

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**CHARAKTERIZACE PARTIKULÁRNÍCH
LÁTEK ZÍSKANÝCH PŘI FILTRACI
PRACHU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019/20

FILIP PROKOP

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Michala Netušila Ph.D. a konzultanta Prof. Ing. Pavla Ditla, Dr.Sc.

V Praze dne 6.8.2020



.....
Jméno a Příjmení

Anotační list

Jméno autora: Filip

Příjmení autora: Prokop

Název práce česky: Charakterizace partikulárních látek získaných při filtraci prachu

Název práce anglicky: Characterization of particulate matter obtained from dust filtration

Rozsah práce:

počet stran: 129

počet obrázků: 75

počet tabulek: 20

počet příloh: 24

Akademický rok: 2019/20

Jazyk práce: český

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: Procesní inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Michal Netušil, Ph.D.

Konzultant práce: prof. Ing. Pavel Ditl, DrSc.

Zadavatel: Škoda Auto a.s.

Anotace česky: Autor se nejprve zaměřil na rešerši v oblasti teorie sedimentace koncentrovaných suspenzí a vlivu polydisperzity na porozitu částicových systémů. Byla porovnána řada modelů kompenzujících vyšší koncentrace suspenze. Byly také popsány dva základní přístupy pro analýzu hustoty uspořádání částic. Tyto poznatky byly následně použity pro návrh metodiky analýzy prachu získaného při prašných zkouškách vozů, a sice sedimentační zkoušky a měření sklepné a sypné hustoty. Výstupem této práce je metodický postup včetně zkušebních protokolů pro výše zmíněné metody v programu Excel.

Anotace anglicky: In the theoretical part the author focused on description of particulate systems, researched the theory of sedimentation of concentrated suspensions and the influence of polydispersity on porosity of particulate systems. Numerous models compensating sedimentation velocity for high concentrations of both mono-, bi- and polydisperse suspensions have been described and compared. Two fundamental approaches to particle arrangement analysis have also been characterized. Gained knowledge was subsequently used to design a dust analysis methodology for field conditions, namely sedimentation tests and measurements of tap and bulk density.

Klíčová slova: sedimentace suspenzí, Stokesův průměr, sklepná hustota, sypná hustota, Arizonské silniční prachy, ISO 12 113-1

Klíčová slova anglicky: sedimentation of suspensions, Stokes diameter, tap density, bulk density, Arizona road dust, ISO 12 113-1

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Prokop** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **434276**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Procesní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Charakterizace partikulárních látek získaných při filtraci prachu

Název diplomové práce anglicky:

Characterization of particulate matter obtained from dust filtration

Pokyny pro vypracování:

Teoretická část práce se zaměří na dvě témata: 1) sedimentace koncentrovaných suspenzí včetně základů optické analýzy 2) závislost hustoty na polydisperzitě partikulárních látek. V praktické části bude provedeno měření a vyhodnocení kalibračních a reálných vzorků partikulárních látek získaných z prašných zkoušek vozů. Stanoví se sypaná a sklepná hustota a sedimentační rychlost. Vyhodnocení měření by mělo využít poznatků získaných v teoretické části práce. Závěr bude obsahovat návrh standardizovaného postupu charakterizace partikulárních látek získaných z prašných zkoušek vozů.

Seznam doporučené literatury:

EN ISO 12103-1 Zkušební prach - silniční vozidla; 2) Dill, P. Návrh, vytvoření a ověření přístroje na měření setřepné hustoty prachu; 3) Dill, P. Teoretické zpracování metodiky stanovení třídy silničního prachu sedimentační metodou a experimentální ověření výsledků. 4) ALLEN, Terence. Powder Sampling and Particle Size Determination; 5) STIESS, Matthias. Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


Ing. Michal Netušil, Ph.D., ŠKODA AUTO a.s.


Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2020**



Ing. Michal Netušil, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.


7.7.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Rád bych zde poděkoval vedoucímu této diplomové práce panu Ing. Michalu Netušilovi, Ph.D. za odborné vedení a ochotu, kterou mi v průběhu práce věnoval. Stejně tak bych chtěl poděkovat panu Prof. Ing. Pavlu Ditlovi, DrSc. za cenné rady a připomínky při vzniku této práce.

Obsah

I	Teoretická část	14
1	Úvod	14
2	Popis partikulárních systémů	14
3	Distribuce rozložení částic (PSD-křivka)	15
3.1	Tvorba distribuční křivky	17
4	Základní statistické parametry pro popis distribuce částic	19
4.1	Statistické průměry	19
4.2	Kvantily	20
4.3	Modus	20
4.4	Statistické momenty	20
5	Rozdělení	21
5.1	GGS rozdělení	22
5.2	Logaritmicko-normální rozdělení	23
5.3	RRSB rozdělení	24
6	Určení velikosti částic	25
6.1	Ekvivalentní průměry	27
6.1.1	Geometrické ekvivalentní průměry	27
6.1.2	Fyzikální ekvivalentní průměry	28
7	Optická analýza	30
7.1	Zobrazovací metody	30
7.2	Difrakční metody	32
7.3	Extinkční metody	33
8	Sedimentace	34
8.1	Silová rovnováha	34
8.2	Sedimentace koncentrovaných suspenzí	37
8.2.1	Hydrodynamické interakce	38
8.2.2	Difuze	40
8.2.3	Vliv stěn	41
8.3	Průběh sedimentační křivky	42

9	Kvantitativní určení vlivu vyšší koncentrace monodisperzních systémů	44
9.1	Korekce látkových parametrů	44
9.2	Kombinovaný přístup změn látkových parametrů	46
9.3	Průtokový model	47
9.3.1	Richardson a Zakiho rovnice	47
9.3.2	Evoluce rovnice Richardsova a Zakiho	49
9.4	Brauer a Kriegel	50
10	Polydisperzní koncentrované systémy	51
10.1	Brauer a Kriegel pro bidisperzní koncentrované systémy	52
10.2	Brauer a Kriegel pro polydisperzní koncentrované systémy	54
10.3	Alternativní přístup modelování sedimentace koncentrovaných suspenzí - Unified Theory on Solid-Liquid Separation	54
11	Závislost hustoty na polydisperzitě partikulárních látek	56
11.1	Hustota částic	56
11.1.1	Hustota skeletu (true density)	57
11.1.2	Sypná hustota (bulk density)	57
11.1.3	Měření sypné hustoty	57
11.1.4	Sklepná hustota (tap density)	59
11.1.5	Měření sklepné hustoty	59
11.1.6	Hausnerův poměr	61
11.1.7	Efektivní hustota	61
12	Uspořádání částic	61
12.1	Porozita	62
12.2	Uspořádání kulových částic	63
12.2.1	Kubické uspořádání	63
12.2.2	Ortorombické uspořádání	64
12.2.3	Tetragonálně sfenoidální uspořádání	64
12.2.4	Rombohedrálně pyramidální uspořádání	65
12.2.5	Rombohedrálně hexagonální uspořádání	66
12.3	Shrnutí základních uspořádání	67
12.4	Porozita u polydisperzních systémů	67
12.5	Přístupy v modelování polydisperzních systémů	68
12.5.1	Kontinuální přístup	69
12.5.2	Diskrétní přístup	71
13	Arizonské prachy	73

II Experimentální část	76
14 Charakteristika Arizonských prachů dle ISO 12 103-1	76
15 Sypná hustota	77
16 Sklepná hustota	78
16.1 Nastavení procesních parametrů	79
16.2 Postup měření	81
16.3 Výsledky Arizonských prachů	82
16.4 Výsledky dodaných vzorků prachu	82
17 Sedimentační zkouška	83
17.1 Postup zkoušky	84
17.2 Přípravek	85
17.3 Kompenzace vyšší koncentrace suspenze	85
17.3.1 Rychlost jedné částice	87
17.4 Protokol sedimentační zkoušky	89
17.5 Sedimentační zkouška Arizonských prachů	91
17.6 Sedimentační zkouška dodaných vzorků	93
17.7 Poznatky získané z experimentů	93
18 Závěr	95
18.1 Standardizovaný postup pro klasifikaci silničního prachu	95
19 Seznam symbolů	98
20 Literatura	101
21 Přílohy - protokoly ze zkoušek	106

Seznam tabulek

1	Statistické váhy	16
2	Stručný přehled maximálních koncentrací	46
3	Exponent do Zakiho vztahu pro různé hodnoty Reynoldsova čísla	48
4	Exponent do Zakiho vztahu pro různé hodnoty Reynoldsova čísla v případě nutnosti započítání vlivu stěn	48
5	Souhrn hodnot korekčních faktorů pro uvedené modely v závislosti na koncentraci, první 4 modely neberou reálnou maximální koncentraci v potaz, následující 3 modely počítají s maximální možnou koncentrací $c_{max} = 0,62$	50
6	Souhrn základních uspořádání pro kulové částice, r značí poloměr kulových částic	67
7	Chemické složení Arizonských prachů [29]	77
8	Sypné hustoty Arizonských prachů dle ISO 12 103-1	77
9	Porovnání normovaných a experimentálních sypných hustot pro prachy splňující ISO 12 103-1; hodnoty udávány v kg/m^3	78
10	Mezní cykly pro frekvenci 300 min^{-1} [3]	80
11	Výsledky měření sypných a sklepných hustot Arizonských prachů, hodnoty udávány v kg/m^3	82
12	Intervaly pro klasifikaci prachu získané pomocí zkoušek sklepné hustoty	83
13	Výsledky měření sypných a sklepných hustot dodaných vzorků prachu s návrhem na klasifikaci podle sklepných hustot. Hodnoty hustot udávány v kg/m^3	83
14	Naměřená data pro sedimentační rychlost jedné částice prachu A4	87
15	Vyhodnocení naměřených dat z tabulky 14	87
16	Hodnoty velikostí částic pro zařazení do jednotlivých tříd prachu pro koncentrace v rozmezí 8 až 10,5%	91
17	Souhrn výsledků sedimentačních testů Arizonských prachů pro různé objemové koncentrace, přepočítání mezi rychlostmi suspenze a částice pomocí vztahu Richardson Zaki; rychlosti v $[mm/s]$, velikosti v $[\mu m]$	92
18	Označení dodaných vzorků prachu	93
19	Souhrn výsledků sedimentačních zkoušek pro dodané vzorky prachů	93

20	Intervaly ze sedimentačních zkoušek a ze zkoušek sypné a sklepné hustoty pro zatřídění vzorků prachu; platnost intervalů sedimentace pro 8 až 10,5% při Zakiho přepočtu, 6,5 až 10,5% pro model Frankel Acrivose	97
----	--	----

Seznam obrázků

1	Vztah integrální a diferenciální distribuční křivky	17
2	Diferenciální distribuční křivka ve formě histogramu [14]	18
3	Grafické znázornění systému částic vyhovujících rozložení typu GGS [8]	23
4	Grafické znázornění systému částic vyhovujících rozložení typu RRSB [14]	25
5	Arizonské prachy v síti rozložení typu RRSB	26
6	Znázornění Feretova průměru na nepravidelné částici [14]	28
7	Ekvivalentní průměry [14]	29
8	Snímky z elektronového mikroskopu metodou SEM, vlevo prachová částice, pozadí tvoří kulové částice produkované zážehovým motorem; vpravo typická saze z výfuku, shluk částic [44]	32
9	Snímek silničního prachu pořízený metodou světelné mikroskopie s pravítkem v pozadí pro určení měřítka při následném vyhodnocování. Snímek vznikl na Ú12118, ČVUT v rámci spolupráce se Škodou Auto	33
10	Silová rovnováha na částici	34
11	Závislost c_D na Re pro kulovou částici [47]	36
12	Závislost podílu sedimentační rychlosti suspenze a částice na objemové koncentraci [16]	39
13	Změny rychlostí při hydrodynamických interakcích dvou částic: (—)exaktní hodnoty, (--) aproximace [16]	40
14	Vliv stěny na rychlostní pole kolem kulové částice nerušeně sedimentující (vlevo) a na částici v úzkém kanálu (vpravo) [26]	41
15	Vliv stěny na sedimentační rychlost. l_1 je vzdálenost středu částice ke stěně, L je pak vzdálenost stěn [16]	42
16	Jednotlivé fáze sedimentace podle Kynchovy teorie [37]	43
17	Smithův model obalů kolem částic	49
18	Porovnání Smithova modelu a Richardsona a Zakiho [27]	50
19	Závislost hodnot korekčních faktorů na objemové koncentraci	51
20	Grafické znázornění výchozího rozložení částic [26]	53
21	Pohled shora pro různé poměry průměrů částic [26]	53

22	Schematické znázornění rušené sedimentace podle Yima a Songa [43]	55
23	Experimentální a schematické znázornění rušeného usazování pro 18%-hm. suspenze $CaCO_3$	56
24	Volumetr pro měření sypané hustoty [34]	58
25	Metody odečtu zdánlivého objemu. Pro neinvazivnost byla v experimentální části použita metoda A [45]	59
26	Princip přístroje na určování sklepné hustoty [34]	60
27	Kubické uspořádání [33]	63
28	Kubické uspořádání, znázornění vzájemné polohy kulových částic [40]	64
29	Ortorombické uspořádání [33]	64
30	Ortorombické uspořádání, znázornění vzájemné polohy kulových částic [40]	64
31	Tetragonálně sfenoidální uspořádání [33]	65
32	Tetragonálně sfenoidální uspořádání, znázornění vzájemné polohy kulových částic [40]	65
33	Rombohedrálně pyramidální uspořádání [33]	65
34	Rombohedrálně pyramidální uspořádání, znázornění vzájemné polohy kulových částic [40]	66
35	Rombohedrálně hexagonální uspořádání [33]	66
36	Rombohedrálně hexagonální uspořádání, znázornění vzájemné polohy kulových částic [40]	66
37	Graficky znázorněná tvorba můstků ve 2D	68
38	Objemově vážená distribuční křivka podle Funk a Dingera pro ideální zaplnění prostoru pro částice v rozmezí 0,96 až $104\mu m$ [32]	70
39	Porovnání distribučních křivek dvou vzorků prachu s ideální distribuční křivkou pro maximální možné využití prostoru částicemi; modul distribuce $n=0,37$	70
40	Grafická metoda pro binární směsi podle Westmanna a Hugila [38]	71
41	Grafická metoda podle Westmanna a Hugila pro terciární směsi [38]	72
42	Grafický výstup Baranauova modelu pro 10000 polydisperzních kulových částic [41]	74
43	Distribuční křivky Arizonských prachů ISO 12103-1 změřené na analyzátoru Coulter Multisizer IIE^{TM}	75
44	Přístroj BeDensi T1 pro měření sklepné hustoty s nasazeným odměrným válcem	79

45	Hodnoty mezních cyklů pro Arizonské prachy; ρ_T je sklepná hustota [3]	80
46	Mezní hodnoty pro klasifikaci prachu dle sklepné hustoty	83
47	Průběh sedimentace a tvar sedimentační křivky	84
48	Přípravek pro sedimentační zkoušky [5]	85
49	Grafické znázornění vlivu koncentrace na průběh sedimentační zkoušky. Nahoře hrubý prach A4 o různých koncentracích, dole Arizonské etalonové prachy při 9 obj.-%	86
50	Průběh podílu sedimentační rychlosti suspenze ku jedné částici prachu A4; potvrzení empirie o zrychlené sedimentační rychlosti pro malé koncentrace, v případě naměřených dat přibližně pod 10,5%. V naměřeném maximu pro 5% dosahuje rychlost suspenze přibližně 2,25násobku rychlosti jedné částice	88
51	Velikosti částic prachu A4 v závislosti na použitém modelu kompenzace vyšší koncentrace a na objemové koncentraci	88
52	Souhrn výsledků sklepných a sypných hustot pro dodané vzorky prachu	106
53	Protokol měření sypné a sklepné hustoty dodaného vzorku prachu	107
54	Protokol měření sypné a sklepné hustoty dodaného vzorku prachu	108
55	Protokol měření sypné a sklepné hustoty dodaného vzorku prachu	109
56	Protokol sedimentační zkoušky Arizonského prachu A4	110
57	Protokol sedimentační zkoušky Arizonského prachu A3	111
58	Protokol sedimentační zkoušky Arizonského prachu A2	112
59	Protokol sedimentační zkoušky Arizonského prachu A1	113
60	Souhrn naměřených hodnot sedimentační zkoušky dodaných vzorků prachu	114
61	Protokol sedimentační zkoušky dodaného vzorku prachu	115
62	Protokol sedimentační zkoušky dodaného vzorku prachu	116
63	Protokol sedimentační zkoušky dodaného vzorku prachu	117
64	Protokol sedimentační zkoušky dodaného vzorku prachu	118
65	Protokol sedimentační zkoušky dodaného vzorku prachu	119
66	Protokol sedimentační zkoušky dodaného vzorku prachu	120
67	Protokol sedimentační zkoušky dodaného vzorku prachu	121
68	Souhrn výsledků sklepných a sypných hustot pro dodané vzorky prachu	122
69	Protokol měření sypné a sklepné hustoty dodaného vzorku prachu	123

70	Protokol měření sypné a sklepné hustoty dodaného vzorku prachu	124
71	Protokol měření sypné a sklepné hustoty dodaného vzorku prachu	125
72	Protokol měření sypné, sklepné hustoty a porozity, vzorek č.1	126
73	Protokol měření sypné, sklepné hustoty a porozity, vzorek č.2	127
74	Protokol měření vzorku prachu pomocí laserové difrakce, vzorek č.1	128
75	Protokol měření vzorku prachu pomocí laserové difrakce, vzorek č.2	129

Část I

Teoretická část

1 Úvod

Cílem této práce je se nejprve v teoretické části zaměřit na sedimentaci koncentrovaných suspenzí včetně základů optické analýzy a poté na závislost hustoty na polydisperzitě partikulárních látek. Tyto poznatky budou následně využity k návrhu a provedení měření vzorků silničního prachu za účelem jeho klasifikace. Výstupem této práce je normalizovaný postup vhodný do polních podmínek na charakterizaci silničního prachu dle etalonů ISO 12103-1.

2 Popis partikulárních systémů

Popisem partikulárních systémů, tedy systémů obsahující pevné látky ve formě částic, se primárně zabývá procesní inženýrství. Zprvu se může nabízet myšlenka, že takovéto systémy jdou brát v dostatečně makroskopickém pohledu jako kontinuum, a že by tím pádem mohly být popsány stejnými zákony. Praxe však ukazuje, že tomu může být i jinak. Jako příklad se dají uvést přesýpací hodiny. Od jakéhokoliv přístroje na měření času se pro úspěšné použití očekává stálost odpočtu. Kdybychom brali písek v hodinách jako kontinuum, tak by průtok šterbinou závisel na výšce sloupce kapaliny (písku) nad šterbinou. Ve skutečnosti u přesýpacích hodin je hmotnostní tok písku téměř konstantní, což spojitost s představou kontinua eliminuje. Ve skutečnosti tlak u sypkých materiálů neroste lineárně s výškou sloupce jako u kapalin, ale po určité náběžné době se téměř ustálí, což umožňuje použití a existenci přesýpacích hodin. Děje se tak kvůli tření mezi jednotlivými částicemi i kvůli tření mezi částicemi a stěnami nádoby. Toto mezičásticové silové působení je navíc nepřímo úměrné velikosti částic. [1] Procesy probíhající v partikulárních systémech tak nelze analyzovat pouze na základě působení vnějších sil, ale je nutné uvažovat i vzájemné interakce částic.

Ve vší obecnosti se partikulární systémy dají charakterizovat pomocí následujících kritérií:

- chemické složení
- popis disperzní složky, to je částic
- vzájemné silové působení mezi částicemi a silové působení na fázovém rozhraní

- popřípadě další stavové veličiny

Pro obsah této práce je zásadní bod popis disperzní složky partikulárního systému, částečně i vzájemné silové působení mezi částicemi. Dále se partikulární systémy dělí podle velikosti vyskytujících se částic na:

- molekulárně disperzní systémy - velikost částic menší než $10^{-9} m$
- koloidní disperzní systémy - velikost částic v rozmezí $10^{-9} - 10^{-6} m$
- hrubé disperzní systémy - velikost částic větší než $10^{-6} m$

Pro obsah této práce je relevantní poslední jmenovaná kategorie, to je částice větší než 1 mikron. Samotné chování partikulárních systémů je z většiny závislé na morfologii a velikosti jednotlivých částic a také na jejich distribuci. Pro zjišťování těchto charakteristik existuje nepřehledné množství metod. Je však nutno mít na paměti, že relevantní srovnání různých výsledků umožňují zpravidla pouze taková data, která byla získána stejnou měřicí metodou, pro maximální porovnatelnost ideálně na stejném přístroji se stejnou obsluhou.

Popis částic může být poměrně jednoduchou disciplínou v případě kulových částic. V případě nekulových částic se situace značně komplikuje. V průběhu času byly vymyšleny nástroje, jakým způsobem popisovat nepravidelné částice. Často se jedná o metody, kdy je nepravidelná částice transformována na ekvivalentní kouli podle zvoleného parametru, například stejného objemu. Pro následné výpočty už lze uvažovat právě tyto ekvivalentní průměry.

3 Distribuce rozložení částic (PSD-křivka)

Za předpokladu, že by veškeré partikulární systémy byly monodisperzní, to znamená, že by částice v nich byly totožné, by pro popis velikosti částic stačila jediná hodnota, například průměr. Vzhledem k tomu, že takovýchto systémů je naprosté minimum, je nutné zvolit takový popis, který by systém částic dostatečně charakterizoval. Dají se použít různé statistické ukazatele, například aritmetický průměr. Jedná se o plně legitimní postup pod podmínkou, že se jedná alespoň částečně o monodisperzní částice, a střední hodnota by pak nebyla zavádějící. Aby se bylo možno o průběhu charakteristik partikulárního systému přesvědčit, je nutno sestavit takzvanou distribuční křivku.

Obecně lze distribuční křivku charakterizovat jako rozložení četnosti velikostí částic na ose x vztažené na určitou statistickou váhu vynášenou na ose y . V závislosti na zvolené statistické váze se distribuční křivky dělí na 5

Tabulka 1: Statistické váhy

Statistická váha	Dimenze	Označení s indexem
počet	L^0	$r = 0$
délka	L^1	$r = 1$
plocha	L^2	$r = 2$
objem	L^3	$r = 3$
hmotnost	L^{3*}	$r = 3^*$

kategorií popsanych v tabulce 1. Je záhodno si uvědomit, že metoda použitá pro měření distribuční křivky určuje současně typ získaného rozdělení. Pro jednoznačné určení statistické váhy distribučních křivek se používá index r .

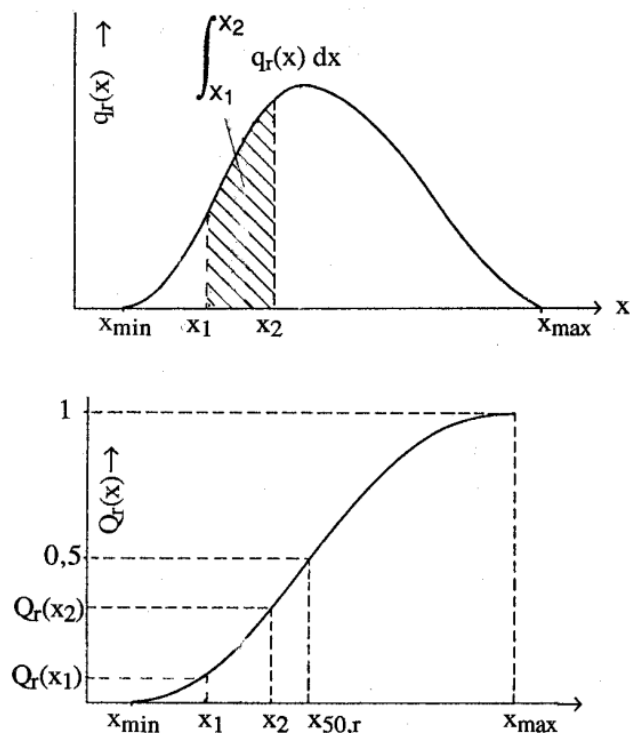
Index 0, počtem vážené rozdělení – Částice jsou spočítány v jednotlivých velikostních skupinách s krokem velikostí delta x definovaným před samotnou analýzou dat. Veškeré čítací měřící metody generují tento typ rozdělení. V obecné statistice je počet téměř výhradní vahou, počty v jednotlivých skupinách se pak nazývají relativní četnost.

Index 1, délkou vážené rozdělení – toto spíše raritní rozdělení nachází typicky uplatnění u takových částic, kdy jeden rozměr výrazně převyšuje svou velikostí ostatní rozměry. Jedná se zpravidla o úzké, protáhlé částice jehlicovitého tvaru.

Index 2, plochou vážené rozdělení – Jedná se buď o skutečný povrch částic a nebo o snáze získatelnou projekční plochu částice opět uspořádaných do velikostních skupin. Nejčastěji je toto rozdělení získáno při použití optických měřících metod.

Index 3 (3), objemem nebo hmotností vážené rozdělení* – hodnoty vynášené v jednotlivých velikostních skupinách jsou získány vážením pro hmotností vážené rozhraní. Pro případ, kdy je hustota částic nezávislá na jejich velikosti, odpovídá hmotností vážené rozdělení objemem váženému rozdělení.

Distribuční křivka částic je jediné zobrazení, díky kterému se dá jednoznačně určit, jestli je zkoumaný partikulární systém monodisperzní, bidisperzní nebo polydisperzní. Průběh distribučních křivek pro různé statistické váhy se liší a volba správné křivky záleží na účelu použití. Pro případ, že zásadním faktorem pro průběh technologie je objem, respektive hmotnost částic, je nutné použít odpovídající křivku. V případě nutnosti lze taktéž provést přepočty mezi jednotlivými statistickými vahami pomocí takzvaných momentů. (viz 4.4 Statistické momenty)



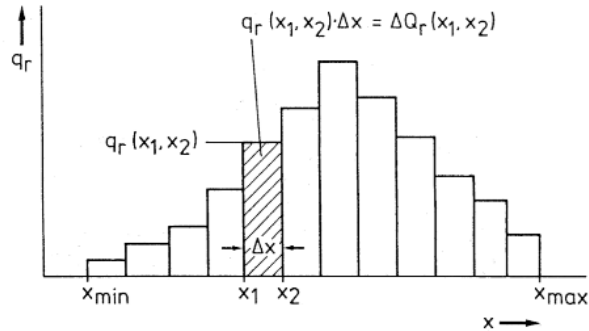
Obrázek 1: Vztah integrální a diferenciální distribuční křivky

3.1 Tvorba distribuční křivky

Křivky distribuce velikostí částic se zvolenou statistickou váhou mohou mít více podob. Mohou být znázorněny diskrétně pomocí histogramů, popřípadě spojitě formou rozdělení pravděpodobností $q(x)$, popřípadě sumární funkcí $Q(x)$. Nechť je dán kolektiv různě velikých částic, pro zjednodušení kulových, srovnaných dle průměru, který má být roztríděn do jednotlivých velikostních skupin. Vykreslí se graf, kde na x-ové ose je dle dohody vynesena velikost částic x (pro nekulové částice ekvivalentní průměr) s šířkou intervalu Δx . Délku kroku je možno zvolit jako podíl celkové šířky rozdělení (maximální velikost vyskytujících se částic) dělenou odmocninou počtu naměřených částic. [2]

$$\Delta x_i = x_i - x_{i-1} \quad (1)$$

Jednotlivé intervaly i nesou označení podle horní hranice intervalu, to znamená interval s hranicemi i a $i + 1$ bude označován jako interval $i + 1$ dle obecně uznávané konvence. Druhou možností je označení jednotlivých velikostních tříd střední hodnotou. Pro rozdělení s úzkými intervaly se pro



Obrázek 2: Diferenciální distribuční křivka ve formě histogramu [14]

jejich identifikaci využívá aritmetický průměr velikostí částic na hranicích intervalů (viz rovnice 2) , u rozložení s širšími intervaly se dá ve výjimečných případech narazit na geometrický průměr taktéž vypočítaný z velikostí částic na hranicích jednotlivých intervalů (viz rovnice 3). [14]

$$\bar{x}_i = \frac{x_1 + x_{i+1}}{2} \quad (2)$$

$$\overline{\bar{x}}_i = \sqrt{x_1 \cdot x_{i+1}} \quad (3)$$

Na osu y jsou následně vynášeny podíly z celkového množství dané statistické váhy, které jsou menší než velikost částic daného intervalu. Pro lepší pochopení slouží následující příklad s počtem váženým rozdělením. Necht' je popisován interval částic popsáný střední hodnotou $x = 10\mu m$. Na osu y potom musí být vynesena počet částic menších, než je charakteristická velikost intervalu ($10\mu m$), poděleným celkovým množstvím částic. Obdobně jsou vyneseny y -ové hodnoty pro zbývající intervaly. Tímto postupem se získá takzvaná sumární funkce $Q(x)$ (viz obr. 2). Už z definice sumární funkce je patrné, že průběh funkce bude s narůstající velikostí částic na ose x stoupat, popřípadě bude konstantní, ale nikdy nemůže klesat.

V případě, že sumární funkce, je podělena šířkou intervalu, získá se křivka rozložení pravděpodobnosti $q(x)$. Hustota pravděpodobnosti tedy zohledňuje fakt, že absolutní množství v určitém intervalu i je také závislé na samotné šířce intervalu Δx . Dá se také uvažovat jako podíl části množství v intervalu i dělená součinem celkového množství a šířky intervalu (viz rovnice 4). Při užití tohoto postupu se užívá pro danou potřebu relevantní nejmenší smysluplná velikost částice x_{min} . [14]

$$q_{r,i}(x) = \frac{\text{Část množství v intervalu } i}{\text{Celkové množství} \cdot \text{Šířka intervalu}} \quad (4)$$

Pro případ hmotnosti jako berné statistické váhy by rovnice 4 přešla do tvaru:

$$q_{3,i}(x_i) = \frac{m_i}{m_{celk} \cdot \Delta x_i} \quad (5)$$

$$q_r(x) = \frac{d}{dx} Q_r(x) \quad (6)$$

$$q_r(x) = \frac{\Delta Q_{r_i}}{\Delta x_i} \quad (7)$$

4 Základní statistické parametry pro popis distribuce částic

Vzhledem k vysokým počtům částic obsažených v partikulárních systémech přichází při vyhodnocení na řadu statistika. Obecně statistická analýza spočívá ve zhušťování informací, to znamená z velkého množství vstupních informací vyselektovat co nejméně vhodně zvolených parametrů, ze kterých lze následně vytěžit maximum informací. Pro tento účel se využívá různých statistických charakteristik. Jedná se o takové veličiny, které podávají koncentrovanou formou informaci o podstatných statistických vlastnostech studovaného souboru. Správně zvolené a správným způsobem vypočítané charakteristiky obsahují v rámci jednoho nebo několika málo čísel veškerou informaci o podstatných statistických vlastnostech studovaného souboru, která je obsažena v původních datech, to je v prvotním zápisu. [6] Pro distribuční křivky partikulárních systémů hrají zásadní roli následující charakteristiky.

4.1 Statistické průměry

Níže je uveden obecný vzorec pro výpočet jednotlivých statistických průměrů:

$$\bar{x}_k = \left(\frac{\sum x_i^k \cdot x_i^r \cdot n_i}{\sum x_i^r \cdot n_i} \right)^{1/k} = \left(\frac{\sum x_i^{k+r} \cdot n_i}{\sum x_i^r \cdot n_i} \right)^{1/k} \quad (8)$$

kde n_i je počet částic v i -té velikostní třídě s průměrnou velikostí (ekvivalentní průměr) x_i , r označuje typ rozdělení (statistickou váhu) a k označuje typ průměru (harmonický průměr $k = -1$, geometrický průměr $k = 0$, aritmetický průměr $k = 1$, kvadratický průměr $k = 2$).

Lze prokázat, že harmonický průměr objemově váženého rozdělení je roven aritmetickému průměru povrchově váženého rozdělení (Herdanův teorem). Proto je specifický povrch (hustota povrchu) nepřímo úměrný harmonickému průměru objemově váženého rozdělení, nazývanému též přirozený průměr nebo Sauterův průměr. [7] (viz 6.1 Ekvivalentní průměry)

4.2 Kvantily

Kvantily jsou velikosti částic, odpovídající vybrané kumulativní váze. Nejdůležitějšími kvantily jsou dolní decil (x_{10}), medián (x_{50}), a horní decil (x_{90}). Pro lepší pochopení kvantilů aplikovaných na partikulární systémy bude osvětlen význam mediánu. Hodnota $x_{50,0}$ (0 značí počet vážené rozdělení) na ose x u sumární funkce znamená, že přesně 50% počtu částic je menších než hodnota $x_{50,0}$.

4.3 Modus

Modus odpovídá maximu na křivce $q(x)$, tedy křivce hustoty pravděpodobnosti. Jinými slovy se jedná o takový průměr nebo ekvivalentní průměr částice, který je nejhojněji zastoupen. Pokud by na křivce hustoty pravděpodobností bylo více maxim, jednalo by se o bi-, tri-, popřípadě multimodální systém částic. Toto označení koreluje s mono-, bi-, polydisperzitou partikulárního systému. V krajním případě striktně monodisperzních částic by křivka hustoty pravděpodobnosti $q(x)$ odpovídala Diracově delta rozdělení. Takovéto teoretické rozdělení hustoty pravděpodobnosti jde v hodnotě průměru částic do nekonečna, všude jinde má nulovou hodnotu. Odpovídající kumulativní křivka by byla vyjádřena skokovou funkcí skokem z 0 na 1 v hodnotě průměru částic na ose x .

4.4 Statistické momenty

Statistické momenty jsou jednou ze dvou základních skupin statistických charakteristik vedle charakteristik kvantilových. Vychází se z analogie k fyzikálním momentům, které jsou definovány součinem síly a ramene, na kterém působí. Obdobně jsou definovány momenty statistické, kdy obdobou síly je četnost určité hodnoty a ramenem následně vzdálenost této hodnoty na ose x od určitého bodu, například od počátku. Pro distribuci rozložení částic mají statistické momenty dvoje hlavní uplatnění.

Pomocí momentů se dají dopočítat pro $k = 1$ střední hodnoty charakterizovaných souborů částic dle následující rovnice:

$$M_{k,r} = \int_{x_{min}}^{x_{max}} x^k \cdot q_r(x) dx \equiv \overline{x_r^k} \quad (9)$$

Zajímavějším uplatněním je možnost použití statistických momentů pro přepočítání jednotlivých distribučních křivek, když je splněn nutný předpoklad nezávislosti velikostí částic na jejich tvaru. Tento fakt je velmi nápomocný v situacích, kdy byla distribuční křivka určena pro příklad obrazovou analýzou, čímž mohla vzniknout křivka počtem váženého rozdělení. V momentě, kdy by bylo záhodno tato data porovnat například s výsledky sedimentační zkoušky totožného vzorku částic, čímž se získá objemem/hmotností vážené rozdělení, jsou tyto dvě křivky navzájem neporovnatelné. Porovnání je možné právě po přepočítání adekvátním momentem podle následujícího vztahu:

$$q_{r,x} = \frac{x^{r-p} \cdot q_p(x)}{M_{r-p,p}} \quad (10)$$

kde index p značí statistickou váhu již existujícího rozdělení hustoty pravděpodobnosti a r je index statistické váhy, která se přepočtem získá, M je poté odpovídající statistický moment. Je nutno si však uvědomit, že i při přepočítání na rozložení o stejných statistických vahách, nemusí dojít k absolutní shodě. Shoda může nastat v případě kulovitých nebo isometrických částic, ale u částic nepravidelných se vychází z ekvivalentních průměrů, které se pro identickou částici liší na základě metody, kterou byl získán. Shoda je u takovýchto nepravidelných částic možná pouze za použití totožných metod pro určování ekvivalentních průměrů částic.

