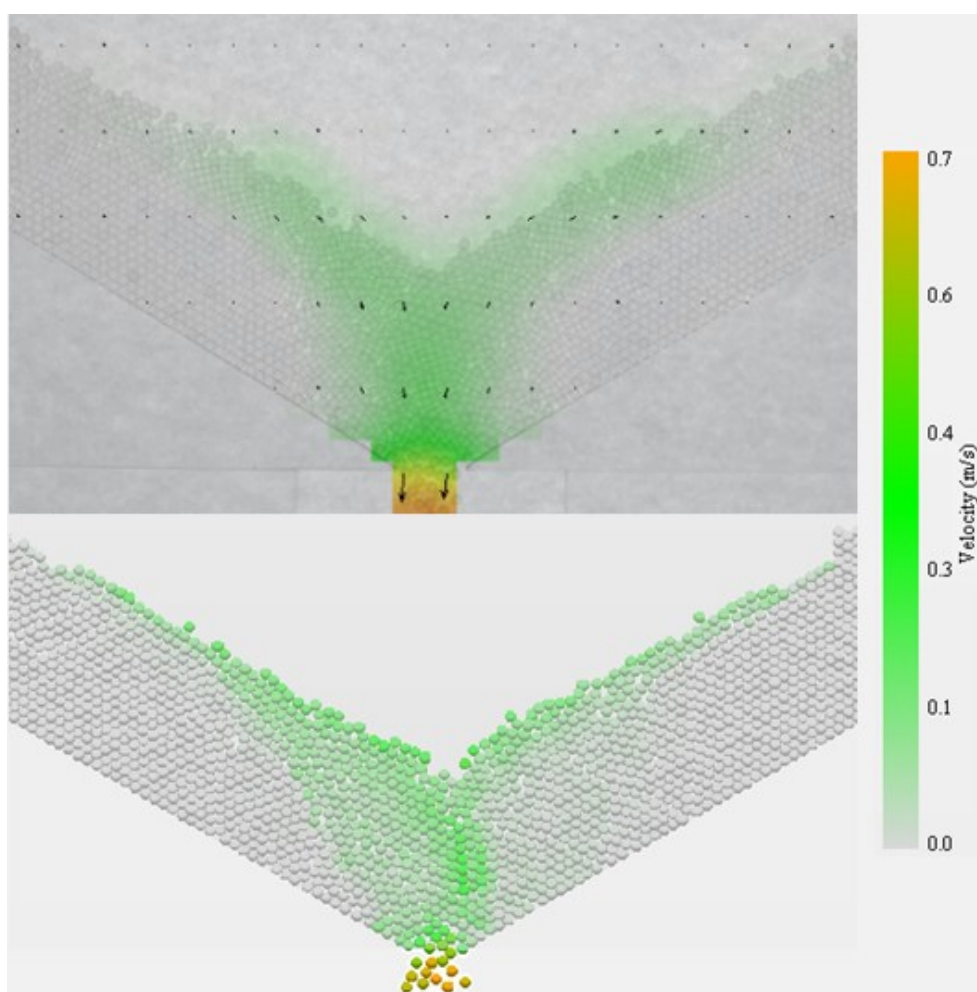
Obr. 9.6: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 3mm



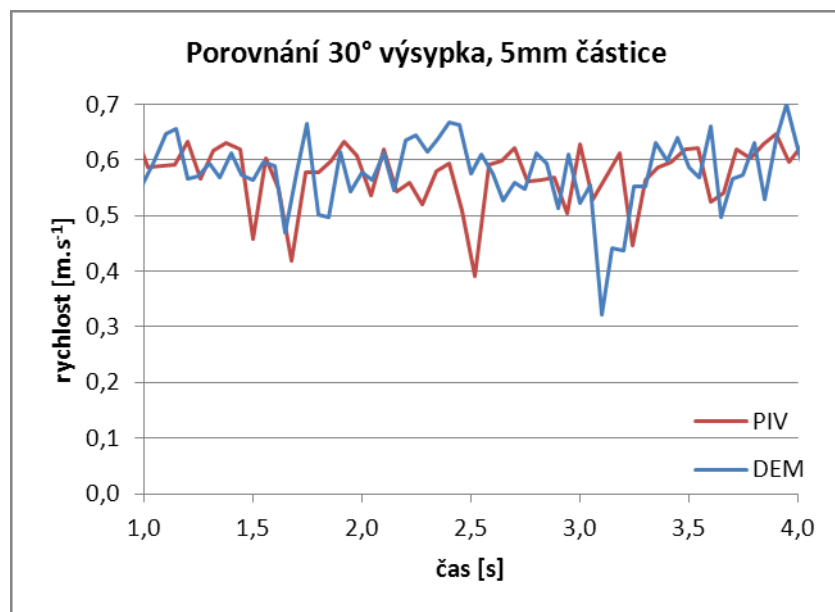
Obr. 9.7: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 30° výsypku a materiál o 3mm částicích ve stejném čase vyprazdňování



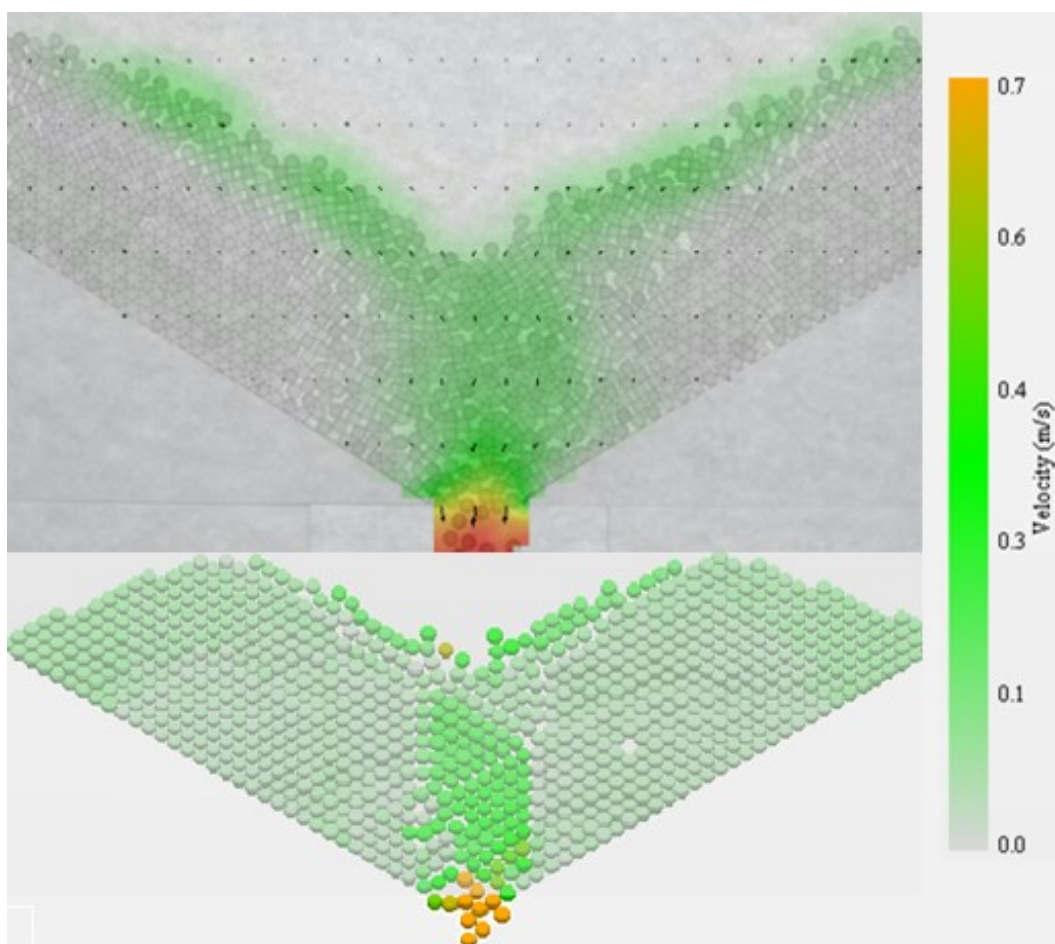
Obr. 9.8: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 4mm



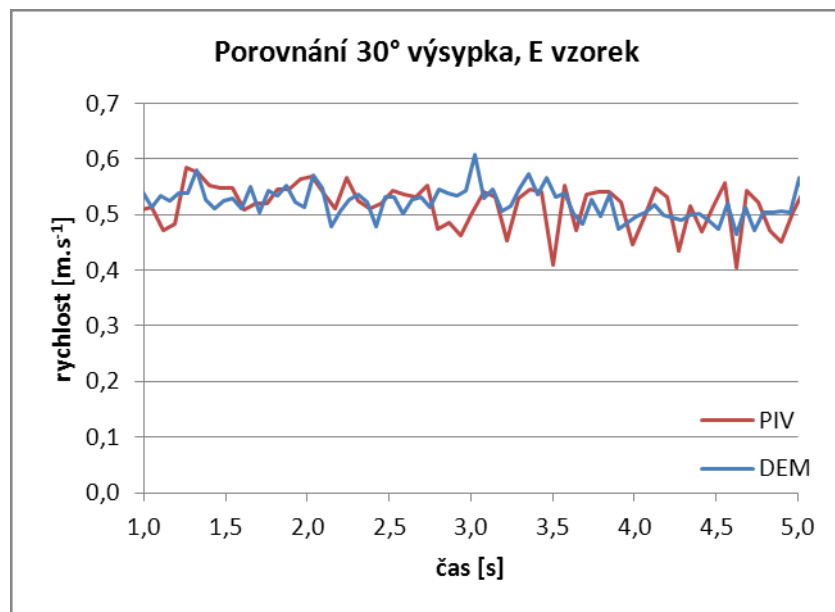
Obr. 9.9: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 30° výsypku a materiál o 4mm částicích ve stejném čase vyprazdňování



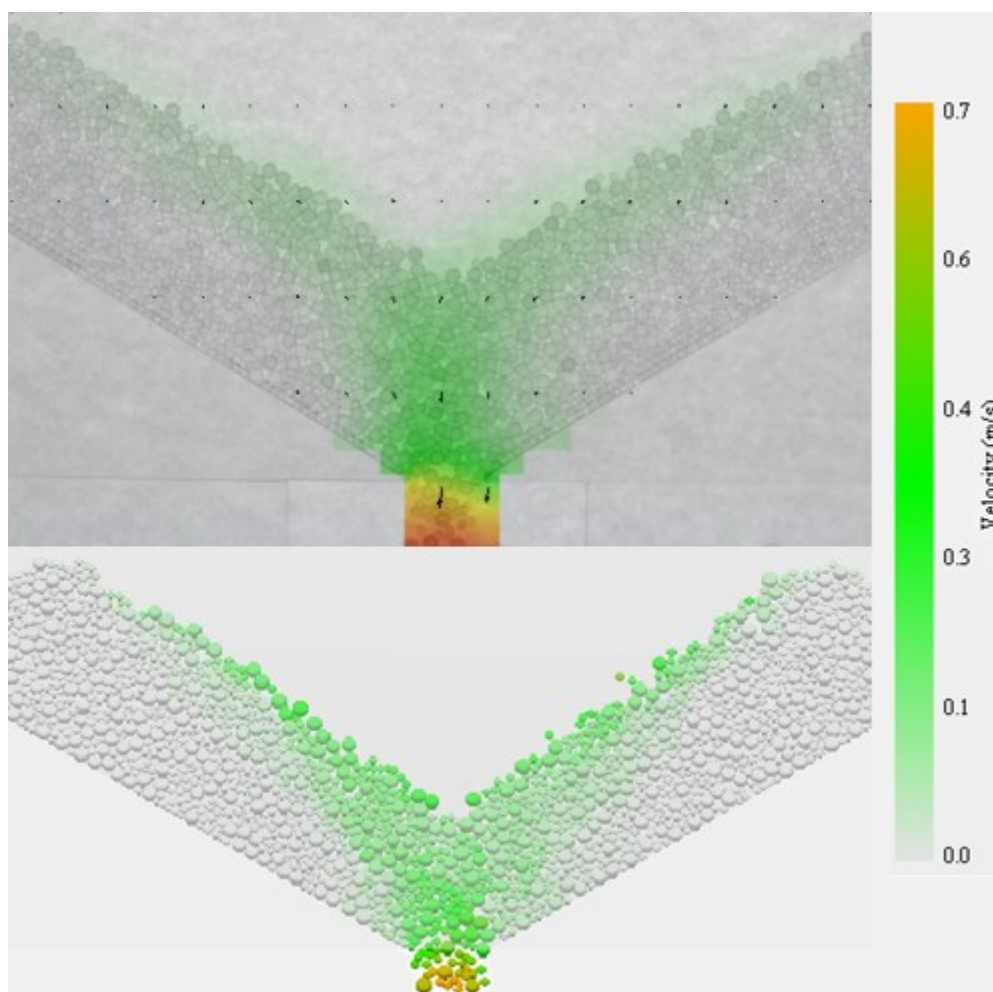
Obr. 9.10: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 5mm



