

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2023

Bc. Denisa Tkáčová



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE PRO GRANULOMETRII PEVNÝCH ČÁSTIC

ACOUSTIC EMISSION SIGNAL PROCESSING FOR GRANULOMETRY OF SOLID PARTICLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Denisa Tkáčová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Stanislav Pikula, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Studentka: Bc. Denisa Tkáčová

ID: 211187

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Zpracování signálu akustické emise pro granulometrii pevných částic

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Granulometrie pevných částic je v průmyslu důležitá analýza v mnoha oborech. Jednou z možností jak granulometrii určit je využít signál akustické emise. Cílem práce je ověřit, jaké parametry signálu akustické emise jsou využitelné pro určení granulometrie pevných částic.

Zadání práce lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Vypracujte přehled používaných metod granulometrie s podrobnějším rozбором metody akustické emise, včetně uváděných parametrů signálu, které je možné u akustické emise vyhodnocovat.
- 2) Provedte jednoduchý experiment na dostupném přípravku a s vhodným vybavením pro záznam a následné zpracování signálu akustické emise.
- 3) Popište dostupné datové sady změřených akustických emisí.
- 4) Na vhodné části datové sady ověřte souvislost parametrů signálu akustické emise s granulometrií pevných částic.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

GROSSE, Christian a Masayasu OHTSU, ed., 2008. Acoustic Emission Testing. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-69895-1.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 17.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Pikula, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá zpracováním a analýzou signálů akustické emise pro granulometrii pevných částic. Akustická emise je jednou z mnoha metod pro určování velikosti částic, jež je v mnoha odvětvích průmyslu důležitou součástí výroby. U signálů akustické emise lze sledovat a analyzovat různé parametry. Tato práce zpracovává a analyzuje rozsáhlou datovou sadu změřených akustických emisí a následně vyhodnocuje, jaké parametry či příznaky ze signálu akustické emise je vhodné využít pro určení velikosti částic.

KLÍČOVÁ SLOVA

metoda akustické emise, měření velikosti částic, granulometrie pevných částic, analýza signálů akustické emise, LabVIEW, oktávová analýza

ABSTRACT

This thesis deals with the processing and analysis of acoustic emission signals for solid particle granulometry. Acoustic emission is one of many methods for particle size measurement, which is an important part of production in many industries. Various parameters can be monitored and analysed for acoustic emission signals. This paper processes and analyzes a large dataset of measured acoustic emissions and then evaluates which parameters from the acoustic emission signal are appropriate to use for particle size determination.

KEYWORDS

acoustic emission method, particle size measurement, granulometry of solid particles, analysis of acoustic emission signals, LabVIEW, octave band analysis

TKÁČOVÁ, Denisa. *Zpracování signálu akustické emise pro granulometrii pevných částic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2023, 121 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Stanislav Pikula, PhD.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Bc. Denisa Tkáčová
VUT ID autora:	211187
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2022/23
Téma závěrečné práce:	Zpracování signálu akustické emise pro granulometrii pevných částic

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autorky

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce panu Ing. Stanislavu Pikulovi, Ph.D., za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	15
1 Granulometrie a metody měření	17
1.1 Metody pro měření velikosti částic	17
1.1.1 Metody založené na laserovém měření	17
1.1.2 Určování velikosti částic z obrazu	18
1.1.3 Určování velikosti částic z měření vibrací	19
1.1.4 Určování velikosti částic pomocí metody akustické emise	19
1.2 Metoda akustické emise	19
1.2.1 Princip metody AE	19
1.2.2 Vlastnosti generovaných vln akustické emise	21
1.2.3 Zpracování a typy signálu AE	23
1.3 Použití akustické emise v granulometrii	24
1.4 Analýza signálu akustické emise	28
1.4.1 Popis a parametry signálu AE (časová doména)	28
1.4.2 Frekvenční doména	30
1.4.3 Statistické parametry	32
2 Popis dostupných dat	34
2.1 Přehled a popis použitých parametrů měření	36
2.1.1 Částice/masa/bez dopadů a počet záznamů	37
2.1.2 Směs částic, frakce	37
2.1.3 Výška volného pádu	43
2.1.4 Použitý vlnovod	43
2.1.5 Typ násypky	44
2.1.6 Snímač	46
2.1.7 Rozsah AD převodníku a použití zesilovače	48
2.1.8 Vzorkovací frekvence	50
3 Experiment	51
3.1 Popis aparatury	51
3.2 Měřicí karta a záznamový software	52
3.3 Parametry měření a změřená data	54
4 Zpracování dat	57
4.1 Úprava nekonzistentních názvů složek	57
4.2 Načítání binárních souborů	57
4.3 Popis funkčnosti kódu	58

4.3.1	Hlavní diagram	58
4.3.2	Data selecting	59
4.3.3	Data browsing	60
4.3.4	Features calculating	62
4.3.5	Features browsing	63
4.3.6	Results browsing	64
4.4	Ukládání dat	65
4.5	Time stamps – časové značky	66
4.6	Šumová data v sadě Vlnovody Experiment	67
4.7	Informace k používání programu	67
4.8	Výčet a popis SubVI	68
5	Analyzované příznaky a výsledky analýzy	72
5.1	Výběr dat pro analýzu	72
5.2	Datová sada Vlnovody Experiment	73
5.3	Příznaky	73
5.4	Výpočet míry separability a vliv na vyhodnocení výsledků	77
5.4.1	Vliv míry separability na vyhodnocení výsledků	80
5.5	Flow Single Thick	80
5.6	Flow Double Thick Aura 003	83
5.7	Flow Multi Thick Aura003	86
5.8	Flow Single Aura 004	88
5.9	Flow Single Fraction	88
5.10	Shrnutí analýz	92
	Závěr	93
	Literatura	95
	Seznam příloh	99
	A Přehledová tabulka dostupných dat	100
	B Tabulky míry separability	103
B.1	Flow Single Thick	103
B.2	Flow Double Thick Aura003	104
B.3	Flow Multi Thick Aura003 – poměry	106
B.4	Flow Multi Thick Aura003 – rozložení	108
B.5	Flow Single Aura004	110
B.6	Flow Single Fraction – neextrahované signály	112
B.7	Flow Single Fraction – extrahované signály	114

C Grafy příznaků	116
C.1 Flow single thick	116
C.2 Flow double thick	117
C.3 Flow Single Fraction – neextrahované signály	118
C.4 Flow Single Fraction – extrahované signály	120
D Obsah elektronické přílohy	121

Seznam obrázků

1	Příklad experimentálního měření AE při dopadu částic v průmyslu . . .	15
1.1	Schéma FBRM sondy (není v měřítku)	18
1.2	Generování AE způsobené uvolněním energie z materiálu	20
1.3	Akustické spektrum	21
1.4	Typy vln	22
1.5	Měřicí řetězec signálu AE	23
1.6	Praskavý vs. spojitý signál AE	24
1.7	Příklad signálu AE	24
1.8	Princip měření velikosti částic metodou AE	25
1.9	Spektrální čáry v závislosti na výšce dopadajících částic	26
1.10	Spektrální čáry v závislosti na poměru směsi dopadajících částic . . .	27
1.11	Typy signálů při dopadu masy a částice	28
1.12	Parametry signálu AE	29
1.13	Oktávové spektrum	32
2.1	Pořízené fotky při dopadu frakce na vlnovod	36
2.2	Keramzit granulát	38
2.3	Síta	38
2.4	Normální rozložení směsí s pokrytím 80, 90 a 99 %	40
2.5	Rozložení částic při pokrytí 99 %	40
2.6	Tabulka RR rozložení směsí s chybnými parametry $b(\lambda)$	41
2.7	RR rozložení s pokrytím 99 % a chybnými parametry	41
2.8	RR rozložení s pokrytím 99 % a novými parametry	42
2.9	Vlnovody umístěné v aparatuře	44
2.10	Vlnovody – kulatina, čtverec, šipka	44
2.11	Magnetická spoušť	45
2.12	Klepací násypka	46
2.13	Použité snímače	46
2.14	Charakteristika snímače Aura SV416 naměřená metodou Hatano . . .	47
2.15	Frekvenční charakteristika UT1000	47
2.16	Signály ze sady Aura Vlnovody – bez a se zesilovačem	49
2.17	Aura vlnovody – bez ZES (3,15–4 mm; 0,85 m; kulatina20povrch) . .	49
3.1	Aparatura pro experimentální měření granulometrie	51
3.2	Pohled na aparaturu z boku	52
3.3	Držák pro upevnění snímače k vlnovodu	52
3.4	Měřicí karta Dakel ZEDO-22	52
3.5	Prostředí programu ZEDO Daemon	53
3.6	Možnosti exportu dat	54

3.7	Měřicí soustava	54
4.1	Stavový diagram kódu	58
4.2	Stavy <i>Data selecting</i> , <i>Features calculating</i> a jejich indikace na Front panelu	59
4.3	Stav <i>Data selecting</i>	60
4.4	Front panel – Browsing	61
4.5	Stav <i>Browse data</i>	62
4.6	Stav <i>Calculate features</i>	62
4.7	Front panel stav <i>Features browsing</i>	63
4.8	Blokový diagram stav <i>Features browsing</i>	64
4.9	Front panel stav <i>Results browsing</i>	65
4.10	Blokový diagram stav <i>Results browsing</i>	65
5.1	Signál AE při použití různých násypek	73
5.2	Oktávové spektrum 1/3 z celého signálu	75
5.3	Oktávové spektrum 1/3, vyhlazené a interpolované	75
5.4	Oktávové spektrum 1/12 z kladné části signálu	76
5.5	Oktávové spektrum 1/6 z kvadrátu signálu	77
5.6	Výpočet míry separability – grafické znázornění	78
5.7	Příznak Band frequency 1/3, pouze pravá frekvence – barva odpovídá výšce dopadu	81
5.8	Band Frequency POS 1/12	82
5.9	Band Freq PWR 1/3	83
5.10	Band Freq 1/3, pro všechny směsi	84
5.11	Bandwidth 1/24, pro všechny směsi	85
5.12	Sum OCV 1/3, pro všechna rozložení	87
5.13	Band Freq POS 1/3, pro všechna rozložení	87
5.14	Band Freq 1/3, neextrahovaný signál	89
5.15	Bandwidth 1/24, neextrahovaný signál	90
5.16	Band freq 1/6, extrahovaný signál	91
B.1	Tabulka datové sady Flow Single Thick, část 1/1	103
B.2	Tabulka datové sady Flow Double Thick, část 1/2	104
B.3	Tabulka datové sady Flow Double Thick, část 2/2	105
B.4	Tabulka datové sady Flow Multi Thick pro různá pokrytí, část 1/2	106
B.5	Tabulka datové sady Flow Multi Thick pro různá pokrytí, část 2/2	107
B.6	Tabulka datové sady Flow Multi Thick pro různá rozložení, část 1/2	108
B.7	Tabulka datové sady Flow Multi Thick pro různá rozložení, část 2/2	109
B.8	Tabulka datové sady Flow Single Aura004, část 1/2	110
B.9	Tabulka datové sady Flow Single Aura004, část 2/2	111

B.10 Tabulka datové sady Flow Single Fraction pro neextrahované signály, část 1/2	112
B.11 Tabulka datové sady Flow Single Fraction pro neextrahované signály, část 2/2	113
B.12 Tabulka datové sady Flow Single Fraction pro extrahované signály, část 1/2	114
B.13 Tabulka datové sady Flow Single Fraction pro extrahované signály, část 2/2	115
C.1 Bandwidth OCV 1/3	116
C.2 Bandwidth POS 1/12	116
C.3 Band Freq 1/24	117
C.4 Band Freq 1/24	117
C.5 Bandwidth OCV 1/3	118
C.6 Band Freq 1/6	118
C.7 Band Freq 1/24	119
C.8 Band Freq POS 1/3	119
C.9 Band Freq 1/3	120

Seznam tabulek

2.1	Stručná přehledová tabulka dostupných datových sad	35
2.2	Určené parametry Rossin & Rammler rozložení	43
2.3	Parametry snímače UT1000	48
2.4	Parametry snímače Olympus V103-RB	48
3.1	Parametry měření	55
3.2	Počet změřených signálů	55
4.1	Porovnání časového rozdílu dopadu částic ze snímků a ze signálu AE	66
4.2	Počet změřených signálů po odstranění šumových dat	67
5.1	Data při dopadu masy	72
5.2	Analyzované příznaky	74
5.3	Analyzované průběhy	77
5.4	Vybrané příznaky pro sadu FLOW SINGLE THICK	81
5.5	Vybrané příznaky pro sadu FLOW DOUBLE THICK	84
5.6	Porovnání amplitud příznaku Band Freq 1/3 pro výšku 0,850 m pro směs 5 a 3,15 mm se sadou FLOW SINGLE THICK	85
5.7	Vybrané příznaky pro sadu FLOW SINGLE FRACTION pro neex- trahovaný signál	89
5.8	Vybrané příznaky pro sadu FLOW SINGLE FRACTION pro extra- hovaný signál	90
5.9	Porovnání amplitud příznaku Band Freq 1/3 0,850 m se sadou FLOW SINGLE THICK	91

Úvod

Granulometrie je pojem, který popisuje měření a určování velikosti částic či frakce v určité mase. Někdy je také popisována jako PSD (particle size distribution).

Granulometrie je v mnoha odvětvích důležitá součást výroby. Při výrobě je totiž nutné dodržet stanovené velikosti částic (frakce) výsledného produktu, které se obvykle řídí normami. Příkladem může být měření prachu v plynu, měření velikosti hornin (zejména uhlí) a nerostů, měření velikosti běžně prodávaných produktů, jako je prací prášek, keramzit a další. Z uvedených příkladů je patrné, že velikosti částic, které je nutné měřit, se mohou nalézat v širokém rozsahu. Tato diplomová práce se z velké části zaměřuje na keramzit, jehož velikost se pohybuje v jednotkách milimetrů.



Obr. 1: Příklad experimentálního měření AE při dopadu částic v průmyslu

Pro měření velikosti částic existuje řada metod a přístupů. Příkladem může být prosévání částic přes síta, laserové měření, určování ze snímků, měření vibrací nebo akustické emise. Výčet metod a jejich stručný popis je popsán na začátku první kapitoly.

Tato diplomová práce se zabývá zpracováním již naměřených signálů akustické emise. V principu je metoda akustické emise založena na měření elastických vln, které vzniknou následkem dopadu částic na překážku. Změřené signály akustické emise je poté možné analyzovat. Na obrázku 1 je zobrazen příklad experimentálního měření akustické emise dopadajících částic v průmyslu.

V článku [1] se Uher a Beneš věnovali experimentu, který se zaměřoval na vztah mezi signálem akustické emise a velikostí měřených částic. Experiment se zaměřoval na snímání a zpracování signálu při dopadu částic různých velikostí a také při dopadu částic s různou rychlostí. Bylo ověřeno, že metoda AE má potenciál v měření velikosti granulí.

Pro zpracování a následnou analýzu je k dispozici rozsáhlá datová sada, která byla změřena jako návaznost na výše popsany experiment. Datová sada má velikost 194 GB a jednotlivá měření byla provedena s různými parametry, jako například různá výška dopadu částice, typ vlnovodu (překážka) nebo velikost frakce.

Cílem této práce je popsat datovou sadu, vybrat vhodnou část dat pro analýzu a na těchto datech ověřit či určit vztah mezi signálem akustické emise a velikostí částic.

V první kapitole této práce jsou uvedeny metody granulometrie a je popsán princip akustické emise spolu s metodami analýzy signálu. V druhé kapitole jsou popsána dostupná data, komponenty a parametry použité při měření. Ve třetí kapitole je popsán vlastní experiment měření velikosti částic, změřená data a parametry měření. V následující kapitole je popsán implementovaný nástroj pro analýzu signálů v prostředí LabVIEW a v poslední kapitole je rozebrána analýza vybrané části dat.

1 Granulometrie a metody měření

V této kapitole jsou popsány vybrané metody, které lze využít pro měření velikosti částic. Následně je detailněji rozebrán princip metody akustické emise a její využití v granulometrii. Na konci této kapitoly jsou popsány způsoby nebo možnosti analýzy signálu akustické emise, které by mohly být vhodné pro určení velikosti částic.

1.1 Metody pro měření velikosti částic

Granulometrie se zabývá měřením velikosti částic. Pro měření velikosti částic existuje řada metod. Tou nejzákladnější je prosévání částic přes síto. Tato metoda je však velmi zdlouhavá, a proto je snaha nasazovat v praxi efektivnější metody [2].

Výběr metody je závislý například na možnostech připevnění měřicí soustavy nebo na velikosti částic, kterou je třeba měřit. Ve farmaceutickém či chemickém průmyslu se velikost částic může pohybovat v jednotkách nanometrů až mikrometrů [3]. V literatuře [4] se zabývají měřením velikosti částic biomasy, která se pohybuje v řádu milimetrů, a v článku [2] je popsán přehled metod využitelných pro měření práškového prášku o velikosti stovek mikrometrů. Existuje také mnoho aplikací, kde je potřeba měřit větší částice jako například horniny, jejichž měřená velikost se pohybuje v řádech jednotek až desítek milimetrů [5].

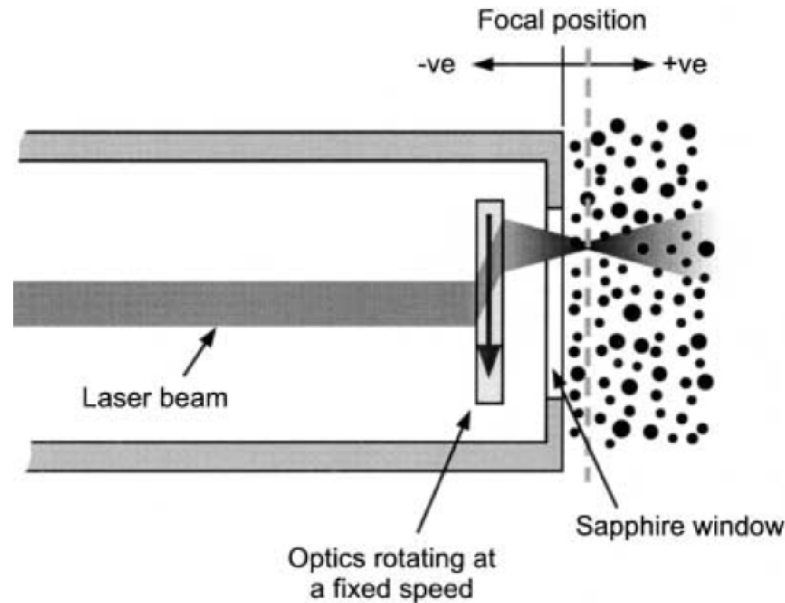
Pro měření velikosti částic se používá řada metod, například: měření spotřeby, NIR (Near infrared spectroscopy), snímání obrazu, optické metody – FBRM (Focused beam reflectance measurement), měření kapacity a rezistivity, mikrovlnné měření, SFV (Spatial filter velocimetry), vibrace nebo akustická emise [2].

V následujícím textu jsou popsány vybrané metody, které lze využít pro měření velikosti částic.

1.1.1 Metody založené na laserovém měření

Příkladem laserové metody může být FBRM (Focused beam reflectance measurement). Na obrázku 1.1 je zobrazeno schéma FBRM sondy.

V sondě je umístěný laserový paprsek směřovaný na čočku. Čočka rotuje konstantní rychlostí, což vytvoří paprsek, který je zaměřen (fokusován) do konkrétního místa. Při nasvícení částice tímto paprskem se část světla odrazí zpátky do sondy, kde je zachycena snímačem. Délka pulsu odraženého světla je poté přímo úměrná šířce částice v místě, kde paprsek osvětluje tuto částici. Pomocí této metody lze měřit částice o velikosti jednotek až stovek mikrometrů. [6]



Obr. 1.1: Schéma FBRM sondy (není v měřítku) [6]

FRBM je schopno měřit velké množství částic a určovat jejich velikost v reálném čase, nevýhodou však je, že sonda musí být umístěna velmi blízko měřené částice, maximálně 2 mm. [2, s. 3]

1.1.2 Určování velikosti částic z obrazu

Vyhodnocování parametrů z obrazu je jednou z možností měření velikosti částic. Pro pořizování snímků je nutné mít vhodnou kameru a osvětlení. Z pořízených snímků lze určit velikost částic pomocí zpracování obrazu. V počítačovém vidění je mnoho přístupů a nástrojů pro zpracování obrazu a parametrů pro vyhodnocení. Příkladem může být určování průměru ze segmentovaného obrazu [5, 7] nebo snímání a vyhodnocování velikosti částic na základě stínů z osvětlení [8]. Z uvedených článků vyplývá, že obecně je problematické, pokud se částice překrývají.

Dnešní hardware umožňuje obraz snímat a vyhodnocovat v reálném čase. Nevýhodou však je, že není vždy k dispozici vhodný prostor pro umístění celého zařízení s osvětlením [2, s. 3]. Rozsah velikostí částic, který je možné vyhodnocovat, je závislý na parametrech vybrané kamery a jejím nastavení. Obecně ale platí, čím menší částice je nutné rozpoznat, tím výkonnější hardware je zapotřebí.

1.1.3 Určování velikosti částic z měření vibrací

Jeden z prvotních experimentů pro měření velikosti částic ze signálu vibrací byl popsán v článku [9] z roku 1986. Článek se zabýval monitorováním velikosti částic v planetárním mixéru. Pro měření byla použita speciální sonda s akcelerometrem, který byl umístěn za plátem ohnutým do širokouhlé špičky. Sonda byla vložena do směsi a bylo zjištěno, že rychlost (špička) a výchylka (špička – špička) vibrací jsou závislé na změně velikosti a hustotě částic.

V článku [10] z roku 1999 byla použita FFT pro analyzování velikosti částic. Kulová sonda byla vložena přímo do směsi ve směšovacím granulátoru. Bylo zjištěno, že magnituda frekvence rotujících lopatek se zvyšuje se zvětšujícím se průměrem částic v nádobě.

Měření a vyhodnocování vibrací je možné provádět v reálném čase a výhodou může být neinvazivnost metody. Nevýhodou je náročné zpracování signálu, tedy hledání vztahu mezi měřeným signálem a velikostmi částic. [2, s. 4] Je také nutné uvažovat, že částice musí být schopny vybudit snímané vibrace [11].

1.1.4 Určování velikosti částic pomocí metody akustické emise

Další možnou metodou je měření velikosti granulí pomocí akustické emise. Výhodou je například jednoduché nasazení do již zavedené výroby, jednoduchá aparatura nebo také schopnost měřit v reálném čase [1]. Nevýhodou poté náročnější hledání vztahu mezi signálem a velikostí granulí [2]. Výhodou také je schopnost měřit i menší částice v řádech stovek μm [4].

Tato diplomová práce se zaměřuje na zpracování signálů akustické emise. Metoda akustické emise bude tedy podrobněji popsána v následující kapitole.

1.2 Metoda akustické emise

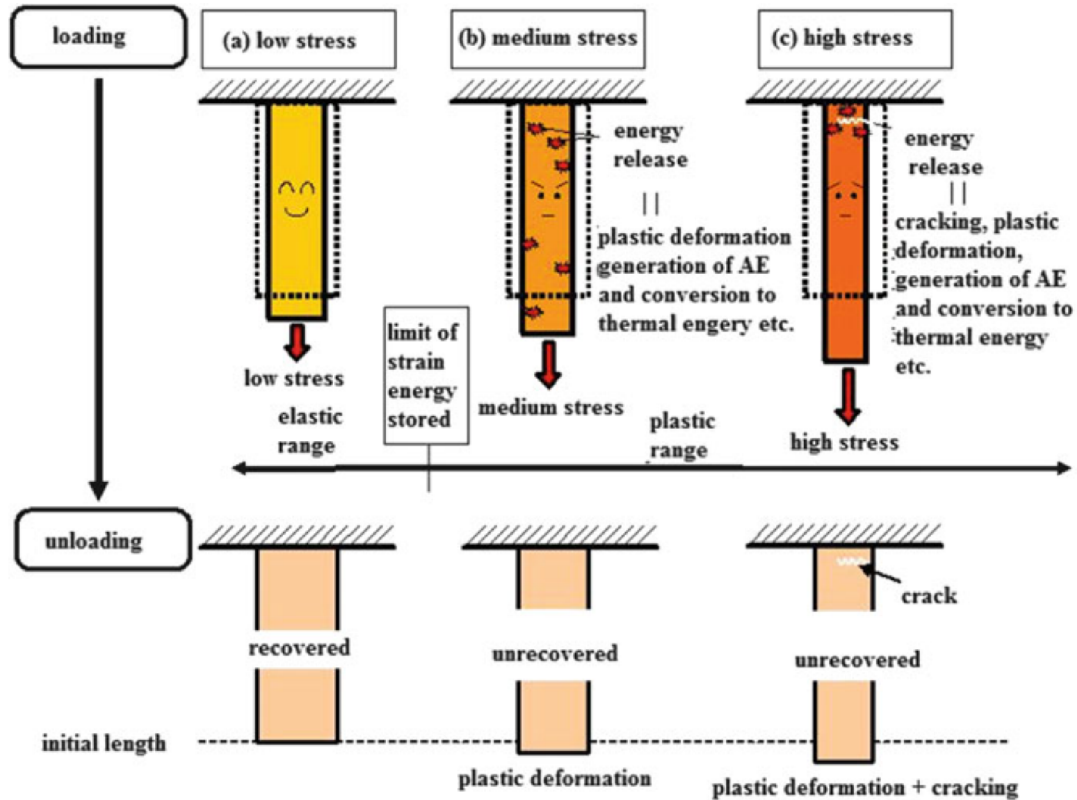
Metoda akustické emise je využitelná pro různá odvětví v průmyslu, tedy nejen pro granulometrii. Hojně se využívá při měření defektů v materiálu, čímž se předchází fatálnímu selhání snímaného objektu.

Tato kapitola se bude věnovat metodě akustické emise obecně. Nejdříve bude nastíněn princip metody a vlastnosti generovaných vln a následně bude nastíněn měřicí řetězec pro snímání signálů AE.

1.2.1 Princip metody AE

Metoda akustické emise je založena na měření elastických vln, které vzniknou následkem působení vnějších sil na tuhý materiál. [12]

Velikost síly, která působí na materiál, určuje chování materiálu v průběhu a po ukončení zatížení. Podle literatury [12, s. 5] lze rozlišit tři velikosti působících sil: malé, střední a velké zatížení. Na obrázku 1.2 je zobrazen vliv působení různých velikostí sil na materiál.



Obr. 1.2: Generování AE způsobené uvolněním energie [12, s. 6]

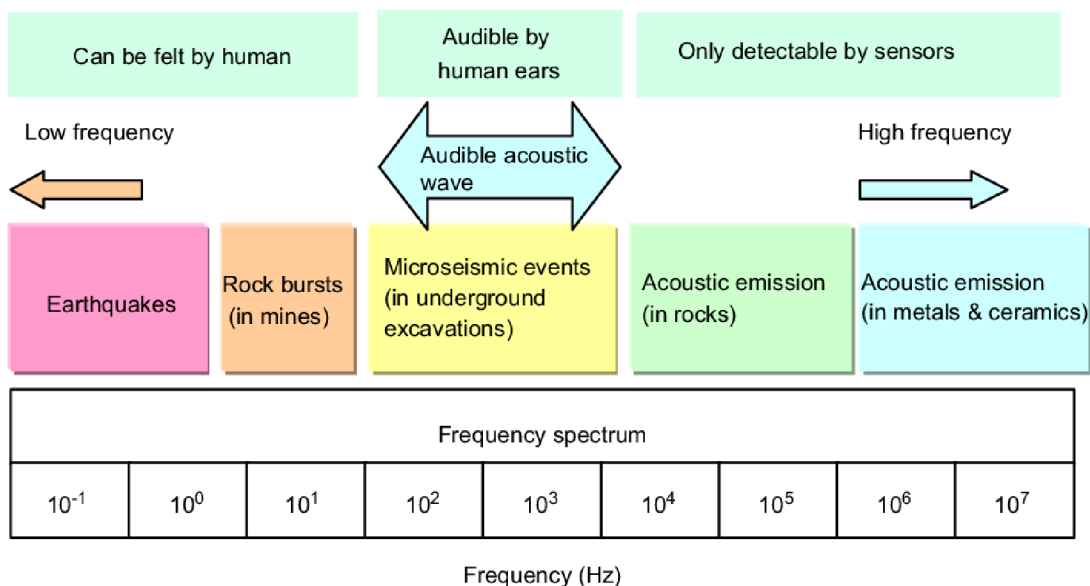
Při působení malého zatížení dochází vlivem naakumulované energie v materiálu k elastické deformaci. Po ukončení zatížení se materiál vrátí do původní formy (a). Při zvýšení zatížení na hladinu, kdy naakumulovaná energie v materiálu přesáhne maximální možný limit, dojde k uvolnění energie z materiálu. Toto uvolnění energie způsobí plastickou deformaci, tedy takovou deformaci, kdy se materiál po ukončení zatížení není schopen vrátit zpět do původní formy (b). Plastická deformace způsobí tzv. mikro-trhliny v materiálu. Při dalším zvýšení působící síly dojde k trhlinám v materiálu (c). [12]

Při plastické deformaci nebo při prasknutí materiálu dojde k uvolnění energie ve formě elastických vln. Tento jev je popisován jako akustická emise (AE) a generované vlny jsou nazývány jako vlny akustické emise (dále AE vlny). AE vlny se šíří v materiálu z místa vzniku a mohou být detekovány AE senzorem na jeho povrchu. [12]

Metoda je považována za nedestruktivní metodu (Non-Destructive Testing), jelikož měření probíhá v průběhu zatížení materiálu a působení síly na materiál je zachyceno ve velmi brzkém stádiu. [13]

1.2.2 Vlastnosti generovaných vln akustické emise

Na obrázku 1.3 je zobrazeno akustické spektrum. Obecně lze spektrum rozdělit na tři pásma: infrazvuk – menší než 16 Hz, slyšitelný zvuk a ultrazvuk – vyšší než 16 kHz.



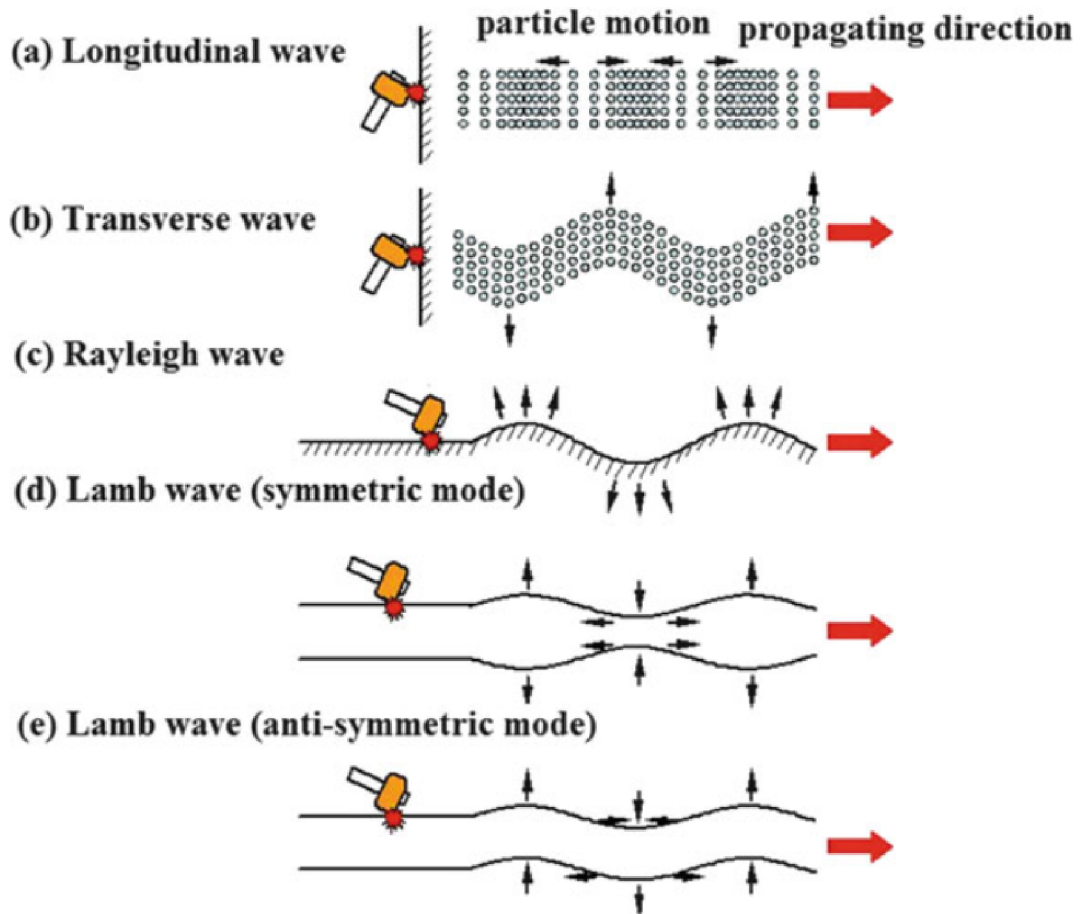
Obr. 1.3: Akustické spektrum [14, s. 6]

Jev akustické emise se projevuje ve všech třech pásmech, a zatímco v infrazvukovém pásmu se nacházejí události jako například zemětřesení, v ultrazvukovém pásmu je akustická emise generována na mikroskopické úrovni [13]. V tomto pásmu probíhají měření akustických emisí, která jsou využitelná v průmyslu.

