

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2024

**KRISTÝNA
KOTHÁNKOVÁ**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kothánková** Jméno: **Kristýna** Osobní číslo: **482414**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Charakteristika inertních materiálů pro spalování v bublinkové fluidní vrstvě

Název diplomové práce anglicky:

Characteristics of inert bed material for fluidized bed combustion

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracování literární rešerše, které bude zaměřena na fundamentální principy chování fluidní vrstvy a jeho matematického popisu, vlastností a charakteristiku částic inertních materiálů tvořící fluidní vrstvu a jeho matematického popisu.
- 2) Vytvoření výpočtového modelu, který bude zahrnovat charakteristiku částic inertních materiálů pomocí různých matematických modelů, a analýzu klíčových parametrů charakterizující fluidní vrstvu (rychlosti fluidace, tlaková ztráta).
- 3) Provedení experimentů, které budou zahrnovat analýzu distribuce velikosti částic vybraných materiálů fluidní vrstvy, a fluidační charakteristiku těchto materiálů, zahrnující určení prahových rychlostí fluidace a sféricity částic materiálu.
- 4) Zpracování a vyhodnocení naměřených dat, aplikace výpočtových postupů, porovnání modelových a experimentálních výsledků, formulace závěrů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] KUNII, Daizo a Octave LEVENSPIEL. Fluidization engineering. 2. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991. Butterworth-Heinemann series in chemical engineering. ISBN 978-0-409-90233-4.
[2] SVAROVSKY, Ladislav, ed. Solid-liquid separation. 4th ed. Oxford ; Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 978-0-7506-4568-3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D. ústav energetiky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **15.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2025**

prof. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna 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.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „Charakteristika inertních materiálů pro spalování v bublinkové fluidní vrstvě“ vypracovala samostatně pod vedením prof. Ing. Jana Hrdličky, Ph.D. Práci jsem vypracovala s využitím uvedené literatury v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při tvorbě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Kristýna Kothánková

Anotační list

Jméno autora:	Kristýna Kothánková
Název DP:	Charakteristika inertních materiálů pro spalování v bublinkové fluidní vrstvě
Anglický název:	Characteristics of inert bed material for fluidized bed combustion
Akademický rok:	2023/2024
Ústav:	Ústav energetiky 12115
Vedoucí DP:	prof. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 77 Počet obrázků: 18 Počet tabulek: 23 Počet příloh: 3
Klíčová slova:	Fluidace, fluidní vrstva, inertní materiál, velikostní distribuce částic, prahová rychlost fluidace, sféricita
Keywords:	Fluidization, fluidized bed, inert material, particle size distribution, minimum fluidization velocity, sphericity

Anotace:

Diplomová práce se zabývá charakteristikou inertních materiálů v bublinkové fluidní vrstvě. V teoretické části práce jsou uvedeny základní pojmy, charakteristika fluidního stavu a typy fluidních vrstev. Dále jsou zde shrnuty vlastnosti inertních částic, způsoby stanovení velikostní distribuce částic a charakteristické parametry fluidní vrstvy jako například mezerovitost vrstvy, tlaková ztráta a prahová rychlost fluidace. Experimentální část práce je věnována stanovení velikostní distribuce částic pomocí různých matematických modelů, určení prahové rychlosti fluidace, prahové rychlosti úletu a vyhodnocení chování částic v závislosti na rychlosti fluidačního média u 5 různých materiálů.

Abstract:

The master thesis deals with the characterization of inert materials in a bubble fluidized bed. In the theoretical part of the thesis the basic concepts, characteristics of the fluidized state and types of fluidized beds are described. Furthermore, the properties of inert particles, methods for determining the particle size distribution and characteristic parameters of the fluidized bed such as void fraction, pressure drop, and minimum fluidization velocity are summarized. The experimental part of the thesis is devoted to the determination of the particle size distribution using different mathematical models and the determination of the minimum fluidization velocity, the terminal velocity and evaluation of the particle behaviour as a function of the fluidization medium velocity for five different materials.

Poděkování

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Janu Hrdličkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a věcné připomínky, dále pak za jeho trpělivost a drahocenný čas, který mi věnoval. Mé díky patří také Ing. Pavlu Skopci, Ph.D. za poskytnuté odborné konzultace.

Obsah

1	Seznam symbolů	10
2	Úvod.....	12
	Teoretická část diplomové práce	13
3	Fluidace a fluidní vrstva.....	13
3.1	Charakteristika fluidního stavu.....	13
3.2	Základní vlastnosti fluidní vrstvy	15
3.3	Typy fluidních vrstev.....	15
4	Základní vlastnosti částic	17
4.1	Sféricita.....	18
4.2	Distribuční křivky a hustota pravděpodobnosti velikosti částic	18
4.2.1	Distribuční křivka rozsevu	18
4.2.2	Distribuční křivka propadu.....	19
4.2.3	Hustota pravděpodobnosti.....	19
4.2.4	Charakteristické hodnoty.....	20
4.3	Matematický popis distribuce částic.....	21
4.3.1	Normální distribuce.....	21
4.3.2	Log-normální distribuce	22
4.3.3	Rosin-Rammlerova distribuční funkce.....	23
4.3.4	Harrisova korelace.....	24
4.4	Způsoby stanovení velikostní distribuce částic	25
4.5	Geldartovo rozdělení částic	27
5	Charakteristické parametry fluidní vrstvy.....	30
5.1	Mezerovitost vrstvy	30
5.2	Výška fluidní vrstvy a její expanze	30
5.3	Tlaková ztráta	31
5.4	Prahová rychlost fluidace	32

5.5	Prahová rychlost úletu	35
	Experimentální část	36
6	Stanovení velikostní distribuce částic	36
6.1	Použité materiály	36
6.2	Popis měřících přístrojů	38
6.3	Metodika měření	38
7	Stanovení rychlosti fluidace 5 různých materiálů	38
7.1	Popis měřících přístrojů	39
7.2	Metodika měření	39
8	Vyhodnocení středního průměru částic a mediánu z experimentálně zjištěných dat	40
8.1	Střední průměr	40
8.2	Medián	41
9	Naměřené a vypočtené hodnoty - velikostní distribuce částic	41
9.1	Parametry a koeficienty	42
9.1.1	Parametry normální distribuce	42
9.1.2	Parametry log-normální distribuce	42
9.1.3	Koeficienty Rosin-Rammlerovy distribuční funkce	43
9.1.4	Koeficienty Harrisovy korelace	43
9.2	Velikostní distribuce částic	44
9.2.1	Velikostní distribuce částic materiálu písek 01-06	45
9.2.2	Velikostní distribuce částic materiálu písek 03-30	46
9.2.3	Velikostní distribuce částic materiálu písek 05-10	49
9.2.4	Velikostní distribuce částic materiálu LWA 0-2	52
9.2.5	Velikostní distribuce částic materiálu LWA 1/4	55
10	Diskuze a výsledky - velikostní distribuce částic	58
10.1	Geldartovo rozdělení částic	58
10.2	Analýza distribuce velikosti částic	59

11	Naměřené a vypočtené hodnoty – fluidační charakteristika	59
11.1	Závislost tlakové ztráty na rychlosti proudění.....	60
11.2	Prahová rychlost fluidace	63
11.3	Prahová rychlost úletu	64
12	Diskuze a výsledky – fluidační charakteristika.....	65
12.1	Závislost velikosti částic a sféricity na prahové rychlosti fluidace	65
12.2	Prahová rychlost fluidace a prahová rychlost úletu.....	66
13	Závěr	72
14	Seznam použité literatury a informačních zdrojů	74
15	Seznam obrázků	75
16	Seznam tabulek	76
17	Seznam grafů	77
18	Seznam příloh	77

1 Seznam symbolů

ϕ_s	[-]	sféricita
x	[mm]	rozměr oka síta
x_z	[mm]	velikost zrna větší, než je rozměr oka síta x
Δm	[g]	hmotnost zrn s rozměrem ok x
m	[g]	hmotnost celkové navážky vzorku
d_p	[mm]	průměr částice
R^2	[-]	determinační index
μ	[-]	střední hodnota, průměr logaritmu částic
σ	[-]	směrodatná odchylka, standardní odchylka logaritmu částic
θ	[-]	parametr umístění
m_i	[-]	parametr měřítka
b	[-]	rozsah velikostí částic zkoumaného vzorku
n	[-]	polydisperzita vzorku
x_{mod}	[mm]	modus
x_{med}	[mm]	medián
x_{D10}	[mm]	1. decil
x_{D90}	[mm]	9. decil
x_0	[mm]	maximální velikost ve vzorku
s	[-]	parametr spojený s jemnou částí grafu
r	[-]	parametr spojený s hrubou částí grafu
ε	[-]	mezerovitost
V_b	[m ³]	celkový objem
V_p	[m ³]	objem všech částic
ρ_p	[kg/ m ³]	sypná hmotnost
ρ_b	[kg/ m ³]	hustota pevných částic
m_p	[kg]	hmotnost částic
h	[mm]	výška fluidní vrstvy
S	[m ²]	průřez vrstvy
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení
g_c	[m/s ²]	tíhové zrychlení
Δp	[Pa]	tlaková ztráta ve fluidní vrstvě
ρ_g	[kg/ m ³]	hustota plynu

L_m	[m]	výška pevného lože
μ	[Pa·s]	dynamická viskozita
u_o	[m/s]	mimovrstvová rychlost plynu
L_{mf}	[m]	výška fluidní vrstvy při stavu minimální fluidace
ε_{mf}	[-]	experimentálně zjištěná mezerovitost
u_{mf}	[m/s]	prahová rychlost fluidace
$Re_{p,mf}$	[-]	Reynoldsovo číslo
Ar	[-]	Archimedovo číslo
K_1, K_2	[s ⁻¹]	rychlostní konst. pro výměnu pevných látek ve volném prostoru
u_t^*	[m/s]	prahová rychlost úletu

2 Úvod

Fluidace je fyzikální proces, při kterém působením fluidačního média ve směru zdola nahoru vzniká suspenze částic vznášejících se v uzavřeném prostoru v proudu fluidačního média. Tato suspenze se chová podobně jako tekutina, a proto je označována fluidní vrstvou. Fluidačním médiem mohou být kapaliny i plyny. Při procesu spalování se používají pouze plyny jako fluidační médium.

Specifickým typem fluidní vrstvy v systému plyn – pevná látka je bublinková fluidní vrstva. V bublinkové fluidní vrstvě jsou pevné částice inertního materiálu transportovány proudem plynu a dochází k energickému pohybu částic. Částice se prudce míchají, což vede k nestabilitám a vzniku bublin v loži, které ovlivňují chování a vlastnosti fluidní vrstvy.

Cílem této diplomové práce je analyzovat charakteristiku inertních materiálů pro spalování v bublinkové fluidní vrstvě. Hlavní pozornost bude věnována základním principům ovlivňující chování fluidní vrstvy a jejich matematickému popisu. Teoretická část práce bude zpracována formou rešerše, která bude obsahovat charakteristiku fluidního stavu a základní informace o typech fluidních vrstev a jejich charakteristických vlastnostech. Dále pak se zaměří na vlastnosti a charakteristiky částic inertních materiálů tvořící fluidní vrstvu a jejich matematický popis. Součástí experimentální části práce bude výpočtový model pro charakterizaci inertních materiálů pomocí různých matematických přístupů a analýza klíčových parametrů charakterizujících fluidní vrstvu. Následně budou naměřená data zpracována a vyhodnocena. Výpočetní metody budou použity k porovnání predikcí modelů s experimentálními výsledky.

Výsledky této diplomové práce budou využity k formulaci závěrů a doporučení, která povedou k lepšímu pochopení chování a vlastností inertních materiálů při spalování v bublinkové fluidní vrstvě.

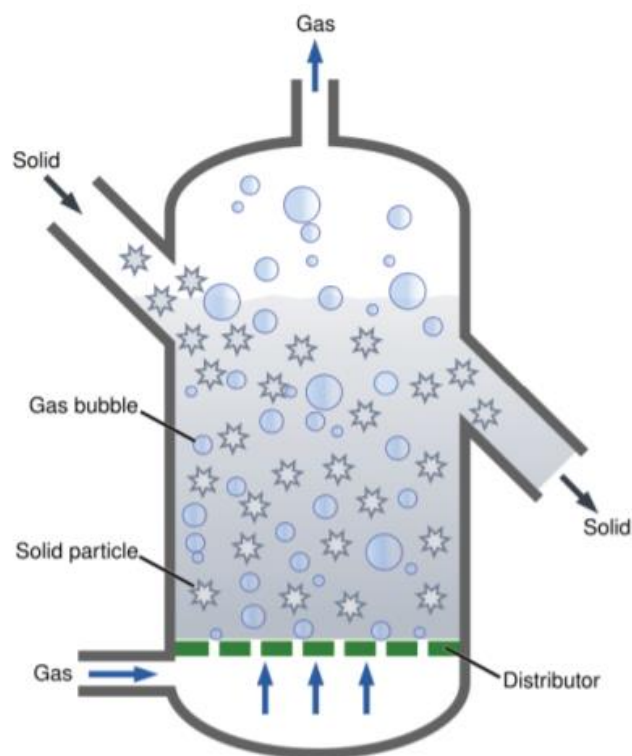
Teoretická část diplomové práce

3 Fluidace a fluidní vrstva

3.1 Charakteristika fluidního stavu

K fluidace dochází pouze tehdy, když plyn proudící vzhůru působí tak velkou odporovou silou, že překoná gravitační sílu působící směrem dolů. Fluktuační částic v důsledku odporových sil ovlivňuje rychlost plynu. Velikost tohoto vlivu závisí na tvaru částice. V případě, že má částice kulový tvar, tak je její vliv na rychlost plynu téměř nulový, zatímco částice nepravidelného mají vliv významnější. Rychlost, při které dochází k fluidaci, se nazývá prahovou rychlostí. K dosažení rovnováhy mezi silou odporu a tíhou částic, která je zpomalená vztlakem, dochází právě při prahu fluidace. [1] [2]

Na obr. 1 je zobrazen princip fluidace.



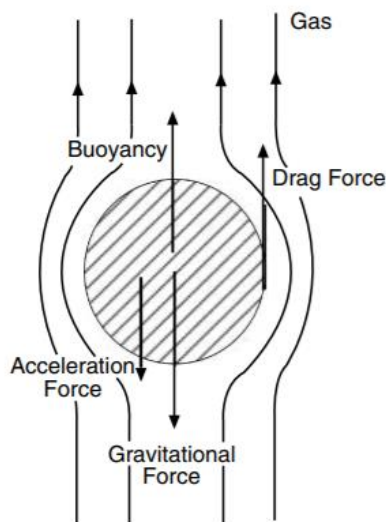
Obr. 1: Princip fluidace [3]

Fluidační zařízení je vybaveno roštem, jehož hlavním úkolem je rovnoměrné rozptýlení plynu tak, aby se vytvořila vrstva suspenze, známá také jako fluidní vrstva. Po vytvoření fluidní vrstvy se částice přestanou pohybovat a v mezerách mezi nimi začne proudit

fluidační médium. Je přiváděno spodem přes distributor, přičemž se vyrovnávají síly vztlaková, gravitační a odporová. Při zvyšování rychlosti fluidačního média se zvětší mezery mezi částicemi a částice se začnou přesouvat, čímž podpoří rychlost hoření. Rychlost proudění se postupně zvyšuje, až se dosáhne prahové rychlosti fluidace. U samotné částice dochází k jejímu vznosu, a při dalším zvyšování rychlosti až k jejímu úletu. U vrstvy částic se s rostoucí mimovrstvou rychlostí zvětšuje výška fluidní vrstvy a dochází ke zvětšování objemu vrstvy, tzv. expanzi. Mezi částicemi se vytvářejí mezery, zvětšují se průtočné průřezy a rychlost zůstává na takové úrovni, že částice zůstávají ve fluidní vrstvě. S dalším zvyšováním rychlosti dochází k tak výrazné expanzi fluidní vrstvy, že částice začínají z vrstvy unikat. Teoreticky může dojít k úletu částic i při nižších rychlostech, ale poté, co uniknou, vstupují do volného prostoru, kde je rychlost tak nízká, že se částice vracejí zpět do lože. Taková fluidní vrstva připomíná vroucí kapalinu.

Na průběh fluidace má největší vliv rychlost proudění, ale nesmí se opomenout ani další faktory, které ji ovlivňují, jako je například velikost, tvar či hustota částic. Variabilita vlastností částic vyžaduje experimentální zkoumání. Fluidní stav dále charakterizuje tlaková ztráta, která zůstává nezávislá na změnách mimovrstvové rychlosti.

Proces fluidace nachází uplatnění především v energetickém průmyslu při reakcích plynů na pevných katalyzátorech a při sušení práškových materiálů. [1] [4]



Obr. 2: Síly působící na částici při fluidaci [18]

Na obr. 2 jsou zobrazeny síly, které působí na částici. Vztlaková síla a odporová síla plynu působí proti síle gravitační. Rychlost částice se zvyšuje do té doby, než je rovna prahové rychlosti úletu.

3.2 Základní vlastnosti fluidní vrstvy

Fluidní vrstvu lze definovat jako specifický případ pohyblivé vrstvy částic. Stabilita fluidní vrstvy závisí na přechodu mezi rovnoměrnou a nerovnoměrnou fluidní vrstvou. Rovnoměrná fluidní vrstva má homogenní strukturu a koncentrace částic je v celé vrstvě konstantní. V nerovnoměrné fluidní vrstvě se mění koncentrace částic v závislosti na jejich umístění ve vrstvě. Fluidními vrstvami prostupuje fluidační médium – plyn.

Fluidní lože s hustou fází se velice podobá vroucí kapalině a v mnoha ohledech se i jako kapalina chová. Při naklonění fluidačního zařízení hladina fluidní vrstvy zůstává vodorovně a při spojení dvou fluidních vrstev se jejich výšky vyrovnají. [1] [5]

3.3 Typy fluidních vrstev

Při ustáleném průtoku fluidačního média může částice protékat fluidní vrstvou několika způsoby, přičemž volba konkrétního typu závisí především na tvaru, množství a velikosti částic. Existuje celkem osm základních typů fluidních vrstev, ale pro účely spalování v fluidním kotli s plynem jako fluidačním médiem se obvykle používá šest z nich. Patří sem fluidní vrstva s homogenní fluidací, lože s minimální fluidací, bublinková fluidní vrstva, pístová fluidní vrstva, turbulentní fluidace a řídká fluidní vrstva. Každý z těchto typů má své specifické vlastnosti a použití v závislosti na konkrétních podmínkách. [1]

a) Fluidní vrstva s homogenní fluidací

Fluidní vrstva s homogenní fluidací se vytváří při fluidaci monodisperzních částic, což znamená, že částice mají stejnou velikost. V této vrstvě jsou částice rovnoměrně rozprostřeny v libovolném volném průřezu a jejich koncentrace zůstává nezměněna v průběhu času. Během fluidace prochází plyn vrstvou jemných částic směrem nahoru a proniká prázdnými prostory mezi stacionárními částicemi. Fluidní vrstva s homogenní fluidací se vytváří pouze za zvláštních podmínek a není běžným jevem. [1]

b) Lože s minimální fluidací

Lože s minimální fluidací vzniká, když se dosáhne rychlosti proudění, při níž je třecí síla mezi částicemi a fluidačním médiem rovna hmotnosti částic. V této situaci jsou částice nadnášeny vzhůru proudícím fluidačním médiem, a pokud je současně vertikální složka tlakové síly mezi sousedními částicemi nulová, mluvíme o loži s minimální fluidizací. [1]

c) Bublínková fluidní vrstva

Bublínková fluidní vrstva je specifickým typem fluidní vrstvy v systému plyn – pevná látka. Tato vrstva se vyznačuje tím, že při průtocích vyšších, než je minimální rychlost fluidace, dochází k velmi energickému pohybu částic. Částice se prudce míchají, což vede k nestabilitám a vzniku bublin v loži, které ovlivňují chování a vlastnosti tohoto typu fluidní vrstvy. [1]

d) Pístová fluidní vrstva

Pístová fluidní vrstva je speciálním typem fluidní vrstvy, která se v systému plyn - pevná látka chová dynamicky. Existují dva druhy pístové fluidní vrstvy: s axiálními nebo plochými písty. V pístové fluidní vrstvě s axiálními písty stoupají bubliny směrem vzhůru a postupně se srážejí, což vede ke zvětšování jejich objemu, dokud nezaplň celou nádobu. Pokud jsou v loži jemné částice, může dojít k jevu nazývanému „slugging“, kdy částice netvoří bubliny, ale plynule stékají po stěně komory. V pístové fluidní vrstvě s plochými písty je část lože nad bublinou tlačena vzhůru, částice se pohybují směrem dolů a dochází k rozpadu axiálního šneku. Ihned po rozpadu se vytvoří nový šnek a celý proces se opakuje. [1]

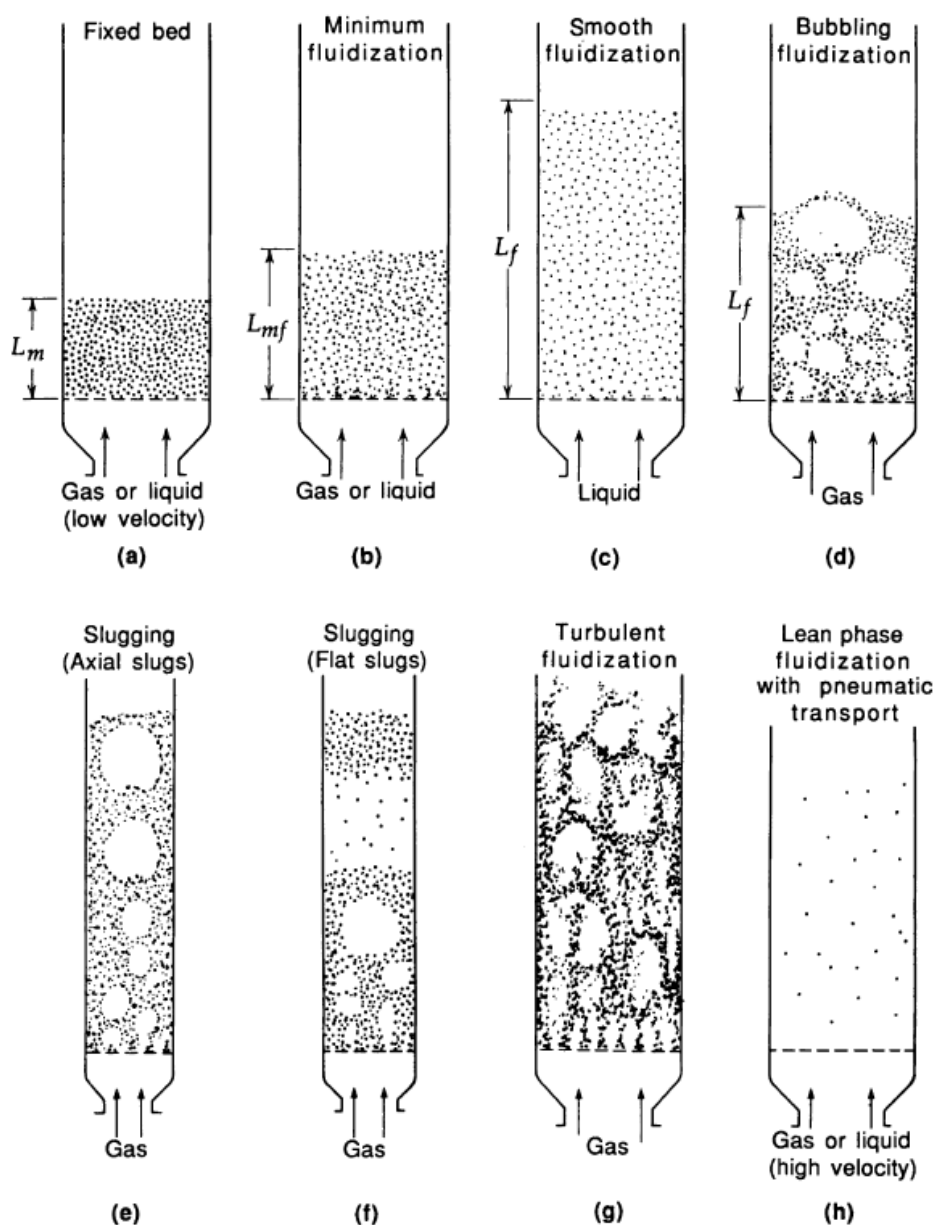
e) Turbulentní fluidace

K turbulentní fluidaci dochází, když je rychlost průtoku plynu vyšší než koncová rychlost pevných částic v loži. Tento jev je charakterizován tím, že při této rychlosti již nevznikají bubliny, ale dochází k intenzivnímu pohybu pevných částic různých tvarů a velikostí. Turbulentní fluidace způsobuje výrazné změny v chování částic a může mít významný vliv na procesy, které probíhají ve fluidním systému. [1]

f) Řídká fluidní vrstva

Při zvýšení průtoku fluidačního média nad mez prahové rychlosti úletu se částice dostávají do pneumatické fáze. Vzniká řídká fluidní vrstva, ve které se částice neshlukují, ale pohybují se samostatně. Tento typ fluidní vrstvy se využívá kotlů s cirkulující fluidní vrstvou. [1]

Na obr. 3 jsou zobrazeny různé typy fluidních vrstev.



Obr. 3: Typy fluidních vrstev [1]

4 Základní vlastnosti částic

Primárními vlastnostmi částic, které mají zásadní vliv na jejich chování, jsou distribuce velikosti částic, tvar částic, povrchové vlastnosti a hustota. Sekundárními vlastnostmi částic, které také hrají důležitou roli, jsou rychlost usazování částic a propustnost lože.

Většina částic má nepravidelný tvar, a proto je nutné využít analýzu velikosti částic a její distribuci k charakterizaci těchto částic. Nepravidelné částice mohou být popisovány různými velikostmi, zahrnujícími ekvivalentní průměr koule, ekvivalentní průměr kruhu a statistický průměr, což umožňuje podrobnější analýzu jejich geometrických vlastností. [6]

4.1 Sféricita

Sféricita, také nazývaná kulovitost, představuje poměr povrchu koule o objemu částice ke skutečnému povrchu této částice. Je vyjádřena číslem v rozmezí od 0 do 1. Pro částice, které nejsou dokonale kulovité, je hodnota sféricity vždy menší než 1. Čím více se hodnota sféricity blíží k 1, tím více se částice podobá kouli. Hodnota sféricity je dána především charakterem materiálu, ze kterého částice pochází. Zaoblení povrchu částice obvykle není rozhodujícím faktorem ovlivňujícím sféricitu. Příkladem je krychle, která má minimální zaoblení povrchu, ale dosahuje poměrně vysoké hodnoty sféricity (0,81). [1]

Obecně platí, že určení sféricity je jeden z největších problémů při modelování fluidní vrstvy. U částic s pravidelnými geometrickými tvary je možné tuto hodnotu vypočítat, avšak u částic s nepravidelnými tvary, pro které nelze získat hodnotu z tabulek, je nutné provést měření. K získání efektivní hodnoty sféricity ϕ_s u nepravidelných částic se používá experimentální postup, který zahrnuje měření tlakové ztráty v loži při různých rychlostech proudění.

4.2 Distribuční křivky a hustota pravděpodobnosti velikosti částic

Hustota pravděpodobnosti a distribuční křivky propadu a rozsevu se používají k definování rozdělení spojitéch náhodných veličin. Derivováním distribuční funkce propadu se získá funkce hustoty pravděpodobnosti.

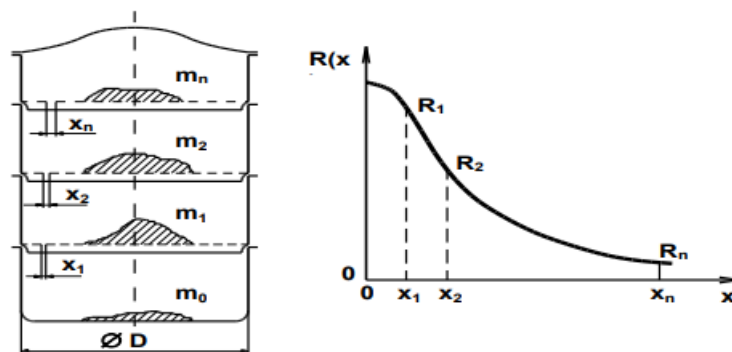
Při použití sítové analýzy, což je nejčastěji používaná metoda pro praktické stanovení velikostní distribuce částic, je možné definovat distribuční křivku rozsevu, propadu a hustoty pravděpodobnosti následně:

4.2.1 Distribuční křivka rozsevu

Udává hmotnostní podíl zrn x_z větších, než je rozměr oka síta x v závislosti na x

$$R_x = \frac{\Delta m (x_z > x)}{m} \quad (1)$$

, kde Δm [g] je hmotnost zrn s rozměrem ok x a větších a m [g] je hmotnost celkové navážky vzorku. Na obr. 4 je zobrazena distribuční křivka rozsevu.



Obr. 4: Distribuční křivka rozsevu

4.2.2 Distribuční křivka propadu

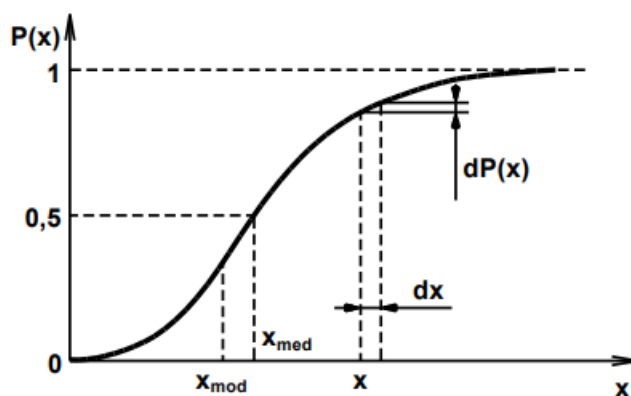
Udává hmotnostní podíl zrn o velikosti $x_z = x$ a menších, než je rozměr oka síta x v závislosti na x .

$$P_x = \frac{\Delta m (x_z \leq x)}{m} \quad (2)$$

Mezi distribuční křivkou rozsevu a propadu platí vztah:

$$P_{(x)} + R_{(x)} = 1 \quad (3)$$

Na obr. 5 je zobrazena distribuční křivka propadu.

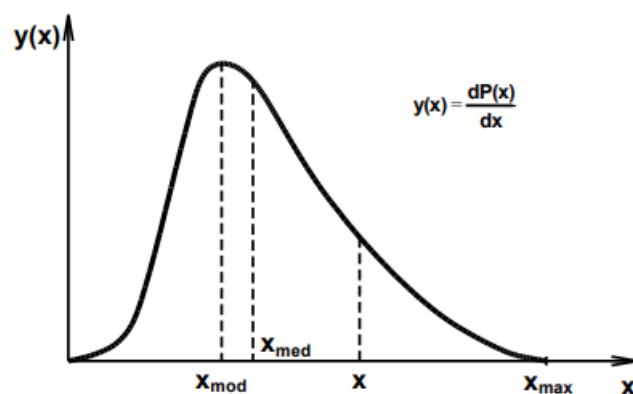


Obr. 5: Distribuční křivka propadu

4.2.3 Hustota pravděpodobnosti

Hustota pravděpodobnosti je derivační křivkou distribuční křivky propadu. Lze vyjádřit jako hmotnostní podíl zrn připadajících na odpovídající interval rozměru ok.

$$y_i(x) = \frac{P(x_{i+1}) - P(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad [1/mm] \quad (4)$$



Obr. 6: Hustota pravděpodobnosti [7]

Hustota pravděpodobnosti (obr. 6) popisuje četnost částic v závislosti na jejich velikosti. Definuje to, že spojitá náhodná veličina bude ležet v určitém intervalu hodnot. Na křivce hustoty pravděpodobnosti se nacházejí důležité body, jako jsou například modus, medián, střední průměr či decily. [8], [9]

4.2.4 Charakteristické hodnoty

Modus je maximum hustoty pravděpodobnosti. Modus je vrcholem frekvenčního rozdělení, který představuje nejčastěji se vyskytující velikost částic v distribuci.

Medián dělí plochu pod křivkou hustoty pravděpodobnosti na dvě stejné části a odpovídá hodnotě, při které je distribuční funkce rovna 0,5.

Střední průměr představuje podíl všech velikostí částic a počet částic. Existuje několik definic pro střední průměr, jelikož záleží, jestli se jedná o číselný, povrchový nebo objemový vážený střední průměr.

Střední hodnota velikosti částic se určí jako:

$$d_p = \frac{1}{\sum_{all\ i} \left(\frac{\text{hmotnostní podíl v intervalu } i}{\text{střední průměr v intervalu } i} \right)} \quad (5)$$

Šířka hustoty pravděpodobnosti se určí na základě tzv. decilů. Nejpoužívanější jsou D10, D50 a D90. D50 je též jiné označení pro medián. Definice D10 a D90 se podobá definici mediánu, jen s tím rozdílem, že D10 představuje 10 % celkové plochy a u D90 se jedná o 90 %. Hodnoty decilů jsou pro spalování ve fluidní vrstvě velice důležité, jelikož díky nim je možné zjistit, jak moc je látka polydisperzní. Čím méně se hodnoty decilů liší, tím více je látka monodisperzní, a tedy vhodnější pro spalování ve fluidní vrstvě. [8]

4.3 Matematický popis distribuce částic

Existuje několik různých způsobů, jak popsat distribuci částic, ale mezi čtyři hlavní druhy distribucí částic se řadí: normální distribuce (Gaussovo rozdělení), log-normální distribuce, Rosin-Rammlerova distribuční funkce a Harrisova korelace. Rosin-Rammlerova distribuční funkce a Harrisova korelace jsou založeny na normální distribuci a log-normální distribuce je odvozena z normální distribuce pomocí logaritmu. Náhodná veličina X má log-normální rozdělení s parametry μ a σ^2 , pokud náhodná veličina Y , $Y = \ln(X)$, má normální rozdělení $N(\mu, \sigma^2)$. [10]

U všech zmíněných metod se pro určení koeficientů aproximace využívá metody nejmenších čtverců. Metoda nejmenších čtverců spočívá v minimalizaci součtu čtverců odchylek mezi měřenými a aproximovanými hodnotami. Determinační index R^2 vyjadřuje, jak moc se liší skutečné hodnoty od hodnot aproximovaných. [11]

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma[R(x)_{\text{naměřeno}} - R(x)_{\text{teoretické}}]^2}{\Sigma[R(x)_{\text{naměřeno}} - R(x)_{\text{střední}}]^2} \quad (6)$$

4.3.1 Normální distribuce

Normální distribuce, též nazývaná Gaussovo rozdělení, je symetrická křivka ve tvaru zvonu. Je charakterizována dvěma parametry μ a σ^2 . Prvním charakteristickým parametrem je střední hodnota μ , ve které hustota normální distribuce nabývá maxima a je rovna mediánu i modu, z čehož plyne, že hustota pravděpodobnosti je symetrická podle osy y :

$$x = \mu \quad (7)$$

Druhým charakteristickým parametrem je rozptyl σ^2 , střední hodnota kvadrátů odchylek od střední hodnoty, který charakterizuje variabilitu náhodné veličiny X . Směrodatná odchylka σ zachycuje odchylku od střední hodnoty. [12], [13]

Hustotu pravděpodobnosti velikosti částic v normální distribuci lze vyjádřit následujícím způsobem [14]:

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \quad (8)$$

Distribuční funkce má tvar:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx \quad (9)$$

Decil D10 normální distribuce:

$$x_{D10} = \mu - 1,28155 \cdot \sigma \quad (10)$$

Decil D90 normální distribuce:

$$x_{D90} = \mu + 1,28155 \cdot \sigma \quad (11)$$

4.3.2 Log-normální distribuce

Log-normální distribuce je tříparametrická funkce s parametry: logaritmus průměru částic (μ), standardní odchylka logaritmu částic (σ) a parametr posunu (θ) [10], [12].