5 Rozdělení

Distribuční křivky partikulárních systémů, ať už formou sumární funkce nebo formou funkce hustoty pravděpodobnosti, jsou měřeny na k tomu určených přístrojích, kdy výstupem jsou stovky párů hodnot $x - Q(x)$, popřípadě $x - q(x)$ v digitální formě. Neexistuje žádný jednoduchý analytický aparát, který by veškeré křivky složené z těchto datových párů popsal. Přitom by to bylo z hlediska popisu partikulárních systémů velmi výhodné na určení středních hodnot nebo také specifického povrchu částic.

Jak již bylo řečeno výše, neexistuje žádná jednoduchá funkce, která by dokázala popsat veškeré typy křivek distribuce částic. Z toho důvodu byly na základě zkušeností a teorie pravděpodobnosti vytvořeny takové křivky, které dostatečně přesně aproximují vyskytující se rozdělení. Musí být přitom bráno v potaz, že různé typy technologických procesů generují různé typy distribučních křivek. V průběhu času tedy vznikly pro různé technologie

syntézy nebo zpracování částic rozdělení na míru. Tato empirická rozdělení zpravidla obsahují jeden parametr polohy, který charakterizuje absolutní velikost kolektivu částic, a jeden parametr rozptylu částic, který popisuje šířku křivky. Některé z těchto rozdělení byly ukotveny v národních i mezinárodních normách a tři nejdůležitější z nich budou zmíněny níže. Jedná se o:

- GGS rozdělení (Gates-Gaudin-Schuhmann, DIN 66143)
- Logaritmicko-normální rozdělení (DIN 66144, ISO 9276-5)
- RRSB-rozdělení (Rosin-Rammler-Sperling-Bennett, DIN 66145)

Všechny tři výše zmíněné rozdělení jsou dvouparametrové aproximace naměřených výsledků. Každá takováto funkce má vlastní speciální grafickou síť, do které jsou vynášeny jednotlivé naměřené body, většinou ve formě funkce označované jako $D(x)$. Tím je docíleno, při použití vhodného rozdělení, že naměřené výsledky vytvoří přímkou, což značně zjednoduší analytický popis.

5.1 GGS rozdělení

Gates-Gaudin-Schuhmannovo (GGS) rozdělení je na intervalu $0 \leq x \leq x_{max}$ definováno následujícím předpisem:

$$D_r(x) = \left(\frac{x}{x_{max}} \right)^m \quad \text{pro } x \leq x_{max} \quad \text{a} \quad D(x) = 1 \quad \text{pro } x > x_{max} \quad (11)$$

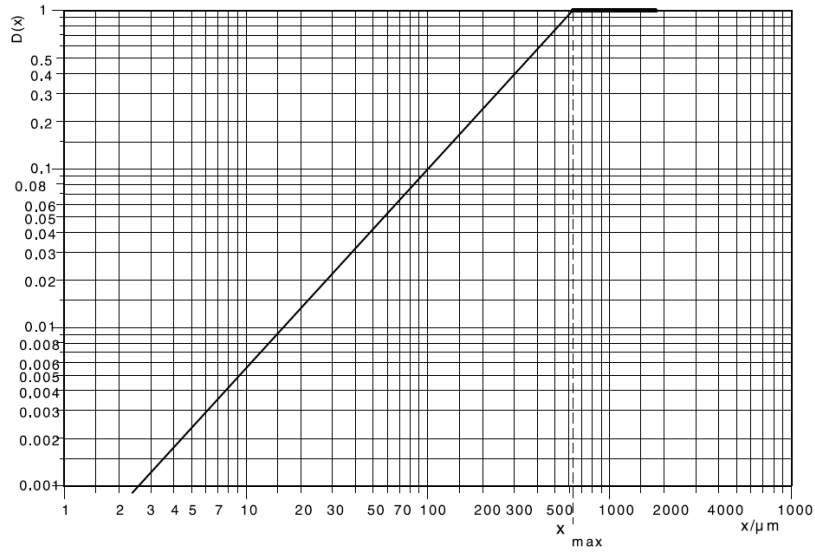
Při vynesení naměřených bodů do zlogaritmované sítě ($\log x - \log y$) vznikne přímkou pro $x < x_{max}$ s předpisem:

$$\log D(x) = m \cdot \log x - m \cdot \log x_{max} \quad (12)$$

V případě GGS-rozložení je parametrem polohy hodnota x_{max} a parametrem rozptylu poté hodnota m získaná při odečtu z grafu. Hodnota m charakterizuje stoupání úsečky v grafu, velké hodnoty m jsou charakteristické pro úzké rozložení částic, malé hodnoty m naopak pro široké rozdělení. V bodě x_{max} má grafický průběh zlom a funkce $D(x)$ dosáhne hodnoty 1.

Výhodnou GGS-rozložení je jednoduchý matematický popis vzniklé křivky. Naopak nevýhodou v některých případech může být fakt, že chyby u jemnějších částic mají větší váhu než u částic větších. Proto je toto rozdělení nevhodné pro takové partikulární systémy, ve kterých mají malé částice větší než 50% podíl.

Celkový specifický povrch se spočítá pro předpoklad $m \neq 1$:



Obrázek 3: Grafické znázornění systému částic vyhovujících rozložení typu GGS [8]

$$S_V = 6f \cdot \frac{m}{m-1} \cdot \frac{1}{x_{max}} \quad (13)$$

kde $f = 1,5$ je takzvaný faktor tvaru, pro koule platí: $f = 6$.

5.2 Logaritmicko-normální rozdělení

Setkat se s částicemi, které by vyhovovali normálnímu rozdělení (někdy také Gauss-Laplaceovo rozdělení), je poměrně vzácné. Může tak nastat například pro úzké rozdělení obilných zrn. Naproti tomu logaritmus velikostí částic ($\ln x$) vyhovuje normálnímu rozdělení častěji a vzniká tak logaritmicko-normální rozdělení. Pro křivku hustoty pravděpodobnosti poté platí následující vztah:

$$q_r(x) = \frac{1}{\sigma_{\ln} \sqrt{2\pi x}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \ln x_{50,r}}{\sigma_{\ln}} \right)^2 \right] \quad (14)$$

kde $x_{50,r}$ je medián, σ_{\ln} je směrodatná odchylka $\ln x$.

Logaritmicko-normální rozdělení lze uplatnit na partikulární systémy z praxe zpravidla tehdy, když se u nich vyskytuje větší podíl jemných částic. Díky svým vlastnostem lze směrodatná odchylka jednoduše dopočítat pomocí kvantilů následujícím způsobem:

$$\sigma_{ln} = \frac{1}{2} \ln \frac{x_{84}}{x_{16}} = \ln \frac{x_{84}}{x_{50}} = \ln \frac{x_{50}}{x_{16}} \quad (15)$$

Směrodatná odchylka je nezávislá na statistické váze rozložení, záleží pouze na sklonu křivky při vnášení párů $x - q(x)$ na logaritmický papír pro logaritmicko-normální rozdělení. Snadno lze také dopočítat medián při potřebě změny statistické váhy, kdy graficky dojde pouze k posunutí přímky ve směru osy x :

$$x_{50,q} = x_{50,r} \cdot \exp \left[(q - r) \sigma_{ln}^2 \right] \quad (16)$$

Velice snadno lze také dopočítat specifický povrch částic S_v ze Sauterova průměru, který se určí z následujícího vztahu:

$$x_{St} = x_{50,r} \cdot \exp \left[(2.5 - r) \sigma_{ln}^2 \right] \quad (17)$$

Výše zmíněné rovnice platí pro případ, kdy lze sumární funkce partiikulárního systému popsat pomocí logaritmicko-normálního rozdělení v celém rozsahu. V případě popisu systému pomocí více rovnoběžek je postup náročnější viz DIN 66144. [8]

5.3 RRSB rozdělení

Rozdělení podle autorů Rosina, Rammlera, Sperlinga a Bennetta, vzniklé původně na popis jemně namletého uhlí, označované jako RRSB-rozdělení má předpis v následujícím tvaru:

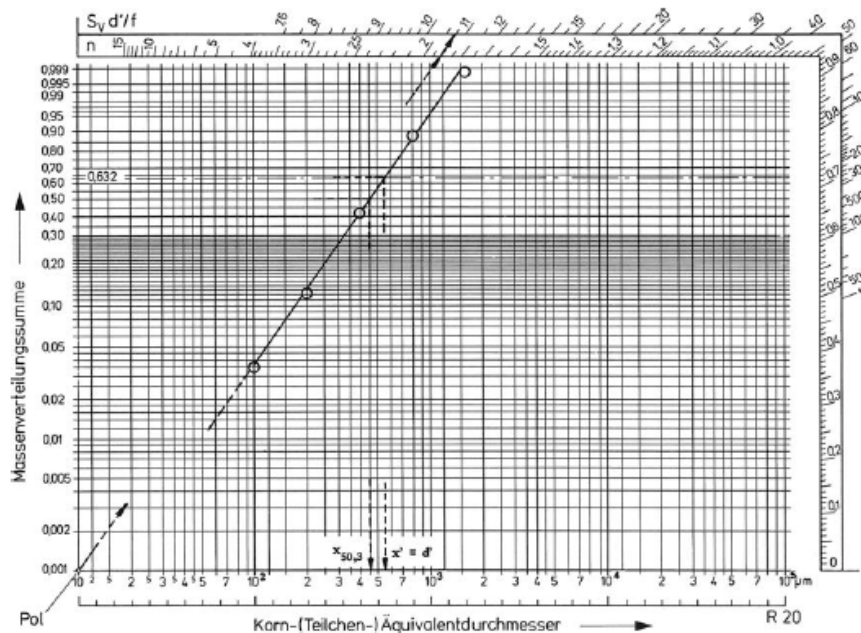
$$Q_3(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x_{63,3}} \right)^n \right] \quad (18)$$

kde kvantil $x_{63,3}$ (3 značí objemem/hmotností vážené rozdělení) je parametr polohy a n je parametr rozptylu částic. Po dvojitým zlogaritmování se získá rovnice přímky ve tvaru:

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1 - Q_3(x)} \right) = n \ln(x) - n \ln(x_{63,3}) \quad (19)$$

Derivací rovnice 18 podle x se získá křivka rozdělení pravděpodobnosti:

$$q_r(x) = \frac{n}{x_{63,3}} \cdot \left(\frac{x}{x_{63,3}} \right)^{n-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{x}{x_{63,3}} \right)^n \right] = \frac{n}{x_{63,3}} \cdot \left(\frac{n}{x_{63,3}} \right)^{n-1} \cdot [1 - Q_3(x)] \quad (20)$$



Obrázek 4: Grafické znázornění systému částic vyhovujících rozložení typu RRSB [14]

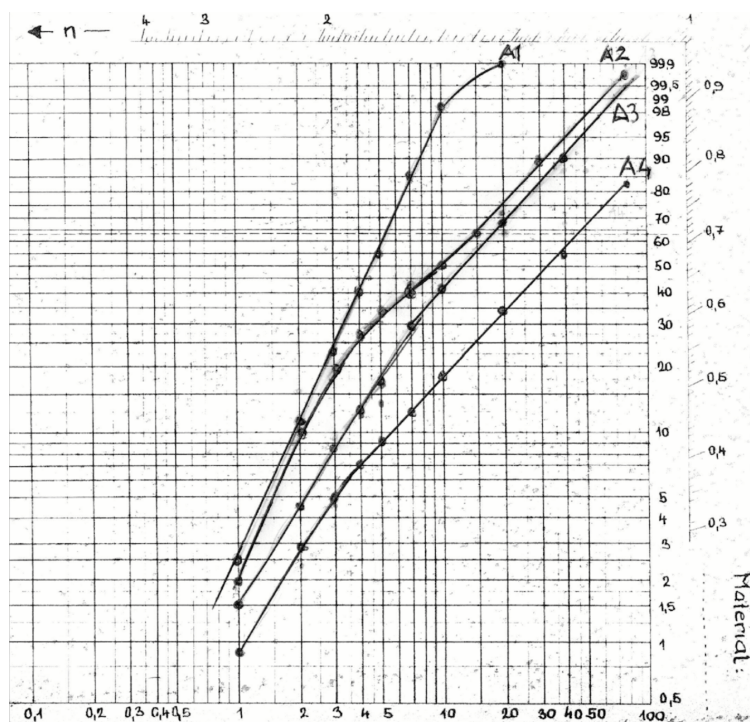
Ověření, zda kolektiv daných částic odpovídá RRSB-rozdělení, se provádí graficky na milimetrovém papíře pro RRSB-rozdělení, někdy také označovaném jako Weibullova síť. Pokud vynášené body tvoří přímku, jedná se o RRSB-rozdělení. Jak již bylo jednou zmíněno, toto rozdělení původně vzniklo na míru částicím vzniklým zpravidla při mletí, nicméně také vyhovuje částicím vzniklým erozí, tudíž prachu.

Na obrázku 5 jsou vyneseny hodnoty Arizonských prachů, přičemž rozdělení podle Rosina, Rammlera, Sperlinga a Bennetta poměrně dobře vyhovují. Vzniká tak alternativní možnost popisu systému částic silničního prachu k obecné distribuční křivce.

6 Určení velikosti částic

Jak již bylo jednou zmíněno, chování partikulárních systémů závisí na velikosti a morfologii částic, dále také na distribuci rozložení velikostí, popřípadě dalších fyzikálních vlastností povrchu částic. Na následujících řádcích budou osvětleny postupy pro určení velikosti jednotlivých částic.

V ideálním případě, to znamená pro koule, lze velikost částice vyjádřit



Obrázek 5: Arizonské prachy v síti rozložení typu RRSB

snadno pouze jedním parametrem, a sice jejím průměrem. Složitější situace nastává v momentě, kdy částice nejsou dokonale kulové, ale z procesních důvodů by bylo výhodné, je popsat jednou hodnotou. Toho se docílí tak, že částice je transformována do ekvivalentní koule o ekvivalentním průměru. Je nezbytné zmínit, že pro částice nepravidelného tvaru je rozhodující zvolená metoda určení ekvivalentního průměru. Pro stejnou částici měřenou různými metodami by byly získány různé výsledky. Je proto zásadní, volit metodu měření a ekvivalentní průměr tak, aby získaná velikost měla vypovídající hodnotu pro využívanou technologii.

Pro lepší představu důležitosti různých rozměrů pro různé aplikace si lze představit ukázkovou situaci s cihlou. Nechť má standardní cihla rozměry $203 \times 92 \times 57 \text{ mm}$ (D, Š, V) a nestandardní $180 \times 100 \times 70 \text{ mm}$. Otázka zní, která je větší? Pokud by byly použity například jako boční ohraničení chodníku, rozhodující je délka a standardní cihla se bere jako větší. Pokud by ale cílem bylo postavit sloupek, rozhodovala by výška a rázem by byla nestandardní cihla považována za tu větší. Obdobná je situace pro částice prachu. Vhodná volba průměru tedy záleží na dalších technologických krocích.

6.1 Ekvivalentní průměry

Užití ekvivalentních průměrů značně zjednodušuje popis nekulových částic, u kterých by bylo nutno uvažovat často velmi složitou geometrii za pomoci statistických metod. Místo toho tato metoda umožňuje pracovat s kulovými částicemi, pro které stačí pouze jedno číslo na dostatečný popis, a tím je průměr ekvivalentní koule. Další výhodou je fakt, že chování kulových částic lze často popsat i teoreticky a není tak nutno spoléhat na empirické vztahy.

Ekvivalentním průměrem je označován takový průměr koule, popřípadě kruhu, která má stejnou hodnotu vybrané geometrické nebo fyzikální charakteristiky jako měřená nepravidelná částice. Tím vzniká základní dělení ekvivalentních průměrů na geometrické a fyzikální. Samozřejmostí je porovnatelnost pouze totožných typů ekvivalentních průměrů získaných ideálně stejnou měřicí metodou.

6.1.1 Geometrické ekvivalentní průměry

Geometrické ekvivalentní průměry pro nepravidelné částice vycházejí z geometrických vlastností. Je možné je rozdělit podle počtu dimenzí na:

- 1D – délky, obvod
- 2D – plocha, projekční plocha, průřez
- 3D – objem, hmotnost

Nejdůležitějšími geometrickými průměry jsou:

Objemově-ekvivalentní průměr d_V : průměr koule stejného objemu jako vybraná nepravidelná částice.

Povrchově-ekvivalentní průměr d_S : průměr koule stejného povrchu jako vybraná nepravidelná částice.

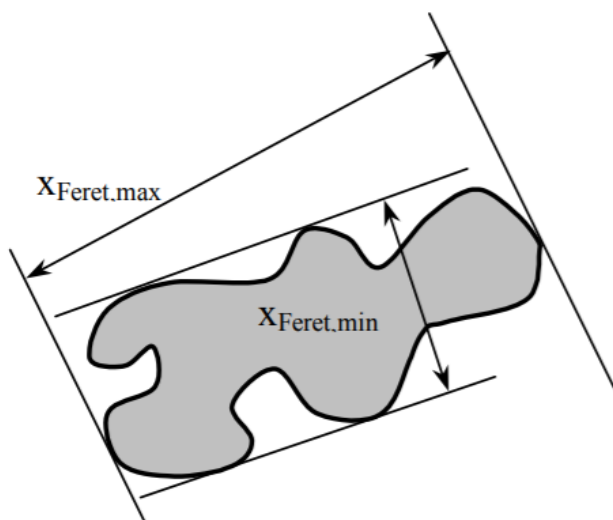
Objemově-povrchový-ekvivalentní průměr d_{sv} : průměr koule o stejném poměru plochy a objemu.

Sauterův průměr d_{ST} : vyjadřuje poměr třetí mocniny objemově ekvivalentního průměru k druhé mocnině povrchově ekvivalentnímu průměru. Sauterův průměr je také nepřímo úměrný specifickému povrchu částice, což je plocha povrchu vztažená na jednotkovou hmotnost.

Projekční průměr d_P : průměr kruhu o stejné projekční ploše jako nepravidelná částice.

Feretův průměr d_F : vzdálenost dvou rovnoběžných tangent k obrysu nepravidelné částice.

Martinův průměr d_M : délka úsečky, která dělí nepravidelnou částici na dvě oblasti o stejné ploše.



Obrázek 6: Znázornění Feretova průměru na nepravidelné částici [14]

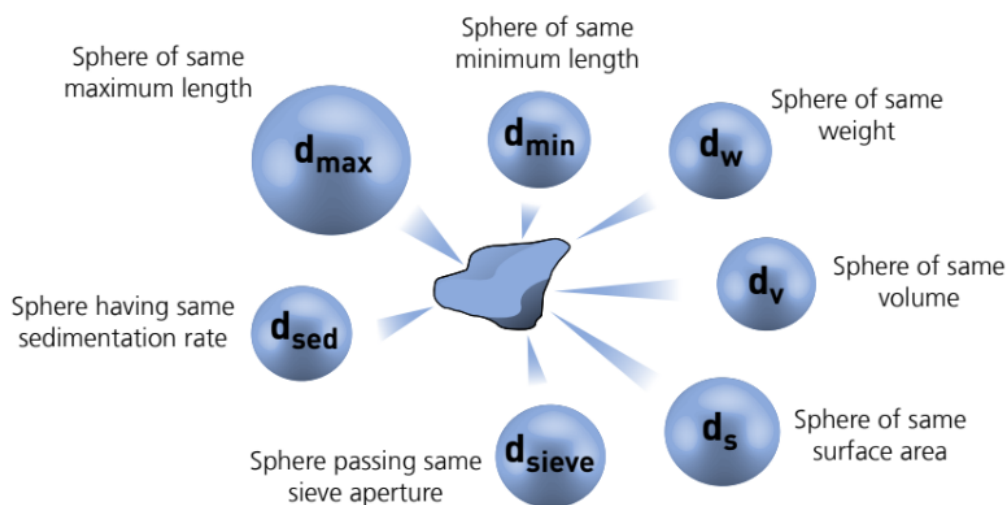
Právě poslední tři jmenované průměry jsou často využívány při manuální optické analýze.

Při použití Feretova průměru je však potřeba rovnoběžné tangenty dodefinovat, neboť rovnoběžných tečen by existovalo nekonečné množství. Existuje několik možností. Může se zvolit referenční směr, na který musí být tangenty kolmé. Další možností je vzít maximální Feretův průměr, popřípadě minimální průměr. Tato samotná hodnota o tvaru jedné částice v podstatě nemusí vůbec nic vypovídat, proto je potřeba provádět měření na dostatečném počtu částic, které jsou orientované náhodně. Podmínkou ale je, že musí být stejného tvaru. Po splnění tohoto předpokladu je získaný Feretův průměr vypovídající pro daný soubor částic.

6.1.2 Fyzikální ekvivalentní průměry

Z principu libovolná fyzikální vlastnost, která má souvislost s velikostí nekulové částice, může sloužit k vytvoření ekvivalentního průměru. Platí tak za předpokladu, že je známá souvislost zvolené fyzikální vlastnosti a velikosti kulové částice, aby bylo možné provést přepočítání. Pod fyzikální ekvivalentní průměry spadají:

Laser-ekvivalentní průměr: průměr takové koule, která vykazuje stejnou interakci s laserovým paprskem jako nepravidelná částice.



Obrázek 7: Ekvivalentní průměry [14]

Hydrodynamický ekvivalentní průměr d_H : odpovídá kouli se stejným koeficientem translační difuze jako vybraná nepravidelná částice ve stejné tekutině za stejných podmínek.

$$d_H = \frac{kT}{3\pi\eta D_{\text{translace}}} \quad (21)$$

kde k je Boltzmannova konstanta, T je absolutní Kelvinova teplota, η je dynamická viskozita kapalného prostředí a $D_{\text{translace}}$ je koeficient translační difuze (musí být extrapolován na nekonečně zředěný systém, to je na nulovou koncentraci částic). [7]

A konečně pro sedimentaci zásadní *Stokesův průměr* d_{St} : hodnota odpovídající průměru takové koule, která by klesala stejnou ustálenou rychlostí ve stejné kapalině a za stejných podmínek jako nepravidelná částice při malých Reynoldsových číslech.

$$d_{St} = \sqrt{\frac{18\eta u_0}{(\rho_s - \rho_L)g}} \quad (22)$$

kde η je dynamická viskozita čisté kapaliny, u_0 je sedimentační rychlost jedné částice, ρ_s je hustota skeletu částic, ρ_L je hustota kapaliny a g je gravitační zrychlení.

7 Optická analýza

Vzhledem k zadání práce budou na následujících řádcích pouze stručně popsány základy optické analýzy partikulárních systémů.

Optické (mikroskopické) měřicí metody mají proti dalším analytickým postupům jednu nespornou výhodu. Při neznámém vzorku partikulárního systému se totiž jediným pohledem do mikroskopu, případně na obrazovku, dá odhadnout velikostní rozptyl částic, popsat tendenci systému k tvorbě aglomerátů, tvar částic a jakost povrchu, obecně morfologii, na základě čehož může být rozhodnuto o dalším postupu. Proto by se vždy mělo jednat o první krok při analýze neznámého vzorku částic. Co do počtu, většina optických metod je čítacích, to znamená, že vzniká počtem vážená distribuční křivka. Při potřebě změny statistické váhy je potřeba distribuční křivku přepočítat pomocí statistických momentů. Obecně se optické metody dělí do dvou kategorií:

- Zobrazovací metody
- Difrakční metody

U čítacích metod vzniká vždy jeden problém k přezkoumání. Je nutno se přesvědčit, že každá popisovaná velikostní frakce částic je ve vyhodnocovaném vzorku dostatečně hojně zastoupena, aby bylo možno z naměřených výsledků vyvozovat vůbec nějaké závěry. Nicméně při analýze neznámého vzorku částic je tato informace nedostupná. Vychází se tedy ze statistických metod a teorie pravděpodobnosti, přičemž stanoví minimální požadovaná pravděpodobnost, že každá velikostní frakce je dostatečně zastoupena, v nejobecnějších případech je to 68%. [14] Nejjednodušší prevencí proti zkreslenému vyhodnocení je správný odběr vzorku partikulárního systému, kdy v daném vzorku musí být zastoupeny všechny velikostní frakce ideálně ve stejném poměru jako v originálním systému částic.

7.1 Zobrazovací metody

Jak již je patrné z názvu, zobrazovací optické metody spočívají v analýze partikulárního systému pomocí obrazu (fotografie). Každá jednotlivá částice ze zkoumaného vzorku je jednotlivě přeměřena, na základě čehož je poté zařazena do odpovídající velikostní skupiny. Mikroskopická analýza jakožto zástupce zobrazovacích metod, má poměrně dlouhou historii. Analytické postupy původně vznikali na poli biologie a medicíny a až poté se postupně aplikovali na pevné částice pro inženýrské použití.

Manuální optická analýza vzorku pod mikroskopem je velmi časově neefektivní, a proto v podstatě nepoužívaná. Místo toho nacházejí použití automatické či poloautomatické metody s výpočetním aparátem integrovaným do specializovaných softwarů na vyhodnocení obrazu v pozadí. Schéma měření je ale v obou případech totožné. Nejprve je nutno vypreparovat takový vzorek systému částic, kde částice budou tvořit pouze jednu vrstvu a nebudou se vzájemně překrývat. Následně se vytvoří snímek preparovaného vzorku. Obraz se převede do tónů šedivé a je v dostatečné kvalitě digitalizován. Následuje úprava obrazu podle zadaných kritérií, například k ohlazení hran jednotlivých částic nebo také vyplnění kontur částic. Výstupem je požadovaná veličina, zpravidla počet částic v jednotlivých přednastavených velikostních třídách, popřípadě jejich projekční průměr nebo další ekvivalentní průměry.

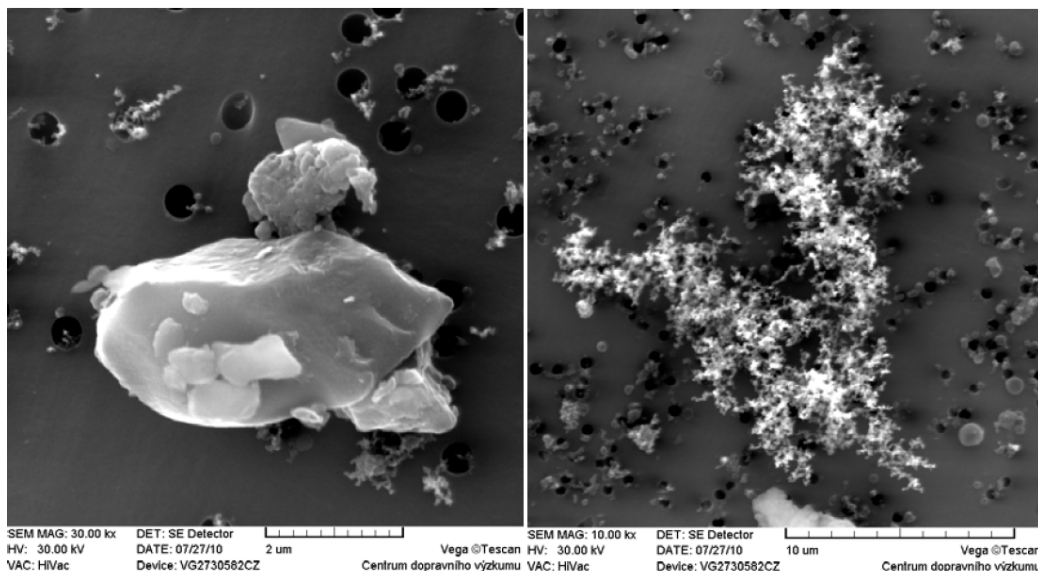
Při užívání projekční plochy k charakterizaci částic je nutno mít na paměti, že částice se samovolně nastavily do stabilní polohy, zploštělé částice tak nastavují svojí největší plochu a celková hodnota projekční plochy se tak zvýší.

Při použití světelné mikroskopie je spodní limit změřitelných částic 200nm . [11] Při menších rozměrech by docházelo k difrakci světla na hranách částic, už by poté nabylo na místě bavit se o jasných konturách, což měření světelným mikroskopem vyžaduje. Při posunu k elektronové mikroskopii minimální rozpoznatelný rozměr značně klesá do řádu nanometrů. Pro ilustraci jsou na obrázku 8 uvedeny snímky z elektronové mikroskopie pořízené mikroskopem typu SEM - Scanning Electron Microscopy zobrazující silniční prach.

Dále je na obrázku 9 vyobrazen ilustrační snímek dodaného vzorku silničního prachu vytvořený pomocí podsvíceného optického mikroskopu. Takovýto snímek může být dále použit pro softwarové vyhodnocení daného vzorku prachu.

Na snímek vhodný k analýze jsou kladeny následující požadavky:

- Na snímku musí být dostatečné množství částic, aby každá velikostní třída byla zastoupena ideálně ve stejném poměru jako v původním zdroji částic, popřípadě musí být vyhodnoceno více snímků
- Částice by se neměly překrývat, jinak nelze rozeznat, zdali se případně jedná o aglomerát, nebo jen překrytí částic
- Použité snímky musí být dostatečně kontrastní, aby snímek bylo možno vyhodnotit
- Částice by měly mít vhodný tvar pro optickou analýzu, vláknité propletené struktury nejsou pro optické vyhodnocení vhodné



Obrázek 8: Snímky z elektronového mikroskopu metodou SEM, vlevo prachová částice, pozadí tvoří kulové částice produkované zážehovým motorem; vpravo typická saze z výfuku, shluk částic [44]

Zobrazovací metody se dále dělí na metody statické a dynamické. Statické metody jsou charakteristické tím, že částice jsou fixovány pod mikroskopem a jejich pohyb je nežádoucí. Tato metoda se zpravidla hodí pro systémy, u kterých je poměr maximální a minimální velikosti částic alespoň 10:1 [14]. U dynamických metod jsou snímány částice unášené proudem kapaliny, popřípadě plynu pomocí několika kamer.

7.2 Difrakční metody

U difrakčních metod se využívá difrakce a absorpce světla na jednotlivých částicích, popřípadě kolektivech částic, k popisu jejich velikosti a koncentrace. Difrakční metody jsou z pohledu historie poměrně mladým analytickým nástrojem. Jejich rozvoj, ale i samotnou existenci, umožnilo sestrojení laserového zdroje světla a rozvoj výpočetní techniky nutné pro vyhodnocení naměřených dat.

Samotná laserová difrakce patří do skupin takzvaných ensemblových metod. Jedná se o metody, kdy je laserem osvětlen velký počet částic a získaný difrakční obraz detekovaný fotodetektorem je složen z interferenčních obrazů jednotlivých částic. Obdobně jako u zobrazovacích metod nesmí koncentrace částic překročit takovou mez, kdy by docházelo k vzájemným překryvům částic, což zkresluje výsledky měření. Současně však musí být koncentrace do-



Obrázek 9: Snímek silničního prachu pořízený metodou světelné mikroskopie s pravítkem v pozadí pro určení měřítka při následném vyhodnocování. Snímek vznikl na Ú12118, ČVUT v rámci spolupráce se Škodou Auto

statečně velká, aby bylo docíleno slušného poměru mezi získaným signálem a šumem. Standardní metoda k vyhodnocování dat získaných laserovou difrakcí je založená na Fraunhoferově aproximaci. [7]

7.3 Extinkční metody

U extinkčních metod je zaznamenáván pokles intenzity záření při průchodu částice unášené kapalinou mezi zdrojem záření a detektorem. Pokles intenzity záření je popsán Lambert-Beerschovým zákonem:

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-C_{ext} \cdot c_0 \cdot s) \quad (23)$$

kde I_0 je intenzita dopadajícího světla při nulové koncentraci částic, I je intenzita při již nenulové koncentraci částic, C_{ext} je extinkční průřez (někdy také opticky účinný průřez), c_0 je početní koncentrace částic a s je délka paprsku skrz vzorek.

Vztah mezi extinkčním průřezem a projekční plochou částice je popsán pomocí extinkčního koeficientu K , což umožní následné dopočítání právě projekční plochy částice. Vzhledem ke komplikovanému průběhu extinkčního koeficientu u malých částic se tato metoda považuje za nevhodnou pro částice menší než 2 mikrometry, jelikož v této oblasti může docházet k velkým nejistotám u měření. [14]. Statické extinkční metody jsou nejčastěji používány

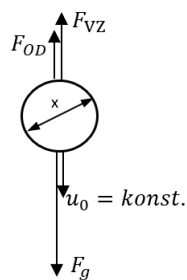
pro zjišťování koncentrace suspenzí. Pro určení počtem váženého rozdělení lze využít dynamické extinkční metody, kde záření prochází přes průtokovou kvyetu, kudy proudí suspenze zkoumaných částic silně naředěná do té míry, že jednotlivé částice se nepřekrývají a měřeným úsekem procházejí jednotlivě.

8 Sedimentace

Sedimentace je jedním ze základních způsobů separace pevných látek a kapalin. Své místo nejen v historii si vydobyla především díky své jednoduchosti. Obecně by se sedimentace dala popsat jako pohyb pevných částic v kapalině z vyšší energetické vrstvy na nižší. Tento pohyb může být vyvolán gravitačními, eventuálně odstředivými silami. Toto platí samozřejmě za předpokladu, že částice budou mít větší hustotu skeletu, než je hustota kapaliny.

Nicméně sedimentace nemusí sloužit pouze jako dělicí proces, ale i jako analytická metoda. Datuje se tak do zhruba poloviny 19. století, kdy George Gabriel Stokes publikoval řešení Navier-Stokesových rovnic pro malá Reynoldsova čísla pro pohyb kulové částice, na což navazuje Stokesova rovnice, která už udává vztah mezi sedimentační rychlostí a velikostí částice. V případě nekulových částic je výstupem Stokesův ekvivalentní průměr.

8.1 Silová rovnováha



Obrázek 10: Silová rovnováha na částici

Posouzení chování částice klesající kapalinou v tíhovém poli Země bude posouzeno na základě silové rovnováhy. Aby bylo možno uvažovat silovou rovnováhu, je nutné podmínit pohyb částice jako rovnoměrný, to znamená s konstantní rychlostí. Pro dobrou řešitelnost se za částici bude považovat dokonale hladká a nestlačitelná koule.