AE vlna se šíří materiálem z místa vzniku určitou rychlostí a skládá se z několika módů nebo typů vln, obrázek 1.4. [12]

Podélná (longitudinal) vlna se šíří ve směru pohybu částic a má nejvyšší rychlost.

U příčné (transverse) vlny je směr pohybu částic kolmý na směr pohybu vlny. Tento pohyb lze popsat na příkladu s provazem, který je na jednom konci upevněný a na druhém konci je držen napnutý. Při soustavném pohybu nahoru a dolů s jedním koncem provazu se vytvoří příčná vlna a pohyb, který je vykonáván s provazem, je kolmý na směr šíření vlny. Příčnou vlnu lze vytvořit pouze v tuhých materiálech. [15]



Obr. 1.4: Typy vln [12, s. 14]

Rayleigh nebo také povrchová vlna se šíří na povrchu tělesa a je kombinací podélné a příčné vlny. Tato kombinace vytvoří eliptický pohyb a se zvyšující se hloubkou v materiálu se velikost pohybu zmenšuje. Na povrchu materiálu se tedy vytvoří vlnění s nejvyšší amplitudou. Tato vlna se vytváří v tlustých materiálech. Rayleigh vlna je známá jako projev zemětřesení. [16]

Lamb vlny se vytváří v tenkých materiálech a jsou způsobeny vibrací materiálu. Tyto vlny mohou být symetrické, nebo asymetrické. [12]

Rychlost šíření vln závisí na typu vlny, ale také na materiálu, kterým se šíří. Rychlost šíření podélné vlny lze vyjádřit pomocí vzorce [12]:

$$C_L = \sqrt{\frac{(1 - \mu)E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)\rho}} \quad (\text{m s}^{-1}) \quad (1.1)$$

A rychlost šíření příčné vlny lze vyjádřit [12]:

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{2(1 + \mu)\rho}} \quad (\text{m s}^{-1}) \quad (1.2)$$

kde:

μ = Poissonova konstanta

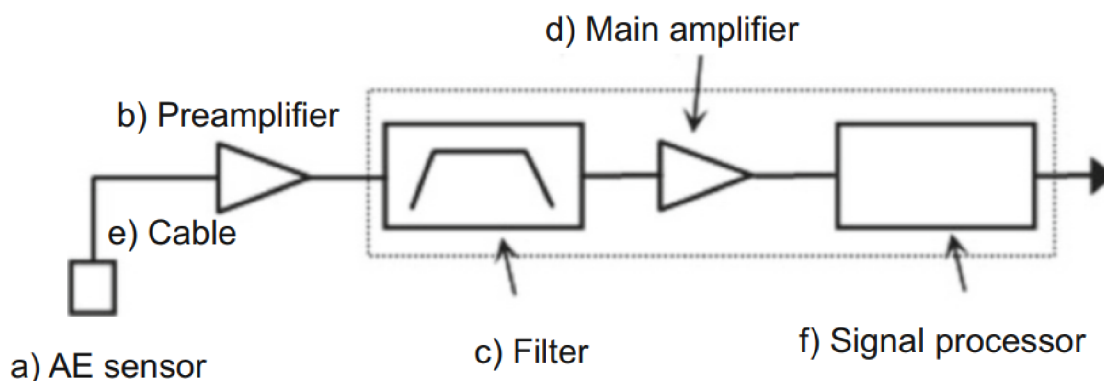
E = Youngův modul pružnosti

ρ = hustota materiálu

Vlny, které se šíří od místa vzniku, jsou snímány senzorem na povrchu materiálu. Na povrchu však dochází k odrazu vln a je nutné počítat s tím, že měřené vlny jsou těmito odrazy ovlivněny. [12]

1.2.3 Zpracování a typy signálu AE

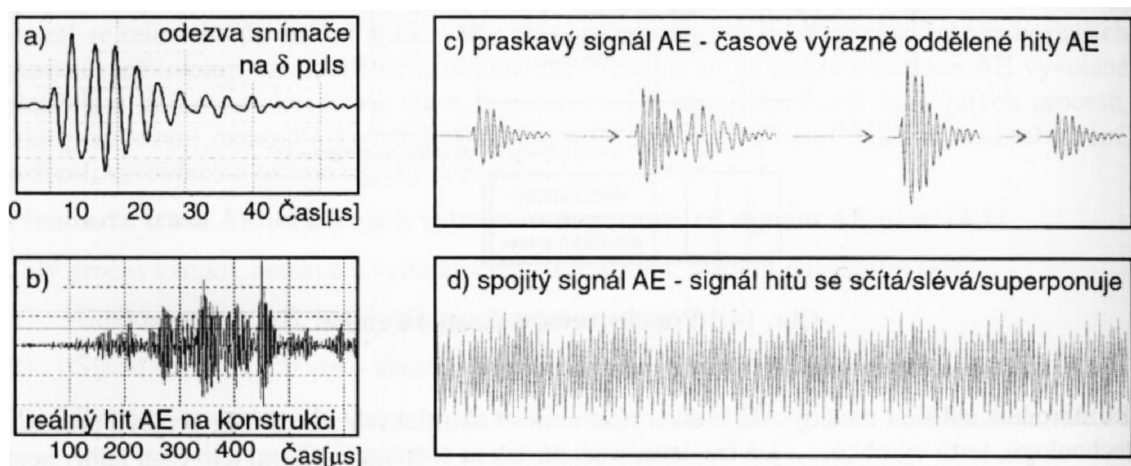
Signál akustické emise je snímán ze senzoru a předzpracován v měřicím řetězci (obrázek 1.5), který se obvykle kromě snímače skládá z předzesilovače (b), filtru (c), hlavního zesilovače (d), kabelu (e) a jednotky pro zpracování signálu (f). AE vlny jsou tímto řetězcem detekovány a převedeny na elektrický signál, kterým je obvykle napětí. [12, s. 20]



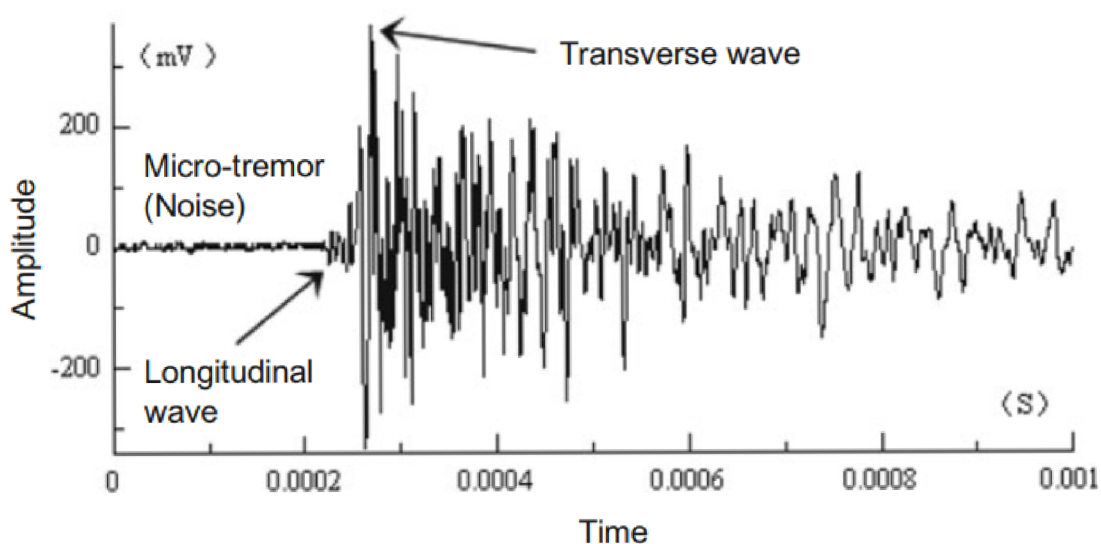
Obr. 1.5: Měřicí řetězec signálu AE [12, s. 21]

Na obrázku 1.6 je možné vidět dva typy signálu AE, tzv. praskavý (burst) a spojitý signál. Praskavý signál vznikne v případě, že zatížení a vznik události AE působí po větších časových krocích, a je tedy možné pozorovat jednotlivé události v signálu. Spojitý signál vznikne při působení více událostí AE najednou nebo při působení událostí AE krátce po sobě. Tento signál má charakter šumu, tzv. akustický šum. [17, s. 448]

Na obrázku 1.7 lze vidět příklad reálného signálu s vyznačenou podélnou a příčnou vlnou. Popis a parametry signálu akustické emise jsou popsány v kapitole 1.4.



Obr. 1.6: Praskavý vs. spojitý signál AE [17, s. 448]

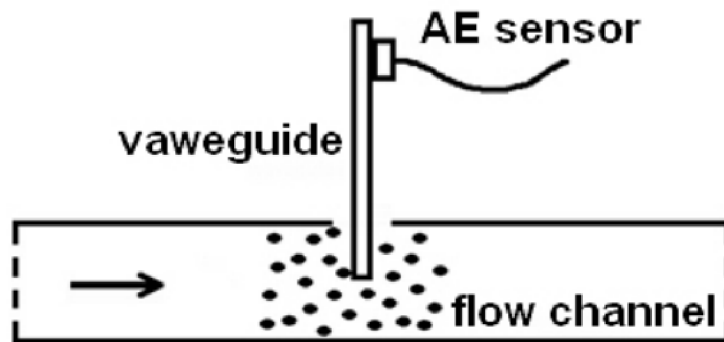


Obr. 1.7: Příklad signálu AE [12, s. 22]

1.3 Použití akustické emise v granulometrii

V předchozí kapitole byl popsán princip vzniku akustické emise. Bylo vysvětleno, že při působení vnějších sil na materiál dojde ke vzniku vln akustické emise, které se šíří materiálem a snímají se na jeho povrchu.

Tohoto jevu lze využít pro měření velikosti částic, které dopadají na překážku. V následujícím textu bude popsána teorie a experiment, kterým se zabývá článek [1]. V článku jsou odvozeny vztahy 1.3 a 1.4 z Hertzovy teorie o kontaktu. Předpokladem je, že částice s určitým poloměrem dopadají na plošnou překážku z určité výšky a na překážce se měří signál AE, obrázek 1.8. [1]



Obr. 1.8: Princip měření velikosti částic metodou AE [1]

$$T = 3.8556 \times [\rho(\alpha_1 + \alpha_2)]^{0.4} \nu^{-0.2} r \quad (1.3)$$

$$F_{max} = 3.4929 \times (\alpha_1 + \alpha_2)^{-0.4} \rho^{0.6} \nu^{1.2} r^2 \quad (1.4)$$

kde:

T = čas kontaktu

F_{max} = amplituda síly kontaktu

ν = rychlost dopadajících částic

r = poloměr dopadajících částic

ρ = hustota dopadajících částic

α_1 = materiálová konstanta částic

α_2 = materiálová konstanta plochy

$$\alpha_1 = \frac{1 - \mu_1}{G_1} \quad (1.5)$$

$$\alpha_2 = \frac{1 - \mu_2}{G_2} \quad (1.6)$$

kde:

μ = Poissonova konstanta částic a plochy

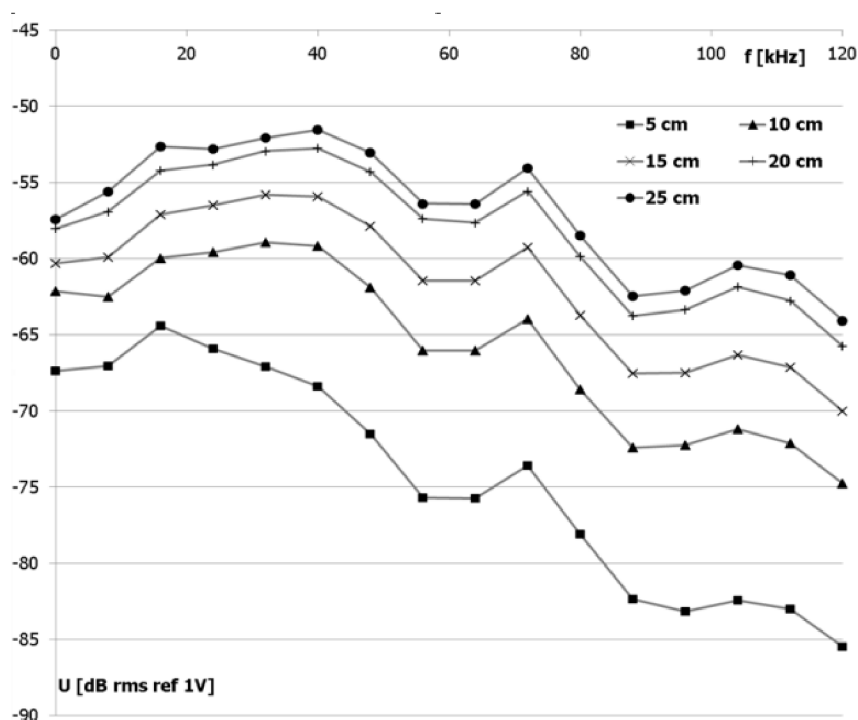
G = modul pružnosti částic a plochy

Ze vztahů 1.3 a 1.4 [1] vyplývá, že čas kontaktu částic T je přímo úměrný poloměru částice r a nepřímo úměrný rychlosti dopadu částic ν . A amplituda síly během kontaktu F_{max} je přímo úměrná rychlosti částic ν a mocnině poloměru částic r . Ze vztahů tedy vyplývá, že metoda akustické emise je využitelná pro měření velikosti částic, jelikož velikost amplitudy vlny a trvání signálu akustické emise jsou závislé na poloměru částic dopadajících na plošnou překážku. [1]

Teoretický předpoklad je v článku ověřen na experimentu. Nejdříve byly měřeny signály při dopadu částic z různých výšek (tedy s různou rychlostí) na plošnou překážku. A následně byly měřeny signály při dopadu směsi částic s různým podílem velikostí částic. Změřené signály byly převedeny do frekvenční oblasti pomocí FFT, obrázek 1.9 a 1.10. [1]

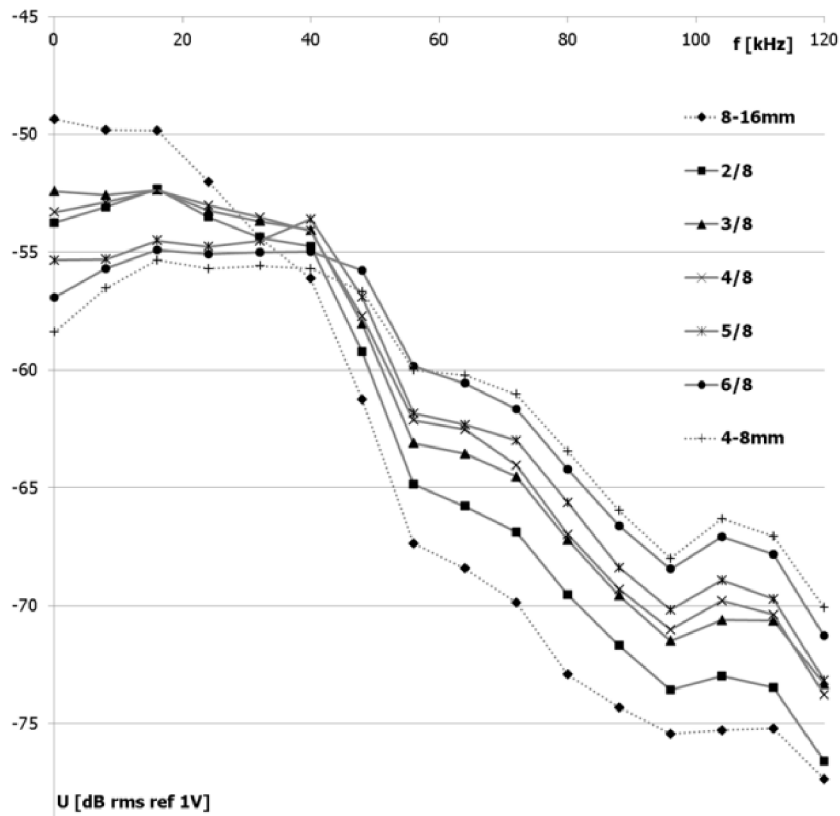
Z obrázku 1.9 vyplývá, že dopad částic z různé výšky koresponduje s různým posunutím charakteristiky, a z frekvenčního spektra na obrázku 1.10 vyplývá, že směs s nejmenšími částicemi se projevuje nízkou amplitudou v nižších frekvencích a zároveň vyšší amplitudou ve vyšších frekvencích. U směsi s největšími částicemi tomu je naopak. [1]

Dále je teoreticky spočítaná závislost síly F_{max} na velikosti částic a porovnána v grafech s amplitudami měřeného signálu na frekvencích 0–8 a 120–128 kHz. Z charakteristik se ověřilo, že síla F_{max} odpovídá amplitudě ve spektru. [1]



Obr. 1.9: Spektrální čáry v závislosti na výšce dopadajících částic [1]

Metodou akustické emise v granulometrii se zabývají další články, například v literatuře [18]. Teoretická část vychází opět z Hertzovy teorie o kontaktu a experiment je prováděn v závislosti na různých výškách dopadu (8, 12, 20, 28, 36 cm), různé tloušťce překážky (6.5, 12.7, 32 mm) a různém toku částic ($0-0.08 \text{ gs}^{-1}$). Výsledky ukazují, že vztah mezi tokem částic a výkonem signálu je lineární, a to i při různých výškách dopadu a různé tloušťce překážky. [18]



Obr. 1.10: Spektrální čáry v závislosti na poměru směsi dopadajících částic [1]

V jiném článku [4] se autoři zaměřují na on-line měření distribuce velikosti částic v biomase (stovky μm), kde rovněž vycházejí z Hertzovy teorie o kontaktu, a experiment potvrzuje, že distribuci velikosti částic lze určit ze signálu AE, konkrétně z amplitudy napětí.[4]

Dostupné jsou i další články s tímto tématem, například literatura [19], [20] a další.

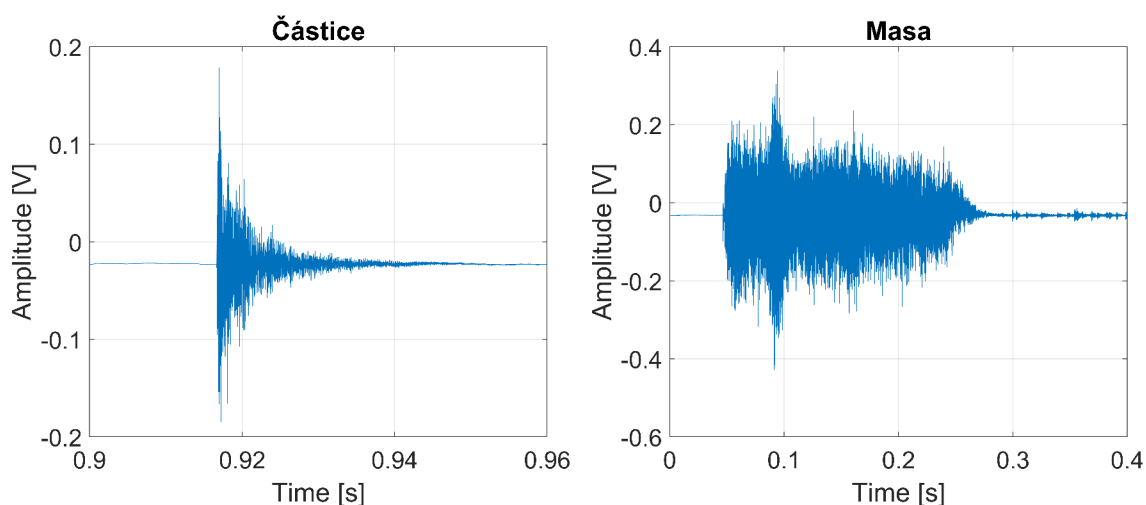
Z článků je patrné, že teoretické předpoklady vycházející z Hertzovy teorie o kontaktu je možné potvrdit experimenty. Liší se však lehce způsob určování velikosti částic – z frekvenčního spektra, ze závislosti výkonu na toku částic, z amplitudy a například v článku [20] je popsán komplexní systém založený na neuronových sítích.

Při analýze signálu lze sledovat a uvažovat různé příznaky signálu AE, které mohou určit velikost částic. Těmito příznaky se bude zabývat následující kapitola.

1.4 Analýza signálu akustické emise

Signál akustické emise lze analyzovat jak v časové, tak frekvenční doméně. Pokud na překážku dopadá jedna částice, vznikne tzv. praskavý signál (kapitola 1.2.3). Pokud na překážku dopadá masa částic, vznikne tzv. spojitý signál, který má charakter šumu. Příklad signálů při dopadu masy a částice z datové sady je zobrazen na obrázku 1.11.

Změřený signál může být ovlivněn úhlem dopadu částice nebo místem dopadu na překážce. Dále zde může docházet k odrazům, kdy jedna částice dopadne na překážku vícekrát, nebo může hrát roli nepravidelný tvar částice. Všechny tyto vlivy mohou mít dopad na průběh signálu.



(a) Signál AE při dopadu částice: Aura VI-novody, frakce 2–3,15 mm, výška 0,85 m, Data_230816_170803 (b) Signál AE při dopadu masy: Flow Single Thick, frakce 2–3,15 mm, výška 0,85 m, Data_310816_164541

Obr. 1.11: Typy signálů při dopadu masy a částice (signály pochází z dostupné datové sady)

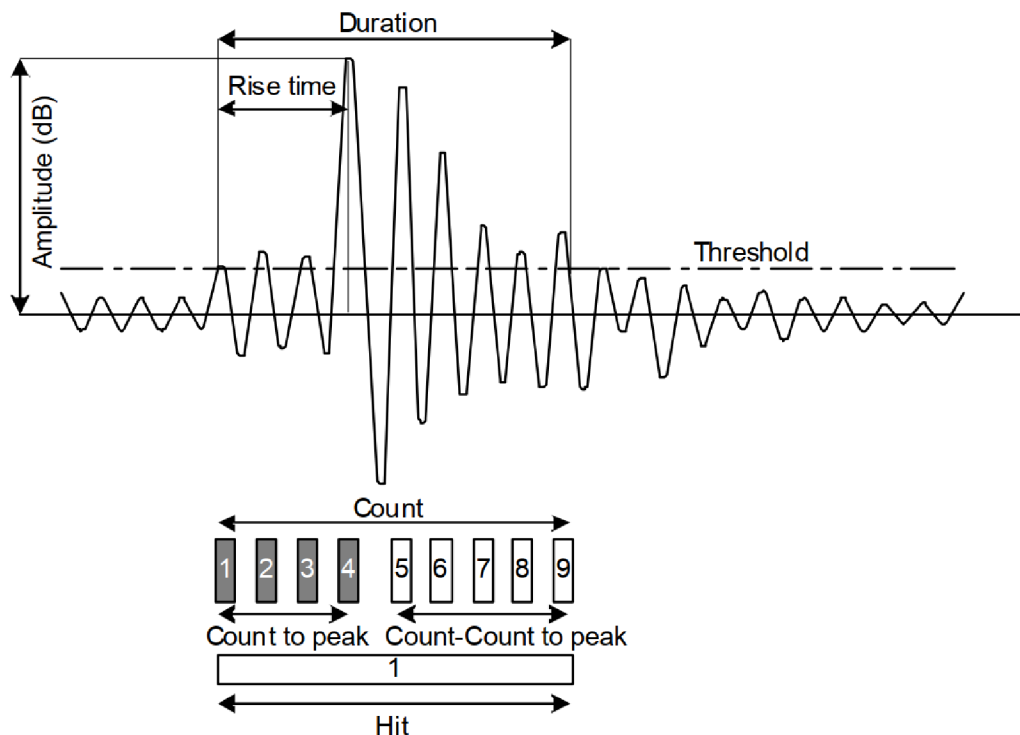
Při dopadu jednotlivých částic lze signál analyzovat v časové i frekvenční doméně. Pokud však na překážku dopadá masa částic, je obtížné získat hodnotné informace v časové doméně a analýza signálu převažuje ve frekvenční doméně.

1.4.1 Popis a parametry signálu AE (časová doména)

Ze změřeného signálu je nejprve nutné vybrat (extrahovat) důležitou část. Signál AE se extrahuje ze signálu v závislosti na nastaveném prahu, obrázek 1.12. Práh se nastavuje lehce vyšší než šumové hodnoty, které se pohybují kolem jednotek až desítek μV . V momentě, kdy poprvé signál přesáhne prahovou hodnotu, detekuje

se tento čas jako začátek signálu AE. Obdobně v momentě, kdy signál začne klesat a nepřesáhl prahovou hodnotu, detekuje se tento čas jako konec AE signálu. Tento práh může být nastaven i pro záporné hodnoty. V některých případech může dojít k tomu, že signál poklesne pod prahovou hodnotu, ale následný puls už je opět nad prahem. V takovém případě může dojít ke ztrátě informace, jelikož již byl detekován konec signálu AE. Možností řešení je stanovit si nový časový parametr, který definuje, jak dlouho od poklesu signálu pod prahovou hodnotu se bude sledovat, jestli signál opět nevzrostl nad prahovou hodnotu. Pokud signál již znovu nevzroste a časový limit uběhne, detekuje se konec signálu AE. [12]

V časové oblasti lze analyzovat několik parametrů. Na obrázku 1.12 je zobrazen příklad signálu AE v čase, kde jsou vyznačené některé sledované parametry. Jejich přehled a popis je uveden níže.



Obr. 1.12: Parametry signálu AE [13, s. 43]

1. Hit

Popisuje počet signálů akustické emise (počet dopadů). Na obrázku 1.12 je zobrazen jeden hit. [13, s. 42]

2. Duration

Doba trvání signálu mezi začátkem a koncem extrahovaného signálu. Začátek i konec signálu se určuje nastavením prahu.[12, s. 28]

3. Rise time

Doba mezi začátkem signálu a amplitudou signálu. [12, s. 28]

4. **Amplitude**

Špičková hodnota, kterou signál dosáhne. Hodnota může být udávána i v decibelech a $1 \mu V$ je definována jako 0 dB. [13, s. 42]

5. **Count**

Definuje, kolikrát signál přesáhl práh (threshold) během trvání signálu (duration). Někdy se však takto označuje pouze počet vzorků, které byly detekovány v čase náběhu (count to peak). [13, s. 42]

6. **Energy**

Energii AE signálu lze definovat více způsoby, a to jako druhou mocninu amplitudy nebo integrál druhé mocniny okamžité amplitudy přes celou dobu trvání AE signálu (duration) nebo integrál okamžité amplitudy definované obálkou průběhu přes celou dobu trvání AE signálu. [12, s. 28]

7. **RMS**

Efektivní hodnota signálu akustické emise popisuje energii signálu [17, s. 479]. Lze ji vyjádřit rovnicí [21, s. 69]:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(k)^2} \quad (1.7)$$

kde:

N = počet vzorků

$u(k)$ = vzorky signálu (napětí)

8. **ASL (Average signal level) – Mean**

ASL reprezentuje průměrnou energii signálu [17, s. 479]. Lze ji vyjádřit rovnicí [21, s. 68]:

$$ASL = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \quad (1.8)$$

1.4.2 **Frekvenční doména**

Pro převod vzorkovaného signálu do frekvenční oblasti se využívá DFT (Discrete Fourier Transform). DFT lze vyjádřit vztahem [21, s. 183]:

$$X(k) = \sum_{n=1}^{N-1} x(n) \cos(2\pi kn/N) - j \sum_{n=1}^{N-1} x(n) \sin(2\pi kn/N) \quad (1.9)$$

kde:

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

Frekvenční doménu lze zobrazit v různých typech spektra. Stochastické (náhodné) signály je vhodnější zobrazovat v PSD (Power Spectral Density) – výkonová

spektrální hustota. PSD S_{xx} je definována jako Fourierova transformace autokorelační funkce $R_{xx}(\tau)$, což lze zapsat vztahy [21, s. 71, 171]:

$$S_{xx} = \mathcal{F}[R_{xx}(\tau)] \quad (1.10)$$

$$R_{xx} = E[x(t)x(t - \tau)] \quad (1.11)$$

kde:

$x(t)$ = signál v čase

τ = posunutí v čase

Magnitudu frekvenčního spektra je možné zobrazit buď v absolutních hodnotách, nebo v decibelech. Parametry, které lze sledovat v absolutním měřítku, jsou popsány níže.

1. Frequency centroid

Definovaná jako podíl sumy magnitud vynásobené frekvencí se sumy magnitud. [13, s. 44]

2. Peak frequency

Definovaná jako hodnota frekvence výkonového spektra odpovídající nejvyšší hodnotě magnitudy. [13, s. 44]

V decibelech lze pak sledovat například sklon křivky či pokles.

Oktávové spektrum

Oktávové spektrum zobrazuje frekvenční osu v oktávách nebo ve zlomcích oktáv ($1/n$). Na frekvenční ose jsou poté zobrazena oktávová pásma s jasně definovanou střední frekvencí a šířkou pásma. [21, s. 47]. Oktávové spektrum je tedy schopno vhodně zobrazit širokou oblast frekvencí.

Příklad $1/24$ oktávového spektra je zobrazen na obrázku 1.13. Čím nižší hodnota n , tím je šířka pásem větší.