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{\left(\frac{\ln(x-\theta)}{m_i}\right)^2}{2 \cdot \sigma^2}}}{(x-\theta) \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \quad (12)$$

Pokud je parametr umístění $\theta = 0$ a parametr měřítka $m_i = 1$, tak získáme dvouparametrickou standardní log-normální distribuci:

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{(\ln x)^2}{2 \cdot \sigma^2}}}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \quad (13)$$

Distribuční funkce log-normální distribuce má tvar:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^x \frac{e^{-\frac{(\ln x)^2}{2 \cdot \sigma^2}}}{x} dx \quad (14)$$

Střední hodnota log-normální distribuce:

$$\mu_X = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \quad (15)$$

Rozptyl log-normální distribuce:

$$\sigma_X = \sqrt{e^{2 \cdot \mu + \sigma^2} \cdot (e^{\sigma^2} - 1)} \quad (16)$$

Modus log-normální distribuce:

$$x_{mod} = e^{\mu - \sigma^2} \quad (17)$$

Medián log-normální distribuce:

$$x_{med} = e^{\mu} \quad (18)$$

Decil D10 log-normální distribuce:

$$x_{D10} = e^{\mu - 1,28155 \cdot \sigma} \quad (19)$$

Decil D90 log-normální distribuce:

$$x_{D90} = e^{\mu + 1,28155 \cdot \sigma} \quad (20)$$

Log-normální distribuce je výhodná především z hlediska fyzikálního významu, jelikož nabývá pouze kladných hodnot. [15], [16]

4.3.3 Rosin-Rammlerova distribuční funkce

Rosin-Rammlerova distribuční funkce je dalším často používaným modelem pro určení velikostní distribuce částic. Princip této metody spočívá v tom, že rozložení velikostí částic je popsáno kumulativní distribuční funkcí, která udává pravděpodobnost, že částice budou mít velikost menší než určitá hodnota. Jedná se o dvouparametrovou funkci, která je obvykle vyjádřena následujícím způsobem:

$$P(x) = 1 - e^{-b \cdot x^n} \quad (21)$$

kde koeficient b vyjadřuje rozsah velikostí částic zkoumaného vzorku a koeficient n definuje polydisperzitu vzorku. [7]

Rovnice hustoty pravděpodobnosti se dá vyjádřit ve tvaru:

$$f(x) = \frac{dP}{dx} = bnx^{n-1} \cdot e^{-b \cdot x^n} \quad (22)$$

Modus Rosin-Rammlerovy distribuční funkce:

$$\text{Pokud } f'(x) = 0, \text{ pak } x = x_{mod}$$

$$f'(x) = (n - 1) \cdot bnx^{n-2} \cdot e^{-b \cdot x^n} + bnx^{n-1} \cdot e^{-b \cdot x^n} = 0 \quad (23)$$

Pro nalezení mediánu Rosin-Rammlerovy distribuční funkce je třeba řešit rovnici:

$$x_{med} = \left(-\frac{\ln(0,5)}{b} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (24)$$

Decil D10 Rosin-Rammlerovy distribuční funkce:

$$x_{D10} = \left(-\frac{\ln(0,9)}{b} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (25)$$

Decil D90 Rosin-Rammlerovy distribuční funkce:

$$x_{D90} = \left(-\frac{\ln(0,1)}{b} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (26)$$

4.3.4 Harrisova korelace

Harris představil tříparametrovou rovnici, která vyhovuje většině empirických distribucí velikosti částic. Ukázal, že většina běžně používaných dvouparametrových rovnic je ve skutečnosti speciálním případem rovnice [10]:

$$P(x) = \left[1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^s \right]^r \quad (27)$$

kde $P(x)$ je kumulativní procentuální překročení velikosti, x_0 je maximální velikost ve vzorku, s je parametr ovlivňuje sklon grafu v oblasti částic s menším průměrem a r je parametr ovlivňuje tvar grafu v oblasti částic s větším průměrem. [10]

Rovnice hustoty pravděpodobnosti je uvedena ve tvaru:

$$f(x) = \frac{dP}{dx} = -\frac{r \cdot s \cdot \left(\frac{x}{x_0} \right)^s \cdot \left[1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^s \right]^{r-1}}{x} \quad (28)$$

Modus Harrisovy korelace:

Pokud $f'(x) = 0$, pak $x = x_{mod}$

$$f'(x) = \frac{(r-s) \cdot r \cdot s^2 \cdot \left(\frac{x}{x_0} \right)^{2s-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^s \right]^{r-2}}{x \cdot x_0} - \frac{r \cdot s^2 \cdot \left(\frac{x}{x_0} \right)^{s-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^s \right]^{r-1}}{x \cdot x_0} + \frac{r \cdot s \cdot \left(\frac{x}{x_0} \right)^s \cdot \left[1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^s \right]^{r-1}}{x^2} \quad (29)$$

Medián Harrisovy korelace:

$$x_{med} = -x_0 \cdot \sqrt[r]{\sqrt[0,5]{0,5} - 1} \quad (30)$$

Decil D10 Harrisovy korelace:

$$x_{D10} = -x_0 \cdot \sqrt[r]{\sqrt[0,1]{0,1} - 1} \quad (31)$$

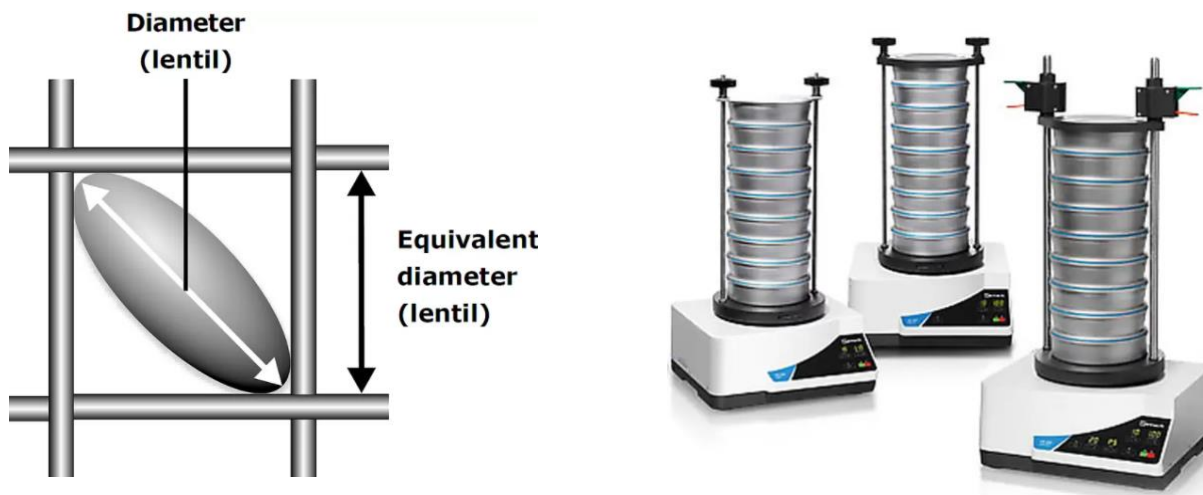
Decil D90 Harrisovy korelace:

$$x_{D90} = -x_0 \cdot \sqrt[r]{\sqrt[0,9]{0,9} - 1} \quad (32)$$

4.4 Způsoby stanovení velikostní distribuce částic

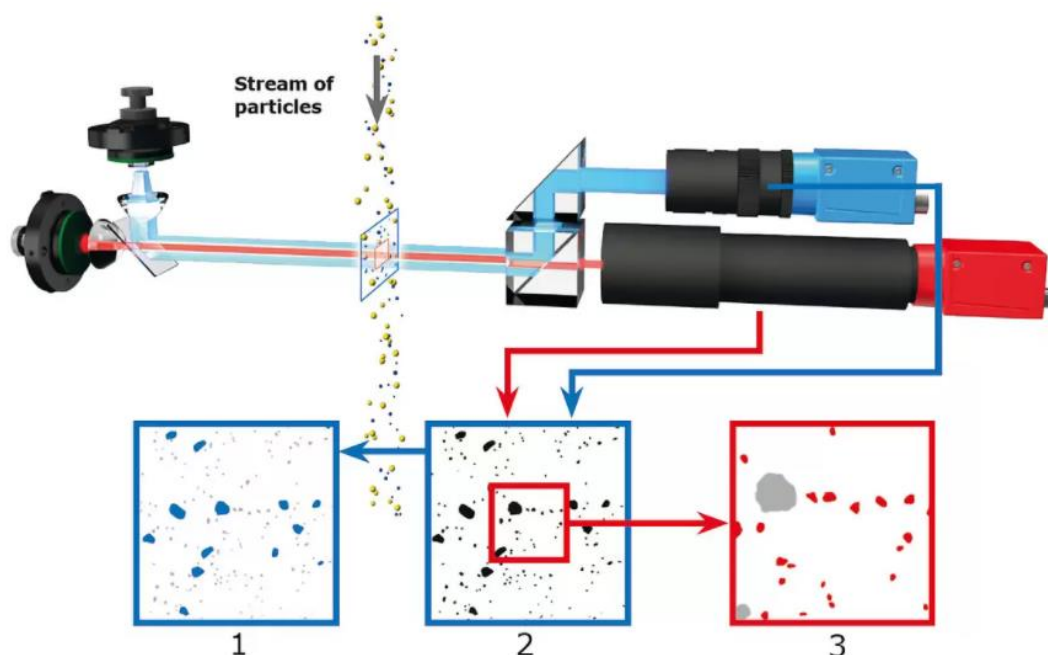
Velikostní distribuce částic lze určit pomocí několika způsobů, včetně sítové analýzy, dynamické obrazové analýzy, dynamického rozptylu světla a statického rozptylu laserového světla.

Sítová analýza (obr. 7) je nejběžněji používanou metodou pro stanovení velikostní distribuce částic. Pro provedení této analýzy jsou potřebná síta s různě velkými otvory, které se naskládají na sebe. Ve spod je síto s nejmenšími otvory a s každým dalším sítem se velikost otvorů zvětšuje. Síta jsou rozvíbrována síťovou třepačkou a částice postupně propadávají otvory sít, dokud nenarazí na síto s menšími otvory, než je jejich velikost. Po rozdělení částic podle velikosti jsou váženy v jednotlivých sítích. Distribuce velikostí se určuje jako hmotnostní procenta částic na jednotlivých sítích. Nevýhodou sítové analýzy je omezený počet sít, kvůli čemuž je možné rozdělit dané částice jen do několika málo velikostních skupin. Tento způsob stanovení velikostní distribuce částic je velice časově náročný. Do celkového času, který je potřebný pro uskutečnění sítové analýzy, se musí započítat počáteční vážení, prosévání (15 až 30 minut), zpětné vážení a čištění sít. Navíc během analýzy dochází k ucpávání otvorů, což může způsobit nepřesnosti a chyby ve výsledcích. [17]



Obr. 7: Síťová analýza [17]

Pomocí dynamické analýzy obrazu se dá analyzovat pohyb částic v reálném čase. Fotoaparáty používané při této analýze jsou schopny zachytit stovky snímků za sekundu. Vyhodnocení částic v řádu milionů trvá pouze několik málo minut. Z obrázků lze snadno určit různé parametry velikosti částic, jako jsou kulovitost, šířka, délka, symetrie a poměr stran. Dynamická analýza obrazu měří částice v náhodných orientacích, kvůli čemuž vznikají systematické rozdíly v získaných výsledcích. Princip této analýzy spočívá v zachycení největších částic hlavní kamerou, přičemž kompletní tok je následně zachycen dvěma kamerami a „zoom“ kamera analyzuje nejmenší částice (obr. 8). [17]



Obr. 8: Dynamická analýza obrazu – princip [17]

Dynamický rozptyl světla se využívá k analýze částic různých rozměrů, přičemž menší částice vykazují rychlejší pohyb než větší částice. Velikostní distribuce částic je stanovena na základě rozptylu světla, které interaguje s těmito částicemi. Dynamický rozptyl světla je vhodný pro analýzu nanočástic, protože u částic větších než 10 μm dochází ke značným nepřesnostem ve výsledcích.

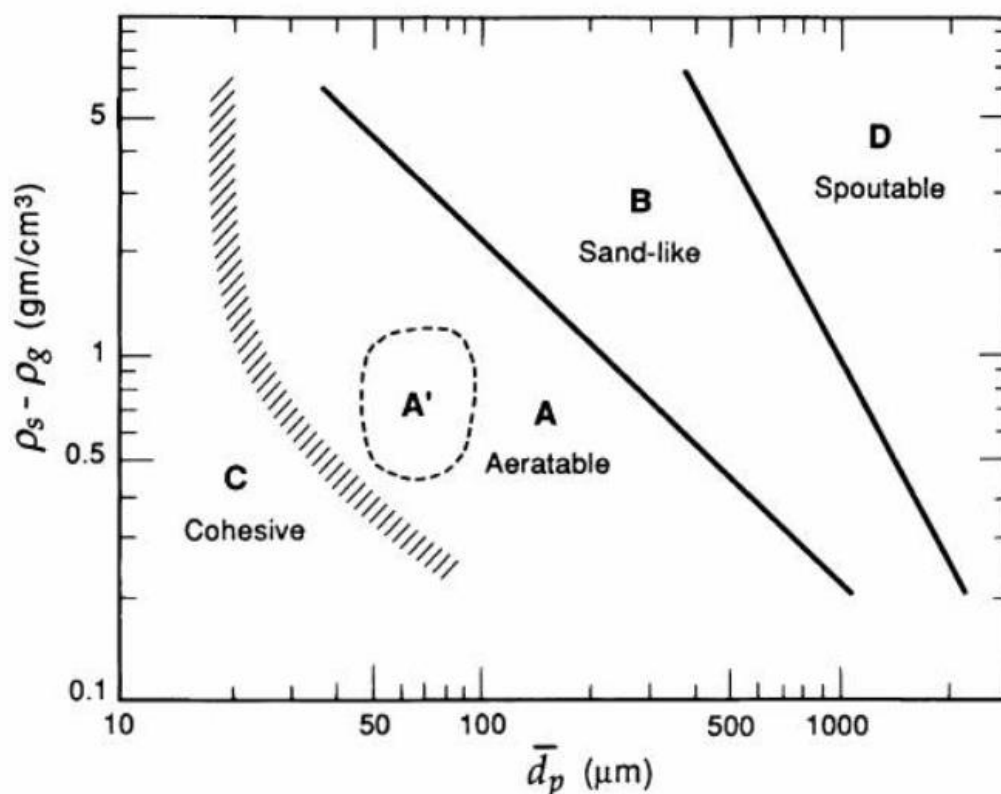
Při analýze statického rozptylu laserového světla se velikostní distribuce částic měří pomocí laserového světla, které je rozptýleno částicemi pod různými úhly (malými částicemi pod velkými úhly, velkými částicemi pod malými úhly). Analýza částic v polydisperzním vzorku je složitá, jelikož se jednotlivé signály rozptylu světla částic navzájem překrývají. Jedná se o nepřímou metodu, při níž se velikostní distribuce částic získává ze superponovaných vzorů rozptýleného světla. Analýza statického rozptylu laserového světla je rychlá, ale má poměrně nízké rozlišení, kvůli kterému mohou být výsledky zkresleny. [17]

4.5 Geldartovo rozdělení částic

Fluidní vrstva je tvořena z částic s rozdílnými vlastnostmi, které silně ovlivňují průběh fluidace. Geldart prováděl studie chování různých materiálů během fluidace a vytvořil klasifikaci těchto materiálů na základě jejich hustoty a velikosti částic. Tuto klasifikaci rozdělil do čtyř základních skupin označovaných jako C, A, B a D.

Z hlediska fluidovatelnosti jsou nejvhodnější ty materiály, které mají minimální rozptyl rozměrů, tvarů i hustoty. V Geldartově klasifikaci spadají do skupin A a B. Obtížně fluidovatelné materiály zahrnují pasty, velice jemné práškové materiály a biomasu ve formě dřevní štěpky. Tento typ biomasy je rozměrově velice nehomogenní, což komplikuje stanovení jejích fluidačních parametrů. V některých případech u těchto materiálů ani nemusí dojít ke fluidaci, jelikož ještě před dosažením prahové rychlosti fluidace mohou všechny částice uletět.

Geldartovo rozdělení částic (obr. 9) je možné zobrazit pomocí diagramu s logaritmickým souřadným systémem, který vymezuje oblasti částic na základě rozdílu hustot částic a fluidačního média a střední velikosti částice. V případě fluidace plynem může být použito zjednodušení, kdy se rozdíl hustot částic a fluidačního média nahradí hustotou částic. [1] [18]



Obr. 9: Geldartovo rozdělení částic

Skupina C

Ve skupině C jsou zahrnuty materiály, které je obecně obtížné fluidovat, protože síly působící mezi částicemi jsou větší než síly generované proudícím fluidačním médiem. Do této skupiny spadají soudržné nebo velmi jemné prášky, jako je například mouka nebo škrob. V ložích s malým průměrem mají částice patřící do skupiny C tendenci stoupat nahoru jako zátky pevných látek. Naopak, v ložích s větším průměrem se vytvářejí kanálky a v důsledku velkých sil soudržnosti se fluidace stává téměř nemožnou. Problém shlukování částic ve skupině C se řeší přidáním příměsí částic ze skupiny B do lože. Tímto způsobem lze zabránit okamžitému unášení velmi malých částic ze skupiny C z lože. Díky příměsí zůstanou tyto částice v loži dostatečně dlouhou dobu, aby mohla probíhat fyzikální nebo chemická přeměna pevných částic. [1] [18]

Skupina A

Skupina A zahrnuje materiály, které snadno fluidují a mají částice s malými až středně velkými rozměry a nízkou hustotou. V této skupině dochází k expanzi husté fáze materiálu v oblasti mezi prahem fluidace a vznikem bublin. Fluidace může probíhat i při nízkých rychlostech přiváděného fluidačního média. Při zvyšujících se rychlostech přiváděného fluidačního média dochází k přechodu lože do bublinkového režimu. Vzniká fluidní vrstva obsahující plynné bubliny, které se slučují a postupně stoupají směrem nahoru v loži. [1] [18]

Skupina B

Skupina B obsahuje materiály, u kterých dochází k fluidaci pevných částic s intenzivním bubláním. Toto bubláni je pozorováno téměř okamžitě po dosažení prahové rychlosti fluidace a vytváří charakteristickou bublající vrstvu. Materiály zařazené do této skupiny mají středně velké částice a střední hustotu (např. sklo, rudy nebo písek). Při dosažení vysokých rychlostí přiváděného fluidačního média v loži se začínají vytvářet malé bublinky. Tyto bublinky se postupně slučují a stoupají směrem nahoru v loži. Rychlost vzestupu těchto bublinek je větší než rychlost intersticiálního plynu, který se nachází v emulzní fázi. Intenzivní bubláni podporuje hrubou cirkulaci pevných látek. [1] [18]

Skupina D

Materiály ve skupině D mají velké a husté částice, jejichž rozměry se pohybují v řádech milimetrů. Při vyšších rychlostech přiváděného fluidačního média vytvářejí tyto materiály stabilní tryskající vrstvu. Kvůli vysoké nehomogenitě husté fáze je dosažení fluidace velice obtížné. Fluidaci snižuje zejména nepředvídatelné chování srážejících se bublinek a nerovnoměrné rozložení fluidačního média v loži. Bublinky se srážejí velmi rychle, ale stoupají pomaleji než fluidační médium, což vede k nerovnováze a výrazně ovlivňuje fluidační chování materiálů z této skupiny. [1] [18]

5 Charakteristické parametry fluidní vrstvy

5.1 Mezerovitost vrstvy

Mezerovitost ε je definována jako relativní mezerový objem, který se vztahuje k celkovému objemu vrstvy, tzn. je rovna podílu volného objemu vrstvy k celkovému objemu fluidní vrstvy. Pro mezerovitost platí rovnice:

$$\varepsilon = \frac{(V_b - V_p)}{V} \quad (33)$$

Mezerovitost je možné vyjádřit i pomocí podílu hustoty pevných částic a sypané hmotnosti.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (34)$$

Hodnota mezerovitosti závisí nejen na velikosti a tvaru částic, ale také na distribuci velikosti částic a jejich povrchu. Částice, které patří podle Geldartova rozdělení do skupiny C, jsou jemné a velmi kohezivní, a tudíž mají velice nízkou mezerovitost. Částice ze skupiny A jsou menších rozměrů a kohezivní, takže mezerovitost je také poměrně nízká. U částic ze skupiny B, běžných částic, které lze dobře fluidovat, se hodnota mezerovitosti pohybuje mezi 0,4 – 0,6. U velkých částic, které spadají do skupiny D, mezerovitost narůstá.

Pomocí mezerovitosti je možné vyjádřit mezerový objem jak nehybné vrstvy, tak i fluidní vrstvy na prahu fluidace a expanzi fluidní vrstvy. Mezerovitost nehybné vrstvy závisí na setřesení vrstvy, kterou částice protékají při rychlosti blížíci se prahové rychlosti fluidace. Objem nehybné vrstvy roste se zvyšující se rychlostí, a proto je objem nehybné vrstvy na prahu fluidace větší než před začátkem fluidace. [19]

5.2 Výška fluidní vrstvy a její expanze

V případě, že horní hranice fluidované vrstvy projevuje značné fluktuace, není možné určit výšku fluidní vrstvy. Lze určit pouze její expanzi. Na nepravidelnost struktury fluidní vrstvy má vliv také nepravidelný tvar částice, nehomogenita procesu či konstrukce roštu. Expanzi rovnoměrné fluidní vrstvy lze matematicky popsat pomocí obecné funkce:

$$Re = K \cdot \varepsilon^z \quad (35)$$

kde K a z označují konstanty, které jsou závislé na velikosti částic a fyzikálních vlastnostech jak samotných částic, tak i fluidizačního média. [5]

5.3 Tlaková ztráta

Hodnota tlakové ztráty Δp ve fluidní vrstvě je určena tíhou částice, sníženou o vztlak na průřez vrstvy S . Tlaková ztráta je dána rovnicí:

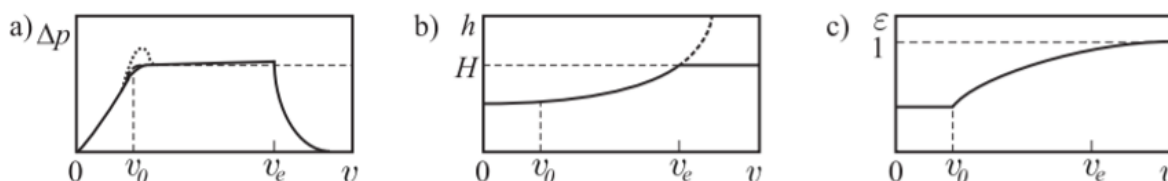
$$\Delta p = \frac{m_p \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{S \cdot \rho_p} \quad (36)$$

Vzorec pro ztrátu tlaku je možné vyjádřit i další způsobem (s použitím mezerovitosti ε , která musí být ≤ 1):

$$\Delta p = \frac{V_b \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{S} = h \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g \quad (37)$$

působení síly je konstantní, a tudíž i ztráta tlaku je stále stejná. Člen $h \cdot (1 - \varepsilon)$ musí zůstat konstantní, což je důvod, proč se s rostoucí výškou fluidní vrstvy h zvětšuje mezerovitost ε .

Na obr. 10 jsou zobrazeny závislosti a) tlakové ztráty Δp , b) výšky fluidní vrstvy h , c) mezerovitosti ε , na mimovrstvové rychlosti tekutiny v .



Obr. 10: Závislost a) tlakové ztráty Δp , b) výšky fluidní vrstvy h , c) mezerovitosti ε , na mimovrstvové rychlosti tekutiny v [19]

Silná čára v grafech představuje průběh závislostí ve skutečném zařízení, zatímco silná přerušovaná čára znázorňuje teoretickou závislost, kde není zahrnut vliv zařízení. Zlom v oblasti prahu fluidace nemusí být ostrý. Jedním z důvodů neostrého zlomu je nehomogenita částic. Dalším důvodem může být převýšení (v grafech označeno tečkovanou čarou), které je způsobeno povrchovou soudržností částic nebo setřesením fluidní vrstvy a je pozorovatelné jen u zvyšování průtoku tekutiny. [19]

5.4 Prahová rychlost fluidace

Prahová rychlost fluidace je rychlost, při které fluidační médium dosahuje mimovrstvové rychlosti a pevný materiál v loži začíná reagovat na proudění fluidačního média – pevný materiál ztrácí svou soudržnost a začíná se pod vlivem fluidačního média pohybovat a míchat. Při dosažení prahu fluidace je síla odporu v rovnováze s tíhou částic zmenšenou o vztlak. V praxi se prahová rychlost fluidace určuje na základě grafu závislosti povrchové rychlosti na poklesu tlaku v loži pro konkrétní palivo. Prahová rychlost fluidace je obvykle vyjádřena jako funkce vlastností částic (např. sféricita, průměr či hustota částic), vlastností plynu (např. hustota a viskozita plynu) a vlastností lože. [1] [20]

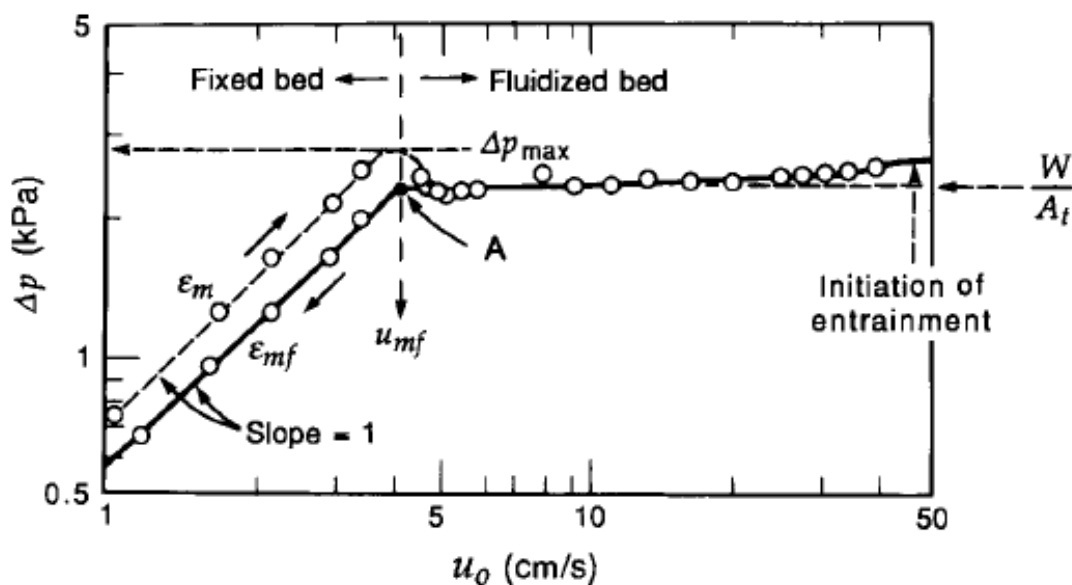
Prahovou rychlost fluidace lze vypočítat na základě upravené Ergunovy rovnice. Ergunova rovnice koreluje tlakovou ztrátu s postupovou rychlostí plynu, který prochází vrstvou nehybných částic. Ergunova rovnice platí pouze pro fixní vrstvu částic.

$$\frac{\Delta p_b}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_b - \rho_g) \cdot \frac{g}{g_c} \quad (38)$$

kde L_{mf} je výška fluidní vrstvy při stavu minimální fluidace, ε_{mf} je experimentálně zjištěná mezerovitost a $(\rho_b - \rho_g) \cdot \frac{g}{g_c}$ vyjadřuje specifickou váhu pevných látek.

Po dosažení prahové rychlosti fluidace začne vrstva částic expandovat a hodnota mezerovitosti postupně roste z hodnoty ε_m na ε_{mf} , která je velice obtížně měřitelná. Proto se za ε_{mf} dosazuje mezerovitost nehybné vrstvy zjištěná na základě materiálových vlastností.

Na obr. 11 je zobrazena závislost tlakové ztráty na mimovrstvové rychlosti fluidačního média.



Obr. 11: Závislost tlakové ztráty na mimovrstvové rychlosti fluidačního média (písek) [1]

Tlakovou ztrátu v pevném loži složeném ze stejně velkých izotropních pevných látek d_p koreloval Ergun pomocí rovnice:

$$\frac{\Delta p_b}{L_{mf}} \cdot g_c = \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} \cdot \frac{\mu \cdot u_0}{(\phi_s \cdot d_p)^2} + 1,75 \cdot \frac{1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_m^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot u_0^2}{\phi_s \cdot d_p} \quad (39)$$

Kombinací rovnic (38) a (39) vznikne rovnice pro výpočet prahové rychlosti fluidace při minimálních podmínkách fluidizace:

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s} \cdot \left(\frac{d_p \cdot u_{mf} \cdot \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s^2} \cdot \left(\frac{d_p \cdot u_{mf} \cdot \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_b - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \quad (40)$$

Rovnici lze zapsat pomocí Reynoldsova čísla a bezrozměrného Archimédova čísla následovně:

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s} \cdot Re_{p,mf}^2 + \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s^2} \cdot Re_{p,mf} = Ar \quad (41)$$

kde jsou Reynoldsovo číslo a bezrozměrné Archimédovo číslo definovány vzorci:

$$Re_{p,mf} = \frac{d_p \cdot u_{mf} \cdot \rho_g}{\mu} \quad (42)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_b - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \quad (43)$$

Pro výpočet prahové rychlosti fluidace velmi malých částic ($Re_{p,mf} < 20$) se rovnice zjednodušuje následovně:

$$u_{mf} = \frac{d_p^2 \cdot (\rho_b - \rho_g) \cdot g}{150\mu} \cdot \frac{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s^2}{1 - \varepsilon_{mf}} \quad (44)$$

U částic větších rozměrů ($Re_{p,mf} > 1000$) se prahová rychlost fluidace vypočítá pomocí vzorce:

$$u_{mf}^2 = \frac{d_p \cdot (\rho_b - \rho_g) \cdot g}{1,75\rho_g} \cdot \varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s \quad (45)$$

V Tab. 1 jsou uvedeny hodnoty mezerovitosti při prahové rychlosti fluidace pro různé materiály.

Typ částice	Průměr částice d_p [mm]						
	0,02	0,05	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40
Ostrý písek, $\phi_s = 0,67$	-	0,60	0,59	0,58	0,54	0,50	0,49
Kulatý písek, $\phi_s = 0,86$	-	0,56	0,52	0,48	0,44	0,42	-
Smíšený kulatý písek	-	-	0,42	0,42	0,41	-	-
Uhlí a skelný prášek	0,72	0,67	0,64	0,62	0,57	0,56	-
Antracitové uhlí, $\phi_s = 0,63$	-	0,62	0,61	0,60	0,56	0,53	0,51
Absorpční uhlí	0,74	0,72	0,71	0,69	-	-	-
Fischerův-Tropschův katalyzátor, $\phi_s = 0,58$	-	-	-	0,58	0,56	0,55	-
Karborundum	-	0,61	0,59	0,56	0,48	-	-

Tab. 1: Hodnoty mezerovitosti při prahové rychlosti fluidace pro různé materiály [1]

Ergunovu rovnici je též možné vyjádřit pomocí koeficientů K_1 a K_2 :

$$K_1 \cdot Re_{p,mf}^2 + K_2 \cdot Re_{p,mf} = Ar \quad (46)$$

kde

$$K_1 = \frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s} \quad (47)$$

$$K_2 = \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s^2} \quad (48)$$

Pomocí těchto koeficientů je možné odhadnout prahovou rychlost fluidace u_{mf} . Wen a Yu uvedli, že hodnoty koeficientů K_1 a K_2 jsou konstantní v rozsahu hodnot $Re = 0,001 \div 000$, nicméně jejich směrodatná odchylka je rovna $\pm 34 \%$, což vede k významné nepřesnosti výpočtu. Hodnoty koeficientů K_1 a K_2 různých materiálů je možné nalézt v odborné literatuře (D. Kunii a Octave. Levenspiel, *Fluidization engineering*). [1]

5.5 Prahová rychlost úletu

Při zvyšování průtoku fluidačního média se mezery mezi částicemi zvětšují a dochází k expanzi fluidní vrstvy. Při překročení mezní hodnoty, která je dána výškou fluidačního zařízení, začnou částice ze zařízení uletovat a nastává práh úletu. Prahová rychlost úletu představuje horní hranici fluidní vrstvy a je jedním ze základních charakteristických parametrů fluidní vrstvy. Prahová rychlost úletu klesá s rostoucí teplotou, což je způsobeno zvýšenou viskozitou plynu při vyšších teplotách. Během expanze plynu se zvýší mimovrstvová rychlost plynu, což vede k rychlejšímu pohybu částic. [1] [5] [18]

Prahovou rychlost úletu je možné vyjádřit za pomoci Haiderova a Levenspielova vzorce:

$$u_t^* = \left[\frac{18}{(d_p)^2} + \frac{2,335 - 1,744 \cdot \phi_s}{(d_p)^{0,5}} \right]^{-1}, \quad 0,5 < \phi_s < 1 \quad (49)$$

Experimentální část

Experimentální část práce je zaměřena na určení velikostní distribuce částic, stanovení prahové rychlosti fluidace a prahové rychlosti úletu 5 vybraných materiálů: 2 keramzitů LWA a 3 písků různých hrubostí a experimentální určení sféricity. K určení velikostní distribuce částic je využita síťová analýza. Sféricita bude zjištěna z experimentálních dat získaných měřením tlakové ztráty vrstvy každého z testovaných materiálů na rychlosti proudění fluidačního média. Bude spočtena prahová rychlost fluidace a prahová rychlost úletu pro charakteristické rozměry daných materiálů a porovnána s experimentálně zjištěnými daty. Výsledky budou podrobně analyzovány a porovnány s očekávanými údaji.

6 Stanovení velikostní distribuce částic

Velikostní distribuci částic neboli granulometrii je možné stanovit několika metodami. Jednou z těchto metod je síťová analýza, pomocí které se určí distribuční křivka propadu $P(x)$ a hustota pravděpodobnosti $y(x)$ 5 různých materiálů. K určení distribuční křivky propadu a hustoty pravděpodobnosti se využije normální distribuce, log-normální distribuce, Rosin-Rammlerova distribuční funkce a Harrisova korelace, které budou mezi sebou porovnány. Dále se pak výpočtem určí charakteristické hodnoty, mezi něž patří střední průměr, modus, medián, decily D10 a D90.

6.1 Použité materiály

Velikostní distribuce částic byla stanovena u 5 různých materiálů: písek 01-06, písek 03-10, písek 05-10, LWA 0-2 a LWA 1/4. Jejich charakteristika je uvedena v Tab. 2.

Materiál	Hustota [kg/m ³]	Sypná hmotnost [kg/m ³]
písek 01-06	2 650	1 520
písek 03-30	2 650	1 500
písek 05-10	2 650	1 500
LWA 0-2	1 000	575
LWA 1/4	925	500

Tab. 2: Charakteristika materiálů použitých v experimentální části práce [21]

Hustoty použitých materiálů byly nalezeny v technický listech. Hodnoty sypné hmotnosti byly experimentálně zjištěny v laboratoři. Materiály jsou zobrazeny na obr. 12-16.



Obr. 12: Písek 01-06



Obr. 13: Písek 03-30



Obr. 15: Písek 05-10



Obr. 14: LWA 0-2



Obr. 16: LWA 1/4

6.2 Popis měřících přístrojů

Pro separaci různých velikostí zrn byla použita síťová třepačka. Síťová třepačka je vybavena vibračním mechanismem, který generuje vibrace přenášené na síta umístěná ve speciální držákové konstrukci. Tyto vibrace umožňují částicím procházet otvory sít a separovat je podle velikosti zrn. Je vybavena digitálním ovládacím panelem, který umožňuje nastavení doby střásání a intenzitu vibrací. Pro různé typy materiálů se používají síta s různými velikostmi otvorů. Pro písky byla použita síta s otvory o velikosti: 0,1; 0,2; 0,315; 0,5; 0,6; 0,85; 1; 1,4; 2 mm, pro LWA 0-2 síta s otvory o rozměrech 0,25; 0,5; 0,85; 1; 1,18; 1,7; 2; 2,8; 4 mm a pro LWA 1/4 síta s otvory 0,5; 1; 1,4; 2; 2,36; 2,8; 3,35; 4 mm. Síta jsou vyráběna z odolných kovových materiálů, aby byla zajištěna jejich pevnost a odolnost při manipulaci a separaci materiálu. Pod nejspodnější síto byla umístěna miska, do které propadly nejjemnější částice. K určení hmotnosti materiálu na jednotlivých sítích se použila analytická váha, která umožnila přesné vážení malých hmotností s vysokou přesností na úrovni setin gramu.

