

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Technická fakulta

**Smykové vlastnosti partikulárních materiálů**  
diplomová práce

Vedoucí práce: Ph.D. Monika Hromasová  
Autor práce: Bc. Lucie Hájková

PRAHA 2019

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Lucie Hájková

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

**Smykové vlastnosti partikulárních materiálů**

Název anglicky

**The measurement of shear properties of particulate matter**

---

**Cíle práce**

Měření mechanických parametrů partikulárních látek.

**Metodika**

Literární rešerše bude věnována partikulárním látkám a jejich mechanickému chování se zaměřením na tokové vlastnosti. Důraz bude kladen na měření smykových vlastností partikulárních látek a vyhodnocení měření.

**Doporučený rozsah práce**

50 stran

**Klíčová slova**

Partikulární látky, úhel vnitřního tření, měření.

---

**Doporučené zdroje informací**

DOBRAŠCZYK, B J. – DENDY, D A V. *Cereals and cereal products : chemistry and technology*. Gaithersburg, Md.: Aspen Publishers, 2001. ISBN 0834217678.

MALOUN, J. *Technologická zařízení a hlavní procesy při výrobě krmiv*. Praha: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2001. ISBN 80-213-0783-8.

ZEGZULKA, Jiří. *Mechanika sypkých hmot* . Vyd. 1. VŠB – Technická univerzita, 2004. ISBN 978 – 802 – 4806 – 990.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2018/19 LS – TF

**Vedoucí práce**

Ing. Monika Hromasová, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra elektrotechniky a automatizace

---

Elektronicky schváleno dne 2. 2. 2018

**prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 9. 3. 2018

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 08. 03. 2019

---

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Smykové vlastnosti partikulárních materiálů vypracovala samostatně a použila jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomová práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědoma, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědoma že, na moji diplomová práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 31.3.2019

.....  
Podpis autora

**Poděkování:**

Tímto bych ráda poděkovala paní Ph.D. Monice Hromasové, Ph. D., za její rady, a odborné vedení při zpracování mé diplomové práce.

**Abstrakt:** Cílem diplomové práce bylo popsat a změřit vlastnosti partikulárních látek. V teoretické části jsou charakterizovány základní vlastnosti a principy tokového chování partikulárních látek. Je uveden popis přístrojů určených k měření smykových vlastností včetně principu měření na jednotlivých strojích. Praktická část práce obsahuje popis mobilního smykového stroje. Na tomto přístroji jsou prováděna měření vnějšího a vnitřního úhlu tření. Pro získání ucelené informace o chování partikulárních látek je změřena i vlhkost a sypaný úhel materiálu. K měření byl použit vzorek semen řepky olejně.

**Klíčová slova:** smykový stroj, partikulární látky, tokovost, řepka olejka

### **The measurement of shear properties of particulate matter**

**Summary:** The aim of the thesis was to describe and measure the properties of particulate matter. In the theoretical part are characterized the basic properties and principles of flow behavior of particulate matter. There is a description of the devices for measuring shear properties, including the principle of measurement on individual machines. The practical part of the thesis contains description of mobile shear machine. External and internal friction angle measurements are made on this unit. To obtain comprehensive information on the behavior of particulate matter, the humidity and angle of repose of the material are also measured. An oilseed rape seed sample was used for the measurement.

**Key words:** shear machine, particulates, flowability, oilseed rape

## Obsah

1. Úvod .....	1
2. Teoretická východiska .....	2
2.1. Partikulární látky.....	2
2.1.1. Definice partikulární látky.....	2
2.1.2. Velikost, tvar a složení pevných částic .....	3
2.1.3. Distribuce velikosti částic.....	6
2.1.4. Objemová a měrná hmotnost .....	9
2.1.5. Pórovitost.....	9
2.1.6. Vlhkost partikulární látky.....	10
2.1.7. Vazby mezi pevnými částicemi.....	11
2.2. Mechanika partikulárních látek.....	14
2.2.1. Napětí v partikulárních látkách .....	16
2.2.2. Tokové vlastnosti partikulárních látek.....	18
2.2.3. Stěnové (vnější) tření .....	20
2.2.4. Sypný úhel.....	21
2.3. Přístroje pro měření smykových vlastností.....	23
3. Cíl práce .....	30
4. Metodika práce .....	30
5. Praktická část práce .....	31
5.1. Materiál .....	31
5.2. Prováděná měření.....	31
5.2.1. Popis smykové přístroje.....	31
5.2.2. Průběh měření na smykovém stroji .....	36
5.2.3. Naměřené hodnoty .....	37
5.2.4. Měření vlhkosti .....	41
5.2.5. Měření sypného úhlu .....	43
5.3. Automatizace výpočtu .....	45
6. Diskuze.....	47
6.1. Vnější a vnitřní úhel tření .....	47
6.2. Porovnání naměřených hodnot sypného úhlu.....	48

7. Závěr .....	49
8. Seznam použitých zdrojů.....	50
9. Přílohy .....	1



# 1. Úvod

Studium chování partikulárních látek nachází uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti. K manipulaci s partikulárními materiály dochází ve stavebnictví a zemědělství, v potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Znalost vlastností partikulárních látek se uplatňuje nejen při jejich skladování (např. při výběru vhodného sila či zásobníku) ale i dopravě a manipulaci (např. návrh tvaru a velikosti násypek). V posledních letech se do popředí zájmu dostává povrchová úprava materiálů, z důvodu vylepšení jejich tokových vlastností.

Od 60. let minulého století probíhá intenzivní výzkum partikulárních látek, který vedl k zavedení mnoha nových technologií. Opustila se snaha definovat partikulární látky pomocí jedné veličiny a dochází k neustálému zdokonalování měřících zařízení zjišťující fyzikální vlastnosti partikulárních částic. Jedná se například o velikost, tvar, povrchovou strukturu nebo tvrdost částic. Mezi další důležité faktory, které ovlivňují chování partikulárních materiálů, patří vlhkost či stupeň provzdušnění. Při vývoji nových metod je potřeba zohlednit, že musí odrážet podmínky, kterým je materiál vystaven ve výrobních procesech.

Kvůli komplexnosti partikulárních látek není možné předpovídat jejich chování bez dostatku vypovídajících dat. K tomuto účelu slouží smykové zkoušky. Pomocí smykové zkoušky lze zjistit vliv normálového napětí na tekutost partikulárních látek. Takto získaná data slouží při navrhování zásobníků, dopravníků a výsypek.

První část práce je zaměřena na charakterizaci základních vlastností partikulárních látek. Popsány jsou síly, které působí mezi pevnými částicemi a odezva partikulárních látek na napětí a jejich tokové vlastnosti. Dále jsou v teoretické části popsány přístroje pro smykové zkoušky a princip měření na jednotlivých přístrojích. Tři základní typy jsou Jenikeho smykový stroj, rotační smykový stroj a smykový stroj Freeman.

Druhá, praktická část práce popisuje přesný postup měření vlastností partikulárních látek na mobilním smykovém stroji, který je chráněn užitečným vzorem CHOTĚBORSKÝ, R. – LINDA, M. – NÝČ, M. *Mobilní zařízení pro smykovou zkoušku zeminy*. Zpracování naměřených dat je zautomatizováno pomocí skriptu napsaném v programu Scilab. Je popsáno měření sypného úhlu a vlhkosti. Pro měření byl použit vzorek řepky olejně.

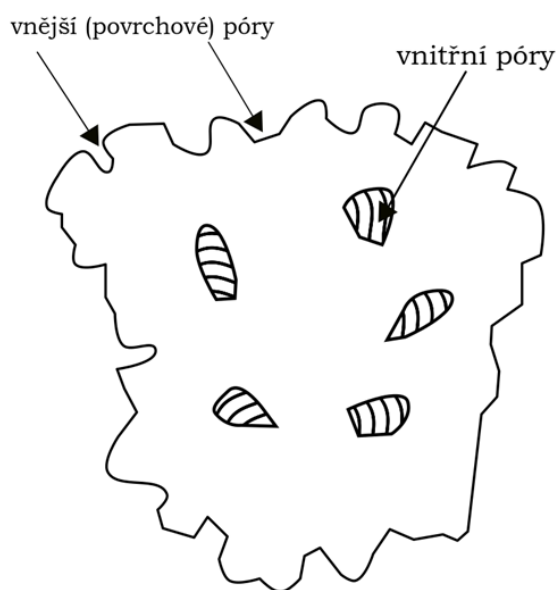
## 2. Teoretická východiska

### 2.1. Partikulární látky

#### 2.1.1. Definice partikulární látky

Partikulární látky jsou složeny ze vzájemně se dotýkajících pevných částic (pevné fáze) a z kapalné a/ nebo plynné fáze. Částicí rozumíme individuální prvek skládající se z velkého množství hmotných objektů. Kapalná nebo plynná fáze vyplňuje póry skeletu, tvořeného pevnými částicemi. Řez partikulární částicí je zobrazen na obr. 1. (1; 2)

*Obrázek 1 Řez partikulární částicí (1)*

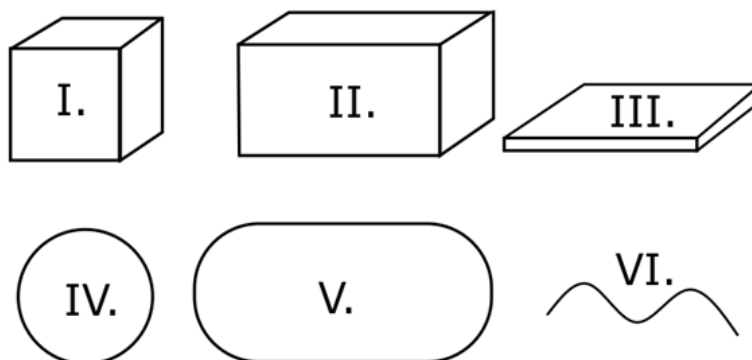


Pevné částice v partikulární látce jsou v neustálém kontaktu, jehož důsledkem je omezení jejich pohybové autonomie, tj. omezení volnosti pohybu jednotlivých pevných částic. Pevnost a tuhost partikulární látky je tedy podmíněna počtem a pevností kontaktních vazeb. Pod pojem pohybové autonomie spadá i strukturní účinek pootáčení pevných částic. Ten roste v míře, s jakou se tvar pevných částic odchyluje od ideálně kulového, pro který je otáčení bezvýznamné. (3; 1)

### 2.1.2. Velikost, tvar a složení pevných částic

Pevné částice partikulárních látek se vyskytují v rozsáhlém rozmezí, a to od rozměrů submikroskopických až po makroskopické. Jako makroskopické se označují částice pozorovatelné pouhým okem, jedná se o částice s poloměrem větším než 0,1 m. Z hlediska mechanických pochodů jsou tyto částice nejčastější. Mezi mikroskopické částice se řadí například jemné prachové částice a k jejich pozorování je již potřeba mikroskop. Submikroskopické částice dosahují přibližně velikosti 1 nm. Jsou to rozměry, při kterých lze studovat krystalová mřížka. Mikroskopické nebo makroskopické částice pevné látky, jejichž poměr největší ku nejmenší nepřesahuje 10, bývají označovány jako zrna. Partikulární látky tvořené těmito částicemi se označují jako zrnitý materiál. Dalším často užívaným termínem jsou sypké hmoty (materiály). Velikost částic značně ovlivňuje mechanické chování partikulární látky.

*Obrázek 2 Tvary pevných částic (2)*



Pevné částice partikulárních látek se vyskytují v mnoha tvarech a velikostech. Tvar částice může být pravidelný či nepravidelný, a to například ve formě kuličky, šupinky, destičky, vlákna atd. Dva vzorky partikulární látky identického složení, lišící se pouze velikostí částic, budou vykazovat jinou mechanickou odezvu. Obecně lze částici přiřadit dle tvaru do jedné ze šesti skupin označené římskými číslicemi (viz obr. 2). Popis jednotlivých skupin je uveden v tab. 1. (3; 1; 2)

Tabulka 1 Tvar částic (2)

Skupina	
I.	Částice s ostrými hranami, přibližně stejných rozměrů do všech tří směrů souřadnicového systému (kvádr).
II.	Částice s ostrými hranami. Jeden rozměr je významně větší (hranol).
III.	Částice s ostrými hranami. Jeden rozměr je významně menší (destičky).
IV.	Částice se zaoblenými hranami přibližně stejných rozměrů (koule).
V.	Částice s oblými hranami. Jeden rozměr je větší než oba zbývající (válce, tyče).
VI.	Částice se zaoblenými hranami. Jeden rozměr je významně menší (vlákno, nitka).

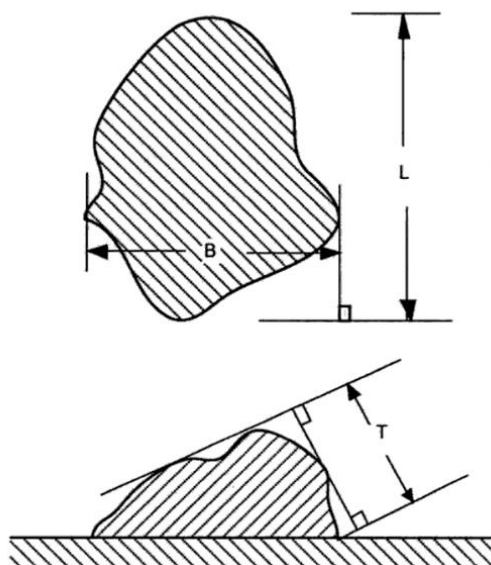
Pro popis tvaru pevné částice se používá její uložení na rovinu nejvyšší stability. Působí-li na částici pouze gravitační síla, pak při dopadu na vodorovnou rovinu zaujme polohu, kdy nejmenší rozměr částice je kolmý na rovinu nejvyšší stability (viz obr. 3). (3; 1; 2)

Z této výchozí polohy vycházejí tři vzájemně kolmé rozměry. Nejmenší rozměr, tloušťka  $T$ , vzdálenost roviny rovnoběžné s rovinou nejvyšší stability a dotýkající se částice. Nejdelší rozměr, délka  $L$ , vzdálenost dvou rovin, dotýkajících se částice a kolmých k rovinám, definujícím šířku. A šířka  $B$ , minimální vzdálenost dvou rovnoběžných rovin, dotýkajících se částice a kolmých k rovině největší stability. Z těchto tří rozměrů lze odvodit dva tvarové faktory: podlouhlost  $m_1$  a plochost  $m_t$ , dle vztahů (2.1) a (2.2). (1; 4; 5; 6; 2)

$$m_1 = \frac{L}{B} \quad (2.1)$$

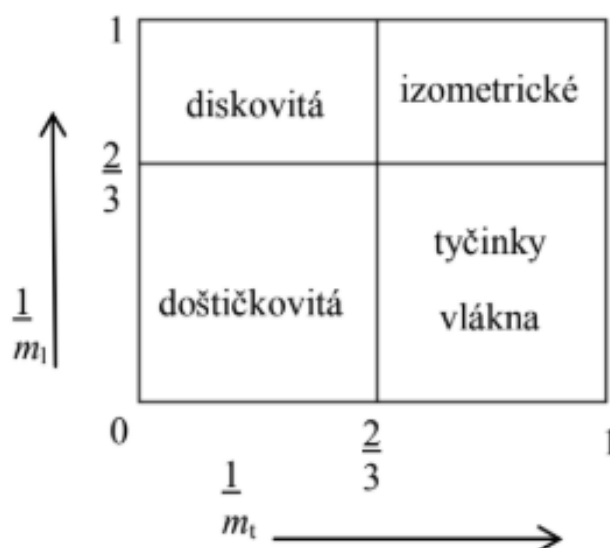
$$m_t = \frac{B}{T} \quad (2.2)$$

Obrázek 3 Definice velikosti částice třemi vzájemně kolnými rozměry (4)



Tyto dva tvarové parametry poskytují základní informaci o částici. Vztah mezi podlouhlostí a plochostí udává obr.4. Pro vyjádření velikosti částice je vhodné použít jeden rozměr, a to průměr koule, která má se skutečnou částicí některou vlastnost společnou. Odchytky od skutečného tvaru vystihují tvarové součinitele. Velikost částice je vhodné vyjádřit pomocí jednotného rozměru. Skutečná částice je nahrazena kulatou částicí, která má se skutečnou částicí společnou některou vlastnost. Odchytky od skutečného tvaru se vyjadřují tvarovými součiniteli. (1; 4; 5; 6; 2)

Obrázek 4 Tvar částice podle její podlouhlosti a plochosti (1)



Do tvarových součinitelů se řadí objemový součinitel  $\alpha_v$  (2.3), povrchový součinitel  $\alpha_s$  (2.4) a sféricitu  $\alpha_k$  (2.5).

$$\alpha_v = \frac{\alpha_e}{m_t \sqrt{m_l}} \quad (2.3)$$

$$\alpha_s = 1,57 + A \left( \frac{\alpha_e}{m_l} \right)^{4/3} \left( \frac{m_l + 1}{m_t} \right) \quad (2.4)$$

$$\alpha_k = \left( \frac{d_v}{d_s} \right)^2 \quad (2.5)$$

Kde:

$\alpha_e$  je redukovaný objemový součinitel(–),

A je součinitel geometrického tvaru částic ( $m^2$ ),

$d_v$  je průměr koule o stejném objemu jako částice ( $m$ ),

$d_s$  je průměr koule o stejném povrchu jako částice ( $m$ ).

Složení partikulárních látek je velmi variabilní. Pevné částice mohou být organické, anorganické, kovové nebo nekovové. Složení, společně s velikostí působícího napětí, teplotou, tvarem a vazebnými silami partikulárních látek značně ovlivňuje jejich chování.