Střední frekvence lze určit pomocí vztahu [21, s. 47]:

$$f_c = 1000G^{\frac{x-30}{n}} \quad (1.12)$$

Šířku pásma definovanou horní a dolní frekvencí lze určit pomocí vztahů [21, s. 47]:

$$f_l = f_c G^{-1/2n} \quad (1.13)$$

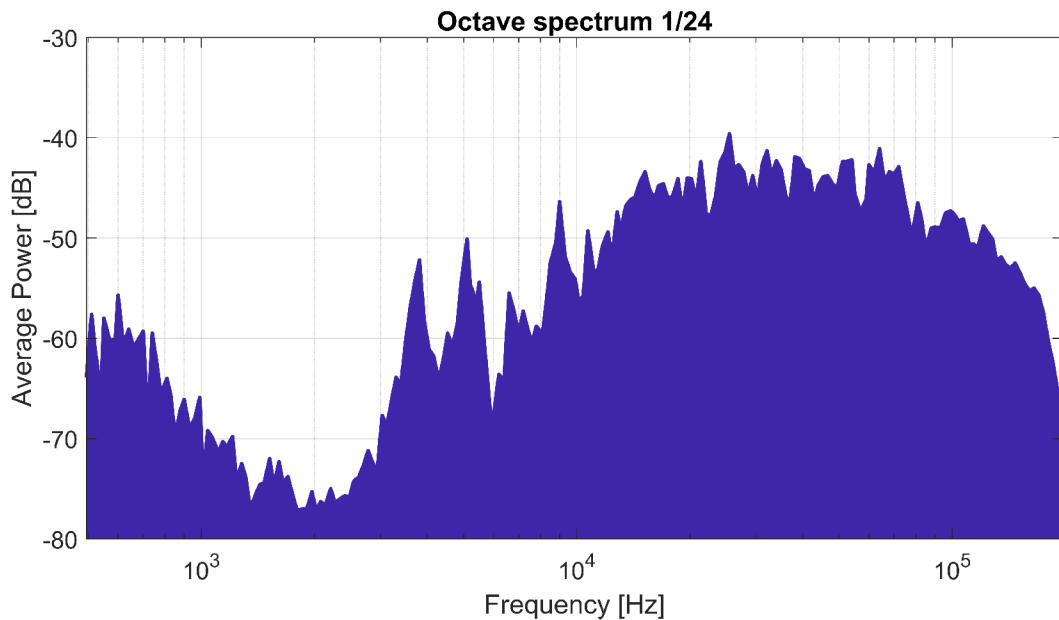
$$f_h = f_c G^{1/2n} \quad (1.14)$$

kde:

$$G = 10^{3/10} \approx 1.9953$$

x = číslo pásma

n = zlomek oktávy



Obr. 1.13: Oktávové spektrum (spektrum vypočteno z dostupných dat, Flow Single Thick, frakce 2–3,15 mm, výška 0,85 m, Data_310816_164541)

1.4.3 Statistické parametry

Centrální momenty mohou být jedny z dalších parametrů, které lze sledovat u signálu akustické emise. Typicky se v analýze zvuku a vibrací používají dva centrální momenty, a to šikmost a špičatost. [21, s. 70]

Rozptyl

Rozptyl je centrální moment druhého řádu a je možné ho z dat určit [21, s. 69]:

$$M_2 = \sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (x - \bar{x})^2 \quad (1.15)$$

kde:

\bar{x} = střední hodnota x

Šikmost

Šikmost S_x definuje symetrii kolem střední hodnoty signálu. Pokud je signál symetrický, šikmost se rovná nule. Šikmost lze definovat [21, s. 70]:

$$S_x = \frac{M_3}{\sigma_x^3} \quad (1.16)$$

kde:

σ_x = směrodatná odchylka

M_3 = centrální moment 3. řádu

Špičatost

Špičatost může být určena porovnáváním špiček pravděpodobnostní hustoty funkce signálu s normálním rozložením. Normální rozdělení má špičatost nulovou. Čím vyšší špička, tím větší špičatost. Špičatost lze definovat [21, s. 70]:

$$K_x = \frac{M_4}{\sigma_x^4} \quad (1.17)$$

kde:

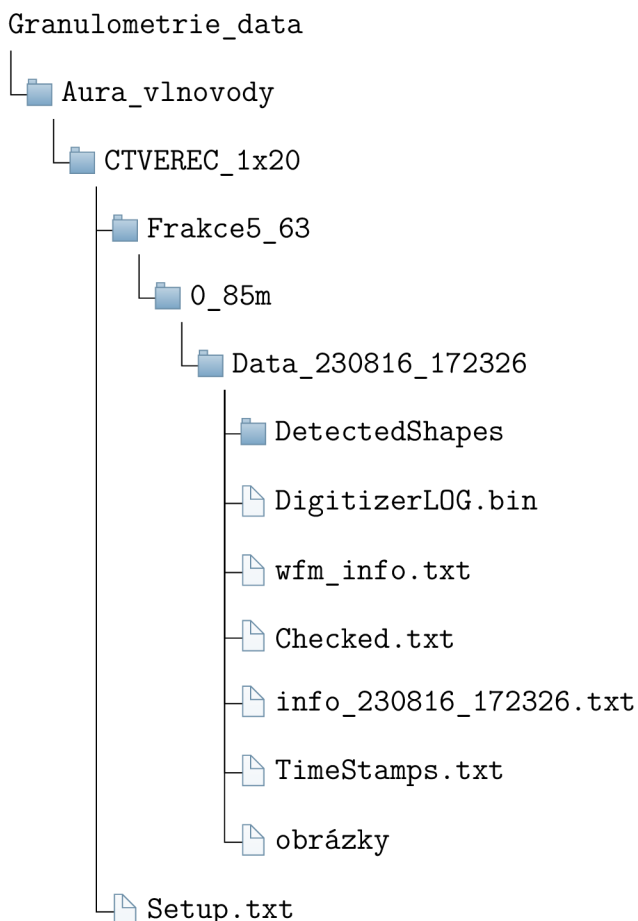
σ_x = směrodatná odchylka

M_4 = centrální moment 4. řádu

2 Popis dostupných dat

V experimentu, který byl popsán na začátku kapitoly 1.3, byl zjištěn teoretický vztah mezi AE a granulometrií. Změřená data, která budou analyzována v této diplomové práci, vznikla jako návaznost na tento experiment. Ve zmiňovaném experimentu se vycházelo z Hertzovy teorie o kontaktu a předpokládal se dopad kulatého objektu na plošnou překážku. V praxi je však granulát často nepravidelný a při dopadu může docházet k odrazům. Cílem měření bylo tedy získat data pro analýzu reálných signálů AE, aby bylo možné určit, které příznaky jsou využitelné pro vyhodnocování velikosti částic pomocí metody AE, popřípadě které parametry jsou při měření stěžejní.

Pro analýzu je k dispozici rozsáhlá datová sada, která má velikost 194 GB. Data se dělí na 19 hlavních složek. Níže je ukázán příklad stromové struktury části jedné z hlavních složek (*Aura Vlnovody*).



Z dostupných dat byl vytvořen celkový přehled a popis, který je zobrazen v tabulce v příloze A. Každý řádek tabulky odpovídá jedné hlavní složce z datové sady, ve sloupcích jsou poté uvedeny parametry, s jakými byla data měřena. Stručný přehled datových sad je poté zobrazen v tabulce 2.1, kde je k dispozici popis datových

sad, počet záznamů a jestli dopadala na vlnovod masa částic, nebo jednotlivé částice.

Tab. 2.1: Stručná přehledová tabulka dostupných datových sad

Datová sada	Popis	Částice/masa, Počet záz. n.
Aura Vlnovody	různé druhy vlnovodů (čtverec, šipka, kulatina)	částice, 151
Digitizer 5922	různý rozsah ADC (2 V _{pp} , 10 V _{pp})	granulát v násypce, 2
Flow Double Thick Aura003	směsi ze dvou různých druhů částic	masa, 350
Flow Multi Thick Aura003	směsi s různým rozložením a frakcemi	masa, 270
Flow Single Aura004	různá frekvence klepací násypky	masa, 90
Flow Single Fraction	různá frekvence klepací násypky	masa, 180
Flow Single Thick	dopad masy s použitím mag. spouště	masa, 180
Izol Nasyp	izolované upevnění násypky – různé frekvence, násypky a napětí ADC	granulát v násypce, 52
Klepaci Nasypka Ruseni	vliv klepací násypky (VYP/ZAP)	granulát v násypce, 4
Mag Nasypka	použití mag. násypky (spouště) se záslepkou a bez	bez/s granulátem v násypce, 6
Mereni Castic Aura	použití snímače AURA	částice, 146
Mereni Castic Olympus	použití snímače Olympus	částice, 146
Mereni Castic PA	použití snímače PA	částice, 146
Mereni Rychlost	opakované měření částice se známými rychlostmi	částice, 16
Mereni Vlivu Fvz	různá vzorkovací frekvence	částice, 50
Mereni Vlivu Zes	měření vlivu zesilovače – bez a s	částice, 80
Test Flow	různá frekvence klepací násypky	masa, 15
Vliv Nasypka II	vliv opěrek a kuliček	bez/s granulátem v násypce, 40
Vliv Nasypky	měření bez a se zesilovačem, s VYP/ZAP klepací násypkou	granulát v násypce, 40

V některých datových sadách chybí informace o popisu parametrů. V takových případech je v tabulce označeno políčko pomlčkou. Pouze 9 datových sad je k dispozici s kompletními informacemi. Podrobně jsou data popsána v následující kapitole.

2.1 Přehled a popis použitých parametrů měření

V této kapitole jsou popsány jednotlivé parametry a použité komponenty při měření (např. jaké frakce byly měřeny, jaké snímače byly použity atd.). Celkový přehled dat je zobrazen v tabulce v příloze A.

V každé datové sadě jsou měřené signály uloženy v souboru *DigitizerLOG.bin*. K těmto signálům je přiložen soubor *wfm_info.txt*, kde jsou uloženy informace o signálu (počet záznamů, vzorkovací frekvence, posuv, zesílení a další).

V některých datových sadách je navíc k dispozici soubor, nebo více souborů *Setup.txt*, kde jsou uvedeny informace o parametrech a použitých komponentech při měření (např. použité vlnovody, snímač, atd.).



(a) Dopad částice



(b) Dopad frakce

Obr. 2.1: Pořízené fotky při dopadu frakce na vlnovod (fotky převzaty z dostupné datové sady)

Dále jsou v datových sadách k dispozici fotky, které byly pořizovány současně s měřením. K fotkám jsou přiloženy soubory s informacemi o pořizování a přesné časové značky každého snímku – *info_xx_xx.txt* a *TimeStamps.txt*.

Příklad fotek je zobrazen na obrázku 2.1. Všechny fotky jsou pořizované s rychlostí kolem 125 fps ($600 \mu s$). V datové sadě *Mereni Rychlost* jako v jediné nejsou k dispozici žádné fotky a ve čtyřech datových sadách jsou fotky prázdné.

Ostatní dodatečné soubory, které jsou specifické pro konkrétní datovou sadu, jsou uvedeny v přehledu:

Aura Vlnovody:	Detekované částice s informacemi o rychlosti a úhlu natočení
Flow Double Thick Aura003:	Excel s informacemi hmotnostmi směsí
Flow Multi Thick Aura003:	Excel s informacemi o hmotnosti a rozložení
Merení Rychlost:	Excel s informacemi o rychlosti
Merení Vlivu Fvz:	Excel s informacemi o rychlosti
Merení Vlivu Zes:	Excel s informacemi o rychlosti

Následující podkapitoly popisují jednotlivé parametry měření a příslušné datové sady, které byly zaměřeny na konkrétní parametr s cílem určit závislost parametru a signálu AE.

2.1.1 Částice/masa/bez dopadů a počet záznamů

Masa:	6 datových sad, 1085 záznamů
Částice:	7 datových sad, 490 záznamů
Bez dopadů:	Digitizer 5922 – 1 datová sada, 2 záznamy vliv násypek – 4 datové sady, 142 záznamů

Na vlnovod můžou dopadat částice nebo celá masa částic. Dopad masy byl měřen celkem v šesti datových sadách a vzniklo 1085 záznamů. Částice byly měřeny v sedmi datových sadách a vzniklo 490 záznamů. Při měření částic bylo v jednom signálu zaznamenáno více dopadů částic, tedy více signálů. V datové sadě *Digitizer 5922* obsahující 2 záznamy jsou měřeny signály bez dopadu částic. V ostatních datových sadách byl měřen vliv chodu násypky a na vlnovod nedopadaly žádné částice, změřilo se 142 záznamů.

V datových sadách, ve kterých na vlnovod nedopadaly žádné částice, je frakce buď umístěna pouze v klepací násypce a zjišťuje se vliv chodu klepací násypky s částicemi, nebo je měření zcela bez frakce a je měřen pouze vliv chodu násypky.

Celkem bylo změřeno 1719 záznamů.

2.1.2 Směs částic, frakce

Flow Double Thick:	Směs dvou částic – 10:90, 90:10, 30:70, 70:30, 50:50 – informace uvedeny v příloženém excelu
Flow Multi Thick:	Směs vytvořena ze všech velikostí částic s normálním rozložením, logaritmovaným normálním rozložením a Rosin Rammler rozložením – informace uvedeny v příloženém excelu
Ostatní datasety:	Použité frakce o jednom rozsahu

Jako typ částic byl ve všech datových sadách použit keramzit, obrázek 2.2. Velikosti jednotlivých částic se získávají jejich proséváním přes síta o různých velikostech. K dispozici byla síta o rozměrech 2; 3,15; 4; 5; 6,3; 7,1 a 8 mm. Na obrázku 2.3 je zobrazen vzhled sít.

Při měření byly použity buď samostatné částice, nebo, a to většinou, frakce (např. 2–3,15 mm). Ve dvou datových sadách byly použity směsi částic. V následujícím textu je popsána datová sada, která se zaměřuje na směsi s různým rozložením částic.



(a) Velikost částic 7,1 mm



(b) Granulát z blízka

Obr. 2.2: Keramzit granulát



(a) Pohled z boku (5 a 6,3 mm)



(b) Pohled svrchu

Obr. 2.3: Síta

Flow Multi Thick Aura003

V této datové sadě byla použita směs všech dostupných frakcí se třemi různými rozloženími: normální (N), logaritmované normální (LN) a Rossin & Rammler (RR) rozložení. Rozložení LN a RR se běžně používají pro popis distribuce částic [22]. Vztahy všech rozložení jsou definované níže.

Normální rozložení (Gaussovo rozložení) definované hustotou pravděpodobnosti [23]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.1)$$

Normální logaritmované rozložení definované hustotou pravděpodobnosti [24]:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0 \quad (2.2)$$

kde:

x = velikost částic

μ = střední hodnota

σ^2 = rozptyl

Rossin & Rammler, někdy uváděné jako Weibull, rozložení definované hustotou pravděpodobnosti [25]:

$$f(x) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\frac{x^k}{\lambda}}, \quad x \geq 0 \quad (2.3)$$

kde:

x = velikost částic

k = parametr tvaru (rozpětí distribuce parametru)

λ = parametr měřítka

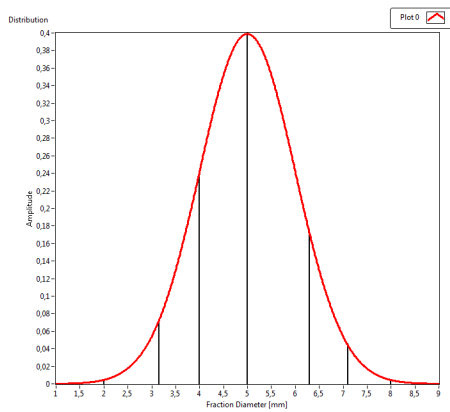
Pro měření byly tedy vytvořeny směsi se třemi různými rozloženími a dále s různým pokrytím rozložení ve směsi, a to 80, 90 a 99 %. Pokrytí lze vysvětlit na tabulce 2.4, která popisuje normální rozložení směsí, jež byly použity pro měření. Tabulka je převzata z dostupných dat, kde jsou rovněž uvedeny tabulky pro LN a RR rozložení.

Při pokrytí rozložení 99 % vznikla směs o hmotnosti 296 g normálního rozložení, s příslušnými parametry. Zbýlé 4 gramy částic leží mimo dané rozložení, tedy pod 2 mm a nad 8 mm. Obdobně vznikly ostatní směsi s odlišným pokrytím. Pokrytí 99 % vytvoří užší rozložení s vyšší špičkovou hodnotou, a pokrytí 80 % naopak širší spektrum s nižší špičkovou hodnotou.

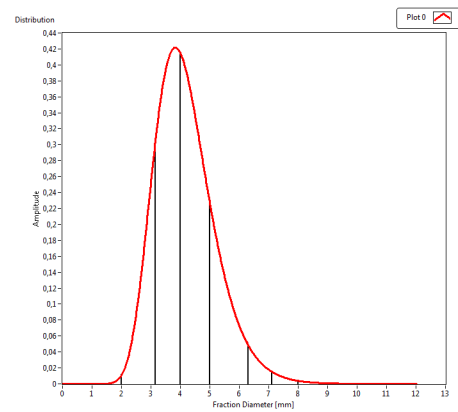
V tabulce si lze všimnout, že hmotnost směsí, které obsahují pouze dané rozložení (sloupec Sum) je pro všechny pokrytí téměř totožná. Dále si lze všimnout, že hmotnost celkových směsí s různým pokrytím je totožná pro všechna rozložení, tedy například pro N, RR i LN rozložení s pokrytím 99 % je hmotnost směsi 300 g.

Cover [%]	Fraction								m ₀ [g]	
	Normal		2 - 3,15	3,15 - 4	4 - 5	5 - 6,3	6,3 - 7,1	7,1 - 8		Sum
	σ [-]	Mean [-]	Content [%]							
99	1	5	3	12.4	33.7	40	7.8	1.7	98.6	300
			Content [g]							
			9	37	101	120	23	5	296	
90	1.75	5	9.9	13.8	21.4	26.8	11.4	7.1	90.4	330
			Content [g]							
			33	46	71	88	38	23	298	
80	2.3	5	11.3	12.1	16.5	21.3	10.5	8.4	80.1	370
			Content [g]							
			42	45	61	79	39	31	296	

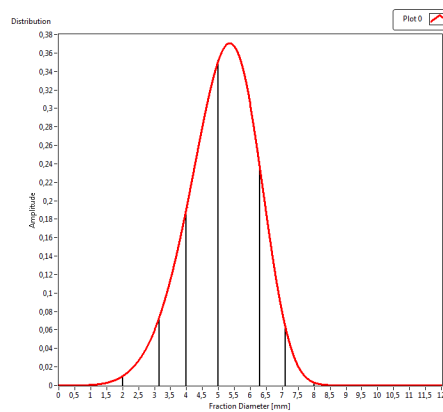
Obr. 2.4: Normální rozložení směsí s pokrytím 80, 90 a 99 % (tabulka převzata z dostupné datové sady)



(a) Normální rozložení



(b) Logaritmované normální rozložení



(c) Rosin & Rammler rozložení

Obr. 2.5: Rozložení částic při pokrytí 99 % (grafy převzaty z dostupné datové sady)

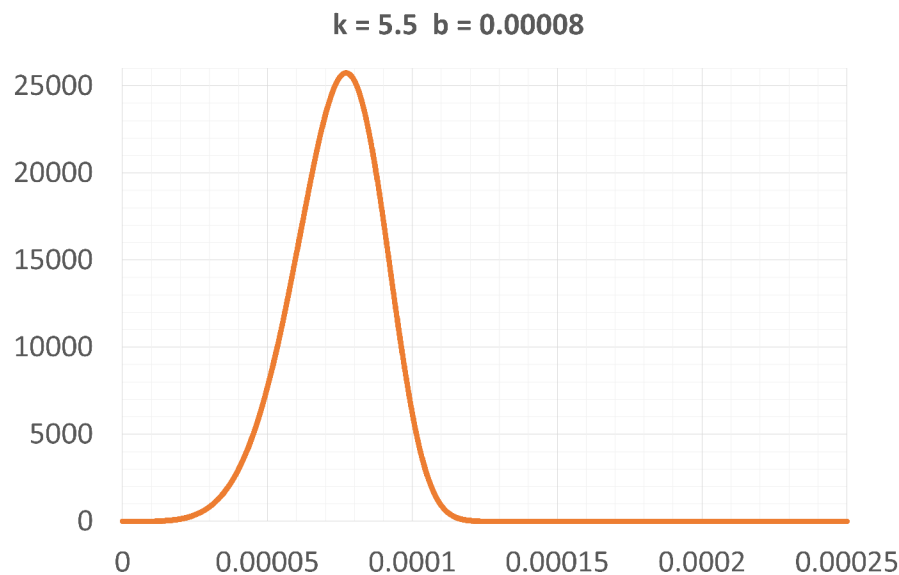
V této datové sadě vzniklo tedy devět směsí (3 rozložení × 3 pokrytí), které byly

využity pro měření. Na obrázku 2.5 je zobrazeno N, LN a RR rozložení směsí při pokrytí 99 %. Tyto grafy jsou rovněž dostupné v datové sadě pro všechna pokrytí.

Cover [%]	RR		Fraction						m_0 [g]		
	n [-]	b [-]	2 - 3,15	3,15 - 4	4 - 5	5 - 6,3	6,3 - 7,1	7,1 - 8		Sum	
	Content [%]						Content [g]				
99	5.5	8.00E-05	3.9	10.6	27.4	43.3	11.4	2.2	98.8	300	
			12	32	82	130	34	7	296		
90	3.37	0.0025	8.6	12	19.6	27.5	13	9.5	90.2	330	
			28	40	65	91	43	31	298		
80	3.27	0.002	6.2	8.7	14.9	23.8	14	13.1	80.7	370	
			23	32	55	88	52	48	299		

Obr. 2.6: Tabulka RR rozložení směsí s chybnými parametry $b(\lambda)$ (tabulka převzata z dostupné datové sady)

V tabulce na obrázku 2.6 jsou zobrazeny parametry RR rozložení $n(k)$ a $b(\lambda)$. Hodnoty těchto parametrů byly ověřovány vynesáním rozložení do grafu. Při ověřování bylo zjištěno, že hodnoty parametrů b , které jsou uvedeny v datové sadě, jsou chybné a výsledné rozložení nesouhlasí s grafy rozložení (dostupných z datové sady), obrázek 2.7. Následně tedy bylo nutné přibližně určit správné parametry.



Obr. 2.7: RR rozložení s pokrytím 99 % a chybným parametrem $b(\lambda)$

Přibližné parametry lze určit z kumulativního rozložení, které je definováno následovně [26]:

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (2.4)$$

Po aplikaci dvojnásobného logaritmu na rovnici výše a její úpravě vyjde vztah, který je analogický s rovnicí přímky [26]:

$$\ln(-\ln(1 - F(x))) = k \ln(x) - k \ln(\lambda) \quad (2.5)$$

analogie s rovnicí přímky:

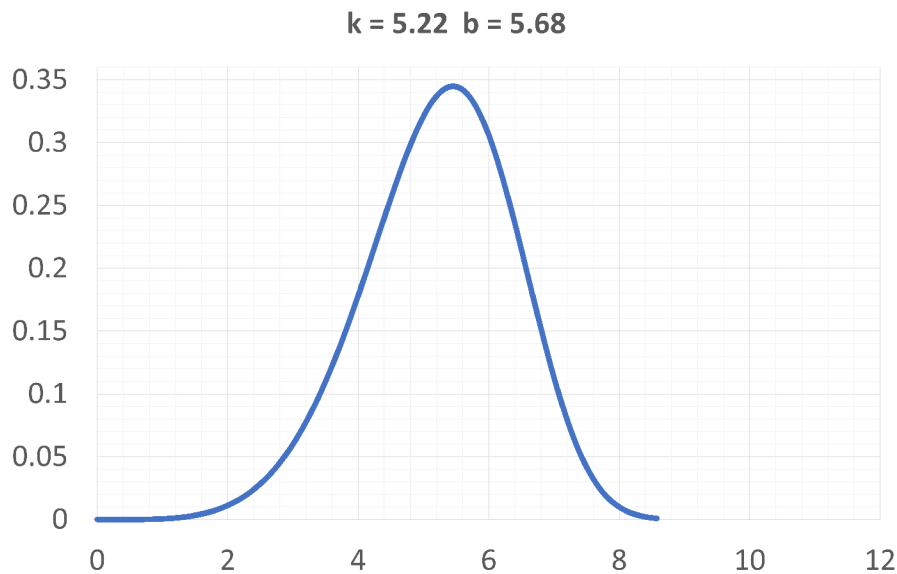
$$y = \ln(-\ln(1 - F(x)))$$

$$x = \ln(x)$$

$$m = k$$

$$c = k \ln(\lambda)$$

Parametry rozložení byly tedy určeny následovně: Z tabulkových dat, kde je uvedeno procentní zastoupení frakce, bylo určeno kumulativní rozložení pro všechna pokrytí. Na základě vztahu 2.5 byly určeny parametry přímky a následně parametry rozložení n (k) a b (λ). V elektronické příloze v souboru *RossRammDistribution.xlsx* jsou uvedeny přesné hodnoty, výpočet a grafy s regresí přímky.



Obr. 2.8: RR rozložení s pokrytím 99 % a novými parametry

Nově vypočítané parametry rozložení jsou uvedeny v tabulce 2.2. Z hodnot je patrné, že parametr b se liší o několik řádů a parametr n v desetínách. RR rozložení s pokrytím 99 % a s novými parametry je zobrazeno na obrázku 2.8. Parametry ostatních rozložení byly rovněž ověřeny a jsou správné.

Tab. 2.2: Určené parametry Rossin & Rammler rozložení

Pokrytí [%]	n (k)	b(λ)
99	5,22	5,68
90	3,27	5,81
80	2,81	6,2

2.1.3 Výška volného pádu

0,7 m:	1 datová sada
0,85 m:	11 datových sad
0,975 m:	2 datové sady
1,1 m:	9 datových sad
1,225 m:	9 datových sad
1,35 m:	2 datové sady
1,475:	1 datová sada
1,6 m:	10 datových sad
1,75 m:	1 datová sada

Měření probíhalo s různou výškou dopadu částic. Výška se pohybovala v rozsahu 0,700–1,750 m. Přesné informace o použitých výškách v datových sadách je možné získat z tabulky v příloze, stručně lze data popsat následovně:

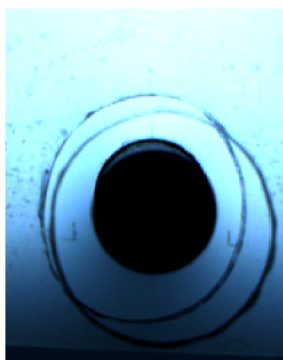
Nejčastěji používané výšky byly 0,850; 1,100; 1,225 a 1,600 m. V 8 sadách byly použity tři stejné výšky (0,850; 1,225; 1,600 m), dále v 6 sadách byla použita pouze jedna výška, a to vždy o velikostí 1,100 m. V datové sadě *Mereni Castic Aura* bylo použito 8 různých výšek.

2.1.4 Použitý vlnovod

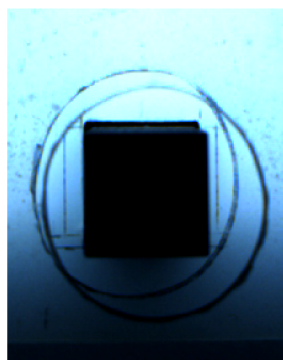
Aura Vlnovody:	Čtverec 20 × 1 mm – umístěný rovnoběžně k zemi, hliník Kulatina 20 × 1 mm – snímač umístěný radiálně (měří se povrchové vlny) nebo axiálně (příčné vlny) Šipka 20 × 1, 2, 3 mm – hliníkový „L“ profil ve směru šipky
Ostatní datové sady:	Čtverec 20×1 mm – k zemi natočen jako kosočtverec

Vlnovod je překážka umístěná v cestě dopadajících částic. Při dopadu je vyvolaná akustická emise měřena snímačem umístěným na povrchu vlnovodu.

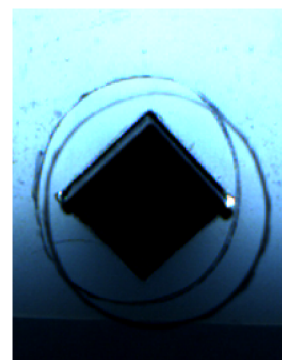
Při měření byly použity tři různé typy vlnovodů, které jsou uvedené v přehledu.



(a) Kulatina



(b) Čtverec



(c) Šipka

Obr. 2.9: Vlnovody umístěné v aparatuře (fotky převzaty z dostupné datové sady)

Na obrázku 2.10 je zobrazen vzhled vlnovodů a na obrázku 2.9 jsou zobrazeny vlnovody umístěné v aparatuře. Všechny vlnovody jsou hliníkové, až na kulatinu, která je ocelová. Kulatina byla použita dvakrát, a to se snímačem umístěným radiálně, kdy se měří povrchové vlny, a se snímačem umístěným axiálně, kdy se měří příčné vlny.



Obr. 2.10: Vlnovody – kulatina, čtverec, šipka

2.1.5 Typ násypky

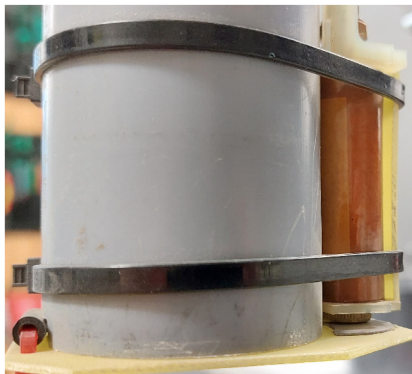
Klepací násypka – 12V, 10 Hz:

Aura Vlnovody, Mereni Castic Aura,
Mereni Castic Olympus, Mereni Castic PA,
Vliv Nасыпка II, Vliv Nасыпка,
Klepaci Nасыпка Ruseni – VYP a ZAP

Různé frekvence klepací násypky:	Flow Single Aura004 – 8/12/16 Hz 14/12 V, Flow Single Fraction – 8/12/16 Hz 14/12 V, Test Flow – 8/12/16 Hz 12 V
Různá násypka, frekvence i napětí:	Izol Nasyp – 5/10/15, Hz 14/12 V – bez/se žlabem
Magnetická spoušť:	Flow Double Thick Aura004, Flow Multi Thick Aura003, Flow Single Thick, Mag Nasyp

Při měření byly použity dva typy násypek (klepací násypka a magnetická spoušť), které byly určeny k sypání částic na vlnovod.

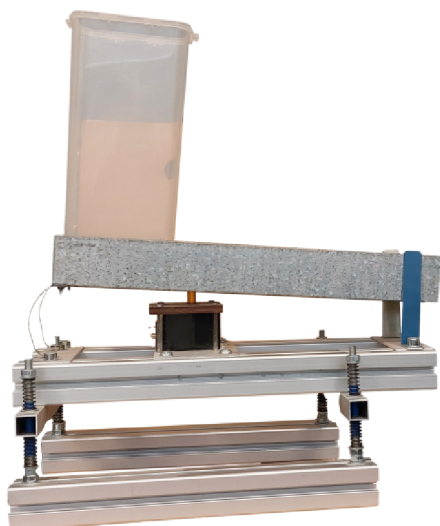
Magnetická spoušť je zobrazena na obrázku 2.11. Tato násypka sloužila pouze pro spouštění masy. Skládá se ze záklopy a elektromagnetu, který drží záklopkou zavřenou. Při vypnutí napájení se masa spustí na vlnovod. V informacích o měření z datové sady *Mag nasyp* je uvedeno, že bylo měřeno s a bez záslepky ve žlabu. V datové sadě *Izol nasyp* je uvedeno, že bylo měřeno bez a se žlabem. Chybí však popis, co je těmito informacemi míněno.



Obr. 2.11: Magnetická spoušť

Klepací násypka (obrázek 2.12) je určena pro dopad samostatných částic i masy. Násypka byla při chodu rozkmitávána vibracemi, díky kterým se částice posouvaly ve žlabu směrem ven. Při měření se testovala různá frekvence napájení vibračního motoru. V datových sadách se lze setkat s parametry thinner (8 Hz) a thicker (12 Hz), které popisují právě frekvenci klepací násypky.

Rozdíl násypek v dopadání masy je takový, že u magnetické spouště dopadne najednou celá masa, čímž vznikne jeden delší ohraničený signál, zatímco u klepací násypky dopadají částice postupně a vznikne dlouhý signál s pozorovatelnými dopady.



(a) Pohled z boku



(b) Pohled svrchu

Obr. 2.12: Klepací násypka

2.1.6 Snímač

PA UT1000:

Merení Castic PA

OLYMPUS V103:

Merení Castic Olympus

AURA SV416:

Ostatní datové sady



(a) AURA SV416



(b) PA UT1000



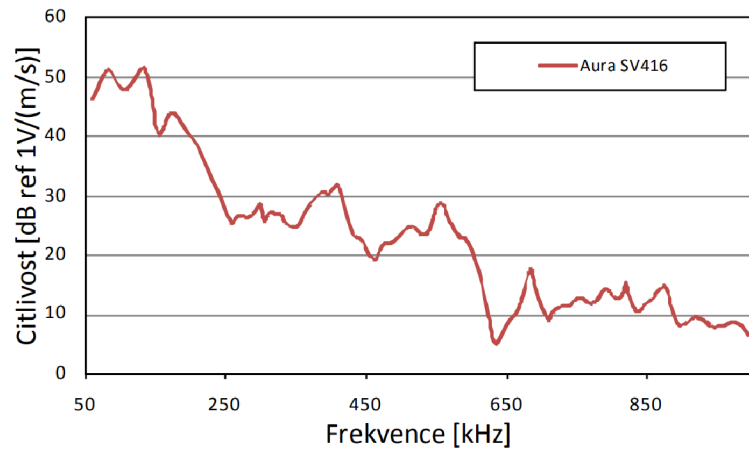
(c) OLYMPUS V103

Obr. 2.13: Použité snímače

V této kapitole jsou stručně popsány parametry použitých snímačů. Celkem byly použity 3 typy snímačů, obrázek 2.13.