6.3 Metodika měření

Síta s různě velkými otvory se zvaží, naskládají se na sebe od síta s nejmenšími otvory, které je nejnižší, až po síto s největšími otvory, přičemž velikost otvorů se postupně zvětšuje. Výběr sít, respektive velikosti otvorů, závisí na vybraném materiálu – pro jemnější materiály se používají síta s menšími otvory a pro hrubší materiály síta s většími otvory. Pod síta se dá miska, která zachycuje nejjemnější částičky, které propadnou všemi sítí. Odváží se 200 g vybraného materiálu a umístí se na nejhornější síto, které se uzavře víkem. Po dobu 20 minut síťová třepačka rozvibrovává síta s materiálem a částice postupně propadají otvory sít, dokud se nedostanou do síta, jehož otvory jsou menší než velikost částic. Po skončení střásání se váží propad m_0 a zbytky na sítích m_1, m_2 až m_n . Měření se opakuje dvakrát.

7 Stanovení rychlosti fluidace 5 různých materiálů

Působením fluidačního média ve směru zdola nahoru se vytvoří suspenze částic vznášejících se v uzavřeném prostoru v proudu fluidačního média. Při dosažení tzv. prahové rychlosti nastává fluidace. Ve chvíli, kdy je síla odporu v rovnováze s tíhou částic zmenšenou o vztlak, nastává práh fluidace.

7.1 Popis měřících přístrojů

V reaktoru s fluidní vrstvou o rozměrech 15 x 22,5 cm jsou použity následující prvky vybavení: ventilátor pro generování proudění vzduchu, frekvenční měnič Teco umožňující regulaci otáček ventilátoru, plováчковý průtokoměr s rozsahem měření od 20 do 160 m³ za hodinu a manometr se sklopnou trubicí k měření tlakové ztráty fluidní vrstvy a distributoru. Na dně reaktoru je umístěn distributor z děrovaného plechu, který zvyšuje kontakt mezi fluidačním médiem a pevnými částicemi. Reaktor, který byl využit při experimentu je zobrazen na obr. 17.



Obr. 17: Reaktor s fluidní vrstvou

7.2 Metodika měření

Experimentálně se stanoví prahová rychlost fluidace a prahová rychlost úletu 5 materiálů (viz. Tab. 2) a výsledné hodnoty se porovnají s teoretickými výpočty. Nejprve je nutné zjistit tlakovou ztrátu distributoru a dále pak závislost tlakové ztráty fluidní vrstvy na rychlosti proudění u 5 daných materiálů.

Pro experimentální určení prahové rychlosti fluidace je nutno umístit materiál do modelu reaktoru s fluidní vrstvou, do kterého je přiváděno fluidační médium, vzduch. Postupným zvyšováním rychlosti proudění vzduchu je možné pozorovat změny v chování materiálu. Ve chvíli, kdy se síly působící na materiál vyrovnají, dosáhne materiál stavu fluidace. Pro určení

prahové rychlosti fluidace je důležité zjistit závislost tlakové ztráty na rychlosti proudění. Tato závislost se rozděluje do dvou oblastí: oblast s rostoucí tlakovou ztrátou a oblast s konstantní tlakovou ztrátou. Hledaná prahová rychlost fluidace je identifikována na logaritmickém grafu závislosti tlakové ztráty na rychlosti proudění. Díky využití logaritmických souřadnic se část odpovídající nehybné vrstvě napřímí a poté lze prahovou rychlost fluidace určit z průsečíku dvou přímk. Od celkové tlakové ztráty je nutno odečíst tlakovou ztrátu distributoru, přes který je tlaková ztráta měřena.

Pro výpočet prahové rychlosti fluidace je nutné znát hodnoty mezerovitosti na prahu fluidace a sféricity. Pro zjištění mezerovitosti se využije dat z *Tab. 2* a rovnice (36). Sypná hmotnost je určena z celkové hmotnosti a objemu, který zaujímají částice v nádobě o rozměrech 0,15 x 0,225 metrů. Do této nádoby jsou vloženy 3 kg daného materiálu a poté jsou odečteny výšky jednotlivých materiálů. Sféricita se vyjádří z Egunovy rovnice (41).

$$\phi_s = \frac{1,75 \cdot \frac{1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_m^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot u_0^2}{d_p} + \sqrt{\left(1,75 \cdot \frac{1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_m^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot u_0^2}{d_p}\right)^2 + 600 \cdot \frac{\Delta p_b}{L_{mf}} \cdot g_c \cdot \frac{(1 - \varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3}}}{2 \cdot \frac{\Delta p_b}{L_{mf}} \cdot g_c} \quad (50)$$

8 Vyhodnocení středního průměru částic a mediánu z experimentálně zjištěných dat

8.1 Střední průměr

Experimentálně zjištěné střední průměry částic testovaných materiálů se nachází v *Tab. 3*. Při výpočtu středních průměrů částic se vycházelo z rovnice (5).

Materiál	Střední průměr d_p [mm]
písek 01-06	0,442
písek 03-30	0,654
písek 05-10	0,746
LWA 0-2	1,615
LWA 1/4	3,089

Tab. 3: Střední průměr částic testovaných materiálů

8.2 Medián

Experimentálně určený medián velikosti částic je hodnota, která odpovídá bodu, kde kumulativní podíl hmotnosti dosahuje 50 % z celkové hmotnosti vzorku. V *Tab. 4* jsou uvedeny mediány pro jednotlivé materiály.

Materiál	Medián x_{med} [mm]
písek 01-06	0,5
písek 03-30	0,6
písek 05-10	0,85
LWA 0-2	1,7
LWA 1/4	3,35

Tab. 4: Medián testovaných materiálů

9 Naměřené a vypočtené hodnoty - velikostní distribuce částic

V práci je prezentován pouze výpočet a grafické zobrazení hustoty pravděpodobnosti. Nejprve byly pomocí rovnice (4) určeny body hustoty pravděpodobnosti z naměřených hodnot a poté hustoty pravděpodobnosti 4 výše uvedenými metodami. Při určování hustot pravděpodobností se u normální distribuce vycházelo z rovnice (8), u log-normální distribuce z rovnice (13), u Rosin-Rammlerovy distribuční funkce z rovnice (22) a z rovnice (28) u Harrisovy korelace. Hodnoty charakteristických hodnot byly určeny pomocí rovnic ze sekce *4.3.1 Normální distribuce až 4.3.4 Harrisova korelace* nacházející se v teoretické části diplomové práce.¹

¹ Číselné hodnoty hustot pravděpodobností se z důvodu velkého množství dat nacházejí v příloze.

9.1 Parametry a koeficienty

9.1.1 Parametry normální distribuce

Normální distribuce je charakterizována dvěma konstantami: střední hodnota μ a rozptyl σ^2 . Střední hodnota je rovna modu a mediánu. Rozptyl udává, jak moc jsou hodnoty ve výběru rozptýleny od střední hodnoty.

Zjištěné parametry normální distribuce jsou uvedeny v *Tab. 5*.

Materiál	μ	σ^2
písek 01-06	0,507	0,126
písek 03-30	0,680	0,247
písek 05-10	0,844	0,155
LWA 0-2	1,748	0,426
LWA 1/4	3,215	0,864

Tab. 5: Zjištěné parametry pro všechny materiály

9.1.2 Parametry log-normální distribuce

Log-normální distribuce je definována pomocí střední hodnoty velikosti částic (μ), která je log-normálně distribuovaná a standardní odchylce logaritmu částic (σ), který udává rozptyl logaritmu náhodné veličiny.

Zjištěné parametry log-normální distribuce jsou uvedeny v *Tab. 6*.

Materiál	μ	σ
písek 01-06	0,515	1,251
písek 03-30	0,703	1,462
písek 05-10	0,824	1,218
LWA 0-2	1,829	1,246
LWA 1/4	3,219	1,247

Tab. 6: Zjištěné parametry pro všechny materiály

9.1.3 Koeficienty Rosin-Rammlerovy distribuční funkce

Koeficienty Rosin-Rammlerovy distribuční funkce popisující rozsah velikostí částic a jejich polydisperzitu.

Zjištěné koeficienty b a n pro R^2 maximální jsou uvedeny v *Tab. 7*.

Materiál	b	n
písek 01-06	22,88	4,98
písek 03-30	2,15	3,20
písek 05-10	3,47	6,95
LWA 0-2	0,05	5,37
LWA 1/4	0,0013	5,50

Tab. 7: Zjištěné koeficienty pro všechny materiály

9.1.4 Koeficienty Harrisovy korelace

Zjištěné koeficienty Harrisovy korelace x_0 , r a s jsou uvedeny v *Tab. 8*.

Materiál	x_0	r	s
písek 01-06	1,024	18,506	4,603
písek 03-30	0,791	4,369	2,952
písek 05-10	0,996	2,267	6,226
LWA 0-2	0,274	33,068	4,987
LWA 1/4	0,194	9,846	5,265

Tab. 8: Zjištěné koeficienty pro všechny materiály

Podmínkami pro výpočet bylo, že hodnota pod odmocninou a koeficienty x_0 , r a s musely být nezáporné.

9.2 Velikostní distribuce částic

V Grafech 1-9 jsou zobrazeny hustoty pravděpodobnosti pro materiály z *Tab.2*, přičemž každý graf reprezentuje jeden materiál. Pro každý materiál jsou použity následující metody určení: z naměřených hodnot, normální distribuce, log-normální distribuce, Rosin-Rammlerovy distribuční funkce a Harrisovy korelace.

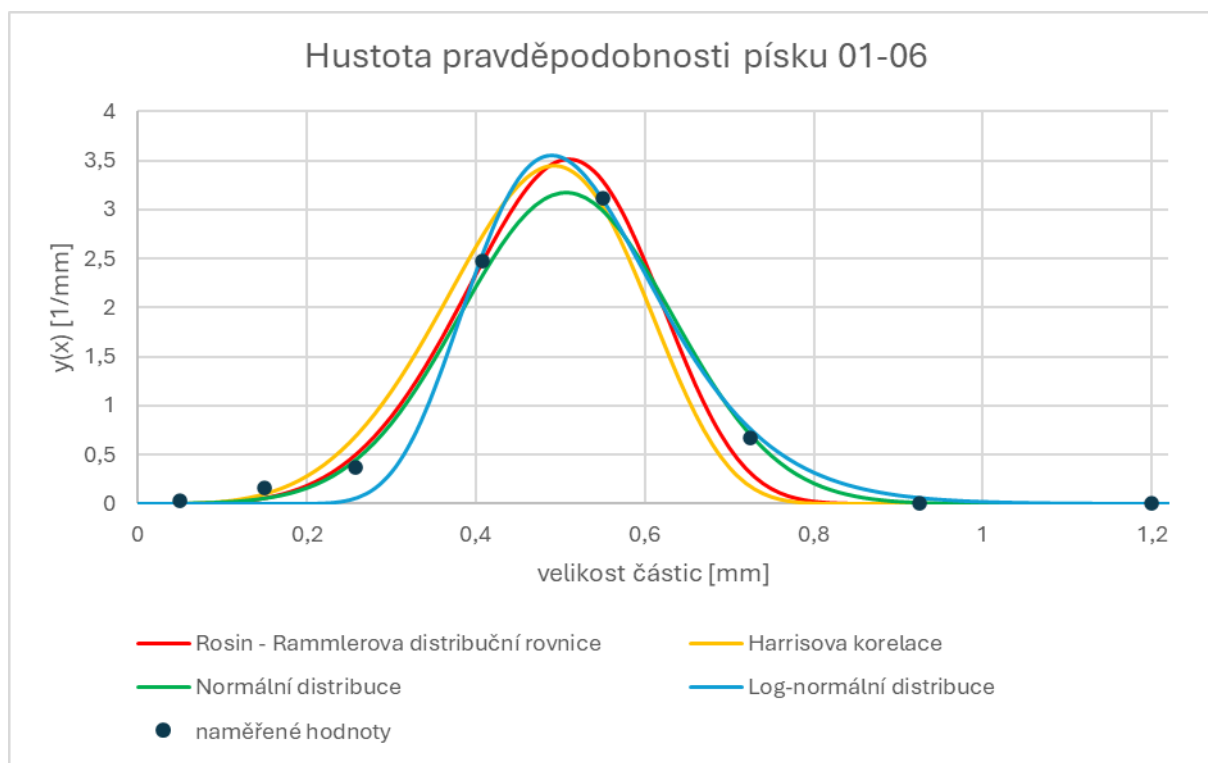
Pomocí bodů je zobrazena hustota pravděpodobnosti z naměřených hodnot a spojitě křivky znázorňují matematický popis distribuční funkce, jejíž charakteristické parametry byly zjištěny z experimentálně naměřených dat jednou ze čtyř zmiňovaných metod.

Při určování jednotlivých bodů se vychází z předpokladu, že velikost částice x se bere jako průměrná hodnota rozměru oka mezi 2 sítý, například x pro výpočet hustoty pravděpodobnosti mezi sítý o rozměrech ok 0,1 mm a 0,2 mm (částice dopadají na síto s rozměrem ok 0,1 mm) se rovná hodnotě 0,15 mm.

Pro minimalizaci vzdálenosti naměřených hodnot od hodnot na aproximující křivce, respektive minimalizaci součtu čtverců odchylek mezi těmito hodnotami, se využívá metoda nejmenších čtverců. V této metodě se využívá Newtonova metoda k iterativnímu nalezení vektoru parametrů, který minimalizuje součet čtverců rozdílů mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami. Pro posouzení kvality fitu se používá determinační index, který je definován rovnicí (6).

9.2.1 Velikostní distribuce částic materiálu písek 01-06

Graf 1 znázorňuje hustoty pravděpodobnosti materiálu písek 01-06. Charakteristické hodnoty vypočtené všemi 4 metodami jsou uvedeny v Tab. 9.



Graf 1: Hustota pravděpodobnosti písku 01-06

Písek 01-06	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
R^2	0,987	0,975	0,999	0,925
x_{mod}	0,507	0,540	0,510	0,500
x_{med}	0,507	0,515	0,496	0,500
x_{D10}	0,345	0,386	0,340	0,333
x_{D90}	0,668	0,686	0,631	0,642

Tab. 9: Souhrnná tabulka pro písek 01-06

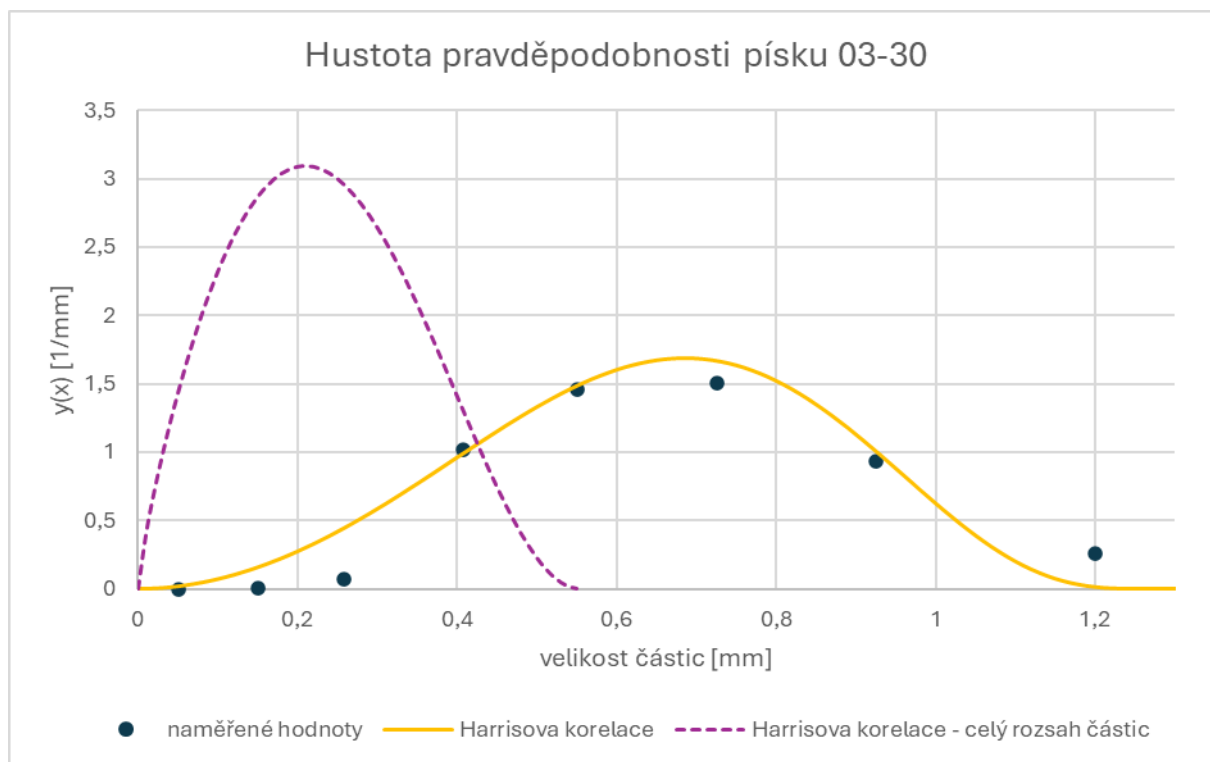
Hodnota determinačního indexu se u všech metod blíží k 1, což znamená, že součet čtverců odchylek mezi měřeními a aproximovanými hodnotami je téměř nulový. Všechny čtyři použité metody s vysokou mírou shody určily hodnoty modu, mediánu, decilu D10 a D90. Referenční hodnoty modu a decilů D10 a D90 se uvažují ty, které jsou získané metodou s nejvyšším determinačním indexem – Rosin-Rammlerova distribuční funkce. Referenční

hodnotou mediánu je medián experimentálně určený $x_{med} = 0,5$ mm. Hodnoty modu mají maximální rozdíl od referenční hodnoty 6 % a decilu D90 8 %. U decilu D10 vychází velice malý procentuální rozdíl u normální distribuce a Harrisovy korelace (2 %). U log-normální distribuce je rozdíl větší než 13 %. Hodnota mediánu zjištěná pomocí Harrisovy korelace je stejná jako hodnota experimentálně určeného mediánu. U ostatních metod je rozdíl hodnoty mediánu od referenční hodnoty mediánu velice malý (rozmezí 1 až 3 %).

9.2.2 Velikostní distribuce částic materiálu písek 03-30

Dalším analyzovaným materiálem je písek 03-30. Při snaze proložení naměřených dat Harrisovou korelací se narazilo na problém. Při analýze materiálu písek 03-30 byla použita síta s oky o rozměrech 0,1 mm až 2 mm. Volba sít byla provedena s ohledem na velikost zrn tohoto materiálu. Předpokládalo se, že použití sít s většími oky by nemělo výrazný vliv na výsledky měření. Snahou je přiblížit se koeficientem x_0 , který představuje maximální velikost částic, k hodnotě 2 mm. V tomto případě x_0 vychází 1,8011 mm. Dále je nutné zohlednit i další koeficienty Harrisovy korelace, r a s , které ovlivňují tvar a šířku hustoty pravděpodobnosti. Při snaze proložit naměřená data dosazením hodnot vhodných koeficientů r a s do rovnice pro výpočet hustoty pravděpodobnosti se dostáváme do komplexních čísel, která nemají při analýze dat fyzikální význam. Z tohoto důvodu byla provedena analýza pouze části dat, u kterých křivka určená pomocí Harrisovy korelace dokázala fitovat naměřená data. U tohoto materiálu byla mezní hodnotou x_0 0,7906 mm a hodnoty r a s byly též pozměněny.

Při analýze celého rozsahu dat se do hodnoty $x = 0,55$ mm, velikost částic do 0,55 mm, nacházíme v reálných číslech a hustota pravděpodobnosti y je rovna 0,0018 1/mm. Od hodnoty $x = 0,56$ mm vychází hustoty pravděpodobnosti v komplexních číslech (viz. Graf 2, Tab. 10).

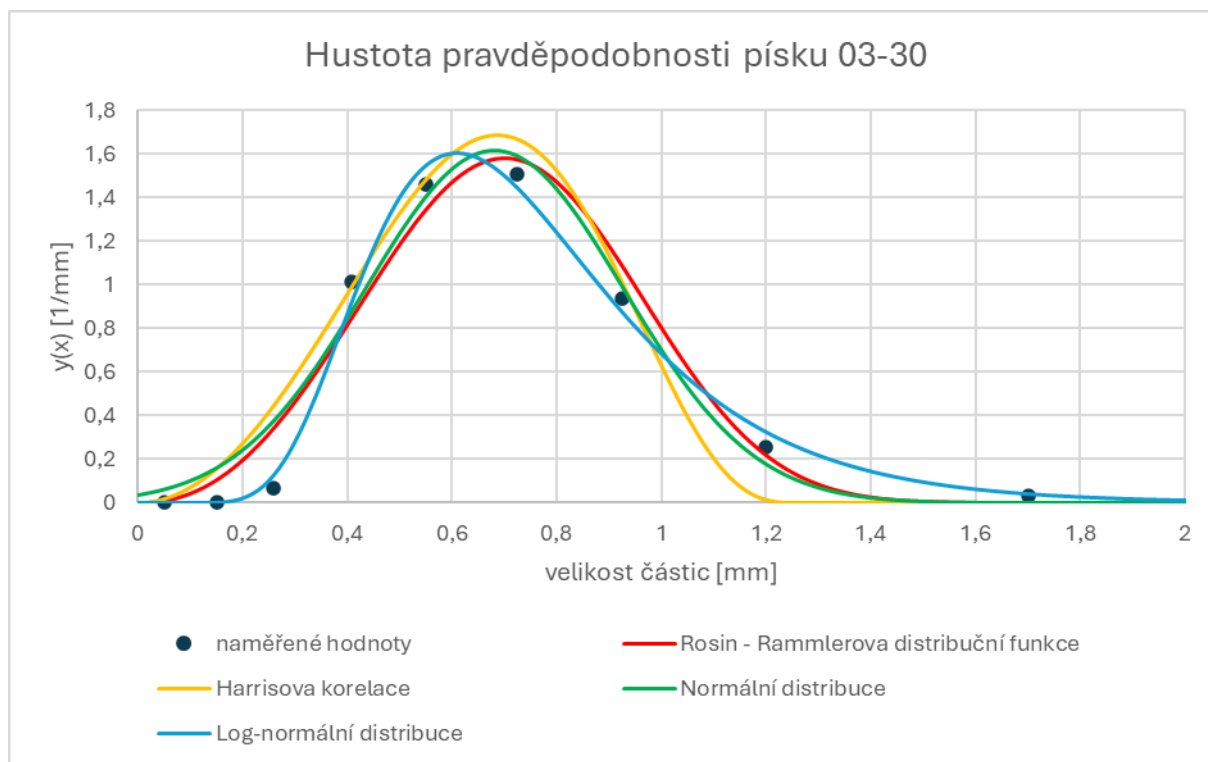


Graf 2: Hustota pravděpodobnosti písku 03-30 - Harrisova korelace

Písek 03-30	Harrisova korelace (celý rozsah částic)	Harrisova korelace
R^2	0,198	0,907
x_{mod}	0,210	0,690
x_{med}	0,736	0,413
x_{D10}	0,271	0,223
x_{D90}	1,257	0,584

Tab. 10: Výsledky získané pomocí Harrisovy korelace (písek 03-30)

Graf 3 zobrazuje hustoty pravděpodobnosti pro materiál písek 03-30. V tomto grafu je zobrazena hustota pravděpodobnosti pomocí Harrisovy korelace pro část dat, která fitují naměřené hodnoty. Charakteristické hodnoty vypočtené všemi 4 metodami jsou uvedeny v Tab. 11.



Graf 3: Hustota pravděpodobnosti písku 03-30

Písek 03-30	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
R^2	0,930	0,995	0,998	0,907
x_{mod}	0,680	0,610	0,700	0,690
x_{med}	0,680	0,703	0,702	0,413
x_{D10}	0,364	0,432	0,390	0,223
x_{D90}	0,997	1,143	1,022	0,584

Tab. 11: Souhrnná tabulka pro písek 03-30

Nejvyšší determinační index byl u materiálu písek 03-30 dosažen Rosin-Rammlerovou distribuční křivkou, a tudíž budou hodnoty zjištěné touto metodou brány jako referenční hodnoty pro vyhodnocení míry shodnosti mezi všemi získanými charakteristickými hodnotami tohoto materiálu, kromě mediánu, u kterého bude referenční hodnotou medián experimentálně zjištěný. Druhý nevyšší determinační index vyšel u log-normální distribuce. U normální distribuce vyšel determinační index mírně nižší, ale stále nad 0,9, což naznačuje dobrou shodu s naměřenými daty.

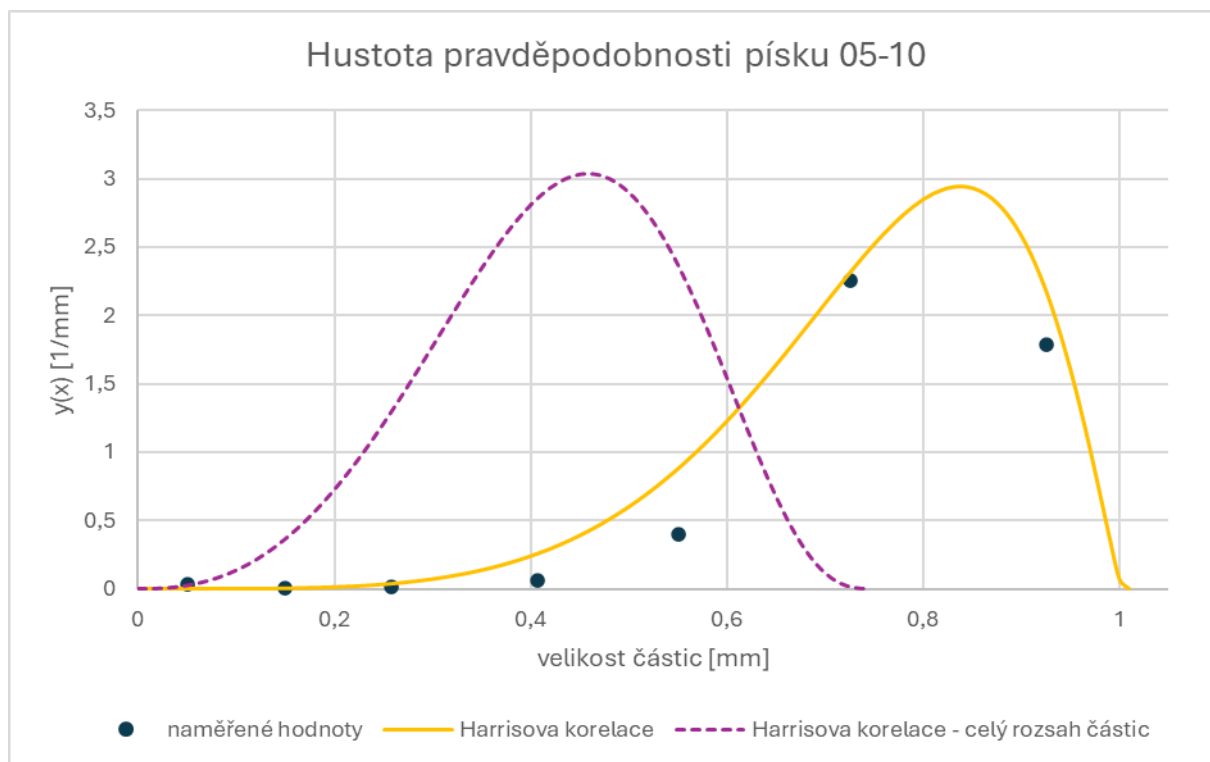
Hodnoty modu určené normální distribucí a Harrisovou korelací se od referenční hodnoty liší necelými 3 %. Hodnota zjištěná log-normální distribucí se liší o více jak 12 %. Hodnota mediánu zjištěná normální distribucí, log-normální distribucí i Rosin-Rammlerovou distribuční funkcí se od referenční hodnoty, $x_{med} = 0,6$ mm, odlišuje o více jak 13 %. Medián u Harrisovy korelace je o více jak 30 % větší než referenční hodnota. U decilů D10 a D90 se u normální distribuce procentuální rozdíl pohybuje mezi 3 a 7 %, u log-normální distribuce kolem 11 % a u Harrisovy korelace se jedná o procentuální rozdíl téměř 43 %. Vysoký procentuální rozdíl hodnot decilů u Harrisovy korelace od referenčních hodnot je dán tím, že byla vyhodnocena pouze data fitující naměřené hodnoty.

9.2.3 Velikostní distribuce částic materiálu písek 05-10

U materiálu písek 05-10 u Harrisovy korelace nastává stejný problém jako u materiálu písek 03-30. Použitím maximální hodnoty x_0 , která u tohoto materiálu vychází 1,3346 mm, se při výpočtu hustoty pravděpodobnosti dostáváme do komplexních čísel. Stejně jako u předchozího materiálu, tak i u tohoto je provedena analýza části dat. Mezní hodnotou x_0 je v tomto případě 0,9965 mm.

Pro celý rozsah dat je možné získat kladné hodnoty hustoty pravděpodobnosti do hodnoty $x = 0,74$ mm. Pro větší hodnoty x vycházejí hustoty pravděpodobnosti v komplexních číslech.

Porovnání hustot pravděpodobností a charakteristických hodnot získaných Harrisovou korelací s využitím celého rozsahu dat a části dat, která fitují naměřené hodnoty, je zobrazeno v Grafu 4, *Tab. 12*).

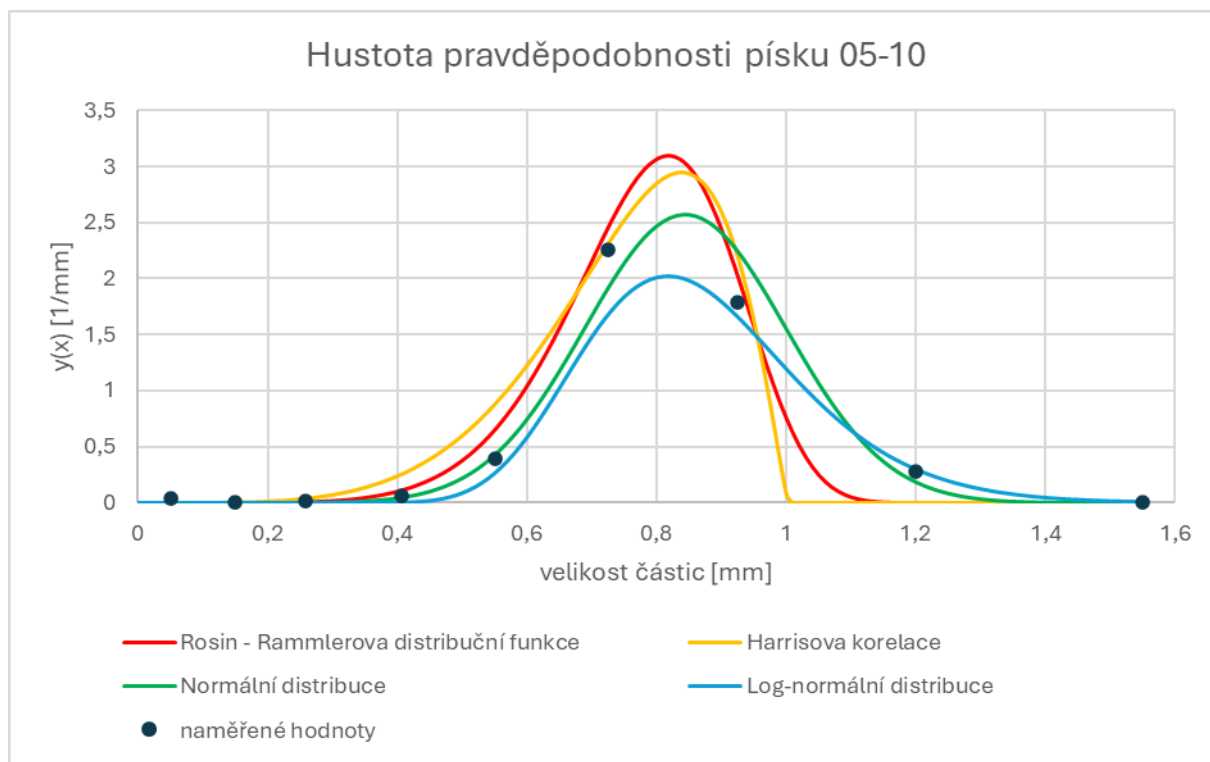


Graf 4: Hustota pravděpodobnosti písku 05-10 - Harrisova korelace

Písek 05-10	Harrisova korelace (celý rozsah částic)	Harrisova korelace
R^2	0,265	0,952
x_{mod}	0,450	0,820
x_{med}	0,824	0,822
x_{D10}	0,458	0,551
x_{D90}	1,040	0,914

Tab. 12: Výsledky získané pomocí Harrisovy korelace (písek 05-10)

Hustoty pravděpodobnosti materiálu písek 05-10 jsou zobrazeny v Grafu 5. Stejně jako u materiálu písek 03-30, tak i u tohoto materiálu je porovnávána Harrisova korelace části dat s ostatními metodami. Charakteristické hodnoty pro tento materiál jsou uvedeny v Tab. 13.



Graf 5: Hustota pravděpodobnosti písku 05-10

Písek 05-10	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
R^2	0,883	0,998	0,960	0,952
x_{mod}	0,844	0,800	0,840	0,820
x_{med}	0,844	0,890	0,816	0,822
x_{D10}	0,645	0,640	0,611	0,551
x_{D90}	1,042	1,060	0,982	0,914

Tab. 13: Souhrnná tabulka pro písek 05-10

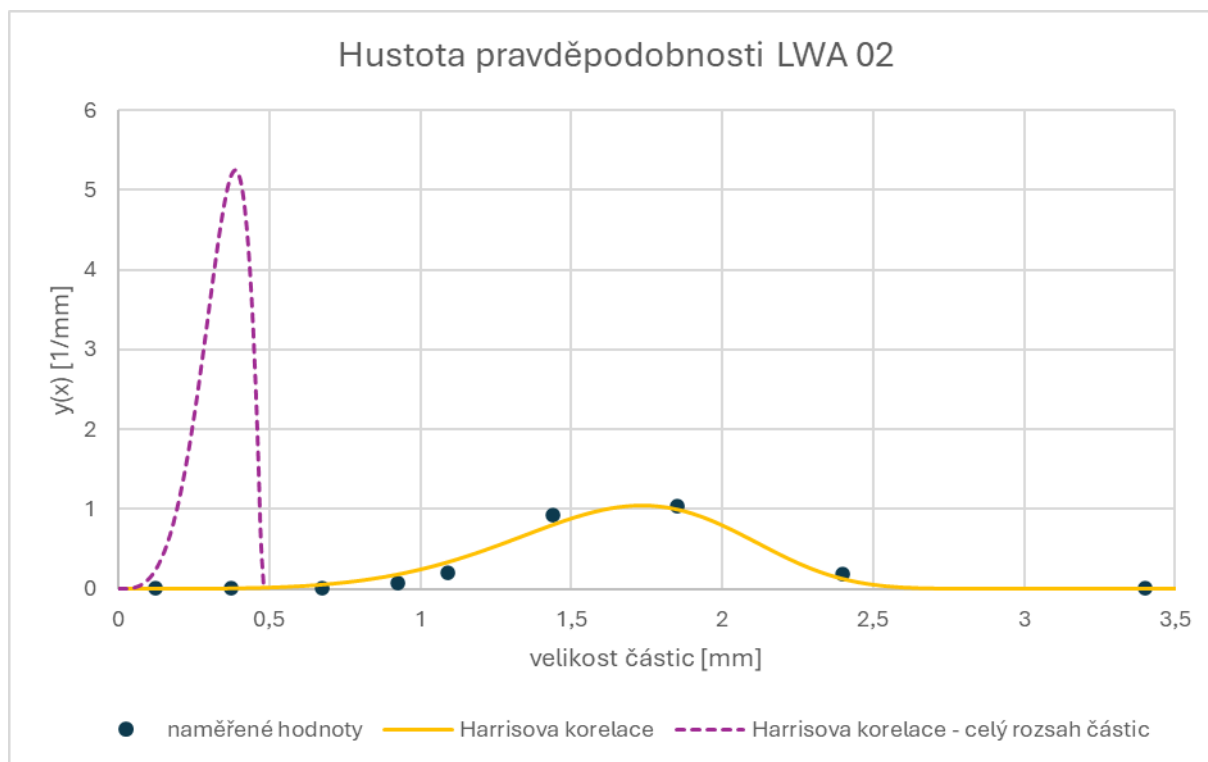
Analýza distribučních funkcí pro materiál písek 05-10 ukázala, že log-normální distribuce vykazuje nejvyšší determinační index, čímž se stává nejvhodnějším modelem pro charakterizaci distribuce velikosti částic tohoto materiálu. Následuje Rosin-Rammlerova distribuční funkce a normální distribuce, které dosahují nižšího determinačního indexu. Pomocí Harrisovy korelace není možné zanalyzovat celou datovou sadu, a tudíž se jedná o nejméně vhodnou metodou pro velikostní distribuci částic materiálu písek 05-10.