### 2.1.3. Distribuce velikosti částic

Partikulární látka je obvykle tvořena částicemi širokého rozsahu velikostí. Takový systém, složený z částic různých velikostí označujeme jako polydisperzní. V případě, že mají všechny částice stejnou velikost hovoříme o systému monodisperzním. Velikost částice lze definovat pomocí hmotnosti, objemu, plochy nebo délkovým rozměrem. Pro polydisperzní systémy je možné velikost částic charakterizovat střední hodnotou nebo rozdělením částic do velikostních skupin (frakcí). (2; 7; 8)

Distribuce velikosti částic lze popsat pomocí tabulky, grafického zpracování nebo matematickým vyjádřením. Při tabulkovém zpracování se nejčastěji používají hodnoty  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{75}$ ,  $d_{90}$  a  $d_{99}$  Ty reprezentují velikost síta, které by bylo potřebné, aby přes něj přepadlo 10, 50, 75, 90 a 99 procent hmotnosti materiálu. (2; 7; 8)

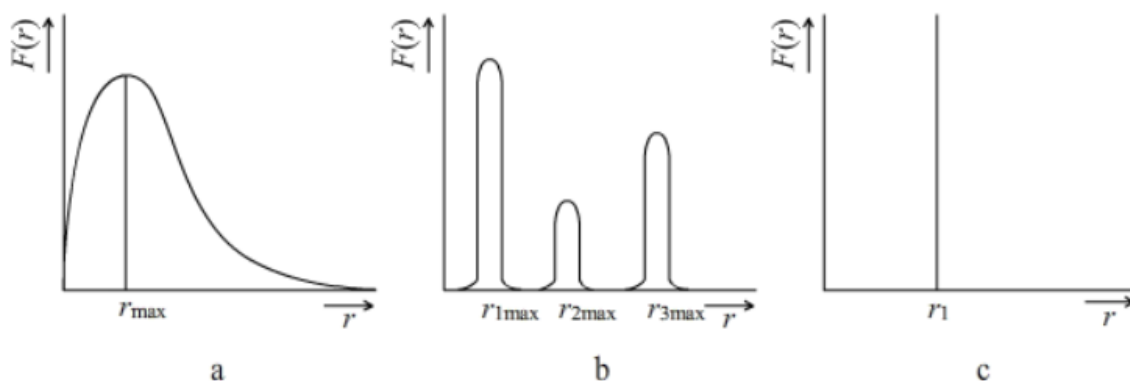
Pro grafické vyjádření distribuce částic se používají diferenciální a integrální grafy. Ty spolu úzce souvisejí, diferenciací integrální distribuce vznikne diferenciální křivka a integrací diferenciální křivky vznikne distribuce integrální. (2; 7; 8)

Diferenciální distribuční křivka (hustota rozdělení) zobrazuje četnost částic v závislosti na jejich hmotnosti. Mimo hmotnosti lze znázornit i jiné parametry, například velikost, objem, povrch nebo počet částic. Distribuční křivka je grafickým vyjádřením diferenciální rozdělovací funkce  $F(r)$  (viz vzorec 4.6), kterou lze definovat jako funkci udávající podíl částic s poloměrem větším nebo rovným  $r + d$ . (2; 7; 8)

$$\int_0^{\infty} F(r) dr = 1 \quad (2.6)$$

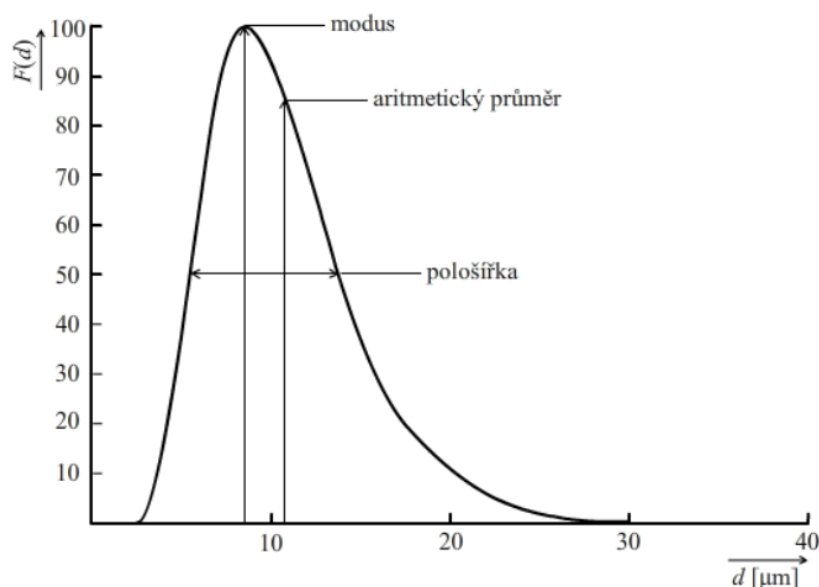
Distribuční křivka může mít různé průběhy. Polydisperzní systém tvořen velkým množstvím frakcí je zobrazen na graf a obr. 5. Pro polydisperzní systém tvořený několika separátními frakcemi bude distribuční křivka tvořena několika maximy odpovídajícími počtu frakcí daného systému (viz graf b obr. 5). Distribuční křivka monodisperzního systému má tvar kolmé přímky udávající jedinou zastoupenou velikost částic v partikulární látce (viz graf c obr. 5).

Obrázek 5 Charakteristické distribuční křivky (8)



V určitých případech se může distribuční křivka podobat Gaussově křivce pravděpodobnostního rozdělení (viz obr. 6). Obrázek 6 znázorňuje modus a aritmetický průměr velikosti částic. Modus představuje nejvíce zastoupenou velikost částic. Aritmetický průměr udává průměrnou velikost částic ve vzorku. V případě symetrického a unimodálního průběhu distribuční křivky je hodnota modu a aritmetického průměru stejná. Pološířka určuje šířku distribuce a je dána délkou úsečky vymezené distribuční křivkou z obou stran v polovině její výšky. (2; 7; 8)

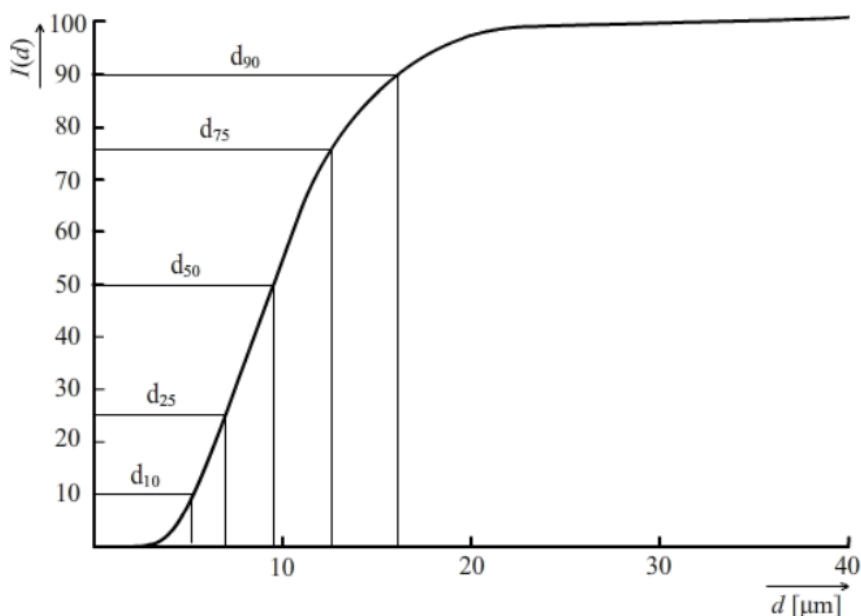
Obrázek 6 Diferenciální rozdělovací křivka



Integrální (kumulativní) distribuční funkce zobrazuje rozložení částic v partikulární látce a lze ji definovat jako podíl frakcí, jejichž částice jsou stejného nebo většího poloměru než zvolená hodnota  $r$ . Takto definovaná distribuční funkce se nazývá doplňková integrální rozdělovací funkce  $Q(r)$  (viz vzorec 4.6). Obrázek 7 zobrazuje identický polydisperzní systém jako je vykreslen pomocí diferenciální rozdělovací funkce na Obrázek 6. (2; 7; 8).

$$Q(r) = \int_{r_1}^0 F(r) dr \quad (2.7)$$

Obrázek 7 Integrální distribuční křivka





#### 2.1.4. Objemová a měrná hmotnost

Jelikož jsou partikulární látky vždy tvořeny více fázemi, nelze k jejich popisu použít hustotu. Pojem hustota je vždy vázána na fyzikálně homogenní látku. Z tohoto důvodu se zavádí pojem objemová hmotnost. Objemovou hmotnost (viz vzorec 4.8) lze definovat jako poměr hmotnosti tělesa ku objemu tělesa včetně jeho pórů, mezer a dutin. Tyto póry mohou být vyplněny plynem nebo kapalinou. Při určování objemové hmotnosti je důležité neopomenout vlhkost materiálu. U materiálů s malou pórovitostí se hodnoty hustoty a objemové hmotnosti rovnají. Materiály s velkou pórovitostí mají objemovou hmotnost v suchém stavu vždy menší, než je hustota. Měrná hmotnost je definována vztahem 4.9. (9; 10; 1)

$$\gamma_d = \frac{Q_s}{V_d} \quad (2.8)$$

$$\gamma_s = \frac{Q_s}{V_s} \quad (2.9)$$

Kde:

$\gamma_d$  je objemová hmotnost ( $\text{g. cm}^{-3}$ ),

$\gamma_s$  je měrná hmotnost ( $\text{g. cm}^{-3}$ ),

$Q_s$  je hmotnost látky (g),

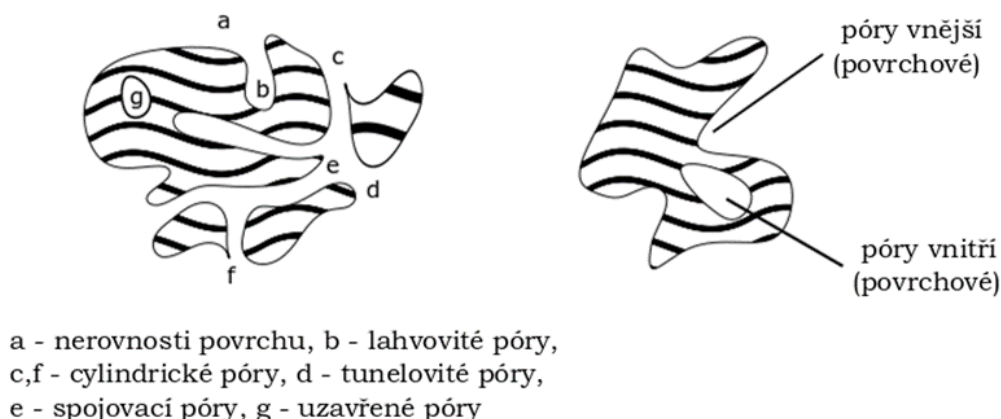
$V_d$  je objem látky ( $\text{g. cm}^{-3}$ ),

$V_s$  je objem pevných částic ( $\text{g. cm}^{-3}$ ).

#### 2.1.5. Pórovitost

Pórovitost je definována jako poměr celkového objemu póru k celkovému objemu, který zaujímá vzorek partikulární látky. U partikulárních látek rozlišujeme několik typů pórů. Pokud jsou póry uzavřené a nesouvisí s povrchem částice označujeme je jako póry uzavřené (vnitřní). Póry spojené s povrchem označujeme jako póry otevřené (vnější). Otevřené póry zvětšují povrch částice, uzavřené póry ovlivňují některé fyzikální vlastnosti jako je vodivost, pevnost částic, hustota apod. Rozdíl mezi vnějšími a vnitřními póry je znázorněn na obr.8. Vnější póry se tvoří i v případě, kdy částice partikulární látky nedisponují samy o sobě vnějšími póry (např. náhodně uspořádané kuličky). V tomto případě jsou jako póry označovány mezery mezi jednotlivými částicemi. (1; 2)

Obrázek 8 Rozdělení póru dle tvaru a velikosti (2)



Pórovitost má podstatný vliv na chování partikulárních látek. Nejlépe je tento vliv patrný na intenzitě zhutnění. Při rostoucí intenzitě zhutnění dochází nejprve k uzavírání velkých pórů ( $> 4 \mu\text{m}$ ) a následně k uzavírání hrubých pórů (4 až  $0,14 \mu\text{m}$ ), o nichž se předpokládá, že existují mezi shluky částic. Objem jemných a velmi jemných pórů se tlakem mírně zvětšuje. Rozdíl ( $V_s - V_d$ ) stanovuje objem pórů a lze ho vyjádřit pomocí pórovitosti (2.10) nebo pomocí čísla pórovitosti  $e$  (2.11). (1; 2)

$$n = \frac{V_d - V_s}{V_d} 100 = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} 100 \quad (2.10)$$

$$e = \frac{V_d - V_s}{V_d} = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \quad (2.11)$$

### 2.1.6. Vlhkost partikulární látky

Pokud není partikulární látka zcela suchá, jsou její póry částečně nebo úplně zaplněny kapalnou fází. Je-li veškerý volný objem naplněn kapalinou (nejčastěji vodou), jedná se o látku zcela nasycenou. Vlhkost partikulární látky  $w$ , lze definovat vztahem (2.12).

$$w = \frac{Q_v}{Q_s} \cdot 100 \quad (2.12)$$

Kde:

$Q_v$  je hmotnost kapaliny obsažené ve vzorku ( $g$ ),

$Q_s$  je hmotnost vzorku ( $g$ ).

Vlhkost značně ovlivňuje vlastnosti materiálu. Dochází ke změně kluzného tření, kdy suché kluzné tření přechází na kluzné tření s hydrostatickým mazáním. (1; 2)

### 2.1.7. Vazby mezi pevnými částicemi

Mezi jednotlivými částicemi partikulární látky působí silové vazby. Těchto vazeb existuje velké množství a jejich velikost se odvíjí od velikosti částic. Jeden z možných způsobů rozdělení silových vazeb je na síly malého a velkého dosahu. Tyto síly mohou být jak přitažlivého, tak odpudivého charakteru. U sil velkého dosahu je oblast působení v řádu desítek nanometrů. Oblast působení sil malého dosahu se pohybuje v řádu desetin nanometru. (1; 3)

Typickými silami malého dosahu jsou soudržné síly krystalické mřížky, mezi které patří síly homeopolární, heteropolární, van der Waalovy-Londonovy, vazby vodíkovými můstky, Bondovy odpudivé síly atd. Síly malého dosahu jsou vázány na povrch pevných částic a představují jejich volnou povrchovou energii. Tyto síly jsou vyvolané porušením krystalických mřížek pevných částic. Mezi síly velkého dosahu se řadí van der Waalovy-Londonovy přitažlivé síly mezi koloidy a Coulombovy elektrostatické síly. (1; 3)

Zatím jsme uvažovali jen o částicích bez povrchových nerovností. V případě částic s velmi hladkým povrchem mohou mikronerovnosti dosahovat výšky přibližně 100 nm. U drsnějších povrchů jsou tyto nerovnosti 5 až 10 krát vyšší. Takové částice se dotýkají jen v dotykových můstcích (dotyk vrcholů dvou nerovností). U částic větších rozměrů než koloidy, např. kovové částice, jsou síly malého dosahu bezvýznamné. Jejich působení je omezeno jen na nejbližší okolí dotykových můstků, jinde vzdálenost obou povrchů přesahuje akční radius sil malého dosahu. (6; 1)

### 2.1.7.1. Třecí vazby

Dvě pevné částice partikulární látky se mohou po sobě klouzat nebo se valit, je proto nutné brát v potaz jak tření kluzné, tak valivé. Kluzné tření se vyskytuje častěji, protože není závislé na tvaru částic. Ploché částice se mohou valit jen obtížně, valivé tření je tedy možné jen u izometrických částic. U kluzného tření je potřeba rozlišit tření suchých povrchů a tření s hydrodynamickým mazáním. Kapalně mazadlo zamezuje přímému kontaktu třecích povrchů, tloušťka mazadla je tedy větší než výška mikronerovností povrchu. (1)

V kontextu třecích vazeb je postačující zabývat se pouze kluzným třením suchým a mezním. Suché tření je tření se zanedbatelnou vlhkostí třecích povrchů. Mezní tření vzniká, pokud je vrstva mazadla menší než výška mikronerovností třecích povrchů. Na obr. 9 jsou znázorněny tyto dva základní případy kluzného tření. (1)

Normálové napětí pro suché tření  $\sigma_f^k$  je dáno vztahem (2.13),

$$\sigma_f^k = \sigma_n \frac{a_g}{\sum a_k} \quad (2.13)$$

kde:

$\sigma_n$  je normálové napětí (Pa),

$a_k$  je plocha kontaktních můstků (m<sup>2</sup>),

$a_g$  je geometrická dotyková plocha (m<sup>2</sup>).

Vlivem mikronerovností na povrchu částice je zpravidla  $\sum a_k \gg a_g$ . Smyková pevnost dvou dotýkajících se povrchů  $\tau_f$  je dána vztahem (2.14),

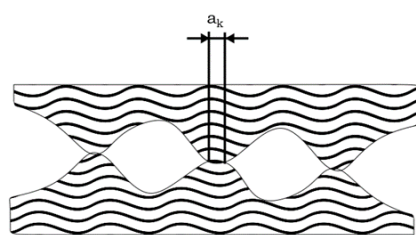
$$\tau_f = \tau_f^k \frac{\sum a_k}{a_g} \quad (2.14)$$

kde  $\tau_f^k$  je smyková pevnost kontaktního můstku (za předpokladu, že je u všech kontaktních můstků stejná). Kombinací rovnic (2.13) a (2.14) získáme vztah (2.15).

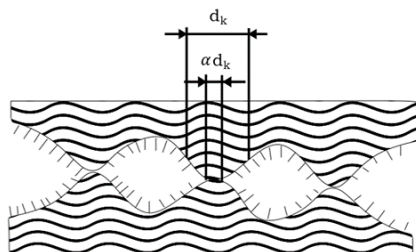
$$\tau_f = \frac{\tau_f^k}{\sigma_f^k} \sigma_n = \mu \sigma_n \quad (2.15)$$

kde  $\mu$  je součinitel smykového tření, který výrazně závisí na čistotě povrchu. (1)

Obrázek 9 Třecí vazby (1)



a) suché kluzné tření



b) mezní kluzné tření

#### 2.1.7.2. Křehké vazby

Řadou fyzikálně chemických pochodů může dojít ke stmelení dvou částic a změně třecí vazby na křehkou. Tato vazba se v podstatě neliší od mřížkových vazeb uvnitř pevné částice. Při stmelení se geometrická a efektivní plocha kontaktních můstků ztotožní (tj.  $a_g = a_k$ ). Porušením křehké vazby přestanou působit síly malého dosahu (s výjimkou kontaktních můstků) a klesne kontaktní pevnost. Změnou křehké vazby na třecí dojde k vzájemnému oddálení částic, tj. zvětšení objemu látky. (1)

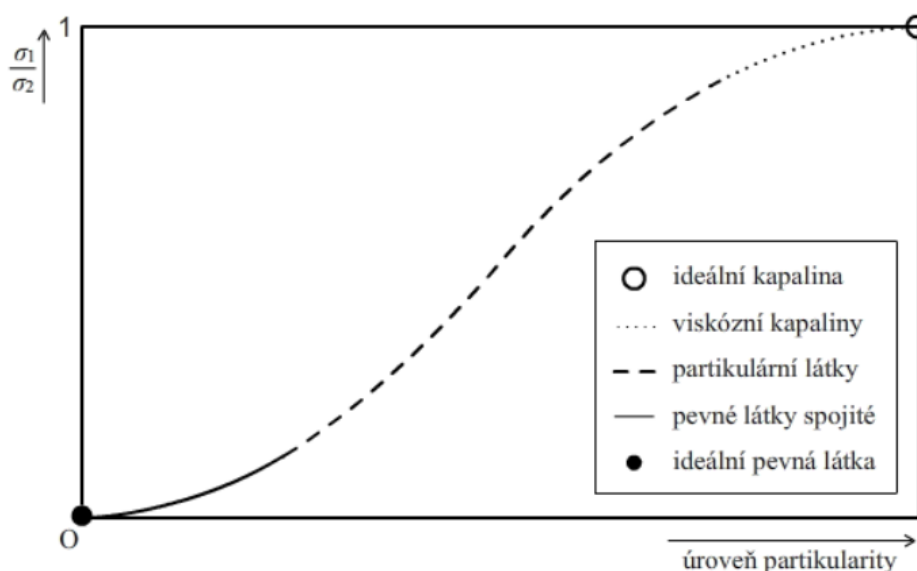
#### 2.1.7.3. Poddajné vazby

Podstatou poddajných vazeb je adhezní síla, stejně jako u vazeb třecích. Vznik poddajné vazby není podmíněn kontaktním napětím, a s jeho zánikem nepřestává existovat. Velikost kontaktního napětí se váže na tu část soudržnosti, kterou vyvolala překonsolidace (časová). Soudržnost zaniká s porušením překonsolidovaného vzorku, ale na rozdíl od křehkých vazeb, je při stejném zatížení vratná. Adhezní síla je u částic větších rozměrů nevýznamná, protože  $a_k \ll a_g$  a ke vzniku kontaktního můstku je, kvůli drsnosti a nepoddajnosti částic, zpravidla nutné kontaktní napětí. Kontakt mezi malými izometrickými částicemi, které dosahují velikosti mikronerovností velkých částic, se uskutečňuje přes rohy a hrany těchto částic. Vzhledem k pohyblivosti malých částic může být efektivní plocha kontaktu mnohonásobně vyšší než u nepoddajných povrchů, a proto se adheze stává významnou.