AURA SV416

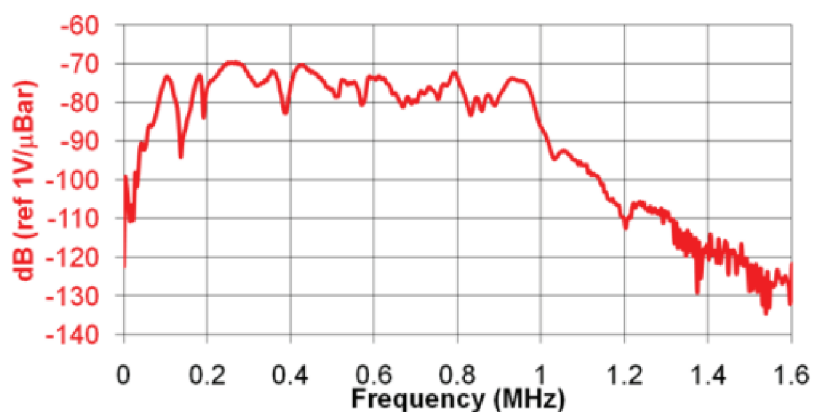
Datasheet snímače AURA SV416 od výrobce Aura Milevsko již není dostupný. K dispozici je však frekvenční charakteristika, která byla naměřena na kalibračním válci, obrázek 2.14.



Obr. 2.14: Charakteristika snímače Aura SV416 naměřená metodou Hatano [27, s. 149]

Physical acoustic UT1000

UT1000 je širokopásmový kontaktní snímač. Frekvenční charakteristika je zobrazena na obrázku 2.15. Parametry snímače jsou zobrazeny v tabulce 2.3. Tento snímač je jako jediný ze všech tří širokopásmový.



Obr. 2.15: Frekvenční charakteristika UT1000 [28]

Tab. 2.3: Parametry snímače UT1000 (informace převzaté z [28])

Parametr	Hodnota
Maximální citlivost pro V/(m/s)	64 dB
Maximální citlivost pro V/ μ bar	-73 dB
Frekvenční rozsah	100–950 kHz
Rezonanční frekvence pro V/(m/s)	60 kHz
Rezonanční frekvence pro V/ μ bar	450 kHz
Odchylka	$\pm 1,5$ dB
Teplotní rozsah prostředí	-65–177 °C
Rozměry	$\varnothing 17,8 \times 16,5$ mm
Pouzdro	Nerezová ocel
Hmotnost	20 g

Olympus V103-RB

Olympus V103-RB je úzkopásmový kontaktní snímač typu Videoscan, který zajišťuje širší frekvenční pásmo oproti ostatním typům [29]. Parametry snímače jsou zobrazeny v tabulce 2.4.

Tab. 2.4: Parametry snímače Olympus V103-RB (informace převzaté z [29])

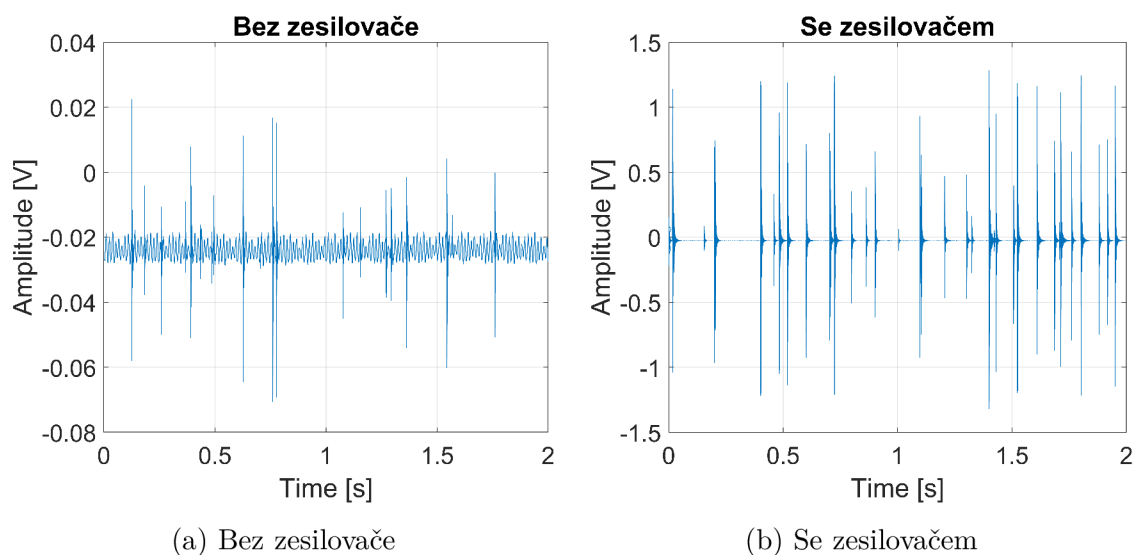
Parametr	Hodnota
Rezonanční frekvence	1 Mhz
Teplota materiálu	do 50 °C
Rozměry	$\varnothing 1,16 \times 1,25$ mm
Pouzdro	Nerezová ocel
Konektor	BNC

2.1.7 Rozsah AD převodníku a použití zesilovače

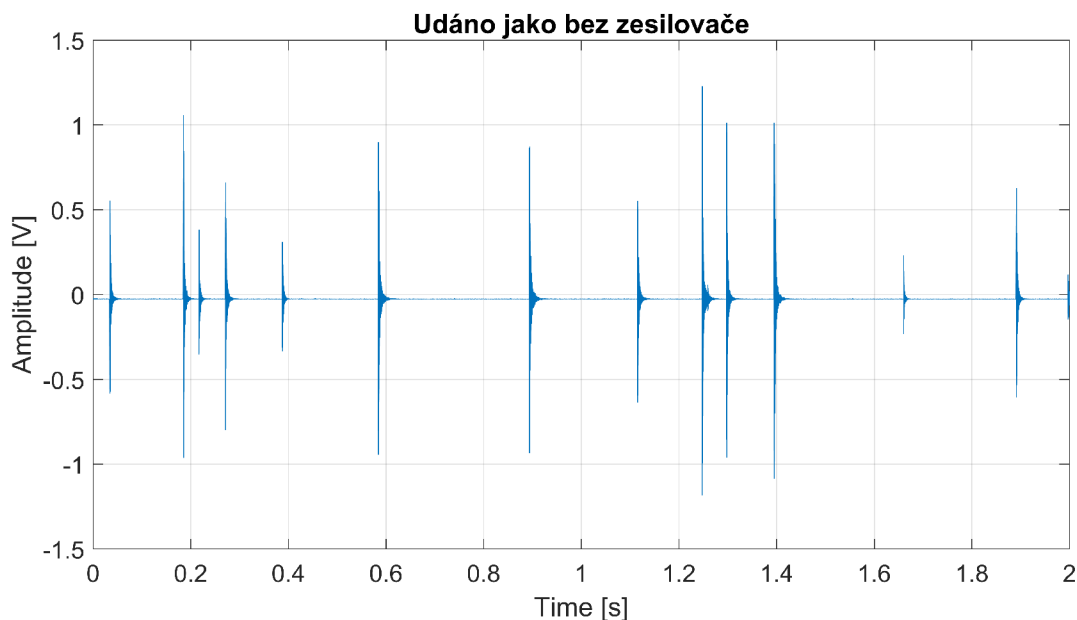
Se ZES 10 V_{pp}:	Aura Vlnovody – některé signály Digitizer 5922 Merení Vlivu Zes
Bez ZES 2 V_{pp}:	Ostatní datové sady

V informacích o měření není uvedeno, na jakém hardwaru/měřicí kartě byl signál měřen. Je zde pouze uvedeno, jaký byl použit rozsah AD převodníku a jestli byl použit zesilovač.

Zesilovač by měl být použit u některých signálů ze sady *Aura Vlnovody*, které se vždy nacházejí ve složce TEST_ZESILOVAC. Tato složka zahrnuje signály s použitím i bez použití zesilovače. Dále jsou signály s použitím zesilovače v datové sadě *Mereni Vlivu Zes.*



Obr. 2.16: Aura Vlnovody – bez a se ZES (3,15–4 mm; 0,850 m; kulatina20povrch)



Obr. 2.17: Aura vlnovody – bez ZES (3,15–4 mm; 0,85 m; kulatina20povrch)

Na obrázcích 2.16 je zobrazen signál bez a s použitím zesilovače ze sady *Aura Vlnovody* (složka TEST_ZESILOVAC). Z amplitud signálů je patrný vliv zesilovače. U ostatních signálů z této datové sady je uvedeno, že nebyl použit zesilovač, ale pokud se porovnají tyto signály (obrázek 2.17) se signály z obrázku 2.16, je patrné že zesilovač použit byl.

Stejně tak u ostatních datových sad neodpovídá vždy amplituda signálů s uvedeným údajem o (ne)použití zesilovače. S faktem, že informace o použití zesilovače nemusí být správná, je tedy třeba počítat.

Rozsah AD převodníku byl buď 2, nebo $10 V_{pp}$. Z dat je patrné, že při použití zesilovače byl rozsah $10 V_{pp}$ a bez použití zesilovače $2 V_{pp}$.

2.1.8 Vzorkovací frekvence

Měření vlivu fvz: 125, 250, 500, 1000, 5000 kHz

Ostatní datasety: 500 kHz

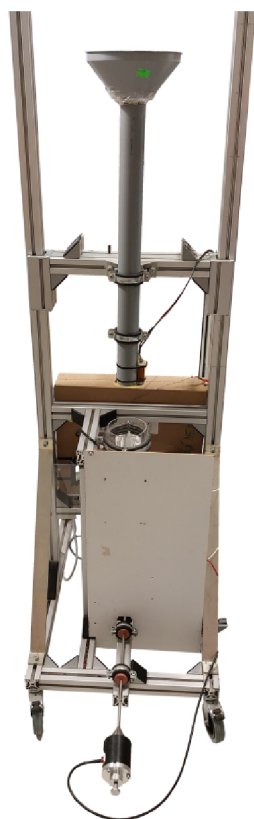
Vzorkovací frekvence zůstávala pro všechny datové sady stejná, až na sadu *Měření Vlivu Zes*, která se zaměřovala na použití různých vzorkovacích frekvencí.

3 Experiment

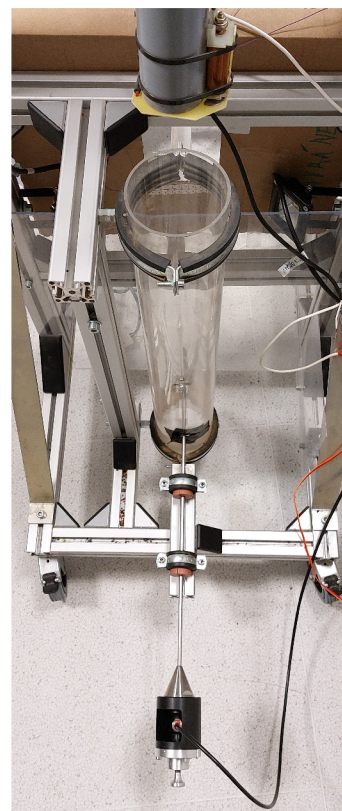
Experimentálně bylo vyzkoušeno změření jedné datové sady. Měření probíhalo na vylepšeném přípravku, s jiným měřicím kanálem a s odlišnými parametry měření oproti dostupné datové sadě. V této kapitole je popsán experiment měření a změřená data.

3.1 Popis aparatury

Na obrázku 3.1 je zobrazena aparatura pro experimentální měření granulometrie. Trychtýř slouží k nasypání frakce a magnetická spoušť na konci válce je určena pro spouštění frakce na vlnovod. Vlnovod je upevněn v rámu a umístěn ve spodním válci jako překážka, obrázek 3.2. Na konci vlnovodu je umístěn snímač, který je připojen k měřicí kartě přes BNC konektor.



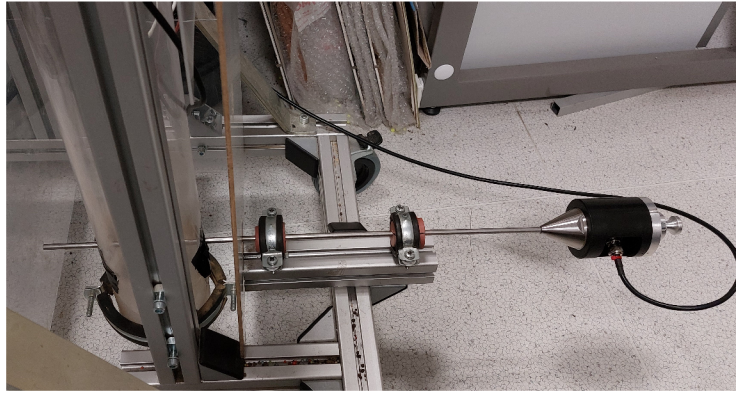
(a) Celá aparatura



(b) Přiblížení vlnovodu a snímače

Obr. 3.1: Aparatura pro experimentální měření granulometrie

Na obrázku 3.3 je zobrazen detailnější pohled způsobu upevnění snímače. Snímač je přitlačen pružinou k držáku a ten je uchycen na vlnovod přes závit.



Obr. 3.2: Pohled na aparaturu z boku



Obr. 3.3: Držák pro upevnění snímače k vlnovodu

3.2 Měřicí karta a záznamový software

V experimentu byla použita měřicí karta ZEDO-22 od firmy Dakel, která je určena pro měření signálů AE, obrázek 3.4.



(a) Čelní pohled



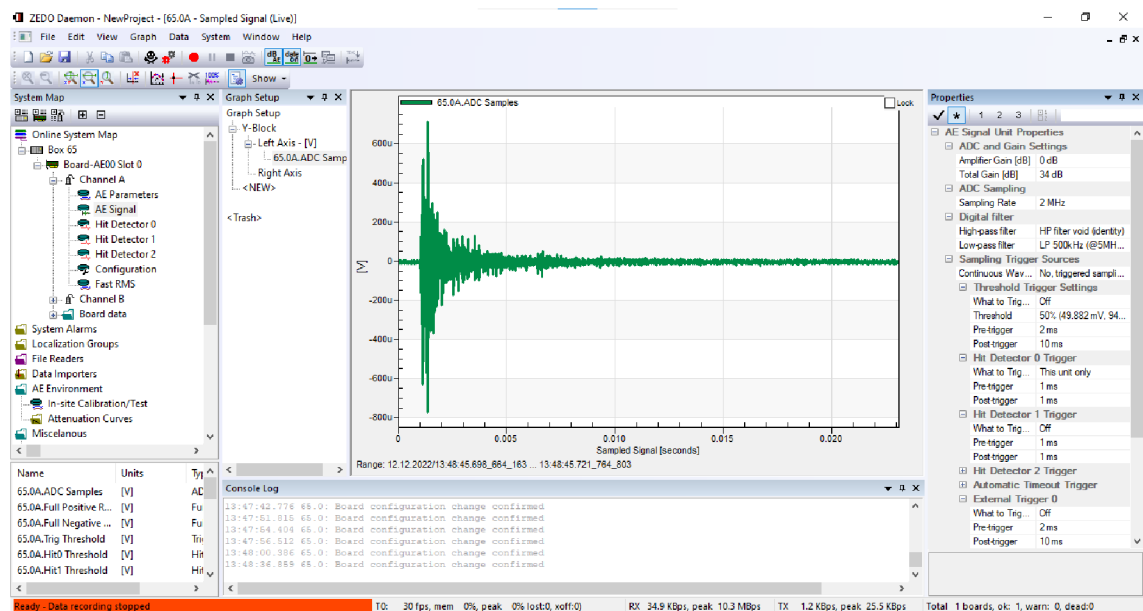
(b) Zadní pohled

Obr. 3.4: Měřicí karta Dakel ZEDO-22

Karta má dva měřicí vstupy AE a jeden AUX vstup pro nízkofrekvenční signály (pod 10 kHz). Signál AE je převáděn pomocí 16bitového AD převodníku a maximální napětí na vstupu může být 10 V_{PP} . Ke kartě je dostupný software ZEDO

Daeamon, kde je možné uživatelsky nastavovat parametry měření. Zesílení signálu lze nastavovat od 0 do 70 dB s krokem 1 dB, dále je možné připojit i předzesilovač se zesílením 32 nebo 45 dB. Vzorkovací frekvenci lze nastavit 1, 2, 4, 5, 8 nebo 10 Mhz. Šířku pásma lze nastavovat mezi 30 kHz až 2 MHz a lze použít filtry horní, nebo dolní zádrž. Jednotka pro zpracování umožňuje detekovat AE hit (dopady). Dále je možné volit způsob spuštění měření: práh, při detekci prvního dopadu a další. Karta je s PC propojena přes Ethernet a posílání dat probíhá přes ZCAP protokol. [30]

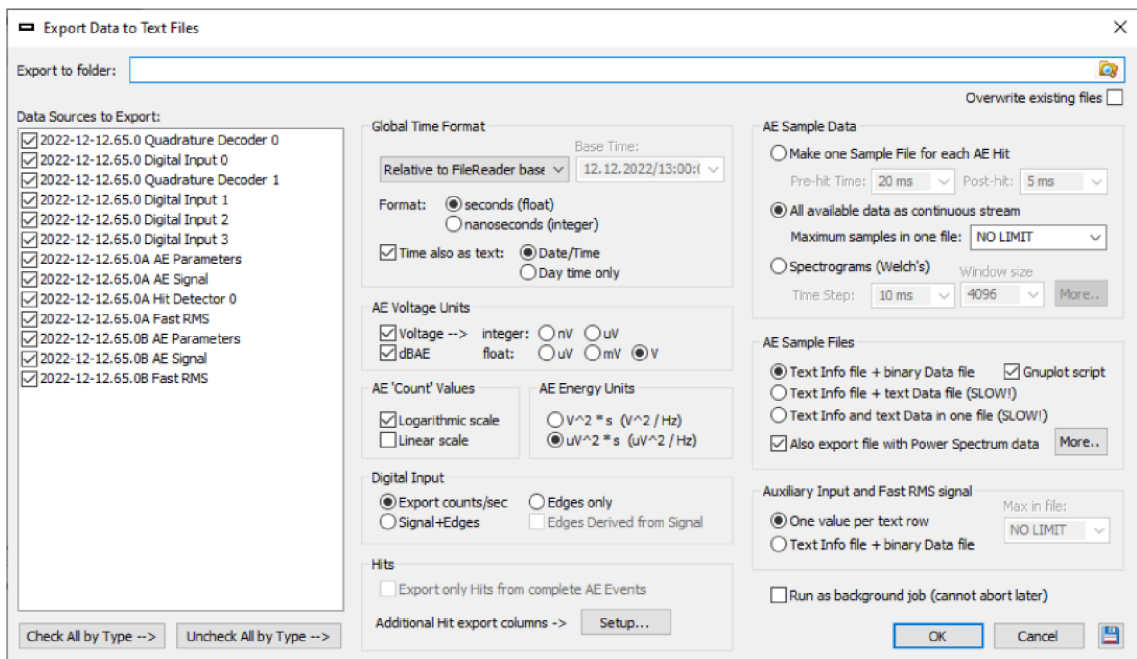
Na obrázku 3.5 je zobrazeno prostředí softwaru ZEDO Daemon. V levém okně (System Map) se nachází průzkumník projektu. V hierarchii lze vidět zvolený kanál A se sledovanými parametry. V prostředním okně je zobrazen měřený signál, ale lze zde zobrazit i jiná okna, např. Hit Detector 0. V dolním prostředním okně je konzole s průběžným výpisem akcí. V pravém okně Properties je možné nastavovat parametry měření (zesílení, spuštění atd.). V horní liště jsou dostupná tlačítka pro start, pauzu a zastavení měření.



Obr. 3.5: Prostředí programu ZEDO Daemon

Nabídka exportu dat je zobrazena na obrázku 3.6. Při exportu dat je možné si navolit formát změřených signálů, a to .bin nebo .txt soubor. Ke změřeným signálům lze navíc uložit základní informace o parametrech měření a měřeném signálu, ty se nacházejí v souboru AE signal (sloupec Data Source to Export). V souboru AE parameters jsou uloženy parametry určené ze signálu, např. RMS hodnoty. Dále je možné si navolit časový formát dat nebo jednotku změřených napětí.

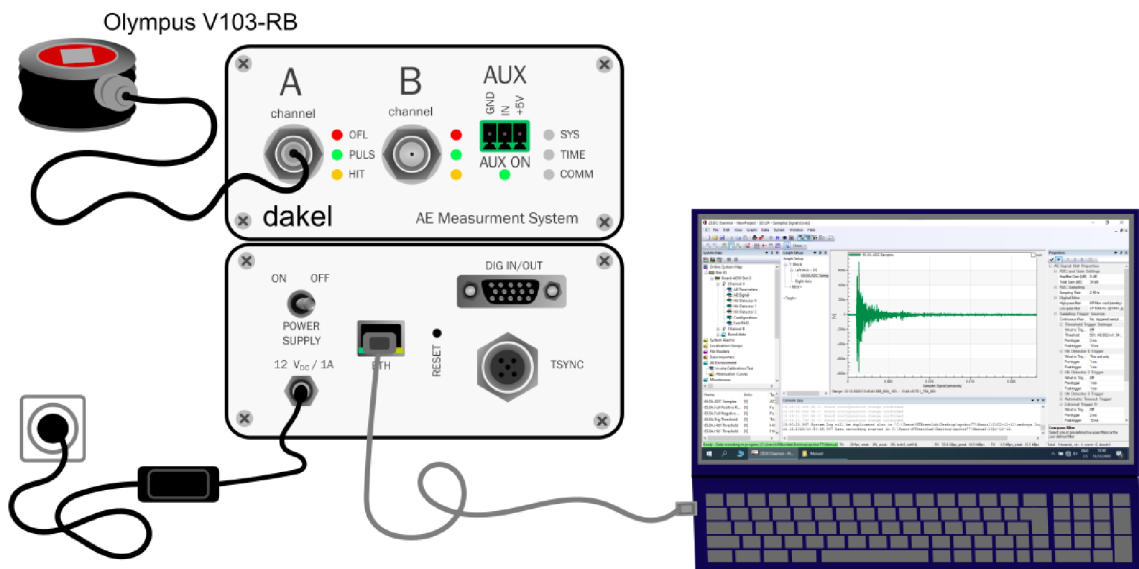
Při potvrzení exportu dat se všechny změřené signály uloží do jedné složky.



Obr. 3.6: Možnosti exportu dat

3.3 Parametry měření a změřená data

Schéma měřicí soustavy je zobrazeno na obrázku 3.7. Detekování signálu AE zajišťoval snímač Olympus V103-RB, parametry tohoto snímače jsou uvedeny v kapitole 2.1.6.



Obr. 3.7: Měřicí soustava

Experiment byl zaměřen na použití různých kulatinových vlnodů o dané tloušťce a délce. Rozměry vlnodů a ostatní parametry měření jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Jako částice byly použity plastové kuličky o průměru 6 mm. Měřil se dopad jak částic, tak i masy. Při měření částic byly kuličky ručně spouštěny na vlnovod a pro dopad masy byla použita magnetická spoušť.

Tab. 3.1: Parametry měření

Parametr	Hodnota
Vzorkovací frekvence	2 Mhz
Spouštění prahem (Threshold)	1 mV
Zesílení (Total Gain)	0 dB
Snímač	Olympus V103-RB
Měřicí karta	Dakel ZEDO-22
Hmotnost kuliček	13,6 g
Výška / \varnothing kuliček	68 cm / 6 mm
Typ vlnovodů	kulatina
Rozměry vlnovodů	$\varnothing 6, 8 \text{ mm} \times 50, 100, 150 \text{ cm}$ $\varnothing 10 \text{ mm} \times 50, 100 \text{ cm}$
Násypka	ručně (částice) / mag. spoušť (masa)

V dostupných datových sadách z kapitoly 2 byly zaznamenány dopady částic v jednom signálu. Při měření s tímto hardwarem se zaznamenával každý dopad částice v samostatném signálu.

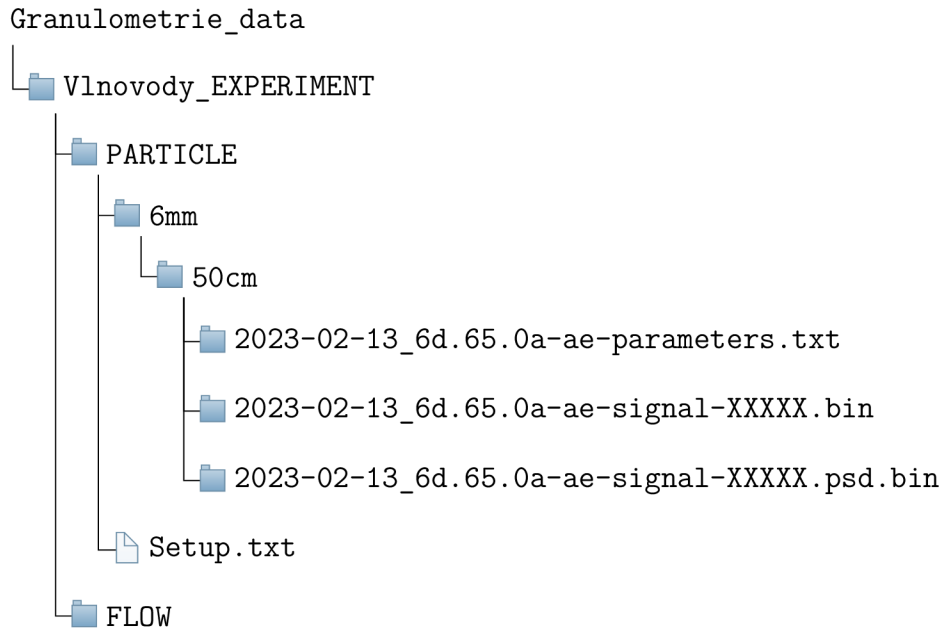
Tab. 3.2: Počet změřených signálů

	Částice			Masa		
	6 mm	8 mm	10 mm	6 mm	8 mm	10 mm
50 cm	15	27	16	5	5	5
100 cm	21	24	34	5	6	6
150 cm	29	–	–	4	6	–

Při měření dopadu masy bylo nastaveno diskrétní spouštění, které po detekci prahu změřilo jeden signál. Při měření částic bylo nastaveno kontinuální spuštění, tedy se měřilo neustále. Práh byl nastaven na 1 mV a zaznamenávalo se 2 ms před a 10 ms po detekci signálu (pre-trigger a post-trigger). Při měření se však občas stávalo, že byl změřen pouze šum, a to i přes nastavený práh spouštění. Při měření částic většinou docházelo k tomu, že se kulička mnohonásobně odrážela v okolí vlnovodu. Na druhou stranu, v některých případech se vlnovodu pouze dotkla.

V tabulce 3.2 je zaznamenám počet všech změřených signálů. Z tabulky je patrné, že počet měření je nekonzistentní, což je zapříčiněno přítomností signálů s šumem, kdy při měření nebylo jasné, kolik dat je skutečně validních. V kapitole 4.6 bude popsána detekce šumových dat a jejich odstranění.

Níže je uveden příklad stromové struktury naměřených dat:



Datová sada je nazvána *Vlnovody_EXPERIMENT* a data jsou rozdělena do dvou hlavních složek pro částice a masu. K datové sadě byl vytvořen soubor *Setup.txt*, kde jsou uvedeny informace o parametrech a komponentech měření (rozměry vlnovodů, použitý snímač, měřicí karta, použitá frakce a další). Naměřená data jsou uložena v binárních souborech *RRRR-MM-DD_XXXX-ae-signal-XXXXX.bin*. Jeden signál je vždy uložen v jednom souboru. Textové soubory *RRRR-MM-DD_XXXX-ae-parameters.txt* obsahují informace o měření, jako například počet vzorků, vzorkovací frekvence, zesílení, způsob uložení a vyčítání binárních dat a další.

4 Zpracování dat

Tato kapitola se zaměřuje na zpracování dat. Jsou zde uvedeny informace o úpravách a načítání dat a dále je zde popsána funkčnost pomocného nástroje v prostředí LabVIEW, který byl vytvořen za účelem analýzy naměřených dat.

4.1 Úprava nekonzistentních názvů složek

Pro automatické zpracování dat byla část složek pojmenována nevhodně či nekonzistentně, z toho důvodu bylo nutné upravit některé názvy složek. Níže je vypsán výčet úprav.

- > FLOW_DOUBLE_THICK_AURA003
Poměry: 10_90, 50_50, 1_9, 1_1 => 10_90, 50_50
Stromová struktura: 0_85m - 10_90, 10_90 - 0_85m => 10_90 -> 0_85m
- > FLOW_MULTI_THICK_AURA003
Pokrytí: 0_80, 80 => 80
- > MERENI_VLIVU_FVZ
Frekvence: 500kS, 2MS => 500kS, 2000kS
- > Všechny složky s názvem frakce a výšky
Frakce63_71, Frakce315_4 => Frakce6_3-7_1, Frakce3_15-4
0_85m, 1_225m, 1_60m => 0_850m, 1_225m, 1_600m

U frakcí bylo nutné upravit názvy, aby velikost frakce byla uložena ve složkách sestupně podle velikost.

4.2 Načítání binárních souborů

Původní i nová naměřená data jsou uložena v binárních souborech.

Původní data

Původní data jsou typu I32 a je využit little endian. Po načtení dat je k datům nutné přičíst *offset* a *gain*. Tyto hodnoty jsou uvedeny v souboru *wfm_info.txt*.

Nová data

Nová data jsou uložena jako 2 Byty se znaménkem (signed) a je využit little endian.

$$Voltage = 10 \frac{ADC}{2^{16}} 10^{-1 \times TotalGain/20} \quad (4.1)$$

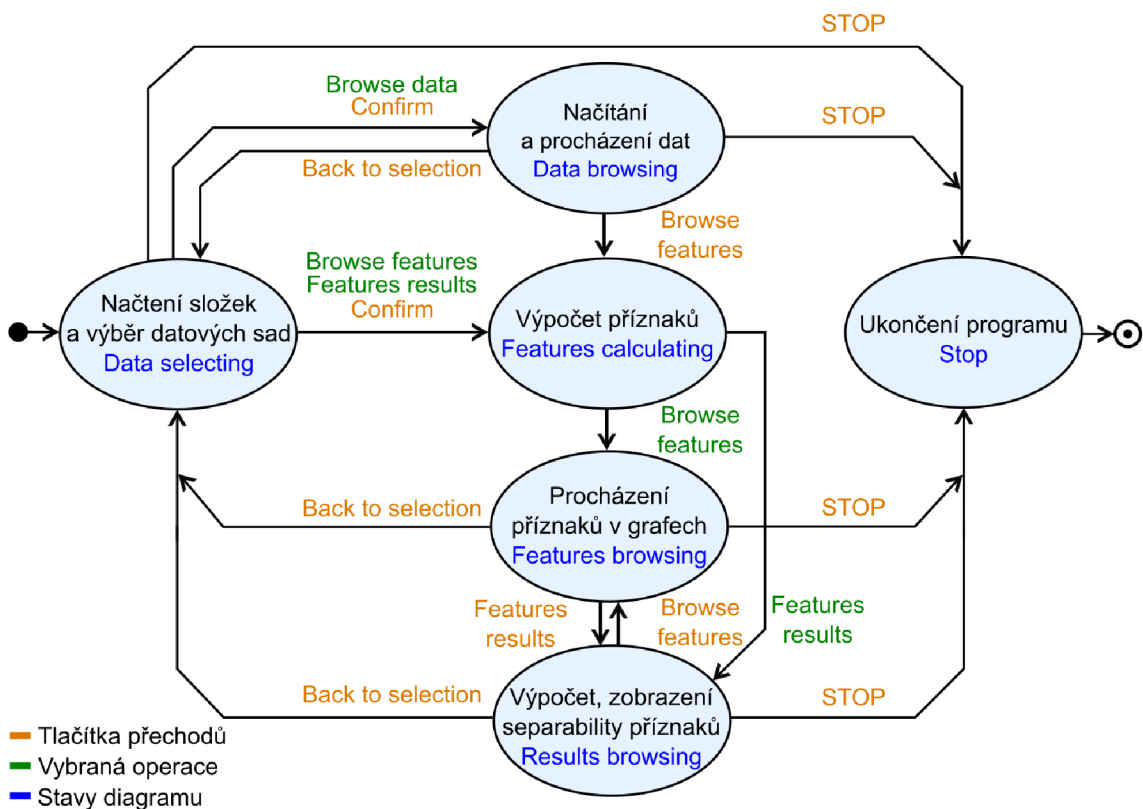
Uložená data jsou hodnoty z AD převodníku a po jejich načtení je nutné hodnoty převést na napětí pomocí vztahu 4.1. Hodnota zesílení (TotalGain) je uvedena v textovém souboru *RRRR-MM-DD_XXXX-ae-parameters.txt*, kde je rovněž uveden převod na napětí a typ dat. Datový soubor *Vlnovody_EXPERIMENT* je naměřen s nulovým zesílením.