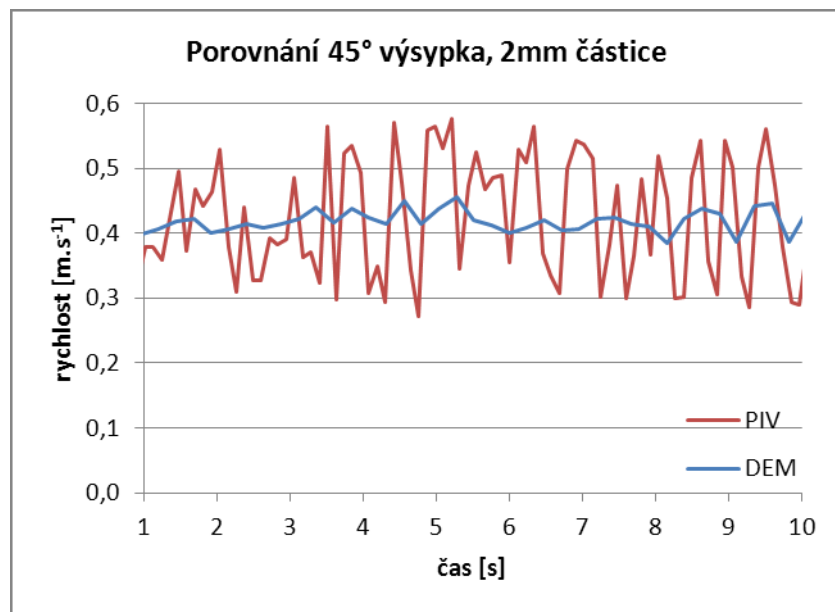
Obr. 9.11: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 30° výsypku a materiál o 5mm částicích ve stejném čase vyprazdňování



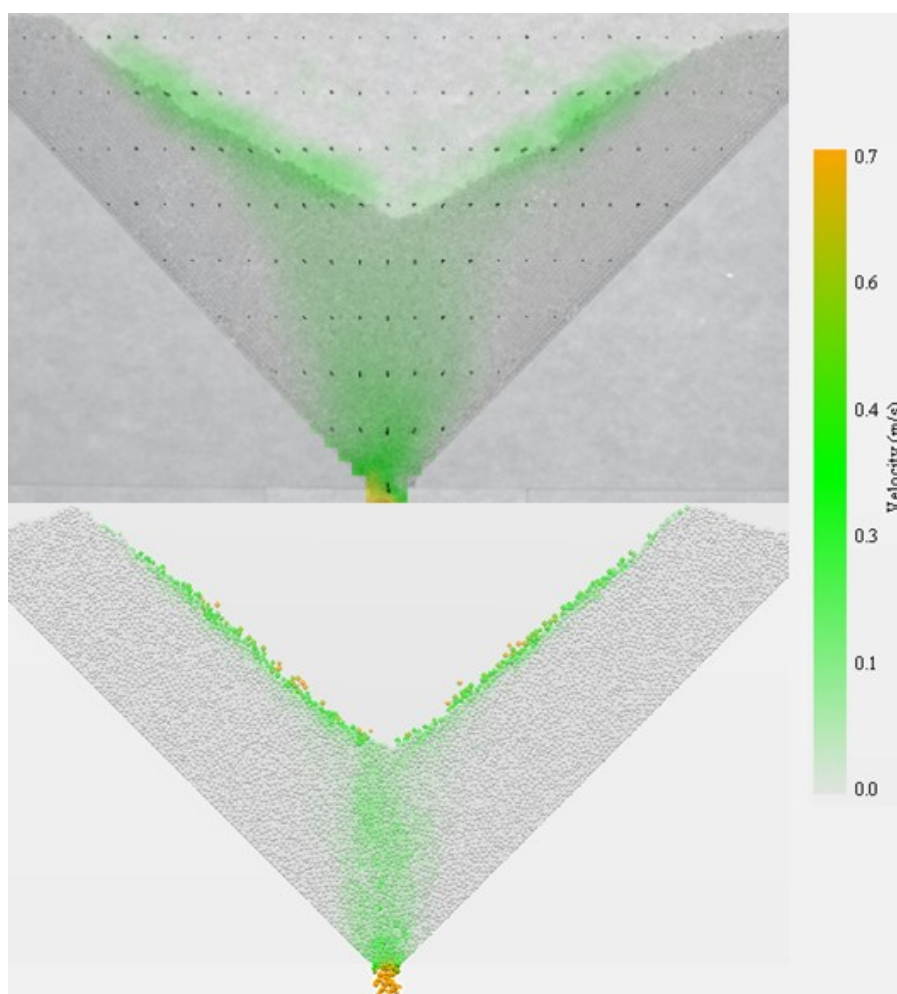
Obr. 9.12: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál typu E



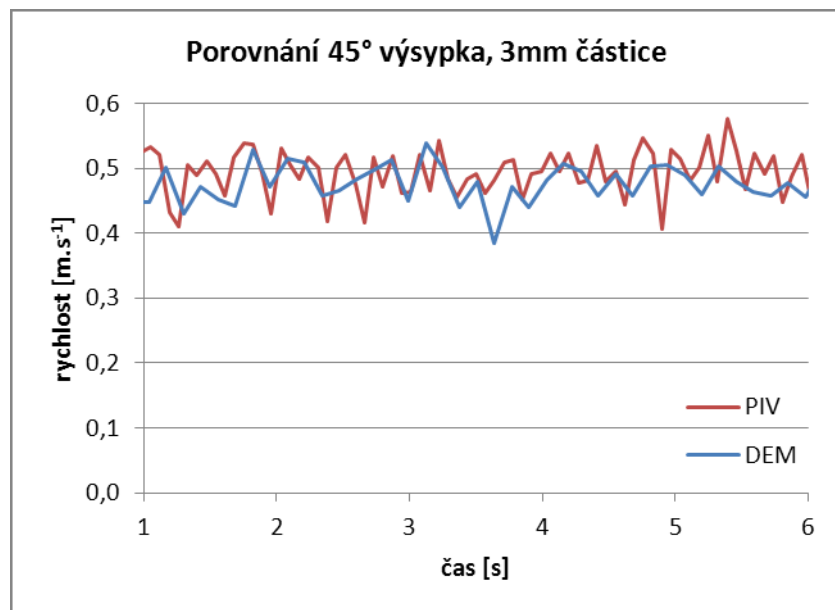
Obr. 9.13: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 30° výsypku a namíchaném materiál typu E ve stejném čase vyprazdňování



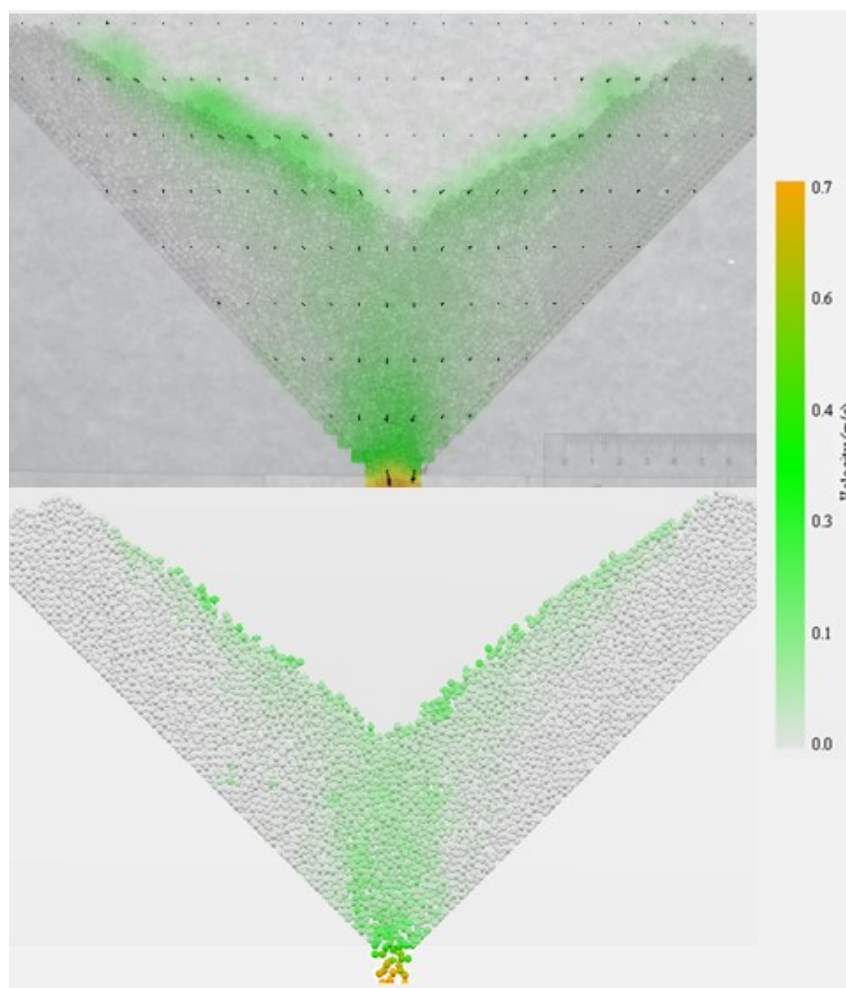
Obr. 9.14: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 2mm



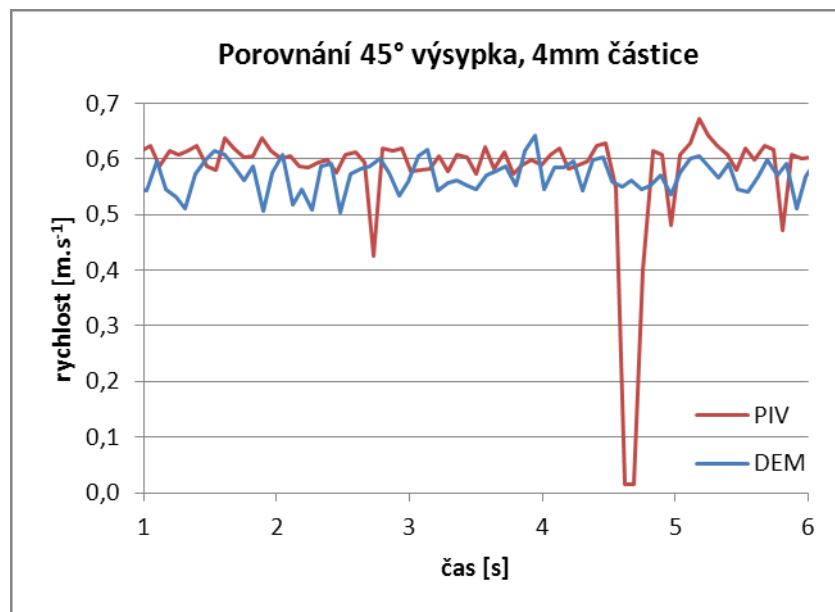
Obr. 9.15: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 45° výsypku a materiál o 2mm částicích ve stejném čase vyprazdňování



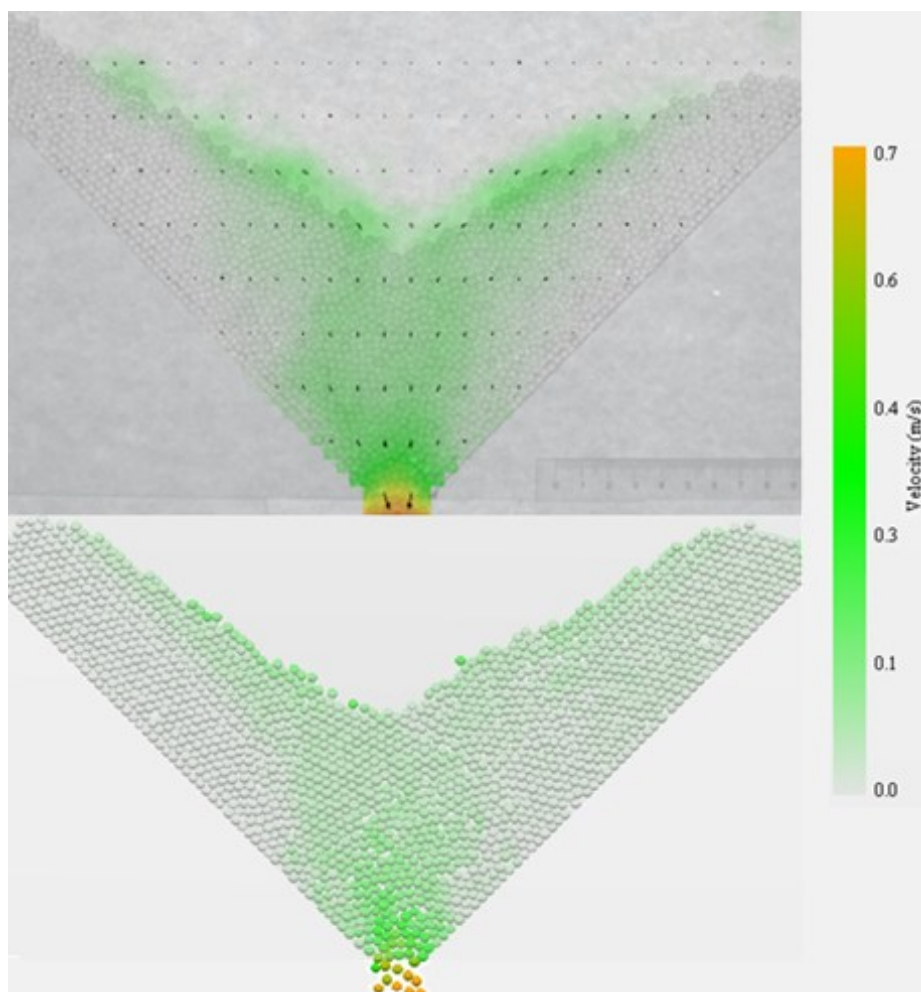
Obr. 9.16: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 3mm