Pro vyhodnocení míry shodnosti mezi získanými charakteristickými hodnotami se jako referenční hodnoty uvažující charakteristické hodnoty získány log-normální distribucí. Pouze hodnota mediánu bude porovnávána s hodnotou experimentálně zjištěnou. V případě modu je procentuální rozdíl velice nízký (méně než 6 %), což naznačuje velmi dobrou shodu mezi mody získanými různými metodami. U mediánu je referenční hodnotou $x_{med} = 0,85$ mm, která se od hodnoty mediánu zjištěného pomocí normální distribuce liší o méně než 1 % a od ostatních hodnot o necelá 4 %. U decilů D10 a D90 je vysoká shoda s normální distribucí (méně než 2 %), u Rosin-Rammlerovy distribuční funkce je procentuální rozdíl větší (téměř 8 %) a u Harrisovy korelace je procentuální rozdíl velký (téměř 14 %). Charakteristické hodnoty vykazují vysokou míru shody, až na decily D10 a D90 u Harrisovy korelace. Rozdílné hodnoty decilů jsou dány tím, že byla analyzována jen část dat.

9.2.4 Velikostní distribuce částic materiálu LWA 0-2

U materiálu LWA 0-2 lze pomocí Harrisovy korelace analyzovat data, u kterých je koeficient x_0 roven 0,274 mm. Dle charakteristiky tohoto materiálu by vhodnou hodnotou x_0 byla hodnota mezi 2,4 až 2,8 mm, nicméně při této hodnotě by bylo možné analyzovat pouze data do hodnoty $x = 0,47$ mm. Jedná se o poslední hodnotu x , u které vychází kladná hodnota.

V Grafu 6 je zobrazena analýza částic pomocí Harrisovy korelace pro část dat, která fitují naměřené hodnoty a pro celý rozsah dat. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v *Tab. 14*.

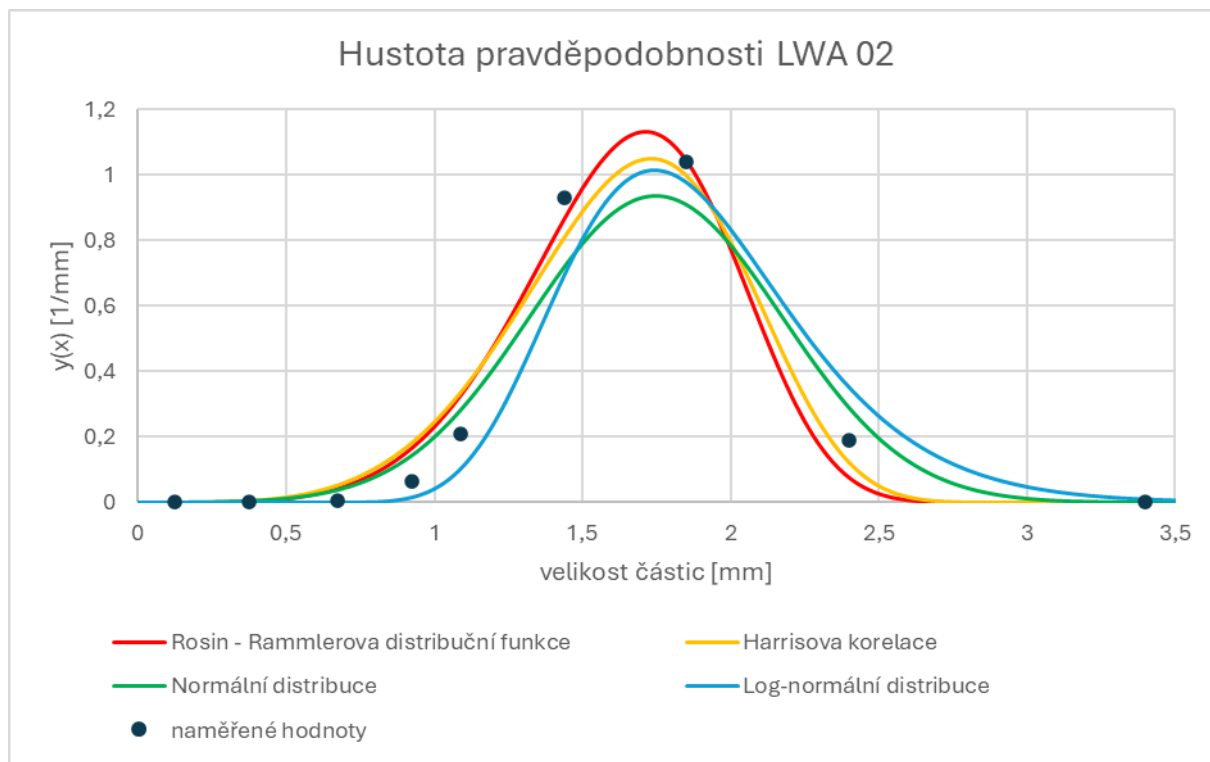


Graf 6: Hustota pravděpodobnosti LWA 0-2 - Harrisova korelace

Písek 03-30	Harrisova korelace (celý rozsah částic)	Harrisova korelace
R^2	0,291	0,962
x_{mod}	0,390	1,770
x_{med}	1,560	0,126
x_{D10}	1,026	0,086
x_{D90}	1,915	0,159

Tab. 14: Výsledky získané pomocí Harrisovy korelace (LWA 0-2)

Tab. 15 shrnuje charakteristické hodnoty pro materiál LWA 0-2, jehož hustoty pravděpodobnosti jsou prezentovány v Grafu 6.



Graf 7: Hustota pravděpodobnosti LWA 0-2

LWA 0-2	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
R^2	0,926	0,927	0,997	0,962
x_{mod}	1,748	1,740	1,740	1,770
x_{med}	1,748	1,829	1,663	0,126
x_{D10}	1,202	1,380	1,171	0,086
x_{D90}	2,294	2,425	2,079	0,159

Tab. 15: Souhrnná tabulka pro LWA 0-2

Charakterizace distribuce velikosti částic pro LWA 0-2 ukázala, že Rosin-Rammlerova distribuční křivka dosahuje nejvyššího determinačního indexu, a tudíž budou charakteristické hodnoty zjištěné touto metodou brány jako referenční, kromě mediánu, který bude porovnáván s experimentálně zjištěnou hodnotou $x_{med} = 1,7$ mm. Pokud se bude uvažovat analýza jen jemnějších částic jako u materiálu písek 03-30, tak druhou nejvhodnější metodou je Harrisova korelace. Normální a log-normální distribuce vykazují nižší determinační index. I když se

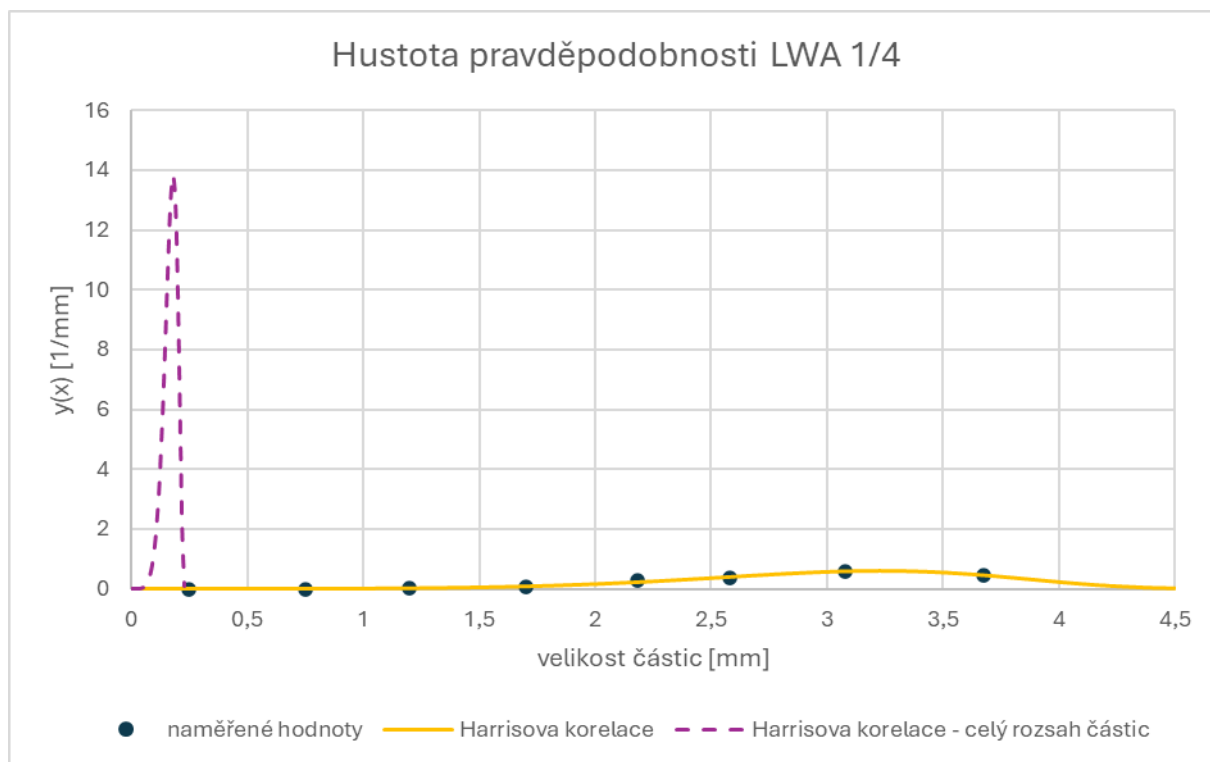
hodnoty determinačního indexu u jednotlivých metod liší, všechny se pohybují nad 0,9, což svědčí o dobré shodě s experimentálními daty.

Hodnoty modu u všech použitých metod se pohybují v rozmezí 1,74 až 1,77, čímž potvrzují konzistentnost výsledků při určování charakteristiky distribuce velikosti částic materiálu LWA 02 (procentuální rozdíl je méně než 2 %). Procentuální rozdíl od referenční hodnoty mediánu je u normální distribuce necelá 3 %, u log-normální distribuce 8 % a u Rosin-Rammlerovy distribuční funkce 2 %. Decil D10 u normální distribuce se liší pouze o necelá 3 % a decil D90 o 10 %. Decily D10 a D90 zjištěné log-normální distribucí se od referenční hodnoty liší necelými 18 %. Decily určené pomocí Harrisovy korelace se liší o více jak 90 %, což je opět dáno tím, že byla porovnávána jen část dat zjištěných touto metodou, data, u kterých se při výpočtu nedostáváme do komplexních čísel.

9.2.5 Velikostní distribuce částic materiálu LWA 1/4

Posledním analyzovaným materiálem je LWA 1/4. Ani u tohoto materiálu není možné analyzovat celý rozsah dat tak, aby křivka vytvořená pomocí Harrisovy korelace fitovala naměřená data. Optimální hodnotou x_0 by bylo 4,2654 mm, avšak vzhledem k tomu, že již při $x = 0,24$ mm vychází hustota pravděpodobnosti v komplexních číslech, tak je nutné analyzovat jen část dat s mezní hodnotou $x_0 = 1,9354$ mm.

Porovnání Harrisovy korelace pro celý rozsah dat a část dat, která jsou vhodná pro vytvoření křivky fitující naměřená data, jsou zobrazena v grafu 8 a charakteristické hodnoty jsou uvedeny v *Tab. 16*.

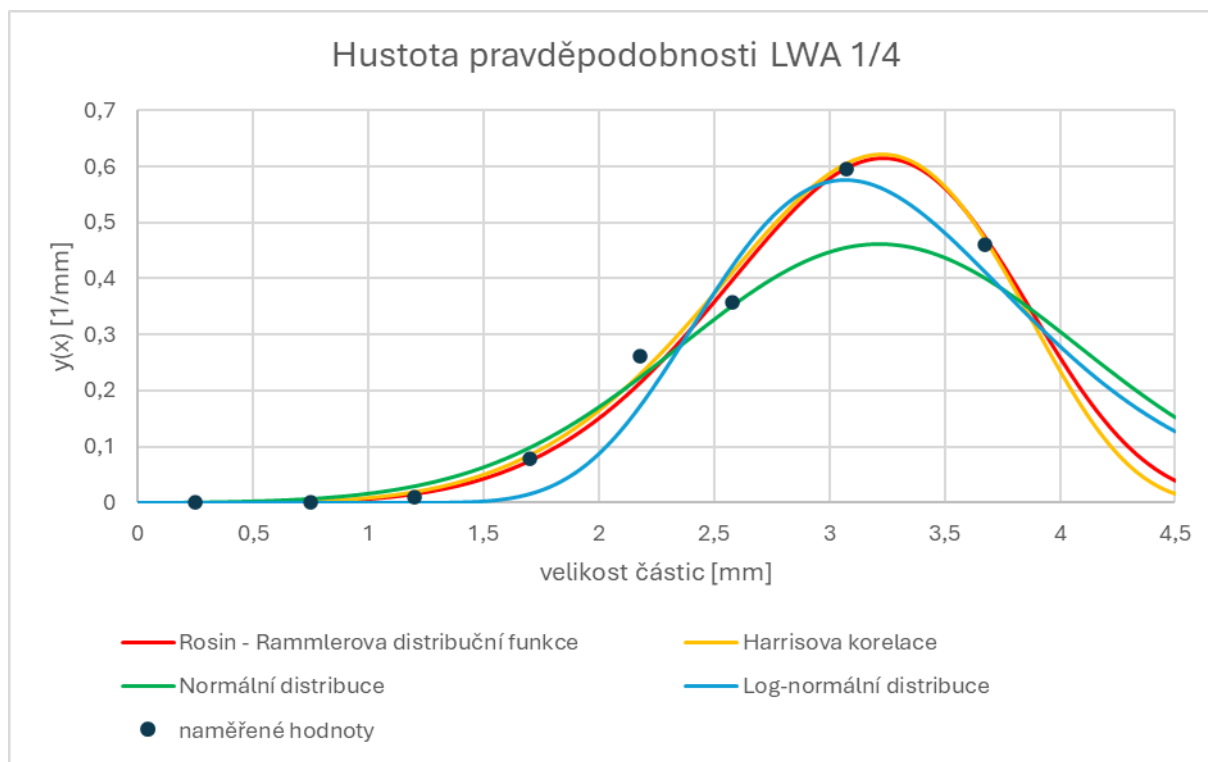


Graf 8: Hustota pravděpodobnosti LWA 1/4 - Harrisova korelace

Písek 03-30	Harrisova korelace (celý rozsah částic)	Harrisova korelace
R^2	-	0,976
x_{mod}	0,180	3,220
x_{med}	3,129	0,116
x_{D10}	2,319	0,082
x_{D90}	3,703	0,144

Tab. 16: Výsledky získané pomocí Harrisovy korelace (LWA 1/4)

Graf 8 zobrazuje křivky hustoty pravděpodobnosti pro materiál LWA 1/4. Informace o charakteristických hodnotách vypočtených všemi čtyřmi metodami (Harrisova korelace použita jen pro část dat) jsou uvedeny v *Tab. 17*.



Graf 9: Hustota pravděpodobnosti LWA 1/4

LWA 1/4	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
R^2	0,888	0,952	0,9998	0,976
x_{mod}	3,215	3,070	3,230	3,220
x_{med}	3,215	3,220	3,137	0,116
x_{D10}	2,108	2,427	2,227	0,082
x_{D90}	4,323	4,272	3,902	0,144

Tab. 17: Souhrnná tabulka pro LWA 1/4

Determinační index ukazuje, že Rosin-Rammlerova distribuční křivka nejlépe vystihuje distribuci LWA 1/4. Log-normální distribuce se rovněž jeví jako vyhovující metoda pro distribuci tohoto materiálu. Harrisova korelace by byla vhodnou metodou, pokud by se analyzovala pouze data s menšími částicemi. Méně vhodnou metodou je normální distribuce, u které se hodnota determinačního indexu pohybuje lehce pod 0,9.

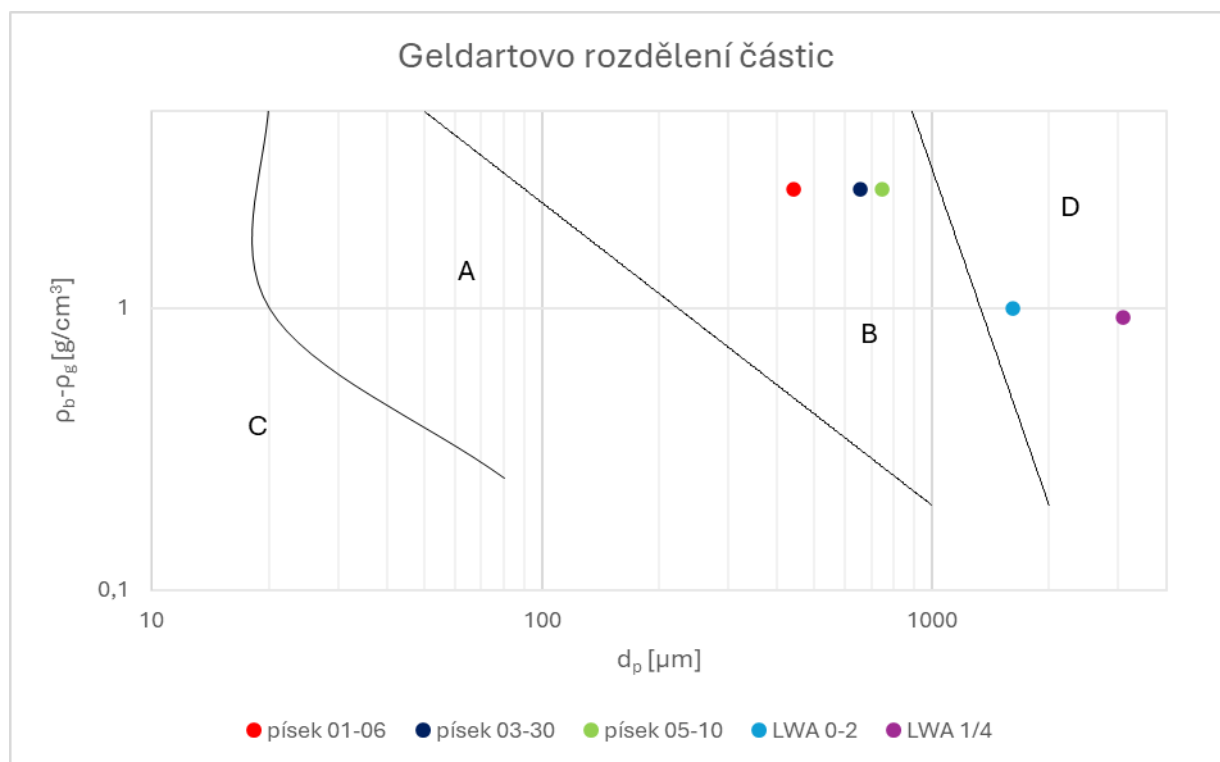
Referenčními hodnotami pro vyhodnocení shodnosti charakteristických hodnot jsou hodnoty zjištěné pomocí Rosin.-Rammlerovy distribuční křivky. Pro medián bude referenční hodnotou experimentálně zjištěná hodnota $x_{med} = 3,35$ mm. Modus vychází všemi metodami velice podobně (rozdíl u normální distribuce a Harrisovy korelace od referenčních hodnot je

méně než 0,5 %, u log-normální distribuce je rozdíl 5 %), což naznačuje konzistentní výsledky při určování této charakteristiky. Hodnoty mediánu se u normální a log-normální distribuce liší od referenční hodnoty o 4 % a u Rosin-Rammlerovy distribuční funkce o 6 %. Rozdíly hodnot decilů D10 a D90 u normální a log-normální distribuce jsou v rozmezí 5 až 11 %. Hodnoty decilů získané pomocí Harrisovy korelace se opět velice liší od referenčních hodnot (o více jak 95 %). Důvod je stejný jako u předešlých materiálů – není možné analyzovat velké částice kvůli tomu, že hodnoty vycházejí v komplexních číslech, která při této analýze nemají fyzikální význam.

10 Diskuze a výsledky - velikostní distribuce částic

10.1 Geldartovo rozdělení částic

Dle Geldartovy klasifikace patří materiály písek 01-06, písek 03-30 a písek 05-10 do skupiny B a materiály LWA 0-2 a LWA 1/4 do skupiny D (obr. 18).



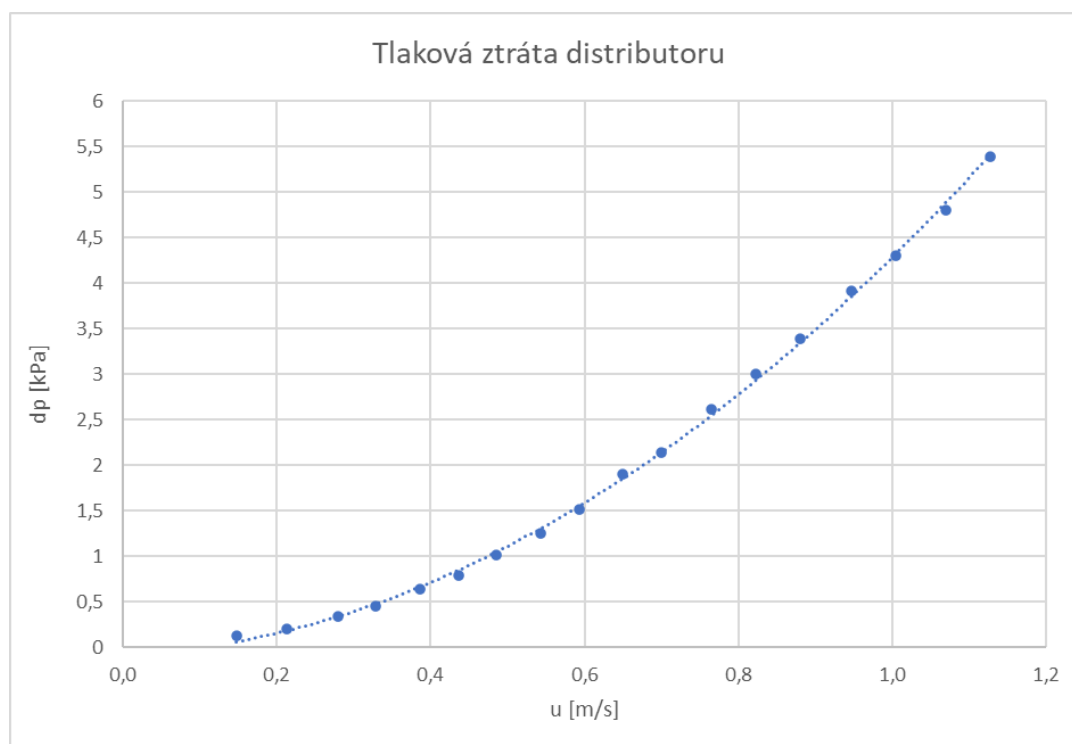
Obr. 18: Geldartovo rozdělení částic

10.2 Analýza distribuce velikosti částic

Vhodnost metody pro analýzu velikostní distribuce částic je hodnocena pomocí determinačního indexu, který ukazuje míru shody mezi daty naměřenými a vypočtenými. Normální distribuce se jeví jako méně vhodná, jelikož determinační index vyšel u této metody u dvou materiálů mnohem nižší než u ostatních metod. Harrisovu korelaci je možné použít pouze na část dat s menšími částicemi, a tudíž není vhodné tuto metodu použít pro analýzu dat materiálů s částicemi o velkých rozměrech. Analýza dat s determinačním indexem jako vypovídajícím ukazatelem prokázala, že Rosin-Rammlerova distribuční funkce je nejvhodnější metodou pro určení velikostní distribuce částic u 4 z 5 testovaných materiálů: písek 01-06, písek 03-30, LWA 0-2 a LWA 1/4. Pouze u materiálu písek 05-10 vyšel determinační index nejvyšší pomocí log-normální distribuce. Pro výpočty prahových rychlostí fluidace a úletu budou využity charakteristické hodnoty zjištěné těmito dvěma metodami.

11 Naměřené a vypočtené hodnoty – fluidační charakteristika

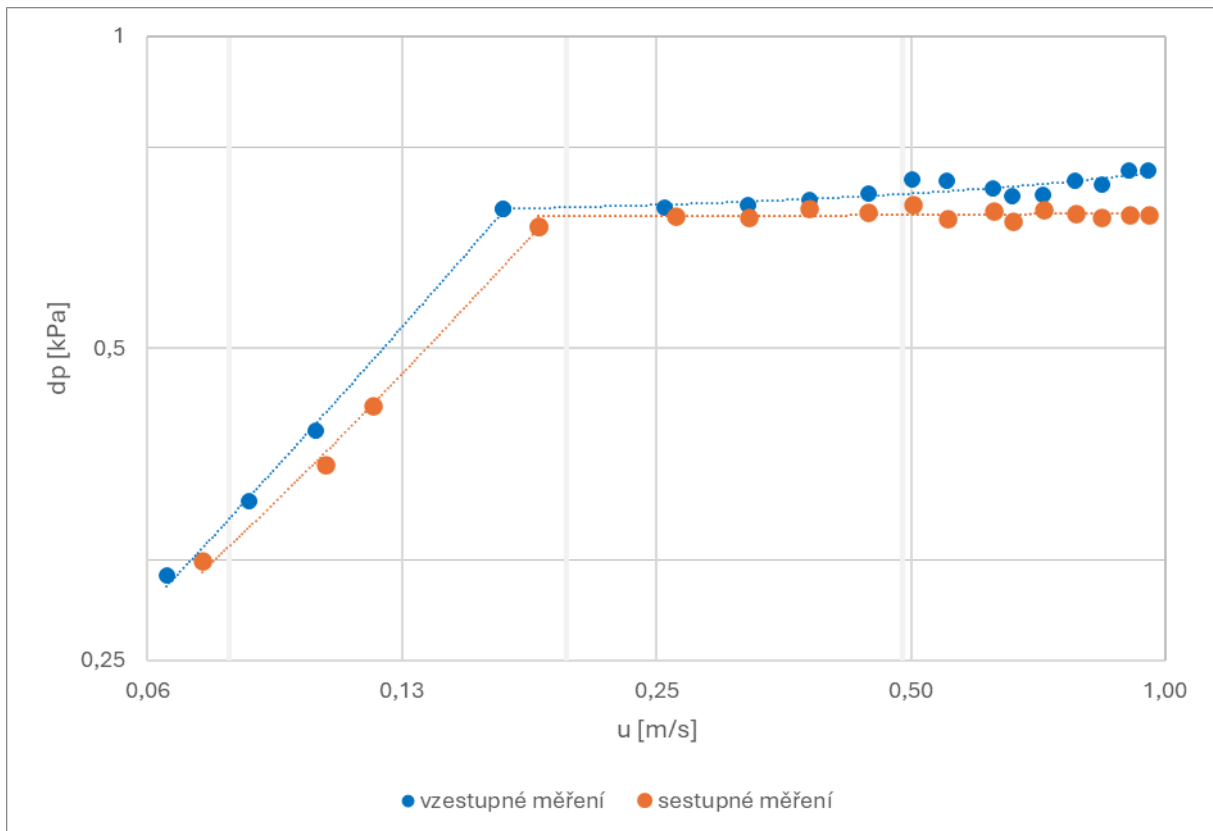
Tlaková ztráta fluidní vrstvy byla měřena včetně distributoru, a proto bylo nutné tlakovou ztrátu distributoru změřit odděleně a poté ji odečíst od celkové tlakové ztráty. Pomocí proložení Δp distributoru polynomem druhého řádu je možné stanovit závislost tlakových ztrát distributoru na rychlosti (viz. Graf 10).



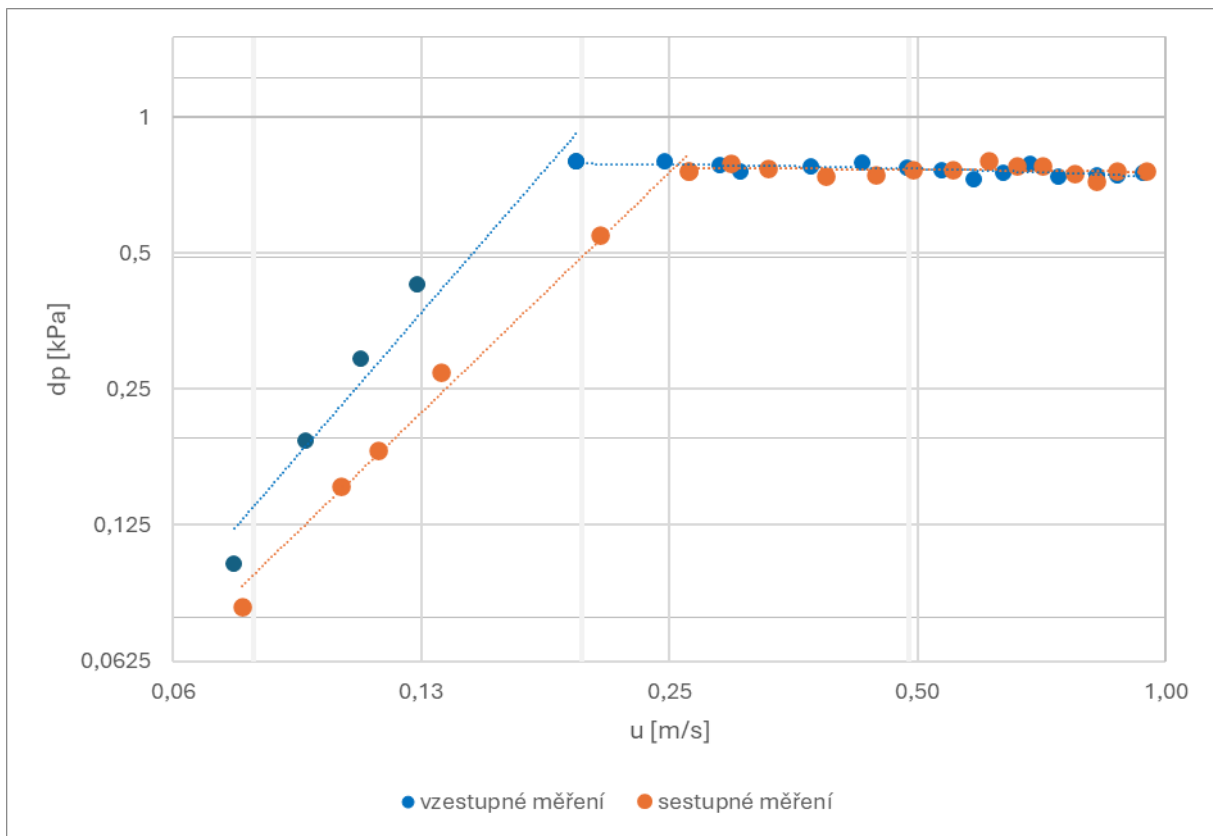
Graf 10: Závislost tlakové ztráty distributoru na rychlosti proudění

11.1 Závislost tlakové ztráty na rychlosti proudění

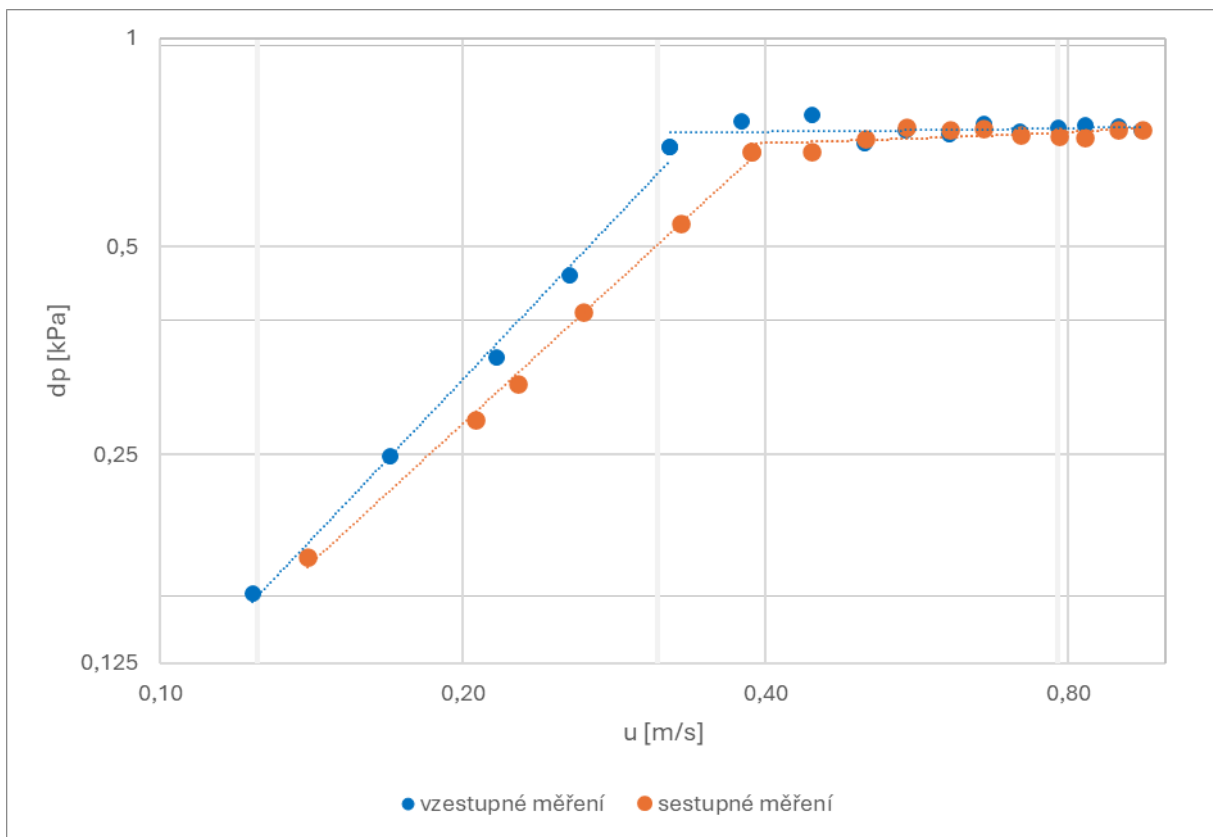
V Grafech 11-15 jsou zobrazeny závislosti tlakové ztráty fluidní vrstvy na mimovrstvové rychlosti proudění u 5 daných materiálů. Závislost tlakové ztráty na rychlosti proudění má dvě oblasti – oblast nárůstu tlakové ztráty a oblast stagnace. Hledaná prahová rychlost fluidace se nachází na průsečíku těchto regresních přímek.