4.3 Popis funkčnosti kódu

Datové sady mají velikost cca 194 GB, pro jednodušší analýzu a orientaci v datech byl vytvořen pomocný nástroj v prostředí LabVIEW, který je možné použít i pro další naměřené datové sady. V této kapitole je popsána funkčnost programu.

Pro vývoj aplikace byla využita verze LabVIEW 2021 (64-bit) a dále byl využit Sound and Vibration Toolkit pro oktávovou analýzu.

4.3.1 Hlavní diagram



Obr. 4.1: Stavový diagram kódu

Na obrázku 4.1 je zobrazen stavový diagram kódu, který se skládá ze šesti stavů. Výchozím stavem je *Data selecting*, kde probíhá výběr operace a datových sad pro

zpracování. Na základě výběru operace mohou následovat dva stavy, kterými jsou *Data browsing*, nebo *Features calculating*.

Stav *Data browsing* slouží k procházení signálů a jejich zobrazování do příslušných grafů. V tomto stavu je možné vždy zobrazit pouze jeden signál. Není možné vyčíst všechny signály (například z jedné datové sady) a poté je zobrazovat, jelikož ve většině případů přesahuje jedna kompletní datová sada velikost paměti pro uložení (zobrazení).

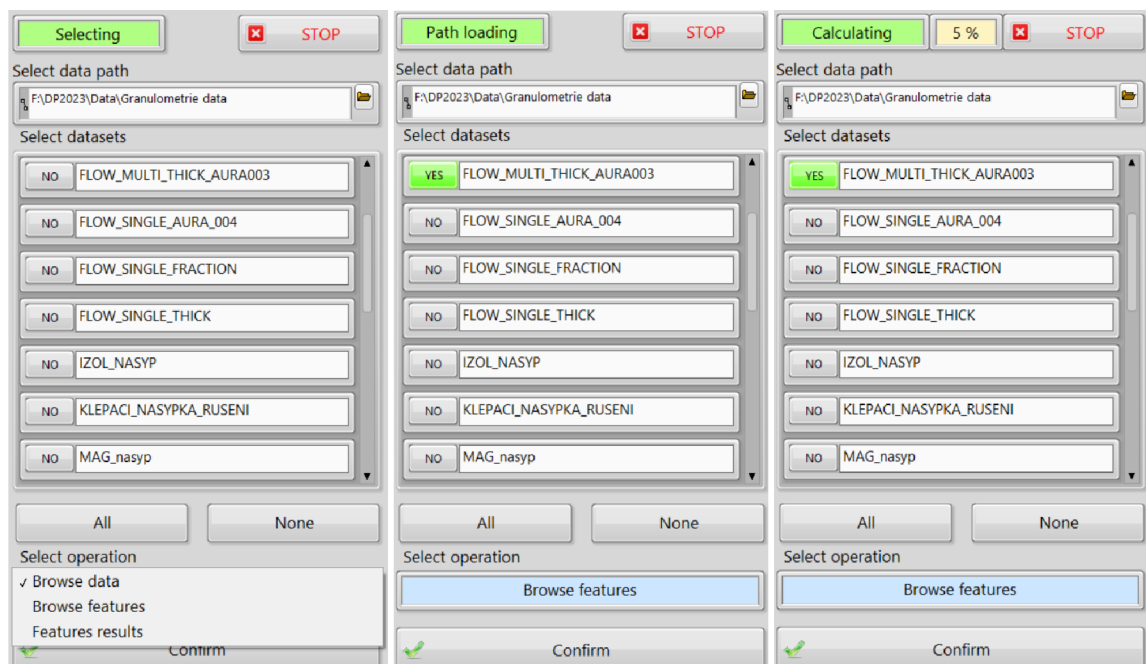
Po výpočtu příznaků ve stavu *Features calculating* mohou na základě výběru operace následovat dva stavy, kterými jsou *Features browsing* a *Results browsing*.

Stav *Features browsing* slouží k zobrazování příznaků a průběhů (např. PSD) v grafu a stav *Results browsing* slouží k výpočtu separability příznaků a zobrazení v tabulce. Způsob výpočtu míry separability je uveden v kapitole 5.4.

Ze všech stavů kromě *Features calculating* je možné pomocí tlačítka *STOP* přejít do stavu *Stop*, který ukončí program.

Bližší popis stavů a Front panelu je uveden v následující textu. Z každého stavu je na Front panelu viditelné tlačítko *STOP* a indikace stavu.

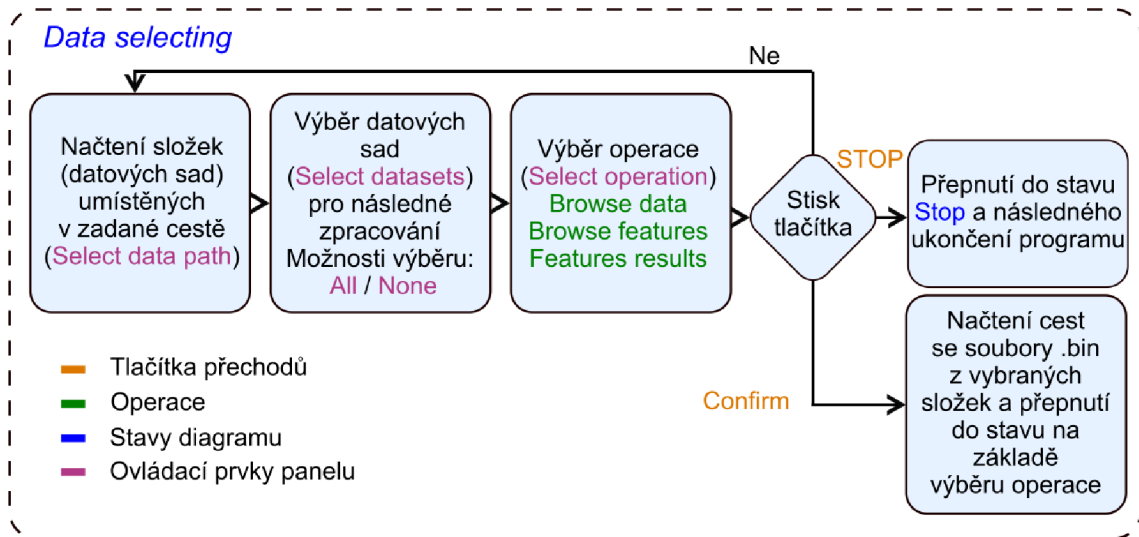
4.3.2 Data selecting



(a) Stav *Data selecting* – výběr dat (b) Stav *Data selecting* – načítání datových souborů (c) Stav *Features calculating* – indikace progresu

Obr. 4.2: Stavy *Data selecting*, *Features calculating* a jejich indikace na Front panelu

Na obrázcích 4.2a a 4.2b je zobrazen Front panel ve stavu *Data selecting*. Na Front panelu je nejprve nutné vybrat umístění datových sad (*Select data path*). Je možné například vybrat i umístění konkrétní datové sady, čímž se sníží hloubka podsložek, ve kterých jsou data uložena. V okně *Select datasets* se poté zobrazí datové sady, které je možné vybírat. Pro výběr všech, nebo žádných datových sad slouží tlačítka *All* a *None*. Dále je možné vybrat požadovanou operaci v okně *Select operation*. Pro potvrzení výběru slouží tlačítko *Confirm*.



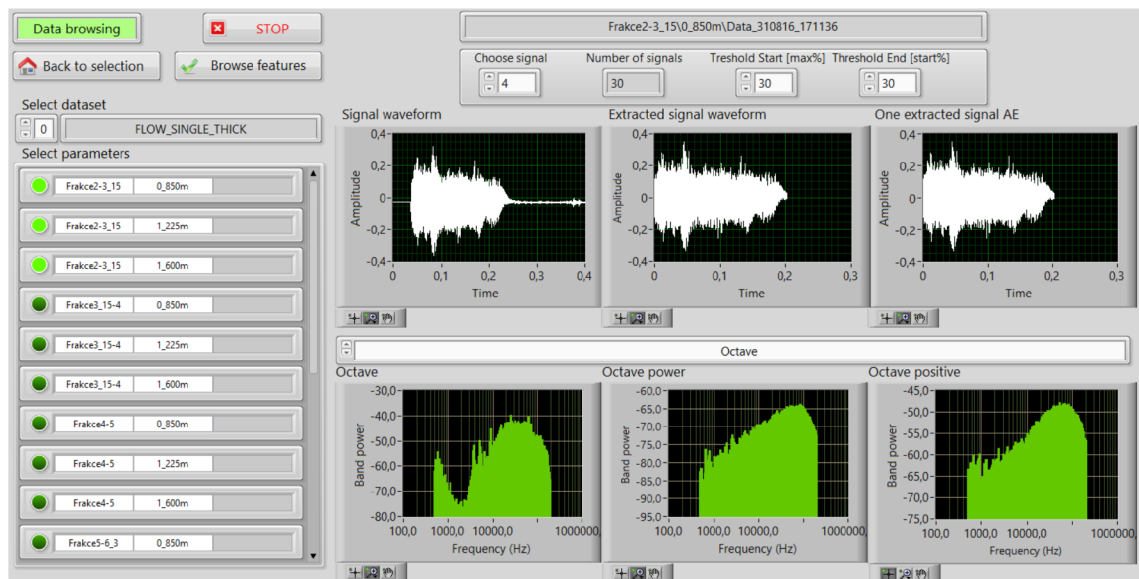
Obr. 4.3: Stav *Data selecting*

Blokový diagram stavu *Data selecting* popisující proces výběru je zobrazen na obrázku 4.3. Po stisku tlačítka *Confirm* jsou načteny všechny cesty, ve kterých jsou umístěné datové soubory. Načítání cest je indikováno na Front panelu, obrázek 4.2b. Cesty s datovými soubory se hledají pomocí vnořování do podsložek, které je prováděno do chvíle, než se najde soubor s příponou *.bin*. Načítání cest s daty zajišťuje SubVI *SearchDataPaths.vi*.

4.3.3 Data browsing

Na Front panelu (obrázek 4.4) se v levé části nachází výběr datové sady (*Select dataset*) a příslušné podsložky (*Select parameters*), kde je možné provádět výběr konkrétních parametrů. Dále se zde nachází tlačítka *Back to selection* a *Browse features*, jejich funkci popisuje blokový diagram na obrázku 4.5.

V pravé části Front panelu se nachází výběr konkrétního signálu (*Choose signal*) a název datové sady. Dále se zde nachází indikátor počtu signálů vybrané části dat (*Number of signals*) a možnost nastavení prahů začátku a konce signálu (*Threshold Start [max%], Threshold End [start%]*). Nastavovaný práh začátku signálu je určován



Obr. 4.4: Front panel – Browsing

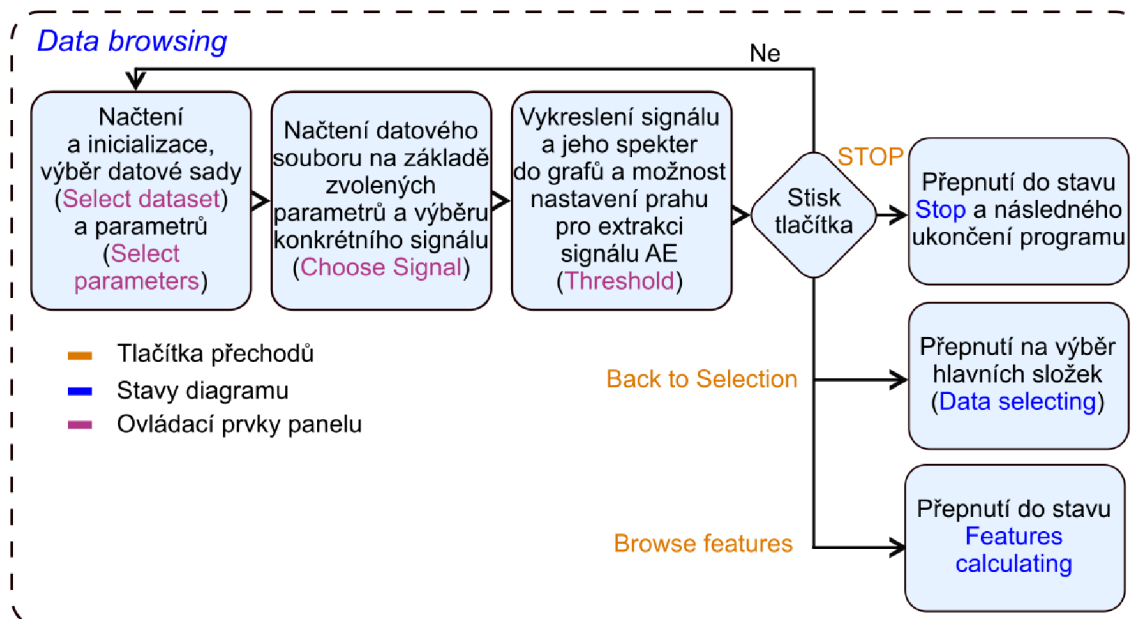
jako procento z maximální hodnoty signálu a práh konce signálu je určován jako procento z prvního prahu. V grafech je poté zobrazen načtený signál, extrahované signály a jeden extrahovaný signál. Dále je možné zobrazit vyhlazené PSD, FFT a oktávové spektrum.

Na obrázku 4.5 je zobrazen blokový diagram stavu *Data browsing*. Pro načtení podsložek (parametrů) slouží SubVI *SearchAllFolders.vi*. SubVI *Parameter-Selection.vi* poté slouží pro selekci cest na základě výběru parametrů (podsložek).

U původních dat se v každé složce nachází pouze jeden naměřený signál, zatímco u nových dat se nachází ve složce signálů více, a je tedy nutné určit kolik. Pro určení počtu signálů u nových dat slouží SubVI *MakePathArray.vi*.

Při načítání vybraných datových souborů je nutné odlišit původní a nový typ dat, jelikož se liší jejich způsob vyčítání a převod na napětí, viz kapitola 4.2. Všechny datové soubory původních dat jsou nazvané *DigitizerLog.bin*. Odlišení je tedy vyřešeno porovnáním názvu datového souboru, a pokud jím není *DigitizerLog.bin*, jedná se o nový typ dat. Nezáleží tedy na názvu případně nových přidaných datových souborů (měřených na stejném hardwaru, resp. se stejným způsobem vyčítání jako nová data).

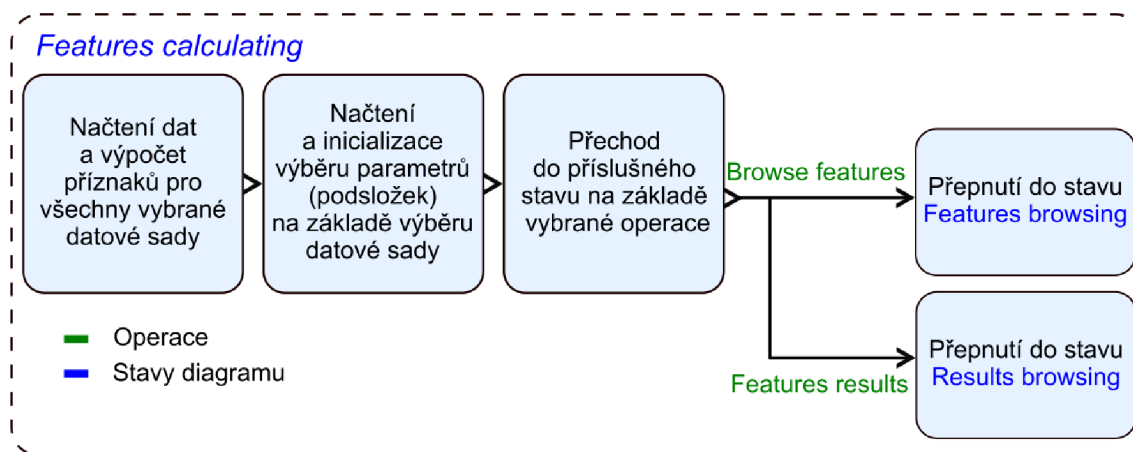
Pro načítání dat poté slouží SubVI *LoadDataOld.vi* a *LoadDataNew.vi*. Pokud by byl změněn způsob načítání souboru, je možné vytvořit nové SubVI a zaměnit je za jeden z těchto dvou. Z načteného signálu je dále nutno extrahovat signál AE, což zajišťuje SubVI *ExtractSignal.vi*. Výstupní signál je poté použit pro výpočet a zobrazování.



Obr. 4.5: Stav *Browse data*

4.3.4 Features calculating

Tento stav je viditelný pouze indikací stavu, obrázek 4.2c. V tomto stavu je rovněž vedle indikace zobrazován procentuální pokrok výpočtu příznaků pro všechny vybrané datové sady.



Obr. 4.6: Stav *Calculate features*

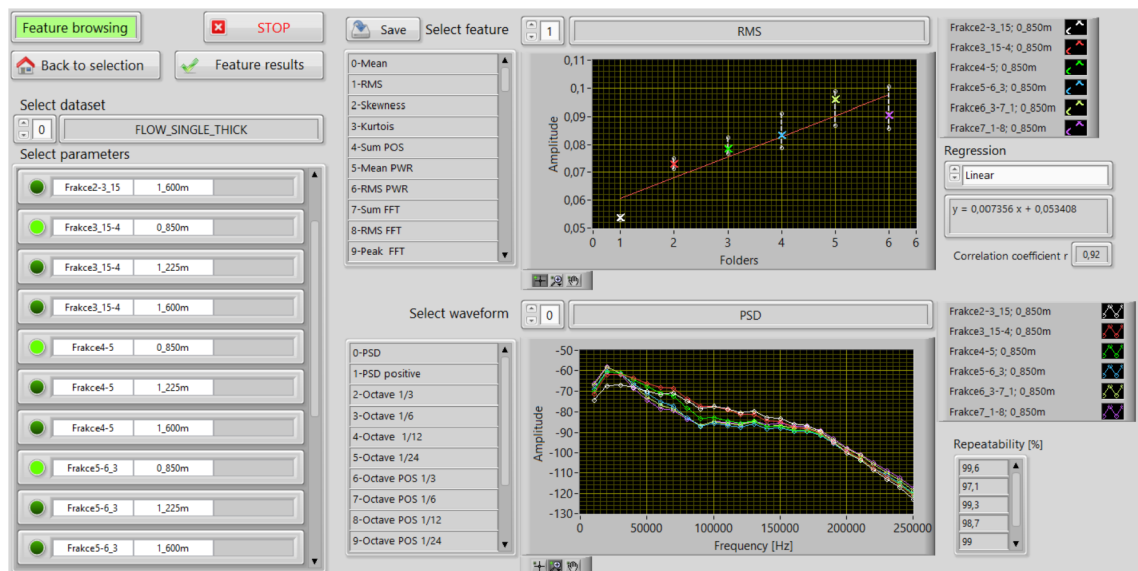
Na obrázku 4.6 je zobrazeno blokové schéma stavu *Features calculating*. Načítání dat je prováděno stejným způsobem jako ve stavu *Data browsing*, s tím rozdílem, že jsou po načtení dat vypočítány příznaky a průběhy, které jsou následně uloženy do clusteru. Tyto clustery jsou uloženy do pole pro všechny vybrané datové sady a jejich signály. Uložení do pole je prováděno takovým způsobem, že v jednom rozměru jsou

uloženy všechny clustery z příslušné datové sady a v druhém rozměru jsou jednotlivé vybrané datové sady. Výpočet probíhá v souboru *FeaturesComputing.vi*. V tomto subVI jsou definovány příznaky pro výpočet, které lze podle potřeby rozšířit o další.

Pro extrakci signálu AE jsou zvoleny prahy 30 % pro původní data a 40 % pro nová data. Hodnoty byly zvoleny na základě zkoumání extrahovaného signálu ve stavu *Data browsing*.

4.3.5 Features browsing

Na Front panelu (obrázek 4.7) se v levé části nachází výběr datové sady (*Select dataset*) a výpis příslušných podsložek (*Select parameters*), kde je možné provádět výběr konkrétních parametrů. Dále se zde nachází tlačítka *Back to selection* a *Features results*.

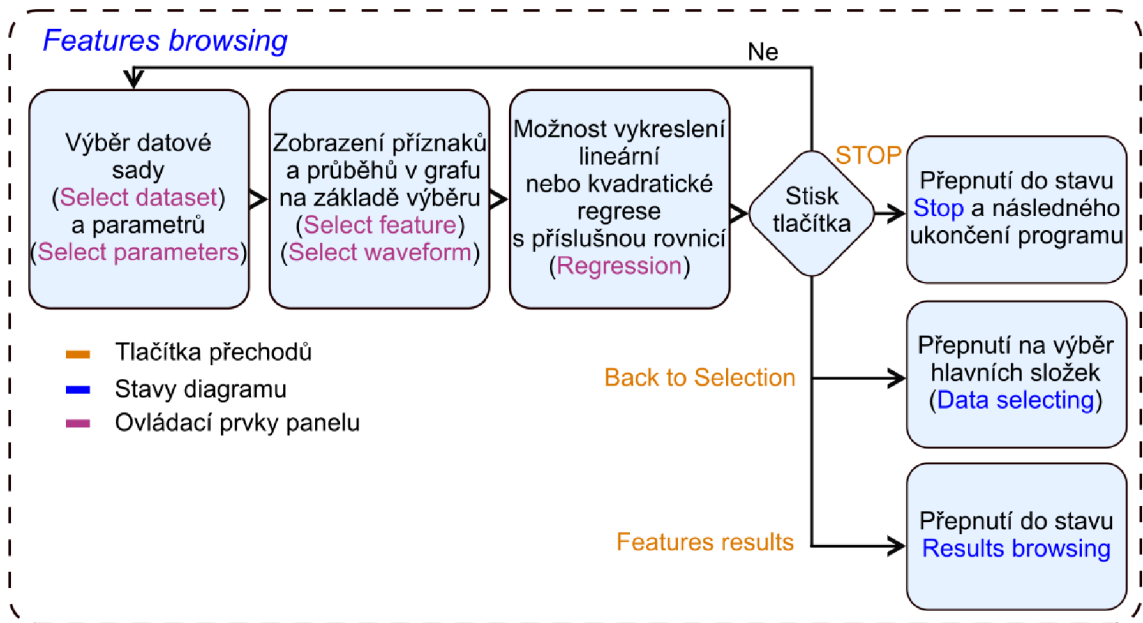


Obr. 4.7: Front panel stav *Features browsing*

Na Front panelu (obrázek 4.7) se v levé části nachází výběr datové sady (*Select dataset*) a výpis příslušných podsložek (*Select parameters*), kde je možné provádět výběr konkrétních parametrů. Dále se zde nachází tlačítka *Back to selection* a *Features results*, jejich funkci popisuje blokový diagram na obrázku 4.8.

V pravé části se poté nachází seznam příznaků a seznam průběhů spolu s příslušným grafem a možností výběru konkrétního příznaku (*Select feature*) či průběhu (*Select waveform*). V grafu příznaků (horní graf) se na ose x nachází vybrané podsložky (parametry) a na ose y se nachází hodnota vybraného příznaku. V případě, že je v podsložce více změřených signálů, vypočítá se medián z určených příznaků a ty se zobrazí v grafu. Na každou podsložku poté připadá vždy jedna hodnota. Dále je pro každou podsložku vykreslen v grafu 15% a 85% percentil. Tyto hodnoty popisují

opakovatelnost měření. Podsoložky jsou seřazeny tak, aby velikost frakce postupně vzrůstala, a z grafu tak byla jasná závislost příznaku a velikost frakce.



Obr. 4.8: Blokový diagram stav *Features browsing*

Dále je možné v okně *Regression* zvolit vykreslení lineární nebo kvadratické regrese spolu s příslušnou rovnicí. U lineární regrese se zároveň zobrazí korelační koeficient r . V grafu průběhů (dolní graf) je zobrazeno PSD nebo oktávové spektrum. Legenda obou grafů popisuje vykreslené hodnoty.

4.3.6 Results browsing

Tento stav slouží k procházení tabulky, která popisuje vhodnost příznaků. Na Front panelu se nachází tlačítka *Back to selection* a *Browse features*, jejich funkce je popsána v blokovém diagramu, obrázek 4.10. Dále se zde nachází možnost výběru datové sady (*Select dataset*) a výběru jednoho parametru (*Select parameter*). V závislosti na výběru parametru jsou do tabulky vykreslovány vypočtené hodnoty a příslušná hlavička. Na obrázku 4.9 je vybrán parametr frakce, tedy jsou selektovány všechny hodnoty frakcí se stejnou výškou, z kterých jsou následně počítány procentuální hodnoty v tabulce. Tyto hodnoty jsou nazvány jako míra separability a jsou udány v procentech. Postup výběru je popsán v blokovém diagramu na obrázku 4.10.

Při určování míry separability je nejdříve nutné selektovat data na základě výběru. Z hodnot příznaků jsou stejně jako ve stavu *Features browsing* vypočteny percentily a mediány opakovaných měření. Z těchto hodnot je poté počítána míra separability. Postup tohoto výpočtu je popsán v kapitole 5.4.

Features results [STOP]

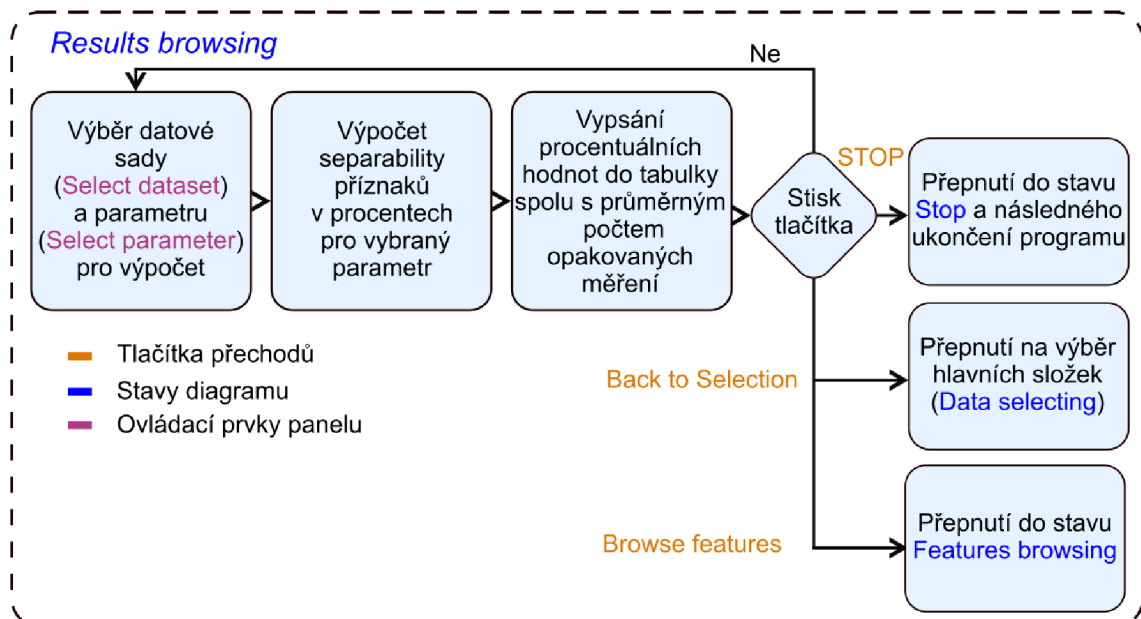
Back to selection Browse features

Select parameter: Frakce2-3.15 0_850m Save

Select dataset: 0 FLOW_SINGLE_THICK

Parameters	0_850m	1_225m	1_600m
Average number of	10	10	10
Sum OCV 1/3	0	0	0
Amplitude OCV 1/3	0	0	0
Peak Freq OCV 1/3	0	69	0
Bandwidth OCV 1/3	83	96	100
Sum OCV 1/6	0	0	0
Amplitude OCV 1/6	0	0	0
Peak Freq OCV 1/6	0	0	0
Bandwidth OCV 1/6	59	0	100
Sum OCV 1/12	0	0	0
Amplitude OCV 1/12	0	0	0
Peak Freq OCV 1/12	0	0	0
Bandwidth 1/12	47	0	0
Sum OCV 1/24	0	0	0
Amplitude OCV 1/24	0	0	0
Peak Freq OCV 1/24	0	0	0
Bandwidth 1/24	97	80	99
Sum OCV POS 1/3	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/3	0	0	0
Peak Freq OCV POS 1/3	0	0	0
Bandwidth POS 1/3	94	81	35
Sum OCV POS 1/6	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/6	0	0	0
Peak Freq OCV POS 1/6	0	0	0
Bandwidth POS 1/6	0	0	0

Obr. 4.9: Front panel stav *Results browsing*



Obr. 4.10: Blokový diagram stav *Results browsing*

4.4 Ukládání dat

Ve stavu *Browsing features* je možné pomocí tlačítka *Save* uložit graf příznaků spolu s percentilovými hodnotami a regresí do souboru .csv. Data z grafu příznaků jsou uložena v tomto pořadí:

- 1. řádek = legenda
- 2. – 5. řádek = x a y hodnoty příznaku (pro dvě hodnoty příznaku)
- 6. – 7. řádek = percentilové hodnoty
- 8. řádek = regrese

Uložená data je možné následně vykreslit do grafu pomocí souboru *plotLabview-Data.m*, který je dostupný v elektronické příloze.

Ve stavu *Features results* je možné pomocí tlačítka *Save* uložit tabulku míry separability do souboru *.csv*. Tabulka je uložena analogicky s tabulkou zobrazovanou v LabVIEW. Tabulky jsou dostupné v příloze B.

4.5 Time stamps – časové značky

Původní naměřená data rovněž obsahují časové značky pro snímky z kamery. Tyto hodnoty jsou pro analýzu signálu vedlejší, pro zajímavost však byly tyto údaje porovnány se signálem ze snímače. Časové značky nejsou v klasickém časovém formátu, ale pouze v absolutních hodnotách udávaných kamerou. Pro jeden datový soubor měření částic bylo vyzkoušeno porovnání časového rozdílu mezi dvěma dopady ze snímku a ze signálu. Pro porovnání byl zvolen datový soubor ze sady *Aura Vlnovody*, kde jsou anotované snímky při dopadu částic. Porovnání bylo provedeno v samostatném VI *TimeAnalysis.vi*

Tab. 4.1: Porovnání časového rozdílu dopadu částic ze snímků a ze signálu AE

$\Delta t_{\text{snímky}}$ [s]	$\Delta t_{\text{signál}}$ [s]	$\Delta t_{\text{snímky}} - \Delta t_{\text{signál}}$ [s]
0,53012	0,53131	-0,00119
0,12851	0,12638	0,00214
0,26506	0,25903	0,00603
0,18474	0,18719	-0,00245
0,09639	0,09472	0,00167
0,29719	0,29177	0,00541
0,09639	0,10128	-0,00490
0,20884	0,20397	0,00487
0,19277	0,19933	-0,00659

V tabulce 4.1 je zobrazena diference času mezi dopady částic získaná ze snímku, ze signálu a jejich rozdíl. Z tabulky je patrné, že hodnoty se liší v řádech tisícín sekund, a je tedy možné přiřadit fotky s viditelnými dopady konkrétním signálům AE.