Na kouli působí následující síly:

Gravitační síla: $F_g = \frac{\pi x^3}{6} \cdot \rho_s \cdot g$

Vztlaková síla: $F_{vz} = \frac{\pi x^3}{6} \cdot \rho_L \cdot g$

Odporová síla: $F_{od} = C_D \cdot \frac{\pi x^2}{4} \cdot \frac{u_p^2}{2} \cdot \rho_L$

Aby byla splněna podmínka konstantní rychlosti částice, musí platit následující rovnice:

$$F_{vz} + F_{St} - F_g = 0 \quad (24)$$

Jedinou překážkou pro vyjádření sedimentační rychlosti, popřípadě velikosti částice, zůstává určení odporového koeficientu C_D , figurujícího ve vyjádření odporové síly. Ten je funkcí Reynoldsova čísla částice Re_p a tím i rychlosti samotné částice.

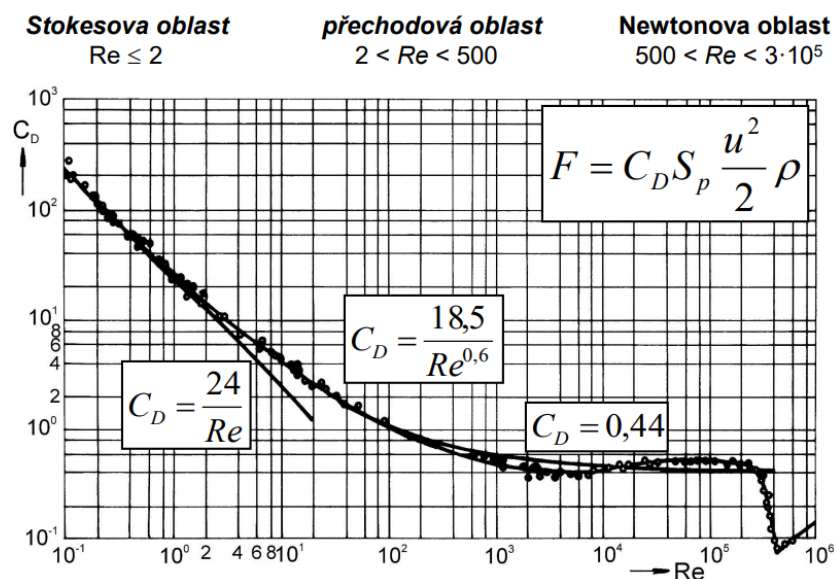
$$Re_p = \frac{\rho_L \cdot u_0 \cdot D}{\eta_l} \quad (25)$$

Odporovou sílu můžeme rozdělit do dvou složek. Při pomalém obtékání libovolného tělesa viskózní tekutinou, v případě sedimentace kapalinou, předpokládáme, že kapalina lpí na stěnách obtékaného tělesa. Smykové napětí na stěnách je tak nenulové, a tím pádem i síly působící na těleso budou nenulové. Druhou složku odporové síly tvoří tlak nerovnoměrně rozložený kolem tělesa, vyvolávající taktéž nenulovou sílu.

Průběh závislosti $C_D - Re$ (viz obr. 11) se dá rozdělit na tři části. Počáteční lineární pokles odporového koeficientu přibližně v oblasti $Re < 1$ odpovídá oboru platnosti Stokesova zákona, takzvaná Stokesova oblast. V této oblasti je převládající složkou odporu prostředí vliv viskózních smykových sil. Tato oblast je pro sedimentaci zásadní a Stokes uvádí následující vztah, pomocí kterého už je možnost dopočítat rychlost částice, popřípadě její velikost (viz rovnice 26) :

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (26)$$

Následuje takzvaná přechodová oblast s pozvolnějším poklesem křivky, zhruba do hodnoty Reynoldsova čísla $Re = 500$. Na ní navazuje Newtonova oblast, kde se dá odporový koeficient považovat za konstantní. V Newtonově oblasti, na rozdíl od Stokesovi oblasti, už nejsou hlavní složkou odporu viskózní síly, ale rozdíl tlaku před a za tělesem. Při dalším zvyšování Reynoldsova čísla dochází v úzké oblasti kolem $Re = 4 \cdot 10^5$ ke skokovému snížení



Obrázek 11: Závislost c_D na Re pro kulovou částici [47]

hodnot odporového koeficientu. Tento pokles bývá označován jako krize odporu a souvisí se změněným způsobem obtékání tělesa.

Jak již bylo jednou zmíněno, pro analytickou sedimentaci je vhodné nahlížet se ve Stokesově oblasti. Nastává tak v případech pomalého obtékání částic, nebo u malých částic, eventuálně pro malé hustoty částic. Další možností je také vysoká hodnota viskozity zvolené tekutiny. Výstupem pro tuto oblast je vztah pro Stokesovu sedimentační rychlost, takzvaná Stokesova rovnice:

$$u = \frac{\Delta \rho g}{18\eta} x^2 \quad (27)$$

kde x je Stokesův průměr, $\Delta \rho$ je rozdíl hustot skeletu částic a kapaliny, η je dynamická viskozita kapaliny, g je tíhové zrychlení, u je Stokesova sedimentační rychlost.

Stokes při odvozování uvažoval tři síly působící na částici: gravitační, vztlakovou a odporovou. Zanedbal tak vliv ostatních částic, setrvačnost, vliv stěny, popřípadě volné hladiny, a také Coriolisovy síly. I přes zanedbání některých faktorů zmíněných výše by chyba pro výpočet Stokesovi rychlosti neměla přesáhnout 5% pro Reynoldsova čísla menší než 0,2. Při ještě menších Reynoldsových číslech pod 0,2 by se chyba měla držet do 0,5% [12]

Při analytické sedimentaci s cílem určení Stokesova průměru částice nastává stav, kdy nelze ověřit, jestli experiment skutečně probíhá ve Stokesově

oblasti (viz obr. 11). Pro ověření oblasti je totiž nutné znát právě neznámý hledaný průměr. Jeden z možných postupů řešení je, že se při výpočtu využije Stokesova vztahu, a pomocí získaného průměru se ověří na základě kontroly Reynoldsova čísla legitimita předchozího postupu. Pro případ, kdy by získaný průměr spadl do jiné oblasti, je možnost upravit pracovní podmínky (viskozitu kapaliny), popřípadě zvážit jinou metodu analýzy částic.

Na předchozích řádcích byl rozebírán rovnoměrný pohyb částice. Při popisu reálného experimentu se nicméně vychází z předpokladu nulové rychlosti částic v čase $t = 0$. Nabízí se tedy otázka, jestli zrychlení částice z nuly na Stokesovu rychlost může zásadním způsobem ovlivnit průběh měření. Vliv může být určen zpětně po zjištění velikosti částice. Částice se konstantní rychlosti blíží exponenciálně a po dosažení do rovnice 28 získáme relaxační čas, což je charakteristický čas, kdy se exponenciála blíží stacionárnímu stavu.

$$t_{ch} = \frac{\rho_s \cdot x^2}{18\eta_l} \quad (28)$$

Pro hodnotu času pětikrát větší než je charakteristický čas, se bere odchylka od konstantní rychlosti menší než 1%, což se dá považovat za dostatečně přesné [15]. Za tento čas bude poté uražená vzdálenost:

$$y(5t_{ch}) = \frac{Ar \cdot \rho_s}{81\rho_L} x \quad (29)$$

$$Ar = \frac{g \cdot (\rho_s - \rho_L) \cdot \rho_L \cdot x^3}{\eta_l^2} = \frac{3}{4} c_w \cdot Re^2 \quad (30)$$

Pro odhad vlivu zrychlení bude proveden výpočet pro reprezentativní kulovou částici o velikosti $10\mu m$, hustotě $2650 \frac{kg}{m^3}$ a sedimentující v ethanolu při $20^\circ C$. Pro částici této velikosti vychází charakteristický čas řádově roven $t_{ch} \approx 10^{-5}$ s a následně uražená vzdálenost pro hodnotu pětinasobku charakteristického času $y(5t_{ch}) \approx 6 \cdot 10^{-12} m$. Po výpočtu těchto hodnot se dá konstatovat, že pro dané podmínky popsané v experimentální části lze vliv zrychlení částic zanedbat.

8.2 Sedimentace koncentrovaných suspenzí

V předcházející části práce se při určování sedimentačního chování částic (určování sedimentační rychlosti) vycházelo z idealizovaných předpokladů. Kapalina se brala jako kontinuum s newtonským chováním, neuvažoval se vliv stěn ani ostatních částic. Vzhledem k zaměření této práce se v následujících odstavcích autor zaměřil na vliv vyšší koncentrace na průběh sedimentace.

U suspenzí s objemovou koncentrací větší než 0,2% [14] už je vliv ostatních částic nezanedbatelný, (Stokesův tvar sedimentační rychlosti neplatí) a je nashodě bavit se o sedimentaci v režimu rušeného usazování (hindered settling). Ke změně chování částic při vyšších koncentracích dochází ze tří hlavních důvodů:

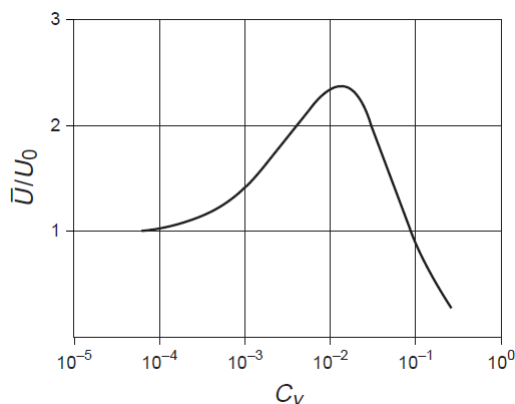
1. Při pádu částice kapalinou může dojít ke kontaktu s jinou částicí, důsledkem je změna trajektorie. Pravděpodobnost srážky roste s rostoucí koncentrací částic
2. Dalším důvodem je zpětný tok kapaliny. Při sedimentaci neklesá pouze částice, ale i část kapaliny v její bezprostřední blízkosti. V rámci zachování platnosti rovnice kontinuity musí vznikat i proud kapaliny směrem vzhůru, tzv. zpětný tok. S rostoucí koncentrací částic tento zpětný tok proporcionálně roste, působí proti sedimentujícím částicím, a tím zpomaluje proces sedimentace
3. Vzájemné elektrostatické působení v případě usazování nabitých částic

Vzhledem k tomu, že pro výše zmíněné body 1. a 2. je zásadní objem zaujatý částicemi, a ne jejich hmotnost, je **vhodným parametrem popisujícím rušené usazování právě objemová koncentrace částic.**

Zkoumané vzorky z experimentální části práce jsou většinou tvořeny oxidem křemičitým a dalšími prvky (viz tabulka 7). Vzhledem k charakteru zkoumaného prachu a způsobu zacházení s ním se nepředpokládá usazování nabitých částic, a proto tato problematika nebude v teoretické části práce dále rozváděna.

8.2.1 Hydrodynamické interakce

U velmi zředěných suspenzí o koncentracích nižších než 0,2% (prakticky, teoreticky 0,01%) [14] je vzájemná interakce částic zanedbatelná. S rostoucí koncentrací dochází ke zvyšování sedimentační rychlosti pozorovatelných částic (viz obr. 12) na maximum kolem 1 obj.-%. pro kulové částice. Toto maximum může dosáhnout až trojnásobku sedimentační rychlosti jednotlivé částice podle Stokese, proto je snaha u některých měřících metod pracujících s malými objemy zkušebních vzorků (typicky pipetovací metody), držet koncentraci pod touto hranicí. [16] Pro nekulové částice se hodnota maxima snižuje a současně se posouvá směrem k nižším koncentracím. Maximum také klesá pro systémy částic s širší distribuční křivkou. S rostoucí koncentrací nadále převládá rušené usazování a rychlost mraku částic klesá.



Obrázek 12: Závislost podílu sedimentační rychlosti suspenze a částice na objemové koncentraci [16]

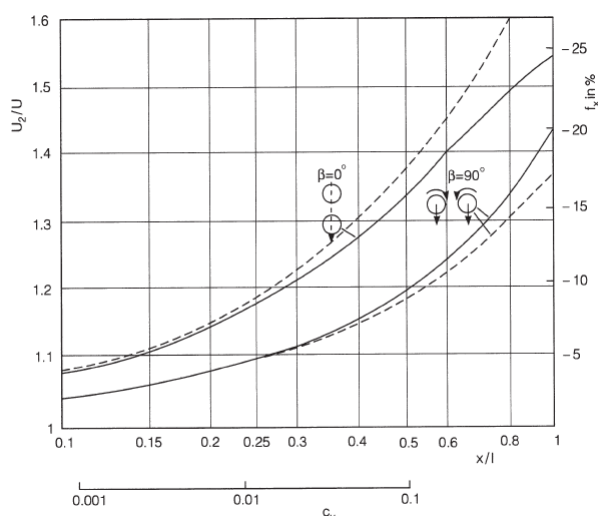
Situace z obrázku 12 se dá pro lepší představu přiblížit na pelotonu cyklistů. Do určitého počtu si jezdci v pelotonu vypomáhají tím, že na jezdce uvnitř pelotonu působí výrazně menší odporová síla vzduchu, díky čemuž mohou jet rychleji. V okamžiku, kdy by se ale na určité ploše vyskytovalo příliš mnoho závodníků, by si již navzájem začali překážet a došlo by ke zpomalení.

Zvyšování rychlosti u malých koncentrací (pod 1 obj.-%) zde bude popsáno pomocí modelu od Happela a Brennera. [20] Tito autoři přišli s následující rovnicí:

$$\frac{u_2}{u_0} = 1 + \frac{3x}{8l}(1 + \cos^2 \beta) = 1 + \frac{3}{8} \frac{1 + \cos^2 \beta}{1 + h/x} \quad (31)$$

kde u_0 je rychlost jedné částice, u_2 je rychlost páru, x je průměr částice, l je vzdálenost středu částice ke stěně nádoby, h je vzdálenost povrchů částic. Vycházejí, jako většina ostatních autorů, z předpokladu dvou totožných kulových částic. Volbou pouze dvou částic tak omezují vliv zpětného proudění. Úhlem β označují úhel mezi spojnicí středů částic a přímkou ve směru pohybu, kdy krajními polohami jsou usedání dvou horizontálně respektive vertikálně uspořádaných částic.

Dle autorů by docházelo k neustálému zvyšování sedimentační rychlosti s rostoucí objemovou koncentrací částic. Dělo by se tak převážně kvůli faktu, že sedimentující částice svým pohybem kolem sebe vytváří rychlostní pole. Nachází-li se další částice v oblasti ovlivněné tímto rychlostním polem, je nutné pro výpočet její rychlosti neuvažovat jen rychlost podle Stokesa, ale je nutné přičíst i hodnotu z rychlostního pole, indukované právě druhou částicí.



Obrázek 13: Změny rychlostí při hydrodynamických interakcích dvou částic: (—) exaktní hodnoty, (---) aproximace [16]

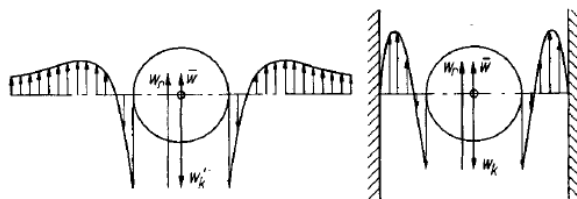
Jak již ale bylo zmíněno výše, toto platí pouze do cca 1 obj.-%.

S rostoucí koncentrací částic se problematika značně komplikuje, a nejen zjednodušení s ignorováním zpětného toku způsobí rozdílné chování modelu a reálného experimentu nad onou hranicí 1 obj.-%. V reálných experimentech navíc zřídka vyjdou ideální kulové částice.

Pro představu bude uvedeno několik příkladů z reálného chování netotožných částic. Dvě částice usedající horizontálně vedle sebe se nepohybují pouze translačně, ale současně i rotují, čímž dále ovlivňují rychlostní pole kolem sebe, a odpuzují tak další částice. Dalším příkladem může být usedání tří totožných částic nad sebou. Pokud budou dvě horní částice blíže k sobě, tak výsledkem bude, že se prostřední částice přiblíží k nejnižší částici, budou usedat rychleji jako pár, a třetí částici (tu nejvýše) nechají za sebou. V případě částic diametrálně rozdílných průměrů může dojít k situaci, že si klesající velká částice tu menší 'chytí' a menší částice se stává satelitem té větší. Nakonec příklad rozporující teorii Happela and Brennera [20]. Nechtě klesají dvě koule nad sebou. Podle autorů jsou stále ve stejné vzdálenosti, ve skutečnosti ale vzhledem k menší odporové síle na druhou částici dojde k tomu, že se koule začnou přibližovat. [19]

8.2.2 Difuze

V případě velmi jemných suspenzí je nutné brát v potaz i Brownův pohyb, který se projeví difuzním transportem hmoty. Vzhledem k faktu, že difuzní



Obrázek 14: Vliv stěny na rychlostní pole kolem kulové částice nerušeně sedimentující (vlevo) a na částici v úzkém kanálu (vpravo) [26]

koeficient je nepřímo úměrný velikosti částic, je tento jev důležitý právě pro velmi malé částice. Obzvláště u měřících metod, kde je principem měření zkoumání pohybu částic, což sedimentace je, může dojít v extrémním případě až k vyrovnání difuzního a sedimentačního (translačního) transportu. V takovém případě by došlo k vytvoření stacionárního koncentračního profilu na celé výšce zkušební nádoby.

Vodítko k posouzení vlivu difuze nabízí Pecletovo číslo:

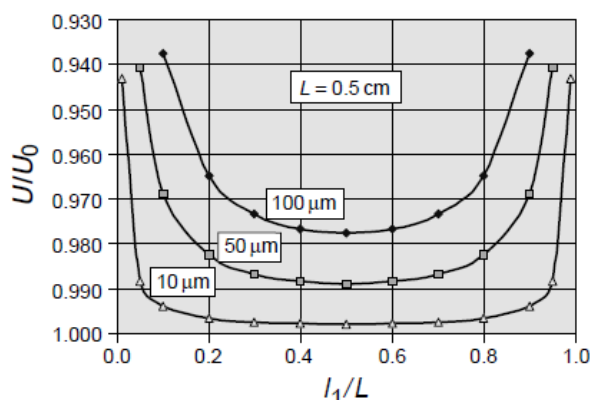
$$Pe = \frac{D_t}{u_{sed} \cdot x} = \frac{6}{\pi} \frac{k_B T}{a_c \cdot \Delta \rho \cdot x^4} = \frac{k_B T}{a_c \cdot \Delta \rho \cdot x \cdot V} \quad (32)$$

kde D_t je difuzní koeficient, u_{sed} je Stokesova sedimentační rychlost a x je průměr částice. Pro malá Pecletova čísla (< 1) je nutno ve výpočtech zohlednit i difuzi, což přibližně odpovídá částicím výrazně menším než $1 \mu m$ [11]. Vzhledem k charakteru zkoumaných vzorků prachu s velikostmi částic přes 1 mikron bude vliv difuze považován za marginální a nebude ve výpočtech zohledněn.

8.2.3 Vliv stěn

Při pohybu částice v blízkosti stěny se začnou projevovat efekty způsobující zvýšení odporové síly. Mezi tyto efekty patří vliv odražené kapaliny od stěny, která by bez přítomnosti stěny částici pouze obtekla. Je také potřeba brát v potaz rychlostní profil při proudění kapaliny trubkou, kdy kapalina na stěně je stacionární, což opět zpomalí usadající částice. Následně tak dochází i k chybnému analytickému určení vzorku částic. Nabízí se otázka, jak kvantitativně vliv stěn posoudit. V literatuře [14] se dá dohledat rovnice pro změnu odporového koeficientu pro případ Stokesovi oblasti proudění:

$$c_w = \frac{24}{Re} \cdot \left(1 - \frac{9}{16} \cdot \left(1 + 2 \frac{z}{d} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (33)$$



Obrázek 15: Vliv stěny na sedimentační rychlost. l_1 je vzdálenost středu částice ke stěně, L je pak vzdálenost stěn [16]

kde z je vzdálenost od povrchu částice ke stěně, d je průměr částice. Pro přímé určení chyby velikosti částic lze použít následující rovnice:

$$D = d_{st} \left(1 + k \frac{D}{L} \right)^{0,5} \quad (34)$$

kde k je parametr tvaru zkušební nádoby ($k = 2, 104$ pro válec), L je průměr zkušební nádoby, d_{st} by byl průměr získaný pomocí Stokesovy rovnice, D je skutečná velikost částice. Rovnice vychází z předpokladu sedimentace jedné částice ve středu nádoby. Pro částici o velikosti $100 \mu m$ ve válci o průměru $2,5 cm$ dojdeme ke vztahu:

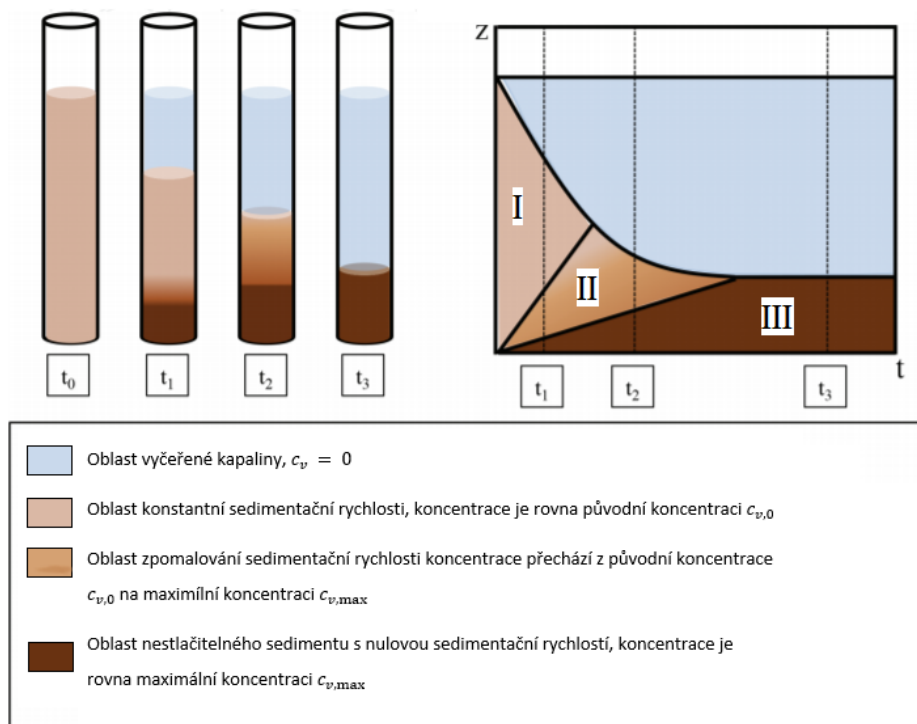
$$D = 1,004 \cdot d_{st} \quad (35)$$

Při zanedbání vlivu stěn v tomto případě bude výpočet zatížen chybou $0,4\%$. V praktické části této práce byly analyzovány částice o řád menší ve stejně velkých válcích, tudíž se chyba výpočtu nadále sníží, a proto nebyl vliv stěn v praktické části brán v potaz.

Grafické znázornění vlivu stěn na usazení jedné částice je zobrazeno na obrázku 15.

8.3 Průběh sedimentační křivky

S rostoucí koncentrací se postupně vytváří ostré rozhraní mezi sedimentujícími částicemi a čistou kapalinou. Vykreslením poklesu výšky tohoto rozhraní v závislosti na čase vznikne sedimentační křivka. Dobře pozorovatelné



Obrázek 16: Jednotlivé fáze sedimentace podle Kynchovy teorie [37]

rozhraní usnadňuje odečet své výšky při manuálním měření v průběhu experimentu a přispívá tak k přesnějším výsledkům. Dobře pozorovatelné rozhraní bylo v případě arizonských prachů dosaženo při koncentracích přibližně nad 7 obj.-%. Tato hodnota je závislá na koncentraci prachu, s rostoucí hrubostí prachu roste i optimální koncentrace.

Průběh sedimentační křivky je vykreslen na obrázku 16. Vychází se z předpokladu, že před začátkem experimentu byla suspenze řádně homogenizována, aby startovní podmínky nebyly podmíněny místními rozdíly v koncentraci pevných částic. Samozřejmostí by mělo být takové zacházení se suspenzí, které nepovede ke vzniku bublin v suspenzi, což by měření znehodnotilo.

Průběh sedimentační křivky se dá rozdělit na tři části. 1. oblast (v obrázku 16 označena I) je oblastí konstantní sedimentační rychlosti, průběh sedimentační křivky je tedy lineární. Tato oblast je zásadní pro určení sedimentační rychlosti mraku částic při manuálním optickém odečtu poklesu výšky rozhraní. V určitých případech je pozorovatelná rozběhová fáze, kdy dochází k náběhu na lineární část. Naměřené body této rozběhové fáze by mohly způsobit zkreslení vyhodnocení velikosti částic a neměly by být použity

pro vyhodnocení. S rostoucí koncentrací se křivka zplošťuje a proces sedimentace probíhá pomaleji. Při přechodu do oblasti II se suspenze začíná zahušťovat z původní koncentrace c_0 a klesá tak rychlost částic. Postupný nárůst koncentrace suspenze graduje přechodem do oblasti III, kde dochází k finálnímu stlačování sedimentu vlastní vahou až do momentu dosažení maximální možné koncentrace c_{max} , přičemž i rychlost částic je nulová. Při srovnání maximální objemové koncentrace a porozity platí vztah:

$$c_{v,max} = 1 - \varepsilon \quad (36)$$

V některých případech částic s širokou distribuční křivkou může dojít ke vzniku více rozhraní. [19] Kvůli zpětnému toku jsou totiž nejmenší částice vyplaveny nad hlavní část suspenze. Vzniká tak sekundární suspenze velmi jemných částic, které vytvoří jedno nebo více dalších rozhraní nad hlavní suspenzí.

9 Kvantitativní určení vlivu vyšší koncentrace monodisperzních systémů

V literatuře zabývající se určením vlivu vyšší koncentrace na proces sedimentace dominují následující dva základní přístupy: [15]

- Korekce látkových parametrů
- Průtokové modely

9.1 Korekce látkových parametrů

První hlavní metodou je korekce látkových parametrů v pohybových rovnicích v podobě brzdě funkce. Suspenze je brána jako kontinuum, u kterého je hustota a viskozita funkcí objemové koncentrace částic c_v . Výpočet rychlosti mraku částic je proveden pomocí známých pohybových rovnic, ve kterých jsou hustota a viskozita kapaliny nahrazeny hustotou a viskozitou suspenze. Výstupem pro výpočet rychlosti suspenze za použití změny viskozity je vztah 37 [9]:

$$\frac{u}{u_0} = \frac{(1 - c_v)^2}{\frac{\eta}{\eta_0}} \quad (37)$$

Existuje několik modelů, přičemž nejznámějším je Einsteinův vztah (viz rovnice 38). Předpokladem je suspenze hladkých kulových a nestlačitelných částic. [17]

$$\frac{\eta}{\eta_0} = 1 + 2,5c_v \quad (38)$$

Einsteinův vztah lze uplatnit v případě silně zředěných suspenzí, ideálně do $c_v = 3\%$. Nebere v potaz Brownův pohyb. Dále předpokládá, že nulová rychlost částic bude dosažena při $c_v = 100\%$. Z experimentů je ale známo, že dosažení nulové rychlosti nastává už v koncentracích mezi 60% a 65%. V rámci eliminace tohoto nedostatku vznikl takzvaný TUSMP-GK model 1: [28]

$$\frac{\eta}{\eta_0} = (1 + 2,5c_v) \cdot \left(1 - \frac{1}{c_{v,max}}\right)^{-0,65} \quad (39)$$

Evolucí byl model TUSMP-GK 2, který je určený přímo pro $c_v > 3\%$:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = (1 + 2,5c_v) \cdot \left(-\frac{1,2275}{c_{v,max} - 0,03}c_v + \frac{1,2275}{c_{v,max} - 0,03}c_{v,max}\right)^{-0,65} \quad (40)$$

Další autoři navázali na Einsteinův vztah, většinou se zaměřením na velká Pecletova čísla, to znamená nebrali v potaz vliv difuze. V této práci zmíněnou výjimkou jsou autoři Batchelor a Green [21], kteří Brownův pohyb částic zohledňují, přičemž přidávají k Einsteinově rovnici člen $6,2c_v^2$. Dále přicházejí se členem pro případ smykového toku $5,3c_v^2$, pro elongační tok $7,6$.

$$\frac{\eta}{\eta_0} = 1 + 2,5c_v + 6,2c_v^2 \quad (41)$$

Dalším přístupem při zanedbání difuze je vztah podle Phan-Tiem a Phan [22]. Základem je suspenze o objemové koncentraci c_v a viskozitě η . Přidáním malého množství částic dc_v do kapalné části suspenze $1 - c_v$ se objemová koncentrace částic zvýší o $\frac{dc_v}{(1-c_v)}$. Za předpokladu, že η je průměrná viskozita suspenze po dosažení do Einsteinova vztahu lze nárůst viskozity vyjádřit ve tvaru:

$$d\eta = \frac{5}{2} \frac{dc_v}{(1-c_v)} \eta \quad (42)$$

a po integraci:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = (1 - c_v)^{-5/2} \quad (43)$$

Následně autoři Ball a Richmond [18] přišli s myšlenkou, že částice se kvůli shlukování nepřidávají do celého objemu kapaliny $1 - c_v$, a nahradili tento člen poměrem $1 - (c_v/c_{v,max})$ společně s úpravou exponentu:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \left(-\frac{c_v}{c_{v,max}} \right)^{-2,5c_{v,max}} \quad (44)$$

kde $c_{v,max}$ je maximální možná koncentrace. Pro kulové částice je $c_{v,max}$ přibližně 0,64.[17]

Tabulka 2: Stručný přehled maximálních koncentrací

$c_{v,max} = 0,5236$	kubické uspořádání
$c_{v,max} = 0,6800$	náhodné uspořádání
$c_{v,max} = 0,7405$	hexagonální uspořádání

Dle Metznera [23] je nejvhodnější rovnicí vztah od Frankela a Acrivose (1967):

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{9 (c_v/c_{v,max})^{1/3}}{8 \left(1 - (c_v/c_{v,max})^{1/3} \right)} \quad (45)$$

kde pro kulové částice platí $c_{v,max} \sim 0,62 - 0,64$.

Dalším doporučením Metznera je vztah:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \left(1 - \frac{c_{v,max}}{A} \right)^{-2} \quad (46)$$

kde A je empirická konstanta. Pro hladké monodisperzní koule je $A = 0,68$ [23].

9.2 Kombinovaný přístup změn látkových parametrů

Vedle přístupu se změnou viskozity se dá využít také kombinovaný přístup, který bere v potaz i změnu hustoty suspenze (viz rovnice 48). Kvůli fyzikálně-chemické interakci mezi povrchem částice a molekulami kapaliny se kolem částice vytvoří kapalinové pouzdro, které se pohybuje společně s částicí. Tím dochází ke snížení efektivní hustoty částic (= hmotnostní koncentrace/objemová koncentrace). Metoda využívá Stokesovu rovnici s následujícími úpravami:

$$u = \frac{gx^2}{18\eta}(\rho_s - \rho_L) \quad (47)$$

Místo hustoty kapaliny se použije hustota suspenze vypočítaná dle rovnice 48 a za viskozitu suspenze se použije jeden z výše uvedených vztahů v závislosti na koncentraci suspenze. Za u se dosadí rychlost sedimentující suspenze a výstupem je poté charakteristický průměr částice x .

$$\rho_{susp} = \rho_{l,0} + c_v(\rho_s - \rho_{l,0}) \quad (48)$$

kde ρ_{susp} je hustota suspenze, $\rho_{l,0}$ je hustota čisté kapaliny, ρ_s je hustota skeletu částic.

9.3 Průtokový model

Druhým hlavním způsobem je pohled na sedimentaci jako na tok kapaliny skrz vrstvu částic. Výpočet rychlost mraku částic (sedimentační rychlost suspenze) probíhá na základě volby průtokového modelu. Nejznámějším takovýmto modelem je model Richardsons a Zakiho (viz rovnice 50). Předpokladem jsou monodisperzní částice o konstantní hustotě skeletu. Korekce sedimentační rychlosti se provádí pomocí korekčního faktoru, který je většinou empirického charakteru. Tímto korekčním faktorem k_F je poté přenásobena sedimentační rychlost jedné částice u_0 a výsledkem je sedimentační rychlost suspenze u .

$$u = k_F \cdot u_0 \quad (49)$$

9.3.1 Richardson a Zakiho rovnice

$$\frac{u}{u_0} = (1 - c_V)^n; \quad n = f(Re) \quad (50)$$

Exponent n v Zakiho vztahu je empirického charakteru. Je funkcí Reynoldsova čísla pro jednu částici (dosazuje se rychlost částice), popřípadě funkcí poměru velikosti částice ku průměru sedimentačního válce, čímž zohledňuje vliv stěn. Pro autorem navržený průběh měření a měřené vzorky prachu nemusí být brán vliv stěn v potaz (více v odstavci 8.2.3 Vliv stěn). Dle [14] je Zakiho empirický vztah vyhovující pro objemové koncentrace do 30%. V průběhu času vznikly empirické rovnice pro určení vhodného koeficientu n místo dříve užívaných tabelovaných hodnot (viz tabulky 3 a 4). Jako příklad je uveden vztah Halloanda a Batta [25]:

$$n = 4,6 - Re \left[\frac{100 - 2,3Re}{(1,5 + Re)(105 + Re)} \right] \quad (51)$$

přičemž autor udává maximální chybu exponentu n v rozmezí $-2,8\%$ a $+1,9\%$. Další evolucí bylo nahrazení Reynoldsova čísla číslem Galileovým.

Tabulka 3: Exponent do Zakiho vztahu pro různé hodnoty Reynoldsova čísla

Reynoldsovo číslo	Exponent n
$Re < 0,2$	4,65
$0,2 < Re < 1$	$4,35 \cdot Re^{-0,03}$
$1 < Re < 500$	$4,45 \cdot Re^{-0,1}$
$500 < Re < 300000$	2,39

Tabulka 4: Exponent do Zakiho vztahu pro různé hodnoty Reynoldsova čísla v případě nutnosti započítání vlivu stěn

Reynoldsovo číslo	Exponent n
$Re < 0,2$	$4,65 + 19,5 \left(\frac{d_p}{D}\right)$
$0,2 < Re < 1$	$\left(4,65 + 19,5 \left(\frac{d_p}{D}\right)\right) \cdot Re^{-0,03}$
$1 < Re < 500$	$\left(4,65 + 18 \left(\frac{d_p}{D}\right)\right) \cdot Re^{-0,1}$
$500 < Re$	2,39

Galileovo číslo vyjadřuje podíl gravitačních a viskózních sil. Tento postup má nesporné výhody v tom, že není potřeba znát současně velikost i rychlost usedání jedné částice, postačí první zmiňované.