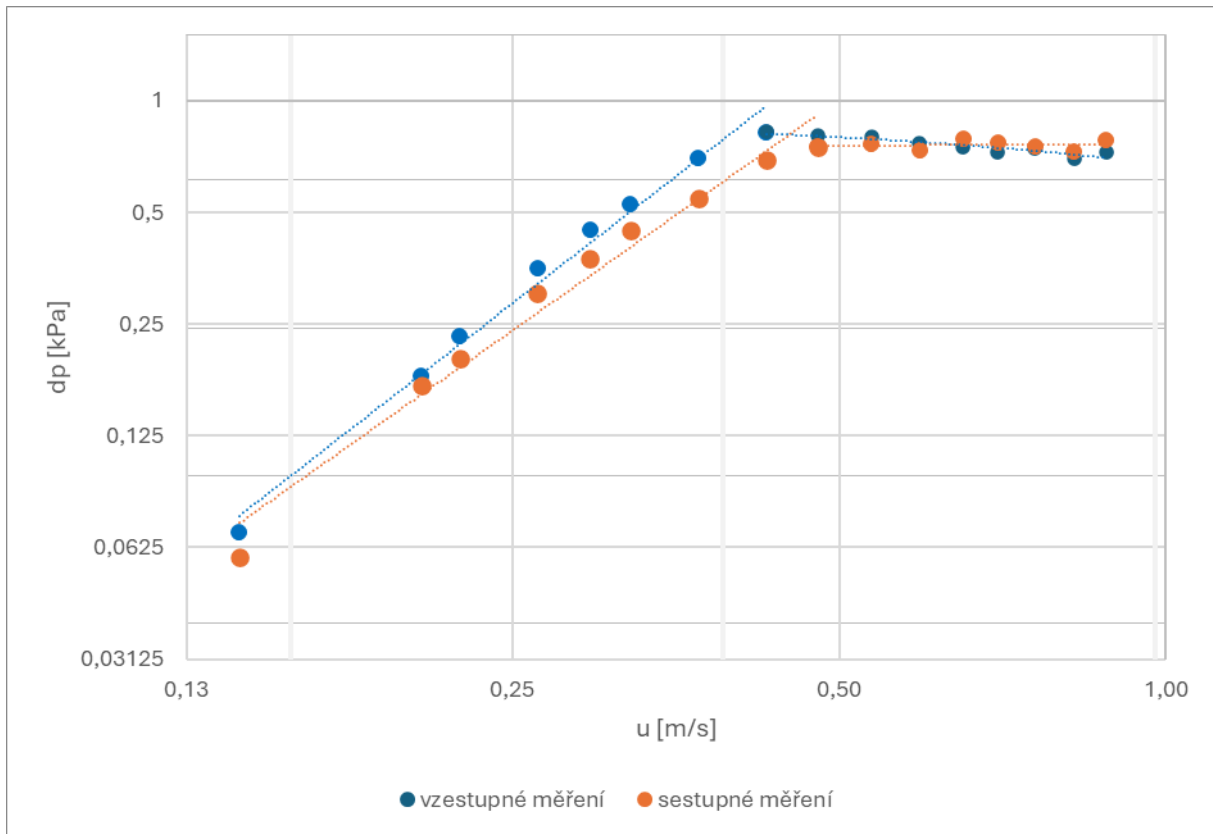
Graf 11: Tlaková ztráta fluidní vrstvy písku 01-06 v závislosti na rychlosti proudění média



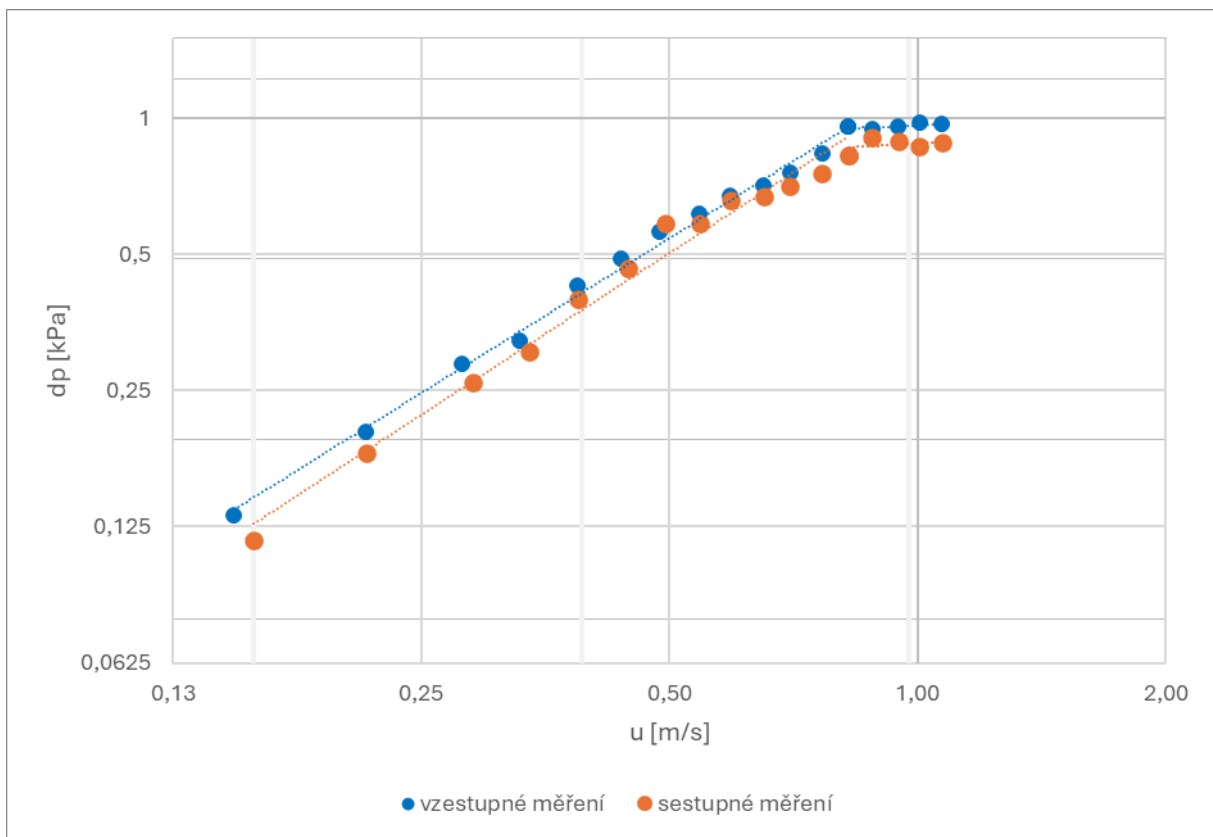
Graf 12: Tlaková ztráta fluidní vrstvy písku 03-30 v závislosti na rychlosti proudění média



Graf 13: Tlaková ztráta fluidní vrstvy písku 05-10 v závislosti na rychlosti proudění média



Graf 14: Tlaková ztráta fluidní vrstvy LWA 0-2 v závislosti na rychlosti proudění média



Graf 15: Tlaková ztráta fluidní vrstvy LWA 1/4 v závislosti na rychlosti proudění média

11.2 Prahová rychlost fluidace

Pro výpočet prahové rychlosti fluidace je nutné znát hodnoty mezerovitosti na prahu fluidace a sféricity. Pro zjištění mezerovitosti bylo využito dat z *Tab. 2* a rovnice (34). Mezerovitost roste s mimovrstvovou rychlostí, avšak při výpočtu bylo uvažováno zjednodušení, že mezerovitost je po celou dobu konstantní, a tudíž mezerovitost v klidu je rovna mezerovitosti na prahu fluidace. Zjištěné hodnoty mezerovitostí jednotlivých materiálů jsou uvedeny v *Tab. 18*.

Materiál	ε [–]
písek 01-06	0,427
písek 03-30	0,435
písek 05-10	0,435
LWA 0-2	0,425
LWA 1/4	0,459

Tab. 18: Mezerovitosti jednotlivých materiálů

Sféricita byla vypočtena pomocí rovnice (50). Do této rovnice byly dosazeny hodnoty tlakových ztrát při odpovídajících rychlostech proudění fluidačního média². Vypočtené hodnoty sféricit byly zprůměrovány a výsledné hodnoty pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v *Tab. 19*.

Materiál	ϕ_s [–]
písek 01-06	0,816
písek 03-30	0,655
písek 05-10	0,768
LWA 0-2	0,891
LWA 1/4	0,874

Tab. 19: Sféricity jednotlivých materiálů

² Číselné hodnoty se z důvodu velkého množství dat nacházejí v příloze.

Teoretická hodnota prahové rychlosti fluidace byla vypočtena pomocí rovnice (41), do které byly dosazeny výše zjištěné hodnoty mezerovitosti a sféricity. V *Tab. 20* jsou uvedeny vypočtené prahové rychlosti fluidace pro jednotlivé materiály pro různé velikosti částic – pro střední průměr, modus, medián, decil D10 a decil D90. Charakteristické hodnoty byly zjištěny pomocí Rosin-Rammlerovy distribuční funkce (písek 01-06, písek 03-30, LWA 0-2 a LWA 1/4) a log-normální distribuce (písek 05-10).

Materiál	$u_{mf_{dp}}$ [m/s]	$u_{mf_{mod}}$ [m/s]	$u_{mf_{med}}$ [m/s]	$u_{mf_{D10}}$ [m/s]	$u_{mf_{D90}}$ [m/s]
písek 01-06	0,158	0,203	0,193	0,097	0,288
písek 03-30	0,229	0,251	0,253	0,088	0,440
písek 05-10	0,357	0,395	0,465	0,283	0,565
LWA 0-2	0,502	0,540	0,517	0,350	0,634
LWA 1/4	0,933	0,962	0,943	0,735	1,086

Tab. 20: Vypočtená prahová rychlost fluidace

11.3 Prahová rychlost úletu

Pomocí rovnice (49) byly vypočteny hodnoty prahových rychlostí úletu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v *Tab. 21*.

Materiál	$u_{t_{dp}}^*$ [m/s]	$u_{t_{mod}}^*$ [m/s]	$u_{t_{med}}^*$ [m/s]	$u_{t_{D10}}^*$ [m/s]	$u_{t_{D90}}^*$ [m/s]
písek 01-06	0,899	1,055	1,023	0,667	1,332
písek 03-30	1,317	1,409	1,413	0,679	2,161
písek 05-10	1,599	1,723	1,926	1,353	2,298
LWA 0-2	1,734	1,853	1,780	1,287	2,166
LWA 1/4	2,997	3,107	3,035	2,283	3,611

Tab. 21: Vypočtená prahová rychlost úletu

12 Diskuze a výsledky – fluidační charakteristika

12.1 Závislost velikosti částic a sféricity na prahové rychlosti fluidace

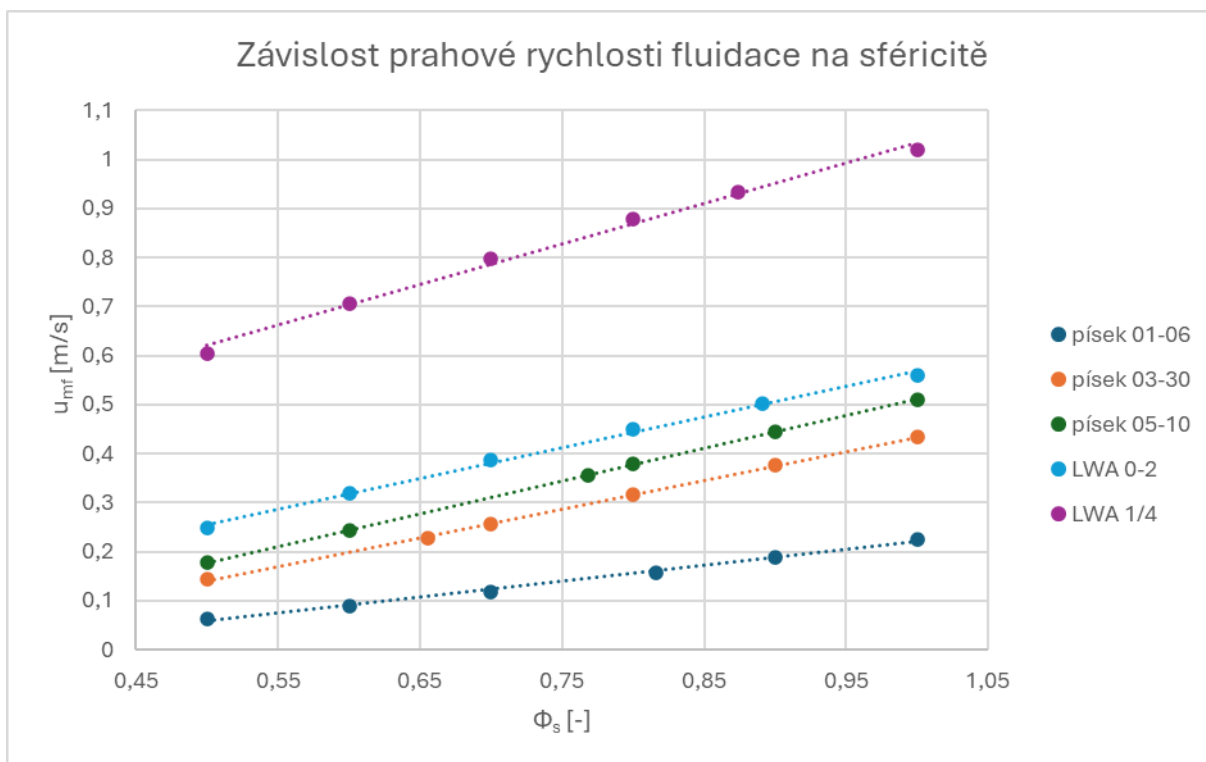
Pro zjištění, jak velký vliv má průměr částic na prahovou rychlost fluidace, je nutné provést citlivostní analýzu. Cílem je výpočtem získat hodnotu prahové rychlosti fluidace, která se bude rovnat hodnotě experimentálně zjištěné (hodnoty ze sestupného měření). Nejprve je nutné přepočítat Archimédovo a Reynoldsovo číslo a poté pomocí excelovského doplňku řešitel nalézt hodnotu průměru částice pro hledanou prahovou rychlost fluidace. V *Tab. 22* jsou uvedeny prahové rychlosti fluidace experimentálně zjištěné, experimentálně zjištěný střední průměr částic a hodnoty nalezené pomocí citlivostní analýzy.

Materiál	$u_{mf_{naměřená}}$ [m/s]	d_p [mm]	$d_{p_{citlivostní\ analýza}}$ [mm]	$d_{p_{rozdíl}}$ [mm]
	sestupné měření			
písek 01-06	0,186	0,442	0,485	0,04
písek 03-30	0,266	0,654	0,725	0,07
písek 05-10	0,405	0,746	0,815	0,07
LWA 0-2	0,469	1,615	1,511	0,1
LWA 1/4	0,824	3,089	2,588	0,5

Tab. 22: Citlivostní analýza - průměr částic

Z citlivostní analýzy na průměr částice je patrné, že u materiálů písek 01-06, písek 03-30 a písek 05-10 se rozdíl mezi experimentálně zjištěnou hodnotou středního průměru částic a hodnotou získanou pomocí citlivostní analýzy pohybuje v setinách milimetrů, přičemž u zbylých dvou materiálů, LWA 0-2 a LWA 1/4, je rozdíl větší a pohybuje se v desetínách milimetrů. Z toho vyplývá, že u materiálů písek 01-06, písek 03-30 a písek 05-10 by pro získání stejné hodnoty prahové rychlosti fluidace, jako je hodnota experimentálně zjištěná, bylo nutné mít směs s částicemi o lehce větším středním průměru a u materiálu LWA 0-2 a LWA 1/4 naopak směs s částicemi o menším středním průměru.

Vliv sféricity na prahovou rychlost fluidace je možné opět zjistit pomocí citlivostní analýzy. V Grafu 16 jsou zobrazeny závislosti prahových rychlostí fluidace na různých hodnotách sféricity. Z grafu je zřejmé, že se zvyšující se hodnotou sféricity roste i prahová rychlost fluidace.



Graf 16: Závislost prahové rychlosti fluidace na sféricitě

12.2 Prahová rychlost fluidace a prahová rychlost úletu

V Tab. 23 jsou uvedeny zjištěné prahové rychlosti fluidace při zvyšování, resp. snižování průtoku média a vypočtené hodnoty pro střední průměr částic, modu a medián.

Materiál	$u_{mf_naměřená}$ [m/s]		$u_{mf_{dp}}$ [m/s]	$u_{mf_{mod}}$ [m/s]	$u_{mf_{med}}$ [m/s]
	vzestupné měření	sestupné měření			
písek 01-06	0,160	0,186	0,158	0,203	0,193
písek 03-30	0,190	0,266	0,229	0,251	0,253
písek 05-10	0,347	0,405	0,357	0,456	0,395
LWA 0-2	0,425	0,469	0,502	0,540	0,517
LWA 1/4	0,840	0,824	0,933	0,962	0,943

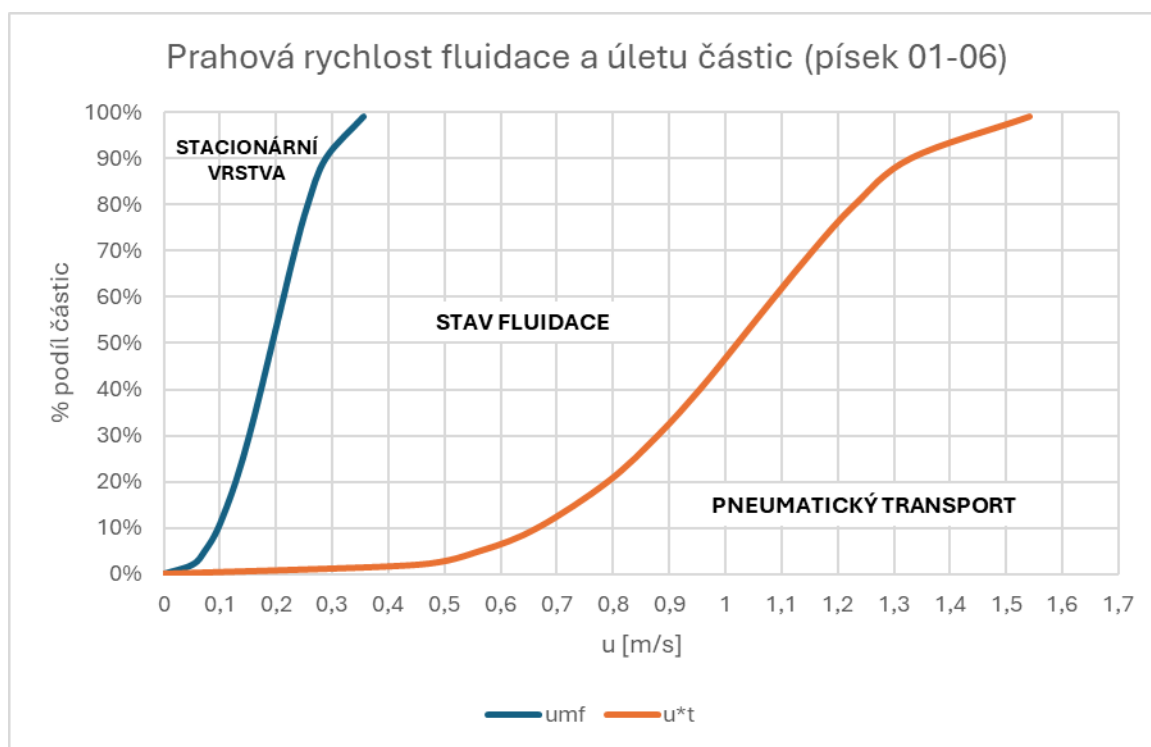
Tab. 23: Prahová rychlost fluidace

Vyhodnocení měření fluidace ukazuje, že prahová rychlost, stanovená na základě naměřených dat, se blíží hodnotám vypočteným z kritériálních rovnic. U 4 z 5 testovaných materiálů vychází prahová rychlost fluidace při zvyšování průtoku média nižší než při jeho

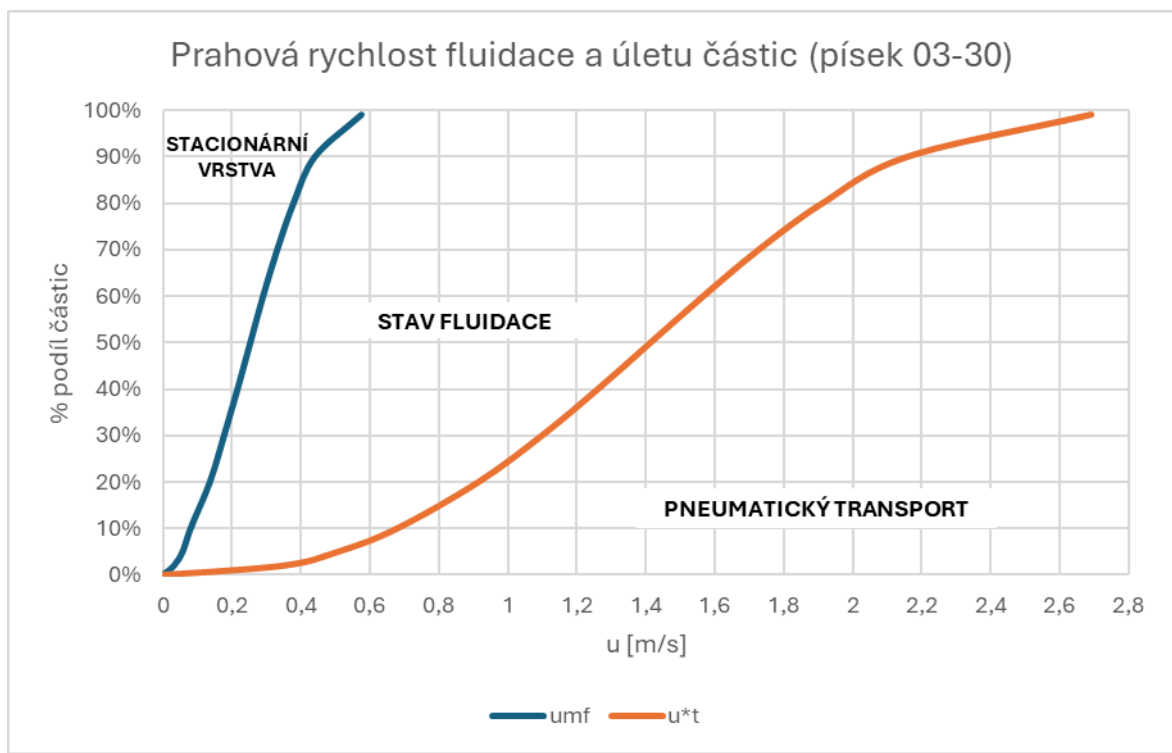
snižování. To může být způsobeno kohezními silami, které působí mezi částicemi při zvyšování průtoku média, ale při snižování průtoku již nepůsobí.

U materiálu písek 01-06 se průměrné procentuální odchylky vypočtených hodnot prahových rychlostí fluidace od naměřených liší o 8 % ($u_{mf_{dp}}$), 17 % ($u_{mf_{mod}}$) a necelých 12 % ($u_{mf_{med}}$). Odchylky u materiálu písek 03-30 jsou 17 % ($u_{mf_{dp}}$) a kolem 10 % pro prahové rychlosti fluidace $u_{mf_{mod}}$ i $u_{mf_{med}}$. Nejnižších průměrných procentuálních odchylek je dosaženo u materiálu písek 05-10, a to 7 % ($u_{mf_{dp}}$) a 5 % ($u_{mf_{med}}$). Naopak odchylka $u_{mf_{mod}}$ je u tohoto materiálu poměrně velká, překračuje 20 %. U materiálů LWA 0-2 a LWA 1/4 se průměrné odchylky u všech vypočtených hodnot pohybují v rozmezí 12 až 16 %. Odchylky mohou být způsobeny nejen výše zmíněnými kohezními silami, ale také poměrně vysokou polydisperzitou částic. Dalším faktorem, který by mohl ovlivňovat shodnost vypočtených a naměřených hodnot, je že, při výpočtu byla uvažována konstantní mezerovitost. Pro výpočet prahové rychlosti fluidace je vhodné použít hodnotu středního průměru, případně mediánu. U 3 z 5 materiálů, písek 01-06, LWA 0-2 a LWA1/4, vychází nejmenší odchylky vypočtených od naměřených hodnot při použití středního průměru. U zbývajících 2 materiálů vychází nejmenší odchylky při použití hodnoty mediánu.

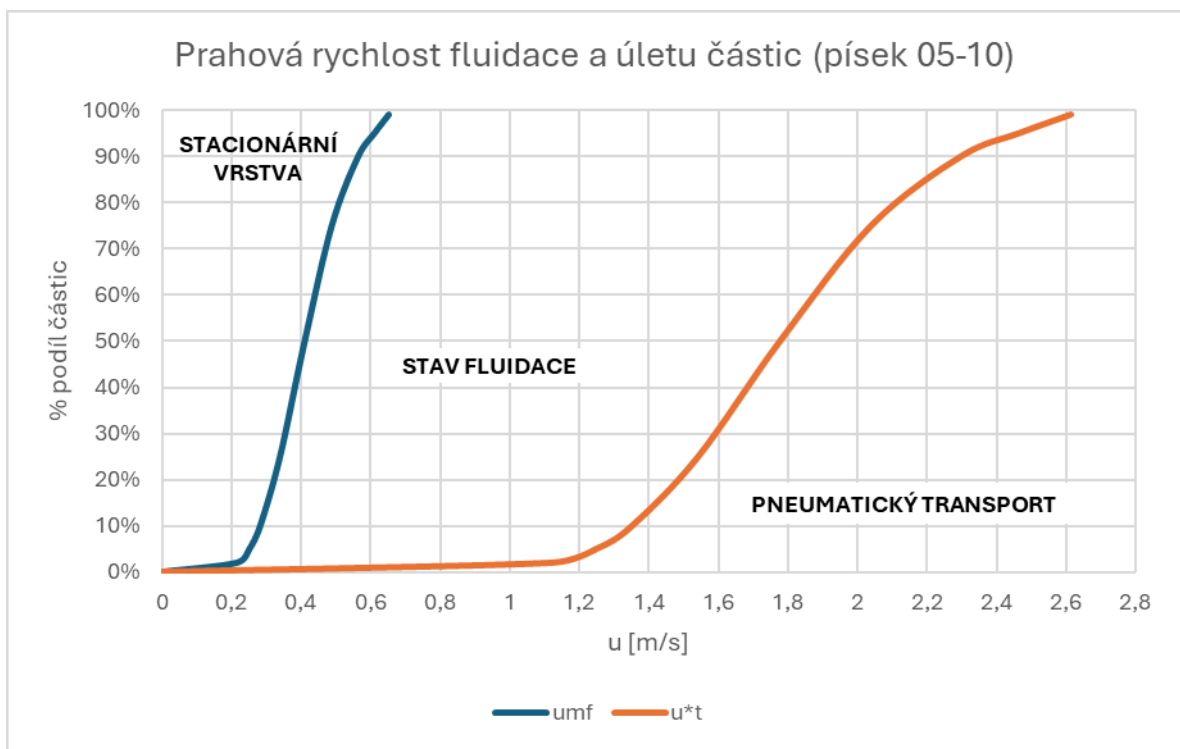
Grafy 17-21 zobrazují 3 oblasti chování částic v závislosti na rychlosti fluidačního média a procentuálním podílu částic: oblast před dosažením prahové rychlosti fluidace (stacionární vrstva), oblast po dosažení prahové rychlosti fluidace (stav fluidace) a oblast po dosažení prahové rychlosti úletu (pneumatický transport).



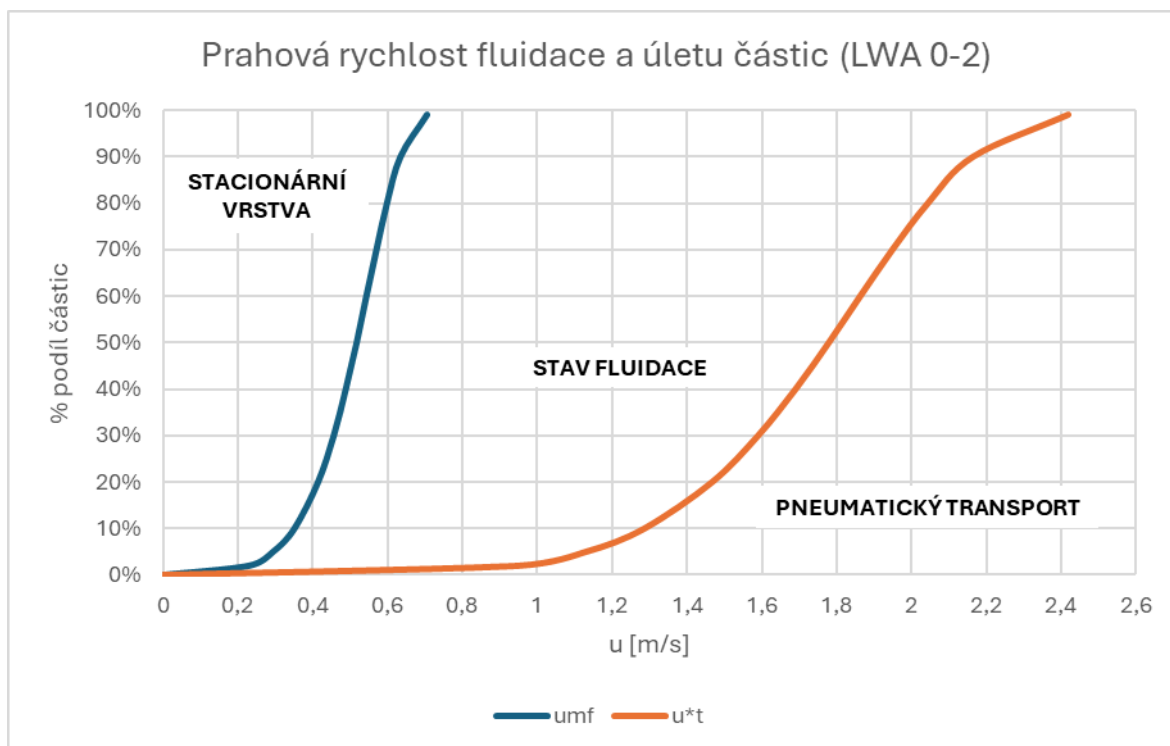
Graf 17: Práhová rychlost fluidace a úletu částic (písek 01-06)



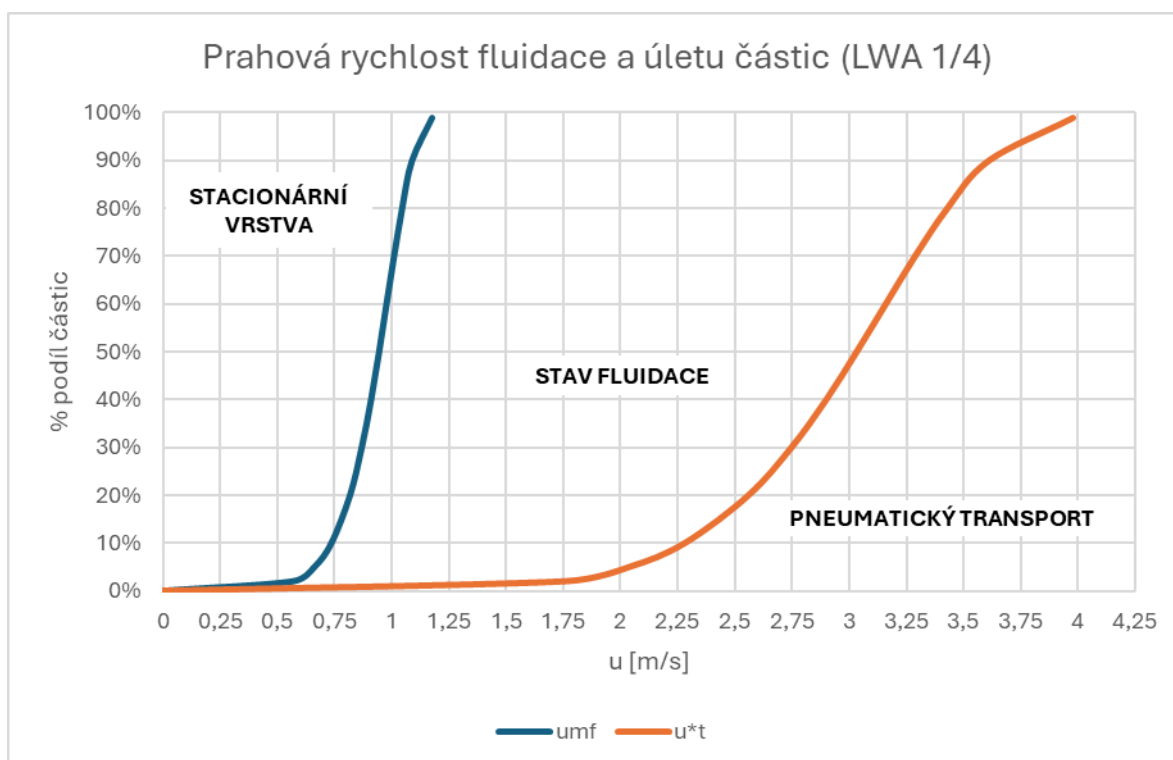
Graf 18: Prahová rychlost fluidace a úletu částic (písek 03-30)



Graf 19: Prahová rychlost fluidace a úletu částic (písek 05-10)



Graf 20: Prahová rychlost fluidace a úletu částic (LWA 0-2)



Graf 21: Prahová rychlost fluidace a úletu částic (LWA 1/4)

Z Grafu 17 je patrné, že částice materiálu písek 01-06 dosahují prahu fluidace při nízkých rychlostech průtoku fluidačního média (do 0,3 m/s). Rozdíl mezi prahovou rychlostí fluidace a prahovou rychlostí úletu je 0,6 až 1,0 m/s, tzn. rozsah rychlostí průtoku, při kterém se částice udržují ve stavu fluidace, je velice malý. I při mírném zvýšení rychlosti průtoku se částice dostávají na práh úletu. Z tohoto důvodu je u materiálu písek 01-06 malá možnost regulace fluidního zařízení.

V Grafu 18 je oblast po dosažení prahové rychlosti fluidace částic materiálu písek 03-30 větší než u předchozího materiálu, což znamená, že je větší i možnost regulace. U tohoto materiálu je sice při nižších rychlostech rozdíl mezi prahovou rychlostí fluidace a prahovou rychlostí úletu poměrně nízký, 0,56 m/s, ale se zvyšující se rychlostí proudícího fluidačního média se rozdíl zvyšuje až na 1,7 m/s.

Z Grafu 19 a Grafu 20, zobrazující oblasti chování částic v závislosti na rychlosti fluidačního média pro materiály písek 05-10 a LWA 0-2, je zřejmé, že rozsah rychlostí, při kterých se částice obou těchto materiálů nacházejí ve stavu fluidace, je mnohem větší, než u předešlých materiálů (0,9 až 1,6 m/s), a tudíž je i možnost regulace fluidního zařízení mnohem větší.

U materiálu LWA 1/4 (Graf 21) je největší možnost regulace, jelikož oblast, ve které se částice nacházejí ve stavu fluidace, je největší ze všech testovaných materiálů. Rozdíl prahové rychlosti fluidace a prahové rychlosti úletu se pohybuje v rozmezí 1,5 m/s a 2,5 m/s.

13 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo stanovení velikostní distribuce částic pomocí různých matematických modelů a vyhodnocení chování částic v závislosti na rychlosti fluidačního média u 5 různých materiálů.

V experimentální části této práce byla určena velikostní distribuce částic materiálů písek 01-06, písek 03-30, písek 05-10, LWA 0-2 a LWA 1/4 pomocí síťové analýzy. Pro matematický popis distribuce částic bylo využito čtyř metod: normální distribuce, log-normální distribuce, Rosin-Rammlerova distribuční funkce a Harrisova korelace. Vhodnost metody byla hodnocena na základě ukazatele určujícího, jak přesně a spolehlivě daná metoda reprezentuje sledované vlastnosti materiálu. Vypovídajícím ukazatelem byl determinační index. Optimální metodou pro určení velikostní distribuce částic se u 4 z 5 materiálů (písek 01-06, písek 03-30, LWA 0-2 a LWA 1/4) jeví Rosin-Rammlerova distribuční funkce a pro písek 05-10 log-normální distribuce. Determinační index určený touto metodou byl u všech testovaných materiálu téměř roven 1. Normální distribuce a Harrisova korelace se jeví jako méně vhodné metody. U normální distribuce vyšel determinační index u dvou materiálů mnohem nižší než u ostatních a při vyhodnocování Harrisovy korelace se muselo brát v potaz, že je vhodná pouze pro určitou velikost částic, a tudíž nebylo možné objektivně vyhodnotit vhodnost této metody pro celý rozsah částic materiálu písek 03-30, písek 05-10, LWA 0-2 a LWA 1/4. U větších částic vycházela při výpočtu komplexní čísla, která nemají fyzikální význam při analýze materiálu. U těchto materiálů se proto provedla analýza části dat s jemnějšími částicemi a ta byla vyhodnocena.