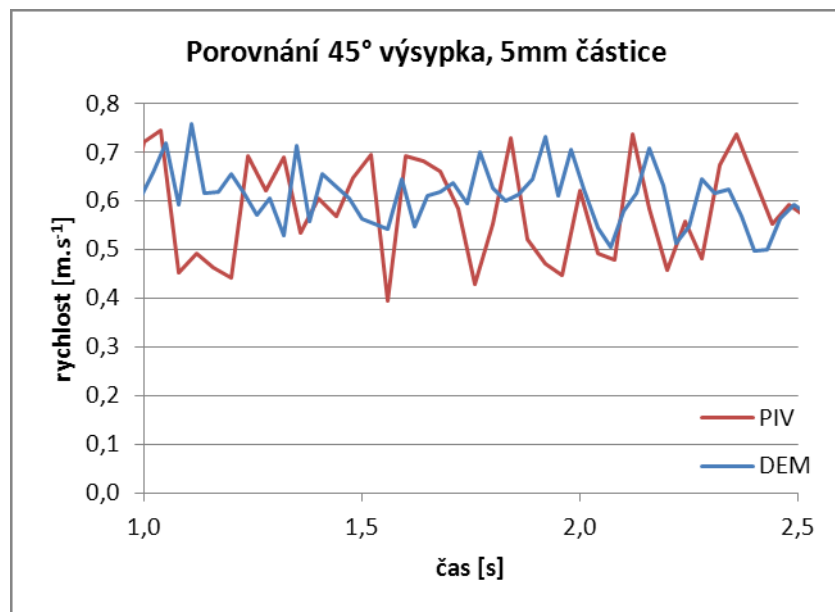
Obr. 9.17: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 45° výsypku a materiál o 3mm částicích ve stejném čase vyprazdňování



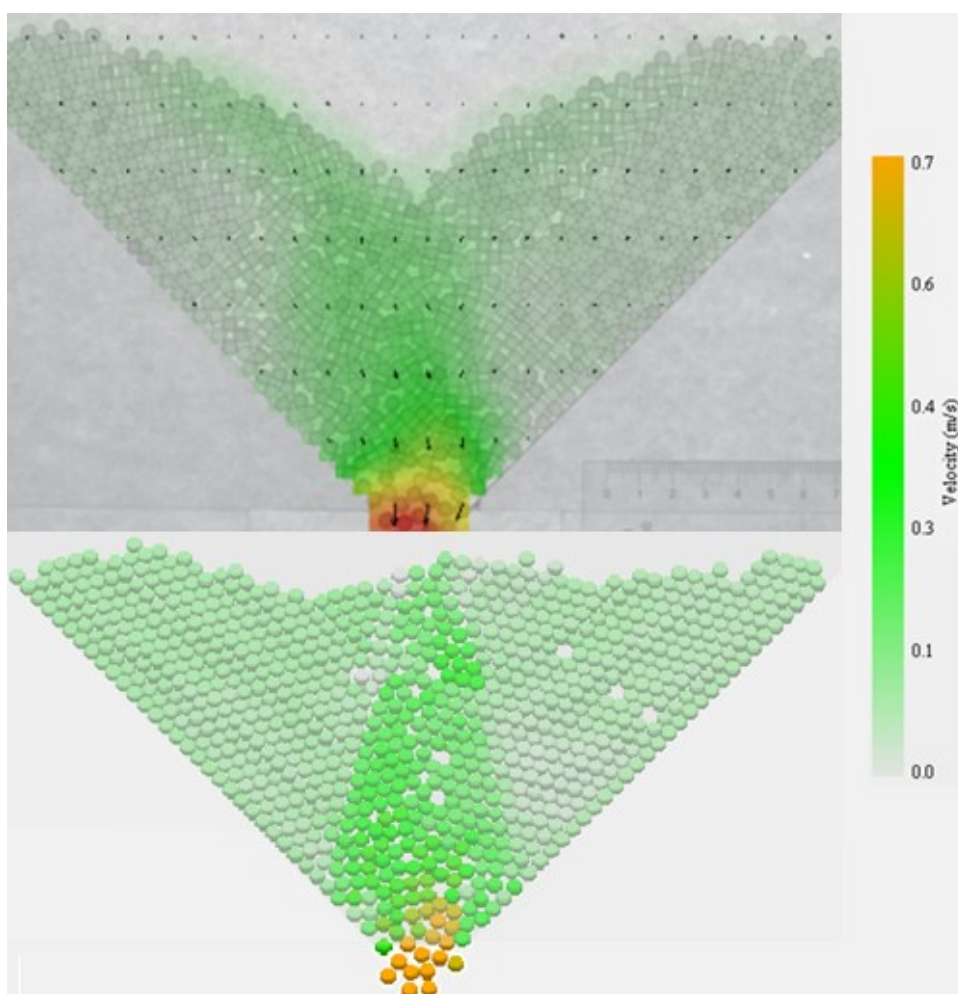
Obr. 9.18: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 4mm



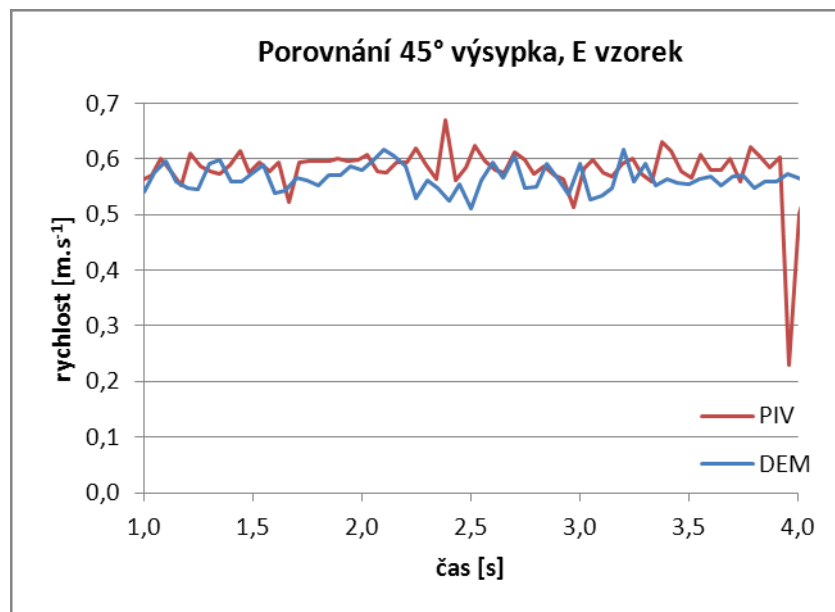
Obr. 9.19: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 45° výsypku a materiál o 4mm částicích ve stejném čase vyprazdňování



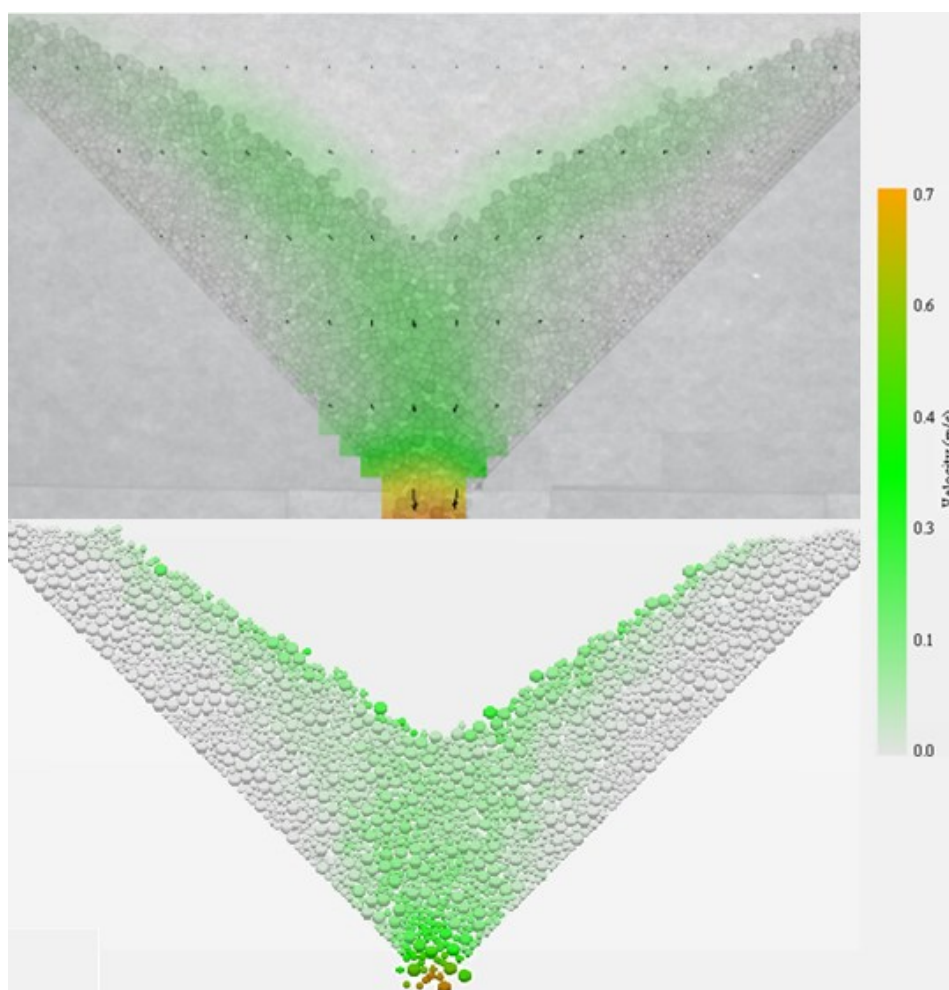
Obr. 9.20: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 5mm



Obr. 9.21: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 45° výsypku a materiál o 5mm částicích ve stejném čase vyprazdňování



Obr. 9.22: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál typu E



Obr. 9.23: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 45° výsypku a namíchaném materiál typu E ve stejném čase vyprazdňování

9.2. Model naklopený v ose x

Sestavený model byl nejprve naplněn materiálem a po té naklopen pod úhlem 45°. Naměřené hodnoty obou srovnávaných metod byly vyneseny do tabulky viz příloha č.2. Hodnoty byly zprůměrovány a vyneseny do porovnávací tabulky (Tab. 9.2). Jednotlivá měření jsou porovnána v příslušných grafech.

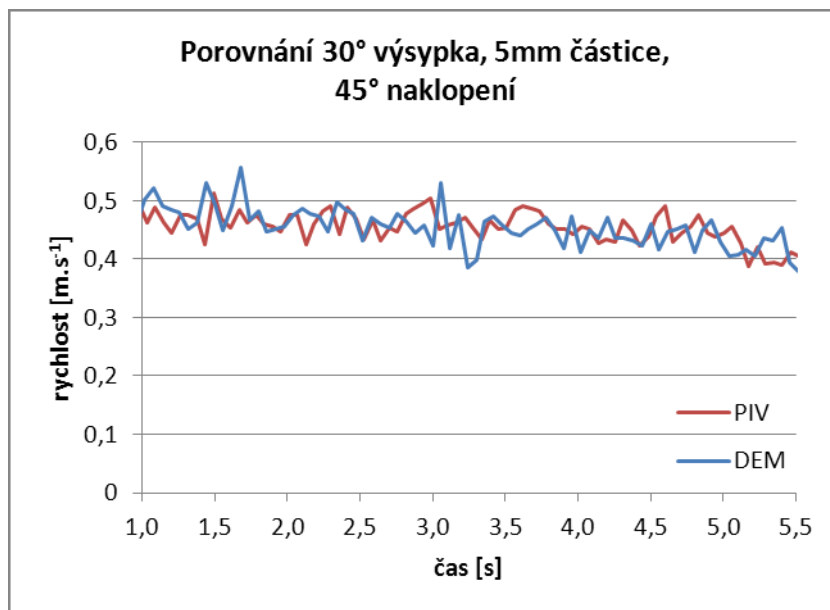
rychlost při naklopení v ose x pod úhlem 45° [m.s ⁻¹]				
	30° výsypka		45° výsypka	
metoda	5mm	E	5mm	E
PIV	0,46	0,43	0,49	0,45
DEM	0,46	0,43	0,49	0,44