## 2.2. Mechanika partikulárních látek

Při popisu vlastností partikulární látky se musí, kromě chemického složení a struktury, zohlednit i interakce jednotlivých částic. A to z důvodu jejich rozměrové a tvarové variace, jejich povrchu (hrubý, hladký), vlhkosti a teploty. Velké množství proměnných neumožňuje teoreticky popsat tokové chování. Proto se mechanické vlastnosti partikulárních látek určují experimentálně pomocí testovacích zařízení popsaných v kapitole 4.3. (11; 10; 1)

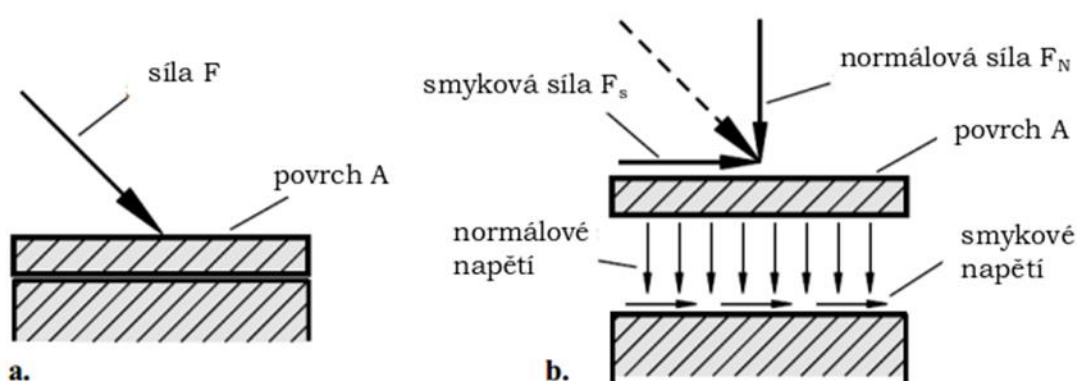
Obrázek 10 Kézdiho diagram (1)



Vliv velikosti částic na mechanické chování partikulárních látek je popsán pomocí úrovně partikularity. Chování partikulární látky je připodobněno ke kapalnému nebo pevnému skupenskému stavu v závislosti na velikosti částic. Se zvětšující se velikostí částic klesá úroveň partikularity a látka se svým mechanickým chováním podobá pevné látce. Naopak se zmenšující se velikostí částic úroveň partikularity stoupá a chování partikulární látky odpovídá kapalině. Toto je způsobeno různou odezvou obou skupenství na přítomnost navzájem kolmých normálových napětí působících na stěnu vymezeného krychlového objemu. Ideální pevná látka nepodléhá deformaci. Pokud tedy na pevnou látku působíme normálovým napětím  $\sigma_1$  v směru kolmém na směr působení bude normálové napětí  $\sigma_2$  nulové a tedy poměr  $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$  bude nulový. (11; 10; 1)

Pro reálné pevné látky platí, že působením normálového napětí  $\sigma_1$ , ve směru kolmém na tuto sílu vznikne, normálové napětí  $\sigma_2$ . Poměr je tedy vždy větší než nula. V případě ideální kapaliny platí Pascalův zákon, popisující rovnoměrné rozložení tlaku v kapalině. Z toho vyplývá, že normálové napětí  $\sigma_1$  je rovno napětí  $\sigma_2$ . Poměr napětí je roven jedné. U reálné kapaliny se do poměru normálových napětí promítá vliv viskozity. Partikulární látky se svými vlastnostmi pohybují mezi více popsányi skupenstvími. Zda se poměr  $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$  bude blížit nule nebo jedné je určeno úrovní partikularity. Závislost poměru napětí na úrovni partikularity udává Kézdiho diagram (viz obr. 10) (11; 10; 1)

Obrázek 11 Síla působící na materiál (a), Výsledné síly (b) (10)



Při působení síly na partikulární látku, uvažujeme o partikulární látce jako o jednotném systému. Síla tedy působí na objemový prvek nikoliv na jednotlivé částice partikulární látky. Jakoukoliv sílu, působící na látku lze rozložit na normálovou a smykovou sílu (viz obr. 11). Normálová síla  $F_N$  (N) působí kolmo na objemový prvek  $A$  ( $m^2$ ). Smyková síla  $F_S$  (N) je paralelní s objemovým prvkem  $A$ . Působící napětí se vypočte podílem síly na plochu (vzorec (2.14) a (2.15)).

(10)

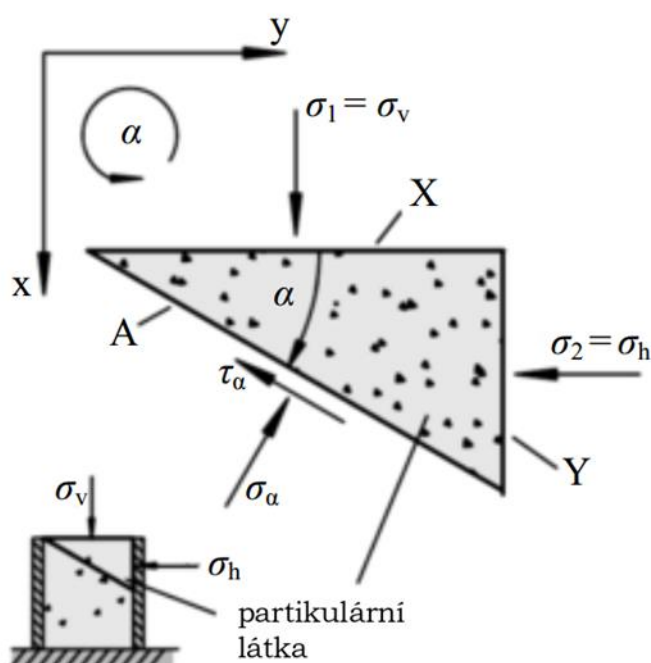
$$\sigma = \frac{F_N}{A} \quad (2.16)$$

$$\tau = \frac{F_S}{A} \quad (2.17)$$

## 2.2.1. Napětí v partikulárních látkách

Při určování napětí v partikulárních látkách předpokládáme, že se látka svým chováním blíží ideálně sypké látce. Tedy že má ve všech směrech stejné vlastnosti (izotropní prostředí). K popisu rozložení tlaků v partikulární látce se definuje elementární krychle, na kterou působí normálové ( $\sigma$ ) a smykové ( $\tau$ ) napětí. Při popisu rozložení napětí zanedbáváme nejmenší rozměr napětí  $\sigma_3$ , z důvodu usnadnění popisu problematiky. (2; 12)

Obrázek 12 Elementární trojboký hranol (10)



Pro další řešení se používá elementární trojboký hranol, vzniklý seříznutím elementární krychle pomocí obecné roviny (obr. 12). Pro napětí  $\sigma$  a  $\tau$ , působící v rovině řezu, vyřešíme podmínky rovnováhy dle vzorců ((2.18) až (2.28)):

Pro napětí  $\sigma$  platí:

$$ds \cdot \sigma_{\alpha} - dx \cdot \sigma_2 \cdot \sin \alpha - dy \cdot \sigma_1 \cdot \cos \alpha = 0 \quad (2.18)$$

zavedeme substitute:

$$dx = ds \cdot \sin \alpha \quad (2.19)$$

a

$$dy = ds \cdot \cos \alpha \quad (2.20)$$

po dosazení a úpravě platí:

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_2 \sin^2 \alpha + \sigma_1 \cos^2 \alpha \quad (2.21)$$



pro napětí  $\tau$  platí:

$$\tau_{\alpha} \cdot ds + \sigma_2 \cdot \cos \alpha \cdot dx - \sigma_2 \cdot \sin \alpha \cdot dy = 0 \quad (2.22)$$

po zavedení substituce a úpravě platí:

$$\tau_{\alpha} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (2.23)$$

pro další úpravu zvolíme substituce:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\alpha), \quad (2.24)$$

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha) \quad (2.25)$$

a

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (2.26)$$

po dosazení a úpravě Pro napětí  $\sigma$  platí:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos 2\alpha \quad (2.27)$$

pro napětí  $\tau$  platí:

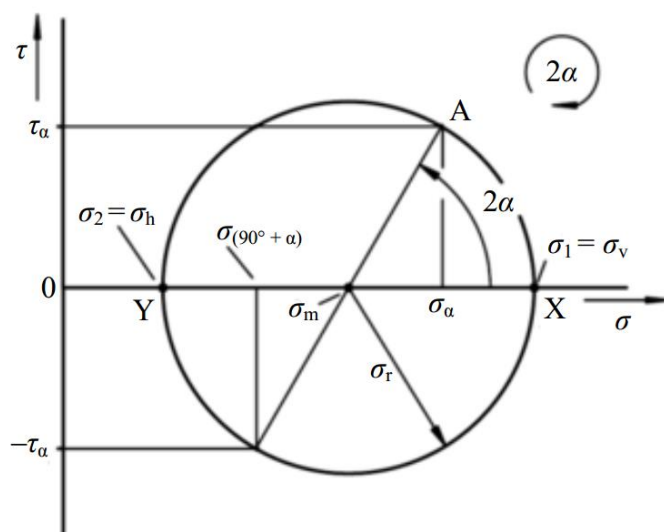
$$\tau_{\alpha} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \sin 2\alpha \quad (2.28)$$

Odvozené rovnice slouží k stanovení normálového a tečného napětí v jakékoliv rovině pro libovolný úhel  $\alpha$ . Vynesením vypočtených hodnot smykových a normálových napětí do téhož grafu získáme tzv. Mohrovu kružnici (obr. 13). Mohrova kružnice určuje vztah normálových a smykových napětí při rovinném stavu napjatosti. Poloměr kružnice je dán vztahem (2.32), normálové napětí lze určit pomocí rovnice (2.30). (2; 12)

$$\sigma_r = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \quad (2.29)$$

$$\sigma = \sigma_m \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \quad (2.30)$$

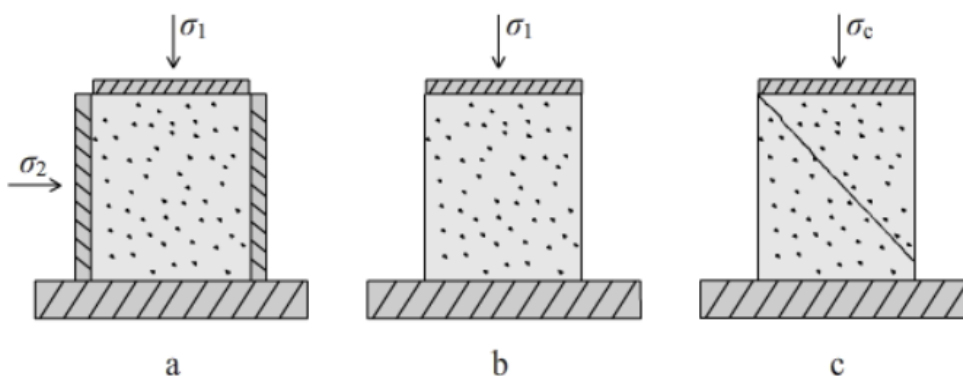
Obrázek 13 Převedení napětí do závislosti pomocí Mohrovi kružnice (2)



### 2.2.2. Tokové vlastnosti partikulárních látek

Problematika tokových vlastností partikulárních látek nachází své uplatnění především v oblastech návrhu a konstrukce zásobníků materiálu. Tokové vlastnosti závisí na velikosti, tvaru, chemickém složení částic i vlhkosti. Z důvodu velkého počtu proměnných se tokové vlastnosti zjišťují pomocí řady testovacích zařízení. (10; 2)

Obrázek 14 Jednoosá zkouška tlakem



Jako příklad lze uvést jednoosou tlakovou zkoušku (obr. 14). Na obrázku je dutý válec, u kterého se předpokládá nulové tření mezi stěnou a materiálem. Válec je naplněn kohézním partikulárním materiálem. V horizontálním směru působí na materiál normálové napětí  $\sigma_1$ , označované jako hlavní nebo konsolidační napětí. Působení konsolidačního napětí je posléze přerušeno a válec je odstraněn. Následujícím působením rostoucí normálové síly dojde k narušení vzorku. Hodnota napětí, při které došlo k narušení materiálu je označována jako prostá mez kluzu nebo tlaková pevnost  $\sigma_c$ . K tečení materiálu dochází až po překročení této limitní hodnoty. Z důvodu potřeby charakterizovat tokové vlastnosti materiálu jedinou hodnotou byl zaveden tzv. index lomu  $ff_c$  ((2.31).

$$ff_c = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (2.31)$$

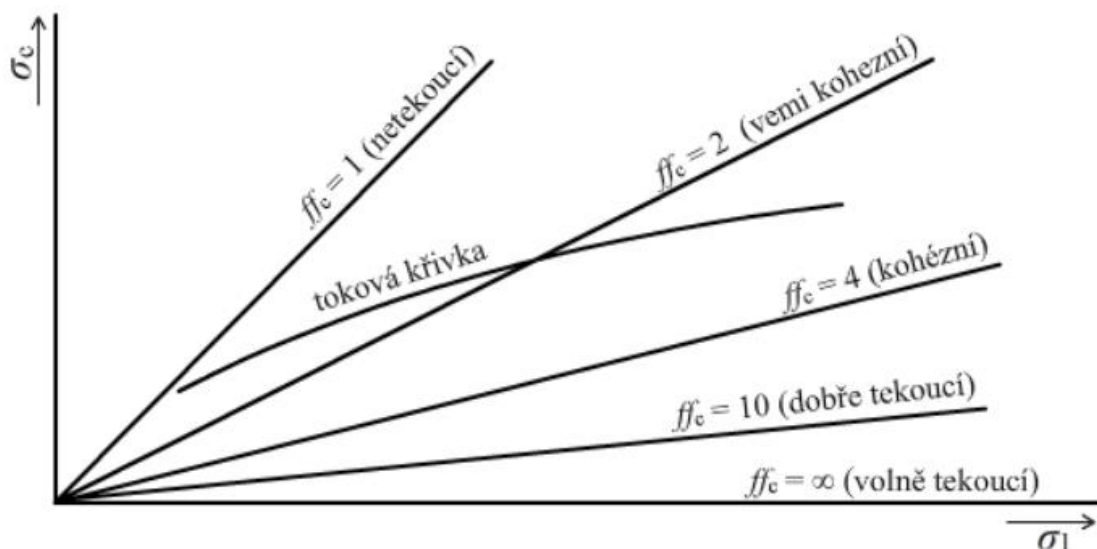
Kde:

$\sigma_1$  je napětí působící během konsolidace (kPa),

$\sigma_c$  je mezní stav napjatosti vzorku konsolidovaného napětím  $\sigma_1$  (kPa).

Obrázek 15 znázorňuje závislost mezního stavu napjatosti vzorku  $\sigma_c$  na konsolidačním napětí  $\sigma_1$ . Index toku charakterizuje pouze jeden bod z průběhu tokové křivky. Hranice mezi jednotlivými charakteristikami látek jsou uvedeny konstantní hodnotou  $ff_c$ . (viz obr. 15) Tekutost látek tedy závisí na stupni konsolidace. S rostoucí konsolidací se hodnota indexu toku zvyšuje a materiál je více tekoucí. (10; 2)

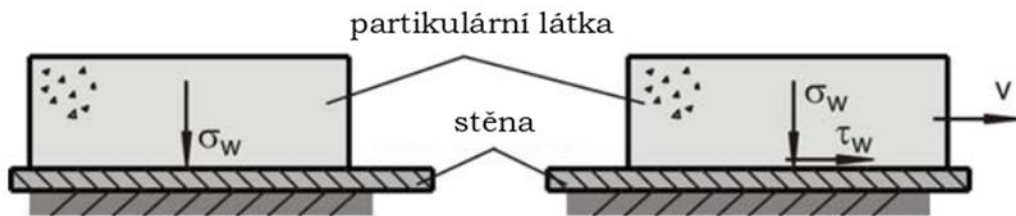
Obrázek 15 Klasifikace tokovosti partikulárních materiálů (10)



### 2.2.3. Stěnové (vnější) tření

Při pohybu partikulární látky po povrchu, s kterým je látka v dotyku, vzniká stěnové (vnější) tření (viz obr.16). Hodnota stěnového tření závisí do stejné míry na materiálu i typu povrchu. Tento jev nelze zanedbávat při návrhu zásobníků a v technických aplikacích partikulárních materiálů. Princip stěnového tření zobrazuje, normálové napětí  $\sigma_w$  působící mezi materiálem stěny a sypkým materiálem. Konstantní rychlostí  $v$  je sypký materiál posouván a vzniká smykové napětí  $\tau_w$ . (10)

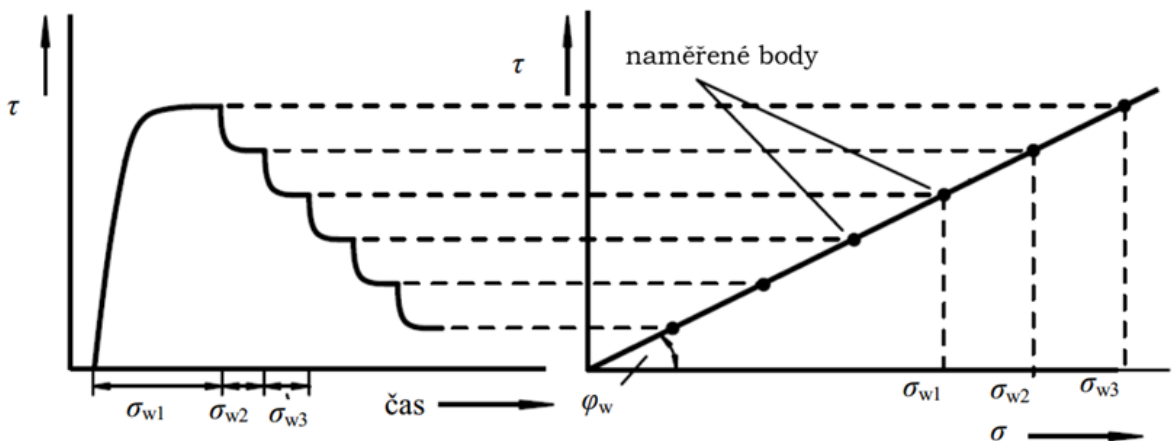
Obrázek 16 Stěnové tření (12) i



Stěnové tření se měří nejčastěji pomocí Jeneikého smykového stoje, který je popsán v následující kapitole. K měření vnějšího úhlu tření se používá destička z materiálu, vůči kterému se vnější úhel stanovuje. Po vynesení naměřených hodnot smykových a normálových napětí do grafu závislosti  $\frac{\tau}{\sigma}$ , získáme stěnovou mezní přímku (viz Obrázek 17). V případě vnějšího tření se často jedná o přímku procházející počátkem. Tato přímka svírá s osou  $\sigma$  úhel stěnového tření  $\varphi_w$  (4.29). (10)

$$\tan \varphi_w = \frac{\tau_w}{\sigma_w} \quad (2.32)$$

Obrázek 17 Výsledek měření stěnového tření (10)



## 2.2.4. Sypný úhel

Sypný úhel  $\theta$  je definován jako úhel odklonu povrchu volně sypaného materiálu od vodorovné roviny a patří mezi charakteristiky popisující tokové chování partikulárních látek. Rozlišujeme dva typy sypného úhlu, a to statický sypný úhel  $\theta_s$  (klidový) a dynamický sypný úhel  $\theta_d$ , kde platí že  $\theta_d < \theta_s$ . Sypké hmoty lze dělit podle hodnoty sypného úhlu do několika tříd (viz tab. 2). (13; 14; 2)

*Tabulka 2 Rozdělení materiálů do tříd podle hodnoty sypného úhlu (2)*

<b>Třída</b>	<b>Charakteristika</b>	<b>Úhel <math>\theta_s</math></b>
<b>1</b>	Tekoucí (chovající se jako kapalina)	Blížící se 0
<b>2</b>	Lehce tekoucí	$\leq 30^\circ$
<b>3</b>	Normálně tekoucí	$30^\circ - 45^\circ$
<b>4</b>	Obtížně tekoucí	$45^\circ - 60^\circ$
<b>5</b>	Soudržný	$>60^\circ$
<b>6</b>	Netekoucí (materiál netvořící skluzy)	

Teoreticky se mohou hodnoty sypného úhlu pohybovat v rozmezí od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ . Tyto extrémní hodnoty se obvykle nevyskytují. Příklady typických hodnot sypného úhlu jsou uvedeny v tab. 3. Obecně platí, že sypný úhel odpovídá úhlu vnitřního tření. Tento předpoklad ale není vždy správný, jelikož platí pouze v případě nekohezních nezkonsolidovaných materiálů. Další podmínkou je, že částice těchto materiálů musí mít kulovitý tvar a hladký povrch. Sypný úhel může ovlivnit mnoho faktorů, jako je velikost zrna, tvar, obsah vlhkosti, nebo drsnost základny (na které je materiál nahromaděn). (14)

*Tabulka 3 Ukázka hodnot statického sypného úhlu (14)*

<b>Materiál</b>	<b>Úhel <math>\theta_s</math></b>
<b>Popel</b>	$40^\circ$
<b>Kávové boby</b>	$35-45^\circ$
<b>Písek (suchý)</b>	$34^\circ$

Přestože je v literatuře popsáno mnoho empirických metod měření sypného úhlu, nejsou tyto metody standardizované, a výsledky naměřené různými metodami se od sebe často liší. Metoda měření by tedy měla být vybrána na základě předem definovaných požadavků a pro konkrétní materiál a aplikaci, a to pro sypný úhel statický i dynamický. (2)

Mezi metody měření statického sypného úhlu  $\theta_s$  patří:

I. Výtoková (výsypaná) metoda

Materiál volně vytéká otvorem z válcové nádoby. Pod výpustným otvorem vzniká kužel o určité hodnotě sypného úhlu.