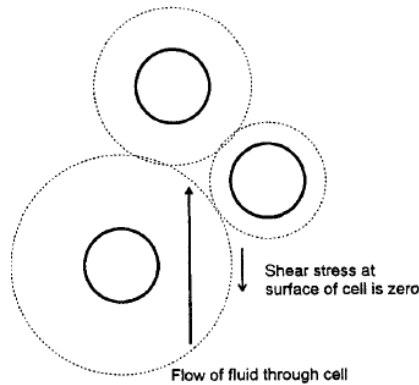
$$K = 0,043 \cdot Ga^{0,57} \left[1 - 1,24 \left(\frac{x}{D}\right)^{0,27} \right] \quad (52)$$

$$Ga = \frac{g \cdot x^3 \cdot \rho_L}{\eta^2} \quad (53)$$

$$n = \frac{4,8 + 2,4K}{1 + K} \quad (54)$$

kde K je pomocný koeficient, Ga je Galileovo číslo, x je průměr částice, D je průměr nádoby, g je gravitační zrychlení, ρ_L je viskozita čisté kapaliny, η je viskozita čisté kapaliny a n je exponent do vztahu Richardsona a Zakiho.

Richardson a Zaki (1954) navázali na vůbec první obecně uznávaný souhrnný model a teoretický popis sedimentace, a sice na Kynchovu teorii [10] z roku 1952. Ta je platná pro ideální suspenzi, která předpokládá stejně velké nestlačitelné částice s konstantní hustotou skeletu. Dalšími předpoklady je neprobíhající přenos hmoty mezi částicemi a kapalinou, stejná koncentrace částic napříč libovolným horizontálním průřezem a závislost sedimentační



Obrázek 17: Smithův model obalů kolem částic

rychlosti pouze na koncentraci pevných částic. Právě Kynchova teorie vytvořila podmínky pro vznik dalších sedimentačních modelů. Jedním z novějších modelů z přelomu tisíciletí je i Smithův model [27].

Podstatou Smithova modelu je, že každá částice má kolem sebe myšlený obal naplněný kapalinou. Množství kapaliny v obalu kolem částice je náhodné. Smith poté pracuje s pravděpodobností dotyku buněk kolem částic. Výsledným vztahem pro určení sedimentační rychlosti mraku částic je:

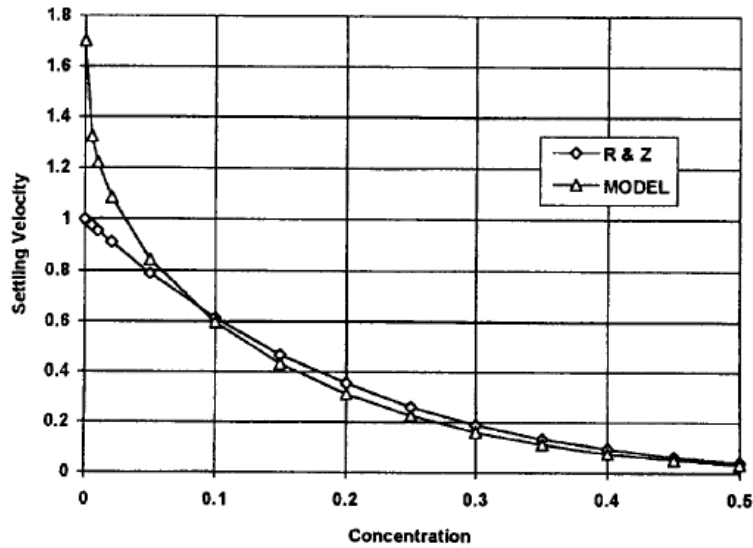
$$u = \frac{\bar{k}\Delta\rho g\bar{c}}{\eta} \quad (55)$$

kde u je rychlost sedimentujícího mraku částic pro daný průměr částice, $\Delta\rho$ je rozdíl hustot částice a kapaliny, \bar{k} je střední permeabilita média, \bar{c} je střední objemová koncentrace, η je dynamická viskozita kapaliny.

Při porovnání s modelem Richardsona a Zakiho (viz rovnice 50) je patrné, že Smith neodpovídá v krajní poloze s nulovou koncentrací, kde by měl formálně vycházet z jedničky. U velmi nízkých koncentrací však Smith tímto zohledňuje zvýšení sedimentační rychlosti až do koncentrací přibližně 7 objemových procent (viz 8.2.1 Hydrodynamické interakce), které není modelem Richardsona a Zakiho bráno v potaz. U koncentrací nad zmíněnou hranici přibližně 7 objemových procent vykazují oba modely dobrou shodu. Model Richardsona a Zakiho je tak i přes své stáří ve vhodném pásmu koncentrací stále relevantním i v porovnání s mnohem mladšími a složitějšími modely.

9.3.2 Evoluce rovnice Richardsona a Zakiho

Na základě experimentálních dat byl původní vztah Richardsona a Zakiho upraven autory Camenenem a van Bangpromem [24] se zohledněním ma-



Obrázek 18: Porovnání Smithova modelu a Richardsona a Zakiho [27]

Tabulka 5: Souhrn hodnot korekčních faktorů pro uvedené modely v závislosti na koncentraci, první 4 modely neberou reálnou maximální koncentraci v potaz, následující 3 modely počítají s maximální možnou koncentrací $c_{max} = 0,62$

c_v	Modely s $c_{max} = 1$				Modely zohledňující reálné $c_{max} = 0,62$		
	Einstein	Batchelor Green	Zaki	Brauer a Kriegel	tusmp-2 Li 2005	Frankel Acrivose	modif. Zaki
1%	0,9562	0,9556	0,9543	0,9363	1,1164	2,5769	0,9543
5%	0,8022	0,7913	0,7878	0,7210	0,8962	1,0546	0,7871
10%	0,6480	0,6174	0,6127	0,5266	0,6820	0,6027	0,6104
15%	0,5255	0,4771	0,4697	0,3924	0,5179	0,3884	0,4654
20%	0,4267	0,3661	0,3543	0,2979	0,3909	0,2606	0,3479

ximální dosažitelné koncentrace – pro kulové částice opět v rozmezí 0,6 až 0,64. Z obrázku 19 vyplývá, že rozdíly jsou však s původním modelem minimální.

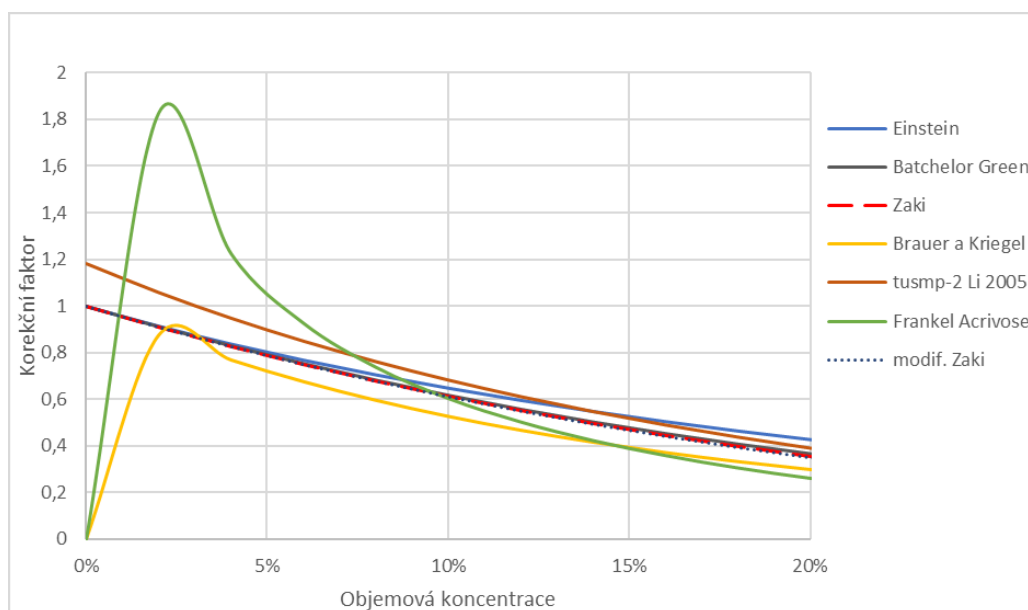
$$\frac{u}{u_0} = (1 - c_v)^{n-1} \left(1 - \frac{c_v}{c_{v,max}} \right)^{c_{v,max}} \quad (56)$$

9.4 Brauer a Kriegel

Dalším modelem pro monodisperzní částice je fyzikální model Brauera a Kriegela [26], který bere v potaz zpětný tok i turbulenci vzniklou usedáním

sedimentu. Jedná se o zjednodušený model odvozený z rovnic pro bidisperzní systém (viz Brauer a Kriegel pro bidisperzní systémy). Dle Bernharda [16] vykazuje dobrou shodu s experimentálními daty při koncentraci větší než 5%.

$$\frac{u}{u_0} = \frac{(1 - c_v)}{\left[1 + \frac{c_v}{(1 - c_v)^2}\right] \left[1 + \frac{1,2}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{12c_v}\right)^2 - \frac{1}{2}}}\right]} \quad (57)$$



Obrázek 19: Závislost hodnot korekčních faktorů na objemové koncentraci

10 Polydisperzní koncentrované systémy

Většina publikovaných článků se zabývá sedimentací kulových nestlačitelných částic. To je ale z pohledu praxe méně častý jev a ve většině příkladů se setkáme s polydisperzními systémy, to je s částicemi o různých velikostech. Charakteristikou polydisperzních systémů je existence více rozhraní v průběhu sedimentace v závislosti na počtu složek suspenze. V takových případech už není možné použít přístup pro monodisperzní suspenze a je nutno zvolit jinou metodiku. Nabízejí se dva přístupy.

První možností je takzvaný částicový přístup. Vychází převážně modifikací již existujících vztahů pro monodisperzní systémy. Druhou možností je simulace při numerickém řešení zákonů zachování za použití sofistikovaných numerických schémat. Druhá jmenovaná metoda představuje značně

náročný přístup, který není v souladu se zněním zadání práce vyžadující metodu do polních podmínek, a tudíž v této práci nebude dále rozebírána. V následujících odstavcích bude nastíněn model Brauera a Kriegela [26], který v této práci bude reprezentantem metod spočívajících na částicovém přístupu.

10.1 Brauer a Kriegel pro bidisperzní koncentrované systémy

Brauer a Kriegel vytvořili fyzikální model pro sedimentaci koncentrovaných bidisperzních systémů, přičemž zjednodušením lze získat model pro monodisperzní systém (viz výše). Předpoklady jejich bidisperzního modelu jsou následující. Soubor částic je kulového tvaru a nestlačitelný. Výchozím stavem suspenze je uspořádání částic dle obrázku 20a. V pravidelných vrstvách o vzdálenosti s nad sebou jsou uspořádány částice jemnější a hrubší frakce. Navíc jsou částice uspořádány tak, že při pohledu shora jsou v zákrytu pouze částice stejné velikosti. Dle modelu se částice mohou pohybovat pouze vertikálně. Velikost parametru a v jedné vrstvě má takovou hodnotu, aby částice z jedné vrstvy mohly dosednout do mezery mezi částicemi z další vrstvy. Jediný proces zodpovědný za změny koncentrace je přibližování jednotlivých vrstev až na minimální vzdálenost $s^* = 0,5s/d_{k1}$, kde s je vzdálenost sousedních vrstev a d_{k1} je průměr větších částic. Vylučují tak jakékoliv další shlukování částic, které by způsobilo místní rozdíly v koncentraci. Bezrozměrný tvar parametru a má následující podobu:

$$a^* = a/d_{k1} \quad (58)$$

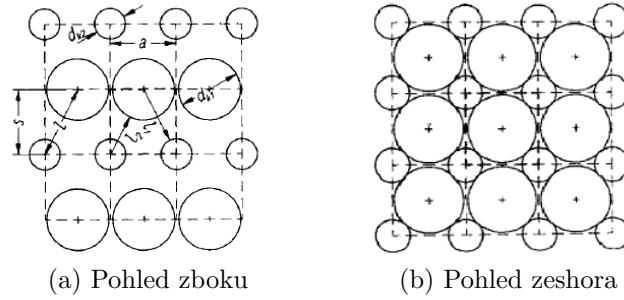
Maximální koncentrace je dosaženo tehdy, když se vrstvy přiblíží natolik, až se navzájem velké částice dotýkají v rovině těch menších. Je zaveden bezrozměrný průměr částic d^* :

$$d^* = \frac{d_{k1}}{d_{k2}} \quad (59)$$

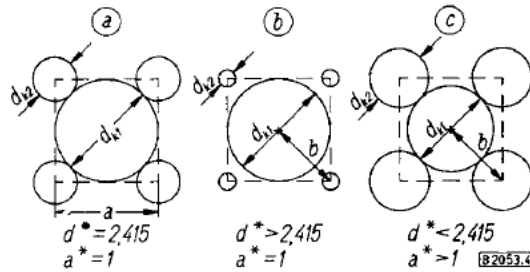
kde d_{k1} je průměr velkých částic, d_{k2} je průměr malých částic.

Autoři rozdělují tři stavy podle poměrů velikosti částic:

1. První uvedený je speciální případ pro $d^* = 2,415$ a $a^* = 1$. Za těchto podmínek dojde k maximálnímu možnému vyplnění prostoru
2. Druhým případem je větší poměr průměrů $d^* > 2,415$ při stejném $a^* = 1$. Větší částice tak v podstatě vytvoří síť, kterou menší částice volně propadávají



Obrázek 20: Grafické znázornění výchozího rozložení částic [26]



Obrázek 21: Pohled shora pro různé poměry průměrů částic [26]

3. Třetím stavem je případ $d^* < 2,415$ a $a^* > 1$, kdy při dosednutí vrstev velké částice už nejsou v kontaktu a opírají se pouze o částice menší

Vzhledem k rozsáhlosti rovnic zde budou uvedeny vztahy pouze pro stav 2:

$$\frac{u_2}{u_{0,2}} = \frac{1 - c_v}{\left[1 + \frac{d^{*5} + 1}{(1 - c_v) \cdot \left(\frac{1 - c_v}{c} (d^{*3} + 1) + d^{*3} - d^{*5} \right)} \right]} \left[1 + \frac{1,2}{\sqrt{\frac{1}{2} + \left(\frac{\pi}{12c_v} \right)^2} - \frac{1}{2}} \right] \quad (60)$$

$$\frac{u_1}{u_{0,1}} = \frac{1 - c_v}{\left[1 + \frac{d^{*5} + 1}{(1 - c_v) \cdot \left(\frac{1 - c_v}{c} d^{*2} (d^{*3} + 1) + d^{*3} - d^{*5} \right)} \right]} \left[1 + \frac{1,2}{\sqrt{\frac{1}{2} + \left(\frac{\pi}{12c_v} \right)^2} - \frac{1}{2d^*}} \right] \quad (61)$$

kde u_2 je rychlost sedimentujícího rozhraní malých částic, $u_{0,2}$ je sedimentační rychlost malé částice, u_1 je rychlost sedimentujícího rozhraní velkých částic a $u_{0,1}$ je sedimentační rychlost velké částice.

10.2 Brauer a Kriegel pro polydisperzní koncentrované systémy

Zásluhu o rozšíření a modifikaci modelu Brauera a Kriegla pro polydisperzní systémy nese Kaskas [13] ve své disertační práci. Jsou zachovány stále stejné předpoklady platné i pro původní model Brauera a Kriegela. Navíc je model platný za předpokladu přítomnosti alespoň tří velikostních frakcí částic s Reynoldsovým číslem menším než 1. Hodnota sedimentační rychlosti mraku částic i -té velikostní frakce se dá určit pomocí rovnice 62 za použití následujících korekčních faktorů. Faktor $k_{g,i}$ zohledňuje vliv zpětného proudění a druhý faktor $k_{T,i}$ koriguje vliv vzniku turbulence při usedání mraku částic. Rovnice pro výpočet rychlosti i -té velikostní frakce tak dostává následující tvar:

$$u_i = k_{g,i} \cdot k_{T,i} \cdot u_{0,i} \quad (62)$$

$$k_{g,i} = \frac{1}{1 + \frac{1}{(1-c_v) \cdot \left[\frac{d_i^{*2} \cdot \rho_i^*}{\sum_{k=1}^N (c_{v,k} \cdot d_k^{*2} \cdot \rho_k^*)} - 1 \right]}} \quad (63)$$

$$k_{T,i} = \frac{1 - c_v}{1 + \frac{1,05 \cdot d_i^* / d_1^*}{\sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(1 + \frac{d_2^*}{d_1^*}\right)^2 + \left(\frac{\frac{2\pi}{3N^2}}{c_v \cdot \left(1 + \frac{d_2^*}{d_1^*}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)}\right)^2 + \frac{d_i^* - \sum_{k=1}^N d_k^*}{x_i^* \cdot 2^{(N-1)}}}}} \quad (64)$$

kde:

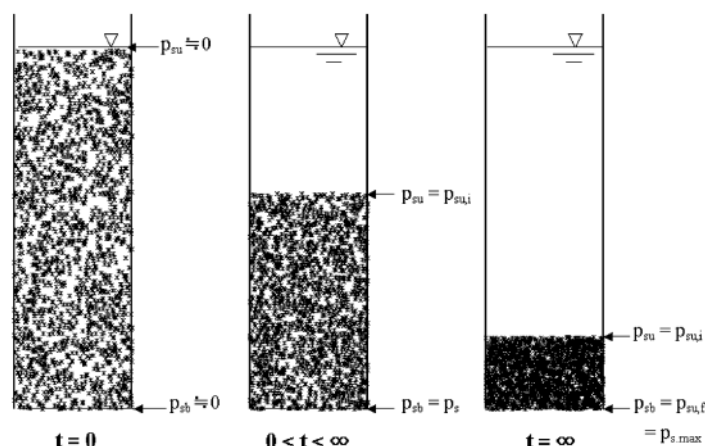
$$d_i^* = \frac{d_i}{d_N} \quad d_1 > d_2 > \dots > d_N \quad (65)$$

$$\rho_i^* = \frac{\rho_{s,i} - \rho_f}{\rho_{s,N} - \rho_f} \quad (66)$$

V případě monodisperzního systému se Kaskasovo řešení rovná rovnicím od Brauera a Kriegela (viz rovnice 57) až na hodnotu koeficientu 1,05 (místo 1,2). Sám Brauer později cituje už jen Kaskasovo řešení s koeficientem 1,2. [15]

10.3 Alternativní přístup modelování sedimentace koncentrovaných suspenzí - Unified Theory on Solid-Liquid Separation

Ve zkratce zde také bude představen model Sung-Sam Yima and Yun-Min Songa. [43] Autoři tvrdí, že lze celý průběh rušeného usazování popsat pomocí



Obrázek 22: Schematické znázornění rušené sedimentace podle Yima a Songa [43]

takzvané sjednocené teorie odlučování pevných a kapalných látek. Vychází z myšlenky, že mechanismy rušeného usazování, koláčové filtrace, centrifugace a centrifugální filtrace jsou totožné a jediným rozdílem jsou různé pracovní podmínky.

Rušenou sedimentaci definují jako přenos sil mezi částicemi, způsobující tlak v systému částic, p_s . Na počátku procesu se tento tlak bere jako zanedbatelný. Na dně na částice působí tlak, p_{sb} , vyvolaný částicemi nad nimi, na počátku také nulový. Se začátkem sedimentace se tíha částic začne přenášet na nižší vrstvy. V průběhu sedimentace ($t > 0$) se malý tlak částic na rozhraní p_{su} , bere jako konstantní a p_{sb} narůstá až k maximální hodnotě v čase $t = \infty$.

Nutný předpoklad:

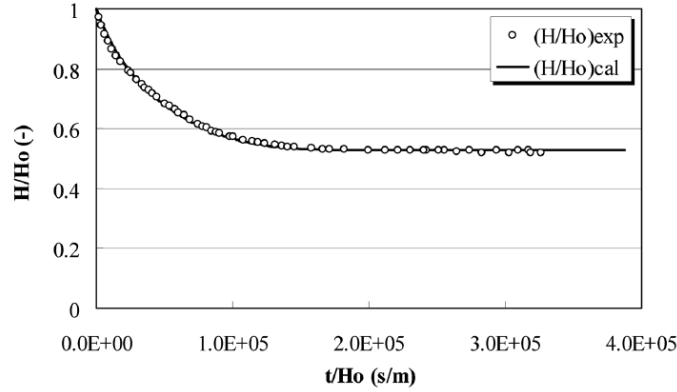
- Částice jsou v čase $t = 0$ v kontaktu, ale stále se ještě vznášejí v kapalině

Použití konstituční rovnice 67 získané na kompresních vážných čidlech (CPC) byla již dříve známa, ale až Yim a Song ji využili pro velmi nízké tlaky.

$$\alpha = ap_s^n \quad 1 - \varepsilon = Bp_s^\beta \quad (67)$$

Následně je uveden vztah pro rychlost rušeného usazování:

$$u = \frac{\left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_s}\right) Wg - p_{sb}}{\alpha_{av} \cdot \eta \cdot W} \quad (68)$$



Obrázek 23: Experimentální a schematické znázornění rušeného usazování pro 18%-hm. suspenze $CaCO_3$

kde u je rychlost sedimentující suspenze, α_{av} průměrný specifický odpor usadajících částic, ρ_L je hustota kapaliny, ρ_s hustota skeletu částic a η viskozita kapaliny. W je podíl hmotnosti částic na plochu průřezu. W je konstantní v průběhu experimentu a je změřitelné. Dále je uveden vztah pro průměrnou porozitu sedimentu (viz rovnice 69) pro následný výpočet tlaku částic u dna, p_{sb} .

$$\varepsilon_{av} = 1 - \frac{1 - n - \beta}{1 - n} \cdot B \cdot \frac{p_{sb}^{1-n} - p_{su}^{1-n}}{p_{sb}^{1-n-\beta} - p_{su}^{1-n-\beta}} \quad (69)$$

Potřebné koeficienty pro výpočet za pomoci tohoto modelu (a, n, B, β) byly autory určeny na základě zkoušek s kompresními vážnými čidly a porovnáním s experimentálními daty. V tom tkví hlavní nedostatek této metody, kdy je nutno provádět zkoušky na dalším zařízení pro získání potřebných koeficientů a značné množství dalších sedimentačních testů.

11 Závislost hustoty na polydisperzitě partikulárních látek

11.1 Hustota částic

Obecně je hustota částic definovaná jako hmotnost částic dělená jejich objemem. Hustota částic sama o sobě je velmi důležitým parametrem při popisu partikulárního systému, a proto musí být řádně definováno její určování. Částice nejsou zpravidla dokonale kulovité, reálné částice mohou mít nej-různější tvary, které ovlivňují velikost nezaplňených prostorů při skladování

souboru částic, otevřené či uzavřené póry nebo dutiny. Proto jsou při popisu partikulárních systémů definovány různé typy hustot na základě toho, jakým způsobem byl získán objem použitý při výpočtu hustoty. Z hlediska partikulárních systémů jsou relevantní následující typy hustot:

- Hustota skeletu (true density)
- Sypná hustota (bulk density)
- Sklepná hustota (tap density)
- Efektivní hustota

11.1.1 Hustota skeletu (true density)

Hustota skeletu, v literatuře běžně označovaná pouze jako hustota, je vypočtena jako hmotnost částic dělená jejich skutečným objemem, to je bez otevřených i uzavřených pórů či dalších dutin. Jedná se tedy pouze o hustotu látky, ze které je částice vytvořena. Právě tento typ hustoty je uváděn ve fyzikálně-chemických tabulkách. Pro arizonské prachy, které slouží jako etalony pro určování třídy silničních prachů se udává hustota skeletu 2650 kg/m^3 . [29]

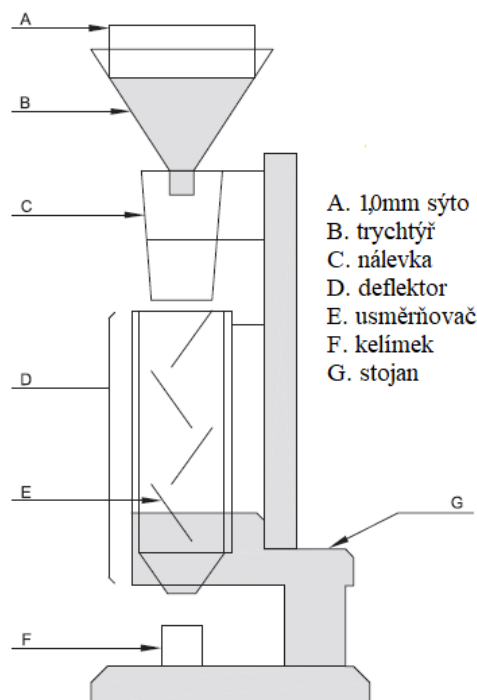
11.1.2 Sypná hustota (bulk density)

Sypná hustota prachu je vyjádřena jako podíl hmotnosti ku nesklepanému objemu prachu. Už do výpočtu nevstupuje pouze “čistý“ objem částic, ale i mezičásticové prostory (externí porozita) včetně pórů v samotných částicích (interní porozita). Je tedy patrné, že sypná hustota záleží jak na hustotě skeletu zkoumaného prachu, tak na prostorovém uspořádání částic, to znamená, jak dokonale částice dokážou vyplnit objem zkušební nádoby. Vzhledem k určování sypné hustoty v odměrných válkách se zpravidla používá jednotka g/ml .

Obecně sypné vlastnosti materiálu závisí na samotném zacházení s prachem, nebo také na typu uskladnění. Tento fakt velmi znesnadňuje dobrou reprodukovatelnost měření, protože stačí jen velmi krátké a slabé silové působení na vzorek prachu, a výsledky sypných hustot se mohou značně lišit. [30] Proto je výhodné k výsledkům sypné hustoty uvádět i metodu, kterou byla hustota změřena, ideálně standardizovaným postupem.

11.1.3 Měření sypné hustoty

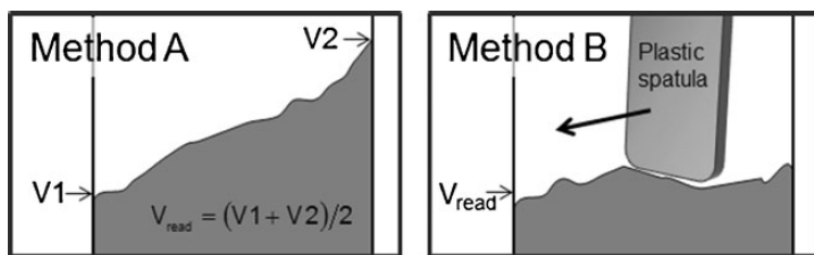
Jak již bylo zmíněno výše, měření sypné hustoty vyžaduje maximální obezřetnost při zacházení se vzorkem partikulární látky při snaze o dobrou



Obrázek 24: Volumetr pro měření sypné hustoty [34]

reprodukovatelnost měření. Není předepsán žádný povinný normovaný postup, existují pouze doporučené postupy, které si navíc často jednotlivé firmy zabývající se danou problematikou upravily pro své potřeby. Pro ilustraci zde bude uveden příklad jedné ze tří doporučovaných metod postupu měření sypné hustoty podle doporučení Evropské farmakopédie, což je jediná referenční sbírka pro kontrolu kvality léčiv v signatářských státech. [34]

Na obrázku 24 je zobrazeno schéma aparatury pro měření sypné hustoty. Zkoumaný vzorek je nejprve proset přes 1mm síto, aby z měření byly vyloučeny shluky částic, které mohly vzniknout při skladování. Částice dále procházejí přes trychtýř do válcovité nádoby se čtyřmi skleněnými narážkami, přes které se volně přesypávají do zkušební nádoby. Tato nádoba by z doporučení měla být válcová o objemu $(25,00 \pm 0,05)\text{ml}$ s vnitřním průměrem $(30,00 \pm 2,00)\text{mm}$, popřípadě krychlovitá s objemem $(16,39 \pm 0,20)\text{ml}$ a vnitřními rozměry $(25,4 \pm 0,076)\text{mm}$. Postup zkoušky je následující. Přes aparát se nechá prosypat zkoumaný vzorek suchého prachu s minimálním objemem 25cm^3 pro krychlovou nádobu a 35cm^3 pro kuželovou nádobu. Prach je přisypáván do té doby, než se zkušební nádoba zaplní s přesahem. Přesah je poté velmi opatrně odstraněn, zkušební miska se zvaží. Odečtením hmotnosti prázdné zkušební misky od misky s nasypaným vzorkem se určí



Obrázek 25: Metody odečtu zdánlivého objemu. Pro neinvazivnost byla v experimentální části použita metoda A [45]

hmotnost nasypaného prachu s přesností alespoň 1% hmotnosti prachu a následně se dopočítá sypná hustota v jednotkách g/ml dle vztahu:

$$\rho_{syp} = \frac{m_{prach}}{V_{box}} \quad (70)$$

Měření se provede třikrát pro tři netotožné vzorky zkoumaného partikulárního systému, přičemž výsledná sypná hustota je aritmetickým průměrem těchto tří měření.

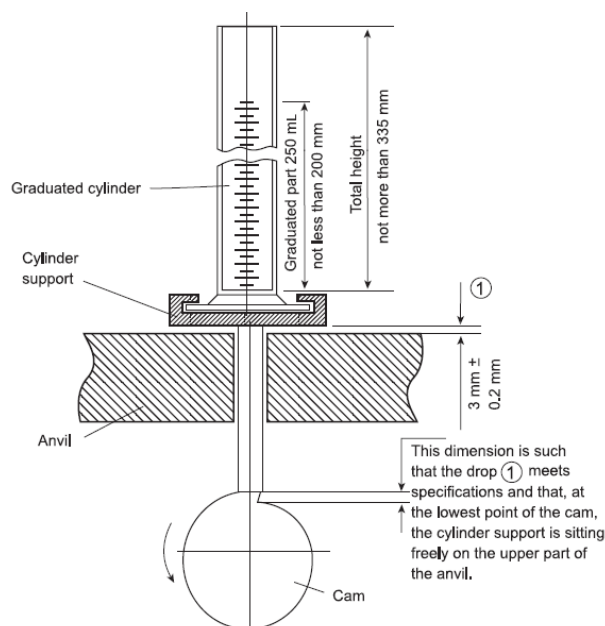
11.1.4 Sklepná hustota (tap density)

Sklepná hustota vychází ze sypné hustoty, která je zvětšena zefektivněním využití prostoru mezi částicemi. Toho je docíleno sklepáváním vzorku prachu v odměrném válci axiálními vibracemi spolu s rotací. Vibrace je docíleno opakovaným zdvihem odměrného válce se vzorkem prachu a následným poklesem vlivem gravitace. Částice tak mění svou polohu do takového uspořádání, kdy zabírají jako celek menší objem. Mechanické působení na vzorek prachu musí být nastaveno tak, aby nedocházelo k “nadsakování” celé masy prachu, což by se negativně projevilo na výsledku měření.

11.1.5 Měření sklepné hustoty

Postup pro měření sklepné hustoty bude, stejně jako sypná hustota výše, prezentován na základě doporučení Evropské farmakopédie, jediné referenční sbírky pro kontrolu kvality léčiv v signatářských státech. Tato sbírka, stejně jako v případě sypné hustoty, uvádí tři preferované postupy měření, první z nich bude osvětlen níže.

Na měření sklepné hustoty slouží speciálně k tomu určené aparáty, schematicky na obrázku 26. Základními součástmi jsou:



Obrázek 26: Princip přístroje na určování sklepné hustoty [34]

- Odnímatelný odměrný válec o objemu 250 ml , s hmotností $(220 \pm 44)\text{g}$ a ryskou po 2 ml
- Aparát schopný vytvořit za minutu buď (250 ± 15) sklepnů z výšky $(3 \pm 0,2)\text{mm}$ nebo (300 ± 15) sklepnů z výšky $(14 \pm 2)\text{mm}$
- Držák odměrného válce o hmotnosti $(450 \pm 10)\text{g}$

Postup zkoušky je následující. Nejprve se nasype prach do odměrného válce stejným způsobem jako u měření sypné hustoty, určí se hmotnost vzorku. Následně se provede s jedním vzorkem 10, 500 a nakonec 1250 sklepnů. Po každém cyklu se odečte objem zaujímaný prachem. Jestli je rozdíl objemů po 1250 a 500 cyklech menší než 2 ml , představuje objem po 1250 sklepech sklepný objem vzorku, který je použit při výpočtu sklepné hustoty s jednotkou g/ml . V případě, že rozdíl je větší, provádí se obdobným způsobem další měření s volitelným krokem (obecné doporučení je 1250 sklepnutí), dokud rozdíl objemů nebude menší než požadované 2 ml . Pokud je to možné, doporučuje se vzorek o hmotnosti 100 g . V opačném případě s nedostatkem zkušebního vzorku se musí zvolit menší odměrný válec o objemu 100ml s hmotností $(130 \pm 16)\text{g}$. Při vyhodnocování výsledků s menším množstvím vzorku je nutné specifikovat modifikované podmínky měření. [34]

11.1.6 Hausnerův poměr

Po změření sypané a sklepné hustoty lze dopočítat takzvaný Hausnerův poměr:

$$H_r = \frac{\rho_{syp}}{\rho_{skl}} \quad (71)$$

Hausnerův poměr je vyjádřen jako podíl sypané a sklepné hustoty. Vzhledem k tomu, že se jedná o parametr popisující pohyb částic prachu, se tak nabízí parametr pro popis fluidizačního chování, tedy kvantitativní veličiny pro určení tekutosti prachu. Na základě Hausnerova poměru byly Geldartem (1973) vytvořeny čtyři skupiny prachů, přičemž krajní hranice byly stanoveny jako 1,25 pro snadno fluidizovatelné prachy a prachy s hodnotou Hausnerova poměru nad 1,4 byly popsány jako velmi obtížně fluidizovatelné. Dalším možným uplatněním Hausnerova poměru je jeho citlivost na tvar částic, přičemž by mohl být použit jako index tvaru částic.

11.1.7 Efektivní hustota

Efektivní hustota částic je definována jako podíl hmotnosti ku objemu částic zahrnujícímu objem uzavřených i otevřených spór. Z pohledu obtékajícího plynu si lze objem částice představit jako aerodynamickou obálku částice, kterou plyn obtéká. Efektivní hustota je zásadním parametrem při odhadování toku plynu částicovými systémy, například při fluidizaci, popřípadě při toku kapaliny systémem částic, což je případ sedimentace. Vzhledem k náročnosti měření efektivní hustoty částic [31], bude tento typ hustoty u výpočtů sedimentačních rychlostí v experimentální části práce nahrazen hustotou skeletu.

12 Uspořádání částic

Partikulární systémy složené z velkého množství individuálních částic představují komplexní formu pevných látek. Tyto částice mohou mít různé velikosti a také různé tvary. Při skladování mohou tvořit nekonečné množství kombinací uspořádání, přičemž při manipulaci může docházet ke změnám polohy jednotlivých částic. Není v lidských možnostech všechny tyto stavy charakterizovat. Přitom uspořádání částic je již dlouhou dobu v centru zájmu nejrůznějších částí průmyslu i teoretického výzkumu. Z teoretického hlediska se jedná o velmi zajímavou oblast aplikovatelnou mimo jiné na přenosové jevy u fluidních vrstev, popřípadě také na fyziku pevných částic. Průmyslovou snahou naproti tomu je zpravidla maximalizovat využití prostoru částicemi, ať

už se jedná o keramický průmysl při tvorbě nových materiálů nebo o snahu úspory prostoru při skladování sypkých materiálů.