Tab. 9.2: Průměrné rychlosti ve výpustném otvoru

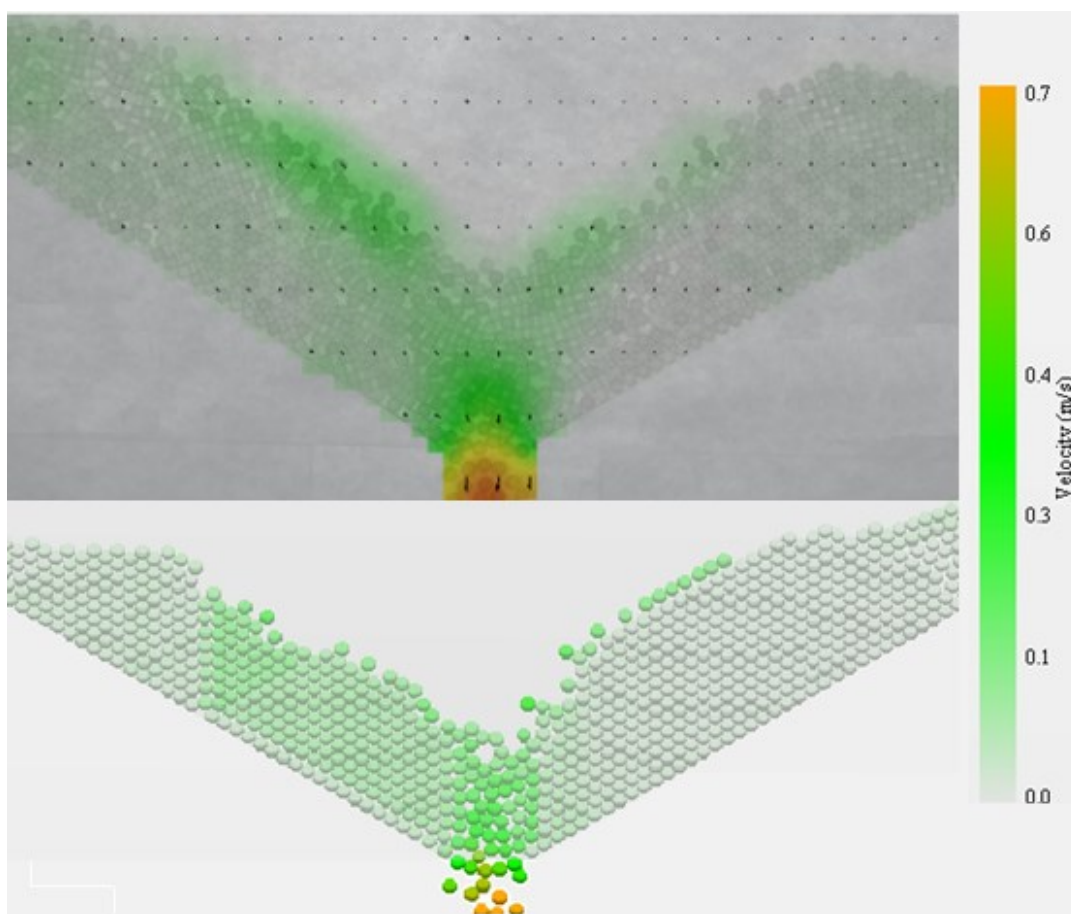
Touto skupinou experimentů mělo být demonstrováno, jak se projeví změna ztrátové práce na výtokovou rychlost materiálu. Srovnání výsledků samotné metody PIV poukazuje na skutečnost, že při zvýšení míry ztrátové práce naklopením celého modelu nádoby o úhel 45° se rychlost pohybu materiálu zpomalí. Toto naklopení mělo stejný vliv na zpomalení toku také při změně úhlu stěny výsypky.

Simulace vytvořené pro porovnání s touto skupinou měření, musely být naplněny ve vertikální poloze stejně jako experiment a poté naklopen pod úhlem 45°.

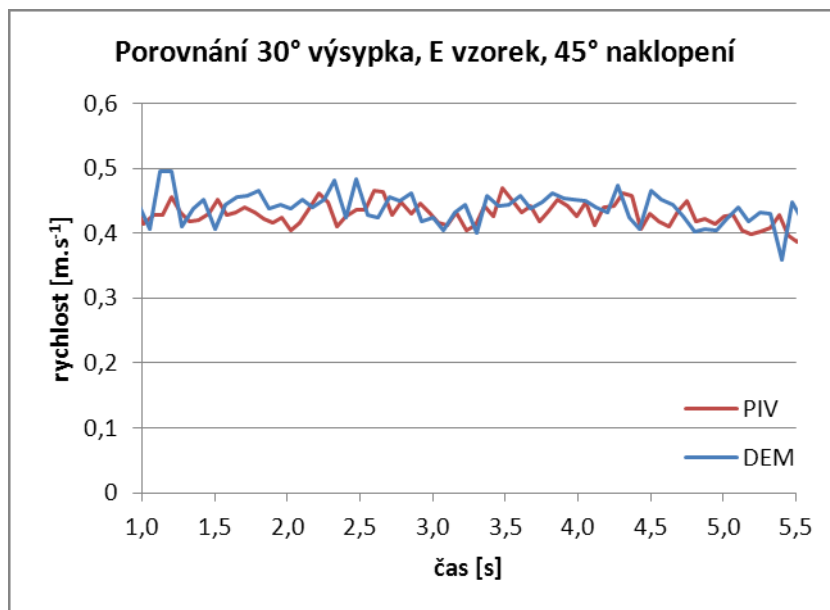
Při nedodržení tohoto postupu plnění, mělo negativní vliv na shodnost simulace s experimenty vzhledem k jinému seskupení částic uvnitř modelu. Z tabulky (tab. 9.2) lze vyčíst shodnost rychlosti pohybu materiálu ve výpustném otvoru při vyprazdňování experimentální i simulované.



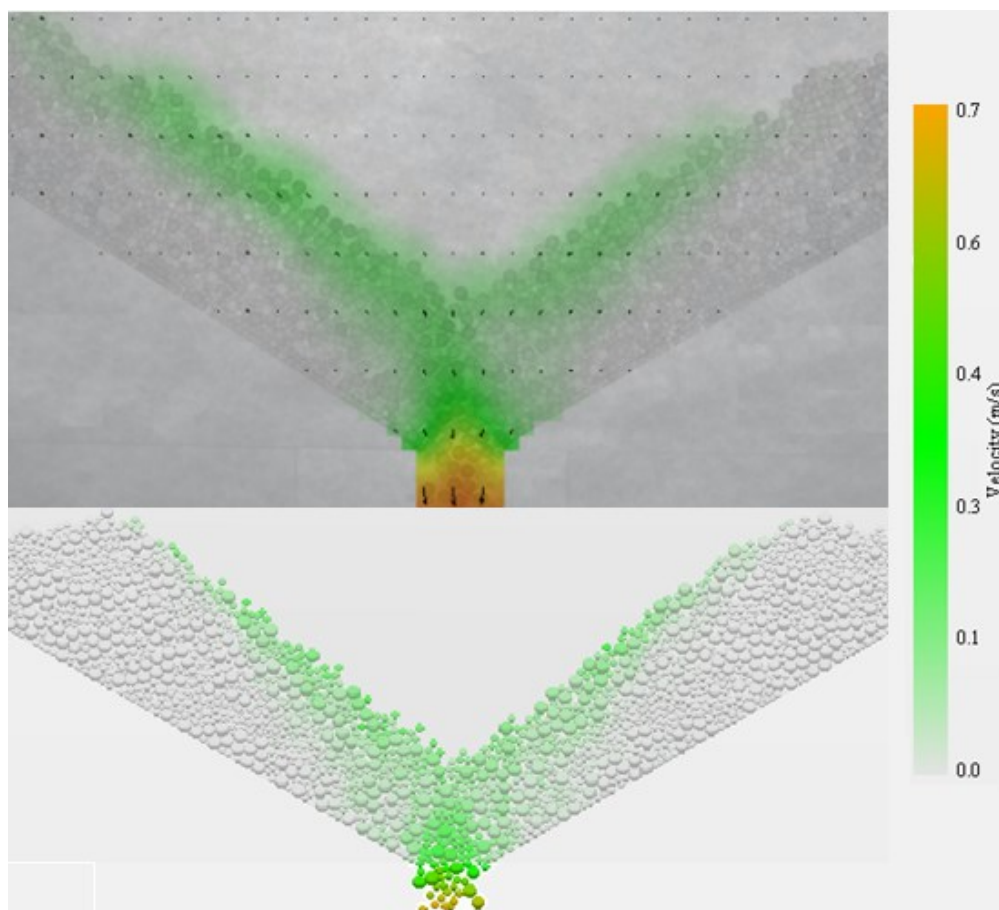
Obr. 9.24: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 5mm při naklonění modelu v ose x o 45°



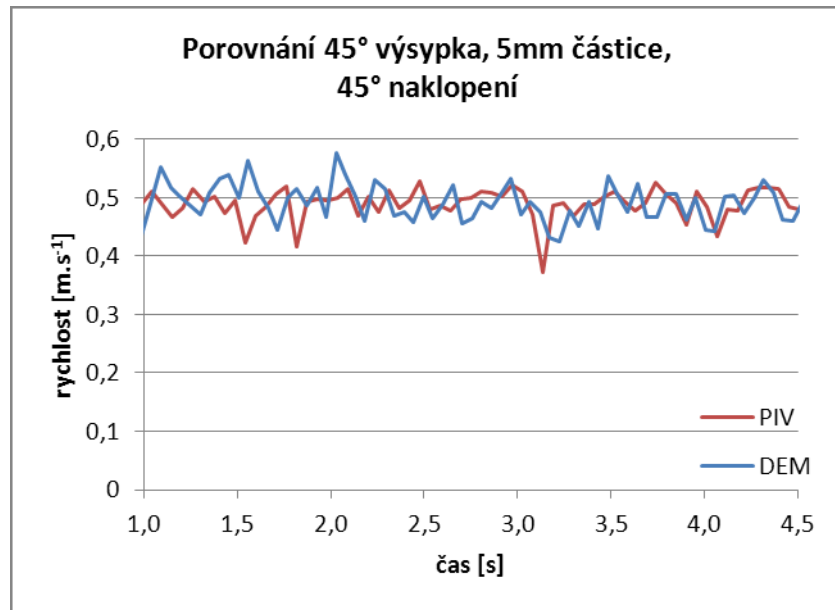
Obr. 9.25: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 30° výsypku a materiál o 5mm částicích ve stejném čase vyprazdňování s nakloněním v ose x o 45°



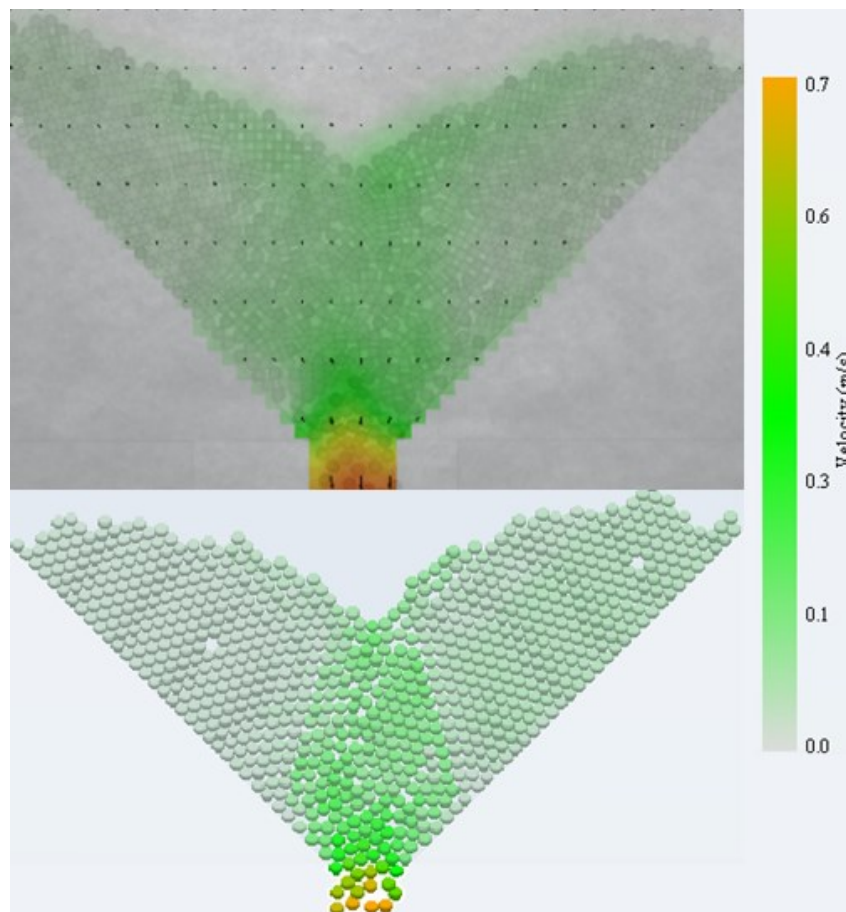
Obr. 9.26: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál typu E při naklonění modelu v ose x o 45°