Použitím Ergunovy rovnice ve spojení s rovnováhou sil ve stavu fluidace byla stanovena prahová rychlost fluidace daných materiálů pro charakteristické hodnoty - střední průměr, modus, medián, decil D10 a decil D90. Pro stejné charakteristické hodnoty byla dále vypočtena prahová rychlost úletu. Prahová rychlost fluidace byla určena i experimentálně. Při porovnání vypočtených a naměřených hodnot daných rychlostí bylo zjištěno, že pro výpočet je nejvhodnější použít střední průměr, u kterého se odchylka mezi vypočtenými a naměřenými daty pohybovala mezi 5 - 8 % u materiálu písek 01-06, písek 03-30 a písek 05-10. U materiálu LWA 0-2 a LWA 1/4 se průměrné odchylky u všech vypočtených hodnot pohybují v rozmezí 12 až 16 %. Důvodem takto velkých odchylek může být vysoká polydisperzita částic, uvažování konstantní mezerovitosti, případně kohezní síly, které působí na částice se zvyšující se rychlostí průtoku fluidačního média.

Na rychlost fluidace má vliv mnoho faktorů, včetně velikosti částic, mezerovitosti a sféricity. Na základě výše uvedených dat je možné konstatovat, že větší průměr částic a vysoká sféricita obecně vedou k vyšší rychlosti fluidace.

Vhodnost zvoleného materiálu pro fluidní lože, respektive jaká je možnost regulace fluidačního zařízení, lze zjistit porovnáním prahové rychlosti fluidace a prahové rychlosti úletu. Pokud je interval mezi prahovou rychlostí fluidace a prahovou rychlostí úletu malý, tak i možnost regulace je malá, a vice versa.

14 Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] D. Kunii a Octave. Levenspiel, *Fluidization engineering*. Butterworth-Heinemann, 1991.
- [2] Šnita D., „Chemické inženýrství“, 2006.
- [3] Khana Academy, „Bioreactors and downstream processing“. Cit.: 8. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.khanacademy.org/science/in-in-class-12-biology-india/xc09ed98f7a9e671b:in-in-biotechnology-principles-and-processes/xc09ed98f7a9e671b:in-in-applications-of-biotechnology/a/bioreactors-and-downstream-processing>
- [4] Dlouhý T., *Výpočty kotlu a spalínových výměníku*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007.
- [5] Beránek J. a Sokol D., „Fluidní technika“, 1961.
- [6] Ladislav Svarovsky, „Solid - Liquid Separation“, 2000.
- [7] „Granulometrie“, Energetika - ČVUT [online]. Praha. Cit.: 19. únor 2024. [Online]. Dostupné z: https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/A_granulometrie.pdf
- [8] HORIBA Scientific, „A guidebook to particle size analysis“. Cit.: 10. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: https://ats-scientific.com/uploads/PSA_Guidebook.pdf
- [9] „Probability Density Function“. Cit.: 3. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.cuemath.com/data/probability-density-function/>
- [10] Svarovsky Ladislav, „Solid Liquid Separation“, 2000.
- [11] Newcastle University, „Coefficient of Determination, R-squared“. Cit.: 2. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.ncl.ac.uk/webtemplate/ask-assets/external/maths-resources/statistics/regression-and-correlation/coefficient-of-determination-r-squared.html>
- [12] „Gallery of Distributions“, Engineering statistics handbook. Cit.: 19. únor 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda366.htm>
- [13] „Normální rozložení a odvozená rozložení“, *MATH and STATS support centre*, Cit.: 2. březen 2024. [Online]. Dostupné z: https://mathstat.econ.muni.cz/media/11190/kapitola_i.pdf
- [14] „Wolframalpha“. Cit.: 29. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.wolframalpha.com/input/?i=log+normal+distribution>
- [15] Brilliant.org, A. Katz, C. Williams, a J. Khim, „Log-normal Distribution“. Cit.: 2. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://brilliant.org/wiki/log-normal-distribution/>
- [16] VŠB -TU Ostrava, „Spojitá rozdělení pravděpodobnosti“, Cit.: 2. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~bri10/Teaching/Statistika%201/Kapitola%206.PDF>

- [17] Microtrac, „Particle Analysis Techniques Compared - COMPARISON OF PARTICLE CHARACTERIZATION METHODS". Cit.: 8. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.microtrac.com/applications/knowledge-base/different-particle-analysis-techniques-compared/>
- [18] S. Oka a E. J. Anthony, „Fluidized Bed Combustion", 2004.
- [19] L. NEUŽIL a Vladimír MÍKA, *Chemické inženýrství I. a II.*, roč. ISBN 80-708-0312-6. 1998.
- [20] R. Singh, J. Mahabeer, E. Obwaka, a A. Mohammadi, *Prediction of the minimum fluidization velocity and bed voidage for different solid particles*. 2019. Cit.: 8. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/334119552_Prediction_of_the_minimum_fluidization_velocity_and_bed_voidage_for_different_solid_particles
- [21] „Katalogový list Sklopísek Střeleč, a.s." Cit.: 23. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://glassand.eu/celkova-produkce/podle-druhu/technicke-pisky>

15 Seznam obrázků

Obr. 1: Princip fluidace [3]	13
Obr. 2: Síly působící na částici při fluidaci [18]	14
Obr. 3: Typy fluidních vrstev [1]	17
Obr. 4: Distribuční křivka rozsevu	19
Obr. 5: Distribuční křivka propadu	19
Obr. 6: Hustota pravděpodobnosti [7].....	20
Obr. 7: Sítová analýza [17]	26
Obr. 8: Dynamická analýza obrazu – princip [17]	26
Obr. 9: Geldartovo rozdělení částic.....	28
Obr. 10: Závislost a) tlakové ztráty Δp , b) výšky fluidní vrstvy h, c) mezerovitosti ϵ , na mimovrstvové rychlosti tekutiny v [19]	31
Obr. 11: Závislost tlakové ztráty na mimovrstvové rychlosti fluidačního média (písek) [1] ..	32
Obr. 12: Písek 01-06.....	37
Obr. 13: Písek 03-30.....	37
Obr. 14: LWA 0-2	37
Obr. 15: Písek 05-10.....	37
Obr. 16: LWA 1/4	37
Obr. 17: Reaktor s fluidní vrstvou.....	39
Obr. 18: Geldartovo rozdělení částic.....	58

16 Seznam tabulek

Tab. 1: Hodnoty mezerovitosti při prahové rychlosti fluidace pro různé materiály [1].....	34
Tab. 2: Charakteristika materiálů použitých v experimentální části práce [21].....	36
Tab. 3: Střední průměr částic testovaných materiálů	40
Tab. 4: Medián testovaných materiálů	41
Tab. 5: Zjištěné parametry pro všechny materiály	42
Tab. 6: Zjištěné parametry pro všechny materiály	42
Tab. 7: Zjištěné koeficienty pro všechny materiály	43
Tab. 8: Zjištěné koeficienty pro všechny materiály	43
Tab. 9: Souhrnná tabulka pro písek 01-06	45
Tab. 10: Výsledky získané pomocí Harrisovy korelace (písek 03-30)	47
Tab. 11: Souhrnná tabulka pro písek 03-30	48
Tab. 12: Výsledky získané pomocí Harrisovy korelace (písek 05-10)	50
Tab. 13: Souhrnná tabulka pro písek 05-10	51
Tab. 14: Výsledky získané pomocí Harrisovy korelace (LWA 0-2).....	53
Tab. 15: Souhrnná tabulka pro LWA 0-2.....	54
Tab. 16: Výsledky získané pomocí Harrisovy korelace (LWA 1/4).....	56
Tab. 17: Souhrnná tabulka pro LWA 1/4	57
Tab. 18: Mezerovitosti jednotlivých materiálů	63
Tab. 19: Sféricity jednotlivých materiálů.....	63
Tab. 20: Vypočtená prahová rychlost fluidace.....	64
Tab. 21: Vypočtená prahová rychlost úletu	64
Tab. 22: Citlivostní analýza - průměr částic	65
Tab. 23: Prahová rychlost fluidace.....	66

17 Seznam grafů

Graf 1: Hustota pravděpodobnosti písku 01-06	45
Graf 2: Hustota pravděpodobnosti písku 03-30 - Harrisova korelace.....	47
Graf 3: Hustota pravděpodobnosti písku 03-30	48
Graf 4: Hustota pravděpodobnosti písku 05-10 - Harrisova korelace.....	50
Graf 5: Hustota pravděpodobnosti písku 05-10	51
Graf 6: Hustota pravděpodobnosti LWA 0-2 - Harrisova korelace	53
Graf 7: Hustota pravděpodobnosti LWA 0-2.....	54
Graf 8: Hustota pravděpodobnosti LWA 1/4 - Harrisova korelace.....	56
Graf 9: Hustota pravděpodobnosti LWA 1/4	57
Graf 10: Závislost tlakové ztráty distributoru na rychlosti proudění	59
Graf 11: Tlaková ztráta fluidní vrstvy písku 01-06 v závislosti na rychlosti proudění média	60
Graf 12: Tlaková ztráta fluidní vrstvy písku 03-30 v závislosti na rychlosti proudění média	61
Graf 13: Tlaková ztráta fluidní vrstvy písku 05-10 v závislosti na rychlosti proudění média	61
Graf 14: Tlaková ztráta fluidní vrstvy LWA 0-2 v závislosti na rychlosti proudění média....	62
Graf 15: Tlaková ztráta fluidní vrstvy LWA 1/4 v závislosti na rychlosti proudění média....	62
Graf 16: Závislost prahové rychlosti fluidace na sféricitě	66
Graf 17: Prahová rychlost fluidace a úletu částic (písek 01-06)	68
Graf 18: Prahová rychlost fluidace a úletu částic (písek 03-30)	69
Graf 19: Prahová rychlost fluidace a úletu částic (písek 05-10)	69
Graf 20: Prahová rychlost fluidace a úletu částic (LWA 0-2).....	70
Graf 21: Prahová rychlost fluidace a úletu částic (LWA 1/4).....	70

18 Seznam příloh

Příloha A – Rozložení celkové navážené hmotnosti materiálů na jednotlivých sítích

Příloha B – Hustoty pravděpodobnosti jednotlivých materiálů zjištěné 4 metodami

Příloha C – Závislost tlakové ztráty na rychlosti průtoku fluidačního média

Příloha A – Rozložení celkové navážené hmotnosti materiálů na jednotlivých sítích

x [mm]	hmotnost sít [g]	1. měření	2. měření	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m _{průměr} [g]
0	338,66	339,35	339,41	0,69	0,75	0,720
0,1	194,52	197,47	198,19	2,95	3,67	3,310
0,2	195,13	203,7	204,19	8,57	9,06	8,815
0,315	210,25	302,68	308,93	92,43	98,68	95,555
0,5	274,68	336,86	342,39	62,18	67,71	64,945
0,6	244,01	276,55	281,98	32,54	37,97	35,255
0,85	250,69	250,71	250,73	0,02	0,04	0,030
1	310,71	310,72	310,73	0,01	0,02	0,015
1,4	322,22	322,22	322,22	0	0	0
				Σ 199,39	Σ 217,90	Σ 208,645

Tab. 1: Naměřené hodnoty (písek 01-06)

x [mm]	hmotnost sít [g]	1. měření	2. měření	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m _{průměr} [g]
0	338,66	338,66	338,66	0	0	0
0,1	194,52	194,54	194,56	0,02	0,04	0,030
0,2	195,13	196,29	197,11	1,16	1,98	1,570
0,315	210,25	245,31	252,99	35,06	42,74	38,900
0,5	274,68	304,31	305,48	29,63	30,8	30,215
0,6	244,01	323,53	320,34	79,52	76,33	77,925
0,85	250,69	281,61	277,89	30,92	27,2	29,060
1	310,71	333,89	329,57	23,18	18,86	21,020
1,4	322,22	329,07	327,42	6,85	5,2	6,025
2	367,19	370,05	369,14	2,86	1,95	2,405
				Σ 209,20	Σ 205,10	Σ 207,150

Tab. 2: Naměřené hodnoty (písek 03-30)

x [mm]	hmotnost sít [g]	1. měření	2. měření	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m _{průměr} [g]
0	338,66	339,35	339,41	0,69	0,75	0,720
0,1	194,52	194,52	194,55	0	0,03	0,015
0,2	195,13	195,53	195,61	0,4	0,48	0,440
0,315	210,25	212,37	213,04	2,12	2,79	2,455
0,5	274,68	282,78	282,87	8,1	8,19	8,145
0,6	244,01	360,81	360,49	116,8	116,48	116,640
0,85	250,69	305,63	306,43	54,94	55,74	55,340
1	310,71	331,92	334,92	21,21	24,21	22,710
1,4	322,22	322,31	322,27	0,09	0,05	0,070
1,7	319,38	319,38	319,38	0	0	0,000
				Σ 204,35	Σ 208,72	Σ 206,535

Tab. 3: Naměřené hodnoty (písek 05-10)

x [mm]	hmotnost sít [g]	1. měření	2. měření	m1 [g]	m2 [g]	m_průměr [g]
0	338,66	338,73	338,66	0,07	0	0,035
0,25	282,05	282,05	282,12	0	0,07	0,035
0,5	274,68	275,25	275,13	0,57	0,45	0,510
0,85	250,69	252,89	252,53	2,2	1,84	2,020
1	310,71	318,74	318,019	8,03	7,309	7,670
1,18	264,33	365,31	362,14	100,98	97,81	99,395
1,7	319,38	382,36	384,68	62,98	65,3	64,140
2	366,96	396,81	399,33	29,85	32,37	31,110
2,8	345,98	346,22	346,26	0,24	0,28	0,260
4	402,86	402,86	402,86	0	0	0
				∑ 204,92	∑ 205,43	∑ 205,175

Tab. 4: Naměřené hodnoty (LWA 0-2)

x [mm]	hmotnost sít [g]	1. měření	2. měření	m1 [g]	m2 [g]	m_průměr [g]
0	338,66	338,66	338,66	0	0	0,000
0,5	274,68	274,68	274,79	0	0,11	0,055
1	310,71	311,53	311,48	0,82	0,77	0,795
1,4	322,22	334,72	329,23	12,5	7,01	9,755
2	367,19	390,86	382,18	23,67	14,99	19,330
2,36	399,12	433,71	429,23	34,59	30,11	32,350
2,8	346,21	413,33	413,38	67,12	67,17	67,145
3,35	403,51	460,68	468,87	57,17	65,36	61,265
4	402,86	414,92	419,57	12,06	16,71	14,385
				∑ 207,93	∑ 202,23	∑ 205,080

Tab. 5: Naměřené hodnoty (LWA 1/4)

Příloha B – Hustoty pravděpodobnosti jednotlivých materiálů zjištěné 4 metodami

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0	0,000960776	-	0	-
0,01	0,001318573	8,4143E-66	1,2427E-06	5,983E-06
0,02	0,001798235	1,67055E-44	1,96262E-05	7,25483E-05
0,03	0,002436963	5,63119E-34	9,8604E-05	0,000312288
0,04	0,003281794	2,26919E-27	0,000309958	0,000879695
0,05	0,004391712	9,6664E-23	0,000753567	0,001964275
0,06	0,005840049	2,80119E-19	0,00155724	0,003786547
0,07	0,007717192	1,4115E-16	0,002876582	0,006595244
0,08	0,010133564	2,10889E-14	0,004894849	0,010665148
0,09	0,013222854	1,29924E-12	0,007822794	0,016295255
0,1	0,017145428	4,09894E-11	0,011898454	0,023807095
0,11	0,022091823	7,68721E-10	0,017386862	0,033543086

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0,12	0,028286219	9,53359E-09	0,024579645	0,045864801
0,13	0,035989711	8,45692E-08	0,033794453	0,061151067
0,14	0,045503198	5,69335E-07	0,045374183	0,079795793
0,15	0,057169659	3,04488E-06	0,05968591	0,102205445
0,16	0,071375537	1,34093E-05	0,077119475	0,128796062
0,17	0,088550963	5,0039E-05	0,098085626	0,159989736
0,18	0,10916849	0,000161932	0,123013634	0,196210452
0,19	0,133740033	0,000463138	0,152348262	0,237879199
0,2	0,16281172	0,001189183	0,186545994	0,285408271
0,21	0,196956361	0,002777391	0,226070389	0,339194657
0,22	0,236763347	0,005965781	0,271386443	0,399612476
0,23	0,282825812	0,011896207	0,322953832	0,467004377
0,24	0,335725033	0,022199352	0,381218922	0,541671883
0,25	0,396012159	0,039035297	0,446605431	0,623864666
0,26	0,464187484	0,065065834	0,51950365	0,71376879
0,27	0,540677684	0,103343704	0,600258171	0,811493973
0,28	0,625811551	0,157117797	0,689154087	0,917060016
0,29	0,719794986	0,229568829	0,786401699	1,030382558
0,3	0,82268612	0,323503531	0,892119814	1,151258429
0,31	0,934371613	0,441044007	1,006317828	1,279350914
0,32	1,054545232	0,583351072	1,128876842	1,41417536
0,33	1,182689936	0,750416022	1,259530221	1,555085609
0,34	1,318064617	0,940945762	1,397844096	1,70126187
0,35	1,459696659	1,152353632	1,54319847	1,851700696
0,36	1,606381293	1,380855067	1,694769732	2,005207842
0,37	1,756688563	1,621655419	1,851515524	2,160394821
0,38	1,90897843	1,869208414	2,012163065	2,315680044
0,39	2,061424249	2,117518589	2,175202132	2,469295417
0,4	2,212044459	2,360459612	2,338884008	2,61929927
0,41	2,358741967	2,592082257	2,501227734	2,763596407
0,42	2,499350294	2,806890111	2,660034968	2,899965909
0,43	2,631685179	3,000066815	2,812914658	3,026097177
0,44	2,753599997	3,167644989	2,957318488	3,139634368
0,45	2,863043076	3,306613054	3,090587748	3,238229076
0,46	2,958114795	3,414961444	3,210011807	3,319600649
0,47	3,037122273	3,491673856	3,312897763	3,381603088
0,48	3,098629432	3,536672065	3,396650153	3,42229689
0,49	3,141500392	3,550724439	3,458858792	3,440023663
0,5	3,164934355	3,535328816	3,497391942	3,433480757
0,51	3,168490481	3,492580067	3,510491143	3,401792659
0,52	3,152101681	3,425031596	3,49686325	3,344575434
0,53	3,116076723	3,335558653	3,455764564	3,26199025
0,54	3,061090556	3,227229652	3,387071522	3,154781912
0,55	2,98816328	3,103190036	3,291332379	3,024298508
0,56	2,89862867	2,966561628	3,169794616	2,872488739
0,57	2,794093622	2,820359023	3,024403652	2,701874278
0,58	2,676390233	2,667423388	2,85776972	2,515495628
0,59	2,547522511	2,510373105	2,67310157	2,316831404
0,6	2,409609885	2,351570037	2,474107784	2,109692584
0,61	2,264829711	2,193099702	2,264868915	1,898095188
0,62	2,11536095	2,036763413	2,049686082	1,686116633
0,63	1,963331	1,884080327	1,832913906	1,477742782
0,64	1,81076744	1,736297364	1,618787479	1,27671409

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0,65	1,659556112	1,594405092	1,411254145	1,08638012
0,66	1,511406611	1,45915783	1,213821104	0,909571941
0,67	1,367825845	1,331096471	1,02942906	0,748501304
0,68	1,230099962	1,210572718	0,860360349	0,604694025
0,69	1,099284531	1,097773688	0,708187307	0,47896275
0,7	0,976202555	0,992746052	0,573763325	0,371421274
0,71	0,861449602	0,895419084	0,457255444	0,281539193
0,72	0,755405116	0,805626158	0,358213842	0,20823216
0,73	0,658248806	0,72312441	0,275670582	0,149979797
0,74	0,569980962	0,647612383	0,208257878	0,104960842
0,75	0,490445475	0,578745609	0,154335162	0,071193647
0,76	0,419354421	0,516150119	0,112114351	0,046670053
0,77	0,356313134	0,45943398	0,079774074	0,029471928
0,78	0,300844827	0,408196974	0,055555713	0,017862162
0,79	0,252413964	0,36203855	0,037836844	0,010345351
0,8	0,210447765	0,320564244	0,025180467	0,005697257
0,81	0,174355387	0,283390717	0,016360978	0,002965793
0,82	0,143544493	0,25014958	0,010369927	0,001449251
0,83	0,11743507	0,220490199	0,006405865	0,00065925
0,84	0,0954705	0,194081604	0,003853188	0,000276357
0,85	0,07712598	0,170613665	0,002254748	0,000105443
0,86	0,061914491	0,149797665	0,001282319	3,6056E-05
0,87	0,049390569	0,131366376	0,000708091	1,0835E-05
0,88	0,039152173	0,115073756	0,000379264	2,78959E-06
0,89	0,030840955	0,100694338	0,000196837	5,94919E-07
0,9	0,024141256	0,088022406	9,88852E-05	1,00354E-07
0,91	0,018778117	0,076871001	4,80337E-05	1,25403E-08
0,92	0,014514575	0,067070829	2,25358E-05	1,05288E-09
0,93	0,011148507	0,058469106	1,02006E-05	5,08788E-11
0,94	0,00850921	0,050928374	4,44943E-06	1,08288E-12
0,95	0,006453894	0,044325316	1,8681E-06	5,9957E-15
0,96	0,004864235	0,038549599	7,5403E-07	2,38285E-18
0,97	0,003643069	0,033502749	2,9224E-07	4,24832E-25
0,98	0,002711317	0,029097082	1,0862E-07	-
0,99	0,00200518	0,025254688	3,86674E-08	-
1	0,001473624	0,021906486	1,31667E-08	-
1,01	0,001076168	0,018991334	4,2828E-09	-
1,02	0,000780968	0,016455218	1,32895E-09	-
1,03	0,000563179	0,014250496	3,92838E-10	-
1,04	0,000403571	0,012335216	1,10467E-10	-
1,05	0,000287378	0,010672489	2,95081E-11	-
1,06	0,000203352	0,009229925	7,47651E-12	-
1,07	0,000142989	0,007979118	1,79414E-12	-
1,08	9,99116E-05	0,006895191	4,07144E-13	-
1,09	6,9373E-05	0,005956379	8,72374E-14	-
1,1	4,78657E-05	0,005143664	1,7621E-14	-
1,11	3,28185E-05	0,004440442	3,34989E-15	-
1,12	2,23601E-05	0,003832233	5,98397E-16	-
1,13	1,51387E-05	0,003306423	1,00272E-16	-
1,14	1,0185E-05	0,002852027	1,5735E-17	-
1,15	6,80922E-06	0,002459493	2,30831E-18	-
1,16	4,52369E-06	0,002120516	3,16005E-19	-
1,17	2,9864E-06	0,001827885	4,02986E-20	-

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
1,18	1,95913E-06	0,001575341	4,77846E-21	-
1,19	1,27714E-06	0,001357455	5,25873E-22	-
1,2	8,2732E-07	0,001169519	5,36105E-23	-
1,21	5,32561E-07	0,001007458	5,05312E-24	-
1,22	3,40663E-07	0,000867741	4,39504E-25	-
1,23	2,16541E-07	0,000747313	3,52044E-26	-
1,24	1,36778E-07	0,000643532	2,5917E-27	-
1,25	8,58524E-08	0,000554111	1,75E-28	-
1,26	5,35486E-08	0,000477078	1,08155E-29	-
1,27	3,31898E-08	0,000410726	6,10515E-31	-
1,28	2,04419E-08	0,000353581	3,14087E-32	-
1,29	1,25112E-08	0,000304372	1,46946E-33	-
1,3	7,60911E-09	0,000262002	6,2382E-35	-
1,31	4,59865E-09	0,000225524	2,39758E-36	-
1,32	2,76177E-09	0,000194121	8,32346E-38	-
1,33	1,64818E-09	0,000167089	2,60402E-39	-
1,34	9,7742E-10	0,000143822	7,32437E-41	-
1,35	5,75994E-10	0,000123795	1,84774E-42	-
1,36	3,37299E-10	0,000106558	4,17062E-44	-
1,37	1,96278E-10	9,1724E-05	8,40191E-46	-
1,38	1,13498E-10	7,89572E-05	1,50691E-47	-
1,39	6,5218E-11	6,79699E-05	2,40007E-49	-
1,4	3,72396E-11	5,85142E-05	3,38586E-51	-

Tab. 6: Hodnoty hustoty pravděpodobnosti (písek 01-06)

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0	0,036330905		0	-
0,01	0,040586666	5,96886E-26	0,000273068	0,000803806
0,02	0,045266619	4,29572E-18	0,001255256	0,003109967
0,03	0,050403447	3,61433E-14	0,003063657	0,006862299
0,04	0,056031202	1,10259E-11	0,00576991	0,012031474
0,05	0,062185217	6,27647E-10	0,009427626	0,018596716
0,06	0,068902008	1,31983E-08	0,01408	0,026541339
0,07	0,076219153	1,44806E-07	0,019763171	0,035850796
0,08	0,084175144	1,00932E-06	0,026508005	0,046511613
0,09	0,092809221	5,04922E-06	0,034341125	0,058510712
0,1	0,102161181	1,9645E-05	0,04328554	0,071834928
0,11	0,112271155	6,28321E-05	0,053361039	0,086470651
0,12	0,123179373	0,000171887	0,064584426	0,102403532
0,13	0,134925893	0,000414149	0,07696966	0,11961824
0,14	0,147550309	0,000898545	0,090527917	0,138098249
0,15	0,161091439	0,001785789	0,105267608	0,157825652
0,16	0,17558698	0,003295169	0,121194357	0,17878099
0,17	0,191073154	0,00570635	0,138310945	0,200943098
0,18	0,20758432	0,009355365	0,156617246	0,224288963
0,19	0,225152582	0,014624841	0,176110137	0,248793592
0,2	0,24380737	0,021929277	0,196783398	0,274429891
0,21	0,263575015	0,031696747	0,21862761	0,301168548

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0,22	0,284478313	0,044348671	0,241630047	0,328977935
0,23	0,30653608	0,060279363	0,265774559	0,357824007
0,24	0,329762713	0,079836902	0,291041465	0,387670214
0,25	0,354167746	0,103306552	0,317407443	0,418477427
0,26	0,37975542	0,130897633	0,344845428	0,450203862
0,27	0,406524258	0,162734344	0,373324516	0,482805021
0,28	0,434466669	0,198850697	0,402809872	0,516233642
0,29	0,46356856	0,239189418	0,433262657	0,550439652
0,3	0,493808995	0,28360448	0,46463996	0,585370134
0,31	0,525159869	0,331866725	0,49689475	0,62096931
0,32	0,557585637	0,383671989	0,529975836	0,657178525
0,33	0,591043082	0,438651084	0,563827851	0,693936247
0,34	0,625481127	0,496381014	0,598391254	0,731178078
0,35	0,660840718	0,556396844	0,63360235	0,768836778
0,36	0,697054751	0,618203703	0,669393331	0,8068423
0,37	0,734048069	0,681288504	0,705692344	0,84512184
0,38	0,771737533	0,745131004	0,742423578	0,883599896
0,39	0,81003215	0,809213977	0,779507385	0,922198345
0,4	0,848833288	0,87303228	0,816860414	0,960836534
0,41	0,888034956	0,936100724	0,854395785	0,999431382
0,42	0,927524164	0,99796068	0,892023283	1,037897501
0,43	0,967181356	1,058185427	0,929649584	1,07614733
0,44	1,006880923	1,116384277	0,967178503	1,11409128
0,45	1,046491779	1,172205543	1,004511281	1,151637908
0,46	1,085878018	1,225338448	1,041546888	1,188694089
0,47	1,124899632	1,275514077	1,078182363	1,22516522
0,48	1,16341329	1,322505485	1,114313173	1,260955429
0,49	1,201273173	1,366127081	1,149833608	1,295967806
0,5	1,238331866	1,406233401	1,184637189	1,330104649
0,51	1,274441284	1,442717386	1,218617103	1,363267724
0,52	1,309453639	1,475508264	1,251666667	1,395358544
0,53	1,343222427	1,504569136	1,283679799	1,426278662
0,54	1,375603444	1,529894349	1,31455151	1,455929979
0,55	1,406455795	1,551506737	1,344178415	1,484215067
0,56	1,435642913	1,56945479	1,372459247	1,51103751
0,57	1,463033561	1,583809824	1,399295383	1,536302254
0,58	1,488502808	1,594663172	1,424591374	1,559915975
0,59	1,511932979	1,602123466	1,448255477	1,581787453
0,6	1,533214559	1,606314018	1,470200176	1,601827968
0,61	1,552247044	1,607370337	1,490342712	1,619951696
0,62	1,56893973	1,605437794	1,50860558	1,636076123
0,63	1,583212435	1,600669453	1,524917033	1,650122463
0,64	1,594996139	1,593224065	1,539211547	1,662016084
0,65	1,604233542	1,583264241	1,551430278	1,671686941
0,66	1,610879524	1,570954799	1,561521478	1,679070013
0,67	1,614901517	1,556461275	1,569440885	1,684105739
0,68	1,616279765	1,539948609	1,575152079	1,686740462
0,69	1,615007494	1,521579981	1,578626791	1,686926863
0,7	1,611090958	1,501515809	1,579845176	1,684624395
0,71	1,604549395	1,47991288	1,578796029	1,679799715
0,72	1,595414865	1,45692362	1,575476961	1,672427102
0,73	1,583731992	1,432695486	1,569894515	1,662488863
0,74	1,569557598	1,407370469	1,56206423	1,649975734

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0,75	1,552960244	1,381084706	1,552010648	1,634887254
0,76	1,534019678	1,353968179	1,539767259	1,617232123
0,77	1,512826195	1,326144502	1,525376393	1,597028541
0,78	1,489479922	1,297730784	1,508889047	1,574304513
0,79	1,46409003	1,268837558	1,490364655	1,549098131
0,8	1,436773885	1,239568765	1,469870797	1,521457815
0,81	1,407656144	1,210021794	1,447482857	1,491442521
0,82	1,376867813	1,180287561	1,42328362	1,459121911
0,83	1,344545263	1,150450634	1,397362817	1,424576464
0,84	1,310829235	1,120589376	1,369816623	1,38789755
0,85	1,275863823	1,090776128	1,340747109	1,349187445
0,86	1,239795455	1,061077402	1,310261651	1,308559282
0,87	1,202771888	1,031554102	1,278472302	1,266136947
0,88	1,164941215	1,002261744	1,245495131	1,222054898
0,89	1,126450895	0,9732507	1,211449543	1,176457915
0,9	1,087446828	0,944566439	1,176457564	1,129500773
0,91	1,04807246	0,916249773	1,140643125	1,081347832
0,92	1,00846795	0,888337105	1,104131334	1,032172534
0,93	0,968769381	0,860860682	1,067047736	0,982156814
0,94	0,929108043	0,833848831	1,029517593	0,931490413
0,95	0,889609779	0,807326208	0,99166516	0,880370088
0,96	0,850394394	0,781314032	0,953612989	0,828998717
0,97	0,811575152	0,75583031	0,915481245	0,777584295
0,98	0,77325833	0,730890067	0,877387062	0,726338818
0,99	0,735542862	0,706505555	0,839443921	0,675477046
1	0,698520049	0,682686461	0,801761077	0,625215156
1,01	0,662273348	0,659440106	0,764443021	0,575769264
1,02	0,626878237	0,636771634	0,727588998	0,527353832
1,03	0,592402143	0,614684191	0,691292569	0,480179951
1,04	0,558904441	0,593179096	0,65564123	0,434453498
1,05	0,526436524	0,572256006	0,620716087	0,390373182
1,06	0,495041921	0,551913064	0,586591592	0,348128466
1,07	0,464756481	0,532147048	0,553335332	0,307897382
1,08	0,435608599	0,512953503	0,521007882	0,269844249
1,09	0,407619494	0,494326873	0,489662715	0,23411729
1,1	0,380803525	0,476260613	0,459346172	0,200846181
1,11	0,355168537	0,458747307	0,430097488	0,170139538
1,12	0,330716243	0,441778769	0,401948869	0,142082363
1,13	0,307442623	0,425346137	0,374925628	0,116733494
1,14	0,285338347	0,409439967	0,349046361	0,094123081
1,15	0,264389204	0,394050312	0,324323173	0,074250135
1,16	0,244576545	0,379166802	0,300761946	0,05708023
1,17	0,225877726	0,364778708	0,27836264	0,042543402
1,18	0,208266549	0,350875017	0,257119627	0,030532382
1,19	0,191713699	0,337444481	0,237022055	0,020901266
1,2	0,176187172	0,324475679	0,218054231	0,013464818
1,21	0,16165269	0,311957061	0,20019602	0,007998647
1,22	0,148074099	0,299876999	0,183423267	0,004240638
1,23	0,135413753	0,288223821	0,167708211	0,001894176
1,24	0,123632873	0,276985856	0,153019918	0,000634152
1,25	0,11269189	0,266151461	0,1393247	0,000117533
1,26	0,102550758	0,255709054	0,126586538	2,9275E-06
1,27	0,09316925	0,245647139	0,11476749	-

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
1,28	0,084507224	0,235954334	0,103828092	-
1,29	0,076524867	0,226619387	0,093727735	-
1,3	0,069182914	0,217631198	0,084425031	-
1,31	0,062442837	0,208978835	0,075878155	-
1,32	0,056267019	0,200651546	0,068045161	-
1,33	0,050618901	0,192638774	0,060884282	-
1,34	0,045463097	0,184930167	0,054354193	-
1,35	0,040765507	0,177515584	0,048414257	-
1,36	0,036493388	0,170385107	0,043024741	-
1,37	0,032615424	0,163529041	0,038147001	-
1,38	0,029101769	0,156937925	0,033743647	-
1,39	0,025924075	0,150602528	0,029778681	-
1,4	0,023055506	0,144513859	0,026217604	-
1,41	0,02047074	0,138663163	0,023027507	-
1,42	0,018145961	0,133041923	0,020177132	-
1,43	0,016058829	0,127641862	0,01763692	-
1,44	0,014188462	0,122454938	0,015379035	-
1,45	0,012515387	0,117473347	0,013377365	-
1,46	0,011021501	0,112689517	0,011607517	-
1,47	0,009690021	0,108096107	0,010046794	-
1,48	0,008505428	0,103686006	0,008674155	-
1,49	0,007453413	0,099452326	0,007470168	-
1,5	0,006520812	0,095388402	0,006416957	-
1,51	0,005695551	0,091487785	0,005498137	-
1,52	0,004966578	0,08774424	0,004698741	-
1,53	0,004323807	0,084151741	0,004005152	-
1,54	0,003758053	0,080704464	0,003405023	-
1,55	0,003260971	0,077396788	0,002887197	-
1,56	0,002825	0,074223286	0,002441632	-
1,57	0,002443305	0,071178719	0,002059317	-
1,58	0,002109717	0,068258036	0,001732197	-
1,59	0,001818689	0,065456366	0,001453096	-
1,6	0,001565237	0,062769011	0,001215643	-
1,61	0,001344897	0,060191446	0,001014201	-
1,62	0,001153681	0,05771931	0,000843802	-
1,63	0,00098803	0,055348404	0,000700079	-
1,64	0,000844776	0,053074684	0,00057921	-
1,65	0,000721109	0,050894257	0,000477857	-
1,66	0,000614536	0,048803377	0,00039312	-
1,67	0,000522856	0,04679844	0,000322485	-
1,68	0,000444123	0,044875976	0,00026378	-
1,69	0,000376628	0,043032652	0,000215137	-
1,7	0,000318867	0,04126526	0,000174952	-
1,71	0,000269522	0,039570717	0,000141856	-
1,72	0,000227439	0,03794606	0,000114681	-
1,73	0,000191613	0,036388441	9,24362E-05	-
1,74	0,000161165	0,034895123	7,42832E-05	-
1,75	0,000135334	0,033463476	5,95153E-05	-
1,76	0,000113456	0,032090977	4,75388E-05	-
1,77	9,49592E-05	0,030775198	3,78565E-05	-
1,78	7,93476E-05	0,029513812	3,00537E-05	-
1,79	6,6194E-05	0,028304581	2,37854E-05	-
1,8	5,51303E-05	0,027145359	1,87659E-05	-