I se znalostí charakteristik jednotlivých částic, která je relativně snadno získatelná, se na tomto základě nedá kvantitativně odhadnout, jakým způsobem se bude celý soubor částic prostorově chovat [31]. Je proto potřeba zvolit odlišný přístup hodnotící sypký materiál jako celek. Tématem dílčí teoretické části této práce je ohodnotit, jakým způsobem se projeví seskupení různě tvarovaných částic zaplnění prostoru, a tím ovlivní naměřené hodnoty hustot. Vzhledem k rozdílným hodnotám sypných a setřepných hustot je patrné, že částice mezi sebou při volném sypání utvářejí volné dutiny, které jsou při následném sklepnutí obsazovány částicemi menších rozměrů. Pro popis takového chování je záhodno definovat parametr, na základě kterého by bylo možno charakterizovat zaplnění prostoru částicemi. Takovým parametrem je porozita.

12.1 Porozita

Porozita je nejčastěji používaným makroskopickým parametrem pro popis partikulárních systémů, obzvláště sypkých materiálů. Obecně je definována jako podíl nezaplňených mezičásticových prostorů ku objemu zaujatému částicemi. Ke vztahu pro porozitu se také dá dojít z následující bilance:

$$\rho_{syp} = \rho_s(1 - \varepsilon) + \rho_a \varepsilon \quad (72)$$

kde ρ_{syp} je sypná hustota, ρ_s je hustota skeletu částic, ρ_a je hustota vzduchu a ε je sypná porozita. Vzhledem k řádově menší hodnotě hustoty vzduchu proti ostatním dvěma hustotám je tato zanedbána, čímž vznikne následující vztah pro výpočet porozity sypného materiálu:

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_{syp}}{\rho_s} = 1 - c_{v,max} \quad (73)$$

Výše zmíněný výpočet porozity je vztah pro systém sypného materiálu a není zaměnitelný s porozitou částic, popřípadě celkovou porozitou, které berou v potaz i vnitřní porozitu částic, to je otevřené či uzavřené póry. Vhledem k zaměření této práce nehraje celková porozita, popřípadě porozita částic, zásadní roli, a proto nebudou dále zmiňovány. Navíc ze snímků silničního prachu pod elektronovým mikroskopem (viz obr. 8) lze usuzovat, že se jedná neporézní částice. Obdobným způsobem jako v rovnici 72 se dá dopočítat sklepná porozita, když je místo hodnoty sypné hustoty použita hustota sklepná.

12.2 Uspořádání kulových částic

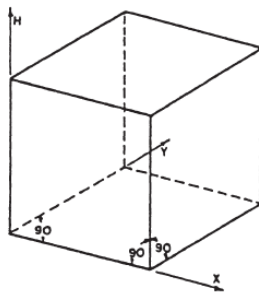
I přes fakt, že drtivá většina technicky relevantních systémů nesestává z totožných kulových částic, je právě toto uspořádání nejčastěji předmětem zkoumání. [30] Opět jsou pro kvantitativní popis uspořádání částic potřeba parametry umožňující srovnání mezi jednotlivými strukturami. Takovými parametry jsou:

- Koordinační číslo – vyjadřuje počet sousedních částic v těsném kontaktu
- Hutnost uspořádání – někdy také relativní hustota uspořádání částic, vyjadřuje objemovou frakci pevných částic

Monodisperzní kulové částice mohou být v prostoru uspořádány do několika pravidelných geometrických uspořádání s různými koordinačními čísly a hustotami uspořádání. Těchto pět základních uspořádání je uvedeno níže:

12.2.1 Kubické uspořádání

Kubické uspořádání je geometricky nejjednodušší variantou uspořádání monodisperzních kulových částic. Koordinační číslo je v tomto případě rovno šesti. Veškeré stěny myšlené struktury (viz obr. 27) mají čtvercový tvar.



Obrázek 27: Kubické uspořádání [33]

Zaplnění prostoru:

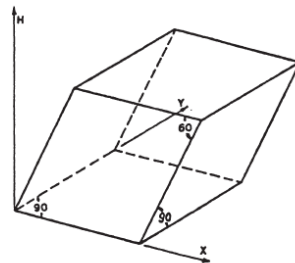
$$\left[\frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{8r^3} \right] \cdot 100\% = 52,36\% \quad (74)$$



Obrázek 28: Kubické uspořádání, znázornění vzájemné polohy kulových částic [40]

12.2.2 Ortorombické uspořádání

Podstavy a dvě stěny myšlené struktury pro ortorombické uspořádání (viz obr. 29) mají tvar čtverce, přední a zadní stěny jsou kosočtverce. Koordinační číslo je v tomto případě rovno osmi.



Obrázek 29: Ortorombické uspořádání [33]



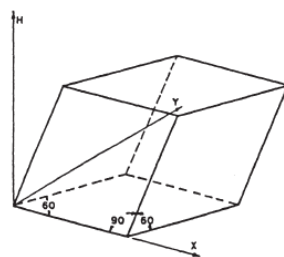
Obrázek 30: Ortorombické uspořádání, znázornění vzájemné polohy kulových částic [40]

Zaplnění prostoru:

$$\left[\frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{4\sqrt{3}r^3} \right] \cdot 100\% = 60,46\% \quad (75)$$

12.2.3 Tetragonálně sfenoidální uspořádání

U tetragonálně sfenoidálního uspořádání tvoří přední a zadní stěnu dva čtverce, zbylé útvary jsou kosočtverce (viz obr. 31). Koordinační číslo je v tomto případě taktéž rovno osmi.



Obrázek 31: Tetragonálně sfenoidální uspořádání [33]



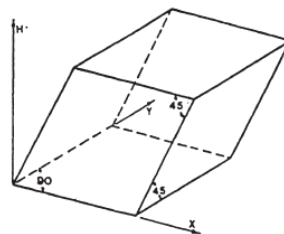
Obrázek 32: Tetragonálně sfenoidální uspořádání, znázornění vzájemné polohy kulových částic [40]

Zaplnění prostoru:

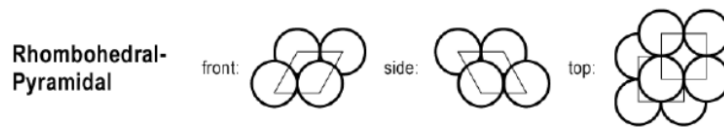
$$\left[\frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{6r^3} \right] \cdot 100\% = 69,81\% \quad (76)$$

12.2.4 Rombohedrálně pyramidální uspořádání

Rombohedrálně pyramidální uspořádání, někdy také jen pyramidální uspořádání sestává z čtvercové základny a stropu, ostatní stěny jsou kosočtverce (viz obr. 33). Koordinační číslo je v tomto případě již dosáhne maximální možné hodnoty a sice dvanácti (pozn.: lokálně je možno docílit větších koordinačních čísel ovšem za cenu vzniklých mezer dále ve struktuře, kde hodnoty koordinačních čísel klesnou) [7].



Obrázek 33: Rombohedrálně pyramidální uspořádání [33]



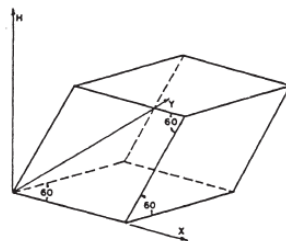
Obrázek 34: Rombohedrálně pyramidální uspořádání, znázornění vzájemné polohy kulových částic [40]

Zaplnění prostoru:

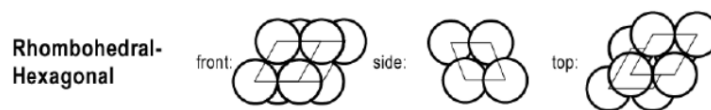
$$\left[\frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{2 \cdot 2 \cdot \sqrt{2}r^3} \right] \cdot 100\% = 74,04\% \quad (77)$$

12.2.5 Rombohedrálně hexagonální uspořádání

U rombohedrálně hexagonálního uspořádání tvoří všechny hrany kosočtverce. Koordinační číslo je v tomto případě také dvanáct.



Obrázek 35: Rombohedrálně hexagonální uspořádání [33]



Obrázek 36: Rombohedrálně hexagonální uspořádání, znázornění vzájemné polohy kulových částic [40]

Zaplnění prostoru:

$$\left[\frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{2\sqrt{3}r^2 \cdot 2\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}r} \right] \cdot 100\% = 74,04\% \quad (78)$$

Tabulka 6: Souhrn základních uspořádání pro kulové částice, r značí poloměr kulových částic

Typ uspořádání	Koord. číslo	Poloměr největší dutiny	Obj. konc. [%]	Porozita
Kubické	6	$0,732r$	52,36	47,64%
Ortorombické	8	$0,528r$	60,46	39,55%
Tetrag. sfenoidální	10	$0,285r$	69,81	30,20%
Rombohed. pyramidální	12	$0,414r$	74,04	25,95%
Rombohed. hexagonální	12	$0,414r$	74,04	25,95%

12.3 Shrnutí základních uspořádání

Jak plyne z popisů jednotlivých uspořádání výše, odpovídající porozita pro nejvyšší dosažitelnou hustotu pravidelného uspořádání kulových částic je $\varepsilon = 25,96\%$. Velmi důležitá je zmínka o pravidelném uspořádání. Při opomenutí pravidelného uspořádání lze lokálně díky tetraedrickým nebo ikosaedrickým klastrům docílit ještě nižších hodnot porozit, tedy ještě hustějšího uspořádání částic, ovšem za cenu větší porozity dále ve struktuře. [7]

Při nahodilém uspořádání monodisperzních kulových částic empiricky převládá porozita $\varepsilon = 35\%$ s průměrným koordinačním číslem přibližně sedm. Byly vytvořeny také empirické vzorce na odhad koordinačního čísla N_c v závislosti na koncentraci pevných látek:

$$N_c = 14 - 10,4(1 - c_v)^{0,38} \quad (79)$$

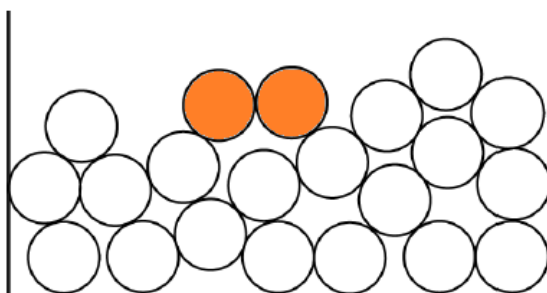
Tento vztah předpovídá, že koordinační číslo se pro hutně uspořádané, tentokrát již nekulové částice, blíží 14 pokud se zaplnění prostoru částicemi blíží 100%.

Souhrnný popis základních uspořádání je uveden v tabulce 6.

12.4 Porozita u polydisperzních systémů

Bohužel drtivá většina partikulárních systémů se řadí k systémům polydisperzním. To znamená, systémy obsahující částice různých velikostí a v praxi nejčastěji i různých tvarů. Může tak nastat nekonečné množství typů uspořádání částic s těžko předvídatelnou hodnotou porozity. Analyticky se jedná o dosud neuspokojivě popsanou problematiku, a tak je nutno se spokojit s empirickými daty, potažmo s výsledky experimentů.

Čistě teoreticky polydisperzní systém může docílit 100% vyplnění prostoru, to je nulové porozity, tím, že prostor mezi velkými částicemi vyplní částice menší, prostory mezi menšími částicemi vyplní částice ještě menší, a takovýmto způsobem by se pokračovalo až k částicím s nekonečně malým průměrem. V praxi však k takovým stavům nedochází zejména kvůli snížené



Obrázek 37: Graficky znázorněná tvorba můstků ve 2D

mobilitě nejmenších částic, které mohou interagovat s povrchem větších částic, uchytit se, a tím poté nemůže dojít k vytvoření ideální struktury.

Platí obecné pravidlo, že malé částice mají tendenci tvořit systémy s většími porozitami. Tento fakt byl také experimentálně ověřen (viz Souhrn hustot). Při uspořádání malých částic dohází totiž častěji k tvorbě takzvaných můstků (viz obr. 37). Tento jev koreluje s vyšší hodnotou vlastního specifického povrchu, to je poměru plochy částic ku jejich objemu. Malé částice nejsou dostatečně hmotné na to, aby vlastní tíhou překonaly povrchové síly, a zaujaly tak pozici s nižší potenciální energií skutálením se do nižšího volného prostoru. [33] Současně v systémech s už tak jemnými částicemi chybí částice ještě menší, které by vyplnily prostor mezi malými částicemi, čímž by snížily porozitu.

Při přimíchání menších částic do systému částic větších může dojít k následujícím scénářům: malé částice způsobí nárůst porozity zvětšením rozestupů částic větších. Na druhou stranu se ale také může stát, že malé částice vyplní prázdné prostory mezi většími částicemi a porozita tak klesne. Tak se děje v případech, kdy poměry poloměrů částic jsou alespoň v poměru 1 : 3. [33] První zmíněný nárůst porozity nezávisí pouze na velikostním poměru, ale také na tvaru částic, a především na podílu jednotlivých velikostních frakcí v daném partikulárním systému. Roly hrají i případné elektrostatické síly, dále také vlhkost vzduchu.

Aby nebyl ovlivněn výsledek měření porozit, popřípadě sypných a sklepných hustot, zkušební nádobou, je nutno dodržet poměr průměru nádoby ku průměru částice alespoň 12:1, lépe však 20:1. [32]

12.5 Přístupy v modelování polydisperzních systémů

Zkoumání vlivu polydisperzních částic na výslednou porozitu, respektive hustotu, je u analytických modelů zpravidla omezeno na binární, terciární

či kvadrální systémy kulových částic. Počátek zkoumání takovýchto partikulárních systémů ve vztahu k hutnosti uspořádání se datuje do 20. a 30. let dvacátého století, kdy byly položeny základy dvěma myšlenkovým proudům, které po mnoho dalších desetiletí ovlivnily další vývoj. Prvním přístupem je přístup Andreasenův [35], přístup kontinuální, který uvažuje zastoupení všech částic podle dané distribuční křivky partikulárního systému. Druhým přístupem je přístup Furnasův, přístup disktrétní. V praxi to znamená, že Furnas pracoval s takovými systémy, které byly složeny z definovaného množství jednotlivých monodisperzních frakcí.

Na následujících řádcích budou na zvolených modelech popsány principy obou myšlenkových proudů. Prvním popisovaným modelem bude model založen na kontinuálním přístupu.

12.5.1 Kontinuální přístup

Kontinuální přístup se základem v Andreasonově práci [35] vychází z předpokladu, že vzhledem k tomu, že reálné částicové systémy mají zpravidla spojité distribuční rozložení částic, měl by i model popisující takový systém být kontinuální. Sám Andreasen vycházel z teorie podobnosti. Jeho předpokladem bylo, že pro ideální maximální uspořádání částic je okolí tvou různě velkých částic vždy podobné [32]. Na základě toho sestavil vztah 80:

$$\frac{CPFT}{100\%} = \left(\frac{D}{D_L} \right)^n \quad (80)$$

kde $CPFT$ je kumulativní procento menší než (viz Distribuční křivka), D je průměr částice, D_L je největší průměr částice, n je modul distribuce.

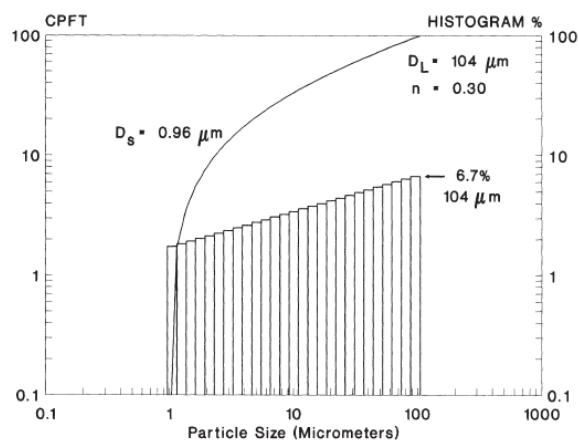
Pomocí experimentálních dat bylo dokázáno, že minimální porozita systému je dosažena pro koeficient n v rozmezí 1/3 a 1/2.

Další evolucí Andreasenovy teorie je model Funk a Dingera [32], někdy také označovaný jako modifikovaný Andreasenův model, který propojuje kontinuální i disktrétní přístup tím, že k Andreasenově vztahu přidává koncept minimální velikosti částice. Výsledný vztah popisující ideální distribuční křivku rozložení částic s minimální porozitou se tak dostává do tvaru:

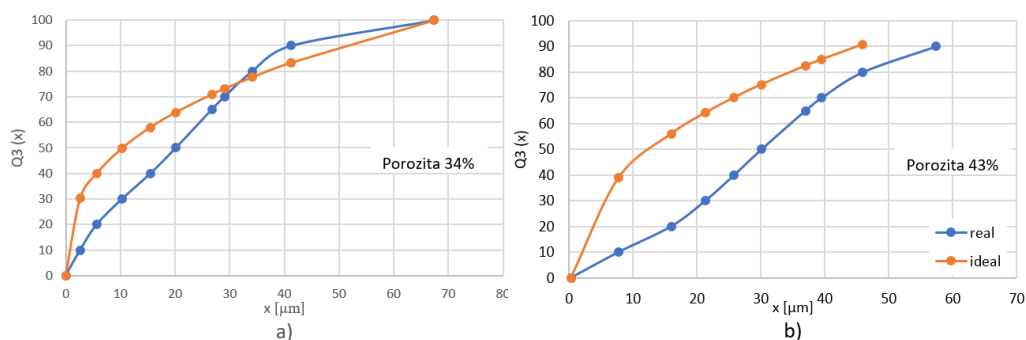
$$\frac{CPFT}{100\%} = \frac{D^n - D_s^n}{D_L^n - D_s^n} \quad (81)$$

kde D_s je průměr nejmenší částice v daném partikulárním systému.

Exponent n , označovaný jako distribuční modul, pro nejhutnější uspořádání částic byl vyčíslen jako $n = 0,37$, čímž spadá do rozmezí původního modelu mezi 1/3 a 1/2.



Obrázek 38: Objemově vážená distribuční křivka podle Funk a Dingera pro ideální zaplnění prostoru pro částice v rozmezí 0,96 až 104 μm [32]



Obrázek 39: Porovnání distribučních křivek dvou vzorků prachu s ideální distribuční křivkou pro maximální možné využití prostoru částicemi; modul distribuce $n=0,37$

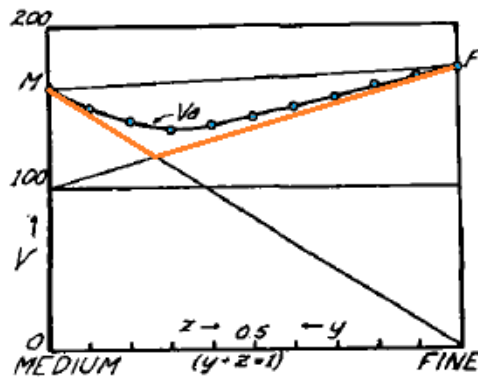
Modifikovaný Andreasenův přístup byl prozkoumán na již dříve měřených vzorcích silničního prachu. Cíleně byly vybrány vzorky prachu s různou naměřenou porozitou - protokoly z těchto měření jsou umístěny v příloze s čísly 72, 73, 74, 75. Grafické porovnání je vyobrazeno na obrázku 39, kde jsou srovnány objemově vážená rozdělení. Dle teorie podle Andreasena by se křivky pro případ nižší porozity, tedy těsnějšího uspořádání, měly více blížit až do limitního případu překrytí. V tomto limitním případě by vzniklo takové rozložení, které by vedlo k maximálně možnému využití prostoru částicemi.

Tento trend je skutečně pozorovatelný i na reálných vzorcích silničního prachu změřeném laserovou difrací pro určení distribuční křivky a zkouškami měření hustot pro určení porozity. V případě křivky b) nebyla k dispozici data

pro celou distribuční křivku, nicméně pro naznačení trendu tento fakt není omezující. Průběh reálně naměřené křivky pro nižší hodnoty porozity se s ideální křivkou podle Andreasena překrývá více než u vzorku prachu s vyšší porozitou, což je v souladu s teorií.

12.5.2 Diskrétní přístup

Diskrétní přístup k maximální dosažitelné hutnosti uspořádání částic zde bude prezentován na grafickém modelu Westmanna a Hugila. [38] Stejně jako Andreasen i Westmann a Hugil předpokládají pouze kulové částice.

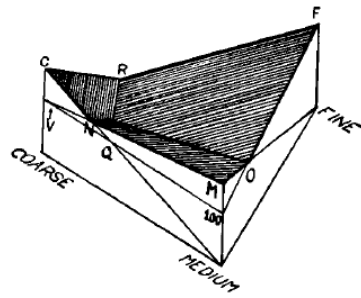


Obrázek 40: Grafická metoda pro binární směsi podle Westmanna a Hugila [38]

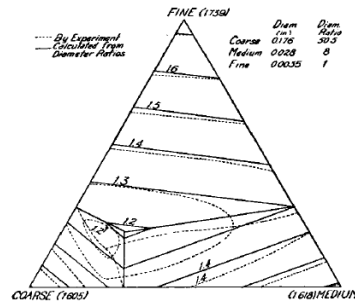
Na obrázku 40 je uveden grafický výsledek mísení binární směsi střední a jemné frakce s poměrem průměrů 8 : 1. Na ose x je vynesena hmotnostní podíl jednotlivých frakcí. Na ose y je vynesena takzvaný zdánlivý objem V_a , definovaný jako:

$$V_a = \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad (82)$$

Například pro monodisperzní částice o porozitě $\varepsilon = 40\%$, které by měly skutečný objem 1 cm^3 (pouze vlastní objem částic), a které by tak po nasypání do odměrného válce zaujímaly objem $1,67 \text{ cm}^3$ by hodnota zdánlivého objemu dosáhla hodnoty $V_a = 1,67$, respektive 167%. Potřebné hodnoty zdánlivých objemů byly získávány pomocí přístroje na určení sklepné hustoty. Na osy y jsou vyneseny zdánlivé objemy hrubé (na obrázku 40 označené medium) M a jemnější frakce F . Z bodu 100% zdánlivého objemu hrubé frakce je vedena úsečka do bodu F a z 0% zdánlivého objemu jemné frakce je vedena úsečka do bodu M . Vznikne tak krajní případ pro smíchání binární



(a) 3D znázornění



(b) 2D diagram

Obrázek 41: Grafická metoda podle Westmanna a Hugila pro terciární směsi [38]

suspenze o nekonečně velkém poměru velikostí částic, v obrázku 40 barevně. Se zmenšujícím se poměrem velikostí částic se zdánlivé objemy vzniklých binárních směsí částic od krajního stavu pozvolně vzdalují (viz kruhy pro experimentální data na obrázku 41) až do krajního případu poměrů velikostí částic 1 : 1, kdy by zdánlivý objem směsi odpovídal hodnotám na křivce MF.

Westmann a Hugil stejný algoritmus aplikovali i na terciární směsi, přičemž výsledné zdánlivé objemy jsou odečitatelné na trojúhelníkových diagramech (viz obr. 41).

Při přepsání tohoto algoritmu do algebraického zápisu lze tuto metodu použít pro libovolné množství velikostních frakcí. Odhadovaným výsledným zdánlivým objemem směsi o libovolném počtu frakcí n je maximum z jednotlivých dílčích zdánlivých objemů vztažených k i -té frakci velikostí částic V_{ai} . Zásadní nevýhodou tohoto postupu pro větší množství frakcí je potřeba získání odpovídajícího množství experimentálních dat na určení skutečných a zdánlivých objemů.

$$\begin{aligned}
 V_{a1} &= a_1 x_1 \\
 V_{a2} &= x_1 + a_2 x_2 \\
 V_{a3} &= x_1 + x_2 + a_3 x_3 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 V_{ai} &= \sum_{j=1}^{i-1} x_j + a_i x_i \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 V_{an} &= \sum_{j=1}^{i-1} x_j + a_n x_n
 \end{aligned}$$

Kde a_i je zdánlivý objem i -té velikostní třídy částic v případě monodisperzity, x_i je hmotnostní podíl i -té velikostní třídy částic, V_{ai} je zdánlivý objem

i -té velikostní třídy částic, n je počet velikostních tříd částic a V_a je maximum z V_{ai} , to znamená zdánlivý objem směsi o n velikostních třídách částic.

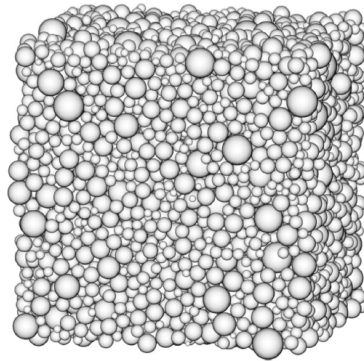
Další modely vznikaly postupně s vývojem výpočetní techniky. První takové modely fungovaly na principu zkušebního objemu, do kterého byly náhodně umísťovány nepřekrývající se částice podle vstupní distribuční křivky velikostní částic. Mluví se v této souvislosti o modelech statických, neboť se částice po umístění již nemohly dále pohybovat. Výstupem těchto prvotních modelů byl zkušební prostor vyplněný částicemi různých velikostí, které se často nedotýkaly, proto se nedá mluvit o systému uložení částic v pravém slova smyslu. [39]

S dalším nárůstem výpočetních výkonů vznikly dynamické modely, které již virtuálním částicím umožňovaly pohyb. Tyto prvotní dynamické modely sice umožňovaly částicím pohyb na základě gravitace a interakce s ostatními částicemi, nicméně výstup modelu odpovídal volnému uspořádání částic, obdobě u procesu při získávání sklepné hustoty (viz Sklepná hustota). Nebylo tak možné vyvozovat závěry o maximální možné hutnosti systému. Snaha k získání informací o maximálních hutnostech vedla k vývoji algoritmů, kde se při prvotním umísťování částic do kontrolního objemu jednotlivé částice mohly překrývat, následně se částice oddělily spolu se zvětšením kontrolního objemu. Pokročilé výpočetní modely [40] již umožňují komplexní analýzu partikulárních systémů včetně simulace sklepávání pro získání minimálního objemu zaujatého částicemi. Výstupem simulací je poté vedle základních informací, jakými jsou hodnota porozí, zaujatý objem, koordinační čísla jednotlivých částic, také například schopnost systému odolávat vnějším silám. [39]

Většina výpočetních softwarů je komerčních, jejich porovnání nabízejí například Kumar a Santhanam. [46] Opak tvoří volně šiřitelný software vytvořený Vasilem Baranauem [41] z Philipps-Universität Marburg.

13 Arizonské prachy

Pro charakterizaci, respektive kategorizaci, silničních prachů slouží již od 40. let takzvané Arizonské prachy. Původně se jedná o prach sesbíraný na plachty od projíždějícího traktoru v Salt River Valley ve státě Arizona, který byl posléze dále namíchán podle daných hmotnostních poměrů jednotlivých frakcí ze síťové analýzy. [42] Produkci a prodej arizonských prachů se poté věnovalo několik výrobců, ale vzhledem k chybějící normě docházelo k případům, kdy se vzorky, ač údajně stejné kategorie prachu, od různých výrobců vzhledem k různým výrobním a měřícím postupům lišily. Až na konci 90. let došlo k ošetření arizonských prachů normou ISO 12103-1 [29],



Obrázek 42: Grafický výstup Baranauova modelu pro 10000 polydisperzních kulových částic [41]

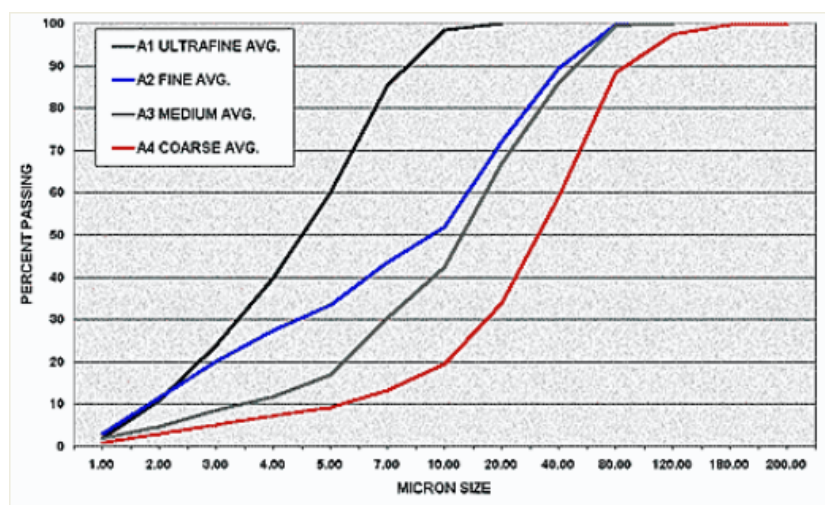
kteřá mimo jiné dělí arizonský prach do 4 skupin podle velikosti částic na prachy:

- Ultra jemné (A1)
- Jemné (A2)
- Střední (A3)
- Hrubé (A4)

ISO 12103-1, A1 ultra jemný prach o nominální velikosti 0-10 mikrometrů. Původně byl vyvinut pro testování filtračních vložek kabiny vozidel. V současné době není specifikován jako vhodný kontaminant pro vzduchové filtry kabiny vozidel, používá se jako testovací kontaminant pro součásti palivového systému, hodnocení výkonu vodního filtru a do dalších obvyklých aplikací.

ISO 12103-1, A2 jemný prach o nominální velikosti 0-80 mikronů. ISO A2 je totožný s SAE jemným prachem vyráběným společností Powder Technology Inc. před vytvořením této normy. Základ pro přijatelné limity velikosti částic specifikované podle ISO 12103-1, A2 byly odvozeny z analýzy osmi šarží prachu SAE Fine Test Dust vyrobeného společností Powder Technology, Inc. v letech 1992 až 1994. Při objemem váženém rozdělení je patrná bimodální distribuce s přibližnými vrcholy ve velikostech 4 a 20 mikrometrů.

ISO 12103-1, A3 střední prach o nominální velikosti 0-80 mikronů s nižším podílem malých částic o velikosti 0-5 mikronů než u prachů ISO 12103-1, A1 a A2. Střední prach A3 je totožný s bývalým testovacím prachem SAE 5-80 mikrometrů specifikovaným v normě SAE J1858 (dnes ISO 4548-12).



Obrázek 43: Distribuční křivky Arizonských prachů ISO 12103-1 změřené na analyzátoru Coulter Multisizer IIE^{TM}

Základ přijatelných limitů velikosti částic specifikovaných podle ISO 12103-1, A3 byl odvozen z několika vzorků dvou předchozích šarží prachu SAE 5-80 mikrometrů vyrobeného společností Powder Technology Inc.

ISO 12103-1, A4 hrubý prach o nominální velikosti 0-180 mikrometrů. ISO prach A4 je totožný s SAE hrubým prachem vyráběným společností Powder Technology Inc. před vytvořením tohoto standardu. Základ pro přijatelné meze velikosti částic stanovené podle ISO 12103-1, A4 byly odvozeny z analýzy 8 šarží SAE Coarse Test Dust vyrobených v letech 1992 až 1994.

Uvedené velikosti částic byly určeny analyzátozem Multisizer IIE, který měří částice jednotlivě podle objemu (hmotnosti). Částice pro analýzu jsou suspendovány v roztoku elektrolytu, který je míchán. Částice se následně pomocí vakuového čerpadla přesouvají do úzké štěrbině, ve které probíhá samotné měření. Mezní hodnoty velikosti částic uvedené v ISO 12103-1 jsou vyjádřeny jako kumulativní objemové procento s grafickým znázorněním na obrázku 43.

Používání Arizonských prachů jako etalonů pro klasifikaci silničního prachu napomáhá fakt, že se jedná o normované prachy ošetřené ISO normou. Mimo jiné i samotné lokace sběru prachu, což jsou daná místa ve státě Arizona, jsou výhodné z hlediska vlhkosti vzduchu, která je v daných místech minimální, a současně se vzorky téměř neliší chemickým složením.

Část II

Experimentální část

Upozornění z průmyslové hygieny: Rizikový stav při manipulaci se vzorky prachu nastane, je-li respirační systém vystaven částicím prachu unášeným vzduchem. Je doporučeno používat respirátor nebo protiprachovou masku, schválenou podle národních předpisů.

Bylo dodáno 7 vzorků silničního prachu v množství dostatečném pouze pro sedimentační zkoušku a 3 vzorky pro zkoušky měření hustot.

Autor si je vědom nevýhodných poměrů pro srovnání obou metod na totožných vzorcích prachu. Tento fakt je kompenzován doložením zprávy s výsledky dřívějších měření, kde byly výsledky obou metod porovnány pro totožné vzorky dodaného prachu a prokázala se poměrně dobrá shoda. [4]

Vzhledem k nejistotě vůči normou udávaným hodnotám sypaných a sklepných hustot Arizonských prachů, byly v první fázi experimentální části této práce důkladně proměřeny právě etalonové Arizonské prachy A1 až A4. Autorem této práce byly naměřeny hodnoty sypaných a sklepných hustot a určen charakteristický průměr souboru částic na základě sedimentační zkoušky.

Cílem experimentální části práce je proměřit charakteristiky etalonových Arizonských prachů pomocí metod zmíněných výše a na základě takto získaných hodnot prověřit možnosti klasifikace sesbíraných vzorků prachu do jednotlivých velikostních tříd A1 až A4. Dále zde budou prezentovány výsledky měření dodaných prachů pro jednotlivé metody. Součástí závěru bude doporučený postup klasifikace prachu na základě poznatků získaných z teoretické a experimentální části práce.

14 Charakteristika Arizonských prachů dle ISO 12 103-1

- Norma udává hustotu prachu jako 2650 kg/m^3
- Chemické složení je sepsáno v tabulce 7
- Sumární distribuční křivky Arizonských prachů jsou v grafické podobě na obrázku 43, numerické hodnoty jsou k nahlédnutí v normě
- Hodnoty sypaných hustot z normy jsou uvedeny v tabulce 8

Tabulka 7: Chemické složení Arizonských prachů [29]

Chemická látka	Podíl hmotnosti [%]
SiO_2	68 až 76
Al_2O_3	10 až 15
Fe_2O_3	2 až 5
Na_2O	2 až 4
CaO	2 až 5
MgO	1 až 2
TiO_2	0,5 až 1
K_2O	2 až 5

Tabulka 8: Sypné hustoty Arizonských prachů dle ISO 12 103-1

Třída prachu	A1	A2	A3	A4
ρ_{syp} [kg/m^3]	500	900	1025	1200

15 Sypná hustota

Metodika klasifikace prachu na základě zkoušek sypné hustoty je zmiňována normou ISO 12 103-1. Podstata metody spočívá ve změření hmotnosti a objemu volně nasypaného vzorku do odměrného válce, eventuálně do měřicí nádoby. Dále je pomocí vzorce na výpočet hustoty vypočtena sypná hustota. Předpokladem metody jsou podobné hustoty skeletů vzorků prachu a Arizonských prachů, to je přibližně $2650 kg/m^3$.

$$\rho_{syp} = \frac{m}{V_{syp}} \quad (83)$$

Měření byla prováděna v odměrných válcích o objemu 50, popřípadě 75 ml. Snahou při sypání prachu do odměrného válce je maximální “načechrání” prachu, to je co možná nejmenší tok prachu do válce, aby se maximálně předcházelo zhutňování částic. Pro co nejlepší reprodukci měření je zásadní vyvarovat se jakýchkoli vibrací, které by mohly ovlivnit vzorek prachu v odměrném válci. Docházelo by ke sklepaní vzorku a výsledná sypná hustota by nebyla vypovídající.