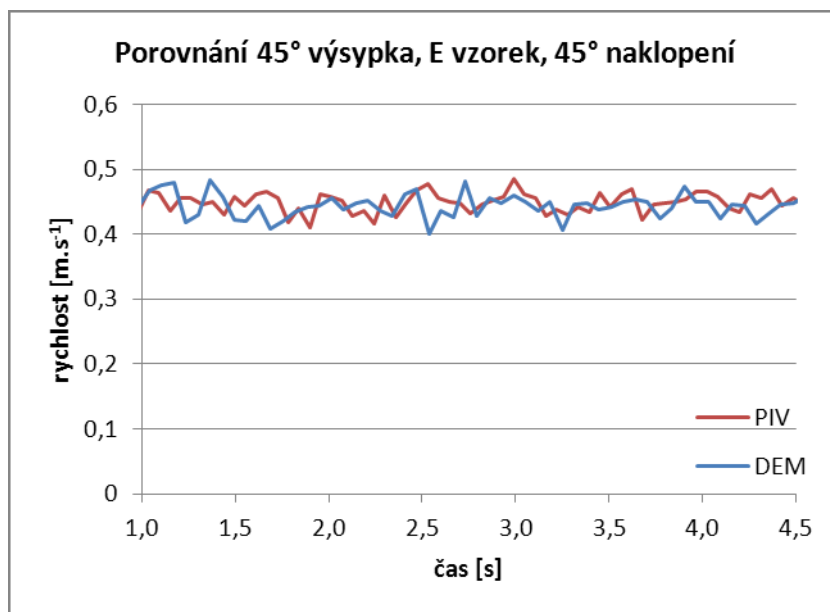
Obr. 9.27: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 30° výsyпка a namíchaný materiál typu E ve stejném čase vyprazdňování s nakloněním v ose x o 45°



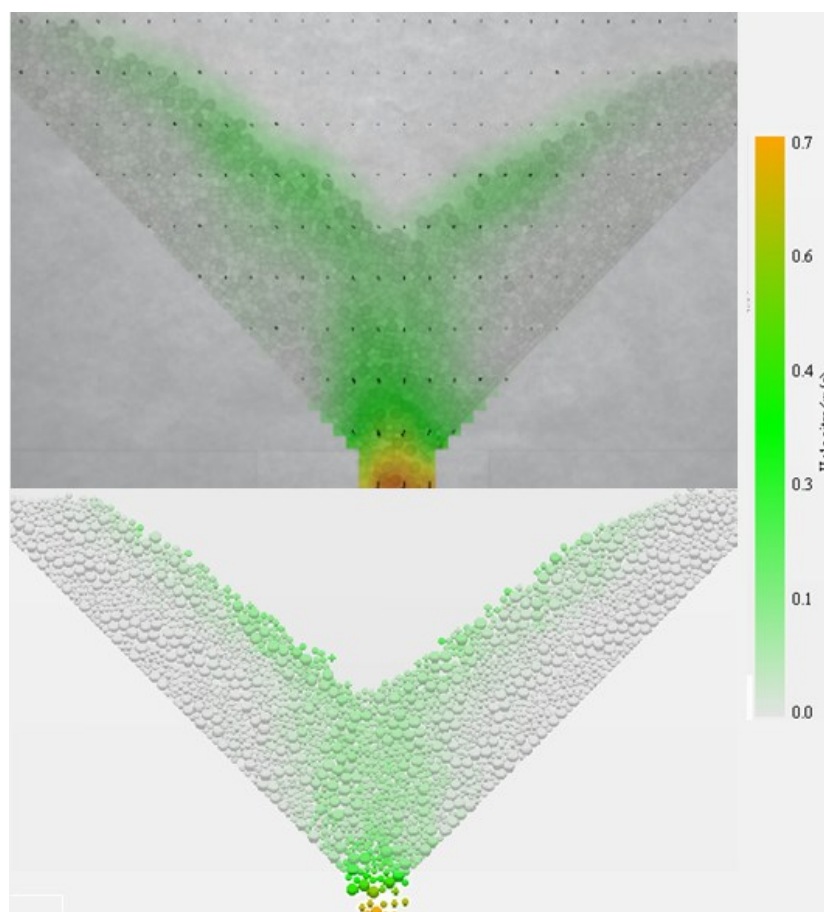
Obr. 9.28: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 5mm při naklonění modelu v ose x o 45°



Obr. 9.29: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 45° výsypku a materiál o 5mm částicích ve stejném čase vyprazdňování s nakloněním v ose x o 45°



Obr. 9.30: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál typu E při naklonění modelu v ose x o 45°



Obr. 9.31: Porovnání rychlostního vektorového pole metodou PIV a DEM pro 45° výsyпка a namíchaný materiál typu E ve stejném čase vyprazdňování s nakloněním v ose x o 45

9.3. Model nádoby s půlkruhovým průřezem

Model nádoby s půlkruhovým průřezem byl zhotoven z nerezového plechu a vyměnitelné výsyvky vyrobeny pomocí 3D tiskárny z plastu. Z tohoto důvodu musely být proměřeny vlastnosti sypkého materiálu v kontaktu s těmito materiály.

rychlosti pro různé tvary výsypek [m.s ⁻¹]					
vzorek	metoda	30°	60°	konvexní	konkávni
5mm	PIV	0,51	0,57	0,47	1,03
	DEM	0,51	0,60	0,49	1,03
E	PIV	0,56	0,59	0,52	1,05
	DEM	0,55	0,63	0,50	1,08

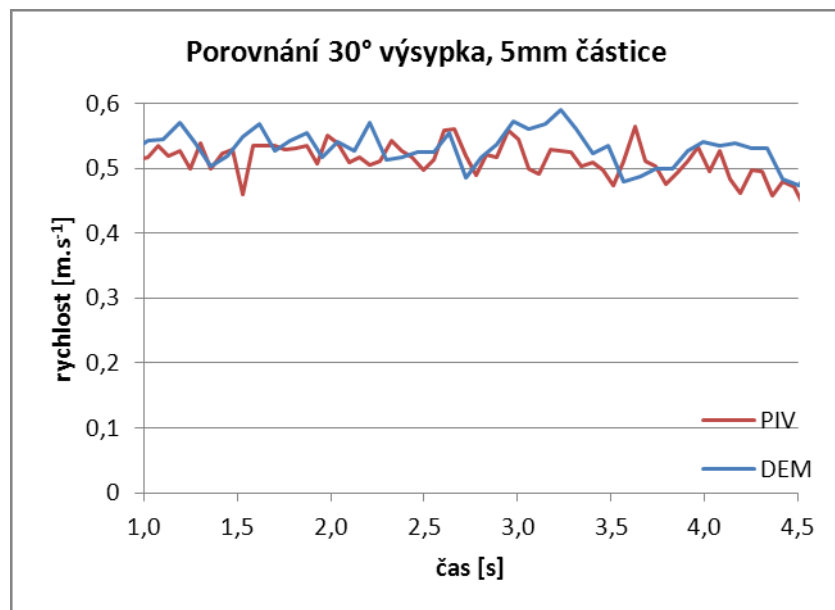
Tab. 9.3: Průměrné rychlosti ve výpustném otvoru

Experimentální měření bylo z důvodu vyměňování výsypek časově náročnější, neboť po každém posunutí nádoby bylo třeba kamerový systém PIV metody znovu kalibrovat.

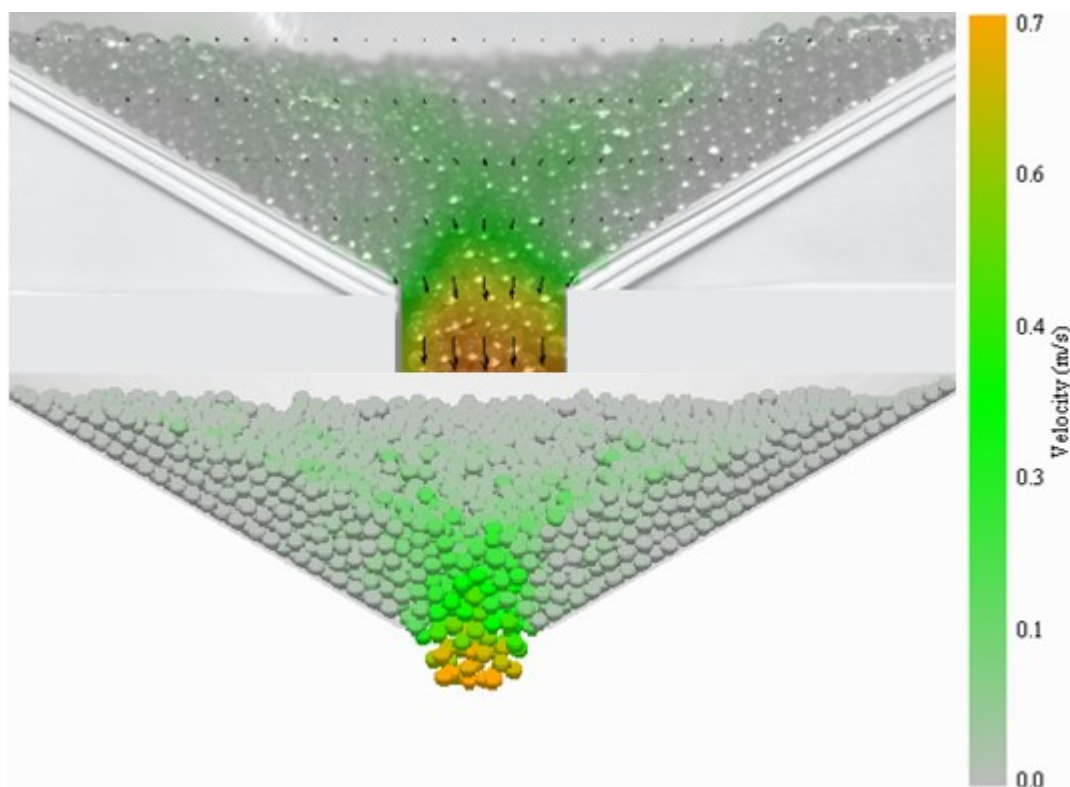
Změna použitých kontaktních materiálů si vyžádala nové měření hodnot dosazovaných do programu EDEM. Špatné zadáním materiálových vlastností sypkého materiálu i kontaktních materiálů má za následek, že vytvořené simulace neodpovídají experimentálním měřením.

Metoda PIV rozkryla odpověď na otázku při jakém tvaru výsyvky bude docházet k nejrychlejšímu toku sypkého materiálu při vyprazdňování. Z tabulky (tab. 9.3) je patrné, že nejrychlejší vyprazdňování probíhá u konkávního tvaru výsyvky a nejpomalejší u konvexního tvaru výsyvky. Homogenní materiál, který měl rychlosti vyprazdňování v předcházejících skupinách měření nejrychlejší, se v tomto případě vyprazdňoval s menší rychlostí ve výpustném otvoru než směs materiálu o dvou frakcích.

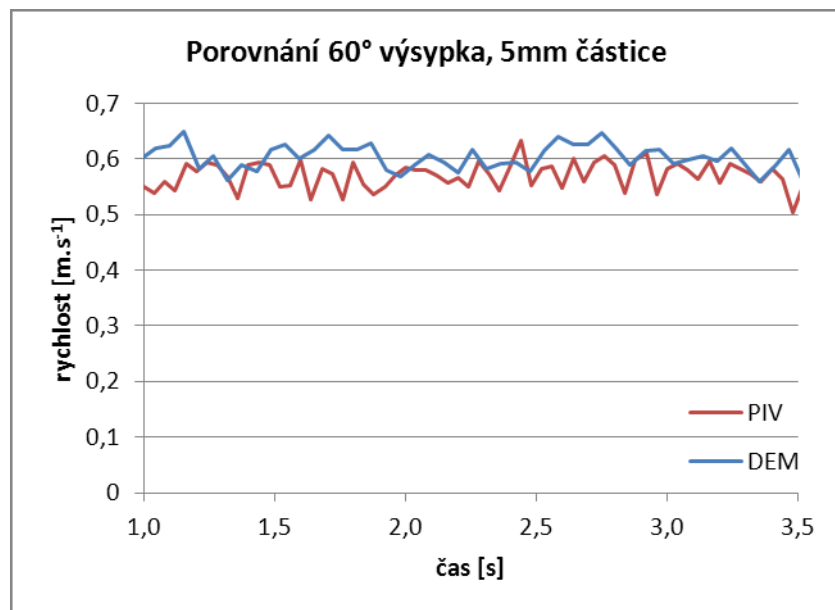
Vzhledem k těmto odlišným experimentálním výsledkům bylo otázkou zda měřené rychlosti budou odpovídat vytvořeným simulacím v programu EDEM. Po vložení proměřených hodnot kontaktních vlastností materiálů s nerezovým plechem a plastem, byly vytvořeny simulace. Tyto simulace byly vyhodnoceny a výsledné hodnoty rychlosti pohybu materiálu ve výpustném otvoru ve srovnání s experimentálním měřením potvrdili korektnost provedených simulací.