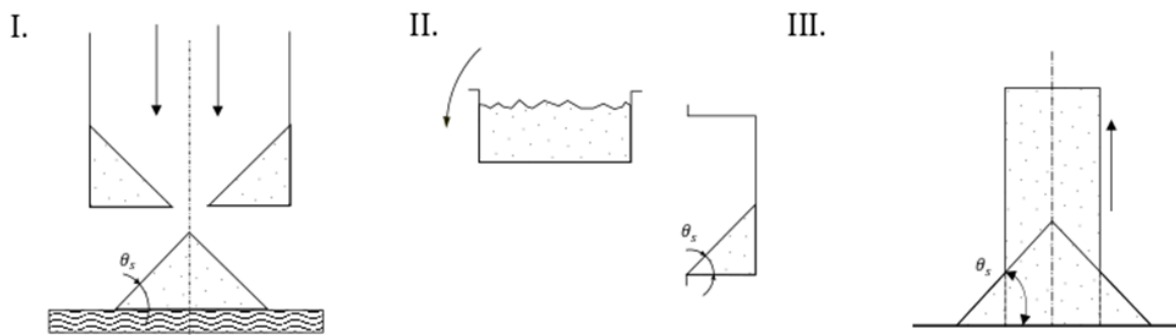
II. Skluzová metoda

Plochá nádoba naplněná sypkým materiálem je postupně otáčena o  $90^\circ$ . Materiál volně přetéká přes hranu nádoby. Hodnota sypného úhlu je ovlivněna rychlostí překlápění nádoby.

III. Sedimentační metoda

Válcový plášť umístěný na podložce je naplněn sypkým materiálem. Následně je válec opatrně odstraněn. Z vytvořeného sypného kužele se následně stanoví sypný úhel. (2)

Obrázek 18 Metody měření statického úhlu (2)



Mezi metody měření dynamického sypného úhlu  $\theta_d$  patří:

I. Ventilační metoda

Materiál je umístěn na podložce, která je profukována vzduchem.

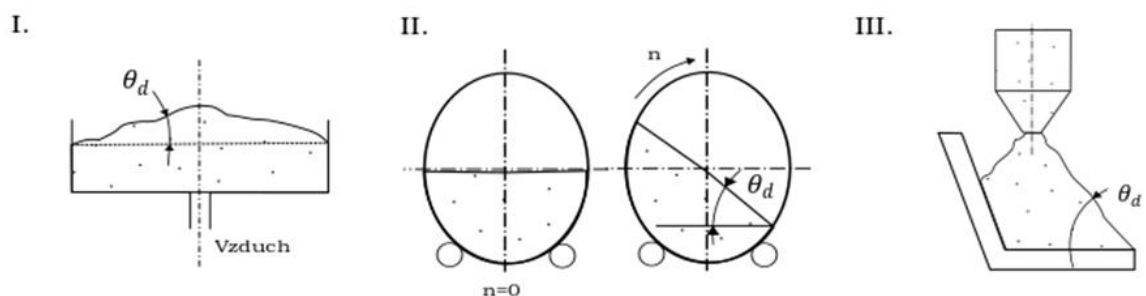
II. Rotační metoda

Materiál je umístěn do válcového zásobníku. Následně je zásobníkem otáčeno. Důležitou roly hraje působení odstředivé síly.

III. Vibrační metoda

Materiál protéká přes vibrující výsypku. Sypný úhel se následně měří obvyklým způsobem. (2)

Obrázek 19 Metody měření dynamického úhlu (2)

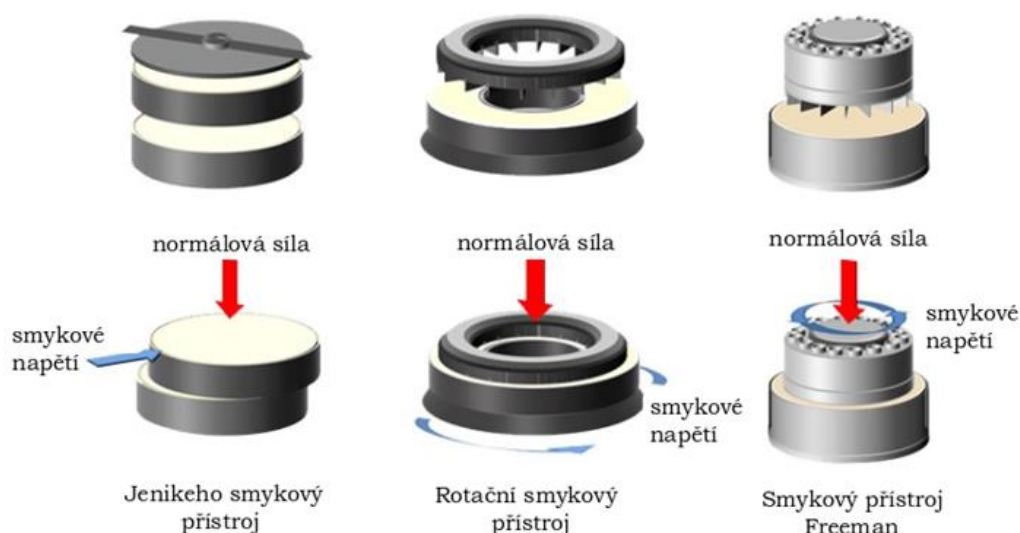


Z výše uvedeného vyplývá, že označení sypného úhlu charakteristikou partikulární látky je značně diskutabilní. Hodnota sypného úhlu závisí jak na vlastnostech materiálu, na použité měřící metodě ale i na kvalifikaci pracovníka. (12; 14; 2)

### 2.3. Přístroje pro měření smykových vlastností

K měření smykových vlastností lze použít několik typů smykových strojů, lišící se od sebe metodou měření a typem deformace materiálu. Společným znakem těchto strojů je smyková cela, na kterou vertikálně působí normálové napětí  $\sigma$ . Smyková cela je nádoba vodorovně rozdělená na dvě části. Horní (pohyblivá) část se posouvá horizontálním směrem vůči spodní (nepohyblivé) části. Dva nejběžnější smykové přístroje jsou Jenikeho smykový stroj a Schulzův rotační smykový stroj (viz obr.20). Dalším typem přístroje pro měření smykových vlastností je rotační smykový přístroj Freeman. Z těchto základních typů vychází množství variací smykových strojů. (12; 15; 16)

Obrázek 20 Typy smykových strojů (16)

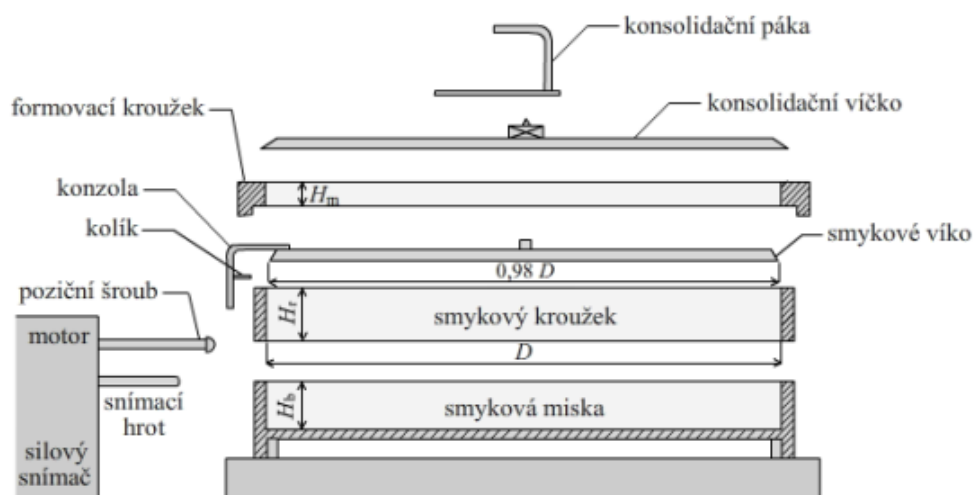


### 2.3.1. Jenikeho smykový stroj (Jenike shear cell)

Smyková cela Jenekeho stroje se skládá ze smykové misky, smykového víka, smykového kroužku, konsolidačního víčka a formovacího kroužku, (viz Obrázek 2121). Další součásti jsou motor pohánějící hrot a silový snímač, který by měl být schopný přenést sílu do 500 N. Signál ze snímače následně prochází zesilovačem. Aby nedocházelo k nežádoucím vibracím, měl by být smykový stroj umístěn na vhodném místě, ideálně na antivibrační lavici. Nežádoucí vibrace značně zvyšují smykovou pevnost materiálu. Standardizované rozměry Jenikeho smykového stroje jsou uvedeny v Tabulka 4 4. V prvních dvou řádcích jsou uvedeny rozměry přístrojů od firmy Jenike & Johanson. Rozměry jednotlivých strojů se mohou značně lišit, všechny ale dodržují stejný poměr jednotlivých rozměrů. (15)



Obrázek 21 Jenikeho smykový stroj (1)



Základním předpokladem zisku důvěryhodných výsledků je výběr kvalitního reprezentativního vzorku. Vliv má nejen vlhkost či zrnitost materiálu ale také nakypření. Z tohoto důvodu je vhodné na každý test použít nový vzorek a doporučené minimální množství materiálu pro měření je 10 litrů. Pokud není takové množství materiálu dostupné, je potřeba použitý vzorek před každým měřením prokypřit. Protože vlhkost materiálu může ovlivnit jeho tekutost je nutné materiál skladovat v hermeticky uzavřených obalech. Doba manipulace se vzorkem musí být co nejkratší a vzorek se musí pravidelně promíchávat, aby nedošlo k nehomogenitě vlhkosti ve vzorku. (1; 15)

Tabulka 4 Standardizované rozměry smykové cely (15)

	$D$ – průměr smyk. kroužku (mm)	$H_b$ – výška smyk. misky (mm)	$H_r$ – výška smyk. kroužku (mm)	$H_m$ - výška form. kroužku (mm)	Materiál
Jenike STANDARD	95,25	12,7	15,875	9,525	Ocel / hliník
Jenike MALÝ	63,5	9,525,	11,113	7,938	Hliník
Standardní velikost	95	13	16	10	Ocel / hliník

Samotná smyková zkouška se dělí na dvě části. V první část je označovaná jako předsmyk. Na kriticky konsolidovaném vzorku je dosaženo ustáleného stavu toku s ustálenou hodnotou objemové hustoty materiálu. V druhé části zkoušky je za sníženého normálového napětí na předsmyknutém vzorku měřena aktuální hodnota smykového napětí. Hodnota normálového napětí je regulována pomocí přídavných závaží.

Na začátku smykové zkoušky je smykový kroužek položen do předvolené polohy. Smyková cela je naplněna měřeným materiálem až nad formovací kroužek tak, aby ve vzorku nevznikly dutinky. Následně je špachtlí vzorek zarovnan. Na smykové víko se působí vertikální silou vzniklou kombinací hmotnosti smykového víka a vybraného závaží. Na takto připravený vzorek působí prostřednictvím snímacího hrotu horizontální smyková síla. Dráha smyku je limitována na dvojnásobek šířky stěny smykového kroužku. Tato hodnota se pohybuje v rozmezí 6 až 8 mm. Po celou dobu měření jsou zaznamenávány hodnoty smykové síly. (1; 15)

Normálové napětí  $\sigma$  se vypočte z působící normálové síly a velikosti smykové cely podle vztahu:

$$\sigma = \frac{F_v}{A} = \frac{(m_B + m_R + m_L + m_H + m_W) \cdot g}{A} \quad (2.33)$$

Kde:

$\sigma$  je normálové napětí ( $Pa$ ),

$A$  je plocha příčného řezu smykové cely ( $m^2$ ),

$F_v$  je vertikálně působící síla ( $N$ ),

$m_B$  je hmotnost sypného tělesa ( $kg$ ),

$m_L$  je hmotnost smykového víčka ( $kg$ ),

$m_R$  je hmotnost smykového kroužku ( $kg$ ),

$m_H$  je hmotnost závěsu ( $kg$ ),

$m_W$  je hmotnost závaží ( $kg$ ),

$g$  je gravitační zrychlení ( $9,81 \text{ m s}^{-2}$ ).

Smykové napětí se vypočte z paralelně na plochu působící smykové síly dle vztahu:

$$\tau = \frac{F_s}{A} \quad (2.34)$$

Kde:

$\tau$  je smykové napětí ( $Pa$ ),

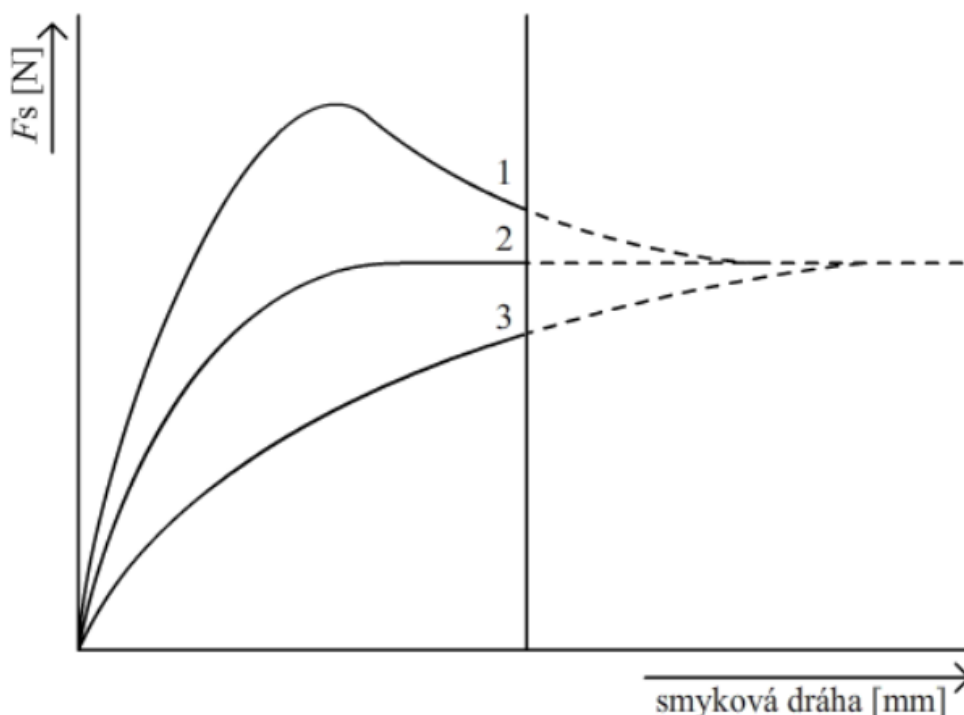
$F_s$  je smyková síla odečtená z kalibrovaného snímače ( $N$ ).

V závislosti na úrovni konsolidace vzorku lze pozorovat tři odlišné průběhy závislosti síly na čase. Pro lepší názornost lze časovou závislost smykové síly přepočítat na smykovou dráhu. Na obr. 22 jsou uvedeny tři různé průběhy smykové síly v závislosti na konsolidaci vzorku. (1; 15)

- Křivka 1 zobrazuje charakteristický průběh pro překonsolidovaný vzorek. Objemová hmotnost vzorku je vyšší než objemová hmotnost během ustáleného toku partikulární látky při daném normálovém napětí.
- Křivka 2 reprezentuje kriticky konsolidovaný vzorek. Měřená smyková síla se po krátkém růstu dostane do ustáleného stavu toku. Z tohoto stavu se vychází v dalších fázích měření.
- Křivka 3 zobrazuje podkonsolidovaný vzorek, tedy vzorek, jehož stupeň konsolidace je nedostatečný. Objemová hmotnost vzorku pro dané normálové napětí je nižší než objemová hmotnost ve stavu ustáleném toku.

Vertikální čára v diagramu na obr.22 představuje hranici 6 mm, kterou nelze u Jenikeho smykovém stroji se smykovou celou standardních rozměrů překročit. Z obrázku vyplívá důvod přípravy vzorku. Na dráze 6 mm nastane ustálený stavu toku pouze v případě kriticky konsolidovaného vzorku. (1; 15)

Obrázek 22 Průběh smykové síly v závislosti na stupni konsolidace (15)

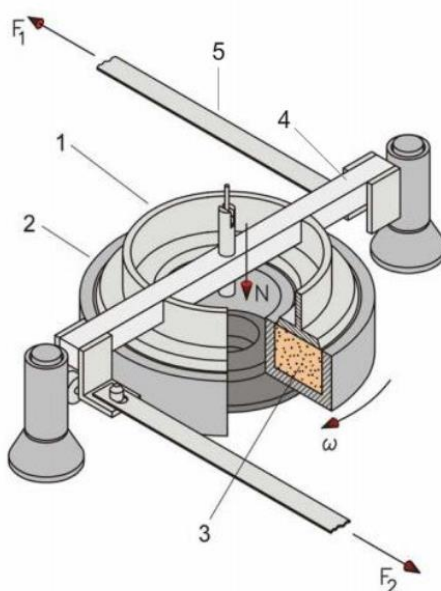


### 2.3.2. Rotační smykový stroj

Hlavní výhodou rotačního smykového stroje je neomezená délka smykové dráhy, což do jisté míry eliminuje problém s konsolidací vzorku. Měření může probíhat zcela automaticky, je tedy méně náročné na obsluhu než měření pomocí Jenikeho smykového stroje. Nevýhodou rotačního smykového stroje je masivní konstrukce a nehomogenní rozložení napětí na vzorku.