Pro zajištění šetrné aplikace prachu do odměrného válce byl využit kruhový filtrační papír srolovaný do trychtýře s malým vystřiženým otvorem vespod. Do takto upraveného filtračního papíru umístěného na vrchol odměrných válců byl vsypáván prach ze zdrojových nádob. Zpravidla dochází k vytvoření můstku (viz obr. 37) v ústí filtračního papíru, a tím se tok prachu

do válce přeruší. Lehkými pohyby s filtračním papírem naplněným prachem se docílí rozbití můstku a rovnoměrné sypání prachu. Je však stále nutno mít na paměti, že jakékoliv vibrace přenášené do odměrné nádoby jsou nežádoucí.

Pro měření bylo využito přibližně od 30 do 50ml vzorků prachu. Odečet objemu prachu v odměrném válci byl měřen na rýskách vždy třikrát po 120° a výsledná hodnota objemu je tak průměrem těchto tří hodnot.

Hodnoty sypné hustoty udávané v ISO normě pro klasifikaci prachů jsou uvedeny v následující tabulce. Současně jsou uvedeny hodnoty naměřené s prachy splňující normu ISO 12103-1.

Tabulka 9: Porovnání normovaných a experimentálních sypných hustot pro prachy splňující ISO 12 103-1; hodnoty udávány v kg/m^3

Vzorek prachu	A1	A2	A3	A4
Charakteristika	ultra jemný	jemný	střední	hrubý
ρ_{syp} dle ISO normy [29]	500	900	1025	1200
ρ_{syp} naměřená	578	755	795	1021

V normě není uvedeno, zda uvedené hodnoty jsou horní, spodní, popřípadě střední hodnotou intervalů tříd prachů. I bez znalosti tohoto faktu je patrné, že hodnoty změřené a udávané se značně liší. Vyšší hodnoty by byly vysvětlitelné tím, že při sypání vzorku do odměrného válce došlo ke zhutnění. Pro hodnoty nižší oproti normě se vysvětlení hledá hůře.

Devizou této metody pro určování tříd prachu je její jednoduchost a časová nenáročnost. Zásadní nevýhodou ovšem je obrovská citlivost výsledku na podmínky měření a ne zcela jisté hodnoty pro správně zatřídění. Ani u dalších měření [2] nebylo dosaženo konzistentních výsledků.

16 Sklepná hustota

I u měření a klasifikace prachů na základě sklepné hustoty je potřeba splnit předpoklad podobných hustot skeletu s Arizonskými prachy, tedy přibližně $2650 kg/m^3$. Princip výpočtu sklepné hustoty je totožný jako výpočet hustoty sypné, rozdílné je zacházení se zkušební vzorkem prachu.

$$\rho_{skl} = \frac{m}{V_{skl}} \quad (84)$$

Sklepná hustota vychází z hustoty sypné, která je zvětšena o efektivnější využití prostoru mezi částicemi. Toho je docíleno sklepáváním vzorku prachu v odměrném válci axiálními vibracemi spolu s rotací.



Obrázek 44: Příklad přístroje BeDensi T1 pro měření sklepné hustoty s nasazeným odměrným válcem

Výběr přístroje na určování sklepné hustoty byl podmíněn následujícími parametry: [3]

- Objem měrného válce 25 cm^3 z důvodu omezeného množství vzorku prachu, získaného ze zkoušky
- Výměnný válec o objemu 100 cm^3 pro přesnější měření v případech, kdy je k dispozici dostatečné množství vzorku
- Příklad měří s jedním snadno vyměnitelným válcem

Na základě výše zmíněných parametrů byl vybrán přístroj BeDensi T1 dodávaný českou firmou LABIMEX CZ s.r.o., www.labimexczech.cz

16.1 Nastavení procesních parametrů

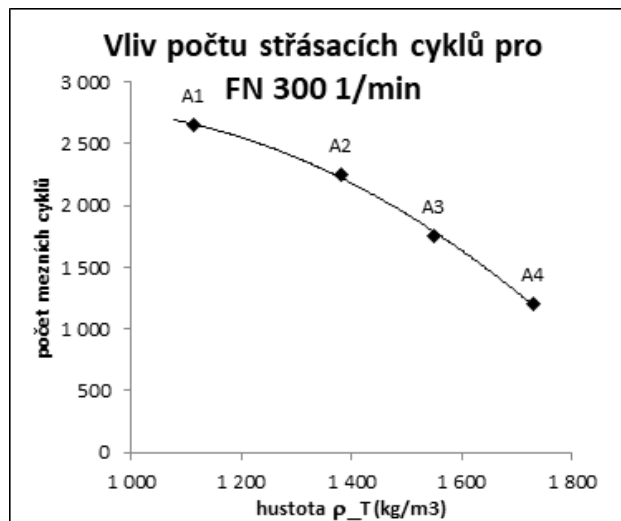
Nejdříve bylo nutno stanovit mezní počet cyklů a vhodnou frekvenci pro získání ustálených hodnot, kdy se sklepaný objem částic již zásadně nemění.

V souladu s návodem přístroje je doporučeno provádět měření při frekvenci 300 min^{-1} . Počet mezních cyklů (doba setřásání) je však u jednotlivých vzorků prachu rozdílný a zkracuje se s rostoucí hrubostí zrn. Měření a vynesené body odpovídají kalibračním vzorkům A1 až A4. Popsaný trend dokumentují měření souhrnně uvedené v tabulce 10 a zobrazené na obrázku 45.

Provedené experimenty prokázaly, že je možné u všech silničních prachů na přístroji nastavit jednotnou frekvenci kmitů $FN=300\text{ min}^{-1}$ s jednotným

Tabulka 10: Mezní cykly pro frekvenci 300 min^{-1} [3]

Vzorek	$\rho_{skl} [\text{kg}/\text{m}^3]$	Počet cyklů
A1 Fiatec	1114	2650
A2 Fiatec	1382	2250
A3 Fiatec	1551	1750
A4 Fiatec	1730	1200



Obrázek 45: Hodnoty mezních cyklů pro Arizonské prachy; ρ_T je sklepná hustota [3]

počtem 3000 sklepných cyklů. Pro takto zvolené parametry s válcem o objemu 25ml se počítá s přesností $\pm 4\%$. Lze pak také očekávat, že ve všech případech bude změřena sklepná hustota, která je v souladu s normou ISO 3953.

Množství vzorku v gramech, je odvislé od prašnosti a od způsobu testu. Ve většině případů se jedná o množství, které vyžaduje provádět měření ve válci o objemu 25 ml. Pro preciznější měření s přesností 1% doporučuje výrobce provádět měření ve válci 100 ml a to opakovaně dvakrát a za výsledek považovat aritmetický průměr z obou měření. [3]

Vzhledem k dodaným množstvím vzorku bylo měření prováděno ve válci o objemu 25ml, pro vzorky Arizonských prachů, kterých bylo dostatečné množství, v 50ml válcích. Výsledky měření jsou shrnuty v protokolech spolu se sypanou hustotou, dopočítanou sklepnou porozitou ε_{skl} , objemem částic V_p a Hausnerovým poměrem.

$$\varepsilon_{skl} = 1 - \frac{\rho_{skl}}{\rho_s} \quad (85)$$

$$V_p = (1 - \varepsilon) \cdot m_i \quad (86)$$

16.2 Postup měření

Provedení testu vyžaduje následující vybavení: minimálně 20 ml prachu na každý test, digitální váhy do 200 g s přesností 0,01 g, odměrný válec 25 ml (alternativně válec 50, 100 ml), laboratorní lžičku k dávkování prachu, násypku, šroubový element na kovové tyčce k vyprázdnění válce, hadřík, přístroj BeDensi T1, pyknometr (objem 25 ml, či 100 ml podle dostupného množství vzorku), štětka na vymytí válce, kalkulačtor.

1. U neznámých vzorků se doporučuje změřit hustotu prachu pyknometrickou metodou a prověřit, zda je tato v rozmezí $2600 - 2700 \text{ kg/m}^3$
2. Zváží se odměrný válec a váhy se vytárují
3. Do válce se přisype takové množství prachu, aby válec byl maximálně naplněn na cca 80%. Válec se vzorkem prachu se zváží, a tak se získá hmotnost přidaného prachu
4. Odečet celkového objemu nezhuťněného prachu nejlépe jako průměr ze tří odečtů po 120°
5. Výpočet sypané hustoty jako podílu hmotnosti vzorku a objemu

6. Válec se pečlivě upne do přístroje, na kterém je nastavena frekvence $FN=300$ a doba cyklů 3000. Přístroj se spustí
7. Po zastavení přístroje je opět třikrát po 120° odečten objem konsolidovaného prachu, vypočítá se průměr
8. Výpočtem je stanovena sklepná hustota (viz rovnice 84)
9. Měření je dvakrát nezávisle opakováno. Výsledná sklepná hustota je aritmetickým průměrem těchto dvou hodnot
10. Na základě přiložených tabulek je prach charakterizován (viz tabulka 20)

16.3 Výsledky Arizonských prachů

Po naměření etalonových Arizonských prachů, a tím i získání mezních hodnot pro jednotlivé třídy, bylo možno přejít k měření dodaných vzorků.

Tabulka 11: Výsledky měření sypných a sklepných hustot Arizonských prachů, hodnoty udávány v kg/m^3

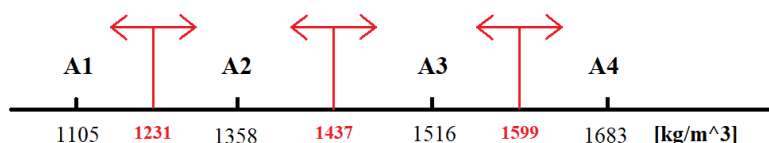
Vzorek prachu	A1	A2	A3	A4
Charakteristika	ultra jemný	jemný	střední	hrubý
ρ_{syp} dle ISO normy [29]	500	900	1025	1200
ρ_{syp} naměřená	578	755	795	1021
ρ_{skl} naměřená	1105	1358	1516	1683
sklepná porozita ε_{skl}	58%	49%	43%	36%

Původní myšlenka byla naměření sklepné hustoty, její empirický přepočet na hustotu sypnou a následná klasifikace na základě britské, popřípadě ISO, normy. Vzhledem ke špatné reprodukovatelnosti měření sypných hustot a k neshodě hodnot naměřených a normovaných, byl tento koncept opuštěn a nahrazen klasifikací pouze na základě sklepné hustoty.

Zkrácená verze výsledků se nachází v tabulce 11. Kompletní protokoly z měření jsou připojeny v závěru práce. Experimenty bylo potvrzeno zjištění z teoretické části, že malé částice tvoří volnější uspořádání s větší porozitou než částice větší.

16.4 Výsledky dodaných vzorků prachu

Vzhledem k nedostatečnému množství dodaných vzorků prachu nebylo možno u všech dodaných vzorků určit sklepnou a sypnou hustotu. Dostatečné



Obrázek 46: Mezní hodnoty pro klasifikaci prachu dle sklepné hustoty

množství na provedení zkoušky splnily pouze tři vzorky. Výsledky jsou k nalezení v tabulce 13.

Vzorky byly klasifikovány na základě mezních hodnot z tabulky 12. Tyto mezní hodnoty byly určeny jako hranice intervalů kolem středních naměřených hodnot (viz obr. 46)

Tabulka 12: Intervaly pro klasifikaci prachu získané pomocí zkoušek sklepné hustoty

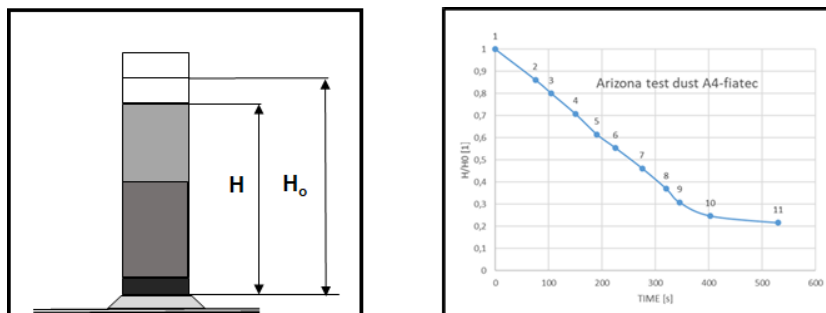
Třída prachu	A1 extra jemný	A2 jemný	A3 střední	A4 hrubý
Interval pro klasifikaci dle sklepné hustoty [kg/m^3]	<1231	1231-1437	1437-1599	>1599

Tabulka 13: Výsledky měření sypaných a sklepných hustot dodaných vzorků prachu s návrhem na klasifikaci podle sklepných hustot. Hodnoty hustot udávány v kg/m^3

Vzorek	ρ_{syp}	ρ_{skl}	Sklepná porozita ε	Zatřídění
1BK CEMA19/2 RTBG	1228	1645	38%	A4
MIX 3BK RTBG IKA HOUB	1050	1554	41%	A3
4BK RBTG IKA	1008	1155	56%	A1

17 Sedimentační zkouška

U sedimentačních zkoušek pro analýzu prachu se využívá lineárního poklesu rozhraní suspenze-vyčeřená kapalina v první fázi sedimentace (viz obr. 47). Určením směrnice přímkové části tak v diagramu výška-čas rovnou dojde k určení sedimentační rychlosti suspenze. Pro grafickou porovnatelnost dvou



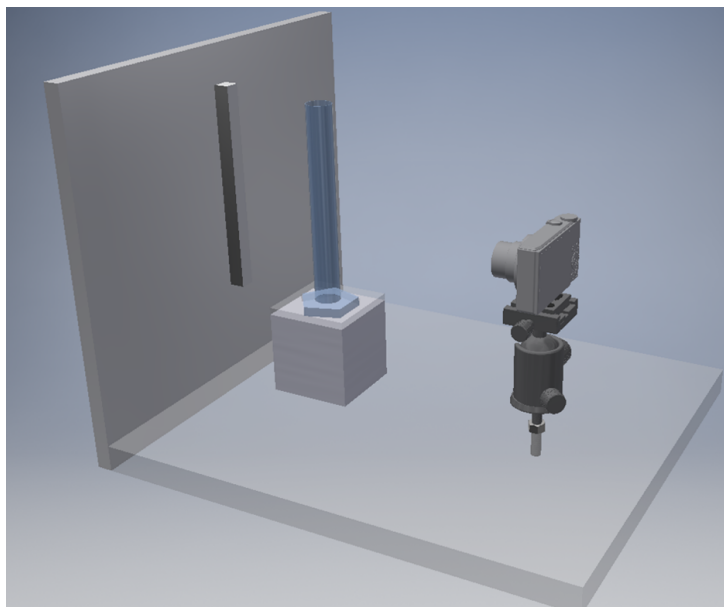
Obrázek 47: Průběh sedimentace a tvar sedimentační křivky

sedimentačních zkoušek stejné koncentrace byly grafy vykreslovány s bezrozměrnou výškou H/H_0 na ose y . Je nutno mít na paměti, že **graficky se dají legitimně srovnávat pouze sedimentační testy se stejnou objemovou koncentrací částic**. V případě dvou zkoušek o různých koncentracích je nutno průběhy přepočítat na dohodnutou hodnotu objemové koncentrace podle vztahu 90. Avšak i při přepočtu je nutno dodržet doporučený interval koncentrací dle protokolu sedimentační zkoušky.

17.1 Postup zkoušky

Pro sedimentační zkoušky byly využívány válce o objemu 50ml . Jako zkušební kapalina sloužil běžně dostupný ethanol 96%. Zkoušky byly prováděny na zkušebním přípravku popsáném v části 17.2.

- Použit může být pouze suchý válec
- Zváží se prázdný válec
- V pomocném odměrném válci se odměří 30ml ethanolu (popřípadě jiný objem na dodržení optimální koncentrace), který se přes trychtýř nalije do zkušebního odměrného válce tak, aby nedošlo ke smočení stěn nad hladinou
- Zváží se válec s ethanolem
- Do válce uloženého na vahách se pomocí lžičky nasype požadované množství prachu
- Suspenze je pomocí skleněné lžičky co nejšetrněji homogenizována a částice se uvedou do vzhledu
- V momentě konce homogenizace se spustí časomíra



Obrázek 48: Přípravek pro sedimentační zkoušky [5]

- Odečet poklesu výšky rozhraní v čase
- Při ustálení poklesu hladiny zkouška končí

Hmotnosti suchého válce a válce s ethanolem slouží jako kontrolní faktor při vybočujících hodnotách měření.

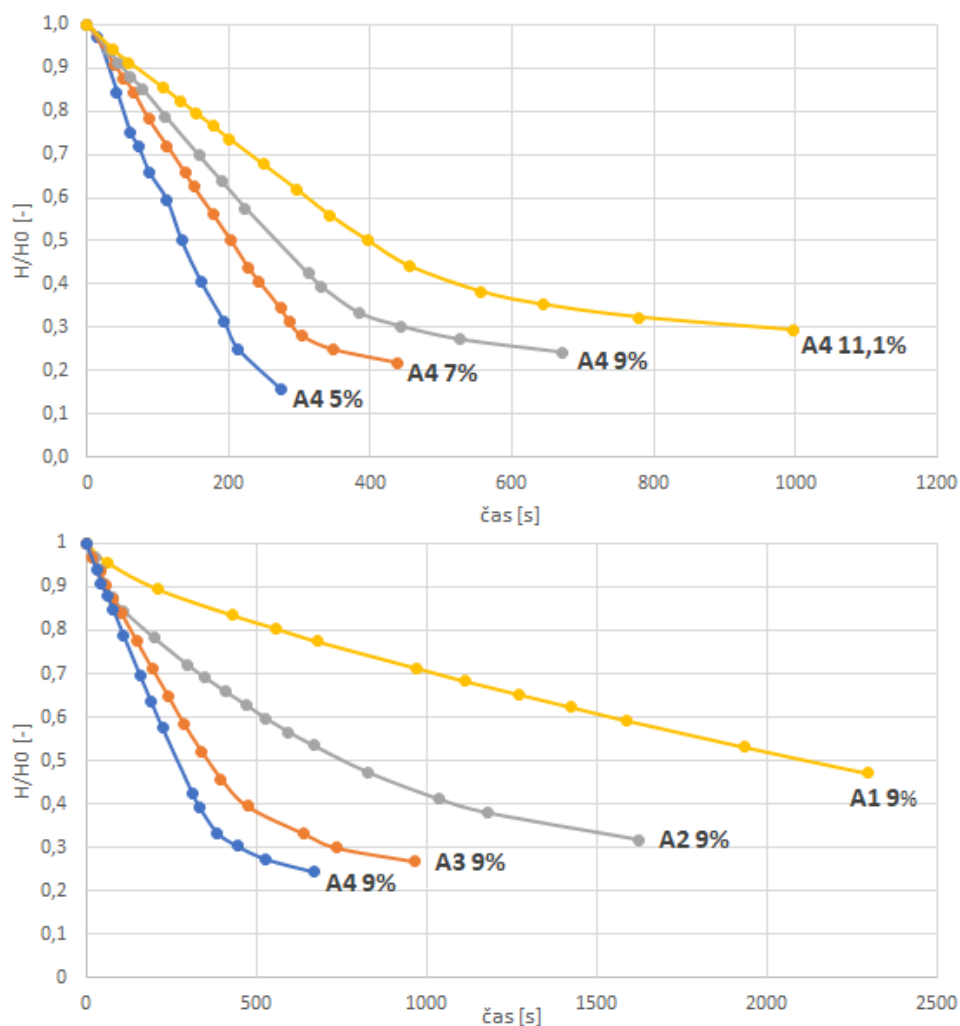
17.2 Přípravek

Přípravek pro sedimentační zkoušky (viz obr. 48) je detailněji popsán ve zprávě [5]. Nosná kostra přípravku je z plexiskla. Skleněný odměrný válec je prosvícen LED osvětlovací soustavou tak, aby neoslňoval snímač (fotoaparát/kamera/mobilní telefon) umístěný na stativové hlavě.

17.3 Kompenzace vyšší koncentrace suspenze

Jak bylo zmíněno výše, průběh sedimentační křivky v grafu výška-čas není závislý pouze na velikosti částic, ale také na koncentraci. Tento trend byl experimentálně potvrzen na etalonovém prachu A4, který byl změřen v rozmezí 5-ti až 11-ti objemových procent (viz obr. 49). S rostoucí koncentrací se snižovala sedimentační rychlost suspenze a průběh sedimentační křivky je

tedy plošší. Na tomto obrázku je navíc patrné, jak mohou být průběhy sedimentačních křivek zavádějící, pokud nejsou respektovány doporučené koncentrace. Po určení rychlosti samostatné částice (viz obr. 50) je vidět, že se výše zmíněné koncentrace stále ještě vyskytují v oblasti, kde suspenze usedá rychleji než jednotlivá částice. Měřené koncentrace se však již nacházejí za maximem nárůstu rychlosti (viz obr. 50), a proto sedimentační rychlost suspenze s rostoucí koncentrací klesá, čímž odpovídá teorii.



Obrázek 49: Grafické znázornění vlivu koncentrace na průběh sedimentační zkoušky. Nahoře hrubý prach A4 o různých koncentracích, dole Arizonské etalonové prachy při 9 obj.-%

Tabulka 14: Naměřená data pro sedimentační rychlost jedné částice prachu A4

Měření 1			Měření 2			Měření 3		
čas	V [ml]	H [mm]	čas	V [ml]	H [mm]	čas	V [ml]	H [mm]
01:05,0	9	16,56	00:31,9	9	16,56	01:39,0	7,2	13,25
01:16,4	8	14,72	00:47,7	8	14,72	01:43,0	7,0	12,88
01:27,0	7	12,88	01:04,6	7	12,88	01:46,0	6,8	12,51
01:37,0	6	11,04	01:24,8	6	11,04	01:50,0	6,6	12,14
01:49,8	5	9,20	01:48,5	5	9,20	01:53,0	6,4	11,78
02:02,0	4	7,36	02:02,0	4	7,36	01:57,0	6,2	11,41

Tabulka 15: Vyhodnocení naměřených dat z tabulky 14

sedimentační rychlost 1	0,1627	[mm/s]
sedimentační rychlost 2	0,0960	[mm/s]
sedimentační rychlost 3	0,1049	[mm/s]
průměrná sed. rychlost	0,1212	[mm/s]

17.3.1 Rychlost jedné částice

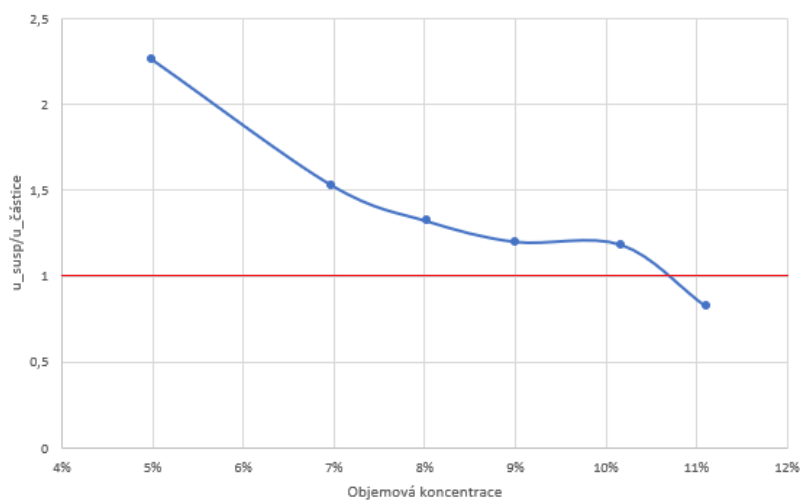
Vzhledem k empirii, že u nízkých koncentrací nedochází ke zpomalování sedimentující suspenze, ale naopak k jejímu zrychlení, musel být tento fakt pro určení optimální koncentrace také experimentálně ověřen. Pro ověření bylo nutné získat sedimentující rychlost jedné co nejjemnější pozorovatelné částice, která se v suspenzi vyskytuje právě na pozorovatelném rozhraní.

Pro získání rychlosti jedné částice byl dodržen standardní postup sedimentační zkoušky popsán výše s tím, že množství prachu přidávaného do ethanolu bylo co nejmenší, aby bylo možno jednotlivé částice pozorovat. Vzhledem k obtížným podmínkám při měření pouze jedné částice byla sedimentační zkouška třikrát opakována a výsledná sedimentační rychlost jedné částice byla vypočítána jako průměr těchto tří měření. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 15.

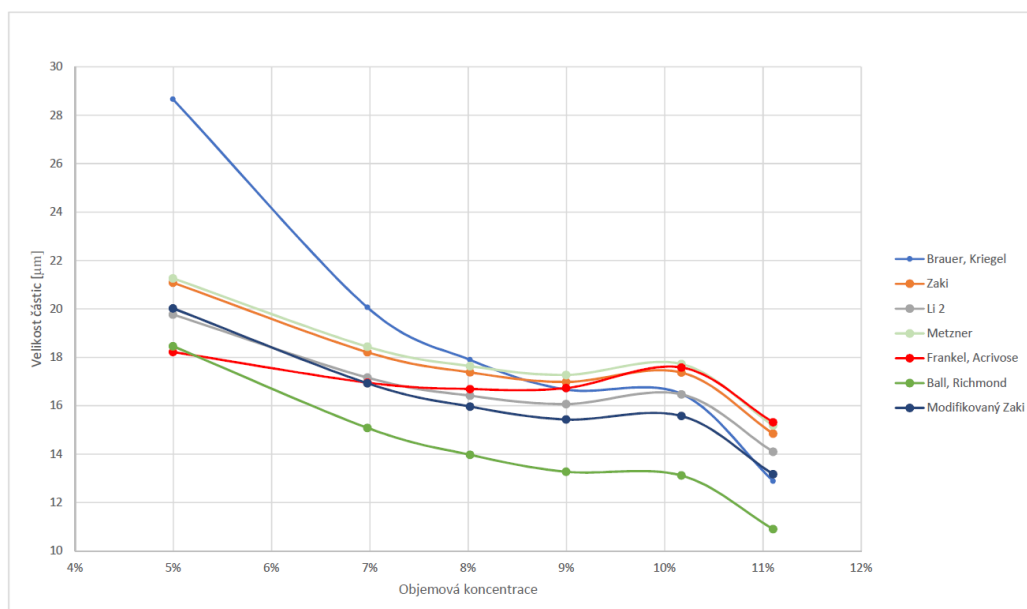
Dále byl vynesena graf poměru sedimentační rychlosti suspenze a jednotlivé částice v závislosti na koncentraci (viz obr. 50). Tím bylo možno porovnat chování partikulárního systému prachu A4 s Bernhardovou empirií. [16]

I v případě prachu A4 bylo experimentálně prokázáno, že při koncentracích do přibližně 10,5 objemových procent dochází ke zrychlení sedimentační rychlosti suspenze oproti rychlosti usedání jednotlivé částice. Vzhledem k obtížnému odečítání špatně viditelného rozhraní nebylo možné změřit průběh pro koncentrace menší než 5%.

Bylo nutné vybrat vhodný model pro korekci koncentrace suspenze tak,



Obrázek 50: Průběh podílu sedimentační rychlosti suspenze ku jedné částici prachu A4; potvrzení empirie o zrychlené sedimentační rychlosti pro malé koncentrace, v případě naměřených dat přibližně pod 10,5%. V naměřenm maximu pro 5% dosahuje rychlost suspenze přibližně 2,25násobku rychlosti jedné částice



Obrázek 51: Velikosti částic prachu A4 v závislosti na použitém modelu kompenzace vyšší koncentrace a na objemové koncentraci

aby vypočítaná velikost částice pokud možno nezávisela na objemové koncentraci suspenze. Výčet modelů z literatury je uveden v teoretické části této práce.

S ohledem na **jedno pozorovatelné rozhraní** při sedimentačních zkouškách byly použity **modely pro monodisperzní systémy**. V určitých případech bylo možno pozorovat mrak velmi jemných částic nad rozhraním suspenze-vyčeřená kapalina, nicméně tyto malé částice netvořily samostatné pozorovatelné rozhraní s čistou kapalinou nad nimi.

Na obrázku 51 jsou uvedeny výsledky sedimentačních rychlostí vypočteny pomocí Stokesovy rovnice s použitím různých korekčních modelů. V ideálním případě by hodnota Stokesova průměru částice neměla být závislá na koncentraci suspenze ani na zvolené kapalině, tudíž ideální průběh by byla přímka rovnoběžná s osou x.

Z obrázku 51 je patrné, že se dopočítané velikosti částic mohou značně lišit. S nárůstem rychlosti pro nižší koncentrace si nejlépe poradil model Frankela a Acrivose, který navíc má téměř konstantní průběh až do přibližně 10,5%. V rozmezí koncentrací od 8 do 10% je velmi blízko nejběžněji užívanému modelu Richardsona a Zakiho, přičemž výsledky obou těchto modelů se neliší více než o necelá 4%. Zakiho model nicméně není vhodný pro nižší koncentrace pod přibližně 7,5%, kdy nedostatečně zohledňuje reálné chování partikulárního systému jako ostatně drtivá většina výše zmíněných modelů.

Na základě porovnání různých korekčních modelů byl **určen nejzazší interval vhodný pro měření**, který byl stanoven v rozmezí **8-10,5% při použití Zakiho vztahu** s výpočtem exponentu pomocí **Galileova čísla**. Zaki je preferován pro svou všeobecnou známost a jednoduchost. Ve jmenovaném rozsahu koncentrací splňuje podmínku nezávislosti velikosti vypočtené velikosti částice na koncentraci, a to **s chybou nepřesahující 2,2%**. V případě nutnosti nižších koncentrací se zkouška dá provést při použití vztahu Frankela a Acrivose s doporučenou hodnotou maximální koncentrace pro kulové částice $c_{v,max} = 0,62$, čímž se rozpětí tolerovatelných koncentrací rozšíří na 6,5 – 10,5%. Veškeré výše zmíněné procentuální koncentrace jsou koncentrace objemové.

17.4 Protokol sedimentační zkoušky

Vstupními daty jsou:

- Teplota
- Objem ethanolu (standartně 30ml)
- Cejcha odměrného válce

- Hustota skeletu prachu
- Hmotnost vzorku prachu
- Jednotlivé hodnoty poklesu rozhraní (objemy) v čase

Výstupy protokolu po doplnění odhadu lomu sedimentační křivky jsou:

- Sedimentační rychlost suspenze
- Sedimentační rychlost reprezentativní částice
- Objemová koncentrace prachu
- Doporučená kategorie třídy prachu
- Grafické znázornění průběhu sedimentace přepočtené pomocí vztahu 50 na objemovou koncentraci 9%, aby bylo možné rychlé optické zařídění prachu do jedné ze čtyř kategorií. Přepočet je platný pouze pro oblast platnosti Zakiho vztahu, to je v rozmezí 8 až 10,5%

V pozadí protokolu probíhají výpočty pro určení vhodného koeficientu do Richardsonovy a Zakiho rovnice, výpočet probíhá iterativně, první hodnotou je standardně udávaných $n = 4,65$. Dále probíhá korekce viskozity ethanolu pro zadanou teplotu měření. Dalším výpočtem je přepočet naměřené sedimentační křivky, kdy se křivka přepočítá na 9% (viz rovnice 90), což následně umožní klasifikaci na základě porovnání s průběhy sedimentačních křivek etalonových prachů.

$$K = 0,043Ga^{0,57} \left[1 - 1,24 \left(\frac{x}{D} \right)^{0,27} \right] \quad (87)$$

$$Ga = \frac{g \cdot x^3 \cdot \rho_L}{\eta^2} \quad (88)$$

$$\eta = \frac{4,8 + 2,4K}{1 + K} \quad (89)$$

$$\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{1 - c_{v,1}}{1 - c_{v,2}} \right)^n \quad (90)$$

Kde u_1 a u_2 jsou hodnoty sedimentačních rychlostí suspenzí, $c_{v,1}$ a $c_{v,2}$ jsou odpovídající hodnoty objemových koncentrací.

17.5 Sedimentační zkouška Arizonských prachů

Pro omezení případných nepřesností způsobených korekčními vztahy byly etalonové Arizonské prachy ISO 12103-1 proměřeny mimo jiné pro objemovou koncentraci $(9 \pm 0,5)\%$. Hodnota byla zvolena s ohledem na platnost Zakiho vztahu ověřenou experimentálně (viz 17.3.1 Kompenzace vyšší koncentrace suspenze). Tyto průběhy poté tvoří grafické pozadí, které umožní z průběhu sedimentační křivky v protokolu rychlé optické zatřídění vzorku prachu do kategorií A1 až A4. Z experimentálně získaných hodnot reprezentativních průměrů částic Arizonských prachů byly vytvořeny intervaly, viz tabulka 16, pro možnost klasifikace vzorků prachu na základě změřeného Stokesova průměru sedimentační zkouškou. Intervaly byly stanoveny na základě obsáhlých experimentálních měření shrnutých v tabulce 17.