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
1,81	4,58405E-05	0,026034085	1,47594E-05	-
1,82	3,80537E-05	0,024968781	1,15717E-05	-
1,83	3,15378E-05	0,023947548	9,04374E-06	-
1,84	2,60947E-05	0,022968566	7,0455E-06	-
1,85	2,15557E-05	0,022030086	5,47116E-06	-
1,86	1,7777E-05	0,021130431	4,2349E-06	-
1,87	1,46367E-05	0,020267994	3,26734E-06	-
1,88	1,20314E-05	0,01944123	2,5126E-06	-
1,89	9,87359E-06	0,01864866	1,92585E-06	-
1,9	8,08951E-06	0,017888864	1,47124E-06	-
1,91	6,61693E-06	0,017160482	1,1202E-06	-
1,92	5,40355E-06	0,016462209	8,50064E-07	-
1,93	4,40543E-06	0,015792792	6,429E-07	-
1,94	3,58579E-06	0,015151031	4,84575E-07	-
1,95	2,91387E-06	0,014535777	3,63996E-07	-
1,96	2,36397E-06	0,013945926	2,72484E-07	-
1,97	1,9147E-06	0,013380421	2,03275E-07	-
1,98	1,54828E-06	0,012838249	1,51119E-07	-
1,99	1,24992E-06	0,012318437	1,11953E-07	-
2	1,00741E-06	0,011820055	8,26473E-08	-

Tab. 7: Hodnoty hustoty pravděpodobnosti (písek 03-30)

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0	9,66867E-07	-	0	-
0,01	1,37017E-06	1,0521E-109	2,98488E-11	4,0981E-08
0,02	1,93366E-06	5,04408E-78	1,85043E-09	7,67149E-07
0,03	2,71755E-06	5,42801E-62	2,06885E-08	4,25722E-06
0,04	3,80339E-06	9,74215E-52	1,14715E-07	1,43607E-05
0,05	5,30101E-06	1,99951E-44	4,33137E-07	3,68778E-05
0,06	7,35768E-06	7,23074E-39	1,28255E-06	7,96935E-05
0,07	1,01699E-05	1,84646E-34	3,21128E-06	0,000152887
0,08	1,39988E-05	7,36886E-31	7,11157E-06	0,000268827
0,09	1,91892E-05	7,52998E-28	1,43394E-05	0,00044225
0,1	2,61949E-05	2,72978E-25	2,68517E-05	0,000690334
0,11	3,561E-05	4,39923E-23	4,73615E-05	0,001032768
0,12	4,82084E-05	3,70578E-21	7,95097E-05	0,001491805
0,13	6,49931E-05	1,83939E-19	0,000128055	0,002092325
0,14	8,72584E-05	5,89149E-18	0,000199078	0,002861878
0,15	0,000116665	1,30649E-16	0,00030021	0,003830734
0,16	0,000155335	2,12041E-15	0,000440867	0,005031925
0,17	0,000205965	2,63319E-14	0,000632512	0,006501281
0,18	0,000271964	2,59399E-13	0,000888927	0,008277466
0,19	0,000357622	2,08815E-12	0,001226504	0,010402009
0,2	0,000468308	1,40786E-11	0,001664553	0,012919322
0,21	0,000610709	8,11592E-11	0,002225621	0,015876728
0,22	0,000793105	4,07078E-10	0,002935837	0,019324469
0,23	0,001025704	1,80321E-09	0,003825261	0,023315715
0,24	0,001321017	7,14479E-09	0,004928256	0,027906565

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0,25	0,001694295	2,56037E-08	0,006283865	0,033156035
0,26	0,002164035	8,37812E-08	0,007936214	0,039126044
0,27	0,002752545	2,52442E-07	0,009934911	0,045881383
0,28	0,003486575	7,05568E-07	0,012335465	0,053489671
0,29	0,004398032	1,84118E-06	0,015199712	0,062021308
0,3	0,005524746	4,51159E-06	0,018596236	0,071549398
0,31	0,00691132	1,04342E-05	0,022600809	0,082149663
0,32	0,008610022	2,28802E-05	0,027296807	0,093900339
0,33	0,010681745	4,77653E-05	0,032775638	0,106882045
0,34	0,013196987	9,5282E-05	0,039137144	0,121177631
0,35	0,01623686	0,000182218	0,046489986	0,136871998
0,36	0,019894083	0,000335086	0,054952	0,154051893
0,37	0,024273952	0,000594133	0,064650511	0,172805661
0,38	0,029495223	0,001018225	0,075722599	0,193222973
0,39	0,035690903	0,001690498	0,088315292	0,21539451
0,4	0,043008872	0,002724501	0,102585685	0,239411597
0,41	0,0516123	0,004270489	0,118700952	0,265365805
0,42	0,06167981	0,006521313	0,136838235	0,293348487
0,43	0,073405313	0,009717337	0,157184385	0,323450269
0,44	0,086997468	0,014149724	0,17993553	0,355760473
0,45	0,102678706	0,020161441	0,205296434	0,390366484
0,46	0,120683755	0,028145446	0,233479611	0,427353041
0,47	0,141257623	0,038539628	0,264704165	0,466801455
0,48	0,164652991	0,051818293	0,299194307	0,508788747
0,49	0,191126986	0,068480212	0,337177501	0,553386698
0,5	0,220937303	0,08903351	0,378882207	0,600660815
0,51	0,254337699	0,113977913	0,424535157	0,650669192
0,52	0,29157285	0,143785109	0,474358121	0,703461273
0,53	0,332872623	0,178878119	0,528564117	0,759076503
0,54	0,378445833	0,219610718	0,587353016	0,81754287
0,55	0,428473562	0,266247956	0,650906498	0,878875323
0,56	0,483102167	0,318948813	0,71938233	0,943074063
0,57	0,54243611	0,377751904	0,79290794	1,010122713
0,58	0,606530792	0,442565004	0,871573287	1,079986339
0,59	0,675385555	0,513158938	0,955423022	1,152609339
0,6	0,748937082	0,589166179	1,044447999	1,22791319
0,61	0,827053405	0,670084211	1,13857619	1,30579404
0,62	0,909528739	0,755283533	1,237663119	1,386120158
0,63	0,996079384	0,844019901	1,341481958	1,468729231
0,64	1,086340898	0,935450287	1,449713499	1,55342551
0,65	1,179866746	1,028651842	1,561936249	1,63997681
0,66	1,276128609	1,122643067	1,67761698	1,728111368
0,67	1,374518475	1,216406371	1,796102124	1,817514559
0,68	1,474352639	1,308911147	1,916610465	1,90782549
0,69	1,57487763	1,399136566	2,038227663	1,998633483
0,7	1,675278094	1,486093337	2,159903183	2,089474454
0,71	1,774686551	1,568843795	2,280450282	2,17982723
0,72	1,872194906	1,646519772	2,398549714	2,26910982
0,73	1,966867542	1,718337852	2,51275782	2,356675681
0,74	2,057755734	1,783611727	2,621519672	2,441810035
0,75	2,143913113	1,84176151	2,723187824	2,523726276
0,76	2,224411816	1,892319961	2,816047161	2,601562572
0,77	2,298358965	1,934935713	2,898346094	2,674378719

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0,78	2,36491305	1,969373653	2,968334179	2,741153392
0,79	2,423299816	1,995512701	3,024305861	2,800781914
0,8	2,472827226	2,013341283	3,064649737	2,852074727
0,81	2,512899101	2,022950825	3,087902261	2,893756802
0,82	2,543027058	2,024527636	3,092804377	2,924468243
0,83	2,562840416	2,018343524	3,078359069	2,942766648
0,84	2,572093786	2,004745515	3,04388738	2,947130482
0,85	2,570672129	1,984145017	2,989080013	2,935967626
0,86	2,558593137	1,957006721	2,914041355	2,907624005
0,87	2,536006868	1,923837548	2,819322619	2,860399261
0,88	2,503192638	1,885175868	2,705940849	2,792567414
0,89	2,460553278	1,841581203	2,575380855	2,702405763
0,9	2,408606902	1,793624588	2,429577763	2,58823484
0,91	2,347976428	1,741879712	2,270878704	2,44847383
0,92	2,279377157	1,686914927	2,101983384	2,281718297
0,93	2,203602739	1,629286202	1,92586462	2,086851209
0,94	2,121509928	1,569531034	1,745671459	1,863205994
0,95	2,034002517	1,508163321	1,564619041	1,610815786
0,96	1,942014896	1,445669189	1,38587074	1,330816799
0,97	1,846495613	1,382503709	1,212419237	1,026157778
0,98	1,74839138	1,319088489	1,04697383	0,703016968
0,99	1,64863185	1,255810027	0,89186131	0,37431086
1	1,548115532	1,1930188	0,748947186	0,073667542
1,01	1,447697095	1,131028984	0,619582687	-
1,02	1,348176308	1,070118724	0,504581141	-
1,03	1,250288774	1,010530896	0,404224947	-
1,04	1,154698563	0,952474267	0,318301841	-
1,05	1,061992799	0,896124975	0,24616665	-
1,06	0,972678176	0,841628283	0,18682265	-
1,07	0,887179348	0,789100514	0,139015122	-
1,08	0,805839087	0,738631128	0,101329072	-
1,09	0,728920035	0,690284891	0,072283275	-
1,1	0,656607892	0,644104069	0,050413876	-
1,11	0,589015824	0,600110639	0,034342485	-
1,12	0,526189865	0,55830845	0,022825867	-
1,13	0,468115098	0,518685337	0,014786471	-
1,14	0,414722379	0,481215148	0,009325113	-
1,15	0,365895398	0,445859663	0,00571859	-
1,16	0,321477865	0,412570411	0,003405993	-
1,17	0,28128065	0,381290359	0,001967773	-
1,18	0,245088701	0,35195547	0,001101336	-
1,19	0,212667623	0,324496133	0,000596342	-
1,2	0,183769789	0,298838468	0,000311961	-
1,21	0,158139918	0,274905485	0,000157438	-
1,22	0,135520051	0,252618139	7,65391E-05	-
1,23	0,115653893	0,231896245	3,57892E-05	-
1,24	0,098290514	0,212659289	1,60705E-05	-
1,25	0,083187411	0,194827132	6,9184E-06	-
1,26	0,070112954	0,178320605	2,85067E-06	-
1,27	0,058848253	0,16306202	1,12227E-06	-
1,28	0,049188496	0,14897559	4,21379E-07	-
1,29	0,040943801	0,135987774	1,50616E-07	-
1,3	0,033939655	0,124027552	5,11511E-08	-

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
1,31	0,028016982	0,113026636	1,6473E-08	-
1,32	0,023031908	0,102919623	5,02036E-09	-
1,33	0,018855287	0,09364411	1,44489E-09	-
1,34	0,015372023	0,085140747	3,91857E-10	-
1,35	0,012480258	0,077353274	9,99196E-11	-
1,36	0,010090455	0,070228509	2,39004E-11	-
1,37	0,008124424	0,063716321	5,35011E-12	-
1,38	0,00651432	0,057769573	1,11807E-12	-
1,39	0,005201639	0,052344048	2,17588E-13	-
1,4	0,004136243	0,047398367	3,93314E-14	-
1,41	0,003275416	0,042893882	6,58614E-15	-
1,42	0,002582983	0,038794576	1,01888E-15	-
1,43	0,002028483	0,03506694	1,45212E-16	-
1,44	0,001586411	0,031679863	1,90111E-17	-
1,45	0,001235534	0,028604502	2,27958E-18	-
1,46	0,000958271	0,025814166	2,49584E-19	-
1,47	0,000740145	0,02328419	2,48732E-20	-
1,48	0,000569298	0,020991819	2,24907E-21	-
1,49	0,000436071	0,018916085	1,83904E-22	-
1,5	0,000332637	0,017037698	1,35525E-23	-
1,51	0,000252684	0,015338929	8,96966E-25	-
1,52	0,000191152	0,013803509	5,31251E-26	-
1,53	0,000144004	0,012416523	2,8054E-27	-
1,54	0,000108035	0,011164316	1,31589E-28	-
1,55	8,07145E-05	0,010034395	5,46127E-30	-

Tab. 8: Hodnoty hustoty pravděpodobnosti (písek 05-10)

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0	0,000205509	-	0	-
0,01	0,000226242	5,0341E-120	4,31355E-10	2,75145E-09
0,02	0,000248929	4,16441E-90	8,94822E-09	4,36253E-08
0,03	0,00027374	1,32353E-74	5,2732E-08	2,19683E-07
0,04	0,000300859	1,68294E-64	1,85626E-07	6,91696E-07
0,05	0,000330481	3,5661E-57	4,92703E-07	1,68378E-06
0,06	0,00036282	1,60845E-51	1,09389E-06	3,48316E-06
0,07	0,000398104	5,67903E-47	2,14706E-06	6,43996E-06
0,08	0,000436578	3,32252E-43	3,85069E-06	1,09671E-05
0,09	0,000478507	5,14712E-40	6,44634E-06	1,75401E-05
0,1	0,000524173	2,88219E-37	1,02208E-05	2,6697E-05
0,11	0,000573881	7,24311E-35	1,55083E-05	3,90382E-05
0,12	0,000627957	9,54914E-33	2,26922E-05	5,52267E-05
0,13	0,000686749	7,41686E-31	3,22069E-05	7,59875E-05
0,14	0,000750632	3,70741E-29	4,45395E-05	0,000102108
0,15	0,000820005	1,27752E-27	6,02315E-05	0,000134437
0,16	0,000895295	3,20441E-26	7,98802E-05	0,000173886
0,17	0,00097696	6,11253E-25	0,00010414	0,00022143
0,18	0,001065486	9,18921E-24	0,000133725	0,000278102
0,19	0,001161393	1,12124E-22	0,000169408	0,000345

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0,2	0,001265235	1,13798E-21	0,000212024	0,000423284
0,21	0,001377602	9,80721E-21	0,00026247	0,000514173
0,22	0,001499122	7,30369E-20	0,000321707	0,00061895
0,23	0,001630462	4,7712E-19	0,000390762	0,000738959
0,24	0,001772331	2,76951E-18	0,000470727	0,000875606
0,25	0,001925482	1,44452E-17	0,000562761	0,001030356
0,26	0,002090715	6,83632E-17	0,000668092	0,001204739
0,27	0,002268875	2,9608E-16	0,000788016	0,001400343
0,28	0,002460859	1,18236E-15	0,000923902	0,001618819
0,29	0,002667618	4,38263E-15	0,001077187	0,001861877
0,3	0,002890154	1,51683E-14	0,001249382	0,002131291
0,31	0,003129528	4,92769E-14	0,00144207	0,002428893
0,32	0,00338686	1,50977E-13	0,001656908	0,002756577
0,33	0,003663331	4,3811E-13	0,00189563	0,003116294
0,34	0,003960186	1,20871E-12	0,002160041	0,003510061
0,35	0,004278737	3,18149E-12	0,002452025	0,003939948
0,36	0,004620363	8,01446E-12	0,002773544	0,00440809
0,37	0,004986516	1,93773E-11	0,003126636	0,004916679
0,38	0,005378718	4,50834E-11	0,003513415	0,005467966
0,39	0,00579857	1,01176E-10	0,003936079	0,006064259
0,4	0,006247749	2,19496E-10	0,004396901	0,006707928
0,41	0,006728012	4,61241E-10	0,004898236	0,007401396
0,42	0,007241198	9,4055E-10	0,005442518	0,008147147
0,43	0,007789233	1,86435E-09	0,006032263	0,008947719
0,44	0,008374125	3,59784E-09	0,006670066	0,009805707
0,45	0,008997974	6,76949E-09	0,007358607	0,010723762
0,46	0,009662969	1,24352E-08	0,008100642	0,011704588
0,47	0,010371389	2,23293E-08	0,008899014	0,012750944
0,48	0,01112561	3,92395E-08	0,009756644	0,013865642
0,49	0,011928099	6,75568E-08	0,010676536	0,015051546
0,5	0,012781423	1,14064E-07	0,011661776	0,016311569
0,51	0,013688242	1,89045E-07	0,012715531	0,017648677
0,52	0,014651318	3,07828E-07	0,013841047	0,019065883
0,53	0,015673509	4,92865E-07	0,015041653	0,020566247
0,54	0,016757773	7,76538E-07	0,016320758	0,022152877
0,55	0,017907168	1,20483E-06	0,01768185	0,023828923
0,56	0,01912485	1,84209E-06	0,019128493	0,02559758
0,57	0,020414075	2,77712E-06	0,020664333	0,027462084
0,58	0,021778196	4,13087E-06	0,022293091	0,02942571
0,59	0,023220663	6,06589E-06	0,024018561	0,031491769
0,6	0,024745024	8,79806E-06	0,025844615	0,03366361
0,61	0,026354917	1,26107E-05	0,027775196	0,035944614
0,62	0,028054076	1,78712E-05	0,029814316	0,038338192
0,63	0,029846322	2,50514E-05	0,031966059	0,040847783
0,64	0,031735562	3,47501E-05	0,034234573	0,043476853
0,65	0,033725787	4,77203E-05	0,036624072	0,04622889
0,66	0,035821068	6,48993E-05	0,039138832	0,049107399
0,67	0,03802555	8,74426E-05	0,041783188	0,052115905
0,68	0,040343446	0,000116763	0,044561529	0,055257943
0,69	0,042779039	0,00015457	0,0474783	0,058537059
0,7	0,045336666	0,000202918	0,050537993	0,061956801
0,71	0,04802072	0,000264255	0,053745144	0,065520723
0,72	0,050835639	0,00034147	0,057104333	0,069232371

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0,73	0,053785899	0,000437954	0,060620175	0,073095287
0,74	0,056876008	0,000557648	0,064297315	0,077112999
0,75	0,060110497	0,000705108	0,068140428	0,081289018
0,76	0,063493907	0,000885559	0,072154208	0,085626832
0,77	0,067030788	0,001104947	0,076343362	0,090129901
0,78	0,070725678	0,001370004	0,080712609	0,094801652
0,79	0,074583103	0,001688289	0,085266668	0,099645471
0,8	0,078607559	0,002068244	0,090010253	0,104664698
0,81	0,082803501	0,002519232	0,094948066	0,109862622
0,82	0,087175334	0,003051576	0,100084787	0,115242469
0,83	0,091727397	0,003676584	0,105425068	0,120807403
0,84	0,096463952	0,004406573	0,110973521	0,126560509
0,85	0,101389168	0,005254873	0,116734712	0,132504793
0,86	0,10650711	0,006235833	0,122713148	0,13864317
0,87	0,111821721	0,007364802	0,128913269	0,144978459
0,88	0,117336809	0,008658107	0,135339435	0,151513369
0,89	0,123056032	0,010133015	0,141995915	0,158250494
0,9	0,128982879	0,011807679	0,148886877	0,165192306
0,91	0,135120661	0,013701077	0,156016372	0,172341139
0,92	0,141472485	0,015832927	0,163388323	0,179699184
0,93	0,148041247	0,018223605	0,171006512	0,187268478
0,94	0,15482961	0,020894029	0,178874562	0,195050892
0,95	0,161839986	0,02386555	0,186995926	0,203048123
0,96	0,169074525	0,027159821	0,195373871	0,211261681
0,97	0,176535093	0,030798659	0,204011459	0,219692878
0,98	0,184223256	0,034803893	0,212911534	0,228342817
0,99	0,192140267	0,039197214	0,222076704	0,23721238
1	0,200287042	0,044000005	0,23150932	0,246302217
1,01	0,208664154	0,049233181	0,241211464	0,255612731
1,02	0,217271806	0,054917012	0,251184923	0,26514407
1,03	0,226109823	0,061070951	0,261431177	0,274896109
1,04	0,235177633	0,067713466	0,271951373	0,284868444
1,05	0,244474255	0,074861864	0,282746309	0,295060372
1,06	0,253998282	0,082532126	0,293816411	0,305470883
1,07	0,263747867	0,090738747	0,305161714	0,316098645
1,08	0,273720713	0,09949458	0,316781838	0,32694199
1,09	0,28391406	0,10881069	0,328675968	0,337998904
1,1	0,294324671	0,118696218	0,340842833	0,34926701
1,11	0,304948826	0,12915826	0,353280682	0,360743556
1,12	0,315782307	0,140201752	0,36598726	0,372425406
1,13	0,326820396	0,151829373	0,378959791	0,384309019
1,14	0,338057862	0,164041466	0,392194951	0,396390445
1,15	0,349488958	0,176835965	0,405688845	0,408665304
1,16	0,361107417	0,190208349	0,41943699	0,42112878
1,17	0,372906444	0,204151606	0,433434285	0,433775609
1,18	0,384878719	0,218656214	0,447674998	0,44660006
1,19	0,397016392	0,233710145	0,462152736	0,459595935
1,2	0,409311087	0,249298875	0,476860431	0,472756546
1,21	0,421753902	0,265405422	0,491790315	0,486074716
1,22	0,434335413	0,282010393	0,506933904	0,499542762
1,23	0,447045679	0,299092049	0,522281974	0,513152489
1,24	0,45987425	0,316626387	0,53782455	0,526895181
1,25	0,472810176	0,33458723	0,553550885	0,540761594

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
1,26	0,485842012	0,352946338	0,569449444	0,554741949
1,27	0,498957838	0,371673526	0,585507893	0,568825927
1,28	0,512145265	0,390736796	0,601713085	0,583002665
1,29	0,525391454	0,410102476	0,618051047	0,597260752
1,3	0,538683133	0,429735372	0,634506976	0,611588224
1,31	0,552006614	0,449598923	0,651065227	0,625972569
1,32	0,565347811	0,469655367	0,667709313	0,640400722
1,33	0,578692267	0,489865909	0,684421896	0,654859071
1,34	0,592025172	0,510190893	0,701184795	0,669333456
1,35	0,605331393	0,530589976	0,717978983	0,683809179
1,36	0,618595494	0,551022309	0,734784595	0,698271005
1,37	0,631801769	0,571446706	0,751580938	0,712703176
1,38	0,644934267	0,591821828	0,768346498	0,727089417
1,39	0,657976827	0,612106347	0,785058963	0,74141295
1,4	0,670913104	0,632259124	0,801695233	0,755656509
1,41	0,683726607	0,65223937	0,81823145	0,769802352
1,42	0,696400729	0,672006805	0,834643021	0,783832285
1,43	0,708918784	0,691521819	0,850904646	0,797727678
1,44	0,721264041	0,710745612	0,866990357	0,81146949
1,45	0,733419762	0,729640342	0,882873556	0,825038292
1,46	0,745369239	0,748169248	0,898527052	0,838414296
1,47	0,757095829	0,766296784	0,913923117	0,851577385
1,48	0,768582995	0,783988726	0,929033532	0,864507141
1,49	0,779814345	0,801212281	0,943829643	0,877182884
1,5	0,790773667	0,817936182	0,958282427	0,889583706
1,51	0,80144497	0,834130776	0,972362551	0,901688512
1,52	0,811812524	0,849768097	0,986040446	0,91347606
1,53	0,821860894	0,864821935	0,99928638	0,924925005
1,54	0,831574984	0,879267891	1,012070538	0,936013946
1,55	0,840940069	0,893083425	1,024363104	0,946721475
1,56	0,849941836	0,906247893	1,036134347	0,957026226
1,57	0,858566418	0,918742571	1,047354715	0,966906929
1,58	0,86680043	0,93055068	1,05799493	0,976342467
1,59	0,874631006	0,941657388	1,068026085	0,985311928
1,6	0,882045829	0,952049818	1,077419745	0,99379467
1,61	0,889033165	0,961717033	1,086148057	1,001770378
1,62	0,895581893	0,970650029	1,094183851	1,009219124
1,63	0,901681537	0,978841703	1,101500757	1,016121436
1,64	0,907322288	0,986286834	1,108073309	1,02245836
1,65	0,91249504	0,992982036	1,113877065	1,028211527
1,66	0,917191403	0,998925725	1,118888717	1,033363215
1,67	0,921403736	1,004118067	1,123086207	1,037896423
1,68	0,92512516	1,008560923	1,126448839	1,041794935
1,69	0,928349582	1,012257798	1,128957394	1,045043387
1,7	0,931071709	1,015213776	1,130594242	1,047627337
1,71	0,933287062	1,017435452	1,13134345	1,04953333
1,72	0,934991989	1,018930871	1,13119089	1,050748964
1,73	0,936183678	1,019709452	1,13012434	1,051262956
1,74	0,936860159	1,019781918	1,128133588	1,051065206
1,75	0,937020313	1,019160219	1,125210518	1,050146856
1,76	0,936663877	1,017857457	1,121349204	1,048500352
1,77	0,935791439	1,01588781	1,116545992	1,046119503
1,78	0,934404442	1,013266455	1,11079957	1,04299953

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
1,79	0,932505176	1,010009487	1,104111037	1,039137121
1,8	0,930096774	1,006133846	1,096483959	1,034530476
1,81	0,927183203	1,001657238	1,087924422	1,029179354
1,82	0,923769253	0,996598056	1,078441061	1,023085107
1,83	0,919860523	0,990975311	1,068045097	1,01625072
1,84	0,915463406	0,984808553	1,056750348	1,008680835
1,85	0,910585074	0,978117801	1,044573231	1,000381779
1,86	0,905233455	0,970923471	1,03153276	0,991361581
1,87	0,899417213	0,963246312	1,01765052	0,981629983
1,88	0,893145726	0,955107332	1,002950636	0,971198448
1,89	0,886429057	0,946527741	0,987459723	0,96008016
1,9	0,879277932	0,937528884	0,971206829	0,948290014
1,91	0,871703708	0,928132187	0,954223356	0,935844603
1,92	0,863718345	0,918359095	0,936542976	0,922762199
1,93	0,855334371	0,908231022	0,918201528	0,90906272
1,94	0,846564856	0,897769296	0,899236903	0,894767697
1,95	0,83742337	0,886995117	0,879688918	0,879900228
1,96	0,827923954	0,875929504	0,859599175	0,86448493
1,97	0,818081082	0,864593255	0,839010908	0,848547878
1,98	0,807909624	0,85300691	0,817968826	0,832116538
1,99	0,79742481	0,841190708	0,796518932	0,815219697
2	0,786642192	0,829164559	0,774708344	0,797887382
2,01	0,775577603	0,816948005	0,752585106	0,780150768
2,02	0,764247123	0,804560198	0,730197985	0,76204209
2,03	0,752667035	0,792019869	0,707596269	0,743594539
2,04	0,740853794	0,779345305	0,684829556	0,72484216
2,05	0,728823979	0,766554329	0,66194754	0,705819733
2,06	0,716594264	0,753664279	0,638999799	0,686562663
2,07	0,704181371	0,740691994	0,616035572	0,667106857
2,08	0,691602042	0,727653798	0,59310355	0,647488597
2,09	0,678872993	0,714565487	0,57025166	0,627744414
2,1	0,666010885	0,701442321	0,547526852	0,607910953
2,11	0,653032285	0,688299016	0,524974903	0,588024843
2,12	0,639953632	0,675149735	0,50264021	0,568122565
2,13	0,626791206	0,662008087	0,48056561	0,548240309
2,14	0,613561091	0,648887123	0,458792192	0,528413847
2,15	0,600279148	0,635799334	0,437359138	0,508678396
2,16	0,586960985	0,622756656	0,41630356	0,489068486
2,17	0,573621924	0,609770465	0,395660361	0,469617832
2,18	0,56027698	0,596851585	0,375462107	0,450359209
2,19	0,546940832	0,584010293	0,355738916	0,431324328
2,2	0,533627798	0,571256322	0,33651836	0,412543723
2,21	0,520351815	0,55859887	0,317825391	0,394046637
2,22	0,507126415	0,546046607	0,299682274	0,375860921
2,23	0,493964708	0,533607683	0,282108551	0,358012938
2,24	0,480879364	0,521289738	0,26512101	0,340527471
2,25	0,467882595	0,509099914	0,248733681	0,323427645
2,26	0,454986143	0,497044861	0,232957849	0,306734858
2,27	0,442201264	0,485130756	0,217802078	0,290468714
2,28	0,429538721	0,473363307	0,203272262	0,274646977
2,29	0,417008772	0,461747772	0,189371681	0,259285527
2,3	0,40462116	0,450288966	0,176101086	0,244398332
2,31	0,392385113	0,438991279	0,163458787	0,229997424

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
2,32	0,380309333	0,427858688	0,151440757	0,216092893
2,33	0,368401997	0,416894768	0,140040756	0,202692892
2,34	0,356670752	0,406102709	0,129250457	0,189803643
2,35	0,345122719	0,39548533	0,119059583	0,177429466
2,36	0,333764492	0,385045088	0,109456057	0,165572811
2,37	0,322602141	0,3747841	0,100426156	0,154234301
2,38	0,311641214	0,364704149	0,091954665	0,14341279
2,39	0,300886749	0,354806703	0,084025047	0,133105419
2,4	0,290343271	0,345092927	0,076619599	0,123307696
2,41	0,280014808	0,335563696	0,069719622	0,114013565
2,42	0,269904896	0,326219609	0,063305581	0,105215503
2,43	0,26001659	0,317061005	0,057357271	0,096904605
2,44	0,250352471	0,308087972	0,051853968	0,089070688
2,45	0,240914665	0,29930036	0,046774589	0,081702389
2,46	0,231704849	0,290697798	0,042097829	0,074787279
2,47	0,222724267	0,282279703	0,037802307	0,068311965
2,48	0,213973743	0,274045291	0,033866697	0,06226221
2,49	0,205453697	0,265993592	0,030269845	0,056623041
2,5	0,197164157	0,258123461	0,026990884	0,051378864
2,51	0,189104779	0,250433586	0,024009341	0,046513576
2,52	0,181274857	0,242922503	0,021305223	0,042010678
2,53	0,173673344	0,235588604	0,018859101	0,037853381
2,54	0,166298869	0,228430147	0,016652183	0,034024713
2,55	0,159149747	0,221445269	0,014666375	0,03050762
2,56	0,152224004	0,214631992	0,012884326	0,027285062
2,57	0,145519388	0,207988234	0,011289477	0,024340105
2,58	0,139033389	0,201511817	0,009866084	0,021656004
2,59	0,132763253	0,195200476	0,008599243	0,019216289
2,6	0,126706004	0,189051869	0,0074749	0,017004831
2,61	0,120858454	0,183063581	0,006479861	0,015005907
2,62	0,115217223	0,177233134	0,005601782	0,013204267
2,63	0,109778756	0,171557995	0,004829164	0,011585176
2,64	0,104539335	0,166035581	0,004151335	0,010134461
2,65	0,099495101	0,160663265	0,003558429	0,008838552
2,66	0,09464206	0,155438387	0,003041363	0,007684504
2,67	0,089976109	0,150358253	0,002591802	0,006660025
2,68	0,08549304	0,145420145	0,002202133	0,00575349
2,69	0,08118856	0,140621327	0,001865424	0,004953949
2,7	0,077058305	0,135959047	0,001575388	0,004251133
2,71	0,073097849	0,131430544	0,001326348	0,00363545
2,72	0,069302718	0,127033052	0,001113195	0,003097977
2,73	0,065668405	0,122763803	0,000931349	0,00263045
2,74	0,062190379	0,118620033	0,000776719	0,00225245
2,75	0,058864094	0,114598985	0,000645669	0,001875359
2,76	0,055685005	0,110697911	0,000534974	0,001574387
2,77	0,052648571	0,10691408	0,000441789	0,001316496
2,78	0,04975027	0,103244773	0,000363614	0,001096397
2,79	0,046985605	0,099687294	0,000298257	0,000909313
2,8	0,044350114	0,096238968	0,000243809	0,000750954
2,81	0,041839374	0,092897145	0,000198609	0,000617478
2,82	0,039449014	0,0896592	0,00016122	0,000505466
2,83	0,037174716	0,08652254	0,000130406	0,000411884
2,84	0,035012224	0,0834846	0,000105101	0,000334057

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
2,85	0,032957349	0,080542849	8,43993E-05	0,000269636
2,86	0,031005973	0,07769479	6,75257E-05	0,000216566
2,87	0,029154056	0,07493796	5,38245E-05	0,000173063
2,88	0,027397639	0,072269935	4,27419E-05	0,000137581
2,89	0,025732847	0,069688327	3,3812E-05	0,000108792
2,9	0,02415589	0,067190788	2,66448E-05	8,55559E-05
2,91	0,022663073	0,064775009	2,0915E-05	6,69049E-05
2,92	0,02125079	0,062438721	1,63528E-05	5,20175E-05
2,93	0,019915531	0,060179697	1,27347E-05	4,02027E-05
2,94	0,018653882	0,057995752	9,87722E-06	3,08817E-05
2,95	0,017462527	0,055884741	7,62969E-06	2,35727E-05
2,96	0,016338248	0,053844564	5,86928E-06	1,78773E-05
2,97	0,015277927	0,051873162	4,49624E-06	1,34676E-05
2,98	0,014278543	0,049968518	3,42989E-06	1,00761E-05
2,99	0,013337176	0,048128661	2,6053E-06	7,48535E-06
3	0,012451004	0,046351658	1,97042E-06	5,52023E-06
3,01	0,011617306	0,044635624	1,48376E-06	4,04041E-06
3,02	0,010833456	0,042978714	1,11238E-06	2,93437E-06
3,03	0,010096925	0,041379125	8,30235E-07	2,11404E-06
3,04	0,009405281	0,039835099	6,16866E-07	1,51045E-06
3,05	0,008756185	0,038344916	4,56247E-07	1,06998E-06
3,06	0,008147393	0,036906901	3,35897E-07	7,5126E-07
3,07	0,007576749	0,035519419	2,46143E-07	5,2266E-07
3,08	0,007042188	0,034180877	1,79524E-07	3,60183E-07
3,09	0,006541735	0,032889721	1,30313E-07	2,45784E-07
3,1	0,006073496	0,031644438	9,4137E-08	1,66018E-07
3,11	0,005635664	0,030443554	6,76737E-08	1,1096E-07
3,12	0,005226513	0,029285633	4,84109E-08	7,33515E-08
3,13	0,004844393	0,028169281	3,44592E-08	4,79406E-08
3,14	0,004487737	0,027093136	2,44054E-08	3,09639E-08
3,15	0,004155046	0,02605588	1,71973E-08	1,97542E-08
3,16	0,003844898	0,025056225	1,2056E-08	1,24423E-08
3,17	0,00355594	0,024092924	8,40804E-09	7,73291E-09
3,18	0,003286884	0,023164762	5,83323E-09	4,73963E-09
3,19	0,003036512	0,022270561	4,02552E-09	2,86315E-09
3,2	0,002803665	0,021409175	2,76318E-09	1,70357E-09
3,21	0,002587247	0,020579493	1,88645E-09	9,977E-10
3,22	0,002386217	0,019780436	1,28088E-09	5,74702E-10
3,23	0,002199595	0,019010957	8,64916E-10	3,25349E-10
3,24	0,00202645	0,018270039	5,80784E-10	1,80865E-10
3,25	0,001865906	0,017556698	3,87798E-10	9,86429E-11
3,26	0,001717133	0,016869978	2,57468E-10	5,27307E-11
3,27	0,001579352	0,016208953	1,69957E-10	2,7599E-11
3,28	0,001451825	0,015572726	1,1154E-10	1,41274E-11
3,29	0,00133386	0,014960426	7,27731E-11	7,06387E-12
3,3	0,001224804	0,014371212	4,71991E-11	3,44554E-12
3,31	0,001124045	0,013804267	3,04294E-11	1,63711E-12
3,32	0,001031006	0,013258801	1,94994E-11	7,56533E-13
3,33	0,000945146	0,012734049	1,24192E-11	3,39436E-13
3,34	0,00086596	0,012229272	7,86108E-12	1,47589E-13
3,35	0,00079297	0,011743752	4,94493E-12	6,20609E-14
3,36	0,000725732	0,011276796	3,09101E-12	2,51805E-14
3,37	0,000663829	0,010827735	1,91988E-12	9,83335E-15