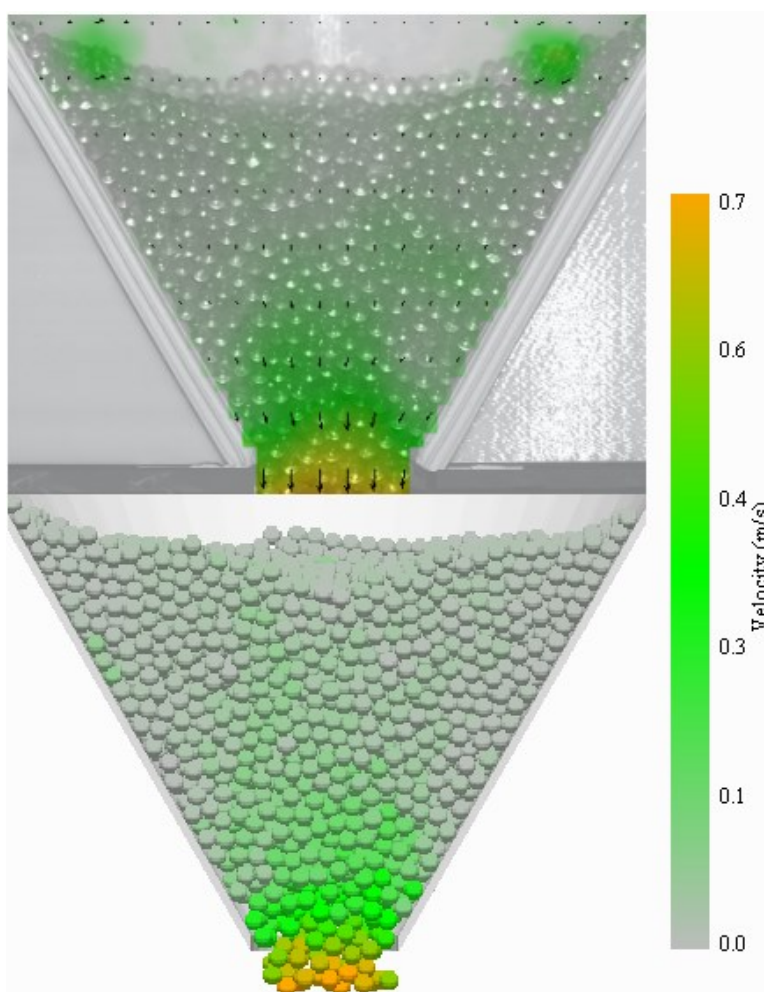
Obr.9.32: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 5mm při 30° výsypce



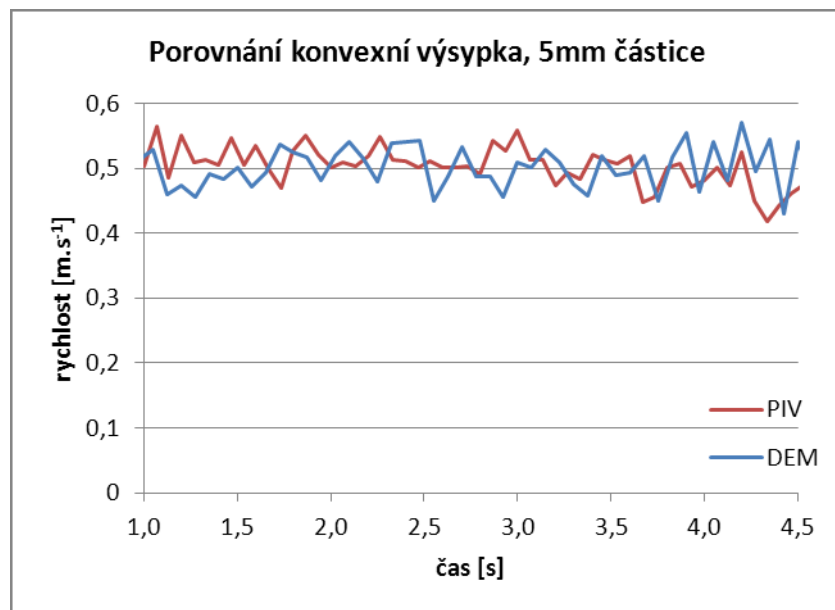
Obr. 9.33: Porovnání rychlostního vektorového pole metody PIV a DEM pro 30° výsypku a materiál o 5mm částicích



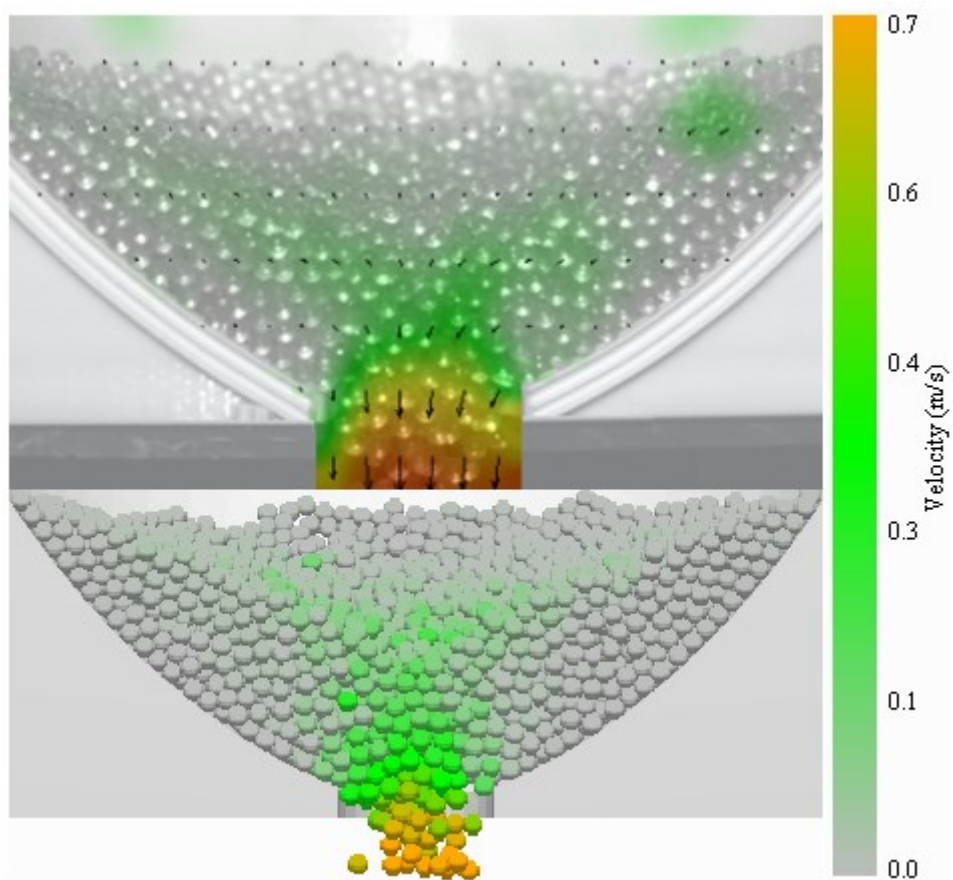
Obr. 9.34: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 5mm při 60° výsypce



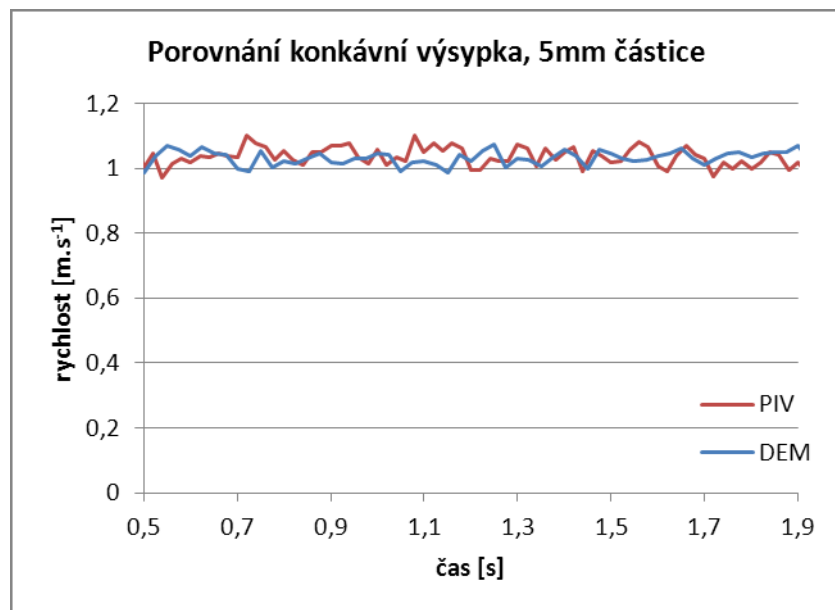
Obr. 9.35: Porovnání rychlostního vektorového pole metody PIV a DEM pro 60° výsypku a materiál o 5mm částicích



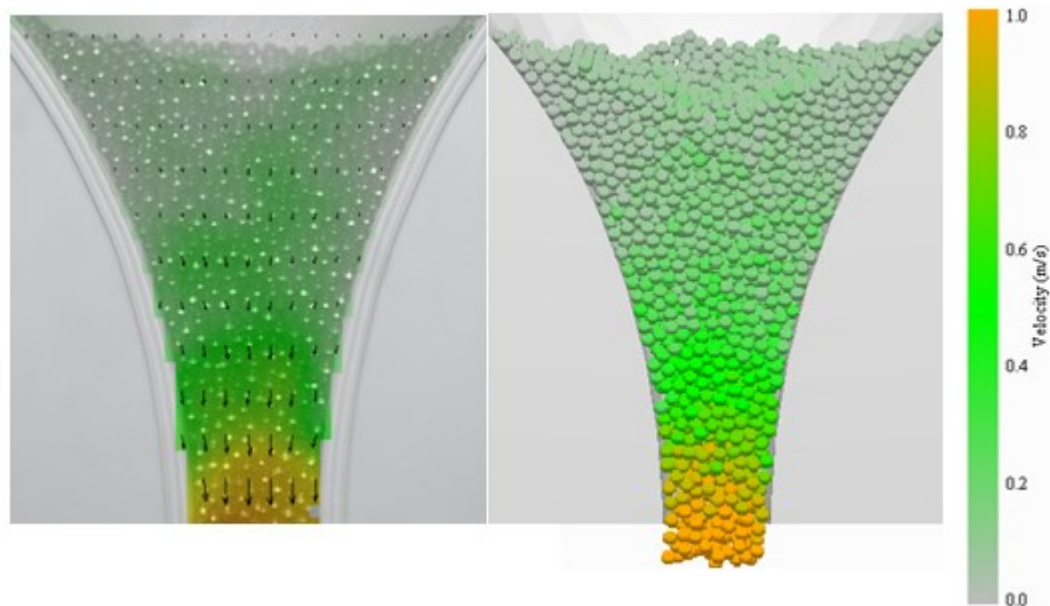
Obr. 9.36: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 5mm při konvexní výsypce



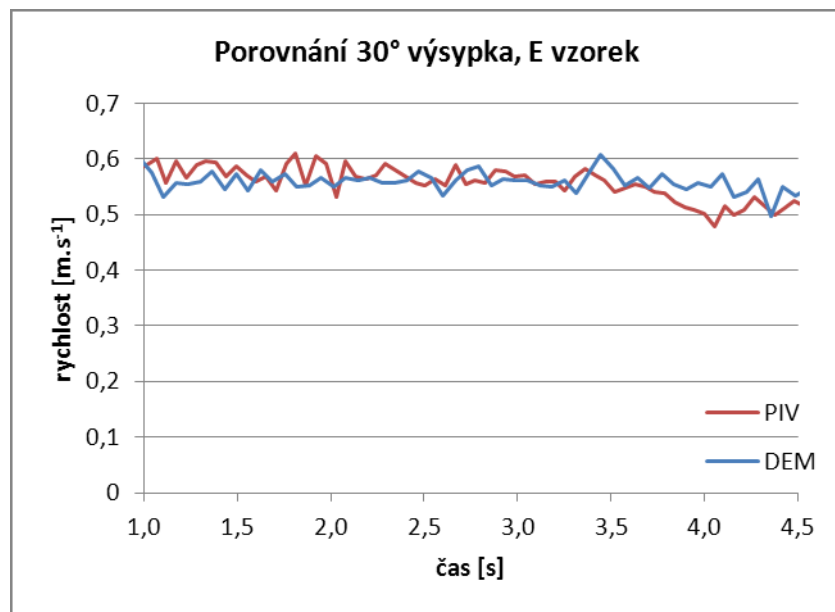
Obr. 9.37: Porovnání rychlostního vektorového pole metody PIV a DEM pro konvexní výsypku a materiál o 5mm částicích