Tabulka 16: Hodnoty velikostí částic pro zatřídění do jednotlivých tříd prachu pro koncentrace v rozmezí 8 až 10,5%

Vzorek prachu	A1 ultra jemný	A2 jemný	A3 střední	A4 hrubý
Charakt. průměr [μm]	5,7	8,7	16,8	17,3
Interval pro klasifikaci [μm]	< 6,9	6,9 – 12,0	12,0 – 17,2	> 17,2

Tabulka 17: Souhrn výsledků sedimentačních testů Arizonských prachů pro různé objemové koncentrace, přepočítání mezi rychlostmi suspenze a částice pomocí vztahu Richardson Zaki; rychlosti v $[mm/s]$, velikosti v $[\mu m]$

Název vzorku	u_{sed} suspenze	u_{sed} částice	velikost částice
A4 5,0% ISO 12103	0,2715	0,3470	21,4
A4 7,1% Fiatec	0,1577	0,2244	16,8
A4 7,0% ISO 12103	0,1836	0,2596	18,5
A4 8,0% ISO 12103	0,1587	0,2368	17,5
A4 9,0% ISO 12103	0,1442	0,2265	17,3
A4 10,2% ISO 12103	0,1420	0,2374	17,5
A4 11,1% ISO 12103	0,0989	0,1737	15,0

Název vzorku	u_{sed} suspenze	u_{sed} částice	velikost částice
A3 5,0% ISO 12103	0,1443	0,1847	15,6
A3 6,0% ISO 12103	0,1428	0,1921	15,9
A3 7,2% Fiatec	0,1053	0,1509	13,8
A3 7,0% ISO 12103	0,1054	0,1493	14,0
A3 8,0% ISO 12103	0,1495	0,2233	17,2
A3 9,0% ISO 12103	0,1371	0,2163	16,8
A3 10,0% ISO 12103	0,1060	0,1756	15,2
A3 11,1% ISO 12103	0,1098	0,1931	15,8

Název vzorku	u_{sed} suspenze	u_{sed} částice	velikost částice
A2 6,0% ISO 12103	0,1487	0,2005	16,1
A2 6,4% Fiatec	0,0493	0,0676	9,2
A2 8,3% ISO 12103	0,0322	0,0487	7,9
A2 9,5% ISO 12103	0,0364	0,0586	8,7

Název vzorku	u_{sed} suspenze	u_{sed} částice	velikost částice
A1 5,9% Fiatec	0,0384	0,0515	8,1
A1 7,7% ISO 12103	0,0189	0,0278	6,0
A1 9,2% ISO 12103	0,0160	0,0253	5,7

17.6 Sedimentační zkouška dodaných vzorků

Sedimentační zkouška dodaných vzorků probíhala podle postupu popsaném v 17.1 Postup zkoušky. Byl dodržen interval objemových koncentrací pro legitimitu použití Zakiho vztahu a s přihlédnutím k etalonovým prachům byly vzorky měřeny přibližně s koncentrací 9%. Souhrn výsledků je uveden níže (tabulka 19), kompletní protokoly jsou k nahlédnutí v závěru této práce.

Tabulka 18: Označení dodaných vzorků prachu

Označení vzorků

1	2BK RBTG IKA HOU	4	1BK IKA
2	2BK RBTG	5	2BK IKA
3	4BK RBTG	6	3BK IKA
		7	4BK IKA

Tabulka 19: Souhrn výsledků sedimentačních zkoušek pro dodané vzorky prachů

Vzorek	1	2	3	4	5	6	7
Hmotnost vzorku [g]	6,95	7,86	6,41	6,71	8,19	6,95	6,9
Objemový podíl vzorku v etanolu	8,0%	9,0%	8,8%	9,2%	9,3%	9,5%	9,4%
Reprezentativní průměr částice [μm]	19,36	19,46	20,60	17,37	17,33	13,35	11,24
Návrh zatřídění dle Arizonských prachů	A4	A4	A4	A4	A4	A3	A2

17.7 Poznatky získané z experimentů

- Sedimentační zkoušky
 - Při špatně viditelném rozhraní suspenze-vyčeřená kapalina je nutno zvýšit koncentraci prachu
 - Většina nalezených modelů na korekci vyšší koncentrace částic nebere v potaz zvýšení sedimentační rychlosti suspenze v oblasti koncentrací do 10,5 obj.-%
 - Nešetrné zacházení se vzorkem prachu vede k zásadně rozdílným výsledkům

- U jemnějších prachů je dobře pozorovatelné rozhraní dosaženo při nižších koncentracích než u prachů hrubších
 - Vzhledem k jednomu pozorovatelnému rozhraní byly aplikovány modely na korekci vyšší koncentrace pro monodisperzní systémy
 - I stejně hrubé prachy mohou mít různé ideální koncentrace pro pozorování rozhraní. Zatímco u Arizonských prachů vyhovovala koncentrace 9 obj.-%, u některých dodaných vzorků, ač charakteristickým průměrem velmi blízko etalonům, bylo rozhraní obtížně pozorovatelné. Nebylo k dispozici dostatečné množství dodaných vzorků pro určení optimální koncentrace (v rámci platnosti modelů kompenzace vyšší koncentrace) na ostré rozhraní
 - U jemnějších prachů trvá rozběh sedimentace déle a prvních několik bodů vybočuje z měřené přímkové části. To znamená, pro určení sedimentační rychlosti je potřeba tyto body vynechat
 - Vypočtená velikost částice pomocí korigujících modelů není zcela nezávislá na koncentraci. Toto platí pouze pro určité intervaly objemových koncentrací (viz obr. 51) Při použití Zakiho modelu je vyhovující interval v rozmezí 8-10,5 obj.-%. Při použití vztahu Frankel, Acrivose se vhodný interval rozšíří na 6,5-10,5 obj.-%
 - Až do přibližně 10,5 obj.-% usedá suspenze rychleji než by usedala samotná částice (viz obr. 50)
 - Zpomalování suspenze s nárůstem koncentrace není plynulé, v oblasti kolem 10,2 obj.-% se u hrubých prachů vyskytovalo lokální maximum (viz obr. 51)
- Měření sklepných a sypných hustot
 - Klasifikace na základě sypných hustot se kvůli přecitlivělosti metody na okolní vlivy nedoporučuje
 - Sklepná metoda oproti tomu poskytuje nástroj na určování tříd prachů
 - Počet mezních cyklů (doba setřásání) se snižuje s narůstající hrubostí částic
 - Jemnější prachy mají volnější uspořádání s většími porozitami než prachy hrubé

18 Závěr

Obsahem této práce bylo nashromáždění teoretických podkladů k analýze partikulárních systémů s detailnějším změřením na sedimentaci koncentrovaných suspenzí a na uspořádání částic (koncentrace versus porozita). Získané poznatky z literatury byly zužitkovány při experimentálním určování a vyhodnocování sedimentačních zkoušek a měření sypaných a sklepných hustot.

Na základě měření etalonových Arizonských prachů ISO 12 103-4 byly určeny krajní hodnoty intervalů pro klasifikaci dodaných vzorků prachu. Tyto hodnoty jsou souhrnně uvedeny v následující tabulce (tabulka 20). Výstupem práce je standardizovaný postup pro klasifikaci silničního prachu do tříd dle Arizonských prachů ISO 12 103-1.

18.1 Standardizovaný postup pro klasifikaci silničního prachu

Pro klasifikaci silničních prachů jsou navrženy dvě metody: Sedimentační zkouška a měření sklepné hustoty. Pokud jsou dodrženy předpoklady pro měření, které jsou zmíněny níže, vykazují sedimentační zkoušky a měření sypaných hustot dobrou shodu při klasifikaci silničních prachů. [4]

Postup při volbě metody klasifikace na základě sklepných hustot:

1. V nové lokalitě se doporučuje změřit hustotu prachu pyknometrickou metodou a prověřit, zda je tato v rozmezí $2600 - 2700 \text{ kg/m}^3$
2. Zváží se odměrný válec a váhy se vytárují
3. Do válce se přisype takové množství prachu, aby válec byl maximálně naplněn na cca 80%. Válec se vzorkem prachu se zváží, a tak se získá hmotnost přidaného prachu
4. Válec se pečlivě upne do přístroje BeDensi T1, na kterém je nastavena frekvence $FN=300$ a doba cyklů 3000. Přístroj se spustí
5. Po zastavení přístroje je třikrát po 120° odečten objem konsolidovaného prachu, vypočítá se průměr
6. Výpočtem je stanovena sklepná hustota (viz rovnice 84)
7. Měření je dvakrát nezávisle opakováno. Výsledná sklepná hustota je aritmetickým průměrem těchto dvou hodnot

8. Na základě přiložených tabulek je prach charakterizován (viz tabulka 20)

Postup při volbě metody klasifikace na základě sedimentační zkoušky:

1. Použit může být pouze suchý válec
2. Pro silniční prachy je doporučen odměrný válec o objemu 50ml. V tomto případě není nutno uvažovat vliv stěn. V případě volby menšího válce je nutno postupovat dle kapitoly 8.2.3
3. Zváží se prázdný válec a váhy se vytárují. Tato hodnota slouží pro kontrolu případné kontaminace válce při abnormálních výsledcích
4. Změří se vzdálenost rysek na válci, aby bylo možno převést pokles hladiny sedimentujících částic z objemu na dráhu, to je změřit cejchu
5. V pomocném odměrném válci se odměří 30ml 96% ethanolu (popřípadě jiný objem na dodržení koncentrace částic v rozmezí 8 až 10,5%), který se přes trychtýř nalije do zkušebního odměrného válce tak, aby nedošlo ke smočení stěn nad hladinou
6. Zváží se válec s ethanolem
7. Do válce uloženého na vahách se pomocí lžičky nasype požadované množství prachu - v případě 30ml ethanolu je to v rozmezí 6,91g až 9,33g, ideálně 8,15g prachu
8. Suspenze je pomocí skleněné lžičky co nejšetrněji homogenizována a částice se uvedou do vzhledu
9. V momentě konce homogenizace se spustí časomíra
10. Odečet výšky hladiny v čase $t=0$
11. Odečet poklesu výšky rozhraní v čase. Doporučený odečet po dvou mililitrech (u 50ml válce)
12. Při ustálení poklesu hladiny zkouška končí
13. Do protokolu se zanesou páry hodnot výšky (objemu) rozhraní a čas od počátku měření
14. Protokol vyhodnotí vstupní data a navrhne klasifikaci do prachu do tříd A1 až A4 na základě vypočtené velikosti částice.

15. Zatrřídění je také možno na základě srovnání sedimentační křivky s etalony v protokolu. V případě neshody je primární určení na základě velikosti částice

Tabulka 20: Intervaly ze sedimentačních zkoušek a ze zkoušek sypné a sklepné hustoty pro zatrřídění vzorků prachu; platnost intervalů sedimentace pro 8 až 10,5% při Zakiho přepočtu, 6,5 až 10,5% pro model Frankel Acrivose

Třída prachu	A1 extra jemný	A2 jemný	A3 střední	A4 hrubý
Interval pro klasifikaci dle sklepné hustoty [kg/m^3]	<1231	1231-1437	1437-1599	>1599
Interval pro klasifikaci dle sedimentační zkoušky [μm]	<6,9	6,9-12,0	12,0-17,2	>17,2

19 Seznam symbolů

a	Parametr vrstvy částic
a_i	Zdánlivý objem monodisperzních částic
Ar	Arheniovo číslo
\bar{c}	Střední objemová koncentrace
C_{ext}	Extinkční průřez
c_{max}	Max objemová koncentrace
$c_{v,max}$	Max objemová koncentrace
c_o	Početní koncentrace částic
c_v	Objemová koncentrace
$CPFT$	Kumulativní procento menší než
D	Skutečná velikost částice
D	Velikost částice
d_{St}	Stokesův průměr
d_{ST}	Sauterův průměr
d_{sv}	Objemově-povrchový ekvivalentní průměr
d_F	Feretův průměr
d_H	Hydrodynamický ekvivalentní průměr
D_L	Největší průměr částice
d_M	Martinův průměr
d_P	Projekční průměr
d_S	Povrchově ekvivalentní průměr
D_s	Průměr nejmenší částice
D_t	Difuzní koeficient
d_V	Objemově-povrchový ekvivalentní průměr
f	Faktor tvaru
g	Gravitační zrychlení
Ga	Galileovo číslo
h	Vzdálenost povrchů částic
H_r	Hausnerův poměr
I	Intenzita při nenulové koncentraci částic
I_0	Intenzita dopadajícího světla při nulové koncentraci částic
k	Boltzmannova konstanta
K	Extinkční koeficient
k	Parametr tvaru zkušební nádoby
k_F	Korekční faktor
L	Dimenze statistické váhy
L	Průměr zkušební nádoby
l	Vzdálenost středu částice ke zdi

m	Charakteristika rozdělení
$M_{k,r}$	Statistický moment
m_{prach}	Hmotnost prachu
n	Počet částic, parametr rozptylu částic
n	Modul distribuce
p_{sb}	Tlak v systému částic na dně
p_{su}	Tlak částic na rozhraní
p_s	Tlak v systému částic
Pe	Pecletovo číslo
$q(x)$	Funkce rozložení pravděpodobností
$Q(x)$	Sumární funkce
r	Poloměr koule
r	Poloměr, označení statistické váhy
Re_p	Reynoldsovo číslo částice
s	Délka paprsku skrz vzorek
s	Vzdálenost sousedních vrstev
T	Absolutní Kelvinova teplota
t	Čas
u	Sedimentační rychlost suspenze
$u_{0,1}$	Sedimentační rychlost jedné velké částice
$u_{0,2}$	Sedimentační rychlost malé částice
u_0	Sedimentační rychlost jedné částice
u_1	Rychlost sedimentujícího rozhraní velkých částic
u_2	Sedimentační rychlost páru částic
u_2	Rychlost sedimentujícího rozhraní malých částic
V_{box}	Objem zkušební nádoby
V_{skl}	Sklepný objem
V_{syp}	Sypný objem vzorku
V_a	Zdánlivý objem
V_p	Objem částic
W	Podíl hmotnosti částic na plochu průřezu
x	Průměr částice
x_{10}	Dolní decil
x_{50}	Medián
x_{90}	Horní decil
x_{k1}	Průměr velkých částic
x_{k2}	Průměr malých částic
z	Vzdálenost od povrchu částice ke stěně
α_{av}	Průměrný specifický odpor usadajících částic

β	Koeficient
ε	Porozita
ε_{av}	Průměrná porozita
η	Dynamická viskozita suspenze
η_0	Dynamická viskozita čisté kapaliny
ρ_a	Hustota vzduchu
ρ_L	Hustota kapaliny
ρ_s	Hustota skeletu
ρ_{skl}	Sklepná hustota
ρ_{susp}	Hustota suspenze
ρ_{syp}	Sypná hustota
σ_{ln}	Směrodatná odchylka

20 Literatura

Reference

- [1] MERKUS, Henk G. *Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality*. Springer Science+Business Media B.V., 2009. ISBN 978-1-4020-9016-5.
- [2] DITL, P., T. JIROUT. *Metodika stanovení třídy silničního prachu: Vypracováno pro výrobní podnik ŠKODA-AUTO, a.s. Mladá Boleslav*. Praha, srpen 2018.
- [3] DITL, P. a R. ŠULC. *Návrh, vytvoření a ověření přístroje na měření setřepné hustoty prachu: Vypracováno pro výrobní podnik ŠKODA-AUTO, a.s. Mladá Boleslav*. 2019.
- [4] DITL, P., T. JIROUT, P. PROCHÁZKA a F. PROKOP. *Měření vzorků prachu CEMA 2*. Praha, 2020.
- [5] DITL, P. *Shrnutí výsledků 2018-2019*. Czech Technical University in Prague, 2020.
- [6] DRAPELA. *Statistické charakteristiky* [online]. In: . [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/drapela/Statisticke_metydy/Prezentace/zakladni/charakteristiky.pdf
- [7] PABST, W. a E. GREGOROVÁ. *Charakterizace částic a částicových soustav*. [online]. http://old.vscht.cz/sil/keramika/Characterization_of_particles/CPPS%20_Czech%20version_.pdf: VŠCHT Praha, 2007.
- [8] *Grundlagen der Verfahrenstechnik 1: Skript zur Vorlesung* [online]. 2006 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifvu/mvt/ressourcen/dateien/downloads/ba_gvt/gvt1_mvt.pdf?lang=en
- [9] BABICK Frank, *Sedimentationsverhalten von kolloidalen Suspensionen: Nanotechnologie-Reihe* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifvu/mvt/ressourcen/dateien/downloads/pvt-seminar/PVT_Seminar_14122010.pdf?lang=en
- [10] A theory of sedimentation. Transactions of the Faraday Society. 1952, 48, 166-176. DOI: 10.1039/tf9524800166. ISSN 0014-7672. Dostupné také z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=tf9524800166>

- [11] BABICK, Frank. *Suspensions of Colloidal Particles and Aggregates*. 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-30663-6.
- [12] HOFFMAN, P. *Sedimentace částic ve vodě a vzduchu: Příklad ČOV a SPE*.
- [13] KASKAS, A.-A. *Schwarmgeschwindigkeiten in Mehrkornsuspensionen am Beispiel der Sedimentation*. 1970. Dissertation. TU Berlin.
- [14] STIESS, Matthias. *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. 2009. DOI: 10.1007/978/3-540-32552-9.
- [15] SALAS, Gonzalo Eugenio Salinas. *Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen Suspensionen*. 2007. Dissertation. Technische Universität Dresden.
- [16] BERNHARDT, Claus. Sedimentation in Particle Size Analysis. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. John Wiley & Sons, 2006. DOI: 10.1002/9780470027318.a1513.
- [17] TANNER, Roger I. *Engineering Rheology*. Second Edition. Oxford Engineering Science Series. ISBN 978-0198564737.
- [18] BALL, Robin C. a Peter RICHMOND. Dynamics of Colloidal Dispersions. *Physics and Chemistry of Liquids*. 2007, **9**(2), 99-116. DOI: 10.1080/00319108008084770. ISSN 0031-9104. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00319108008084770>
- [19] ALLEN, Terence. *Powder Sampling and Particle Size Determination*. Elsevier, 2003. ISBN 0-444-51564-X.
- [20] HAPPEL, John a Howard BRENNER. *Low Reynolds number hydrodynamics*. 1981. DOI: 10.1007/978-94-009-8352-6.
- [21] BATCHELOR, G. K. a J. T. GREEN. The determination of the bulk stress in a suspension of spherical particles to order c^2 . *Journal of Fluid Mechanics*. 1972, **56**(03). DOI: 10.1017/S0022112072002435. ISSN 0022-1120. Dostupné také z: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0022112072002435
- [22] PHAN-THIEN, N a D.C PHAM. Differential multiphase models for polydispersed suspensions and particulate solids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 1997, **72**(2-3), 305-318. DOI: 10.1016/S0377-0257(97)90002-1. ISSN 03770257. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377025797900021>

- [23] METZNER, A. B. Rheology of Suspensions in Polymeric Liquids. *Journal of Rheology*. 1985, **29**(6), 739-775. DOI: 10.1122/1.549808. ISSN 0148-6055. Dostupné také z: <http://sor.scitation.org/doi/10.1122/1.549808>
- [24] CAMENEN, Benoit a Damien PHAM VAN BANG. Modelling the settling of suspended sediments for concentrations close to the gelling concentration. *Continental Shelf Research*. 2011, **31**(10), 106-116. DOI: 10.1016/j.csr.2010.07.003. ISSN 02784343. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0278434310002219>
- [25] MAJUMDER, A.K. Settling velocities of particulate systems - a critical review of some useful models. *MINERALS & METALLURGICAL PROCESSING*. Regional Research Laboratory (CSIR), Bhopal, India, 2007, , 237-242.
- [26] BRAUER, H. a E. KRIEGEL. Kornbewegung bei der Sedimentation. *Chemie-Ing.-Techn.* **1956**(Heft 3), 321-330.
- [27] SMITH, Terence N. A model of settling velocity. *Chemical Engineering Science*. Elsevier Science, 1998, (3), 315-323.
- [28] LI, Qian, Siamack A. SHIRAZI, a Brenton S. MCLAURY. Measurements and Modeling of Particle Sedimentation Rate and Settling Velocity in a Vertical Pipe: FEDSM2005-77290. *The University of Tulsa*. Houston, TX, USA, 2005.
- [29] *ISO 12 103-1: Vozidla pro silniční motorovou dopravu - Zkušební prach pro hodnocení čističů*. 1997.
- [30] 2.9.34. Bulk density and tapped density of powders. *EUROPEAN PHARMACOPOEIA 7.0*. 07/2010, 305-308.
- [31] BARBOSA-C ANOVAS, Gustavo V., Enrique ORTEGA-RIVAS, Pablo JULIANO a Hong YAN. *FOOD POWDERS: Physical Properties, Processing, and Functionality*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2005. ISBN 0-306-47806-4.
- [32] FUNK, James E. *PREDICTIVE PROCESS CONTROL OF CROWDED PARTICULATE SUSPENSIONS*. SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, 1993. ISBN 978-0-7923-9409-9.
- [33] FAYED, Muhammad E. a Lambert OTTEN. *HANDBOOK OF POWDER SCIENCE & TECHNOLOGY*. SECOND EDITION. Springer-Science+Business Media, B.V., ISBN 978-1-4615-6373-0.

- [34] *Council of Europe* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.edqm.eu/en/european-pharmacopoeia-background-50.html>
- [35] ANDREASEN, A. H. M. *Uleber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus Iosen Körnern (mit einigen Experimenten)*,. 1929.
- [36] CONCHA A., Fernando. *Solid-Liquid Separation in the Mining Industry*. 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-02484-4.
- [37] MOREIRA, B.A., F.D.O. AROUCA, J.J.R. DAMASCENO. *Analysis of Relationships Between Permeability, Pressure on the Solids, and Porosity for Calcium Carbonate* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://api.intechopen.com/chapter/pdf-preview/58527>
- [38] WESTMAN, A. E. R. a H. R. HUGILL. *The packing of particles*. 1930.
- [39] FENNIS, Sonja A.A.M. a Joost C. WALRAVEN. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. *Delft University of Technology*: <http://heronjournal.nl/57-2/1.pdf>.
- [40] ALBERTS, Luc. *Initial porosity of random packing: Computer simulation of grain rearrangement: Computer simulation of grain rearrangement*. 2005. Norwegian University of Science and Technology.
- [41] BARANAU, V., Pore-size entropy of random hard-sphere packings. *Soft Matter*. 2013, **9**(12). DOI: 10.1039/c3sm27374a. ISSN 1744-683X. Dostupné také z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c3sm27374a>
- [42] *Test Dust History* [online]. 1300 Grey Fox Road, Arden Hills, MN 55112 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: www.powdertechologyinc.com/test-dust-contaminants/test-dust-history/
- [43] YIM, Sung-Sam a Yun-Min SONG. Study on the Mechanism of Hindered Sedimentation by Unified Theory on Solid-Liquid Separation. *Korean J. Chem. Eng.* 2005, **22**(3), 433-440.
- [44] LIČBINSKÝ, Roman, Aleš FRÝBORT, Jiří HUZLÍK, Vladimír ADAMEC, Karel EFFENBERGER, Pavel MIKUŠKA, Martin VOJTĚŠEK a Kamil KRŮMAL. Usage of Scanning Electron Microscopy for Particulate Matter Sources Identification. *Transactions on Transport Sciences*. 2010, **3**(3), 137-144. DOI: 10.2478/v10158-010-0019-8. ISSN 1802971X. Dostupné také z: <http://tots.upol.cz/doi/10.2478/v10158-010-0019-8.html>

- [45] E SILVA, J. P. Sousa, D. SPLENDOR, I. M. B. GONÇALVES, P. COSTA a J. M. SOUSA LOBO. Note on the Measurement of Bulk Density and Tapped Density of Powders According to the European Pharmacopeia. *AAPS PharmSciTech.* 2013, 14(3), 1098-1100. DOI: 10.1208/s12249-013-9994-5. ISSN 1530-9932. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1208/s12249-013-9994-5>
- [46] KUMAR, Senthil a Manu SANTHANAM. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. *The Indian Concrete Journal.* 2003, 1324-1331.
- [47] JIROUT, Tomáš. Dělení heterogenních směsí pomocí gravitace. *HYDROMECHANICKÉ PROCESY* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: http://users.fsid.cvut.cz/~jiroutom/vyuka/hmp/hmp_soubory/hmp6.pdf

21 Přílohy - protokoly ze zkoušek

Souhrn měření sklepných a sypných hustot				
Měřil	Místo měření	Cas	Datum	
Prokop	CVUT-FS, U218	13:00	24.02.2020	
vzorek	$\rho_{sypná}$	$\rho_{sklepná}$	$\rho_{sklepná} / \rho_{sypná}$	Sklepná porozita
1BK CEMA19/2 RTBG	1228	1645	1,34	38%
MIX 3BK RTBG IKA HOUB	1050	1554	1,48	41%
4BK RBTG IKA	1008	1155	1,15	56%

Obrázek 52: Souhrn výsledků sklepných a sypných hustot pro dodané vzorky prachu

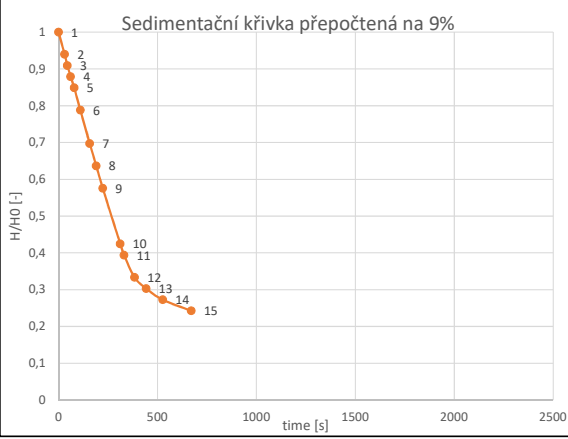
Protokol měření sklepné a sypné hustoty prachu				Číslo měř.																				
Vzorek	Měřil	Místo měření	Čas	Datum																				
1BK CEMA19/2 RTBG	Prokop	ČVUT-FS, Ú218	13:00	24.02.2020																				
Hustota skeletu	2650	[kg/m ³]	Poznámka: Kvůli nedostatečnému množství vzorku bylo měření sklepné hustoty provedeno pouze jednou																					
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">měření 1</th> <th colspan="2">měření 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hmotnost vzorku [g]</td> <td>13,9</td> <td>13,9</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sypný objem vzorku [ml]</td> <td>11,0</td> <td>10,7</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>11,5</td> <td>11,4</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>11,0</td> <td>12,4</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			měření 1		měření 2		Hmotnost vzorku [g]	13,9	13,9		Sypný objem vzorku [ml]	11,0	10,7			11,5	11,4			11,0	12,4	
měření 1		měření 2																						
Hmotnost vzorku [g]	13,9	13,9																						
Sypný objem vzorku [ml]	11,0	10,7																						
	11,5	11,4																						
	11,0	12,4																						
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">měření 1</th> <th colspan="2">měření 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hmotnost vzorku [g]</td> <td>13,9</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sklepaný objem vzorku [ml]</td> <td>8,4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>8,2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>8,8</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			měření 1		měření 2		Hmotnost vzorku [g]	13,9			Sklepaný objem vzorku [ml]	8,4				8,2				8,8		
měření 1		měření 2																						
Hmotnost vzorku [g]	13,9																							
Sklepaný objem vzorku [ml]	8,4																							
	8,2																							
	8,8																							
		<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Sklepná hustota $\rho_{\text{sklepná}}$</td> <td>1645</td> <td>[kg/m³]</td> </tr> <tr> <td>Sypná hustota $\rho_{\text{sypná}}$</td> <td>1228</td> <td>[kg/m³]</td> </tr> </tbody> </table>			Sklepná hustota $\rho_{\text{sklepná}}$	1645	[kg/m ³]	Sypná hustota $\rho_{\text{sypná}}$	1228	[kg/m ³]														
Sklepná hustota $\rho_{\text{sklepná}}$	1645	[kg/m ³]																						
Sypná hustota $\rho_{\text{sypná}}$	1228	[kg/m ³]																						
Sklepná porozita		38%																						
Objem částic měření 1		8,6 [cm ³]																						
Objem částic měření 2		8,6 [cm ³]																						
$\rho_{\text{sklepná}}/\rho_{\text{sypná}}$		1,34 [1]																						

Obrázek 53: Protokol měření sypné a sklepné hustoty dodaného vzorku prachu

Protokol měření sklepné a sypné hustoty prachu				Číslo měř.																				
Vzorek	Měřil	Místo měření	Čas	Datum																				
4BK RBTG IKA	Prokop	ČVUT-FS, Ú218	13:00	24.02.2020																				
Hustota skeletu	2650	[kg/m ³]	Poznámka: Kvůli nedostatečnému množství vzorku bylo měření sklepné hustoty provedeno pouze jednou																					
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">měření 1</th> <th colspan="2">měření 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hmotnost vzorku [g]</td> <td>11,0</td> <td>9,7</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sypný objem vzorku [ml]</td> <td>10,6</td> <td>10,2</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>11,4</td> <td>10,3</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>10,8</td> <td>8,4</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			měření 1		měření 2		Hmotnost vzorku [g]	11,0	9,7		Sypný objem vzorku [ml]	10,6	10,2			11,4	10,3			10,8	8,4	
měření 1		měření 2																						
Hmotnost vzorku [g]	11,0	9,7																						
Sypný objem vzorku [ml]	10,6	10,2																						
	11,4	10,3																						
	10,8	8,4																						
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">měření 1</th> <th colspan="2">měření 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hmotnost vzorku [g]</td> <td>9,7</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sklepaný objem vzorku [ml]</td> <td>6,5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>10,3</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>8,4</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			měření 1		měření 2		Hmotnost vzorku [g]	9,7			Sklepaný objem vzorku [ml]	6,5				10,3				8,4		
měření 1		měření 2																						
Hmotnost vzorku [g]	9,7																							
Sklepaný objem vzorku [ml]	6,5																							
	10,3																							
	8,4																							
		<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Sklepná hustota $\rho_{\text{sklepná}}$</td> <td>1155</td> <td>[kg/m³]</td> </tr> <tr> <td>Sypná hustota $\rho_{\text{sypná}}$</td> <td>1008</td> <td>[kg/m³]</td> </tr> </tbody> </table>			Sklepná hustota $\rho_{\text{sklepná}}$	1155	[kg/m ³]	Sypná hustota $\rho_{\text{sypná}}$	1008	[kg/m ³]														
Sklepná hustota $\rho_{\text{sklepná}}$	1155	[kg/m ³]																						
Sypná hustota $\rho_{\text{sypná}}$	1008	[kg/m ³]																						
		<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Sklepná porozita</td> <td>56%</td> </tr> <tr> <td>Objem částic měření 1</td> <td>4,8 [cm³]</td> </tr> <tr> <td>Objem částic měření 2</td> <td>4,2 [cm³]</td> </tr> <tr> <td>$\rho_{\text{sklepná}}/\rho_{\text{sypná}}$</td> <td>1,15 [1]</td> </tr> </tbody> </table>			Sklepná porozita	56%	Objem částic měření 1	4,8 [cm ³]	Objem částic měření 2	4,2 [cm ³]	$\rho_{\text{sklepná}}/\rho_{\text{sypná}}$	1,15 [1]												
Sklepná porozita	56%																							
Objem částic měření 1	4,8 [cm ³]																							
Objem částic měření 2	4,2 [cm ³]																							
$\rho_{\text{sklepná}}/\rho_{\text{sypná}}$	1,15 [1]																							

Obrázek 55: Protokol měření sypné a sklepné hustoty dodaného vzorku prachu

Protokol měření sedimentace prachu					Číslo měř.
Vzorek	Měřil	Místo měření	Čas	Datum	
A4 ISO 12 103-1	Prokop	ČVUT-FS Ú218	12:00	24.2.20	
Poznámka					
Teplota [°C]	23	Cejcha [mm·ml ⁻¹]	2,4		
Etanol - konc. [%vol]	96	Hustota [kg·m ⁻³]	817		
ρ skelet prach [kg·m ⁻³]	2650	výpočet 2620	Hmotnost vzorku [g]	7,86	
Exponent Zaki [-]	4,7981		Objem etanolu [cm ³]	30	
t	V	H	H/Ho	Poznámka:	
[m:s]	[ml]	[mm]	[1]		
00:00	33	79,2	1		
00:30	31	74,4	0,939		
00:44	30	72,0	0,909		
01:01	29	69,6	0,879		
01:19	28	67,2	0,848		
01:50	26	62,4	0,788		
02:38	23	55,2	0,697		
03:11	21	50,4	0,636		
03:43	19	45,6	0,576		
05:12	14	33,6	0,424		
05:31	13	31,2	0,394		
06:24	11	26,4	0,333		
07:23	10	24,0	0,303		
08:46	9	21,6	0,273		
11:11	8	19,2	0,242	Odhad lomu sedimentční křivky [-]	
		0,0	0	11	
Rozměr částice reprezentující sedimentaci			17,29	μm	
Navrhovaná třída prachu			A4		
Sedimentační rychlost suspenze	0,1442	mm·s ⁻¹			
Sedimentační rychlosti částice	0,2266	mm·s ⁻¹			
Objemová koncentrace prachu	9,00%				

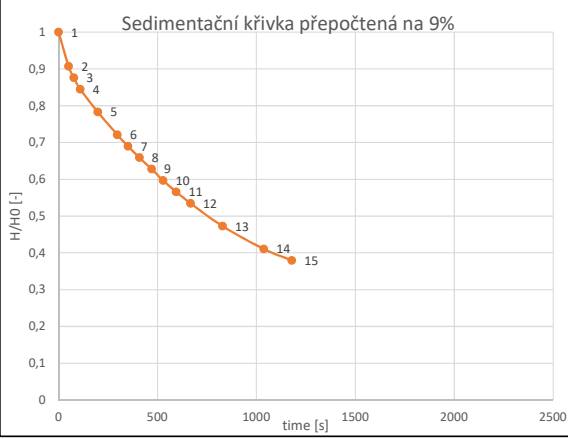


Obrázek 56: Protokol sedimentační zkoušky Arizonského prachu A4

Protokol měření sedimentace prachu					Číslo měř.
Vzorek	Měřil	Místo měření	Čas	Datum	
A3 ISO 12 103-1	Prokop	ČVUT-FS Ú218	12:00	24.2.20	
Poznámka					
Teplota [°C]	23,5	Cejcha [mm·ml ⁻¹]	2,4		
Etanol - konc. [%vol]	96	Hustota [kg·m ⁻³]	817		
ρ skelet prach [kg·m ⁻³]	2650	výpočet 2640	Hmotnost vzorku [g]	7,92	
Exponent Zaki [-]	4,7981		Objem etanolu [cm ³]	30	
t	V	H	H/Ho	Poznámka:	
[m:s]	[ml]	[mm]	[1]		
00:00	33	79,2	1		
00:34	31	74,4	0,939		
00:51	30	72,0	0,909		
01:21	28	67,2	0,848		
01:55	26	62,4	0,788		
02:46	23	55,2	0,697		
03:21	21	50,4	0,636		
03:57	19	45,6	0,576		
04:51	16	38,4	0,485		
05:52	13	31,2	0,394		
06:25	12	28,8	0,364		
07:34	11	26,4	0,333		
09:19	10	24,0	0,303		
			Sedimentační křivka přepočtená na 9%		
			<p>The graph shows a sedimentation curve with H/Ho on the y-axis (0 to 1) and time [s] on the x-axis (0 to 2500). The curve starts at (0, 1) and passes through points 1 to 13, showing a decreasing trend. The data points are: 1(0, 1), 2(10, 0.939), 3(20, 0.909), 4(30, 0.848), 5(40, 0.788), 6(50, 0.697), 7(60, 0.636), 8(70, 0.576), 9(80, 0.485), 10(100, 0.394), 11(120, 0.364), 12(150, 0.333), 13(180, 0.303).</p>		
			Odhad lomu sedimentční křivky [-]		10
			Rozměr částice reprezentující sedimentaci		16,80 μm
			Navrhovaná třída prachu		A3
Sedimentační rychlost suspenze		0,1371	mm·s ⁻¹		
Sedimentační rychlosti částice		0,2163	mm·s ⁻¹		
Objemová koncentrace prachu		9,06%			