4.6 Šumová data v sadě Vlnovody Experiment

V kapitole 3.3 bylo popsáno, že byla měřena data pouze s šumem nebo při dopadu jednotlivých částic byl změřen velmi malý signál. Tato data byla odstraněna následovně:

Šumová data byla selektována na základě nastavování prahu počáteční a koncové hodnoty signálu ve stavu *Data browsing*. Pro novou naměřenou datovou sadu byl zvolen práh 40 % z maximální hodnoty a 40 % z prvního prahu. Pokud signál nebylo možné detekovat při těchto hodnotách prahu, znamenalo to, že signál neklesl pod nastavený koncový práh, který je závislý na maximální hodnotě (jelikož je první práh závislý na max. hodnotě). To tedy znamená, že maximální hodnota v signálu je příliš malá na to, aby byl detekován konec signálu. Pokud byl signál zaznamenán, ale konec signálu byl detekován příliš pozdě, což lze pozorovat v grafu jako dlouhý konec s šumovými hodnotami, byl tento signál rovněž určen jako šumový. Signály, které byly vyhodnoceny jako šum, byly následně odstraněny.

Tab. 4.2: Počet změřených signálů po odstranění šumových dat

	Částice			Masa		
	6 mm	8 mm	10 mm	6 mm	8 mm	10 mm
50 cm	12	18	12	3	3	3
100 cm	14	20	27	3	3	3
150 cm	15	–	–	3	3	–

V tabulce 4.2 je zobrazen celkový počet změřených dat po odstranění šumových dat. Při prohlídce dat bylo dále zjištěno, že v signálech při dopadu jedné částice vznikalo velmi často několik odrazů a signály jsou tímto zkresleny. Při dopadu masy bylo k dispozici velmi málo kuliček, z toho důvodu byla násypka naplněna pouze pod 10 % svého objemu. Signály, které byly změřeny, jsou velmi krátké a v některých případech jsou necelistvé. To znamená, že vznikly velké rozdíly v charakterech signálů při dopadu masy. Pro měření je tedy nutné plnit násypku větším množstvím částic, než v provedeném experimentu.

4.7 Informace k používání programu

Program byl vytvářen ve verzi LabVIEW 2021 64 bit. K této verzi je dále nutné mít doinstalovaný Sound and Vibration Toolkit. Front panel byl vytvářen pro obrazovku s měřítkem zobrazení 125 % (defaultní hodnota pro notebook se systémem Windows).

Při ukončení programu, stisknutím tlačítka *STOP* na Front panelu, se zobrazí záložky a je možné se mezi nimi pohybovat.

Celková doba výpočtu všech datových sad (20, 197 GB) trvala 1 hodinu 7 minut. Výpočet probíhal na běžném notebooku s procesorem Intel i5 6. generace, s pamětí (RAM) 8 GB a SSD diskem. Data jsou však uložena na externím pevném disku, z kterého byla rovněž načítána při běhu programu.

4.8 Výčet a popis SubVI

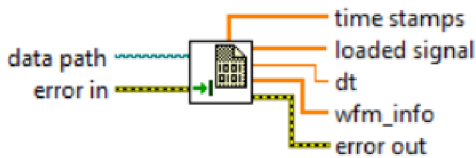
V této kapitole je uveden výčet a stručný popis 14 vytvořených SubVI.

SearchDataPaths



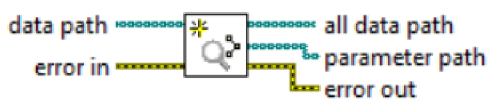
Vstupem je umístění hlavní složky obsahující datové sady. Datové soubory jsou vyhledávány vnořováním do složek do té doby, než je nalezen .bin soubor. Výstupem je dvourozměrné pole cest datových souborů. Jeden rozměr odpovídá počtu datových souborů a druhý rozměr počtu vybraných datových sad.

LoadDataOld



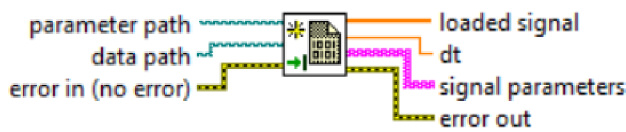
SubVI slouží k načtení původního typu dat. Vstupem je cesta datového souboru a výstupem jsou příslušná data.

MakePathArray



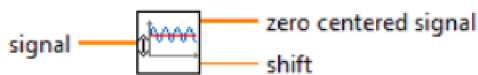
SubVI je určeno pro nalezení všech cest datových souborů, pokud je v jedné složce přítomný více než jeden datový soubor. Výstupem jsou cesty dat a parametrů. SubVI slouží pro nový typ dat, jsou hledány soubory s daty (ae_signal) a soubor s parametry (ae_parameters).

LoadDataNew



SubVI je určeno k načtení nového typu dat. Vstupem je cesta datového souboru a souboru s parametry. Výstupem jsou příslušná data.

ShiftData



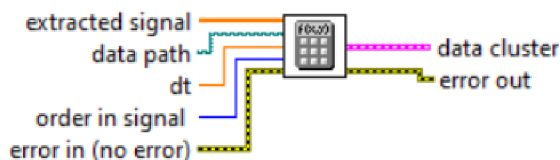
Vstupem je načtený signál a výstupem vycentrovaný signál a posunutí. Posunutí je určeno jako střední hodnota signálu.

ExtractSignal



SubVI je určeno pro extrakci signálu či signálů AE. Vstupem je měřený signál spolu s hodnotami počátečního a koncového prahu. Výstupem je průběh s extrahovanými signály, pole s jednotlivými extrahovanými signály, délka jednotlivých signálů a jejich počet. Extrakce probíhá ve smyčce, ve které se nejdříve hledá začátek signálu v závislosti na nastaveném prahu (start). Následně se hledá konec signálu v závislosti na prahu (end) a kontroluje se, jestli signál nevzrostl opět nad práh po dobu 1000 vzorků. Pokud ne, detekuje se konec signálu. Pro extrakci je aplikován postup popsáný v kapitole 1.4.1.

FeaturesComputing



SubVI slouží pro výpočet příznaků a průběhů. Výčet a popis příznaků je uveden v kapitole 5.3. Vstupem je extrahovaný signál, jeho cesta, Δt a pořadí signálu v načtených datech (pokud je z průběhu extrahovaných více signálů AE). Výstupem je datový cluster, ve kterém jsou uloženy následující informace a data:

path – cesta signálu

order in signal – pořadí v průběhu

features data – hodnoty příznaků

features name – názvy příznaků

num of features value – počet hodnot příznaku (většinou 1 nebo 2 hodnoty)

waveform data – x a y hodnoty průběhů

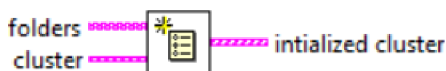
waveform name – názvy průběhů

SearchAllFolders



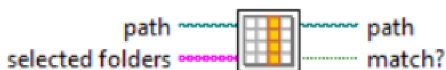
Vstupem jsou umístění všech datových souborů a název datové sady. Výstupem jsou všechny podsložky s názvem parametrů, které jsou umístěny v datové sadě.

InitializeFolderCluster



Toto SubVI slouží k inicializaci pole clusterů s názvem podsložek a možností výběru (bool control). První podsložky jsou vždy nastaveny jako aktivní, aby byla po inicializaci zobrazena alespoň jedna datová sada.

ParameterSelection



SubVI slouží k výběru cest na základě výběru podsložek. Vstupem jsou všechny cesty a vybrané podsložky a výstupem selektované cesty.

DeleteEmptyElement.vim



Toto SubVI slouží k výběru validních dat z jednorozměrného pole. Jelikož jsou hodnoty často ukládány do dvourozměrného pole, dochází k naplnění hodnot prázdnými prvky, pokud je jednorozměrné pole kratší než nejdelší signál v 2D poli. Vstupem je 1D pole a prvek, který definuje prázdný element. SubVI je možné používat pro různé datové typy. Výstupem je extrahované 1D pole a jeho velikost.

BandFrequency



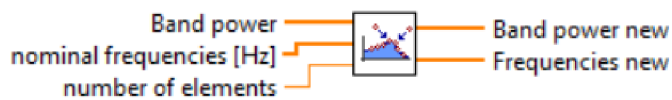
SubVI slouží pro výpočet šířky pásma a pásmových frekvencí. Vstupem jsou amplitudy oktávového spektra, frekvence a pokles, který definuje pásmo. Výstupem jsou pásmové frekvence a šířka pásma.

AveragePSD



SubVI slouží pro výpočet průměrovaného PSD spektra. Vstupem je signál AE a výstupem jsou PSD spektra uložená ve dvou různých formátech.

Interpolace



SubVI slouží pro interpolaci hodnot v oktávovém spektru. Vstupem jsou x a y hodnoty oktávové spektra a maximální frekvence, která je ve spektru obsažena. V závislosti na maximální frekvenci je vytvořeno pole frekvencí, u kterých jsou zjišťovány amplitudy pomocí interpolace.

5 Analyzované příznaky a výsledky analýzy

Tato kapitola se zaměřuje na analýzu dat a její popis. Pro analýzu je využit pomocný nástroj, který je podrobně rozebrán v kapitole 4.3. Na začátku této kapitoly je popsán výběr dat pro analýzu, následně je uveden popis všech použitých příznaků, poté je popsán výpočet míry separability a její vliv na následné vyhodnocení výsledků a v poslední řadě jsou popsány výsledky, které byly získány na základě analýzy.

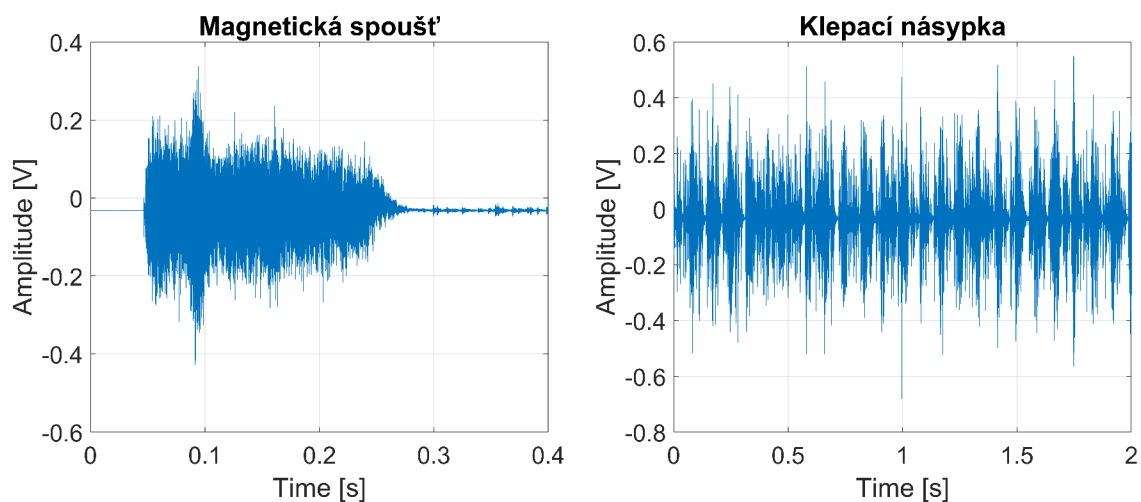
5.1 Výběr dat pro analýzu

V průmyslu se běžněji lze setkat s měřením signálu AE při dopadu masy. Analýza bude tedy zaměřena na tento typ dat. K dispozici je 7 datových sad masy, včetně experimentálního měření. Z toho 3 datové sady byly změřeny s magnetickou spouští a keramzitem, 3 s klepací násypkou a keramzitem a poslední s magnetickou spouští a kuličkami (experiment).

Tab. 5.1: Data při dopadu masy

Datová sada	Násypka	Počet záz. velikost	Frakce
Flow Double Thick Aura003	Mg. spoušť	350 / 15,2 GB	Keramzit
Flow Multi Thick Aura003	Mg. spoušť	270 / 11,8 GB	Keramzit
Flow Single Aura004	Klepací	90 / 19,8 GB	Keramzit
Flow Single Fraction	Klepací	180 / 39,5 GB	Keramzit
Flow Single Thick	Mg. spoušť	180 / 7,98 GB	Keramzit
Test Flow	Klepací	15 / 3,27 GB	Keramzit
Vlnovody Experiment	Mg. spoušť	750 MB	Kuličky

V tabulce 5.1 je zobrazen přehled dat masy. Prvních pět uvedených datových sad je měřeno s více frakcemi. Datová sada *Test Flow* je měřena pouze s použitím jedné frakce, stejně tak nově naměřená sada *Vlnovody Experiment*. Pro analýzu signálů bude tedy využito prvních pět datových sad. V tabulce jsou úmyslně selektována data pro magnetickou spoušť a klepací násypku, jelikož při použití různých násypek vzniká rozdíl v charakteru signálu. U magnetické spouště lze pozorovat v signálu jeden celistvý signál, jelikož celá masa spadne najednou, zatímco u klepací násypky jsou vidět i jednotlivé dopady částic, protože částice jsou postupně dávkovány.



(a) Magnetická spoušť (Flow Single Thick, frakce 2–3,15 mm, výška 0,85 m, Data_310816_164541) (b) Klepací násyпка (Flow Single Fraction, frakce 2–3,15 mm, výška 0,850 m, thicker, Data_270816_115510)

Obr. 5.1: Signál AE při použití různých násypek (signály převzaty z dostupné datové sady)

Na obrázku 5.1 je zobrazen příklad signálů s použitím mg. spouště a klepací násycky při dopadu masy. Tyto signály jsou na první pohled rozdílné.

5.2 Datová sada Vlnovody Experiment

Tato datová sada byla experimentálně změřena a až následně byla vybrána část z dostupných dat, která bude sloužit pro analýzu. Jelikož byla tato sada zaměřena na použití různých vlnovodů a předmětem analýzy jsou různé velikosti frakce, nebude tato sada použita pro analýzu. Dalším faktem je, že pro měření byly použity kuličky, zatímco u všech ostatních sad byl použit keramzit.

Následným zkoumáním změřených dat v pomocném nástroji bylo zjištěno, že změřené dopady masy nejsou vhodné pro analýzu, jelikož bylo použito velmi málo kuliček. To vedlo ke změření velmi krátkých přerušovaných signálů, které nelze vhodně analyzovat.

5.3 Příznaky

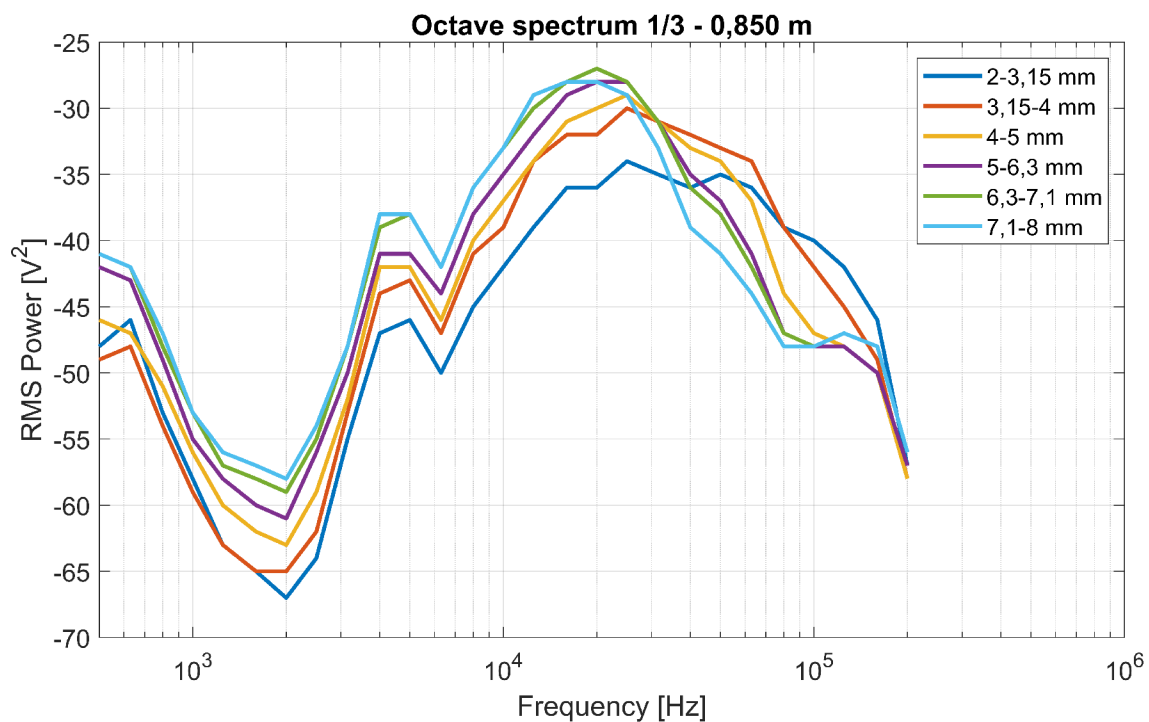
V této kapitole jsou popsány příznaky, které jsou použity pro analýzu signálu a jejichž výpočet probíhá v souboru *FeaturesComputing.vi*.

Tab. 5.2: Analyzované příznaky

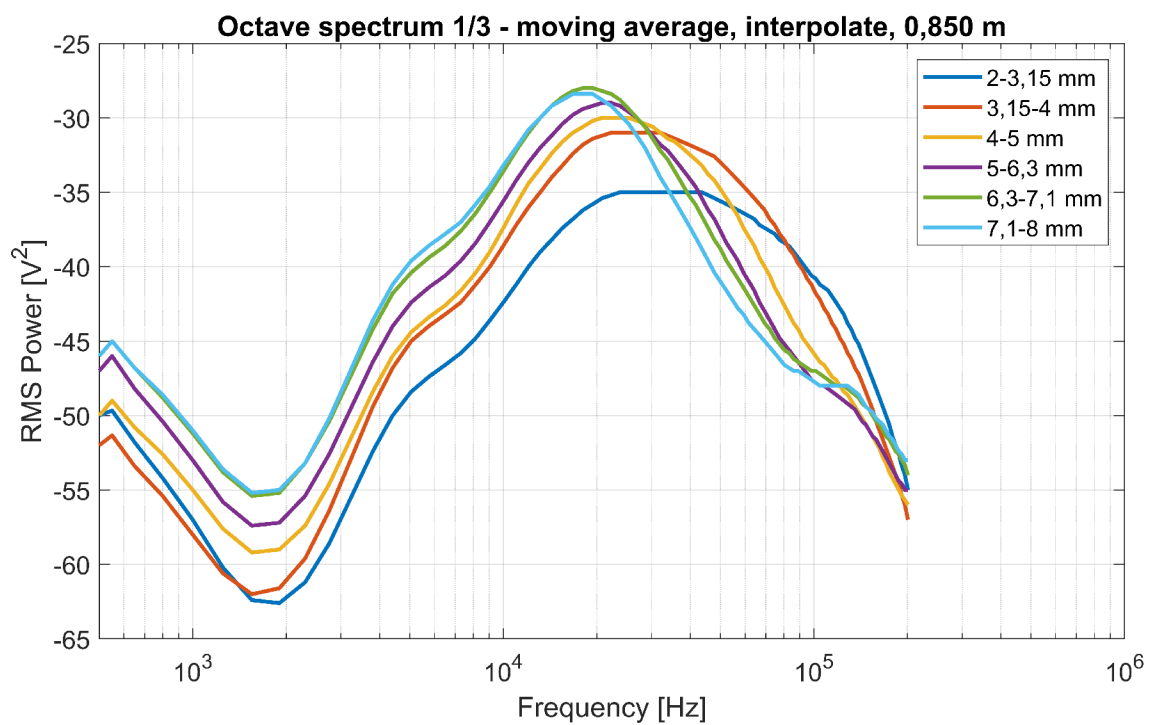
Příznak v LabVIEW	Popis
Mean	střední hodnota kladné části signálu
RMS	efektivní hodnota kladné části signálu
Median	medián signálu
Variance	rozptyl signálu
Skewness	šikmost signálu
Kurtois	špičatost signálu
Energy	suma kvadrátu vzorků signálu
Mean PWR	střední hodnota kvadrátu signálu
RMS PWR	efektivní hodnota kvadrátu signálu
Sum FFT	suma hodnot spektra
RMS FFT	efektivní hodnota spektra
Peak FFT	frekvence max. amplitudy signálu (oříznuté nízké frekvence < 500 Hz)
Sum OCV 1/N	Suma vzorků oktávového spektra
Amplitude OCV 1/N	max. amplituda oktávového spektra
Peak Freq OCV 1/N	frekvence max. amplitudy oktávového spektra
Bandwidth OCV 1/N	Šířka pásma oktávového spektra – pokles 3 dB od max. hodnoty
Sum OCV POS 1/N	Suma vzorků oktávového spektra z kladné části signálu
Amplitude OCV POS 1/N	max. amplituda oktávového spektra z kladné části signálu
Peak Freq OCV POS 1/N	frekvence max. amplitudy oktávového spektra z kladné části signálu
Bandwidth OCV POS 1/N	Šířka pásma oktávového spektra z kladné části signálu
Sum OCV PWR 1/N	Suma vzorků oktávového spektra z kvadrátu signálu
Amplitude OCV PWR 1/N	max. amplituda oktávového spektra z kvadrátu signálu
Peak Freq OCV PWR 1/N	frekvence max. amplitudy oktávového spektra z kvadrátu signálu
Bandwidth OCV PWR 1/N	Šířka pásma oktávového spektra z kvadrátu signálu
Band Freq 1/N	obě frekvence pásma v oktávovém spektru
Band Freq POS 1/N	obě frekvence pásma v oktávovém spektru z kladné části signálu
Band Freq PWR 1/N	obě frekvence pásma v oktávovém spektru z kvadrátu signálu

Při dopadu masy na vlnovod má signál charakter šumu. Jak již bylo popsáno v teoretické části, takový signál je vhodné analyzovat převážně ve frekvenční doméně. Nicméně pro analýzu jsou počítány i příznaky v časové doméně a jejich vhodnost se ukáže následným zkoumáním.

Přehled a popis analyzovaných příznaků je uveden v tabulce 5.2. Pro analýzu je použito celkem 25 typů příznaků, jak z časové, tak frekvenční domény.



Obr. 5.2: Oktávové spektrum 1/3 z celého signálu

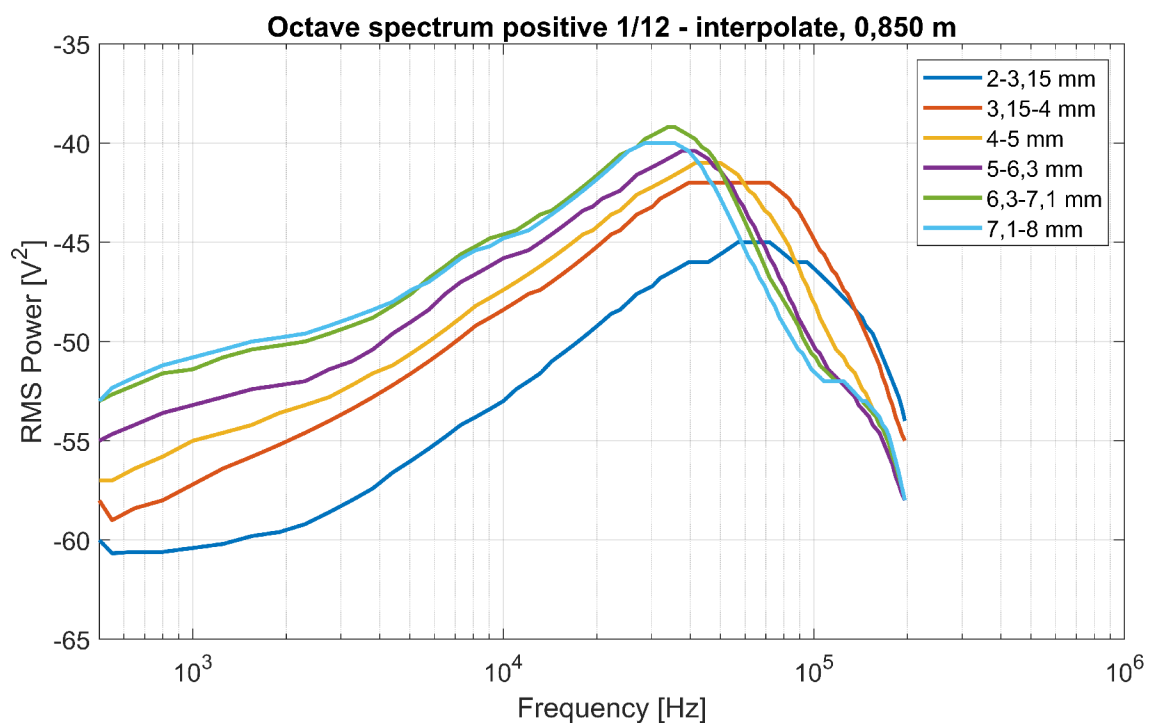


Obr. 5.3: Oktávové spektrum 1/3, vyhlazené a interpolované

Tyto příznaky byly vybrány na základě teoretického rozboru z kapitoly 1.4. U příznaků Mean a RMS je hodnota počítána pouze z kladné části signálu. Pokud je použit pro výpočet celý signál, výsledné hodnoty jsou velmi blízké nule a popisují spíše posun signálu na ose y. Kladná část signálu je použita i u některých dalších příznaků, jež jsou označeny popiskem POS. Dále jsou počítány i příznaky z kvadrátu signálu a ty jsou označeny popiskem PWR.

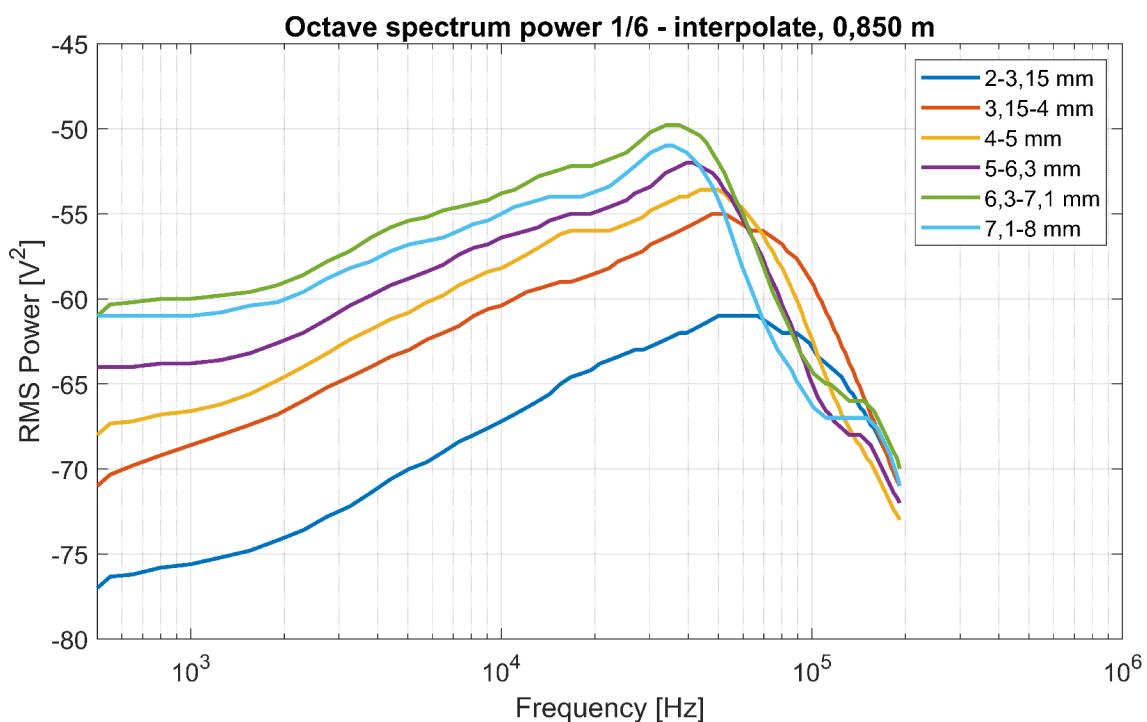
Značná část příznaků je zaměřena na výpočet z oktávového spektra, které je vhodné použít pro zobrazení širokého pásma frekvencí. Oktávové spektrum je počítáno s různým nastavením šířky pásma, a to 1/3, 1/6, 1/12 a 1/24.

Šířka pásma ovlivňuje citlivost změny amplitudy na změnu frekvence. Čím nižší šířka pásma, tím detailnější oktávové spektrum. V závislosti na volbě šířce pásma se však mění počet hodnot, které popisují spektrum. Po výpočtu oktávového spektra je tedy nutné provést interpolace hodnot takovým způsobem, aby všechna oktávová spektra obsahovala stejný počet hodnot.



Obr. 5.4: Oktávové spektrum 1/12 z kladné části signálu

U spekter z celého signálu je navíc před interpolací použit klouzavý průměr, jelikož hodnoty spekter jsou značně zašuměné. Porovnání oktávových spekter celého signálu před a po aplikaci klouzavého průměru je zobrazeno na obrázcích 5.2 a 5.3. Na obrázcích 5.4 a 5.5 je poté zobrazeno spektrum z kladné části signálu (1/12) a z kvadrátu signálu (1/6) po interpolaci. Z těchto upravených spekter jsou následně počítány příznaky, které jsou uvedené v tabulce.



Obr. 5.5: Oktávové spektrum 1/6 z kvadrátu signálu

Tab. 5.3: Analyzované průběhy

Průběh v LabVIEW	Popis
PSD	průměrné PSD spektrum
PSD POS	průměrné PSD spektrum z kladné části signálu
Octave 1/N	oktávová spektrum
Octave POS 1/N	oktávová spektra z kladné části signálu
Octave PWR 1/N	oktávová spektra z kvadrátu signálu

V tabulce 5.3 je uveden výčet porovnávaných průběhů. Tyto průběhy slouží pro zobrazení a popřípadě porovnání s vypočítanými příznaky.