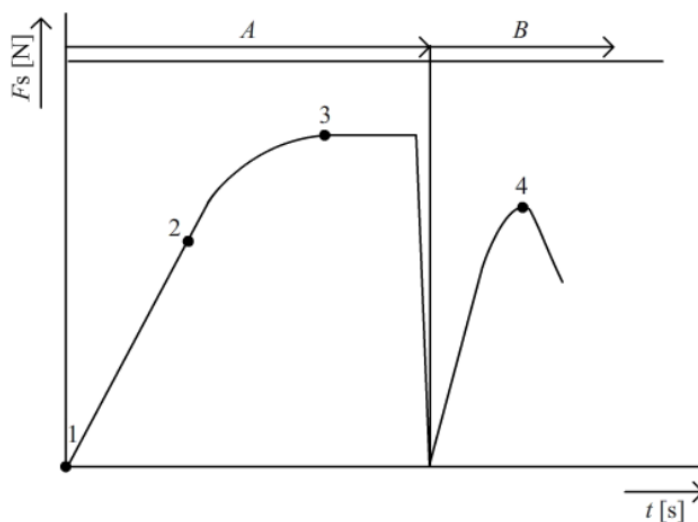
Obrázek 23 zobrazuje schéma Schulzova prstencového smykového přístroje. Jedná se o nejběžnější smykový stroj. Smyková cela prstencovitého tvaru (2) je uzavřena přítlačným víčkem (1). Vzorek partikulární látky (3) je umístěn v cele. Vnitřní strana spodní části smykové cely a vnitřní stěna víčka je pokryta vruby. Toto vroubkování zabraňuje vzorku klouzat po stěnách a umožňuje vznik smykové zóny. Na vzorek je prostřednictvím přítlačného víčka působeno normálovým napětím  $N$ . Přítlačné víčko je udržováno ve své poloze pomocí příčnicku (4) a spojovacích tyčí (5). Smyková cela je uváděna do pohybu pomocí motoru o konstantní úhlové rychlosti  $\omega$  ve směru naznačeném na obrázku. Smykové napětí je přenášeno v podobě sil  $F_1$  a  $F_2$  prostřednictvím příčnicku a spojovacích tyčí na siloměry. (10)

Obrázek 23 Schulzův prstencový rotační stroj (10)



Velikost částic partikulární látky, které je možno změřit, se odvíjí od velikosti smykové cely. Obdobně jako u Jenikeho smykového stroje. Postup a vyhodnocení smykové zkoušky je podobný jako v případě Jenikeho. Vzorek je umístěn do smykové cely a přebytečný materiál je odstraněn pomocí špachtle. Před měřením je potřeba vzorek zhutnit (předsmyk). Na Obrázek 24 je diagram průběhu napětí  $\sigma, \tau$ . Úsek *A* znázorňuje předsmykovou oblast, úsek *B* smykovou oblast. Bod 1 označuje počátek předsmyku, bod 2 představuje oblast lineárního nárůstu síly a bod 3 leží v oblasti konstantního působení síly. Bod 4 označuje maximální hodnotu smyku. (12)

Obrázek 24 Časový průběh měření smykové síly (rotační smykový stroj) (10)



### 3. Cíl práce

Cílem práce je zpracovat literární rešerši na téma partikulární látky a jejich mechanické parametry s důrazem na tokové vlastnosti. Experimentálním měřením zjistit hodnoty sypného úhlu a smykové vlastnosti zvoleného materiálu. Výpočet naměřených hodnot automatizovat pomocí skriptu vytvořeném v programu Scilab.

### 4. Metodika práce

Literární rešerše bude věnována partikulárním látkám a jejich mechanickému chování se zaměřením na tokové vlastnosti. Důraz bude kladen na měření smykových vlastností partikulárních látek a vyhodnocení měření. Měření vnějšího a vnitřního úhlu tření bude probíhat na mobilním smykovém stroji. Dále bude měřen sypný úhel vzorku pomocí sedimentační metody. Pro získání představy o obsahu vody ve vzorku bude měřena vlhkost materiálu. Pro vyhodnocení naměřených dat ze smykového stroje bude vytvořen skript za účelem zautomatizování práce s daty.

## 5. Praktická část práce

### 5.1. Materiál

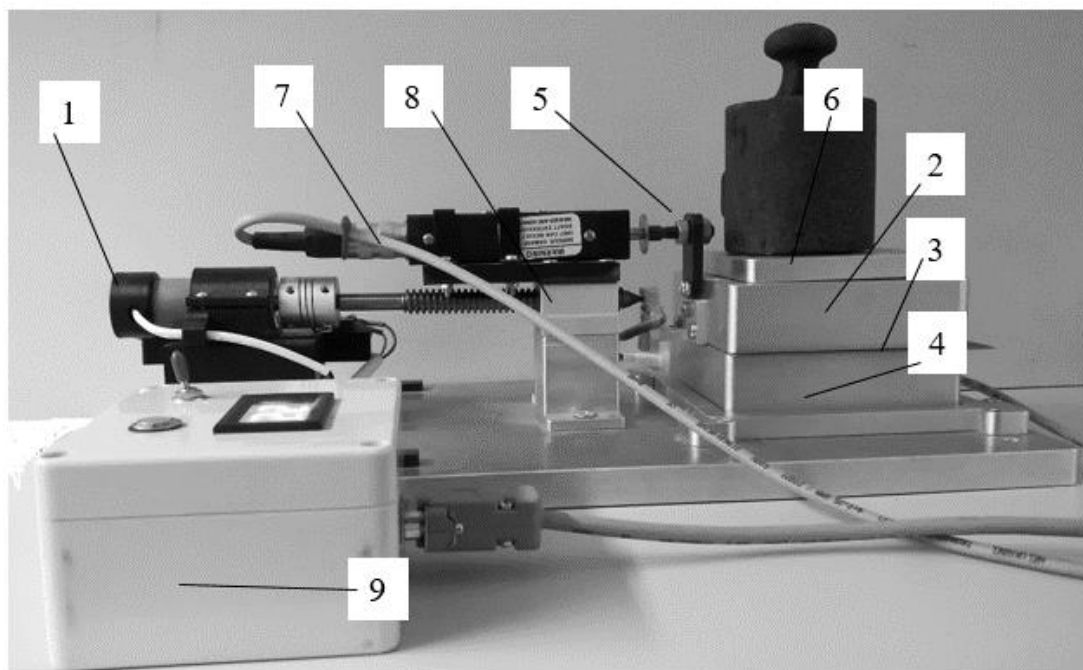
Pro diplomovou práci byla vyprána jako materiál řepka ozimá z čeledi brukvovitých. Ta patří k nejdůležitějším olejným rostlinám, a to především z důvodu výroby biopaliv. Řepka se dále používá pro hnojení a je významnou medonosnou rostlinou. Přibližně 10 % produkce řepky se zpracovává v chemickém průmyslu. Rozkladem olejů a tuků (hydrolýza nebo alkoholýza) se získává glycerol, vyšší mastné kyseliny, vyšší mastné alkoholy a aminy a oligomerní mastné kyseliny. Tyto se pak využívají při výrobě plastických hmot, pryskyřic, laků, emulgátorů, umělých vláken, mazacích prostředků, farmaceutických výrobků nebo v kosmetice. Materiál byl skladován v hermeticky uzavřené plastové nádobě o objemu 10 l a byl pročištěn prosetím sítem. (17)

### 5.2. Prováděná měření

#### 5.2.1. Popis smykové přístroje

Měření sypných vlastností ozimé řepky bylo provedeno na mobilním smykovém stroji nacházejícím se na Technické fakultě ČZU v Praze. Jedná se o zařízení chráněné užitným vzorem CHOTĚBORSKÝ, R. – LINDA, M. – NÝČ, M. *Mobilní zařízení pro smykovou zkoušku zeminy.*

Obrázek 25 Mobilní zařízení pro smykovou zkoušku (18)



1 - elektromotor; 2 - horní čtvercová komora - pohyblivá; 3 - ocelový plech; 4 - dělicí mezera mezi komorami, 5 - hmotnost; 6 - nosná deska; 7 - čidlo řazení, 8 - deformační prvek s tenzometry pro měření síly, 9 - ovládací zařízení.

Smykový přístroj tvoří elektrický motor, horní (pohyblivá) komora a spodní komora (viz obr. 25). Smyková cela je vyrobena z oceli. Výška horní a dolní komory je 30 mm, šířka 90 mm, podlahová plocha komory 8 100 mm<sup>2</sup>. Hmotnost zatěžovací desky byla 219,68 g Elektrický motorek GM25-370CHV-286-R pohání měřící soustavu. Základní parametry motorku uvádí Tabulka 5. Motorek je umístěn v držáku vyrobeným 3D tiskem.

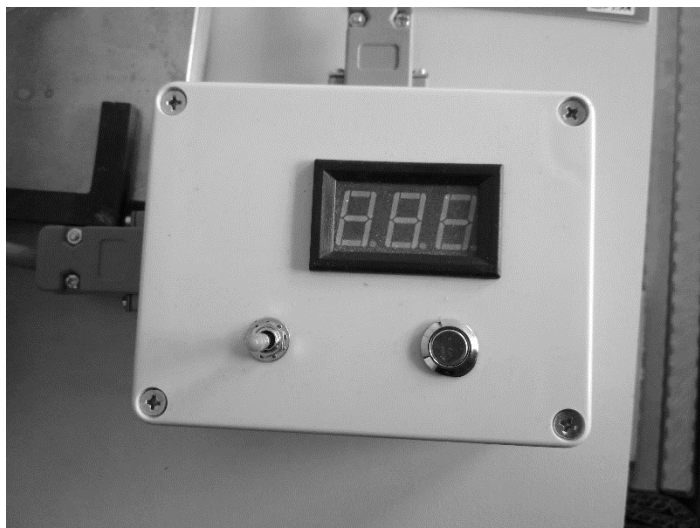
Tabulka 5 Parametry motoru (19)

<b>GM25-370CHV-286-R 9..14V DC (typ. 12 V)</b>	
<b>Jmenovité zatížení:</b>	18 ot · min <sup>-1</sup>
<b>Krouticí moment:</b>	5254 g · cm <sup>-1</sup>
<b>Proud:</b>	145 mA
<b>Chod naprázdno (bez zatížení):</b>	21 ot · min <sup>-1</sup> , 20 mA
<b>Rozběh:</b>	1050 mA
<b>Rozměry:</b>	d=24,4 mm x 57,9 mm



Pomocí ovladače lze ovládat směr posunu (obr. 26). Posun může být buď dopředný, k vytvoření smykového napětí, nebo posun zpět, k navrácení měřícího hrotu do základní polohy. Směr posunu se ovládá pomocí páčky umístěné na ovladači vlevo. Chod motoru se používá tlačítek vpravo.

*Obrázek 26 Ovládací zařízení*



*Tabulka 6 Tenzometr (20)*

<b>Tenzometr AP130-3-12/SP/Au</b>	
<b>Uspořádání</b>	Typ A, bez podložky
<b>Jmenovitý odpor</b>	120 $\Omega$
<b>Hodnota násobitele citlivosti deformace</b>	+130
<b>Délka tenzometru L</b>	3 mm
<b>Deformační citlivost</b>	Positivní
<b>Deformační citlivost</b>	120
<b>Materiál vývodů</b>	Zlato
<b>Tvar konce křemíkové části tenzometru</b>	Sp

Základní parametry použitého tenzometru jsou uvedeny v tab.6. Výpočet závislosti odporu tenzometru na deformaci je veden v rovnici (5.1). Konstanty  $C_1$  a  $C_2$  se vypočítají ze změny odporu tenzometru. Koeficienty potřebné k výpočtu jsou uvedeny v tab.7. Popis značení tenzometrů je uvedeno na obr. 27.

$$R_{\varepsilon,25} = R_{0,25}(1 + C_1\varepsilon + C_2\varepsilon^2) \quad (5.1)$$

kde:

$R_{0,25}$  je odpor volného tenzometru ( $\Omega$ ),

$R_{\varepsilon,25}$  je odpor tenzometru deformovaného při konstantní teplotě 25 ° C ( $\Omega$ ),

$C_1$  je lineární součinitel deformace (-),,

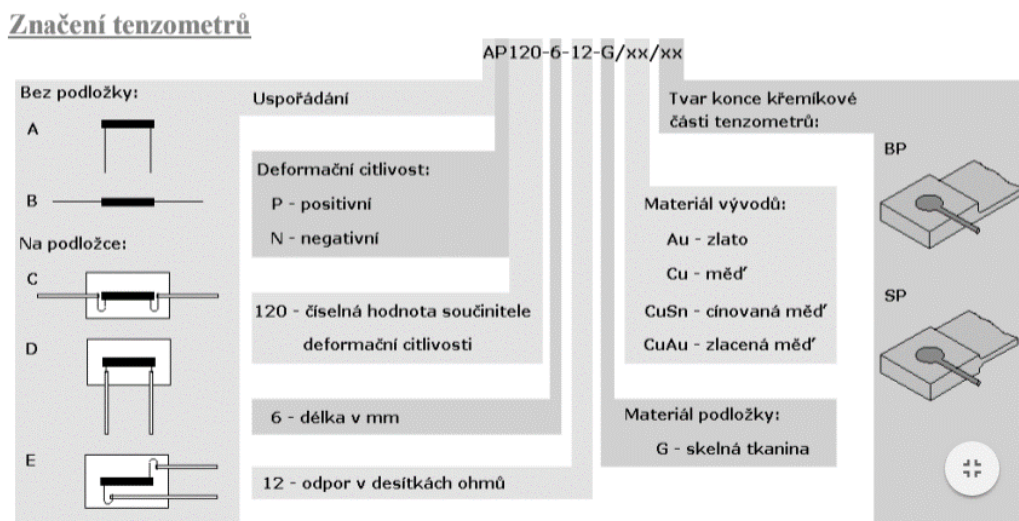
$C_2$  je kvadratický koeficient deformační rovnice (-),,

$\varepsilon$  je poměr deformace ( $m$ ).

Tabulka 7 Koeficienty pro tenzometry (20)

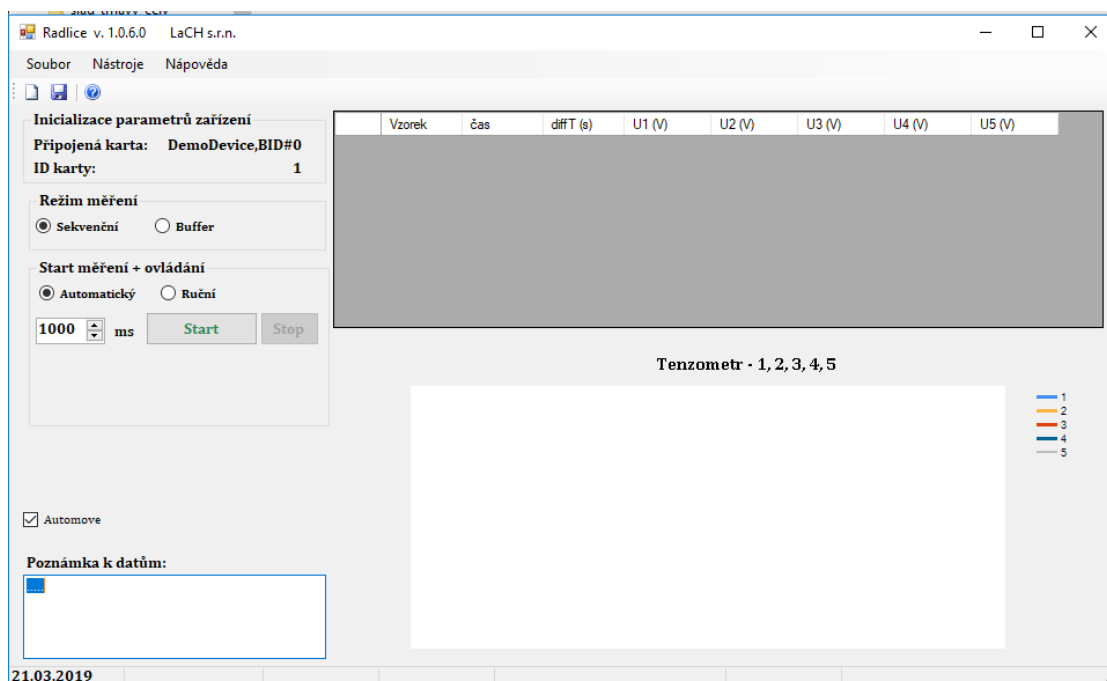
Koeficienty	Hodnota
$R_{0,25}$ ( $\Omega \pm \%$ )	119,4 $\Omega \pm 0,24$
$C_1$ (- $\pm \%$ )	127,3 $\pm 2,00 \%$
$C_2$ (- $\pm \%$ )	5101 $\pm 8,00 \%$
<b>A</b> ( $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	0,0932 $\pm 0,38 \%$
<b>B</b> ( $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	-0,18

Obrázek 27 Značení tenzometrů (20)



Software použitý k sběru dat byl vytvořen ve vývojovém prostředí Visual Basic v rámci užitého vzoru speciálně pro účely měření na smykovém stroji. Prostředí program (viz obr. 28) umožňuje nastavit režim měření na sekvenční a buffer režim. V sekvenčním režimu je možnost nastavit dobu měření. V Buffer režimu se nastavuje hodnota vzorkování a počet vzorků. Okénko v levém dolním rohu slouží k případnému připsání poznámky (ukládá se do textového dokumentu). Výstupem je csv dokument s naměřenými hodnotami a textový dokument s parametry měření.

Obrázek 28 Software Radlice v. 1.0.6.0



K dosažení požadovaného normálového napětí byla použita sada závaží o různé hmotnosti. Do výpočtu velikosti působícího normálového napětí na měřený vzorek je nutné započítat hmotnost smykové víka. Závaží byla zvolena tak, aby měla rovnoměrně rozdělenou hmotnost v požadovaném rozsahu měření. K měření byla použita základní sada závaží (viz tab. 8).

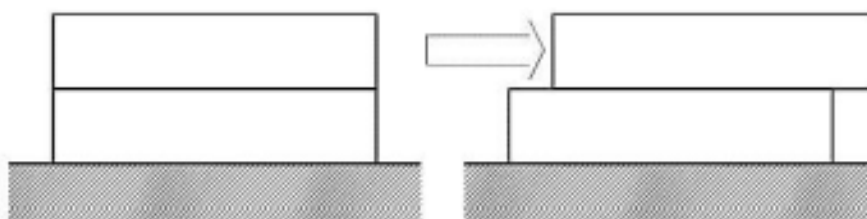
Tabulka 8 Závaží použitá při měření

Použitá závaží	
Závaží	Hmotnost (g)
1	471,1
2	968,9
3	1996,9
4	2472,3

### 5.2.2. Průběh měření na smykovém stroji

Příprava vzorku k měření úhlu tření sestává z několika kroků, které se dodržovaly v průběhu celého měření. Spodní smyková cela byla upevněna do připraveného držáku, tak aby během měření nedošlo k jejímu pohybu. Spodní smyková cela byla zarovnána s horní smykovou celou do jedné roviny (bez přesahu). Partikulární materiál byl dávkován ze skleněné misky pomocí lžice, kterou bylo také prováděno vrstevnaté rozmístění materiálu ve smykové cele. Kovové stěrky bylo použito k následnému důkladnému zarovnání materiálu s horní hranou smykové cely. Na zarovnaný materiál ve smykové cele se opatrně umístí zatěžovací deska. Deska se zatíží závažím o požadované hmotnosti. Hodnota působící síly je zaznamenána ihned po zapnutí pohonu. Pomocí ovladače se motor přepnul do dopředného chodu a došlo k posunutí horní smykové komory (Obrázek 29 29). Po dokončení smykové zkoušky byl pomocí ovladače přepnut motor to zpětného chodu a měřicí destička se vrátila do výchozí polohy.