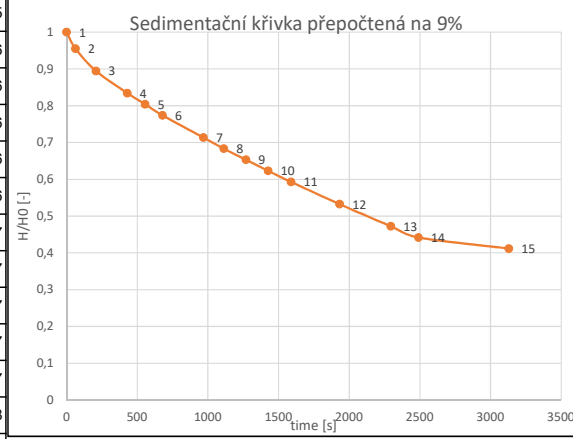
Obrázek 57: Protokol sedimentační zkoušky Arizonského prachu A3

Protokol měření sedimentace prachu					Číslo měř.
Vzorek	Měřil	Místo měření	Čas	Datum	
A2 ISO 12 103-1	Prokop	ČVUT-FS Ú218	12:00	24.2.20	
Poznámka					
Teplota [°C]	24	Cejcha [mm·ml ⁻¹]	2,4		
Etanol - konc. [%vol]	96	Hustota [kg·m ⁻³]	817		
ρ skelet prach [kg·m ⁻³]	2650	výpočet 2767	Hmotnost vzorku [g]	8,3	
Exponent Zaki [-]	4,7995		Objem etanolu [cm ³]	30	
t	V	H	H/Ho	Poznámka:	
[m:s]	[ml]	[mm]	[1]		
00:00	33	79,2	1		
00:51	30	72,0	0,909		
01:17	29	69,6	0,879		
01:50	28	67,2	0,848		
03:18	26	62,4	0,788		
04:57	24	57,6	0,727		
05:51	23	55,2	0,697		
06:48	22	52,8	0,667		
07:50	21	50,4	0,636		
08:48	20	48,0	0,606		
09:55	19	45,6	0,576		
11:07	18	43,2	0,545		
13:48	16	38,4	0,485		
17:17	14	33,6	0,424		
19:39	13	31,2	0,394	Odhad lomu sedimentční křivky [-]	13
27:03	11	26,4	0,333		
Rozměr částice reprezentující sedimentaci			8,70	μm	
Navrhovaná třída prachu			A2		
Sedimentační rychlost suspenze	0,0364	mm·s ⁻¹			
Sedimentační rychlosti částice	0,0586	mm·s ⁻¹			
Objemová koncentrace prachu	9,45%				

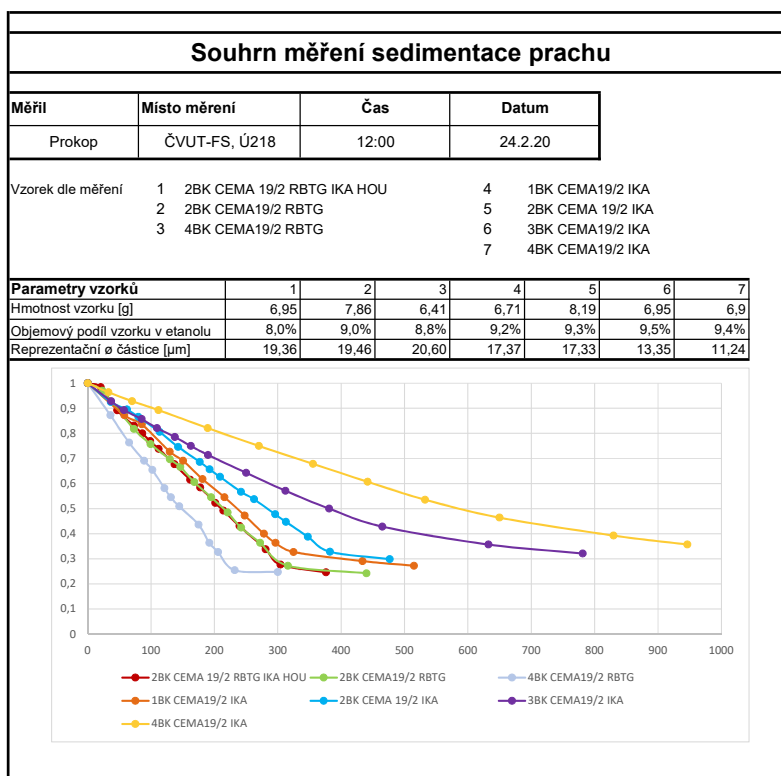


Obrázek 58: Protokol sedimentační zkoušky Arizonského prachu A2

Protokol měření sedimentace prachu					Číslo měř.
Vzorek	Měřil	Místo měření	Čas	Datum	
A1 ISO 12 103-1	Prokop	ČVUT-FS Ú218	12:00	24.2.20	
Poznámka					
Teplota [°C]	25	Cejcha [mm·ml ⁻¹]	2,4		
Etanol - konc. [%vol]	96	Hustota [kg·m ⁻³]	817		
ρ skelet prach [kg·m ⁻³]	2650	výpočet z303	Hmotnost vzorku [g]	8,06	
Exponent Zaki [-]	4,7998		Objem etanolu [cm ³]	30	
t	V	H	H/Ho	Poznámka:	
[m:s]	[ml]	[mm]	[1]		
00:00	33,5	80,4	1		
01:04	32	76,8	0,955		
03:28	30	72,0	0,896		
07:10	28	67,2	0,836		
09:16	27	64,8	0,806		
11:19	26	62,4	0,776		
16:08	24	57,6	0,716		
18:32	23	55,2	0,687		
21:09	22	52,8	0,657		
23:47	21	50,4	0,627		
26:28	20	48,0	0,597		
32:12	18	43,2	0,537		
38:15	16	38,4	0,478		
41:30	15	36,0	0,448		
52:10	14	33,6	0,418	Odhad lomu sedimentční křivky [-]	13
01:33	13,5	32,4	0,403		
Rozměr částice reprezentující sedimentaci			5,7	μm	
Navrhovaná třída prachu			A1		
Sedimentační rychlost suspenze	0,0160	mm·s ⁻¹			
Sedimentační rychlosti částice	0,0254	mm·s ⁻¹			
Objemová koncentrace prachu	9,21%				

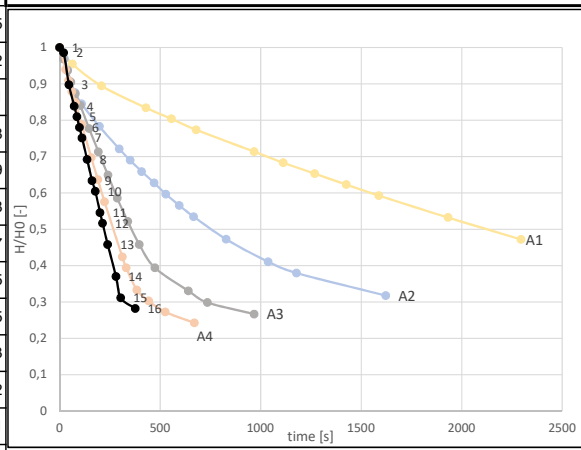


Obrázek 59: Protokol sedimentační zkoušky Arizonského prachu A1



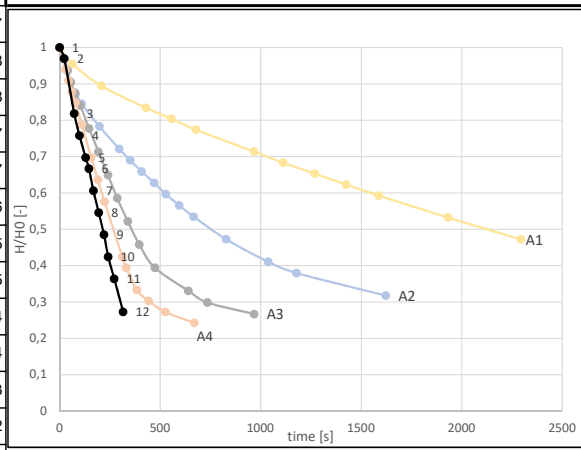
Obrázek 60: Souhrn naměřených hodnot sedimentační zkoušky dodaných vzorků prachu

Protokol měření sedimentace prachu					Číslo měř.
					1
Vzorek	Měřil	Místo měření	Čas	Datum	
PK CEMA 19/2 RBTG IKA HC	Prokop	ČVUT-FS, Ú218	12:00	24.2.20	
Poznámka					
Teplota [°C]	22	Cejcha [mm·ml ⁻¹]	2,4		
Etanol - konc. [%vol]	96	Hustota [kg·m ⁻³]	817		
ρ skelet prach [kg·m ⁻³]	2650	<i>výpočet z 780</i>	Hmotnost vzorku [g]	6,95	
Exponent Zaki [-]	4,7976	Objem etanolu [cm ³]	30		
t	V	H	H/Ho	Poznámka: Obtížně rozeznatelné rozhraní suspenze-čirá kapalina	
[m:s]	[ml]	[mm]	[1]		
00:00	32,5	78,0	1		
00:20	32	76,8	0,985		
00:46	29	69,6	0,892		
01:13	27	64,8	0,831		
01:26	26	62,4	0,8		
01:39	25	60,0	0,769		
01:52	24	57,6	0,738		
02:17	22	52,8	0,677		
02:41	20	48,0	0,615		
02:57	19	45,6	0,585		
03:21	17	40,8	0,523		
03:34	16	38,4	0,492		
03:59	14	33,6	0,431		
04:41	11	26,4	0,338		
05:04	9	21,6	0,277		
06:16	8	19,2	0,246	Odhad lomu sedimentční křivky [-]	
				14	
Rozměr částice reprezentující sedimentaci				19,4 μm	
Navrhovaná třída prachu				A4	
Sedimentační rychlost suspenze	0,1858	mm·s ⁻¹			
Sedimentační rychlosti částice	0,278	mm·s ⁻¹			
Objemová koncentrace prachu	8,04%				



Obrázek 61: Protokol sedimentační zkoušky dodaného vzorku prachu

Protokol měření sedimentace prachu					Číslo měř.
2BK CEMA19/2 RBTG					2
Vzorek	Měřil	Místo měření	Čas	Datum	
2BK CEMA19/2 RBTG	Prokop	ČVUT-FS, Ú218	12:00	24.2.20	
Poznámka					
Teplota [°C]	23	Cejcha [mm·ml ⁻¹]	2,4		
Etanol - konc. [%vol]	96	Hustota [kg·m ⁻³]	817		
ρ skelet prach [kg·m ⁻³]	2650	výpočet 2620	Hmotnost vzorku [g]	7,86	
Exponent Zaki [-]	4,7975		Objem etanolu [cm ³]	30	
t	V	H	H/Ho	Poznámka: Obtížně rozeznatelné rozhraní suspenze-čirá kapalina	
[m:s]	[ml]	[mm]	[1]		
00:00	33	79,2	1		
00:23	32	76,8	0,97		
01:13	27	64,8	0,818		
01:39	25	60,0	0,758		
02:10	23	55,2	0,697		
02:26	22	52,8	0,667		
02:48	20	48,0	0,606		
03:15	18	43,2	0,545		
03:41	16	38,4	0,485		
04:02	14	33,6	0,424		
04:32	12	28,8	0,364		
05:16	9	21,6	0,273		
07:20	8	19,2	0,242		
				Odhad lomu sedimentční křivky [-]	
				10	
				Rozměr částice reprezentující sedimentaci	
				19,5 μm	
				Navrhovaná třída prachu	
				A4	
Sedimentační rychlost suspenze		0,1825	mm·s ⁻¹		
Sedimentační rychlosti částice		0,287	mm·s ⁻¹		
Objemová koncentrace prachu		9,00%			



Obrázek 62: Protokol sedimentační zkoušky dodaného vzorku prachu

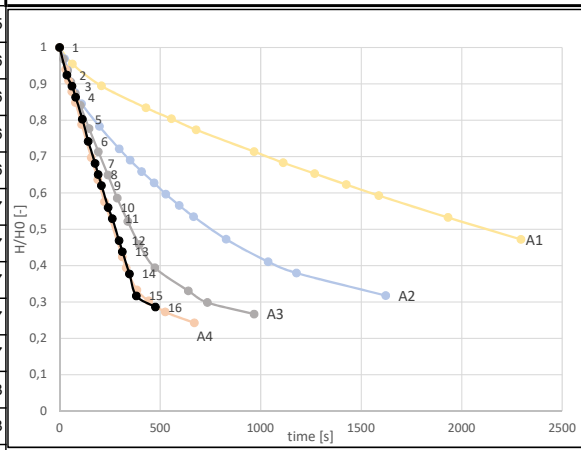
Protokol měření sedimentace prachu					Číslo měř.
Vzorek					3
4BK CEMA19/2 RBTG	Měřil	Prokop	Místo měření	Čas	Datum
			ČVUT-FS, Ú218	12:00	24.2.20
Poznámka					
Teplota [°C]	23	Cejcha [mm·ml ⁻¹]	2,4		
Etanol - konc. [%vol]	96	Hustota [kg·m ⁻³]	817		
ρ skelet prach [kg·m ⁻³]	2650	výpočet z 2964	Hmotnost vzorku [g]	6,41	
Exponent Zaki [-]	4,7973		Objem etanolu [cm ³]	25	
t	V	H	H/Ho	Poznámka: Obtížně rozeznatelné rozhraní suspenze-čirá kapalina. Pro malé množství vzorku byl na zachování vhodné koncentrace snížen objem ethanolu na 25ml	
[m:s]	[ml]	[mm]	[1]		
00:00	27,5	66,0	1		
00:36	24	57,6	0,873		
01:05	21	50,4	0,764		
01:29	19	45,6	0,691		
01:42	18	43,2	0,655		
02:01	16	38,4	0,582		
02:11	15	36,0	0,545		
02:24	14	33,6	0,509		
02:55	12	28,8	0,436		
03:12	10	24,0	0,364		
03:26	9	21,6	0,327		
03:52	7	16,8	0,255		
05:00	6,8	16,3	0,247		
Odhad lomu sedimentční křivky [-]					12
Rozměr částice reprezentující sedimentaci					20,6 μm
Navrhovaná třída prachu					A4
Sedimentační rychlost suspenze	0,2065	mm·s ⁻¹			
Sedimentační rychlosti částice	0,322	mm·s ⁻¹			
Objemová koncentrace prachu	8,82%				

Obrázek 63: Protokol sedimentační zkoušky dodaného vzorku prachu

Protokol měření sedimentace prachu					Číslo měř.			
Vzorek					7			
1BK CEMA19/2 IKA	Měřil	Prokop	Místo měření	ČVUT-FS, Ú218	Čas	Datum	12:00	24.2.20
Poznámka								
Teplota [°C]	24	Cejcha [mm·ml ⁻¹]	2,4					
Etanol - konc. [%vol]	96	Hustota [kg·m ⁻³]	817					
ρ skelet prach [kg·m ⁻³]	2650	výpočet z 2084	Hmotnost vzorku [g]	6,71				
Exponent Zaki [-]	4,7980		Objem etanolu [cm ³]	25				
t	V	H	H/Ho	Poznámka: Obtížně rozeznatelné rozhraní suspenze-čirá kapalina. Pro malé množství vzorku byl na zachování vhodné koncentrace snížen objem etanolu na 25ml				
[m:s]	[ml]	[mm]	[1]					
00:00	27,5	66,0	1					
00:58	24	57,6	0,873					
01:25	23	55,2	0,836					
02:09	20	48,0	0,727					
02:30	19	45,6	0,691					
03:01	17	40,8	0,618					
03:36	15	36,0	0,545					
04:08	13	31,2	0,473					
04:38	11	26,4	0,4					
04:56	10	24,0	0,364					
05:25	9	21,6	0,327					
07:14	8	19,2	0,291					
08:35	7,5	18,0	0,273					
				Odhad lomu sedimentční křivky [-]	10			
				Rozměr částice reprezentující sedimentaci	17,4 μm			
				Navrhovaná třída prachu	A4			
Sedimentační rychlost suspenze	0,1472	mm·s ⁻¹						
Sedimentační rychlosti částice	0,2338	mm·s ⁻¹						
Objemová koncentrace prachu	9,20%							

Obrázek 64: Protokol sedimentační zkoušky dodaného vzorku prachu

Protokol měření sedimentace prachu					Číslo měř.			
Vzorek					4			
2BK CEMA 19/2 IKA	Měřil	Prokop	Místo měření	ČVUT-FS, Ú218	Čas	Datum	12:00	24.2.20
Poznámka								
Teplota [°C]	23	Cejcha [mm·ml ⁻¹]	2,4					
Etanol - konc. [%vol]	96	Hustota [kg·m ⁻³]	817					
ρ skelet prach [kg·m ⁻³]	2650	výpočet 2340	Hmotnost vzorku [g]	8,19				
Exponent Zaki [-]	4,7980		Objem etanolu [cm ³]	30				
t	V	H	H/Ho	Poznámka:				
[m:s]	[ml]	[mm]	[1]					
00:00	33,5	80,4	1					
00:36	31	74,4	0,925					
01:02	30	72,0	0,896					
01:20	29	69,6	0,866					
01:53	27	64,8	0,806					
02:23	25	60,0	0,746					
02:57	23	55,2	0,687					
03:12	22	52,8	0,657					
03:29	21	50,4	0,627					
04:02	19	45,6	0,567					
04:22	18	43,2	0,537					
04:56	16	38,4	0,478					
05:13	15	36,0	0,448					
05:47	13	31,2	0,388					
06:22	11	26,4	0,328					
07:56	10	24,0	0,299	Odhad lomu sedimentční křivky [-]	14			
Rozměr částice reprezentující sedimentaci				17,3	μm			
Navrhovaná třída prachu				A4				
Sedimentační rychlost suspenze	0,1421	mm·s ⁻¹						
Sedimentační rychlosti částice	0,2275	mm·s ⁻¹						
Objemová koncentrace prachu	9,34%							



Obrázek 65: Protokol sedimentační zkoušky dodaného vzorku prachu

Protokol měření sedimentace prachu					Číslo měř.									
					6									
Vzorek	Měřil	Místo měření	Čas	Datum										
3BK CEMA19/2 IKA	Prokop	ČVUT-FS, Ú218	12:00	24.2.20										
Poznámka														
Teplota [°C]	23	Cejcha [mm·ml ⁻¹]	2,4											
Etanol - konc. [%vol]	96	Hustota [kg·m ⁻³]	817											
ρ skelet prach [kg·m ⁻³]	2650	<i>výpočet 2317</i>	Hmotnost vzorku [g]	6,95										
Exponent Zaki [-]	4,7988	Objem etanolu [cm ³]	25											
t	V	H	H/Ho	Poznámka: Pro malé množství vzorku byl na zachování vhodné koncentrace snížen objem ethanolu na 25ml										
[m:s]	[ml]	[mm]	[1]											
00:00	28	67,2	1											
00:37	26	62,4	0,929											
00:57	25	60,0	0,893											
01:25	24	57,6	0,857											
01:49	23	55,2	0,821											
02:17	22	52,8	0,786											
02:43	21	50,4	0,75											
03:10	20	48,0	0,714											
04:10	18	43,2	0,643											
05:12	16	38,4	0,571											
06:21	14	33,6	0,5											
07:45	12	28,8	0,429											
10:32	10	24,0	0,357											
13:01	9	21,6	0,321											
				Odhad lomu sedimentční křivky [-]										
				11										
				<table border="1"> <tr> <td>Rozměr částice reprezentující sedimentaci</td> <td>13,3</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>Navrhovaná třída prachu</td> <td>A3</td> <td></td> </tr> </table>		Rozměr částice reprezentující sedimentaci	13,3	μm	Navrhovaná třída prachu	A3				
Rozměr částice reprezentující sedimentaci	13,3	μm												
Navrhovaná třída prachu	A3													
				<table> <tr> <td>Sedimentační rychlost suspenze</td> <td>0,0836</td> <td>mm·s⁻¹</td> </tr> <tr> <td>Sedimentační rychlosti částice</td> <td>0,1350</td> <td>mm·s⁻¹</td> </tr> <tr> <td>Objemová koncentrace prachu</td> <td>9,49%</td> <td></td> </tr> </table>		Sedimentační rychlost suspenze	0,0836	mm·s ⁻¹	Sedimentační rychlosti částice	0,1350	mm·s ⁻¹	Objemová koncentrace prachu	9,49%	
Sedimentační rychlost suspenze	0,0836	mm·s ⁻¹												
Sedimentační rychlosti částice	0,1350	mm·s ⁻¹												
Objemová koncentrace prachu	9,49%													

Obrázek 66: Protokol sedimentační zkoušky dodaného vzorku prachu

Souhrn měření sklepných a sypných hustot				
Měřil	Místo měření	Čas	Datum	
Prokop	CVUT-FS, U218	13:00	24.02.2020	
<i>vzorek</i>	<i>$\rho_{sypná}$</i>	<i>$\rho_{sklepná}$</i>	<i>$\rho_{sklepná} / \rho_{sypná}$</i>	<i>Sklepná porozita</i>
1BK CEMA19/2 RTBG	1228	1645	1,34	38%
MIX 3BK RTBG IKA HOUB	1050	1554	1,48	41%
4BK RBTG IKA	1008	1155	1,15	56%

Obrázek 68: Souhrn výsledků sklepných a sypných hustot pro dodané vzorky prachu

Protokol měření sklepné a sypné hustoty prachu					Číslo měř.
Vzorek	Měřil	Místo měření	Čas	Datum	
1BK CEMA19/2 RTBG	Prokop	ČVUT-FS, Ú218	13:00	24.02.2020	
Hustota skeletu	2650 [kg/m ³]		Poznámka: Kvůli nedostatečnému množství vzorku bylo měření sklepné hustoty provedeno pouze jednou		
		měření 1 měření 2		měření 1 měření 2	
Hmotnost vzorku [g]	13,9	13,9	Hmotnost vzorku [g]	13,9	
Sypný objem vzorku [ml]	11,0	10,7	Sklepaný objem vzorku [ml]	8,4	
	11,5	11,4		8,2	
	11,0	12,4		8,8	
Sklepná hustota $\rho_{\text{sklepná}}$		1645	[kg/m ³]		
Sypná hustota $\rho_{\text{sypná}}$		1228	[kg/m ³]		
Sklepná porozita	38%				
Objem částic měření 1	8,6	[cm ³]			
Objem částic měření 2	8,6	[cm ³]			
$\rho_{\text{sklepná}}/\rho_{\text{sypná}}$	1,34	[1]			

Obrázek 69: Protokol měření sypné a sklepné hustoty dodaného vzorku prachu

Protokol měření sklepné a sypné hustoty prachu				Číslo měř.
Vzorek	Měřil	Místo měření	Čas	Datum
MIX 3BK RTBG IKA HOUB	Prokop	ČVUT-FS, Ú218	13:00	24.02.2020
Hustota skeletu	2650 [kg/m ³]	Poznámka: Kvůli nedostatečnému množství vzorku bylo měření sklepné hustoty provedeno pouze jednou		
		měření 1		měření 2
Hmotnost vzorku [g]	11,4	13,2		
Sypný objem vzorku [ml]	10,8	12,8		
	11,4	12,6		
	10,2	12,4		
		měření 1		měření 2
Hmotnost vzorku [g]	13,2			
Sklepaný objem vzorku [ml]	8,6			
	8,4			
	8,4			
Sklepná hustota $\rho_{\text{sklepná}}$		1554 [kg/m ³]		
Sypná hustota $\rho_{\text{sypná}}$		1050 [kg/m ³]		
Sklepná porozita	41%			
Objem částic měření 1	6,7 [cm ³]			
Objem částic měření 2	7,7 [cm ³]			
$\rho_{\text{sklepná}}/\rho_{\text{sypná}}$	1,48 [1]			

Obrázek 70: Protokol měření sypné a sklepné hustoty dodaného vzorku prachu

Protokol měření sklepné a sypné hustoty prachu				Číslo měř.
Vzorek	Měřil	Místo měření	Čas	Datum
4BK RBTG IKA	Prokop	ČVUT-FS, Ú218	13:00	24.02.2020
Hustota skeletu	2650 [kg/m ³]	Poznámka: Kvůli nedostatečnému množství vzorku bylo měření sklepné hustoty provedeno pouze jednou		
		měření 1		měření 2
Hmotnost vzorku [g]	11,0	9,7		
Sypný objem vzorku [ml]	10,6	10,2		
	11,4	10,3		
	10,8	8,4		
		měření 1		měření 2
Hmotnost vzorku [g]	9,7			
Sklepaný objem vzorku [ml]	6,5			
	10,3			
	8,4			
Sklepná hustota $\rho_{\text{sklepná}}$		1155 [kg/m ³]		
Sypná hustota $\rho_{\text{sypná}}$		1008 [kg/m ³]		
Sklepná porozita	56%			
Objem částic měření 1	4,8 [cm ³]			
Objem částic měření 2	4,2 [cm ³]			
$\rho_{\text{sklepná}}/\rho_{\text{sypná}}$	1,15 [1]			

Obrázek 71: Protokol měření sypné a sklepné hustoty dodaného vzorku prachu

Protokol měření sklepné hustoty prachu					Číslo měř.																																													
Vzorek					3																																													
SET IKA 1BK CEMA19	Měřil	Prokop	Místo měření	ČVUT-FS, Ú218	Čas																																													
				9:00	Datum																																													
					16.07.2019																																													
Prázdny válec	52,36	[g]	Poznámka:																																															
Hmotnost vzorku - měření 1	4,96	[g]																																																
Hmotnost vzorku - měření 2	4,96	[g]																																																
Hustota skeletu	2650	[kg/m ³]																																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Synpný objem vzorku [ml]</th> <th colspan="2">měření 1</th> <th colspan="2">měření 2</th> <th rowspan="2">Sklepaný objem vzorku [ml]</th> <th colspan="2">měření 1</th> <th colspan="2">měření 2</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>1</th> <th>2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>5,4</td> <td>5,4</td> <td></td> <td></td> <td>3,3</td> <td>3,4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>5,6</td> <td>5,4</td> <td></td> <td></td> <td>3,4</td> <td>3,4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>5,5</td> <td>5,6</td> <td></td> <td></td> <td>3,4</td> <td>3,3</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Synpný objem vzorku [ml]	měření 1		měření 2		Sklepaný objem vzorku [ml]	měření 1		měření 2		1	2	1	2	1	2	1	2		5,4	5,4			3,3	3,4				5,6	5,4			3,4	3,4				5,5	5,6			3,4	3,3		
Synpný objem vzorku [ml]	měření 1		měření 2		Sklepaný objem vzorku [ml]		měření 1		měření 2																																									
	1	2	1	2		1	2	1	2																																									
	5,4	5,4			3,3	3,4																																												
	5,6	5,4			3,4	3,4																																												
	5,5	5,6			3,4	3,3																																												
Sklepná hustota $\rho_{\text{sklepná}}$		1473	[kg/m ³]																																															
Sypná hustota $\rho_{\text{sypná}}$		905	[kg/m ³]																																															
Porozita vzorku	34%																																																	
Objem částic měření 1	3,3	[cm ³]																																																
Objem částic měření 2	3,3	[cm ³]																																																
$\rho_{\text{sklepná}}/\rho_{\text{sypná}}$	1,63	[1]																																																

Obrázek 72: Protokol měření sypné, sklepné hustoty a porozity, vzorek č.1

Protokol měření sklepné hustoty prachu					Číslo měř.
					7
Vzorek	Měřil	Místo měření	Čas	Datum	
BST 4BK RBTG-IKA CEMA19	Prokop	ČVUT-FS, Ú218	9:00	16.07.2019	
Prázdny válec	52,35	[g]	Poznámka:		
Hmotnost vzorku - měření 1	10,08	[g]			
Hmotnost vzorku - měření 2	10,06	[g]			
Hustota skeletu	2650	[kg/m ³]			
		měření 1	měření 2		
Sypný objem vzorku [ml]	8,8	8,8			
	9,0	8,9			
	8,8	8,8			
		měření 1	měření 2		
Sklepaný objem vzorku [ml]	6,4	6,4			
	6,5	6,4			
	6,6	6,8			
Sklepná hustota $\rho_{\text{sklepná}}$		1545	[kg/m ³]		
Sypná hustota $\rho_{\text{sypná}}$		1138	[kg/m ³]		
<i>Porozita vzorku</i>	43%				
<i>Objem částic měření 1</i>	5,8	[cm ³]			
<i>Objem částic měření 2</i>	5,7	[cm ³]			
<i>$\rho_{\text{sklepná}}/\rho_{\text{sypná}}$</i>	1,36	[1]			

Obrázek 73: Protokol měření sypné, sklepné hustoty a porozity, vzorek č.2

Meas.No. 14	Date 08-22-2019	Time 08:01	Operator prof. Jirut	ID 12118	Serial No. 12118
-------------	-----------------	------------	----------------------	----------	------------------

SET IKA 1BK CEMA19 - bez UZ

Measuring Range	0.31 [µm] - 300.74 [µm]	Pump	100[rpm]
Resolution	62 Channels (17 mm / 114 mm)	Stirrer	3[rpm]
Absorption	8.00 [%]	Ultrasonic	0
Measurement Duration	3 [Scans]		

Modell Independant

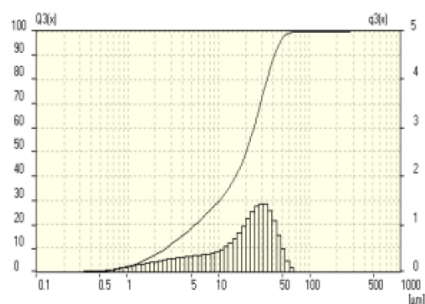
Fraunhofer Calculation selected.

Interpolation Values... C:\Program Files\la22_32\fitsch\HIMNT_1.FPS					
***** % <=	0.050 µm	2.2 % <=	1.000 µm	7.1 % <=	2.000 µm
11.5 % <=	3.000 µm	15.1 % <=	4.000 µm	18.2 % <=	5.000 µm
29.4 % <=	10.000 µm	49.7 % <=	20.000 µm	96.8 % <=	50.000 µm
100.0 % <=	100.000 µm	100.0 % <=	200.000 µm	***** % <=	300.000 µm

Interpolation Values... C:\Program Files\la22_32\fitsch\10_90.FPV					
10.0 % <=	2.643 µm	20.0 % <=	5.657 µm	30.0 % <=	10.321 µm
40.0 % <=	15.497 µm	50.0 % <=	20.132 µm	65.0 % <=	26.703 µm
70.0 % <=	29.002 µm	80.0 % <=	34.103 µm	90.0 % <=	41.156 µm
100.0 % <=	67.420 µm				

Mean Values...					
D43 =	21.01 µm	D42 =	11.86 µm	D41 =	5.95 µm
D32 =	6.69 µm	D31 =	3.17 µm	D30 =	1.92 µm
D21 =	1.5 µm	D20 =	1.02 µm		
D10 =	2.64 µm				

Statistical Means...			
Arithmetic Mean Diameter	21.011 µm	Variance	213.127 µm ²
Geometric Mean Diameter	14.17 µm	Mean Square Deviation	14.599 µm
Quadratic Square Mean Diameter	25.543 µm	Average Deviation	12.185 µm
Harmonic Mean Diameter	6.69 µm	Coefficient of Variation	69.484 %
Statistical Modes...			
Skewness	.437	Mode	29.5 µm
Curtosis	-.633	Median	20.126 µm
Span	1.909	Mean/Median Ratio	1.044
Uniformity	.6		
Specific Surface Area	8968.65 cm ² /cm ³		
Density	1. g/cc		
Form Factor	1. q/cc		



Obrázek 74: Protokol měření vzorku prachu pomocí laserové difrakce, vzorek č.1

Meas.No. 26	Date 08-22-2019	Time 09:16	Operator prof. Jirout	ID 12118	Serial No. 12118
-------------	-----------------	------------	-----------------------	----------	------------------

BST RBTG_IKA 4BK CEMA19 - bez UZ

Measuring Range	0.31 [µm] - 300.74 [µm]	Pump	100[rpm]
Resolution	62 Channels (17 mm / 114 mm)	Stirrer	3[rpm]
Absorption	7.00 [%]	Ultrasonic	0
Measurement Duration	3 [Scans]		

Modell Independant

Fraunhofer Calculation selected.

Interpolation Values... C:\Program Files\la22_32\fritsch\HIMNT_1.FPS

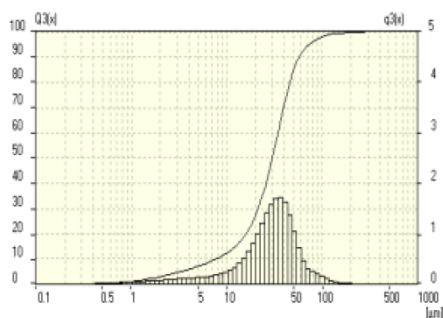
**** % <=	0.050 µm	1.1 % <=	1.000 µm	3.0 % <=	2.000 µm
4.6 % <=	3.000 µm	5.9 % <=	4.000 µm	7.1 % <=	5.000 µm
12.3 % <=	10.000 µm	27.3 % <=	20.000 µm	84.6 % <=	50.000 µm
98.0 % <=	100.000 µm	99.9 % <=	200.000 µm	**** % <=	300.000 µm

Interpolation Values... C:\Program Files\la22_32\fritsch\10_90.FPV

10.0 % <=	7.751 µm	20.0 % <=	15.950 µm	30.0 % <=	21.308 µm
40.0 % <=	25.803 µm	50.0 % <=	30.092 µm	65.0 % <=	36.929 µm
70.0 % <=	39.489 µm	80.0 % <=	45.919 µm	90.0 % <=	57.361 µm
100.0 % <=	***** µm				

Mean	Values...				
D43 =	33.08 µm	D42 =	20.03 µm	D41 =	8.6 µm
D32 =	12.13 µm	D31 =	4.39 µm	D30 =	2.24 µm
D21 =	1.59 µm	D20 =	.96 µm		
D10 =	7.74 µm				

Statistical Means...			
Arithmetic Mean Diameter	33.08 µm	Variance	539.62 µm ²
Geometric Mean Diameter	24.667 µm	Mean Square Deviation	23.23 µm
Quadratic Square Mean Diameter	40.355 µm	Average Deviation	16.091 µm
Harmonic Mean Diameter	12.125 µm	Coefficient of Variation	70.223 %
Statistical Modes...			
Skewness	2.088	Mode	36.66 µm
Curtosis	9.35	Median	30.067 µm
Span	1.644	Mean/Median Ratio	1.1
Uniformity	.53		
Specific Surface Area	4946.26 cm ² /cm ³		
Density	1. g/cc		
Form Factor	1. g/cc		



Obrázek 75: Protokol měření vzorku prachu pomocí laserové difrakce, vzorek č.2