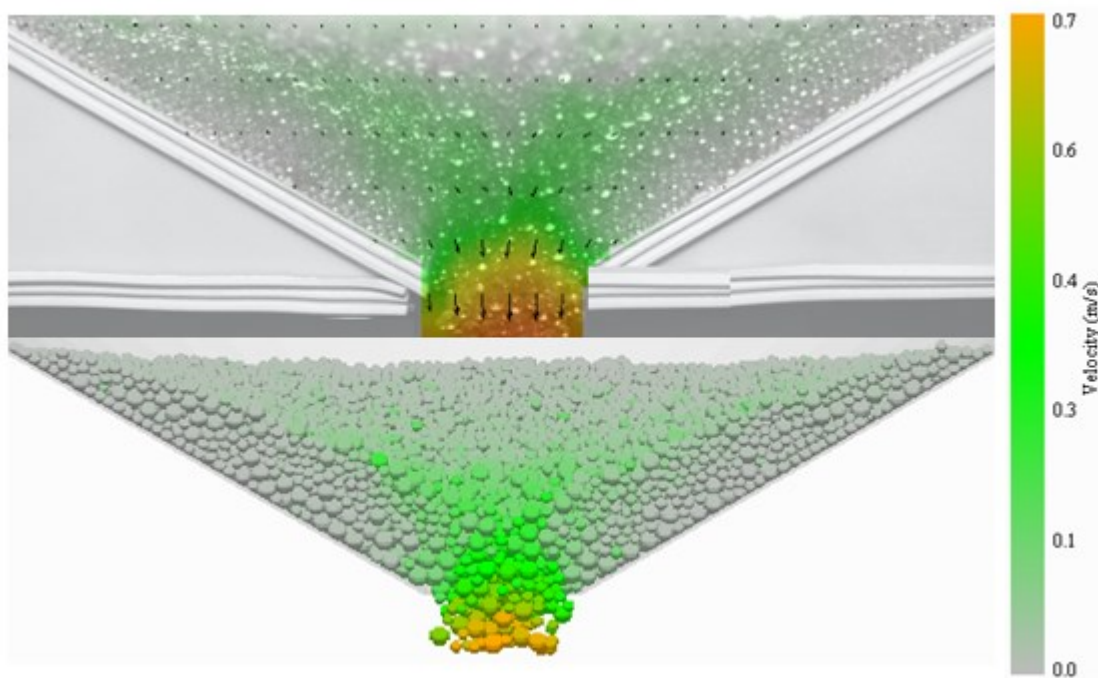
Obr. 9.38: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál 5mm při konkávní výsypce



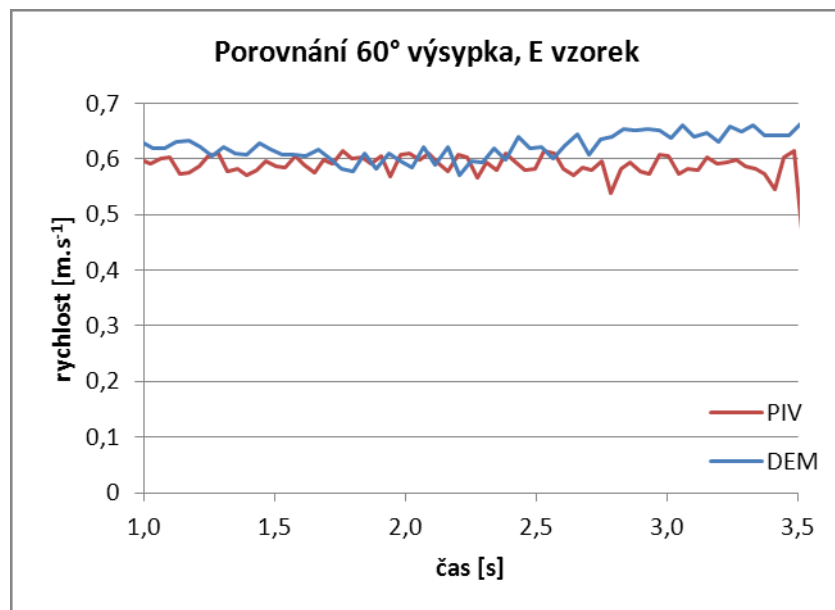
Obr. 9.39: Porovnání rychlostního vektorového pole metody PIV a DEM pro konkávní výsypku a materiál o 5mm částicích



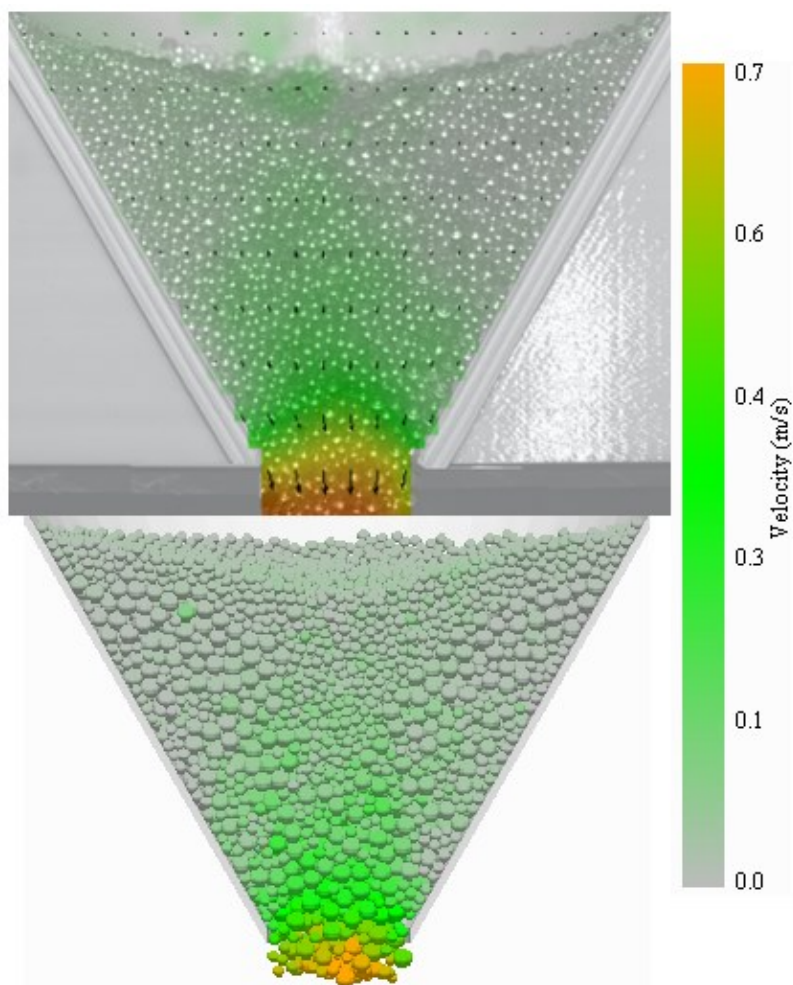
Obr. 9.40: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál typu E při 30° výsypce



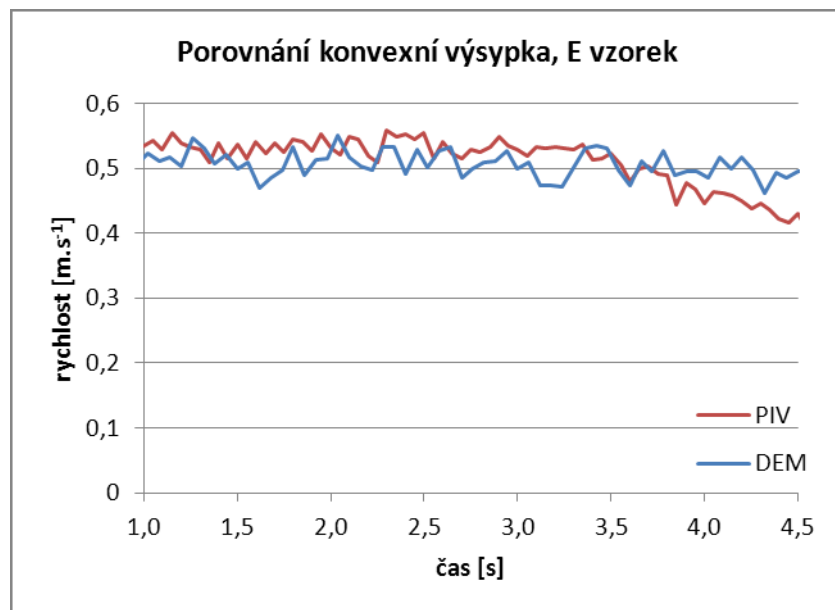
Obr. 9.41: Porovnání rychlostního vektorového pole metody PIV a DEM pro 30° výsypku a namíchaný materiál typu E



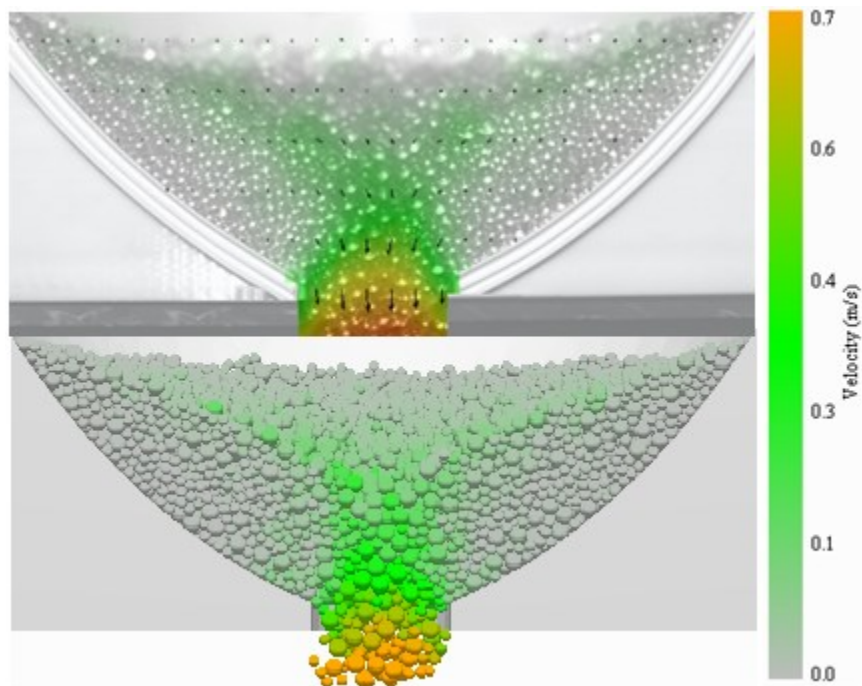
Obr. 9.42: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál typu E při 60° výsypce



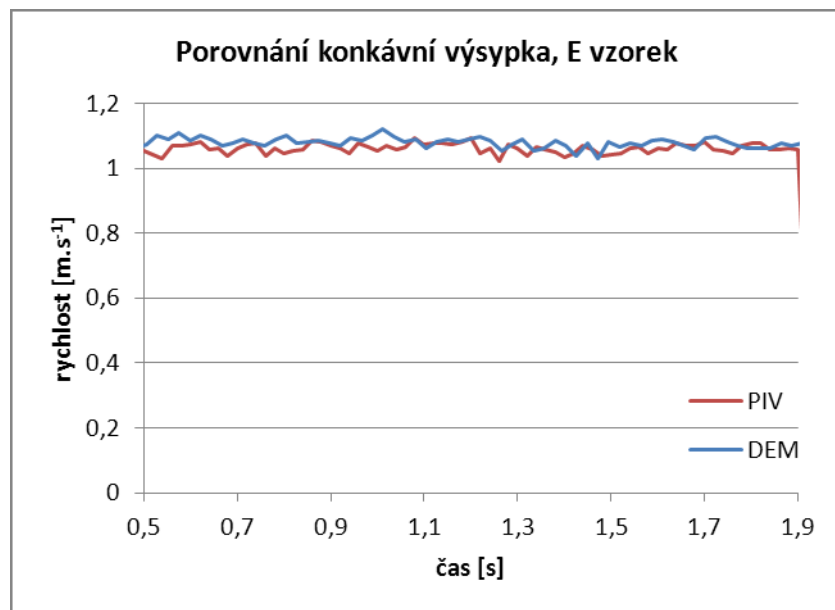
Obr. 9.43: Porovnání rychlostního vektorového pole metody PIV a DEM pro 60° výsypku a namíchaný materiál typu E



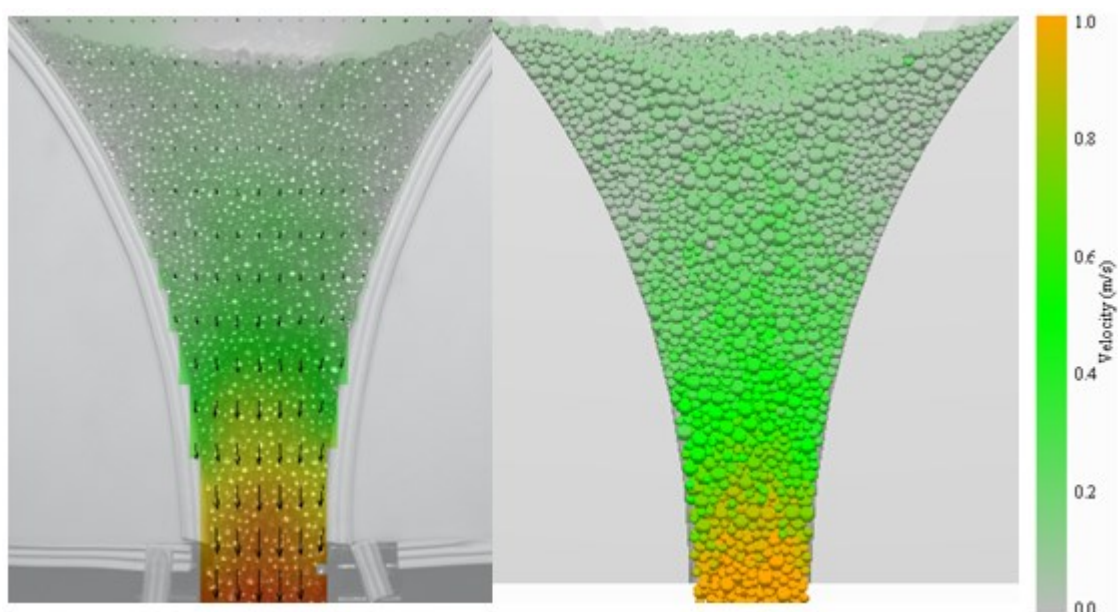
Obr. 9.44: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál typu E při konvexní výsypce



Obr. 9.45: Porovnání rychlostního vektorového pole metody PIV a DEM pro konvexní výsypku a namíchaný materiál typu E



Obr. 9.46: Graf porovnávající PIV a DEM metodu pro materiál typu E při konkávní výsypce



Obr. 9.47: Porovnání rychlostního vektorového pole metody PIV a DEM pro konkávní výsypku a namíchaný materiál typu E

10. Závěr

V současnosti nelze chování sypkého materiálu přesně předpovídat, proto jsou vyvíjeny simulační počítačové programy s cílem maximálního přiblížení se reálnému fyzikálnímu stavu respektující fyzikální realitu. V této práci byl testován simulační program využívající metodu diskretních prvků DEM.