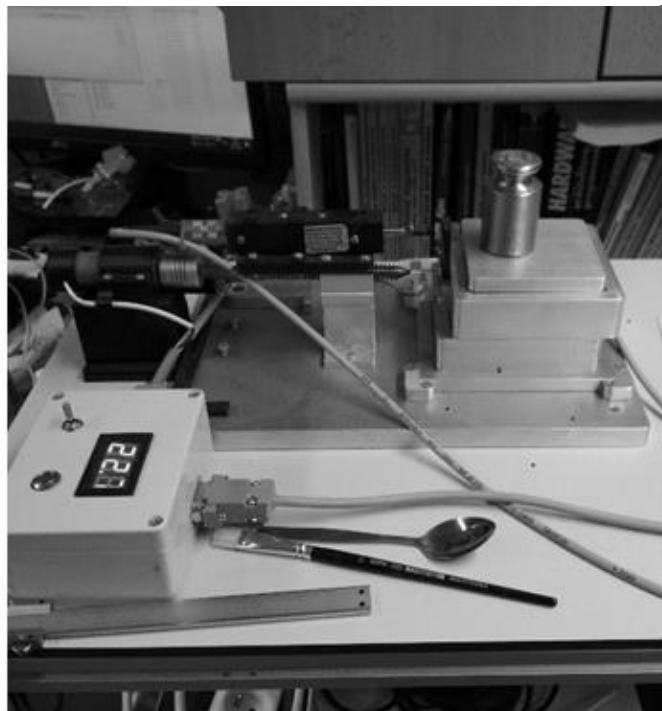
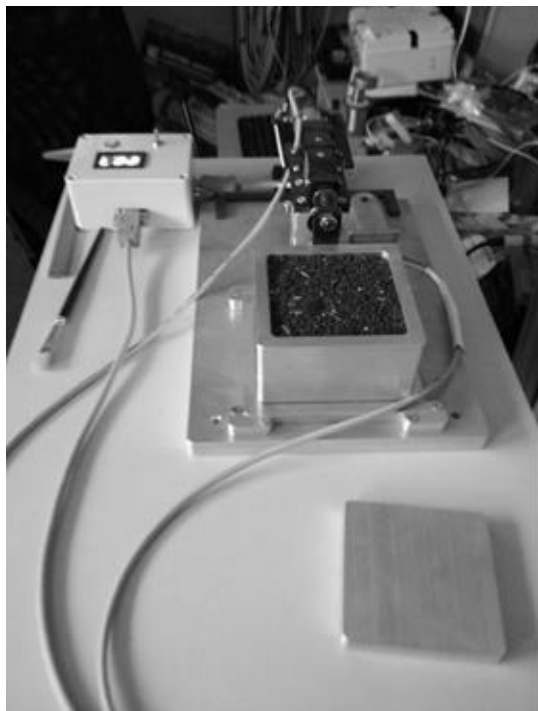
*Obrázek 29 Princip činnosti zařízení pro měření smykové soudržnosti a třecích vlastností sypkých materiálů*



Pro měření vnějšího úhlu tření byla mezi horní a spodní smykovou celou vložena destička s hladkým povrchem. Materiál destičky lze měnit v závislosti na požadovaném výstupu měření. Vrchní smykový kroužek je naplněn materiálem a zakryt zatěžovací deskou na kterou se umístí závaží (viz obr. 30). Je zapnut posun a je provedeno samotné měření. Získané hodnoty jsou zpracovány dle (2.14) (2.15) a jsou vyneseny do grafu závislosti smykového napětí  $\tau$  a normálového napětí  $\sigma$ .

Body v grafu jsou spojeny lineární regresí a tangenta jejich směrnice křivky udává úhel vnějšího tření. K eliminaci chyb během měření bylo každé měření provedeno dvakrát až třikrát. Materiál byl mezi jednotlivými měřeními důkladně prokypřen.

Obrázek 30 Naplněný smykový stroj

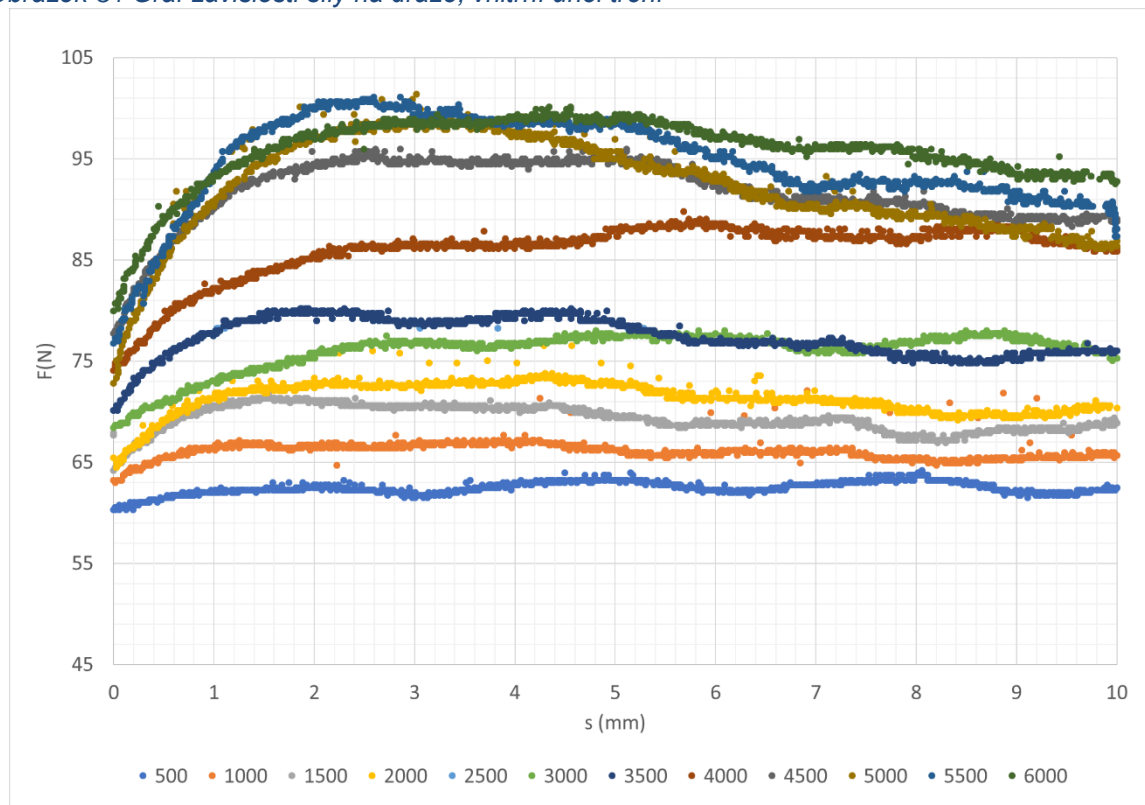


### 5.2.3. Naměřené hodnoty

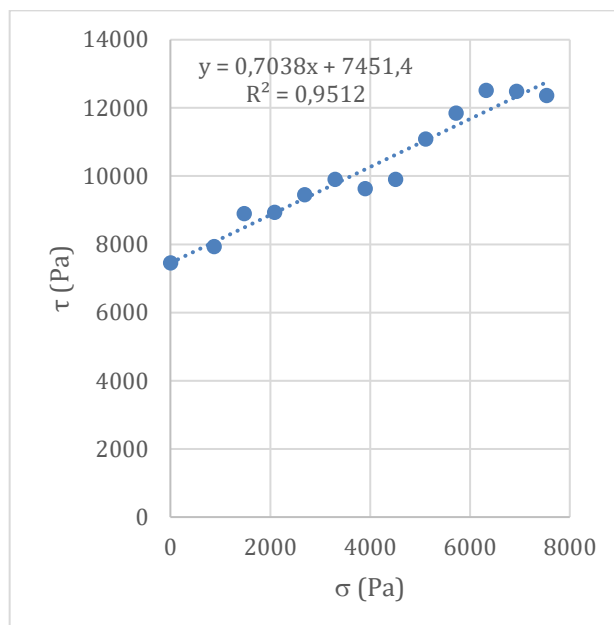
Výsledky byly uloženy v textovém formátu *csv*, který lze otevřít pomocí programu MS Excel. Tento program je použit ke zpracování naměřených dat.

Obrázek 31 a obr. 34 zobrazují křivku průběhu závislosti síly na dráze. Jednotlivé křivky jsou popsány podle velikosti závaží, které bylo při smykové zkoušce použito. Hodnoty zátěže byly v rozmezí od 500 do 6000 g, zátěž byla postupně navyšována o hodnotu 500 g. Dle vzorců (2.33) a (2.34) byly naměřené hodnoty síly přepočteny na normálové  $\sigma$  a smykové  $\tau$  napětí. Z vypočtených hodnot  $\sigma$  a  $\tau$  byly sestrojeny mezní křivky (viz obr. 32. a obr. 35). Obr. 33 a obr. 36 zobrazují Mohrovi kružnice znázorňující stav napjatosti.

Obrázek 31 Graf závislosti síly na dráze; vnitřní úhel tření

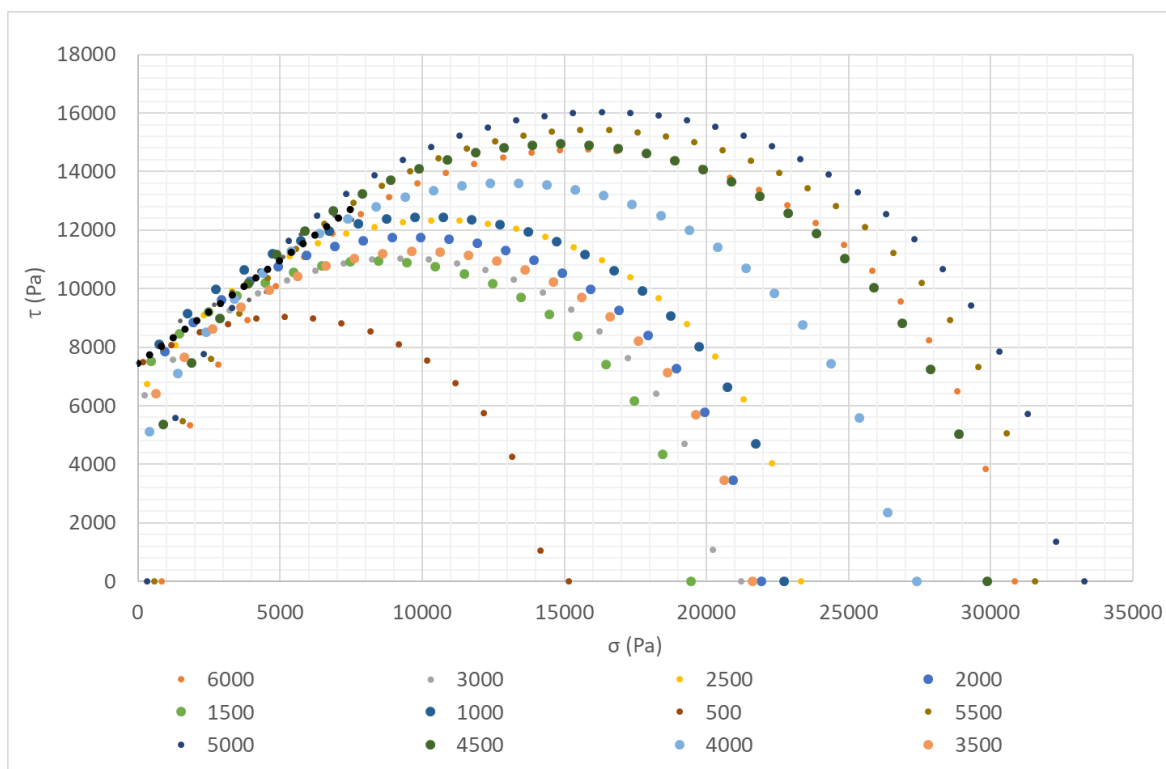


Obrázek 32 Mezní křivka; vnitřní úhel tření

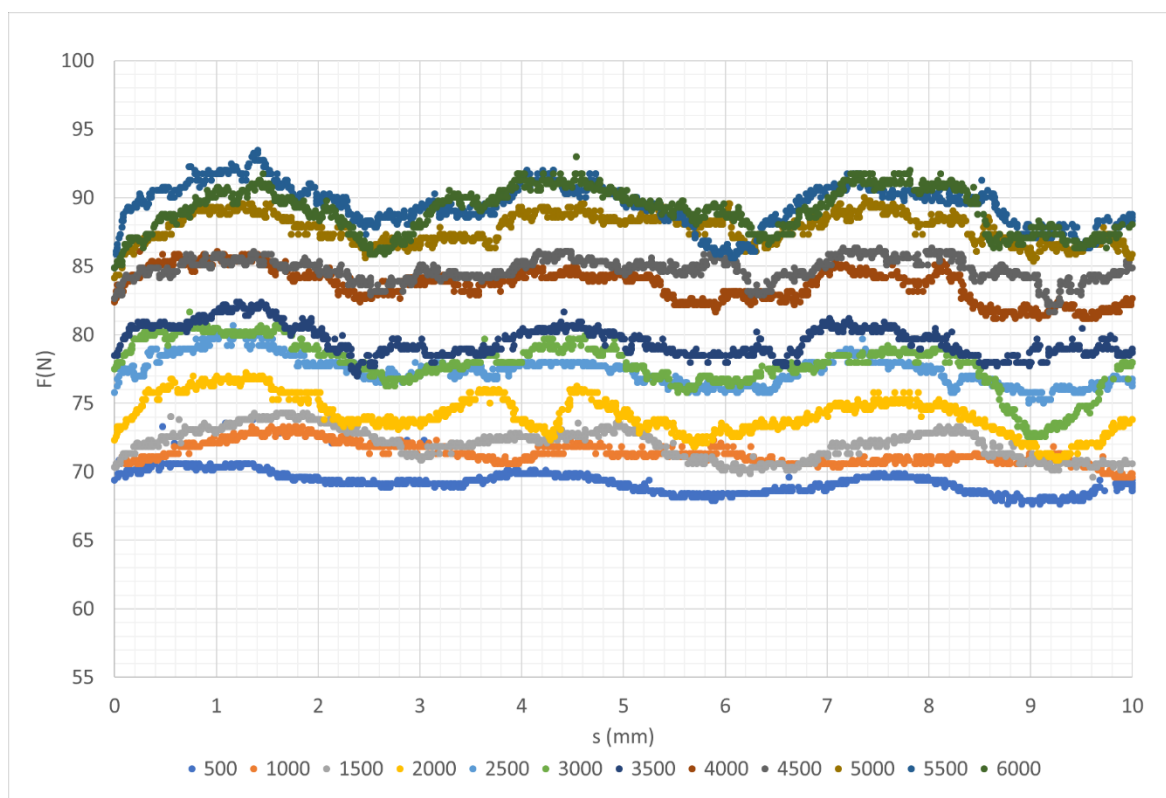


Pro vnitřní úhel tření je rovnice regrese:  $\tau = 0.7038\sigma + 7451.4$ ,  $R^2 = 0,9512$   
 Velikost naměřeného vnitřního úhlu tření  $35,01^\circ$ .

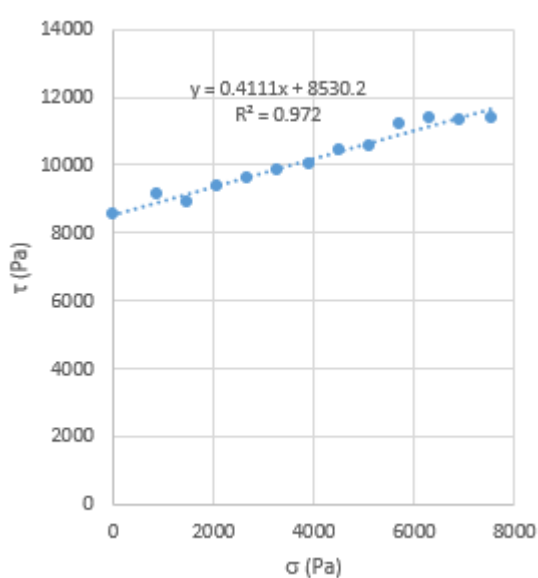
Obrázek 33 Mohrova kružnice; vnitřní úhel tření



Obrázek 34 Graf závislosti síly na dráze; vnější úhel tření

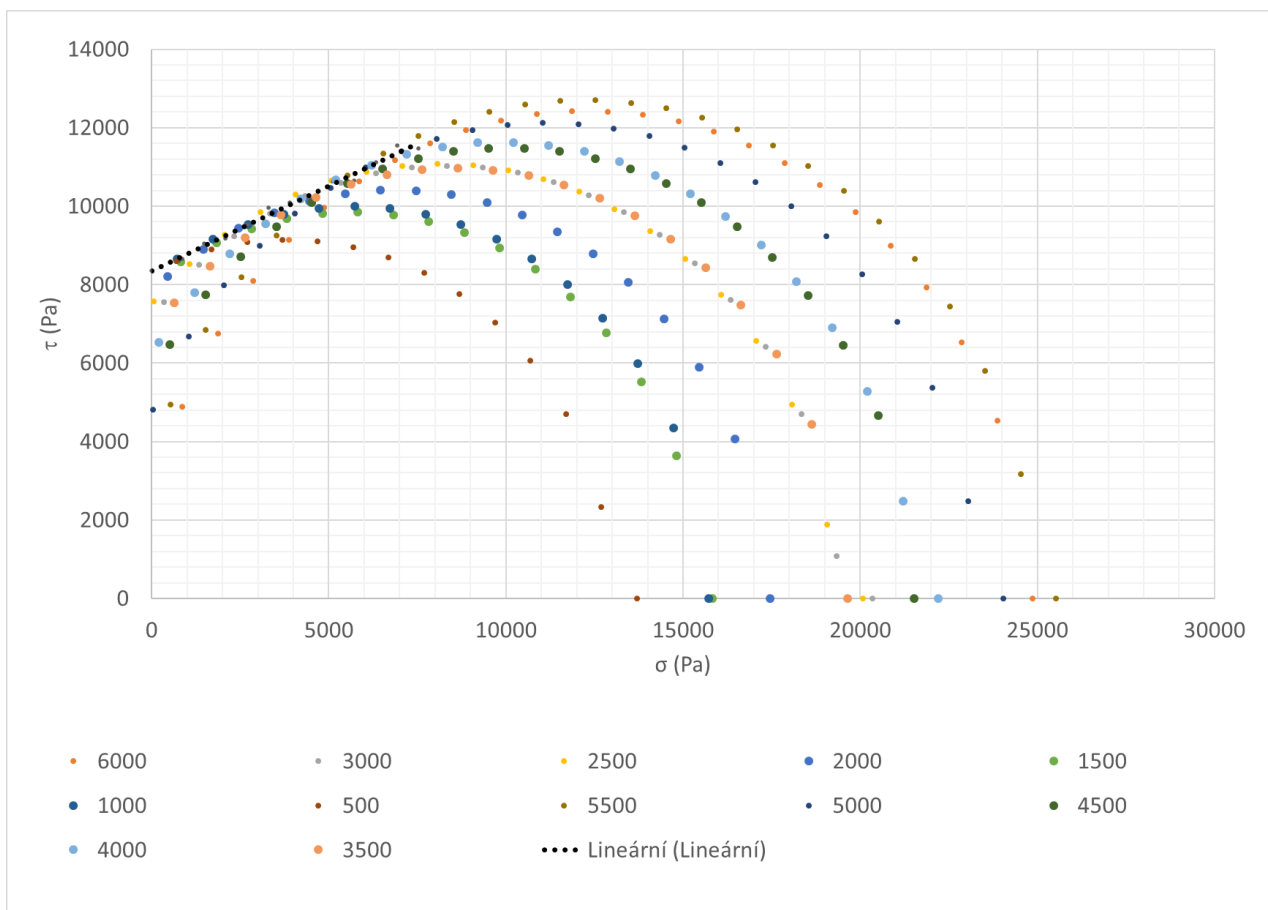


Obrázek 35 Mezní křivka; vnější úhel tření



Pro vnější úhel tření je rovnice regrese:  $\tau = 0.4111 + 8530.2$ ,  $R^2 = 0,972$   
 Velikost naměřeného vnějšího úhlu tření je  $23,15^\circ$

Obrázek 36 Mohrova kružnice; vnější úhel tření





#### 5.2.4. Měření vlhkosti

Měření vlhkosti vzorku bylo prováděno na přístroji MB25 (obr. 37) s halogenovým emitorem od firmy Ohaus nacházející se na katedře technologií zařízení staveb, TF, ČZU v Praze. Princip analyzátoru vlhkosti je založen na snížení hmotnosti měřeného vzorku v důsledku jeho ohřevu. K ohřevu se využívá zdroj tepla analyzátoru vlhkosti. Měření vlhkosti probíhalo v automatickém módu sušení s nastavenou maximální teplotou 105°C. Automatický mód času sušení znamená, že se proces vysoušení vypne, pokud v časovém intervalu 60 sekund nedojde u vzorku ke ztrátě hmotnosti alespoň o 1 mg.