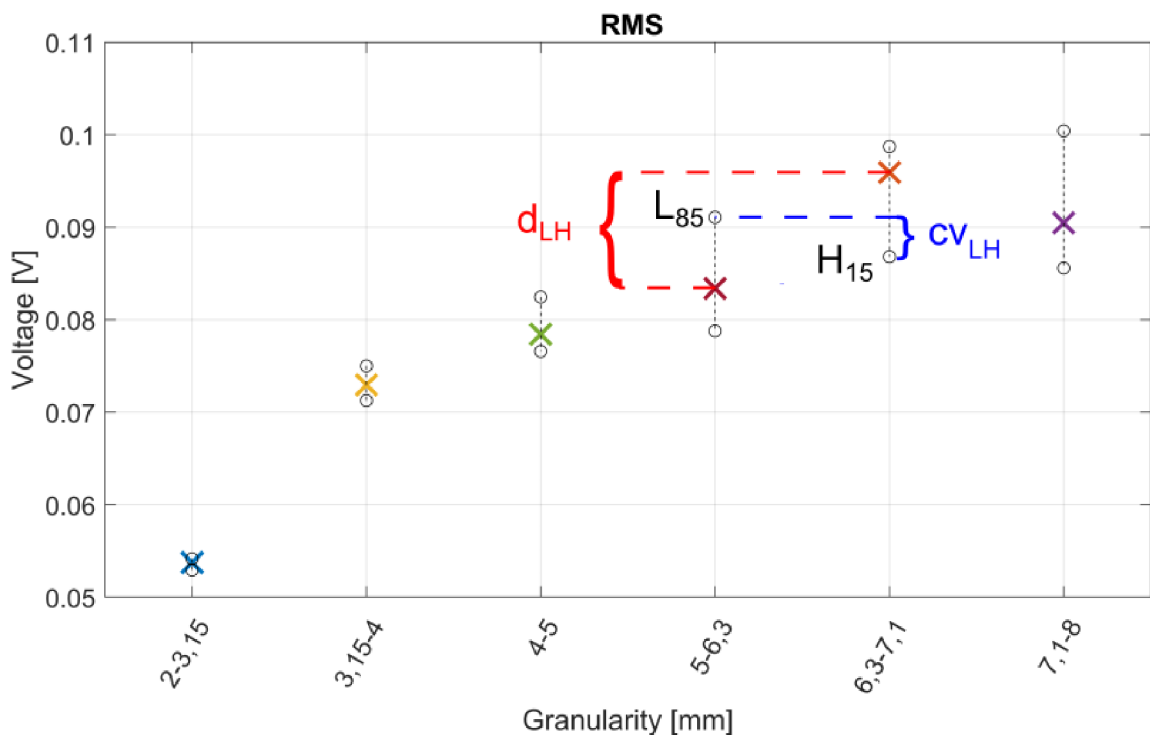
5.4 Výpočet míry separability a vliv na vyhodnocení výsledků

V grafech příznaků, umístěných na Front panelu ve stavu *Features browsing*, jsou zobrazovány mediánové hodnoty a jejich percentily, například obrázek 5.6. Pro popis rozsahu opakovaných měření byl zvolen 15% a 85% percentil. Tyto hodnoty byly zvoleny na základě tzv. boxplotů, které využívají 25% a 75% percentil, s tím, že se

zavedlo o trochu přísnější kritérium.

Aby nebylo nutné procházet všechny tyto grafy, postupně si volit parametry a zkoumat okem jejich vhodnost, tak je z dat vypočtena tzv. míra separability, která je následně zapsána do tabulky ve stavu *Results browsing*. Tato hodnota je udána v procentech, a jak již název napovídá, vyjadřuje jakou měrou jsou amplitudy parametrů (frakce) daného příznaku od sebe oddělitelné.

Míra separability slouží pouze pro selekci vhodných příznaků, které je následně nutné analyzovat za pomoci grafů příznaků. Postup výpočtu separability a vliv na následné vyhodnocení je popsán v této kapitole.



Obr. 5.6: Výpočet míry separability – grafické znázornění

Předpokladem je, že jsou složky uspořádány vzestupně podle velikosti, stejně jako při prohlížení příznaků v grafech, aby bylo možné sledovat chování příznaku se zvyšující se hodnotou parametru (např. velikost frakce). Dále se předpokládá, že všechny složky umístěné ve stejné cestě popisují jeden parametr o různých hodnotách (například složky popisující výšku dopadu jsou umístěny v jedné cestě).

Výpočet míry separability pak probíhá následovně: Nejdříve je nutné zjistit, zda mediánové hodnoty příznaku klesají, či stoupají se zvyšující se hodnotou parametru. To lze určit odečtením první a poslední hodnoty příznaku a vyhodnocením znaménka. Následně je zjišťováno, zda je trend dodržen pro všechny mediánové hodnoty příznaku. Například, pokud je trend stoupající a třetí hodnota je nižší než druhá, trend není dodržen a separabilita je automaticky nulová.

Pokud je trend dodržen pro všechny hodnoty, určuje se dále míra překrytí percentilů sousedních hodnot příznaků. Na obrázku 5.6 je zobrazen příznak, jehož amplituda roste se zvyšující se frekvencí. V tomto případě je trend dodržen, jelikož mediánové hodnoty se zvyšují se zvětšující se frakcí. Pro výpočet míry separability se tedy dále určuje překrytí 85% a 15% percentilu sousedních hodnot cv_{HL} , které lze vyjádřit dle vztahu 5.1. Překrytí je graficky znázorněno v grafu na obrázku 5.6.

$$cv_{HL} = \begin{cases} L_{85} - H_{15}, & \text{pro stoupající trend} \\ H_{85} - L_{15}, & \text{pro klesající trend} \end{cases} \quad (5.1)$$

kde:

L_{15}, L_{85} = 15% nebo 85% percentil první hodnoty (frakce) ze sousedních hodnot
 H_{15}, H_{85} = 15% nebo 85% percentil druhé hodnoty (frakce) ze sousedních hodnot

Pokud je cv_{HL} menší než nula nebo nula, nedochází k překrytí percentilových hodnot. Pokud je větší než nula, tak k překrytí dochází. Na základě tohoto výsledku se dále určuje míra separability pro sousední hodnoty sp_{HL} (vztah 5.2).

$$sp_{HL} = \begin{cases} \left(100 - \frac{cv_{HL}}{d_{HL}} \times 100\right) \times \frac{1}{2}, & d_{HL} \geq cv_{HL} > 0 \\ \left(\frac{|cv_{HL}|}{0,5 \times d_{HL}} \times 100\right) \times \frac{1}{2} + 50, & d_{HL}/2 \geq cv_{HL} \leq 0 \\ 0, & d_{HL} < cv_{HL} > 0 \\ 100, & d_{HL}/2 < cv_{HL} \leq 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

kde:

cv_{HL} = překrytí 85% a 15% percentilu sousedních hodnot

d_{HL} = vzdálenost mezi mediánovými amplitudami sousedních hodnot

Míra separability sousedních hodnot je určena jako poměr překrytí cv_{HL} a vzdálenosti mediánových amplitud d_{HL} v procentech, tyto hodnoty jsou okótované na obrázku 5.6. Pokud je $d_{HL} \geq cv_{HL} > 0$, tedy dochází k překrytí, ale nepřesahuje vzdálenost mediánových amplitud, tak je požadováno, aby poměr vykazoval co nejmenší hodnotu, tedy aby překrytí bylo v poměru ke vzdálenosti co nejmenší. Aby se obrátila logika, je poměr odečten od hodnoty 100. Navíc je výsledek podělen dvěma, čímž se zajistí, že v případě, že dochází k překrytí percentilových hodnot, bude maximální míra separability 50 %.

Pokud je $d_{HL} < cv_{HL} > 0$, tedy velikost překrytí přesahuje vzdálenost mediánových amplitud, míra separability je nulová.

Pokud $d_{HL}/2 \geq cv_{HL} \leq 0$, tedy nedochází k překrytí, tak je žádoucí, aby poměr byl co největší. Pokud bude cv_{HL} větší nebo rovno polovině vzdálenosti d_{HL} , míra

separability bude 100 %. Jestliže je splněna alespoň druhá podmínka a nedochází k překrytí percentilových hodnot, automaticky je míra separability minimálně 50 %.

Po výpočtu jednotlivých sp_{HL} , je nutné vyjádřit celkovou míru separability sp_c , která se určí jako harmonický průměr, vztah 5.3.

$$sp_c = \frac{N}{\sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{s_{ii+1}}} \quad (5.3)$$

kde:

$N = \text{počet } sp_{HL}$

Harmonický průměr zajistí, že výsledná hodnota bude respektovat velký rozptyl jednotlivých mír separabilit vypočítaných z grafu příznaků. Například, pokud bude jeden příznak vykazovat jednotlivé míry separability 40, 40, 40 % a druhý příznak 90, 15, 15 %, aritmetický průměr by pro oba příznaky vykazoval celkovou míru separability 40 %, což není žádoucí. Kdežto harmonický průměr bude vykazovat u druhého příznaku 21 %. Dále pokud bude jenom jedna hodnota sp_{HL} nulová, výsledná separabilita bude rovněž nulová.

5.4.1 Vliv míry separability na vyhodnocení výsledků

Výpočet celkové míry separability je prováděn s cílem nalézt příznaky, jejichž hodnoty se dají odlišit pro různé velikosti frakcí (nebo pro jiný parametr).

Za dobré výsledky se mohou považovat hodnoty nad 50 %, jelikož tato hodnota odpovídá nulovému překrytí percentilů. Důležité rovněž je, aby příznak vykazoval dobré výsledky pro všechny parametry nebo většinu (například výška).

U některých datových sad lze mírné překrytí očekávat, jelikož jednotlivé velikosti frakcí na sebe navazují (2–3,15 mm; 3,15–4 mm), tedy i hodnoty míry separability pod 50 % mohou být akceptovatelné.

Hodnoty míry separability neslouží k vyhodnocení výsledků, ale pouze k selekci vhodných příznaků, které je následně nutné analyzovat a vyhodnotit výsledky z grafů příznaků.

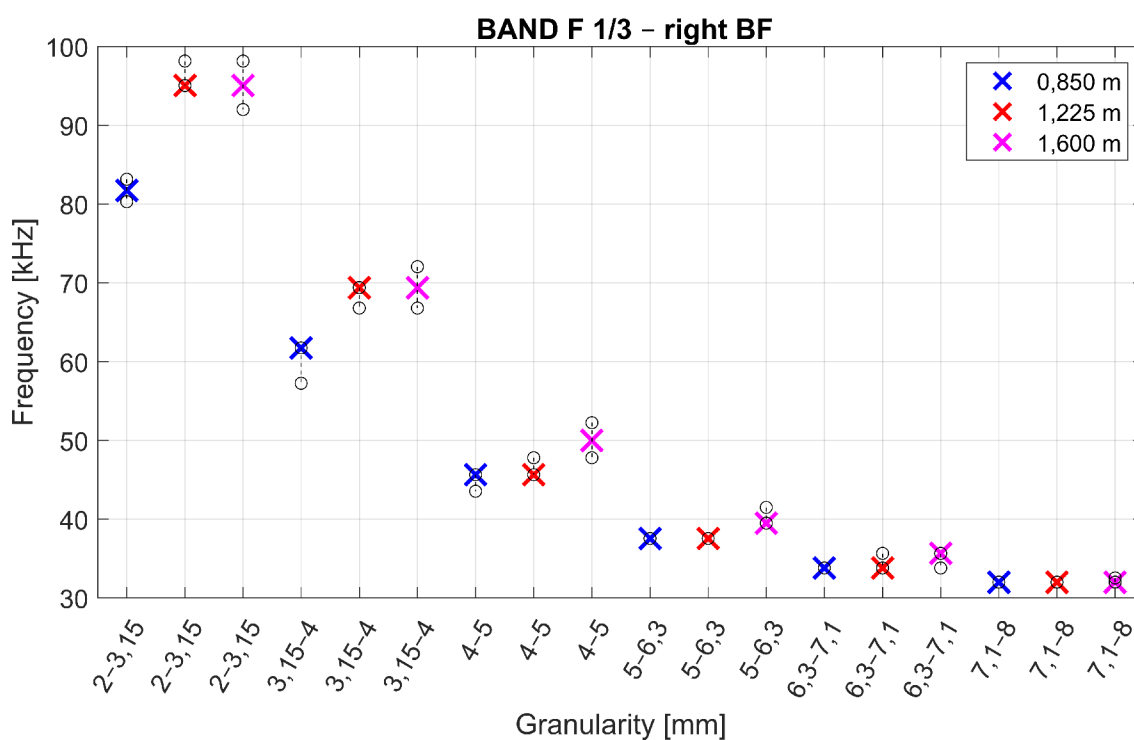
V následujících kapitolách jsou rozebrány příznaky s akceptovatelnými výsledky pro vybrané datové sady.

5.5 Flow Single Thick

Datová sada *Flow Single Thick* je zaměřena na dopad masy s různou velikostí frakce respektive s různými rozsahy částic (např. 2–3,15 mm).

Tab. 5.4: Vybrané příznaky pro sadu FLOW SINGLE THICK

	0,850 m	1,225 m	1,600 m
Bandwidth 1/3	83 %	96 %	99 %
Bandwidth 1/24	70 %	100 %	89 %
Bandwidth POS 1/12	100 %	68 %	91 %
Band Freq 1/3	100 %	100 %	96 %
Band Freq 1/6	83 %	83 %	100 %
Band Freq 1/24	96 %	100 %	100 %
Band Freq POS 1/12	96 %	96 %	100 %
Band Freq POS 1/24	83 %	82 %	98 %
Band Freq PWR 1/3	83 %	71 %	93 %
Band Freq PWR 1/6	83 %	55 %	98 %
Band Freq PWR 1/24	99 %	55 %	82 %



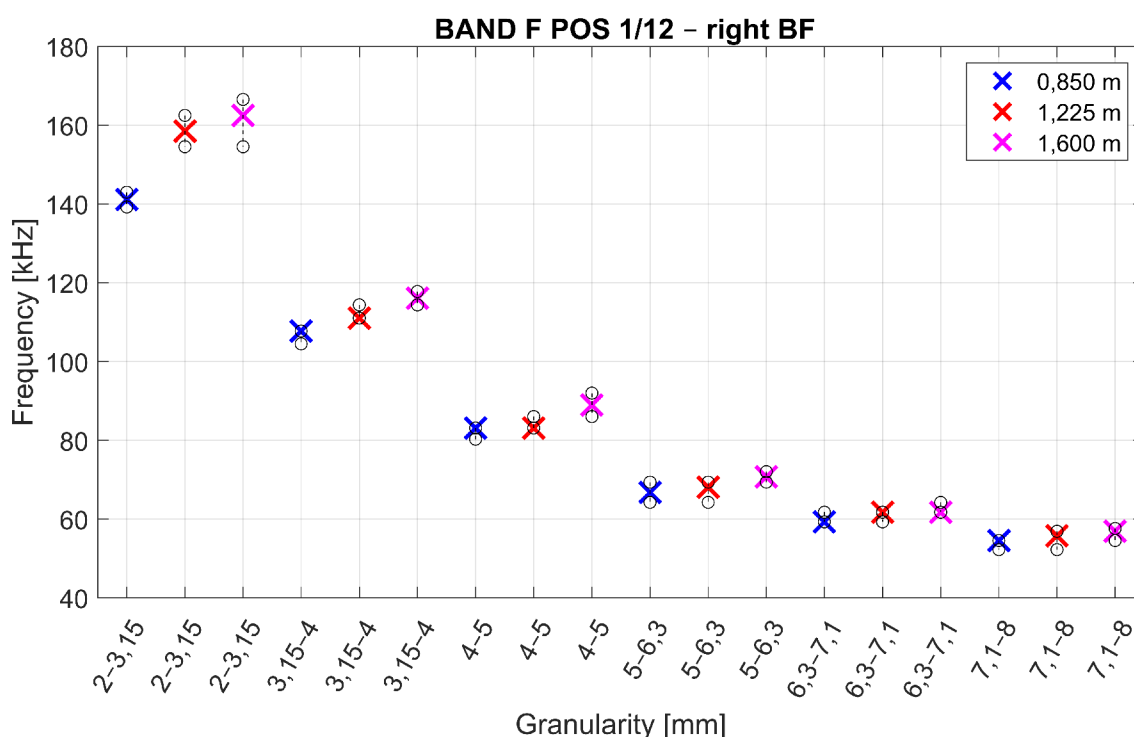
Obr. 5.7: Příznak Band frequency 1/3, pouze pravá frekvence – barva odpovídá výšce dopadu

Pro měření bylo použito 6 různých frakcí a dopad byl měřen pro tři různé výšky. Pro každou kombinaci výšky a frakce bylo naměřeno 10 signálů.

Jak již bylo zmíněno v předchozí podkapitole, pro selekci vhodných příznaků je využita tabulka počítající míru separability příznaků.

V tabulce 5.4 jsou zobrazeny příznaky, které vykazují nejlepší míru separability. Ostatní příznaky jsou buď nulové, nebo mají velmi nízkou míru separability. Celou tabulku je možné si prohlédnout v příloze B.1 nebo ve vytvořeném nástroji.

Nejlepší výsledky vykazují příznaky počítané z oktávového spektra. Celkem jsou počítána oktávová spektra ze třech typů signálů. Pro tuto sadu se ukázala být vhodná zejména spektra z celého signálu a z kladné části signálu. Nejlepší výsledky vykazuje příznak *Band Freq 1/3*, popřípadě *Band Freq 1/24*. Pro kladnou část signálu vykazuje nejlepší výsledky příznak *Band Freq POS 1/12*, pro kvadrát signálu pak *Band Freq PWR 1/3*.



Obr. 5.8: Band Frequency POS 1/12

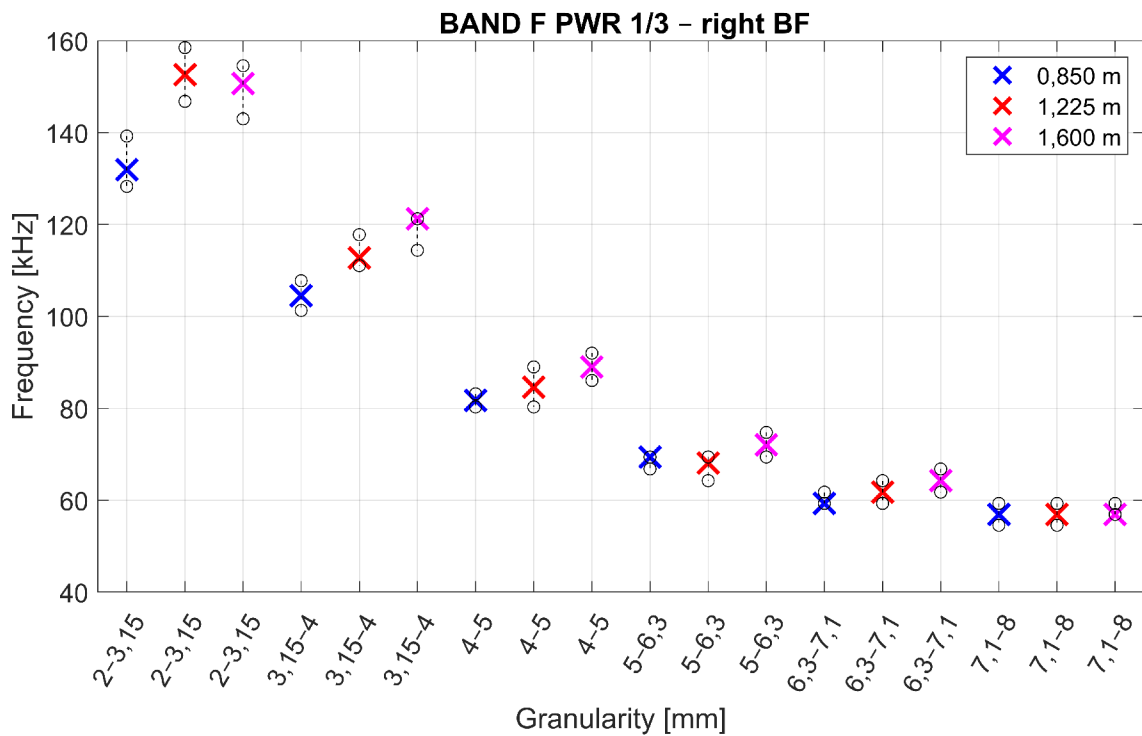
V následujícím textu budou zobrazeny a popsány vybrané vyhovující příznaky. Na obrázku 5.7 je zobrazen graf s příznakem *Band Freq 1/3* pro všechny tři výšky. V grafu je zobrazena pouze pravá frekvence pásma, která vykazuje určené výsledky. Na ose x se nachází jednotlivé frakce, na ose y pak amplituda příznaku. V grafu je možné vidět mediánové hodnoty a rozmezí 15% a 85% percentilu opakovaných měření (šedá čárkovaná čára). Z grafu lze pozorovat, že hodnota příznaku klesá se zvyšující se velikostí frakce. Se zvyšující se hodnotou frakce se snižuje vzdálenost mezi amplitudami příznaků, zároveň se však snižuje rozsah hodnot opakovaných

měření. Z grafu lze rovněž vyčíst, že u menších frakcí jsou velikosti amplitud rozdílné pro různé výšky, ovšem se zvětšující se frakcí je vliv výšky dopadu méně patrný.

Na obrázku 5.8 příznak *Band Freq POS 1/12*. Tento příznak vykazuje velmi podobné chování amplitud příznaku se zvyšující se frakcí. Ovšem frekvence jsou posunuty o řád výše, což je zapříčiněno oříznutím kladné části signálu. Na obrázku 5.9 je poté zobrazen graf příznaku *Band Freq PWR 1/3*. Tento příznak vykazuje rovněž podobné chování, řád frekvencí je stejný jako u příznaku z kladné části signálu.

Ostatní příznaky z tabulky 5.4 vykazují podobné výsledky, nebudou zde tedy uváděny, ale vybranou část je možné si je prohlédnout v příloze C.1.

U datové sady Flow single thick se všechny příznaky z tabulky 5.4 ukázaly být jako velmi vhodné pro určování velikosti frakce vzhledem k použitým parametrům měření. Nejlepší výsledky však vykazují *Band Freq 1/3* nebo *Band Freq 1/24*.



Obr. 5.9: Band Freq PWR 1/3

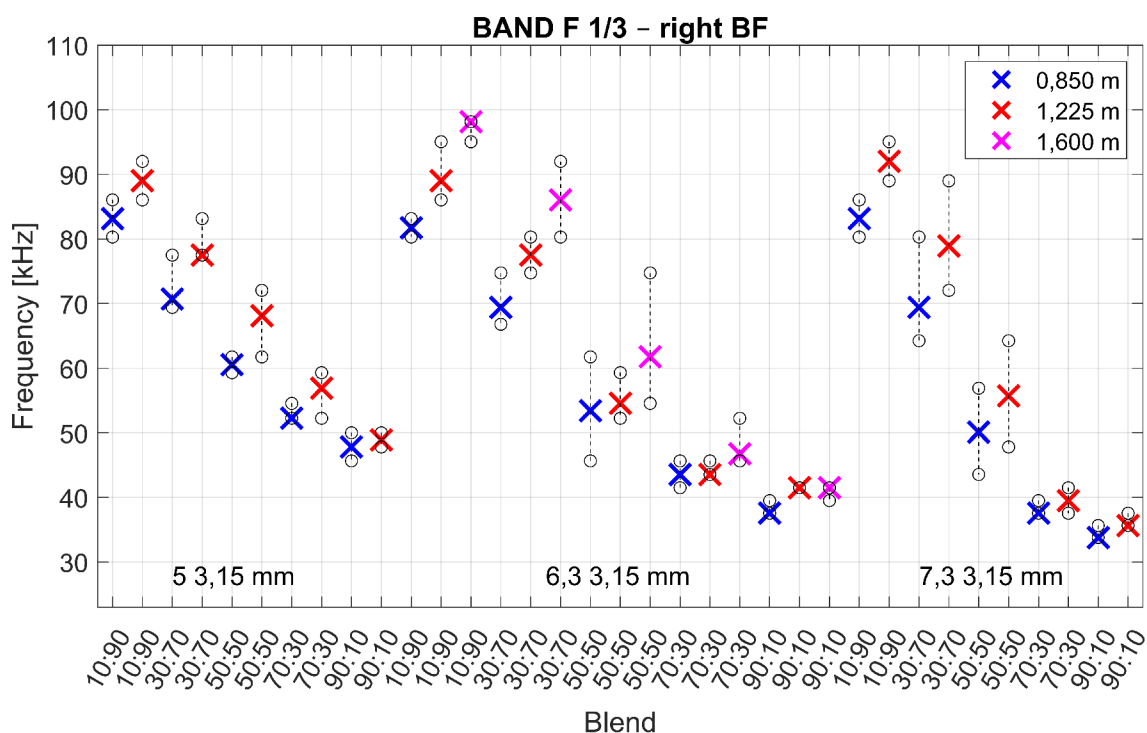
5.6 Flow Double Thick Aura 003

Tato datová sada se zaměřuje na dopad směsí dvou různých velikostí částic v pěti různých poměrech (10:90, 30:70, 50:50, 70:30, 90:10). Celkem jsou použity 3 různé druhy směsí (5 a 3,15; 6,3 a 3,15; 7,1 a 3,15 mm). Následná analýza je zaměřena na použití různých poměrů.

Tab. 5.5: Vybrané příznaky pro sadu FLOW DOUBLE THICK

	5 a 3,15 mm		7,1 a 3,15 mm		6,3 a 3,15 mm		
	0,850 m	1,225 m	0,850 m	1,225 m	0,850 m	1,225 m	1,600 m
Bandwidth OCV 1/3	88 %	77 %	71 %	96 %	72 %	68 %	53 %
Bandwidth OCV 1/24	77 %	64 %	63 %	62 %	76 %	50 %	64 %
Band Freq 1/3	91 %	80 %	73 %	100 %	76 %	75 %	63 %
Band Freq 1/24	77 %	64 %	63 %	63 %	76 %	65 %	65 %

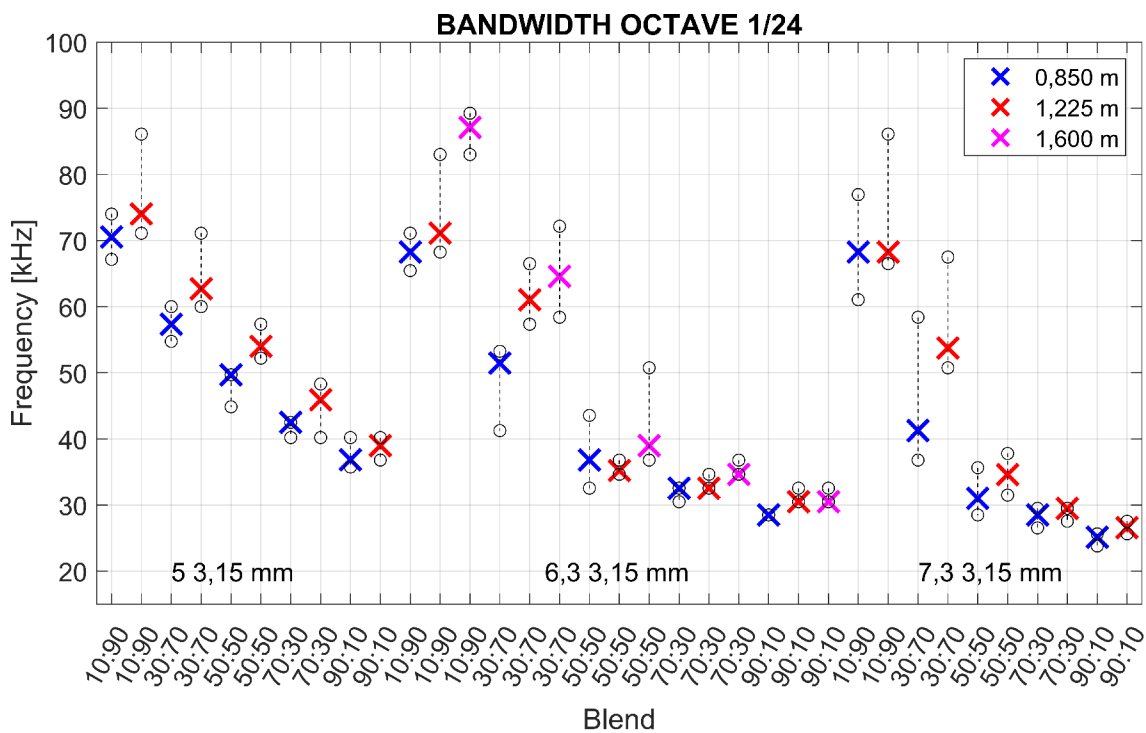
V tabulce 5.5 je zobrazena míra separability příznaků, které vykazují nejlepší výsledky. Pro tuto datovou sadu vychází nejlepší výsledky pro příznaky vypočítané z oktávového spektra z celého signálu. Dále vychází dobré hodnoty i pro některé příznaky z kladné části signálu, u nich se však vždy vyskytuje minimálně jedna 0. Celou tabulku je možné si prohlédnout v příloze B.2.



Obr. 5.10: Band Freq 1/3, pro všechny směsi

Na obrázcích 5.10 a 5.11 jsou zobrazeny příznaky *Band Freq 1/3* a *Bandwidth 1/24*

pro všechny tři směsi a výšky. Z grafu je patrné, že výška dopadu má vliv na velikost amplitudy u menších frakcí, u větších frakcí je výška dopadu méně patrná. Z grafů lze pozorovat, že amplitudy příznaků klesají se zvyšujícím se poměrem větší frakce. U směsi 7,1 a 3,15 mm lze pozorovat největší překrytí percentilů.



Obr. 5.11: Bandwidth 1/24, pro všechny směsi

Z tabulky 5.5 je patrné, že míra separability je oproti datové sadě *Flow Single Thick* o něco nižší. Takové výsledky jsou zapříčiněny velkým rozdílem velikosti frakcí ve směsi. Tyto směsi byly pravděpodobně vytvořeny z toho důvodu, aby mohlo být analyzováno, jestli lze detekovat, zda se jedná o směs, nebo jednotlivé frakce, popřípadě v jakém rozsahu lze očekávat, že se frakce nachází v definovaných mezích.

Tab. 5.6: Porovnání amplitud příznaku Band Freq 1/3 pro výšku 0,850 m pro směs 5 a 3,15 mm se sadou FLOW SINGLE THICK

Frakce [mm]	Frekvence [Hz]	Poměry	Frekvence [Hz]
2–3,15	$8,2 \times 10^4$	10:90	$8,4 \times 10^4$
3,15–4	$6,3 \times 10^4$	30:70	7×10^4
4–5	$4,7 \times 10^4$	50:50	6×10^4
5–6,3	$3,8 \times 10^4$	70:30	$5,2 \times 10^4$
6,3–7,1	$3,4 \times 10^4$	90:10	$4,8 \times 10^4$

V tabulce 5.6 je uvedeno porovnání amplitud stejného příznaku s datovou sadou *Flow Single Thick*. V tabulce jsou uvedeny frekvence pravého pásma pro jednotlivé rozsahy frakcí a pro poměry směsi 3,15 a 5 mm. Z hodnot je patrné, že frekvence poměrů se rozprostřely do oblastí frekvencí, které odpovídají velikosti frakcí 3,15 až 5 mm z *Flow single thick*. Ostatní směsi vykazují stejné chování.

Takové zjištění značí uspokojivý výsledek z toho hlediska, že při použití směsi různých frakcí odpovídá amplituda příznaku průměrné frakci ve směsi. K detekci přítomnosti směsi dvou odlišných frakcí však mediánová frekvence není vhodná.

Větší potenciál pro detekci takové směsi mají percentilové hodnoty, zejména jejich rozsah. Z grafů je patrné, že rozsah percentilových hodnot je mnohem větší než u datové sady *Flow single thick*. Předpokladem je, že čím větší rozsah frakce ve směsi, tím větší rozsah percentilů. Z obou grafů lze pozorovat, že rozsah percentilových hodnot je závislý na poměru frakcí, tedy čím větší zastoupení větší frakce, tím je rozsah menší. Zároveň je však pozorovatelný zvětšující se rozsah se zvětšující se velikostí frakce ve směsi. Neplatí to však u všech velikostí, například pro větší frakce není poměr směsí podle percentilových hodnot rozpoznatelný.

Grafy ostatních příznaků z tabulky vykazují podobné výsledky a je možné si je prohlédnout v příloze C.2.

I v případě, že na vlnovod dopadá směs ze dvou různých frakcí, jsou příznaky z tabulky dostatečně separabilní vzhledem k poměrům frakcí. Pro detekci takovéto směsi má zároveň potenciál sledovat rozsah percentilů.