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
3,38	0,000606872	0,010395919	1,18483E-12	3,68568E-15
3,39	0,000554496	0,009980721	7,2647E-13	1,3218E-15
3,4	0,000506361	0,009581537	4,42518E-13	4,52001E-16
3,41	0,000462149	0,009197779	2,67773E-13	1,46807E-16
3,42	0,000421566	0,008828881	1,60952E-13	4,50897E-17
3,43	0,000384334	0,008474297	9,60935E-14	1,30308E-17
3,44	0,000350197	0,008133498	5,69808E-14	3,52342E-18
3,45	0,000318916	0,007805974	3,35561E-14	8,85578E-19
3,46	0,00029027	0,007491231	1,96242E-14	2,05351E-19
3,47	0,00026405	0,007188794	1,13963E-14	4,35495E-20
3,48	0,000240067	0,006898203	6,57138E-15	8,36059E-21
3,49	0,000218142	0,006619014	3,76217E-15	1,4355E-21
3,5	0,00019811	0,0063508	2,13836E-15	2,17274E-22
3,51	0,000179818	0,006093147	1,20658E-15	2,84881E-23
3,52	0,000163126	0,005845657	6,75814E-16	3,16739E-24
3,53	0,000147901	0,005607946	3,75724E-16	2,90812E-25
3,54	0,000134023	0,005379642	2,07324E-16	2,13239E-26
3,55	0,000121381	0,005160388	1,13537E-16	1,19608E-27
3,56	0,00010987	0,004949839	6,17019E-17	4,84887E-29
3,57	9,93964E-05	0,004747662	3,32741E-17	1,31547E-30
3,58	8,98715E-05	0,004553537	1,78044E-17	2,14365E-32
3,59	8,12145E-05	0,004367155	9,45209E-18	1,79059E-34
3,6	7,3351E-05	0,004188219	4,97826E-18	5,99246E-37
3,61	6,62123E-05	0,00401644	2,60102E-18	5,31008E-40
3,62	5,97355E-05	0,003851544	1,34801E-18	5,70902E-44
3,63	5,38625E-05	0,003693263	6,92939E-19	1,2718E-49
3,64	4,85401E-05	0,003541341	3,53276E-19	1,8638E-59
3,65	4,37195E-05	0,003395531	1,78615E-19	-
3,66	3,9356E-05	0,003255595	8,95519E-20	-
3,67	3,54085E-05	0,003121303	4,45193E-20	-
3,68	3,18393E-05	0,002992435	2,19435E-20	-
3,69	2,86142E-05	0,002868779	1,07229E-20	-
3,7	2,57015E-05	0,002750131	5,19443E-21	-
3,71	2,30726E-05	0,002636292	2,49426E-21	-
3,72	2,07012E-05	0,002527075	1,18712E-21	-
3,73	1,85633E-05	0,002422296	5,59959E-22	-
3,74	1,6637E-05	0,00232178	2,61755E-22	-
3,75	1,49023E-05	0,00222536	1,21248E-22	-
3,76	1,33412E-05	0,002132871	5,56492E-23	-
3,77	1,1937E-05	0,002044158	2,53054E-23	-
3,78	1,06748E-05	0,001959071	1,13999E-23	-
3,79	9,54072E-06	0,001877466	5,08727E-24	-
3,8	8,52244E-06	0,001799203	2,24869E-24	-
3,81	7,60865E-06	0,00172415	9,8446E-25	-
3,82	6,78909E-06	0,001652176	4,26828E-25	-
3,83	6,05447E-06	0,00158316	1,83256E-25	-
3,84	5,39636E-06	0,001516982	7,79064E-26	-
3,85	4,80714E-06	0,001453529	3,27916E-26	-
3,86	4,27989E-06	0,00139269	1,36644E-26	-
3,87	3,80837E-06	0,001334361	5,63655E-27	-
3,88	3,38693E-06	0,001278439	2,30143E-27	-
3,89	3,01047E-06	0,001224828	9,3004E-28	-
3,9	2,67438E-06	0,001173435	3,71953E-28	-

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
3,91	2,3745E-06	0,001124169	1,47203E-28	-
3,92	2,10708E-06	0,001076943	5,76435E-29	-
3,93	1,86875E-06	0,001031676	2,2333E-29	-
3,94	1,65646E-06	0,000988288	8,55987E-30	-
3,95	1,46748E-06	0,000946701	3,24542E-30	-
3,96	1,29934E-06	0,000906843	1,21708E-30	-
3,97	1,14983E-06	0,000868643	4,51409E-31	-
3,98	1,01697E-06	0,000832034	1,6557E-31	-
3,99	8,98961E-07	0,000796949	6,00505E-32	-
4	7,94208E-07	0,000763328	2,15343E-32	-

Tab. 9: Hodnoty hustoty pravděpodobnosti (LWA 0-2)

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0	0,000453337	-	0	-
0,01	0,000473263	3,4979E-147	0	2,695E-11
0,02	0,000493999	6,3322E-114	6,9868E-12	5,18001E-10
0,03	0,000515575	1,85991E-96	1,58375E-10	2,91937E-09
0,04	0,000538021	5,94141E-85	9,82992E-10	9,95643E-09
0,05	0,000561368	1,54539E-76	3,59001E-09	2,57861E-08
0,06	0,000585651	5,43282E-70	9,80482E-09	5,61128E-08
0,07	0,000610902	1,0921E-64	2,22822E-08	1,08284E-07
0,08	0,000637156	2,88947E-60	4,46058E-08	1,91371E-07
0,09	0,000664449	1,69737E-56	8,13774E-08	3,16243E-07
0,1	0,000692819	3,13599E-53	1,383E-07	4,95631E-07
0,11	0,000722303	2,32313E-50	2,22253E-07	7,44186E-07
0,12	0,000752941	8,22534E-48	3,41367E-07	1,07854E-06
0,13	0,000784774	1,58652E-45	5,05088E-07	1,51733E-06
0,14	0,000817843	1,84226E-43	7,24246E-07	2,08131E-06
0,15	0,000852191	1,39219E-41	1,01111E-06	2,7933E-06
0,16	0,000887862	7,28355E-40	1,37947E-06	3,67831E-06
0,17	0,000924903	2,77281E-38	1,84464E-06	4,76355E-06
0,18	0,00096336	8,00025E-37	2,4236E-06	6,07846E-06
0,19	0,001003282	1,80925E-35	3,13495E-06	7,65475E-06
0,2	0,001044718	3,29842E-34	3,99904E-06	9,52644E-06
0,21	0,00108772	4,96371E-33	5,03798E-06	1,17299E-05
0,22	0,001132339	6,29139E-32	6,27571E-06	1,43039E-05
0,23	0,001178632	6,83306E-31	7,73803E-06	1,72895E-05
0,24	0,001226652	6,4547E-30	9,45264E-06	2,07304E-05
0,25	0,001276458	5,37203E-29	1,14492E-05	2,46725E-05
0,26	0,001328108	3,98385E-28	1,37594E-05	2,91644E-05
0,27	0,001381663	2,65869E-27	1,6417E-05	3,42572E-05
0,28	0,001437185	1,61076E-26	1,94578E-05	4,00044E-05
0,29	0,001494738	8,92799E-26	2,29197E-05	4,64622E-05
0,3	0,001554387	4,55857E-25	2,68427E-05	5,36894E-05
0,31	0,0016162	2,15741E-24	3,12694E-05	6,17473E-05
0,32	0,001680247	9,51615E-24	3,62441E-05	7,07E-05
0,33	0,001746597	3,93166E-23	4,18139E-05	8,06141E-05
0,34	0,001815323	1,52836E-22	4,80278E-05	9,1559E-05

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0,35	0,001886502	5,61272E-22	5,49374E-05	0,000103607
0,36	0,001960208	1,95445E-21	6,25966E-05	0,000116832
0,37	0,002036522	6,47497E-21	7,1062E-05	0,000131313
0,38	0,002115523	2,04714E-20	8,03922E-05	0,000147129
0,39	0,002197294	6,19401E-20	9,06487E-05	0,000164364
0,4	0,00228192	1,79817E-19	0,000101895	0,000183104
0,41	0,002369487	5,02057E-19	0,000114199	0,000203437
0,42	0,002460086	1,35109E-18	0,000127628	0,000225455
0,43	0,002553806	3,51158E-18	0,000142255	0,000249253
0,44	0,002650742	8,83108E-18	0,000158154	0,000274927
0,45	0,002750988	2,15262E-17	0,000175401	0,000302579
0,46	0,002854643	5,09399E-17	0,000194078	0,000332311
0,47	0,002961807	1,17201E-16	0,000214266	0,000364229
0,48	0,003072582	2,62538E-16	0,000236052	0,000398442
0,49	0,003187073	5,73321E-16	0,000259522	0,000435064
0,5	0,003305387	1,222E-15	0,000284769	0,000474207
0,51	0,003427634	2,5451E-15	0,000311887	0,000515992
0,52	0,003553926	5,18504E-15	0,000340972	0,000560538
0,53	0,003684378	1,0343E-14	0,000372124	0,000607969
0,54	0,003819106	2,02203E-14	0,000405447	0,000658413
0,55	0,003958231	3,87753E-14	0,000441046	0,000712
0,56	0,004101874	7,29972E-14	0,000479029	0,000768863
0,57	0,00425016	1,35012E-13	0,00051951	0,000829139
0,58	0,004403217	2,45513E-13	0,000562603	0,000892966
0,59	0,004561175	4,39246E-13	0,000608427	0,000960488
0,6	0,004724166	7,73665E-13	0,000657102	0,00103185
0,61	0,004892326	1,34238E-12	0,000708753	0,0011072
0,62	0,005065793	2,29579E-12	0,000763509	0,001186691
0,63	0,005244708	3,87218E-12	0,000821499	0,001270477
0,64	0,005429214	6,44427E-12	0,000882858	0,001358717
0,65	0,005619458	1,05877E-11	0,000947724	0,001451573
0,66	0,005815589	1,71807E-11	0,001016238	0,001549208
0,67	0,006017759	2,75478E-11	0,001088543	0,001651791
0,68	0,006226123	4,3664E-11	0,001164786	0,001759492
0,69	0,006440838	6,84422E-11	0,00124512	0,001872486
0,7	0,006662065	1,06134E-10	0,001329697	0,001990949
0,71	0,006889968	1,62883E-10	0,001418675	0,002115064
0,72	0,007124712	2,47479E-10	0,001512216	0,002245012
0,73	0,007366467	3,72381E-10	0,001610483	0,002380983
0,74	0,007615405	5,55083E-10	0,001713646	0,002523165
0,75	0,007871701	8,19943E-10	0,001821874	0,002671752
0,76	0,008135532	1,20058E-09	0,001935344	0,002826941
0,77	0,008407079	1,743E-09	0,002054234	0,002988933
0,78	0,008686525	2,50969E-09	0,002178724	0,00315793
0,79	0,008974058	3,58484E-09	0,002309003	0,003334138
0,8	0,009269866	5,08103E-09	0,002445257	0,003517769
0,81	0,009574142	7,14769E-09	0,002587681	0,003709034
0,82	0,009887081	9,98184E-09	0,002736469	0,003908151
0,83	0,010208881	1,38413E-08	0,002891824	0,004115338
0,84	0,010539742	1,90616E-08	0,003053947	0,004330819
0,85	0,010879868	2,60758E-08	0,003223047	0,00455482
0,86	0,011229465	3,54404E-08	0,003399334	0,00478757
0,87	0,011588743	4,7865E-08	0,003583023	0,005029302

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
0,88	0,011957913	6,42503E-08	0,003774332	0,005280251
0,89	0,01233719	8,57319E-08	0,003973484	0,005540657
0,9	0,012726792	1,13734E-07	0,004180703	0,005810762
0,91	0,013126939	1,50033E-07	0,00439622	0,006090811
0,92	0,013537852	1,96832E-07	0,004620268	0,006381054
0,93	0,013959757	2,56852E-07	0,004853083	0,006681743
0,94	0,014392883	3,33432E-07	0,005094906	0,006993132
0,95	0,014837459	4,30654E-07	0,005345982	0,007315479
0,96	0,015293718	5,53482E-07	0,005606559	0,007649048
0,97	0,015761895	7,07923E-07	0,005876889	0,007994101
0,98	0,016242227	9,01217E-07	0,006157227	0,008350908
0,99	0,016734955	1,14205E-06	0,006447832	0,008719739
1	0,01724032	1,44079E-06	0,006748969	0,009100868
1,01	0,017758566	1,80977E-06	0,007060903	0,009494572
1,02	0,018289941	2,26361E-06	0,007383905	0,009901132
1,03	0,018834691	2,81954E-06	0,00771825	0,010320831
1,04	0,019393067	3,49781E-06	0,008064216	0,010753955
1,05	0,019965322	4,32214E-06	0,008422085	0,011200794
1,06	0,02055171	5,32015E-06	0,008792142	0,01166164
1,07	0,021152485	6,52397E-06	0,009174676	0,012136787
1,08	0,021767905	7,97078E-06	0,00956998	0,012626535
1,09	0,02239823	9,70346E-06	0,009978352	0,013131185
1,1	0,023043718	1,17713E-05	0,01040009	0,01365104
1,11	0,023704633	1,42308E-05	0,010835499	0,014186406
1,12	0,024381236	1,71465E-05	0,011284887	0,014737595
1,13	0,025073791	2,05917E-05	0,011748564	0,015304916
1,14	0,025782564	2,46499E-05	0,012226845	0,015888687
1,15	0,02650782	2,94151E-05	0,012720049	0,016489223
1,16	0,027249825	3,49938E-05	0,013228497	0,017106846
1,17	0,028008848	4,15053E-05	0,013752513	0,017741878
1,18	0,028785156	4,90836E-05	0,014292428	0,018394644
1,19	0,029579016	5,78785E-05	0,014848572	0,019065472
1,2	0,030390698	6,80568E-05	0,015421281	0,019754692
1,21	0,03122047	7,9804E-05	0,016010895	0,020462637
1,22	0,0320686	9,3326E-05	0,016617754	0,021189641
1,23	0,032935358	0,00010885	0,017242204	0,021936041
1,24	0,03382101	0,000126627	0,017884594	0,022702176
1,25	0,034725824	0,000146933	0,018545275	0,023488388
1,26	0,035650068	0,00017007	0,019224602	0,024295019
1,27	0,036594008	0,000196369	0,019922933	0,025122415
1,28	0,037557909	0,000226194	0,020640627	0,025970923
1,29	0,038542034	0,000259936	0,02137805	0,026840891
1,3	0,039546647	0,000298025	0,022135566	0,02773267
1,31	0,04057201	0,000340924	0,022913546	0,028646612
1,32	0,041618381	0,000389136	0,023712361	0,029583071
1,33	0,042686018	0,000443201	0,024532386	0,030542402
1,34	0,043775178	0,000503704	0,025373997	0,031524961
1,35	0,044886113	0,00057127	0,026237574	0,032531106
1,36	0,046019076	0,000646571	0,027123499	0,033561196
1,37	0,047174314	0,000730326	0,028032156	0,03461559
1,38	0,048352074	0,000823302	0,028963931	0,035694649
1,39	0,049552597	0,000926316	0,029919212	0,036798735
1,4	0,050776124	0,001040236	0,03089839	0,037928211

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
1,41	0,052022891	0,001165985	0,031901856	0,039083438
1,42	0,05329313	0,001304537	0,032930004	0,04026478
1,43	0,05458707	0,001456924	0,03398323	0,041472601
1,44	0,055904935	0,001624234	0,035061931	0,042707265
1,45	0,057246945	0,001807609	0,036166505	0,043969135
1,46	0,058613317	0,002008254	0,037297351	0,045258575
1,47	0,06000426	0,002227428	0,038454869	0,046575948
1,48	0,061419982	0,002466449	0,039639462	0,047921618
1,49	0,062860682	0,002726697	0,040851531	0,049295947
1,5	0,064326557	0,003009606	0,04209148	0,050699297
1,51	0,065817795	0,003316672	0,043359712	0,052132028
1,52	0,067334581	0,003649446	0,044656629	0,053594501
1,53	0,068877092	0,004009537	0,045982637	0,055087074
1,54	0,0704455	0,004398611	0,047338139	0,056610105
1,55	0,072039968	0,004818386	0,048723539	0,058163949
1,56	0,073660656	0,005270636	0,050139239	0,059748959
1,57	0,075307713	0,005757185	0,051585642	0,061365489
1,58	0,076981283	0,006279905	0,05306315	0,063013886
1,59	0,078681501	0,006840718	0,054572163	0,0646945
1,6	0,080408497	0,00744159	0,05611308	0,066407675
1,61	0,082162388	0,008084526	0,057686301	0,068153751
1,62	0,083943288	0,008771574	0,05929222	0,06993307
1,63	0,085751298	0,009504815	0,060931233	0,071745965
1,64	0,087586514	0,010286364	0,062603731	0,073592769
1,65	0,089449021	0,011118363	0,064310104	0,075473811
1,66	0,091338893	0,01200298	0,06605074	0,077389415
1,67	0,093256199	0,012942402	0,067826022	0,079339902
1,68	0,095200994	0,013938834	0,069636331	0,081325586
1,69	0,097173326	0,014994491	0,071482045	0,083346779
1,7	0,09917323	0,016111597	0,073363537	0,085403787
1,71	0,101200733	0,017292377	0,075281178	0,087496911
1,72	0,10325585	0,018539053	0,077235331	0,089626445
1,73	0,105338586	0,019853839	0,079226359	0,091792679
1,74	0,107448933	0,021238936	0,081254616	0,093995897
1,75	0,109586875	0,022696528	0,083320453	0,096236374
1,76	0,111752382	0,024228773	0,085424214	0,098514381
1,77	0,113945411	0,025837799	0,087566238	0,10083018
1,78	0,116165911	0,027525702	0,089746858	0,103184027
1,79	0,118413815	0,029294533	0,091966399	0,10557617
1,8	0,120689045	0,0311463	0,094225179	0,108006848
1,81	0,122991512	0,033082958	0,096523511	0,110476293
1,82	0,125321111	0,035106405	0,098861696	0,112984728
1,83	0,127677726	0,037218474	0,101240031	0,115532366
1,84	0,130061229	0,039420931	0,103658803	0,118119411
1,85	0,132471477	0,041715468	0,106118288	0,120746058
1,86	0,134908312	0,044103696	0,108618756	0,123412491
1,87	0,137371566	0,046587144	0,111160464	0,126118884
1,88	0,139861055	0,049167249	0,11374366	0,1288654
1,89	0,14237658	0,051845354	0,116368584	0,131652189
1,9	0,144917931	0,054622703	0,11903546	0,134479394
1,91	0,14748488	0,057500434	0,121744504	0,13734714
1,92	0,150077188	0,06047958	0,124495918	0,140255544
1,93	0,1526946	0,063561057	0,127289894	0,143204709

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
1,94	0,155336845	0,066745667	0,130126608	0,146194723
1,95	0,15800364	0,070034091	0,133006224	0,149225662
1,96	0,160694684	0,073426885	0,135928893	0,152297588
1,97	0,163409665	0,076924479	0,138894749	0,155410548
1,98	0,166148252	0,080527171	0,141903915	0,158564573
1,99	0,168910101	0,084235127	0,144956494	0,16175968
2	0,171694854	0,088048377	0,148052576	0,164995871
2,01	0,174502134	0,091966814	0,151192235	0,168273128
2,02	0,177331551	0,095990191	0,154375525	0,171591421
2,03	0,180182702	0,100118119	0,157602485	0,174950698
2,04	0,183055164	0,104350067	0,160873136	0,178350894
2,05	0,185948502	0,108685361	0,164187479	0,181791923
2,06	0,188862264	0,113123184	0,167545495	0,18527368
2,07	0,191795983	0,117662572	0,170947149	0,188796043
2,08	0,194749178	0,12230242	0,174392382	0,19235887
2,09	0,19772135	0,127041475	0,177881116	0,195961996
2,1	0,200711987	0,131878345	0,181413252	0,19960524
2,11	0,20372056	0,136811491	0,184988666	0,203288397
2,12	0,206746527	0,141839235	0,188607215	0,207011242
2,13	0,209789328	0,14695976	0,192268731	0,210773527
2,14	0,21284839	0,152171109	0,195973023	0,214574983
2,15	0,215923124	0,15747119	0,199719876	0,218415316
2,16	0,219012928	0,162857777	0,203509048	0,22229421
2,17	0,222117182	0,168328514	0,207340275	0,226211326
2,18	0,225235255	0,173880915	0,211213263	0,230166299
2,19	0,228366497	0,179512372	0,215127695	0,234158739
2,2	0,231510249	0,185220152	0,219083225	0,238188232
2,21	0,234665833	0,191001407	0,223079479	0,242254338
2,22	0,237832559	0,196853173	0,227116056	0,24635659
2,23	0,241009725	0,202772378	0,231192524	0,250494495
2,24	0,244196611	0,208755842	0,235308423	0,254667531
2,25	0,247392487	0,214800285	0,239463263	0,258875152
2,26	0,250596609	0,220902331	0,243656523	0,26311678
2,27	0,25380822	0,22705851	0,247887651	0,26739181
2,28	0,257026548	0,233265268	0,252156063	0,271699608
2,29	0,260250812	0,239518967	0,256461143	0,276039511
2,3	0,263480217	0,245815893	0,260802241	0,280410826
2,31	0,266713955	0,25215226	0,265178677	0,284812827
2,32	0,269951209	0,258524218	0,269589733	0,289244762
2,33	0,273191147	0,264927856	0,274034661	0,293705843
2,34	0,276432929	0,271359205	0,278512673	0,298195254
2,35	0,279675703	0,277814253	0,283022951	0,302712145
2,36	0,282918606	0,284288938	0,287564638	0,307255634
2,37	0,286160766	0,290779164	0,292136841	0,311824808
2,38	0,289401301	0,297280802	0,296738633	0,316418718
2,39	0,292639318	0,303789698	0,301369047	0,321036384
2,4	0,295873918	0,310301674	0,306027081	0,32567679
2,41	0,299104191	0,31681254	0,310711692	0,330338889
2,42	0,302329219	0,323318096	0,315421802	0,335021596
2,43	0,305548077	0,329814137	0,320156294	0,339723795
2,44	0,308759833	0,336296463	0,324914011	0,344444333
2,45	0,311963546	0,342760879	0,329693758	0,349182022
2,46	0,315158269	0,349203203	0,3344943	0,353935639

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
2,47	0,318343052	0,355619272	0,339314363	0,358703925
2,48	0,321516934	0,362004947	0,344152634	0,363485587
2,49	0,324678954	0,368356117	0,349007758	0,368279294
2,5	0,327828142	0,374668705	0,353878343	0,373083679
2,51	0,330963527	0,380938673	0,358762954	0,377897342
2,52	0,334084132	0,387162027	0,363660117	0,382718842
2,53	0,337188977	0,393333482	0,368568318	0,387546706
2,54	0,340277081	0,39945316	0,373486002	0,392379423
2,55	0,343347458	0,405513209	0,378411575	0,397215445
2,56	0,346399123	0,411511194	0,383343402	0,40205319
2,57	0,349431088	0,417443406	0,388279807	0,406891037
2,58	0,352442364	0,423306205	0,393219077	0,411727331
2,59	0,355431962	0,429096025	0,398159456	0,416560381
2,6	0,358398895	0,434809377	0,403099151	0,421388459
2,61	0,361342174	0,440442854	0,408036328	0,426209803
2,62	0,364260813	0,445993129	0,412969116	0,431022614
2,63	0,367153829	0,451456965	0,417895604	0,435825059
2,64	0,370020239	0,456831213	0,422813845	0,440615271
2,65	0,372859065	0,462112817	0,427721851	0,445391348
2,66	0,37566933	0,467298817	0,4326176	0,450151352
2,67	0,378450066	0,472386348	0,437499033	0,454893316
2,68	0,381200303	0,477372645	0,442364054	0,459615235
2,69	0,383919083	0,482255047	0,447210534	0,464315074
2,7	0,386605448	0,487030994	0,452036307	0,468990767
2,71	0,38925845	0,491698032	0,456839175	0,473640215
2,72	0,391877146	0,496253811	0,461616908	0,478261289
2,73	0,394460602	0,500696093	0,466367243	0,482851829
2,74	0,397007891	0,505022745	0,471087886	0,487409647
2,75	0,399518094	0,509231746	0,475776514	0,491932527
2,76	0,401990303	0,513321185	0,480430775	0,496418224
2,77	0,404423617	0,517289262	0,48504829	0,500864468
2,78	0,406817147	0,521134288	0,489626654	0,505268961
2,79	0,409170014	0,524854688	0,494163435	0,509629383
2,8	0,411481351	0,528448996	0,49865618	0,51394339
2,81	0,413750303	0,531915859	0,503102411	0,518208613
2,82	0,415976025	0,535254038	0,507499633	0,522422665
2,83	0,418157687	0,538462402	0,511845328	0,526583138
2,84	0,420294473	0,541539934	0,516136964	0,530687604
2,85	0,422385578	0,544485724	0,520371989	0,534733619
2,86	0,424430213	0,547298974	0,524547841	0,538718724
2,87	0,426427606	0,549978995	0,528661943	0,542640442
2,88	0,428376995	0,552525204	0,532711708	0,546496286
2,89	0,43027764	0,554937125	0,536694542	0,550283758
2,9	0,432128813	0,557214389	0,540607843	0,554000349
2,91	0,433929803	0,559356728	0,544449004	0,557643542
2,92	0,435679919	0,56136398	0,548215418	0,561210813
2,93	0,437378485	0,563236081	0,551904475	0,564699637
2,94	0,439024844	0,564973068	0,55551357	0,568107482
2,95	0,440618358	0,566575075	0,559040099	0,571431818
2,96	0,442158407	0,568042332	0,562481469	0,574670116
2,97	0,44364439	0,569375164	0,565835091	0,577819851
2,98	0,445075728	0,570573987	0,569098394	0,580878502
2,99	0,44645186	0,571639306	0,572268814	0,583843557

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
3	0,447772245	0,572571715	0,57534381	0,586712514
3,01	0,449036365	0,573371893	0,578320857	0,589482883
3,02	0,450243721	0,574040604	0,581197453	0,592152188
3,03	0,451393838	0,574578692	0,58397112	0,59471797
3,04	0,452486259	0,57498708	0,586639409	0,597177791
3,05	0,453520553	0,575266766	0,589199899	0,599529233
3,06	0,454496309	0,575418826	0,591650205	0,601769903
3,07	0,455413139	0,575444405	0,593987976	0,603897435
3,08	0,456270679	0,575344717	0,5962109	0,605909494
3,09	0,457068586	0,575121044	0,598316707	0,607803774
3,1	0,457806544	0,574774732	0,600303173	0,609578009
3,11	0,458484256	0,57430719	0,602168119	0,611229965
3,12	0,459101452	0,573719884	0,60390942	0,612757453
3,13	0,459657886	0,57301434	0,605525002	0,614158326
3,14	0,460153333	0,572192135	0,607012849	0,615430482
3,15	0,460587597	0,5712549	0,608371004	0,61657187
3,16	0,460960502	0,570204315	0,609597572	0,617580491
3,17	0,461271898	0,569042108	0,610690725	0,618454398
3,18	0,461521662	0,567770047	0,611648704	0,619191707
3,19	0,461709692	0,566389948	0,612469819	0,61979059
3,2	0,461835913	0,564903662	0,613152457	0,620249286
3,21	0,461900274	0,563313079	0,61369508	0,620566099
3,22	0,46190275	0,561620122	0,614096233	0,620739405
3,23	0,461843339	0,559826747	0,614354543	0,620767651
3,24	0,461722065	0,557934942	0,614468721	0,620649359
3,25	0,461538977	0,555946719	0,614437568	0,620383134
3,26	0,461294149	0,553864116	0,614259978	0,619967659
3,27	0,460987679	0,551689197	0,613934937	0,619401702
3,28	0,460619689	0,549424041	0,613461527	0,618684121
3,29	0,460190329	0,547070752	0,61283893	0,617813863
3,3	0,459699769	0,544631445	0,61206643	0,616789969
3,31	0,459148206	0,542108252	0,611143414	0,615611575
3,32	0,458535862	0,539503317	0,610069374	0,614277919
3,33	0,457862982	0,536818792	0,608843913	0,612788339
3,34	0,457129833	0,534056841	0,60746674	0,611142277
3,35	0,45633671	0,53121963	0,60593768	0,609339284
3,36	0,455483929	0,528309332	0,60425667	0,60737902
3,37	0,454571829	0,525328122	0,602423764	0,605261256
3,38	0,453600773	0,522278175	0,600439131	0,602985881
3,39	0,452571147	0,519161666	0,59830306	0,600552898
3,4	0,45148336	0,515980766	0,596015961	0,597962431
3,41	0,450337843	0,512737641	0,593578365	0,595214725
3,42	0,449135049	0,509434454	0,590990922	0,592310148
3,43	0,447875452	0,506073357	0,58825441	0,589249195
3,44	0,446559549	0,502656495	0,585369728	0,586032487
3,45	0,445187857	0,499186003	0,582337899	0,582660773
3,46	0,443760916	0,495664001	0,579160073	0,579134937
3,47	0,442279283	0,492092599	0,575837523	0,575455989
3,48	0,440743537	0,488473891	0,572371649	0,571625077
3,49	0,439154278	0,484809956	0,568763974	0,567643482
3,5	0,437512123	0,481102855	0,565016148	0,563512621
3,51	0,43581771	0,477354631	0,561129943	0,559234045
3,52	0,434071694	0,47356731	0,557107255	0,554809445

	Normální distribuce	Log-normální distribuce	Rosin-Rammlerova distribuční funkce	Harrisova korelace
x [mm]	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor	y(x) teor
3,53	0,432274748	0,469742894	0,552950105	0,550240649
3,54	0,430427564	0,465883367	0,548660634	0,54552962
3,55	0,428530851	0,461990689	0,544241102	0,540678463
3,56	0,426585333	0,458066798	0,539693891	0,535689418
3,57	0,424591753	0,454113608	0,535021498	0,530564865
3,58	0,422550869	0,450133008	0,530226537	0,525307317
3,59	0,420463453	0,446126862	0,525311735	0,519919429
3,6	0,418330292	0,442097007	0,52027993	0,514403988
3,61	0,41615219	0,438045253	0,515134071	0,508763917
3,62	0,413929962	0,433973385	0,50987721	0,50300227
3,63	0,411664438	0,429883158	0,504512505	0,497122236
3,64	0,409356461	0,425776298	0,499043213	0,491127132
3,65	0,407006884	0,421654503	0,493472691	0,485020403
3,66	0,404616575	0,417519443	0,487804388	0,47880562
3,67	0,402186411	0,413372754	0,482041844	0,472486477
3,68	0,399717281	0,409216047	0,476188684	0,466066788
3,69	0,397210084	0,405050898	0,47024862	0,459550486
3,7	0,394665729	0,400878854	0,464225439	0,452941617
3,71	0,392085132	0,396701432	0,458123004	0,446244338
3,72	0,38946922	0,392520116	0,45194525	0,439462913
3,73	0,386818928	0,388336358	0,445696175	0,43260171
3,74	0,384135197	0,384151581	0,439379839	0,425665195
3,75	0,381418976	0,379967175	0,43300036	0,41865793
3,76	0,37867122	0,375784495	0,426561905	0,411584567
3,77	0,375892889	0,371604869	0,420068688	0,40444984
3,78	0,37308495	0,367429591	0,413524965	0,397258566
3,79	0,370248373	0,363259921	0,406935028	0,390015637
3,8	0,367384134	0,359097091	0,400303197	0,382726011
3,81	0,36449321	0,354942297	0,393633821	0,375394711
3,82	0,361576585	0,350796707	0,386931264	0,368026817
3,83	0,35863524	0,346661454	0,380199909	0,360627461
3,84	0,355670164	0,342537641	0,373444144	0,353201817
3,85	0,352682342	0,338426341	0,36666836	0,345755098
3,86	0,349672764	0,334328591	0,359876946	0,338292549
3,87	0,346642419	0,330245403	0,353074281	0,330819437
3,88	0,343592293	0,326177754	0,346264732	0,323341048
3,89	0,340523376	0,322126591	0,339452644	0,315862677
3,9	0,337436654	0,318092831	0,332642336	0,308389619
3,91	0,334333112	0,314077361	0,325838095	0,300927167
3,92	0,331213732	0,310081038	0,319044173	0,293480599
3,93	0,328079494	0,306104689	0,312264777	0,286055172
3,94	0,324931374	0,302149113	0,305504068	0,278656116
3,95	0,321770345	0,298215078	0,298766151	0,271288622
3,96	0,318597376	0,294303325	0,292055074	0,263957837
3,97	0,315413431	0,290414565	0,285374819	0,256668858
3,98	0,312219467	0,286549484	0,278729299	0,249426718
3,99	0,309016438	0,282708738	0,272122355	0,242236382
4	0,305805292	0,278892955	0,265557746	0,23510274

Tab. 10: Hodnoty hustoty pravděpodobnosti (LWA 1/4)

Příloha C – Závislost tlakové ztráty na rychlosti průtoku média

u [m/s]	dp_celková_vzestupně [kPa]	dp_celková_sestupně [kPa]
0,0658	0,3015	0,3119
0,0823	0,3562	0,3864
0,0988	0,4163	0,4401
0,1646	0,6809	0,6559
0,2551	0,6835	0,6713
0,3210	0,6865	0,6684
0,3786	0,6963	0,6821
0,4444	0,7045	0,6759
0,5021	0,7267	0,6881
0,5514	0,7248	0,6666
0,6255	0,7130	0,6796
0,6584	0,7019	0,6641
0,7160	0,7042	0,6799
0,7819	0,7253	0,6747
0,8395	0,7204	0,6700
0,9053	0,7434	0,6732
0,9547	0,7419	0,6731

Tab. 11: Závislost tlakové ztráty na rychlosti průtoku média - písek 01-06

u [m/s]	dp_celková_vzestupně [kPa]	dp_celková_sestupně [kPa]
0,0741	0,1027	0,0828
0,0905	0,1927	0,1527
0,1056	0,2930	0,1830
0,1235	0,4266	0,2728
0,1928	0,7984	0,5498
0,2469	0,7968	0,7621
0,2881	0,7807	0,7897
0,3045	0,7601	0,7697
0,3704	0,7760	0,7406
0,4280	0,7915	0,7451
0,4856	0,7703	0,7665
0,5350	0,7637	0,7655
0,5844	0,7273	0,7988
0,6337	0,7512	0,7826
0,6831	0,7886	0,7794
0,7407	0,7377	0,7512
0,8230	0,7445	0,7203
0,8724	0,7447	0,7605
0,9383	0,7506	0,7580

Tab. 12: Závislost tlakové ztráty na rychlosti průtoku média - písek 03 – 30

u [m/s]	dp_celková_vzestupně [kPa]	dp_celková sestupně [kPa]
0,1235	0,1574	0,1782
0,1693	0,2483	0,2810
0,2156	0,3459	0,3165
0,2551	0,4553	0,4030
0,3210	0,6972	0,5409
0,3786	0,7576	0,6866
0,4444	0,7745	0,6855
0,5021	0,7071	0,7177
0,5514	0,7354	0,7456
0,6091	0,7272	0,7381
0,6584	0,7525	0,7427
0,7160	0,7344	0,7250
0,7819	0,7428	0,7233
0,8313	0,7491	0,7196
0,8971	0,7460	0,7372
0,9465	0,7364	0,7384

Tab. 13: Závislost tlakové ztráty na rychlosti průtoku média - písek 05-10

u [m/s]	dp_celková_vzestupně [kPa]	dp_celková sestupně [kPa]
0,1399	0,0686	0,0590
0,2058	0,1815	0,1715
0,2234	0,2316	0,2015
0,2634	0,3536	0,3034
0,2945	0,4479	0,3755
0,3210	0,5282	0,4486
0,3704	0,6989	0,5478
0,4280	0,8223	0,6933
0,4774	0,8090	0,7513
0,5350	0,7966	0,7675
0,5926	0,7657	0,7372
0,6502	0,7494	0,7904
0,6996	0,7281	0,7696
0,7572	0,7425	0,7533
0,8230	0,6995	0,7295
0,8807	0,7260	0,7860

Tab. 14: Závislost tlakové ztráty na rychlosti průtoku média – LWA 0-2

u [m/s]	dp_celková_vzestupně [kPa]	dp_celková_sestupně [kPa]
0,1481	0,1329	0,1165
0,2140	0,2019	0,1819
0,2798	0,2858	0,2606
0,3292	0,3217	0,3042
0,3868	0,4266	0,3973
0,4362	0,4894	0,4653
0,4856	0,5628	0,5855
0,5432	0,6141	0,5862
0,5926	0,6745	0,6584
0,6502	0,7077	0,6709
0,6996	0,7565	0,7096
0,7654	0,8348	0,7569
0,8230	0,9574	0,8297
0,8807	0,9441	0,9062
0,9465	0,9557	0,8868
1,0041	0,9751	0,8661
1,0700	0,9711	0,8822

Tab. 15: Závislost tlakové ztráty na rychlosti průtoku média – LWA 1/4