Obrázek 37 Měřič vlhkosti OHAUS MB 25 (21)



Hmotnost vzorku značně ovlivňuje délku měření a přesnost naměřených dat. Čím větší hmotnost vzorku, tím víc vlhkosti musí být odpařeno, což značně prodlužuje čas měření. Hmotnost vzorku by se měla pohybovat mezi 3 a 20 g. A to podle požadované přesnosti měření (viz tab. 9).

Tabulka 9 Závislost přesnosti měření na velikosti vzorku (21)

Velikost vzorku (g)	Přesnost (%)
0,5	±1,0
1	±0,6
2	±0,3
5	±0,12
10	±0,06

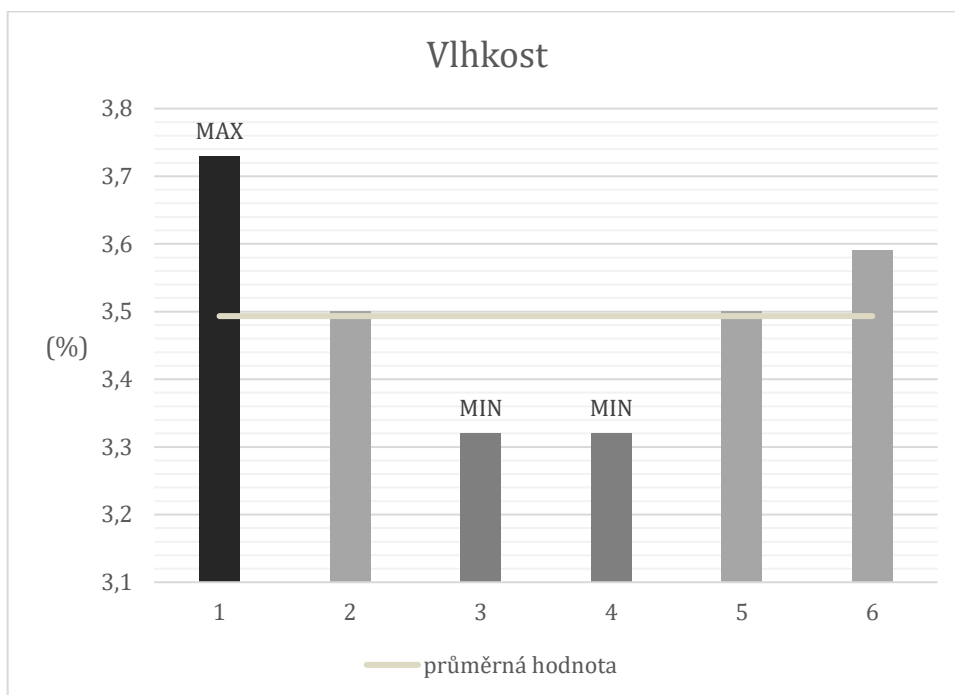
Měření vlhkosti bylo prováděno dle postupu uvedeného v manuálu. Zkušební nádoba byla umístěna do držáku a byla vynulována váha. Do zkušební nádoby byl rovnoměrně rozprostřen vzorek materiálu. Následně proběhlo samotné sušení. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 10. (21)

Tabulka 10 Naměřené hodnoty vlhkosti

Měření	m (g)	vlhkost (%)	t (min)
1	9,525	3,73	15
2	3,14	3,5	14,15
3	3,01	3,32	10,34
4	3,01	3,32	11,11
5	3	3,5	12,58
6	3,07	3,59	14,22
<b>Průměr <math>\bar{x}</math></b>	4,125833	3,493333	12,9
<b>Minimum</b>	3	3,32	10,34
<b>Maximum</b>	9,525	3,73	15
<b>Medián</b>	3,04	3,5	13,365
<b>Směrodatná odchylka <math>\sigma</math></b>	2,415068	0,144645	1,71148084

K prvnímu měření bylo použito 9,525 g řepky. Pro další měření byla hmotnost vzorku snížena na 3 g. Tento velký rozdíl významně ovlivnil průměr a směrodatnou odchylku hmotnosti. Směrodatná odchylka určuje, do jaké míry jsou hodnoty odchýleny od průměrné hodnoty.

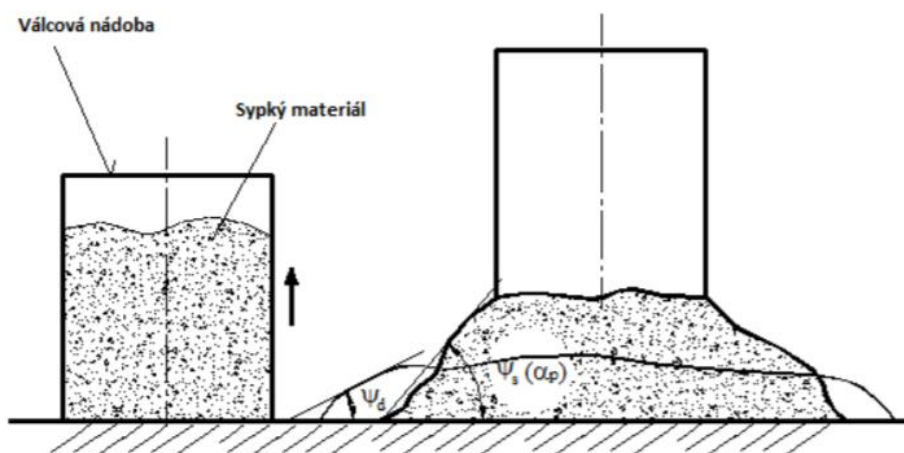
Obrázek 38 Naměřené hodnoty vlhkosti



### 5.2.5. Měření sypného úhlu

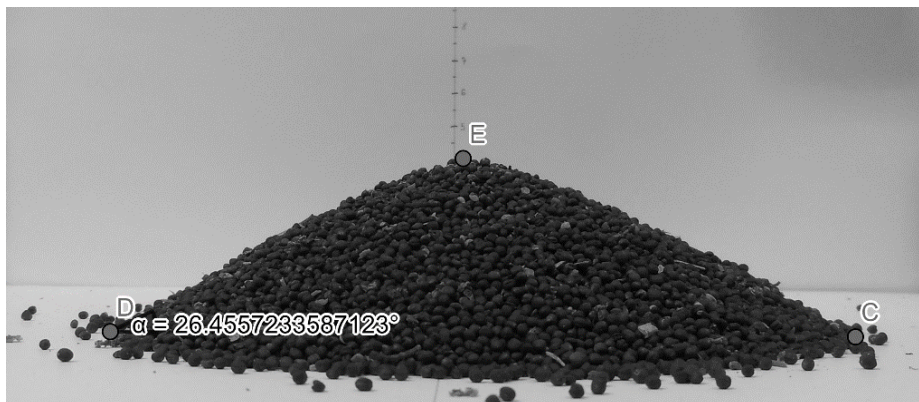
Měření sypného úhlu bylo prováděno sedimentační metodou. K měření byla použita plastová válcová nádoba o vnitřním průměru 4,85 cm a vnějším průměru 5 cm. Měření přirozeného sypného úhlu probíhalo následovně. Měřicí válec byl umístěn na podložku a naplněn měřeným vzorkem o objemu 225 ml z uzavřené nádoby. Následně byl válec opatrně odstraněn rovnoměrným vertikálním pohybem, tak aby došlo k vysypání celého vzorku (viz Obrázek 3939).

Obrázek 39 Měření úhlu přirozeného svahu sypké hmoty vysypáváním z válcové nádoby (22)



Vzniklá hromada byla vyfotografována pomocí fotoaparátu umístěném na stativu ve vzdálenosti 20 cm od podložky (obr. 40). Podložka byla opatrně očištěna od veškerého materiálu a celý proces se opakoval. Měření konsolidovaného sypného úhlu probíhalo obdobně jako měření přirozeného sypného úhlu. Ke konsolidaci vzorku bylo použito závaží o hmotnosti 0,5 kg, které na materiál působilo po dobu 10 minut.

Obrázek 40 Měření sypného úhlu

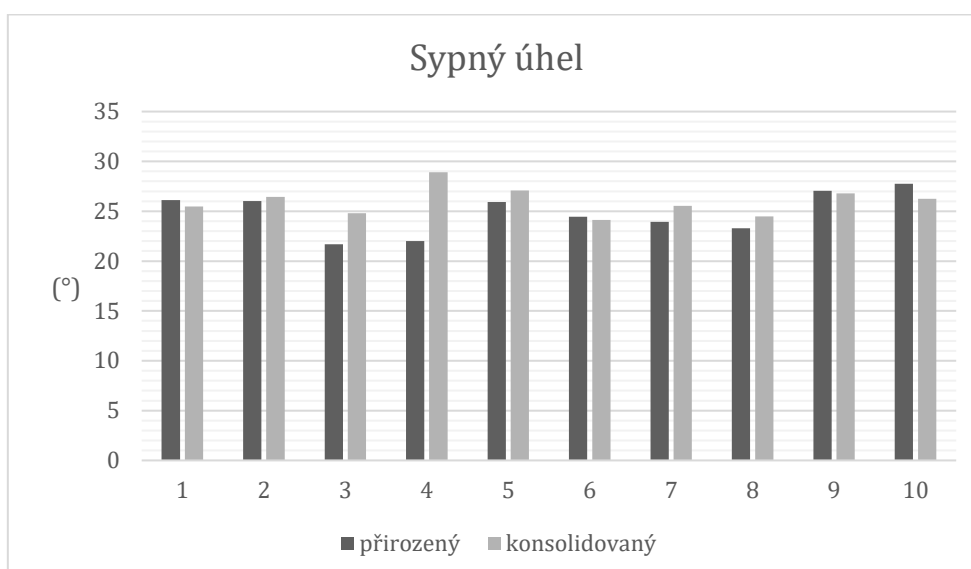


Vyhodnocení hodnot sypného úhlu proběhlo pomocí open source programu GeoGebra. Data byla zpracována v programu MS Excel a naměřené hodnoty sypného úhlu jsou uvedeny v tab. 11.

Tabulka 11 Naměřené hodnoty sypného úhlu

Měření	Sypný úhel (°)	
	přirozený	konsolidovaný
1	26,110	25,465
2	26,029	26,455
3	21,678	24,797
4	22,011	28,912
5	25,928	27,096
6	24,463	24,130
7	23,925	25,548
8	23,305	24,488
9	27,051	26,802
10	27,773	26,254
<b>Průměr</b>	24,827	25,995
<b>Max</b>	27,773	28,912
<b>Min</b>	21,678	24,130
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,976	1,353
<b>Medián</b>	25,196	25,901

Obrázek 41 Naměřené hodnoty sypného úhlu



Z naměřených hodnot lze konstatovat, že průměrná hodnota přirozeného sypného úhlu je  $24,827^\circ$ . Medián je roven  $25,196$ . V tomto případě tedy nejsou střední hodnoty (aritmetický průměr a medián) výrazně odlišné. Směrodatná odchylka  $1,976$  signalizuje relativně větší odchýlení od aritmetického průměru. Průměrná hodnota konsolidovaného sypného úhlu je  $25,995^\circ$  a medián je roven  $25,901$ . Střední hodnoty jsou tedy téměř totožné. Směrodatná odchylka  $1,353$  ukazuje, že naměřené sypné konsolidované úhly jsou si podobné. Z porovnání hodnot přirozeného a konsolidovaného sypného úhlu vyplývá, že hodnoty přirozeného úhlu jsou menší. Velikost rozdílu je ovlivněna dobou konsolidace a hmotností závaží.

### 5.3. Automatizace výpočtu

Z důvodu usnadnění práce s daty je vhodné veškeré výpočty automatizovat. Skript napsaný v programu Scilab 6.0.1 pracuje s naměřenými daty. V příloze je uveden skript (viz kód 1), který na jedno spuštění vybere všechny csv soubory ve vybrané složce. Následně provede odečet dráhy a napětí, výpočet hmotnosti a síly. Vykreslí graf závislosti síly na dráze pro každý jednotlivý csv soubor a vypočtené hodnoty uloží do nového souboru, tak aby naměřené hodnoty v původním souboru zůstaly zachovány (viz obr. 42). Je vytvořen souhrnný graf závislosti síly na dráze. Dále program provede výpočet a vykreslení mezní křivky a Mohrovi kružnice (viz obr. 43)

Obrázek 42 Ukázka skriptu

The screenshot displays the Scilab 6.0.1 environment. On the left, a script editor shows a MATLAB-style script for processing CSV files. The script includes commands for clearing the workspace, loading files, and calculating force (F) based on distance (s). A plot window titled '2\_1000' is open, showing a graph of Force F (N) versus distance s (mm). The y-axis ranges from 50 to 68 N, and the x-axis ranges from 0 to 10 mm. The plot shows a noisy signal that rises from approximately 50 N at s=0 to a peak of about 65 N between s=2 and s=8, before dropping sharply. On the right, a 'Prohlížeč proměnných' (Variable Inspector) window shows a list of variables and their values, such as 'a' (0.0081), 'ans' (1x1), 'csv' (4x1), 'da' (1x1), 'data' (3072x4), 'f' (3072x1), 'fi' (1x1), 'fmax' (4x2), 'g' (9.81), 'j' (4), 'j' (3.07e...), 'jmeno' (1x1), 'k0' (8.48e...), 'k1' (3.24e...), 'knh' (2.63), 'l' (90), 'm' (3072x1), 'maxVa...' (3.8), 'mdesky' (0.22), 'n' (4), 'neh' (1), 'pc' (3072x1), 's' (3072x1), 's1' (2.28), 'sigma' (872: ...), 'sn0' (2583x2), 'sv' (3072x1), 'svetkost' (3.07e...), 'svetko...' (2.35e...), '722', 'tau' (8.05e...), 'tauSigma' (6.27e...), 'u' (3072x1), 'u1' (1.14), 'uv' (3072x1), and 'vypoct...' (3072x6).

Obrázek 43 Ukázka vykreslených grafů v programu Scilab

The screenshot shows three plots generated in Scilab. The top plot, titled 'Mohrova kružnice', is a Mohr's circle plot showing shear stress  $\tau$  (Pa) on the y-axis (ranging from 0 to 12,000) versus normal stress  $\sigma$  (Pa) on the x-axis (ranging from -4,000 to 22,000). The data points form a semi-circular arc. Below this, two plot windows are shown. The left window, titled 'Závislost síly na dráze', shows Force F (N) on the y-axis (ranging from 60 to 75) versus distance s (mm) on the x-axis (ranging from 0 to 10). It displays multiple noisy curves representing force versus distance. The right window, titled 'Mezni křivka', shows shear stress  $\tau$  (Pa) on the y-axis (ranging from 1,000 to 2,500) versus normal stress  $\sigma$  (Pa) on the x-axis (ranging from 8,000 to 9,400). It shows a few data points forming a curve.

## 6. Diskuze

Smykové zkoušky hrají důležitou roli při zjišťování základních vlastností sypkých látek. Znalost tokových vlastností materiálu je podstatná při dopravě, skladování a manipulaci. Měření byla realizována za stabilních laboratorních podmínek při teplotě 21–22 °C a relativní vlhkosti vzduchu  $30 \pm 1$  %. Měření vnitřního a vnějšího tření bylo provedeno dvakrát až třikrát. Tab. 12 obsahuje zprůměrované hodnoty naměřených dat.

### 6.1. Vnější a vnitřní úhel tření

Úhel vnitřního tření představuje tření mezi jednotlivými zrny materiálu a je ovlivněn působícím normálovým napětím a mírou konsolidace. Úhel vnějšího tření je úhel, při kterém se partikulární materiál začíná klouzat po podložce. Je výrazně ovlivněn typem podkladového materiálu. Velikost naměřeného vnitřního úhlu tření  $35,01^\circ$ . Velikost naměřeného vnějšího úhlu tření je  $23,15^\circ$ .

Naměřené hodnoty vnitřního úhlu odpovídá hodnotám od autorů Quian, Xuduo a Xue (2019), které se pohybují od  $23,91 \pm 0,28^\circ$  při vlhkosti 6,58% do  $34,99 \pm 1,08^\circ$  při vlhkosti 11,16%. Úhel vnitřního tření  $28,10^\circ$  při vlhkosti 5,5 % byl naměřen autory Kornél, Bernát (2015). Z porovnání hodnot vyplývá, že velikost vnitřního úhlu závisí na vlhkosti. (23; 24)

## 6.2. Porovnání naměřených hodnot sypného úhlu

Naměřené hodnoty sypného úhlu jsou společně s hodnotami sypného úhlu a vlhkosti autorů Hong, Duc (2008) a Izli, Unal (2009) jsou uvedeny v tab. 10.

*Tabulka 12 Porovnání hodnot sypného úhlu*

	Sypný úhel (°)	Vlhkost (%)	
<b>Naměřené hodnoty</b>	24,83 ±1,97	3,5	
	26,12±0,340	10	
<b>S.J. Hong, L.A. Duc (2008)</b>	27,04±0,269	14,91	
	Odrůda Capitol	21,97±0,62	8,3
	Odrůda Jetneuf	18,22±1,15	7,7
<b>N.Izli, H.Unal (2009)</b>	Odrůda Samurai	18,91±1,05	7,3
	Odrůda Capitol	23,34±0,53	15,9
	Odrůda Jetneuf	19,73±1,67	15,6
	Odrůda Samurai	20,26±0,99	15,5

Naměřená hodnota sypného úhlu je  $24,83 \pm 1,97^\circ$  při vlhkosti 3,5 %, což odpovídá hodnotám Hong, Duc (2008). Z tabulky vyplývá že s rostoucí vlhkostí roste velikost sypného úhlu. Z porovnání hodnot dále vyplývá, že velikost sypného úhlu závisí na vlhkosti. Dalším určujícím faktorem je odrůda plodiny, a z ní odvíjející se tvarové a rozměrové rozdíly.



## 7. Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou partikulárních materiálů. Tyto materiály jsou velmi komplexní a ani přesná znalost základních parametrů neumožňuje určit jejich chování. K tomuto účelu slouží experimentální měření a počítačové simulace, kterými můžeme zjistit chování jednotlivých partikulárních látek. Tyto poznatky výrazně pomáhají při návrhu a realizaci zásobníků, dopravníků aj.

V teoretické části jsou popsány základní charakteristické vlastnosti partikulárních látek. Je popsána problematika vazeb mezi částicemi a mechanického chování partikulárních látek v rozsahu potřebném k porozumění principu smykové zkoušky. Následně jsou popsány nejpoužívanější přístroje pro měření smykových vlastností včetně principu měření na jednotlivých přístrojích. Popis je zaměřen na Jenikeho smykový stroj a standardní postup smykové zkoušky. Dále je popsána alternativa Jenikeho stroje, rotační smykový stroj.