V rámci disertační práce proběhly tři skupiny měření na navržených a sestavených modelech zásobníků. První a druhá skupina obsahovala měření na skleněném modelu s 30° a 45° výsypkou, přičemž druhá skupina využívala naklopení modelu v ose x pod úhlem 45° . Třetí skupina měření proběhla na modelu, kde hlavní část nádoby měla průřez půlkruhu. Do této nádoby byly umístovány různé tvary výsypek (30° , 60° , konvexní a konkávní). Při těchto měřeních byl metodou PIV snímán pohyb sypkého materiálu ve výpustném otvoru nádoby a vyhodnocován v podobě vektorů rychlosti. Výsledné grafy, uvedené v práci, poukazují na závislosti změny rychlosti ve výpustném otvoru v závislosti na tvaru výsypky. Jednotlivá měření byla zaznamenána, hodnoty vyhodnoceny jako průměrná rychlost z databáze osmdesáti naměřených hodnot a porovnány mezi sebou.

Při provedených experimentech nedocházelo k poruchám toku materiálu, pokud byla respektována velikost výpustného otvoru odpovídající šestinásobku průměru největší částice zkoumaného materiálu. Hodnota šestinásobku byla změřena experimentálně na jednotlivých modelech.

Experiment byl pomocí metody DEM validován virtuální simulací. Simulace využívala geometricky a poměrově podobné nádoby jako při experimentu. Z hlediska kontaktních vlastností materiálů byly virtuálnímu modelu přiřazeny materiálové vlastnosti odpovídající experimentálnímu modelu. Proces simulace vychází z několika posloupných kroků obsahující nadefinování vlastností materiálů, naplnění modelu sypkým materiálem a samotné vyprázdnění. Výstupem simulace byly hodnoty rychlosti z důvodu validace s metodou PIV. Vytvořené simulace umožňují zobrazení také kompresních sil, potencionální a kinetické energie.

Provedeným experimentům předcházelo měření mechanicko-fyzikálních vlastností zvolených materiálů a hledání odpovědí na otázku parametrů majících vliv na změny a jejich průběh při výzkumu směsí s různou koncentrací frakcí. Měřením bylo zjištěno, že mícháním homogenních materiálů se sníží úhel vnitřního tření vytvářeného

vzorku v rozmezí 3° . U namíchaných vzorků s rozdílem částic větší než 2 mm byla nejnižší hodnota úhlu vnitřního tření naměřena při poměru smíchání 50/50%. Při rozdílu velikosti částic 1 mm byla nejnižší hodnota úhlu vnitřního tření naměřena při převážném poměru menší frakce materiálu v poměru 75/25. Může se říci, že mícháním homogenních materiálů je možno snižovat úhel vnitřního tření. Tuto skutečnost také potvrzuje experiment provedený ve třetí skupině měření. Namíchaný materiál typu E nabýval vyšších rychlostí ve výpustném otvoru a měl kratší dobu vyprázdnění nádoby než homogenní materiál. Toto zjištění nám umožňuje regulovat úhel vnitřního tření sypkého materiálu, jehož částice mají kulovitý tvar. Je potřeba zdůraznit vliv tvaru částic a granulometrii částic v otázce matematického modelování.

Porovnáním výsledků experimentu s počítačovou simulací bylo dosaženo shody s tolerancí čtyř setin metrů za sekundu ve všech třech skupinách měření. Počítačová simulace dokládá výsledky naměřené experimentálně a obě metody se shodují na prokázaném faktu, že tvar výsypky má vliv na rychlost vyprazdňování nádoby. V první skupině měření bylo zjištěno, že možnost geometrického uspořádání částic materiálu v nádobě má vliv na mechanismy toku sypkého materiálu. Naměřené a nasimulované hodnoty to také dokládají. V druhé skupině měření byl model naklopen v ose x o 45° čímž došlo ke zpomalení rychlosti vypouštění o dvě desetiny metrů za sekundu všech měřených materiálů a vliv možnosti geometrického uspořádání v nádobě byl zachován. Ve třetí skupině měření byly porovnávány tvary výsypek umístěvaných do modelu nádoby s průřezem půlkruhu. Nejrychlejší vyprazdňování proběhlo při konkávním tvaru výsypky téměř o dvojnásobné hodnoty. Druhé nejrychlejší vyprazdňování probíhalo při použití výsypky s úhlem sklonu 60° . Téměř srovnatelné rychlosti byly naměřeny u výsypky s úhlem sklonu stěny 30° a konvexního tvaru.

Jakýkoli krok, ať už velký nebo malý umožňuje krok příští, proto na základě experimentu s konvexním a konkávním tvarem výsypek skladovacích nádob se otevírá prostor pro detailnější výzkum a především aplikace v průmyslu se znalostí výhod a nevýhod změn tvaru pro různé průmyslové aplikace.

Cíle disertační práce byly splněny tak, jak byly navrženy v tezích s popsáním dosažených výsledků.

11. Seznam použité literatury a internetových zdrojů

- [1] POLÁK, J., PAVLISKA, J., SLÍVA, A. *Dopravní a manipulační zařízení I.* Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2001, s. 104 ISBN 80-248-0043-8
- [2] POLÁK, J., SLÍVA, A. *Dopravní a manipulační zařízení III.* Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2005 s. 137 ISBN 80-248-0963-X
- [3] JASAŇ, V. *Teória a stavba dopravníkov.* TU Košice: Alfa Bratislava, 1984 s. 336.
- [4] KLIMECKÝ, O., VEVERKOVÁ, H., BAILOTTI, K., MÜLLER, J. *Manipulace s materiálem: doprava v lomech.* Ostrava: Vysoká škola báňská, 1988, s. 312.
- [5] Překlad publikace. *Standard Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell (SSTT), A Report of the EFCE Working Party on the Mechanics*, UK (1989), s. 49. ISBN 0-85295-232-5.
- [6] ZEGZULKA, J. *Mechanika sypaných hmot.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2004, s. 186. ISBN 80-248-0699-1
- [7] WESTERWEEL, J. *Theoretical analysis of the measurement precision in PIV* 2000
- [8] SCHULZE, D. Ring Shear Tester RST-01.pc. 1999-2011.
- [9] SCHULZE, D. RSV 95. 1999-2011.
- [10] SCHULZE, D. Flow properties testing with Ring Shear testers RST-01.01, RST-01.pc, and RST-XS. 1997-2011.
- [11] SCHULZE, D. RST.Inspector (ASCII). 2002-2011.
- [12] SCHULZE, D. RST.CONTROL 95. 2001-2011.
- [13] PATRMAN, F. *Doprava v hutích I.* Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1983, s. 362.
- [14] DOSPIVA, P. *Inovativní metody řešení poruch toku při vynášení ze zásobníku.* Disertační práce 2011, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011.
- [15] MALÁŠEK, J. *State of stress identification of transformed - deformed particular materials*, In Engineering Mechanics 2007, Institute of Thermomechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, v.v.i., Prague, pp.173-174. ISBN 978-80-87012-06-2.
- [16] KATTERFELD, A., DONOHUE, T. J., ILIC, D. *Application of the discrete element method in mechanical conveying of bulk materials*, In: 7th International

Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids (CHoPS), 7
(Friedrichshafen) 2012.09.10-13.

- [17] WENSRICH, C. M., KATTERFELD, A., SUGO, D. *Rolling friction and shape in discrete element modelling*, In: 7th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids (CHoPS). - Friedrichshafen, insges. 6 S., 2012 Kongress: CHoPS; 7 (Friedrichshafen) : 2012.09.10-13.
- [18] LUDING, S. Theory and simulation of granular materials with hard spheres. In CCAST-WL workshop series: volume 148: Granular Matter, 17-21 Feb. 2003, Beijing, P. R. China, pp. 1-14
- [19] ABOU-CHAKRA, H., TÜZÜN, U. *Coefficient of friction of binary granular mixtures in contact with a smooth wall: PART I: Direct shear box measurements of the effects of particle size ratio and particle surface roughness*. In Chemical Engineering Science, Volume 54, Issue 24, December 1999, Pages 5901-5912.
- [20] www.vsb.cz
- [21] www.fjfi.cvut.cz
- [22] www.dem-solutions.com
- [23] ottp.fme.vutbr.cz
- [24] tresen.vscht.cz
- [25] cs.wikipedia.org
- [26] www.upv.cz
- [27] www.scopus.com
- [28] www.dietmar-schulze.de
- [29] www.fi.muni.cz/~xpelane/IV109
- [30] www.epo.org
- [31] cfdem.dcs-computing.com

12. Seznam vlastních nebo spoluautorských prací

- 1 BRÁZDA, R., VYLETĚLEK, J.: *Influence of active and passive states of stress of a particulate matter in the particulate matter storage silo*. In Carpathian logistics congress CLC'2011.
- 2 VYLETĚLEK, J., ZEGZULKA, J.: *Aplikace modelování vlastností a pohybu partikulárních hmot v zásobnících*. Sborník přednášek XXXVII. Mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních stavebních a zemědělských strojů, Brno 2011, ISBN 978-80-214-4323-5
- 3 BRÁZDA, R., HORÁK, M., ZEGZULKA, J., VYLETĚLEK, J.: *Zařízení k polohování snímačů zatížení výsypek svislých skladovacích systémů*. Patent zapsán dne 17.9.2012, číslo přihlášky 2012-243, číslo dokumentu 303953
- 4 VYLETĚLEK, J., BRÁZDA, R.: *Simulace pohybu partikulární hmoty v zásobníku v aplikaci na konstrukci modelu zásobníku*. Sborník přednášek XXXVIII. Mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních stavebních a zemědělských strojů, Plzeň 2012, ISBN 978-80-261-0141-3
- 5 ZEGZULKA, J., VYLETĚLEK, J., ROZBROJ, J., NEČAS, J.: *Validační systém k simulacím průběhu procesů v silech, reaktorech a procesních nádobách*. Oznámení o vytvoření předmětu průmyslového vlastnictví dne 21.11.2012
- 6 ROZBROJ, J., ZEGZULKA, J., VYLETĚLEK, J.: *Užití DEM ke Zjištění vlastností na dopravním zařízení*. Sborník přednášek XXXIX. Mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů, Ostrava 2013, Ostrava VŠB-TUO, ISBN 978-80-248-3124-4
- 7 VYLETĚLEK, J., ZEGZULKA, J., ROZBROJ, J.: *Vliv tvaru nádoby a částic na chování partikulární hmoty ve skladovacích zařízeních s využitím programu EDEM*. Sborník přednášek XXXIX. Mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů, Ostrava 2013, Ostrava VŠB-TUO, ISBN 978-80-248-3124-4

13. Seznam příloh

Příloha 1 – Zprávy a grafy z měření mechanicko-fyzikálních vlastností

Příloha 2 – Naměřené hodnoty pomocí metody PIV a DEM

Tento výzkum byl proveden s pomocí Laboratoře sypkých hmot na VŠB - Technické univerzitě Ostrava, za pomoci projektů Studentské grantové soutěže s názvy Verifikační standardy metody DEM v oblasti procesů partikulárních hmot SP/2010182, Výzkum standardů sypkých hmot – hmota, vlastnosti, procesy SP2011/155, jednotkami projektu Energie pro CZ.1.05/2.1.00/03.0069-ENET Využití netradičních zdrojů energie a TAČR TA03011158 Inovativní řešení zařízení zatížených abrazivitou.

Děkuji prof. Ing. Jiřímu Zegzulkovi, CS.c za odborné vedení práce, poskytování rad a vytváření přínosných diskuzí. Panu Ing. Janu Nečasovi Ph.D. za věcné připomínky k dané problematice. Panu Ing. Robertovi Brázdovi Ph.D. za možnost spolupráce na projektu. Panu Ing. Jiřímu Rozbrojovi, Ing. Danovi Gelnarovi, Ing. Martinu Žídkovi, Ing. Davidovi Žurovcovi a Ing. Jakubovi Hlostovi za pomocnou ruku v průběhu celé práce. V neposlední řadě slečně Bc. Denise Košákové za morální podporu.