V experimentální části diplomové práce je měření vlastností řepky olejně, která se svým tvarem blíží ideálně kulatému tvaru. Bylo provedeno měření vlhkosti, sypného úhlu, vnitřního a vnějšího úhlu tření. Z vyhodnocení výstupních dat měření sypného úhlu a jejich porovnání s již existujícími hodnotami vyplývá, že sypný úhel je značně ovlivněn vlhkostí vzorku a typem odrůdy. Pro měření vnitřního a vnějšího úhlu tření byl použit mobilní smykový stroj. K zautomatizování práce s daty byl napsán skript v softwaru Scilab. Výsledky práce mohou být použity při matematickém *modelování* pohybu sypkých hmot metodou diskretních prvků (*DEM*) v softwaru RockyDEM.

## 8. Seznam použitých zdrojů

- (1) FEDA, Jaroslav. *Základy mechaniky partikulárních látek*. 1. Praha: Academia, 1977. ISBN Základy mechaniky partikulárních látek.
- (2) MEDEK, Jaroslav. *Mechanické pochody*. Vyd. 3. přeprac. Brno: PC-DIR, 1998. ISBN 80-214-1264-X.
- (3) ZEGZULKA, Jiří. *Mechanika sypkých hmot*. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0699-1.
- (4) KEEY, R. *Drying of loose and particulate materials*. 1992. New York: Hemisphere Pub., 1992. ISBN 08-911-6878-8.
- (5) FAYED, M. a L. OTTEN. *Handbook of powder science and technology*. 2. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1984. ISBN 04-422-2610-1.
- (6) MEDEK, Jaroslav. *Mechanické pochody*. Vyd. 3. přeprac. Brno: PC-DIR, 1998. ISBN 80-214-1264-X.
- (7) JESENÁK, Karol. *Analýza veľkostí častíc* [online]. Bratislava: Přírodovědecká fakulta Univerzity Komenského, 2008 [cit. 2019-03-20]. ISBN 978-80-223-2464-9. Dostupné z: <http://staryweb.fns.uniba.sk/index.php?id=jesenak2008>
- (8) POUCHLÝ, Julius. Integrovaný systém elektronických studijních opor VŠCHT Praha. *Diferenciální rozdělovací funkce velikostí částic* [online]. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_es-001/motor/main.obsah.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/motor/main.obsah.html)
- (9) Objemová hmotnost- fyzikální veličiny. *IZOLACE-INFO* [online]. Olomouc: Izolace-info, 2013 [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: <https://www.isolace-info.cz/technicke-informace/fyzikalni-veliciny/9483-objemova-hmotnost-fyzikalni-veliciny-a.html#.XCOn-ow89PZ>
- (10) SCHULZE, Dietmar. *Powders and bulk solids: behavior, characterization, storage and flow*. 1. New York: Springer, 2008. ISBN 35-407-3767-7.
- (11) KÉZDI, Árpád a László RÉTHÁTI. *Handbook of soil mechanics*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1974. ISBN 96-305-0088-4.
- (12) SCHULZE, Dietmar. *Flow properties of powders and bulk solids*. 2014. b.r. Dostupné také z:

[https://www.researchgate.net/publication/267818207\\_Flow\\_Properties\\_of\\_Powders\\_and\\_Bulk\\_Solids](https://www.researchgate.net/publication/267818207_Flow_Properties_of_Powders_and_Bulk_Solids)

- (13) PAVLISKA, Jiří a Leopold HRABOVSKÝ. *Dopravní a manipulační zařízení IV*. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0537-5.
- (14) BAGHABRA AL-AMOUDI, Omar S. a Hamzah M. BEAKAWI AL-HASHEMI. A review on the angle of repose of granular materials. *PowderTechnology* [online]. Elsevier, 2018, **2018**(330), 398-414 [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0032591018301153?token=D84B7640F1779CFD848B63B12AA2501D6272CBE8719D4FED0DA07AB37C23CC8700E03E7D7FBA8A5B001B468C20E9D444>
- (15) *Standard smykové zkoušky partikulárních hmot pomocí Jenikeho smykového stroje: Standard shear testing technique for particulate solids using the Jenike shear cell = Standardmethode zur Charakterisierung von Schüttgütern mit dem Jenike Schergerät*. 1. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1051-4.
- (16) *Powder Testing with the FT4 Powder Rheometer* [online]. United Kingdom: Freeman Technology, 2015 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <https://www.freemantech.co.uk>
- (17) Řepka olejná. *Zf.jcu.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: [http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/Repka\\_olejna.htm](http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/Repka_olejna.htm)
- (18) [online]. b.r. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: [http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/Repka\\_olejna.htm](http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/Repka_olejna.htm)
- (19) GM25-370CHV-286-R. In: *Gme.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-03-29]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/elektricky-motorek-s-prevodovkou-gm25-370chv-286-r>
- (20) *Vtsz: Tenzometry a snímače pro průmyslovou výrobu* [online]. Zlín, 2019 [cit. 2019-03-29]. Dostupné z: <https://vtsz.cz>
- (21) *Ohaus* [online]. Shanghai, 2016 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <https://asiapacific.ohaus.com/en-AP/>
- (22) POLÁK, Jaromír, Jiří PAVLISKA a Aleš SLÍVA. *Dopravní a manipulační zařízení I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 80-248-0043-8.

- (23) TAMÁS, Kornél, Bernát FÖLDESI, János Péter RÁDICS, István J. JÓRI a László FENYVESI. A Simulation Model for Determining the Mechanical Properties of Rapeseed using the Discrete Element Method. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2015, **59**(4), 575-582. DOI: 10.3311/PPci.8173. ISSN 05536626. Dostupné také z: <https://pp.bme.hu/ci/article/view/8173>
- (24) QIAN, Xu, Cheng XUDUO a Chen XUE. Models for predicting frictional properties of rapeseed. *International Agrophysics*. 2019, **2019**(33), 61-66.

## Seznam obrázků a tabulek:

Obrázek 1 Řez partikulární částicí (1) .....	2
Obrázek 2 Tvary pevných částic (2) .....	3
Obrázek 3 Definice velikosti částice třemi vzájemně kolmými rozměry (4) .....	5
Obrázek 4 Tvar částice podle její podlouhlosti a plochosti (1).....	5
Obrázek 5 Charakteristické distribuční křivky (8) .....	7
Obrázek 6 Diferenciální rozdělovací křivka .....	8
Obrázek 7 Integrální distribuční křivka .....	8
Obrázek 8 Rozdělení póru dle tvaru a velikosti (2).....	10
Obrázek 9 Třecí vazby (1).....	13
Obrázek 10 Kézdiho diagram (1).....	14
Obrázek 11 Síla působící na materiál (a), Výsledné síly (b) (10) .....	15
Obrázek 12 Elementární trojboký hranol (10).....	16
Obrázek 13 Převedení napětí do závislosti pomocí Mohrovi kružnice (2) .....	18
Obrázek 14 Jednoosá zkouška tlakem.....	18
Obrázek 15 Klasifikace tokovosti partikulárních materiálů (10) .....	19
Obrázek 16 Stěnové třen (12) í .....	20
Obrázek 17 Výsledek měření stěnového tření (10) .....	20
Obrázek 18 Metody měření statického úhlu (2).....	22
Obrázek 19 Metody měření dynamického úhlu (2).....	23
Obrázek 20 Typy smykových strojů (16) .....	24
Obrázek 21 Jenikeho smykový stroj (1) .....	25
Obrázek 22 Průběh smykové síly v závislosti na stupni konsolidace (15).....	27
Obrázek 23 Schulzův prstencový rotační stroj (10).....	28
Obrázek 24 Časový průběh měření smykové síly (rotační smykový stroj) (10).....	29
Obrázek 25 Mobilní zařízení pro smykovou zkoušku (18).....	32
Obrázek 26 Ovládací zařízení .....	33
Obrázek 27 Značení tenzometrů (20).....	34
Obrázek 28 Software Radlice v. 1.0.6.0 .....	35
Obrázek 29 Princip činnosti zařízení pro měření smykové soudržnosti a třecích vlastností sypaných materiálů.....	36
Obrázek 30 Naplněný smykový stroj .....	37
Obrázek 31 Graf závislosti síly na dráze; vnitřní úhel tření .....	38
Obrázek 32 Mezní křivka; vnitřní úhel tření .....	38

Obrázek 33 Mohrova kružnice; vnitřní úhel tření .....	39
Obrázek 34 Graf závislosti síly na dráze; vnější úhel tření .....	39
Obrázek 35 Mezní křivka; vnější úhel tření.....	40
Obrázek 36 Mohrova kružnice; vnější úhel tření .....	40
Obrázek 37 Měřič vlhkosti OHAUS MB 25 (21).....	41
Obrázek 38 Naměřené hodnoty vlhkosti .....	43
Obrázek 39 Měření úhlu přirozeného svahu sypké hmoty vysypáváním z válcové nádoby (22) .....	43
Obrázek 40 Měřené sypného úhlu .....	44
Obrázek 41 Naměřené hodnoty sypného úhlu .....	45
Obrázek 42 Ukázka skriptu .....	46
Obrázek 43 Ukázka vykreslených grafů v programu Scilab .....	46
Tabulka 1 Tvar částic (2).....	4
Tabulka 2 Rozdělení materiálů do tříd podle hodnoty sypného úhlu (2).....	21
Tabulka 3 Ukázka hodnot statického sypného úhlu (14) .....	21
Tabulka 4 Standardizované rozměry smykové cely (15) .....	25
Tabulka 5 Parametry motoru (19).....	32
Tabulka 6 Tenzometr (20) .....	33
Tabulka 7 Koeficienty pro tenzometry (20).....	34
Tabulka 8 Závaží použitá při měření .....	35
Tabulka 9 Závislost přesnosti měření na velikosti vzorku (21) .....	42
Tabulka 10 Naměřené hodnoty vlhkosti .....	42
Tabulka 11 Naměřené hodnoty sypného úhlu .....	44
Tabulka 12 Porovnání hodnot sypného úhlu .....	48

## Seznam symbolů a zkratk

$\varepsilon$	( $m$ )	poměr deformace
$w$	(%)	vlhkost
$n$	(–)	pórovitost materiálu
$g$	( $m \cdot s^{-2}$ )	gravitační zrychlení
$e$	(–)	číslo pórovitosti
$T$	( $m$ )	tloušťka částice
$L$	( $m$ )	délka částice
$D$	( $mm$ )	průměr smyk. kroužku
$d_{10,50,90,99}$	( $\mu m$ )	granulometrické charakteristiky
$B$	( $m$ )	šířka částice
$A$	( $m^2$ )	povrch
$\tau$	( $Pa$ )	smykové napět
$\sigma$	( $Pa$ )	normálové napětí
$\tau_f^k$	( $Pa$ )	smyková pevnost kontaktního můstku
$\tau_f$	( $Pa$ )	smyková pevnost povrchů
$\sigma_f^k$	( $Pa$ )	normálové napětí pro suché tření
$\sigma_c$	( $Pa$ )	mezni stav napjatosti
$\sigma_c$	( $^\circ$ )	úhel stěnového tření
$\sigma_1$	( $Pa$ )	konsolidační napětí
$\theta_s$	( $^\circ$ )	statický sypný úhel
$\theta_d$	( $^\circ$ )	dynamický sypný úhel
$\gamma_s$	( $g \cdot cm^{-3}$ )	měrná hmotnost
$\gamma_d$	( $g \cdot cm^{-3}$ )	objemová hmotnost
$\alpha_e$	(–)	redukovaný objemový součinitel
$m_t$	(–)	plochost
$m_W$	( $kg$ )	hmotnost závaží
$m_R$	( $kg$ )	hmotnost smykového kroužku
$m_L$	( $kg$ )	hmotnost smykového víčka
$m_H$	( $kg$ )	hmotnost závěsu
$m_B$	( $kg$ )	hmotnost vzorku v smykové cele
$m_1$	(–)	podlouhlost
$ffc$	(–)	index flow function
$d_v$	( $m$ )	průměr koule o stejném objemu jako částice
$d_s$	( $m$ )	průměr koule o stejném povrchu jako částice
$a_k$	( $m^2$ )	plocha kontaktních můstků
$a_g$	( $m^2$ )	geometrická dotyková plocha
$V_s$	( $g \cdot cm^{-3}$ )	objem pevných částic.
$V_d$	( $g \cdot cm^{-3}$ ),	objem látky

$R_{\varepsilon,25}$	$(\Omega)$	odpor deformovaného tenzometru
$R_{0,25}$	$(\Omega)$ ,	odpor volného tenzometru
$Q_v$	$(g)$	hmotnost kapaliny obsažené ve vzorku
$Q_s$	$(g)$ ,	hmotnost látky
$Q_s$	$(g)$	hmotnost vzorku
$H_r$	$(mm)$	výška smykového kroužku
$H_m$	$(mm)$	výška formovacího kroužku
$H_b$	$(mm)$	výška smykové misky
$F_s$	$(N)$	smyková síla
$F_n$	$(N)$	normálová síla



## 9. Přílohy

### Příloha 1 Skript k automatickému zpracování dat

```
10. clc
11. clear
12.
13. csv = listfiles('*.*csv');
14.
15. l=90; // délka strany zatěžovací desky(mm)
16. a=(l/1000)^2; // plocha (m2)
17. mdesky=0.21968; // hmotnost zatěžovací desky (kg)
18. g=9.81373; // tíhové zrychlení (m*s-2)
19.
20. for i=1:size(csv,1) //cyklus otevírající jednotlivé csv soubory
21.     disp('Opening file: '+csv(i));
22.     HmotnostSouboru = strsplit(csv(i),'_');
23.     hmotnost=strtod(strsubst(HmotnostSouboru(2),".csv",""))/1000;
24.     //zjistuje hmotnost vzorku z názvu souboru !hmotnost vzorku musí být uvedena v názvu!
25.     data = csvread(csv(i),ascii(59),',','double');
26.     jmeno=fileparts(csv(i),'fname')
27.     legenda(i,:)=jmeno;
28.
29.     pc=data(:,1); //pořadové číslo
30.     u=data(:,3); //načtení napětí U(V)
31.     s=data(:,4); //načtení dráhy s(mm)
32.     j=length(s); //počet hodnot drahy
33.
34.     m=u*5.1339-0.0499 //výpočet hmotnosti vzorku m(kg)
35.     f=m*9.81373 //výpočet síly F (N)
36.     fmax(i,2)= max(f) // zjištění maximální hodnoty síly F (N)
37.     fmax(i,1)=hmotnost// zapsat hmotnost použitého zavaží do souboru
38.     s1=data(1,4); //první hodnota drahy
39.     u1=data(1,3); //první hodnota napětí
40.
41.     for n=1:j
42.         sv=s-s1; // s od 0 (mm)
43.         uv=u-u1; //u od 0 (V)
44.     end
45.
46.     svelikost=size(sv);
47.     svelikostindex = svelikost(1,1);
48.     while svelikostindex > 1
49.         if(sv(svelikostindex,1) == 0)
50.             break;
51.         end
52.         svelikostindex = svelikostindex-1
53.     end
54.     svelikostIndex2 = 1;
55.
56.     // zjištění maximálního počtu hodnot dráhy, od kdy je dráha nulová
57.     maxValue = 0;
58.     for i=svelikostindex:svelikost(1,1)
59.         s0(svelikostIndex2,1)= sv(i,1);
60.         s0(svelikostIndex2,2)= f(i,1);
61.         if(s0(svelikostIndex2,1)> maxValue)
62.             maxValue = s0(svelikostIndex2,1);
63.         end
64.         svelikostIndex2 = svelikostIndex2 +1;
65.     end
66.
67.
```

```

68.
69.
70.
71.
72.
73.
74.     knh = 10/maxValue;
75.     //nastavení stupnice od 0 do 10
76.     for i=1:size(s0,1)
77.         sn0(i,1) = s0(i,1)*knh;
78.         sn0(i,2) = s0(i,2);
79.     end
80.
81.
82.     scf(0); // graf závislosti síly na dráze pro jednotlivé zatížení
83.     plot2d( sn0(:,1),sn0(:,2));
84.     xlabel ("s (mm)", "fontsize",4);
85.     ylabel("F (N)", "fontsize",4);
86.     title (jmeno,"fontsize",4);
87.     xs2png(0,"graf_"+jmeno+".jpg"); //uloží vykreslený graf
88.     clf(0);
89.
90.     scf(1); //graf závislosti síly na dráze celkový
91.     plot2d(sn0(:,1),sn0(:,2));
92.     xlabel ("s (mm)", "fontsize",4);
93.     ylabel("F (N)", "fontsize",4);
94.     title ("Závislost síly na dráze", "fontsize",4);
95.
96.
97.
98.     vypocteno=[pc,u, uv,s,m,f]; //zápis vypočtených hodnot dráhy a síly do souboru
99.     csvWrite(vypocteno, "vypocteno_"+jmeno+".csv",ascii(59), '.') //uloží vypočtené hodnoty
100.
101. end
102. xs2png(1,"Závislost síly na dráze.jpg");
103.
104. for i=1:size(csv,1) // výpočet hodnot tau a sigma
105.     tau(i,:)=fmax(i,2)/a; // tau (Pa)
106.     sigma(i,:)=(((mdesky+fmax(i,1))*g)/a); //sigma(Pa)
107. end
108. n= size(csv,1)
109. tauSigma = 0;
110.
111. for i=1:size(tau,1)
112.     tauSigma = tauSigma+(tau(i,1)*sigma(i,1))
113. end
114.
115. //smernice
116. k1 = ((n*tauSigma)-(sum(sigma)*sum(tau)))/((n*sum(sigma.^2)-(sum(sigma)^2));
117. k0 = ((sum(sigma.^2)*sum(tau)-(sum(sigma)*tauSigma))/((n*sum(sigma.^2)-(sum(sigma)^2)));
118.
119. for i=1:size(csv,1)
120.     fi(i,:)=atan((tau(i,1)-k0)/sigma(i,1)) // uhel fi (rad)
121. end
122.
123. for i=1:size(csv,1)
124.     fi2(i,1)=((fi(i,1)/3.14)*180) // uhel fi (°)
125. end
126.
127. for i=1:size(csv,1)
128.     deltasigma(i,:) = tan(fi(i,:))*tau(i,:); //výpočet delta sigma
129.     sigmar(i,:) = (tau(i,+)/cos(fi(i,:))); //výpočet sigma r
130. end
131.
132.
133.

```

```

134.
135.
136.
137.
138.
139.
140. for i=1:size(csv,1) // vykreslení bodů mezní křivky
141.     f=scf(2);
142.     plot2d(tau(i,1),sigma(i,1));
143.     graf = gce();
144.     st= graf.children;
145.     st.mark_style = 9 ;
146.     st.line_mode = "off";
147.     xlabel ("σ (Pa)", "fontsize",4);
148.     ylabel ("τ (Pa)", "fontsize",4);
149.     title ("Mezní křivka", "fontsize",4);
150. end
151. xs2png(2,"Mezni křivka.jpg")
152.
153.
154.
155. for i=1:size(csv,1) //výpočet bodů Mohrovi kružnice
156.     sigmastred = sigma(i,:)+deltastred(i,:);
157.     sigma1 = sigmastred - sigmar(i,:);
158.     sigma2 = sigmastred + sigmar(i,:);
159.
160.     sigmabody (1,i) = sigma1;
161.     taubody (1,i) = 0;
162.     for j=2:50
163.         sigmabody (j,i) = sigmabody(j-1,i) + 1000;
164.         taubody (j,i) = ((sigmar(i,1)^2-(sigmabody (j,i)-sigmastred)^2)^(1/2));
165.         if(isreal(taubody(j,i),1) == %f)
166.             taubody(j,i) = 0;
167.             break;
168.         end
169.     end
170. end
171.
172. for i=1:size(csv,1) //vykreslení Mohrovi kružnice
173.     f=scf(3);
174.     plot2d(sigmabody(:,i),taubody(:,i));
175.     graf = gce();
176.     st= graf.children;
177.     st.mark_style = 9 ;
178.     st.line_mode = "off";
179.     xlabel ("σ (Pa)", "fontsize",4);
180.

```