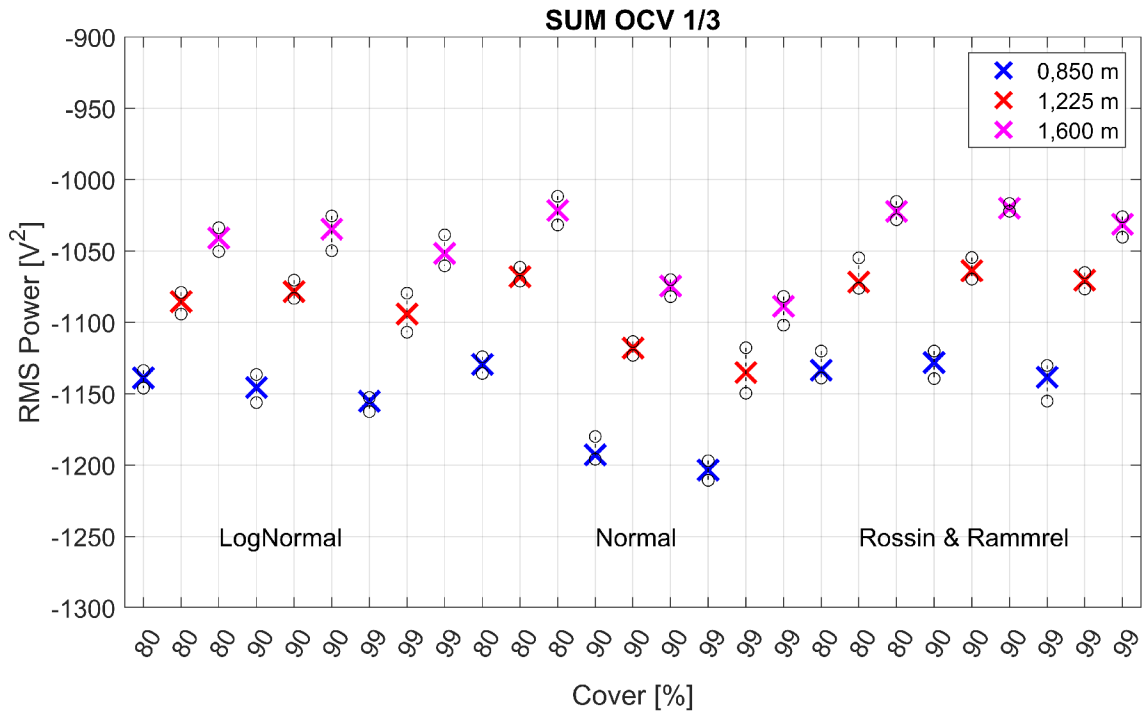
5.7 Flow Multi Thick Aura003

Tato datová sada se zaměřuje na dopad směsi frakcí o různých rozloženích (normální, logaritmované normální a Rossin & Rammrel) s různým pokrytím (80, 90, 99 %) a třemi různými výškami (0,850 m, 1,225 m, 1,600 m). Pokrytí popisuje, jaká část směsi je tvořena danými frakcemi, zbylá část je pak mimo interval vymezených frakcí.

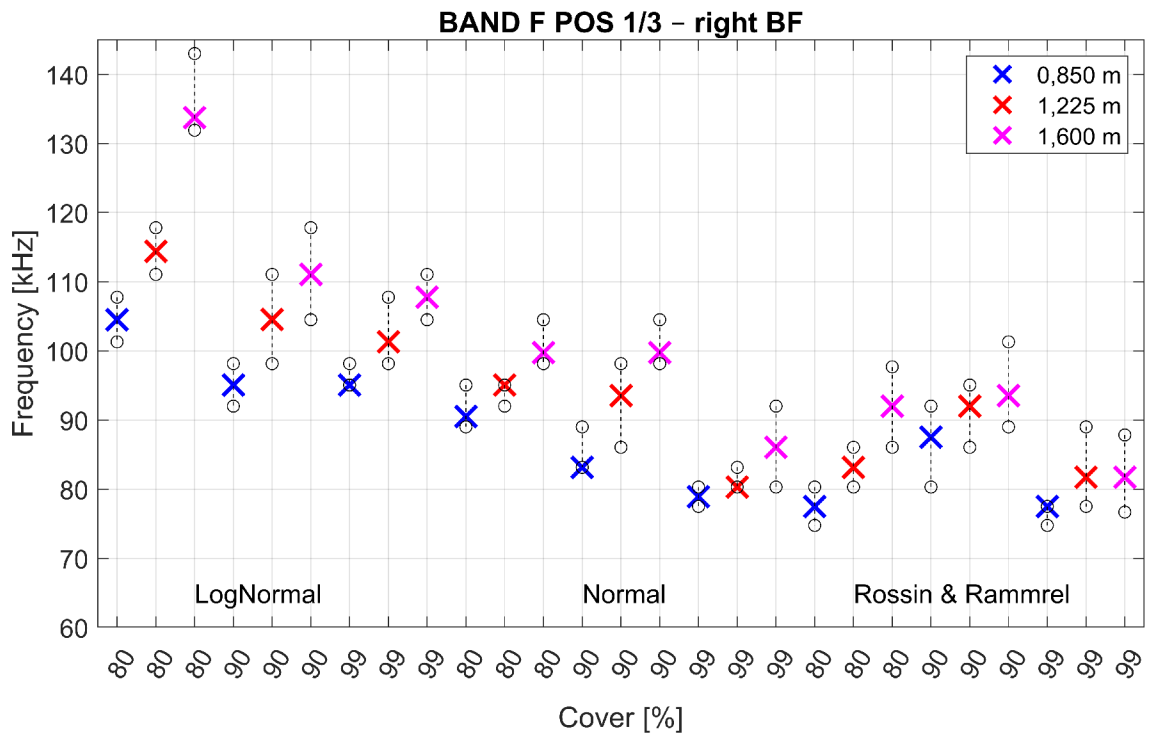
Při zkoumání vlivu pokrytí rozložení pomocí tabulky bylo zjištěno, že při různých procentech pokrytí vykazují příznaky jen velmi malou míru separability. Nejlépe vyšel příznak *Sum OCV 1/3*. Celou tabulku je možné si prohlédnout v příloze B.3. Při následném zkoumání grafů příznaků bylo zjištěno, že hodnoty amplitud příznaků se liší jen velmi málo pro různá pokrytí. V grafu na obrázku 5.12 je zobrazen příznak *Sum OCV 1/3*. U normálního rozložení lze vidět snižující se amplitudu se zvyšujícím se pokrytím. U ostatních rozložení se však hodnoty amplitud příznaků příliš neliší.

Je zřejmé, že je snaha držet frakce ve směsi v určitém pásmu velikostí. Pro tuto datovou sadu by bylo možná vhodnější, kdyby dané rozložení měnilo pásmo frakcí, z kterého je směs vytvořena. Například směs, která je tvořena frakcemi 2–5 mm, pak další 4–7,1 mm a poté 5–8,1 mm. Z takovýchto dat by bylo možné zkoumat hodnoty

příznaků v závislosti na rozsahu frakcí, které směs tvoří. Hodnoty příznaků by pak mohly být dále porovnávány i s příznaky získanými z jednotlivých frakcí.



Obr. 5.12: Sum OCV 1/3, pro všechna rozložení



Obr. 5.13: Band Freq POS 1/3, pro všechna rozložení

Dále byl zkoumán vliv různých rozložení. Z tabulky v příloze B.4 je patrné, že při pokrytí rozložení 80 % vykazuje hned několik příznaků dobrou separabilitu. Pro ostatní pokrytí však výsledky ukazují převážně nulovou separabilitu. Příklad příznaku *Band Freq POS 1/3* je zobrazen v grafu na obrázku 5.13.

Z grafu je patrné, že při pokrytí 80 % jsou hodnoty amplitud dostatečně separabilní pro odlišení různých rozložení.

U této datové sady lze tedy výsledně konstatovat, že nelze dobře rozlišit různá pokrytí, kde byly přijatelné výsledky pouze u normálního rozložení. Dále nelze dobře rozlišit ani různá rozložení, zde vyšel dobrý výsledek pouze u pokrytí 80 %. Jak již bylo zmíněno, analýza rozložení by mohla pokračovat vytvořením směsí, které by byly poskládány z různých rozsahů frakcí.

5.8 Flow Single Aura 004

Tato datová sada se zaměřuje na dopad jednotlivých částic. Celkem jsou použity tři frakce (3,15–4; 5–6,3; 7,1–8 mm), tři výšky (0,850; 1,225 a 1,600 m) a dále nastavení thicker a thinner, což popisuje frekvenci klepací násypky (12 a 8 Hz).

U této datové sady vychází míra separability příznaků výborná pro velmi mnoho příznaků. Takto dobré výsledky jsou zapříčiněny tím, že jsou použity pouze tři velikosti frakce, které na sebe nenavazují, a amplitudy příznaků jsou tedy od sebe dostatečně vzdáleny. Dobré výsledky ukazují příznaky jak z oktávového spektra, tak i z časové oblasti. Tabulku měř separabilit si lze prohlédnout v příloze B.5. Nebudou zde uváděny žádné grafy, jelikož pozbývá smysl zkoumat tuto datovou sadu z hlediska velikosti frakcí. Následující datová sada je však měřena s použitím stejných parametrů, s tím rozdílem, že je použito více frakcí.

5.9 Flow Single Fraction

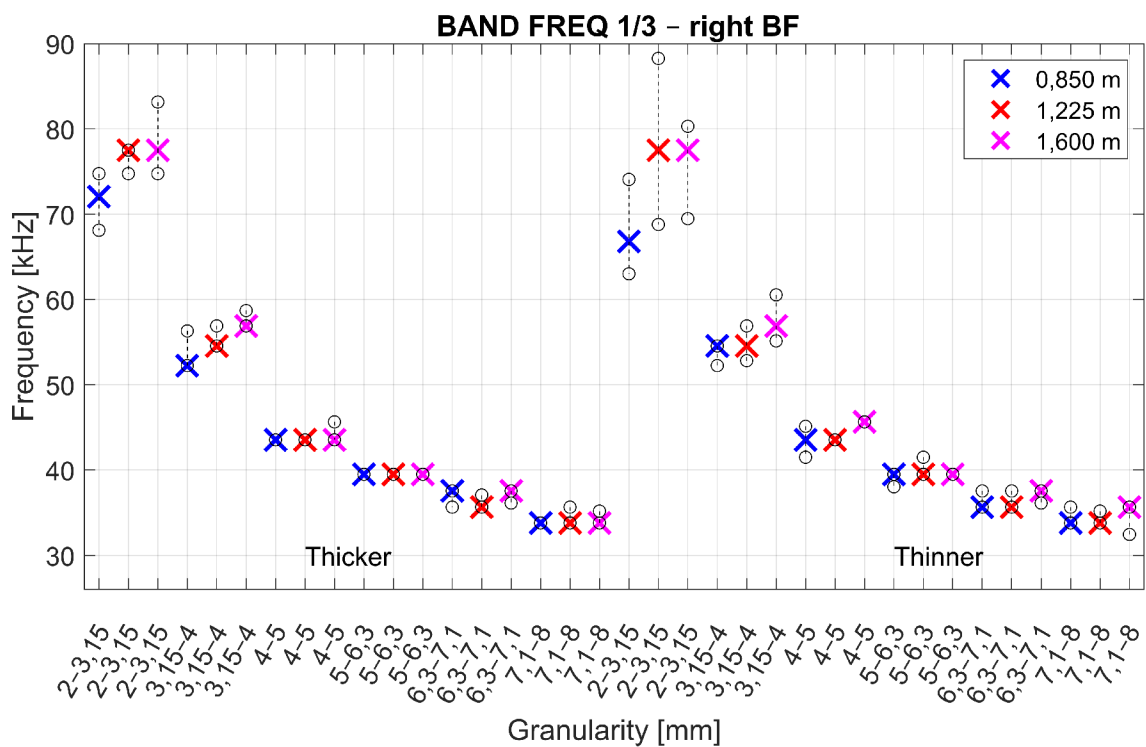
Tato datová sada se zaměřuje na dopad jednotlivých částic. Je použito celkem šest frakcí (2–3,15; 3,15–4; 4–5; 5–6,3; 6,3–7,1 a 7,1–8 mm), tři výšky (0,850; 1,225 a 1,600 m) a dále nastavení thicker (12 Hz) a thinner (8 Hz), popisující frekvenci klepací násypky.

Jelikož je tato datová sada měřena s použitím klepací násypky a v signálu je možné pozorovat i jednotlivé dopady, byl signál zkoumán třemi způsoby. Nejdříve byl zkoumán celý signál bez extrakce signálů AE, poté celý signál s extrakcí signálů AE a nakonec jednotlivé úseky, tedy extrahované signály.

Tab. 5.7: Vybrané příznaky pro sadu FLOW SINGLE FRACTION pro neextrahovaný signál

	0,850 m		1,225 m		1,600 m	
	Thicker	Thinner	Thicker	Thinner	Thicker	Thinner
Bandwidth 1/24	79 %	53 %	100 %	81 %	100 %	92 %
Band Freq 1/3	100 %	76 %	83 %	94 %	94 %	93 %
Band Freq 1/6	100 %	73 %	83 %	96 %	100 %	90 %
Band Freq 1/24	94 %	58 %	98 %	81 %	100 %	92 %
Band Freq POS 1/3	94 %	38 %	81 %	74 %	71 %	50 %

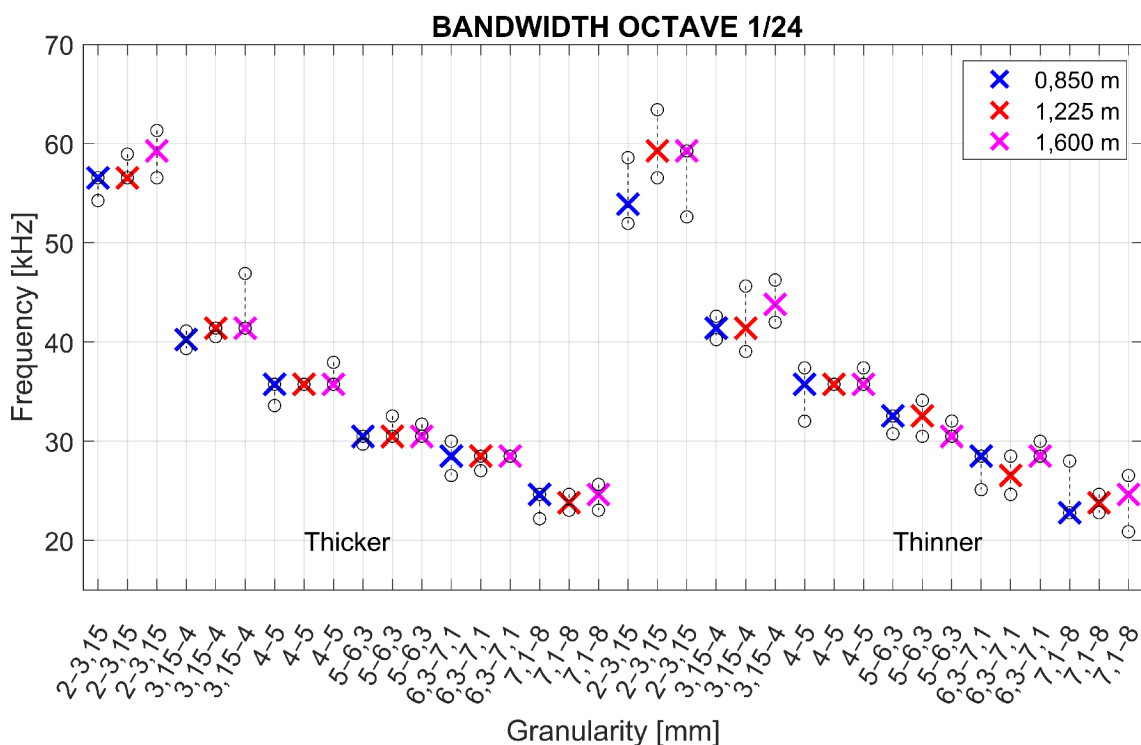
Pro neextrahovaný signál jsou výsledky uvedeny v tabulce 5.7. Nejpříjemnější výsledky vykazují příznaky popisující frekvenci pásma z oktávového spektra, tabulka 5.7. Celou tabulku je možné si prohlédnout v příloze B.6.



Obr. 5.14: Band Freq 1/3, neextrahovaný signál

V grafech na obrázcích 5.14 a 5.15 jsou zobrazeny příznaky *Band Freq 1/3* a *Bandwidth 1/24* pro neextrahovaný signál. Z obou grafů je patrné, že frekvence klesá se zvyšující se frakcí. Nastavení thicker vykazuje lepší výsledky, díky nižšímu

rozsahu percentilů. Příznak *Bandwidth 1/24* má o něco větší rozsah percentilů u vyšších frakcí, což je příčinou nižší separability příznaku. Zbylé příznaky vykazují podobné grafy příznaků a je možné si je prohlédnout v příloze C.3.

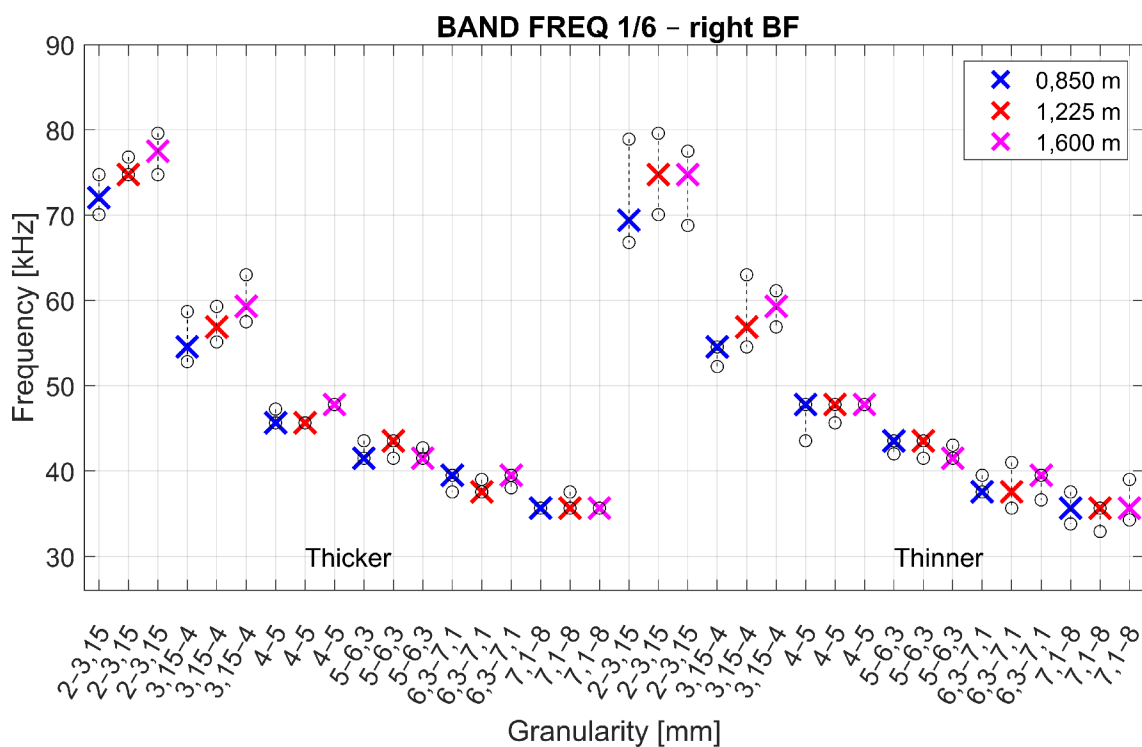


Obr. 5.15: Bandwidth 1/24, neextrahovaný signál

Tab. 5.8: Vybrané příznaky pro sadu FLOW SINGLE FRACTION pro extrahovaný signál

	0,850 m		1,225 m		1,600 m	
	Thicker	Thinner	Thicker	Thinner	Thicker	Thinner
Band Freq 1/3	83 %	69 %	83 %	41 %	100 %	73 %
Band Freq 1/6	100 %	71 %	82 %	73 %	100 %	54 %

Pro extrahovaný signál jsou přijatelné výsledky uvedeny v tabulce 5.8. Celou tabulku je možné si prohlédnout v příloze B.7. Při extrakci signálů AE dojde k odstranění prodlev mezi dopady částí. Na obrázku 5.16 je zobrazen příznak *Band Freq 1/6* pro nastavení thinner a thicker. Z grafu je patrné, že příznak se snižuje se zvětšující se frakcí. Nastavení thicker vykazuje mírně lepší výsledky, jelikož mají percentilové hodnoty menší rozsah. Příznak *Band Freq 1/3* je možné si prohlédnout v příloze C.4.



Obr. 5.16: Band freq 1/6, extrahovaný signál

Jelikož je možné v signálu při použití klepací násypky pozorovat i samostatné signály nebo úseky, bylo vyzkoušeno celý signál sledovat z hlediska jednotlivých dopadů. Každý signál se rozdělil na samostatné signály, ze kterých se počítaly příznaky. Tabulka separability však vyšla nulová pro všechny hodnoty a při zkoumání grafů nevykazovaly žádné příznaky přijatelné hodnoty.

Tab. 5.9: Porovnání amplitud příznaku Band Freq 1/3 0,850 m se sadou FLOW SINGLE THICK

Frakce [mm]	FST	Frekvence [Hz] FSF extracted	FSF unextracted
2–3,15	$8,2 \times 10^4$	$7,2 \times 10^4$	$7,2 \times 10^4$
3,15–4	$6,3 \times 10^4$	$5,2 \times 10^4$	$5,2 \times 10^4$
4–5	$4,7 \times 10^4$	$4,5 \times 10^4$	$4,4 \times 10^4$
5–6,3	$3,8 \times 10^4$	4×10^4	4×10^4
6,3–7,1	$3,4 \times 10^4$	$3,7 \times 10^4$	$3,9 \times 10^4$
7,1–8	$3,2 \times 10^4$	$3,4 \times 10^4$	$3,4 \times 10^4$

V tabulce 5.9 je zobrazeno porovnání amplitud příznaku *Band Freq 1/3* pro výšku 0,850 m, který vykazuje dobré výsledky pro všechny datové sady, které se za-

měřují na dopad jedné částice. Při porovnání s datovou sadou *Flow Single Thick (FST)* je příznak u datové sady *Flow Single Fraction (FSF)* rozložen do užší frekvenční oblasti. Při porovnání přijatelných příznaků extrahovaného a neextrahovaného signálu vyšlo, že výsledky jsou velmi podobné, ale pro neextrahovaný signál vykazuje více příznaků přijatelnou separabilitu. V této datové sadě je tedy výhodnější použít neextrahované signály. Z hlediska použití násypky je vhodnější použít magnetickou spoušť.

5.10 Shrnutí analýz

Pro analýzu bylo vybráno pět datových sad. Tři datové sady byly zaměřeny na dopad masy částic. Z toho *Flow single thick* se zaměřovala na dopad pomocí magnetické spouště, která zajišťuje dopad celé masy najednou. Dvě zbylé, *Flow Single Fraction* a *Flow Single Aura004*, byly zaměřeny na dopad masy s použitím klepací násypky, která zajišťuje jejich postupný dopad. A poslední sada *Flow Single AURA004*, která obsahuje pouze tři rozsahy frakcí, a z toho důvodu vyšla výsledná separabilita u většiny příznaků výborná.

U datové sady *Flow single thick* byly vyhodnoceny jako nejlepší příznaky *Band Freq 1/3* a *1/24*. Tyto příznaky vykazují vysokou separabilitu pro všechny tři použité výšky a grafy příznaků odpovídají těmto výsledkům. U datové sady *Flow Single Fraction* byly vyhodnoceny nejlepší příznaky pro neextrahovaný signál, a jsou to *Band Freq 1/3* a *1/6*. Z hodnot separabilit a grafů příznaků bylo vyhodnoceno, že příznaky u nastavení thicker (popisující frekvenci klepací násypky (12 Hz)) vykazují znatelně lepší výsledky. Při porovnání výsledků těchto dvou datových sad bylo vyhodnoceno, že pro analýzu dopadů jednotlivých částic je vhodnější použít magnetickou spoušť, jelikož hodnoty příznaků u *Flow Single Thick* jsou rozprostřeny do širší oblasti frekvencí než u *Flow Single Fraction*.

Další datová sada *Flow double thick* se zaměřovala na dopad směsí vytvořených ze dvou různých frakcí a v různých poměrech. Nejlepší výsledek vykazoval opět příznak *Band Freq 1/3*. Z výsledků bylo vyhodnoceno, že lze z amplitud příznaků určit poměr frakcí a také, že pro detekci směsi má potenciál sledovat rozsah percentilů, který je v porovnání s dopadem jednotlivých částic podstatně větší.

Poslední analyzovaná datová sad *Flow Multi Thick Aura004* se zaměřovala na dopad různých rozložení s různým pokrytím. U této datové sady vyšlo, že příznak *Sum OCV 1/3* je schopen rozlišit různá pokrytí, avšak pouze pro normální rozložení. Dále bylo vyhodnoceno, že mnoho příznaků je schopno rozlišit různá rozložení, ale pouze při pokrytí 80 %. Výsledně tedy bylo vyhodnoceno, že nelze dobře rozlišit různá pokrytí nebo rozložení. Analýza rozložení by však mohla pokračovat měřeními směsí, které by byly vytvořeny z různých rozsahů frakcí.

Závěr

Tato diplomová práce se zaměřovala na analýzu signálů akustických emisí pro granulometrii pevných částic. Pro analýzu bylo k dispozici 19 datových sad o velikosti 194 GB.

V teoretické části byly popsány používané metody pro granulometrii pevných částic s bližším zaměřením na akustickou emisi. Následně byly popsány metody a způsoby, kterými je možné signál akustické emise analyzovat.

V praktické části práce, kapitola 2, byly popsány dostupné datové sady. Všechny sady byly prozkoumány a následně byly jednotlivě popsány parametry, které souvisely s měřením signálu AE (velikost frakce, násypka, výška, vzorkovací frekvence, typ vlnovodu a snímače a další). U datové sady *Flow Multi Thick AURA004*, která se zaměřovala na dopad směsí s různým rozložením, bylo zjištěno, že u Rossin&Rammler jsou uvedeny chybné parametry rozložení. Nové správné parametry byly následně odvozeny z dostupných dat a grafů. Z informací, které byly získány z datových sad, byla vytvořena přehledová tabulka, která stručně a jasně popisuje všechna dostupná data. Tabulka je uvedena v příloze A.

Následně byl proveden experiment měření, který se zaměřoval na použití různých vlnodů. V kapitole 3 byly popsány použité komponenty, hardware a parametry měření. Ze změřených dat bylo následně zjištěno, že u dat s dopadem masy bylo použito velmi málo kuliček. To vedlo k velmi krátkému signálu s rozdílným charakterem, jelikož v některých případech lze pozorovat celistvý signál a v některých případech pouze jednotlivé dopady. Dopady jednotlivých částic jsou vhodné pro analýzu, je však nutné brát v úvahu, že při spouštění kuliček docházelo k mnohonásobným odrazům, což se následně projevuje na změřeném signálu.

Pro analýzu dat byl vytvořen komplexní pomocný nástroj v prostředí LabVIEW, který umožňuje zkoumat a analyzovat rozsáhlá data. V kapitole 4 byl podrobně popsán vytvořený program spolu s jednotlivými *Sub VI*. Tento nástroj je možné použít i pro další naměřené datové sady.

Z dostupných dat byla vybrána část, která se zaměřuje na dopad masy, jelikož se předpokládá, že se s takovými signály lze pravděpodobněji setkat v průmyslovém měření. Následně byly popsány příznaky, které jsou ze signálů počítány. Velká část příznaků je počítána z oktávového spektra s různými šířkami pásem, jelikož toto spektrum umožňuje vhodně zobrazovat širokou oblast frekvencí. Nicméně byly počítány i jiné další parametry. Následně byl vysvětlen výpočet tzv. míry separability, která slouží k selekci vhodných příznaků, jejichž výsledky je následně nutné potvrdit z grafů příznaků. Tato hodnota je udána v procentech.

V kapitole 5.10 jsou shrnuty provedené analýzy pěti vybraných datových sad. Ze sad *Flow Single Thick*, *Flow Single Fraction* a *Flow Single Aura004* se ukázala

být pro určení jednotlivých frakcí jako nejvhodnější sada *Flow Single Thick* (měřena s mg. spouští), u které vykazuje nejlepší výsledky příznak *Band Freq 1/3*.

V sadě *Flow Double Thick Aura003* se ukázal být pro vyhodnocení dominantní frakce ve směsi nejvhodnější příznak *Band Freq 1/3*. Pro detekci směsi se poté ukázalo být vhodné sledovat rozsah percentilových hodnot.

V sadě *Flow Multi Thick Aura003* nastal problém s určením rozložení i s určením pokrytí rozložení. Z grafů příznaků nebylo možné tyto parametry rozlišit. Nicméně analýza rozložení by dále mohla pokračovat vytvořením směsí s různými rozsahy frakcí.

Z analýzy signálů bylo potvrzeno, že lze určit velikost frakce ze signálů AE a jako nejlepší příznak pro určení velikosti se jeví *Band Freq 1/3*, tedy pravá frekvence pásma v oktávovém spektru počítaná z celého signálu.

Literatura

- [1] UHER, Miroslav a Petr BENES. Measurement of particle size distribution by the use of acoustic emission method. In: *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings* [online]. IEEE, 2012, 2012, s. 1194–1198 [cit. 2023-03-30]. ISBN 978-1-4577-1772-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2012.6229375>
- [2] NSUGBE, Ejay, Andrew STARR a Cristobal RUIZ CARCEL. Monitoring the particle size distribution of a powder mixing process with acoustic emissions: a review. *Engineering & Technology Reference* [online]. 2016, **1**(1) [cit. 2023-01-20]. ISSN 2056-4007. Dostupné z: <https://doi.org/10.1049/etr.2016.0139>
- [3] SHEKUNOV, Boris Y., Pratibhash CHATTOPADHYAY, Henry H. Y. TONG a Albert H. L. CHOW. Particle Size Analysis in Pharmaceutics: Principles, Methods and Applications. *Pharmaceutical Research* [online]. 2007, **24**(2), s. 204 [cit. 2023-01-20]. ISSN 0724-8741. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11095-006-9146-7>
- [4] GAO, Lingjun, Yong YAN, Robert M. CARTER, Peter LEE, Chuanlong XU a Duo SUN. On-line particle sizing of pneumatically conveyed biomass particles using piezoelectric sensors. *Fuel* [online]. 2013, **113**, s. 810–816 [cit. 2023-01-20]. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.029>
- [5] AL-THYABAT, S. a N.J. MILES. An improved estimation of size distribution from particle profile measurements. *Powder Technology* [online]. 2006, **166**(3), s. 152–160 [cit. 2023-01-20]. ISSN 0032-5910. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.05.008>
- [6] R. HEATH, Alex-, Phillip -D. FAWELL, Parisa- A. BAHRI a Jean- D. SWIFT. Estimating Average Particle Size by Focused Beam Reflectance Measurement (FBRM). *Particle & Particle Systems Characterization* [online]. WILEY-VCH, 2002, **19**(2), s. 84–95 [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1002/1521-4117\(200205\)19:2<84::AID-PPSC84>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1521-4117(200205)19:2<84::AID-PPSC84>3.0.CO;2-1)
- [7] SHANTHI, C., R. KINGSLEY PORPATHAM a N. PAPPA. Image Analysis for Particle Size Distribution. *International Journal of Engineering and Technology (IJET)* [online]. 2014, **6**(3), s. 1340–1345 [cit. 2023-01-20]. ISSN 0975-4024. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/287319918_Image_Analysis_for_Particle_Size_Distribution

- [8] SANDLER, Niklas. Photometric imaging in particle size measurement and surface visualization. *International Journal of Pharmaceutics* [online]. 2011, **417**(1–2), s. 227–234 [cit. 2023-01-20]. ISSN 0378-5173. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.11.007>
- [9] N.STANIFORTH, J. a S. M. QUINCE. Granulation monitoring in a planetary mixer using a probe vibration analysis technique. *International Journal of Pharmaceutics* [online]. 1986, **32**(2–3), s. 177–185 [cit. 2023-01-20]. ISSN 0378-5173. Dostupné z: doi: [https://doi.org/10.1016/0378-5173\(86\)90177-8](https://doi.org/10.1016/0378-5173(86)90177-8)
- [10] OHIKE, A., K. ASHIHARA a R. IBUKI. Granulation Monitoring by Fast Fourier Transform Technique. *Chem. Pharm. Bull.* [online]. 1999, **47**(12), s. 1734–1739 [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/cpb1958/47/12/47_12_1734/_pdf/-char/en
- [11] BRIENS, L., D. DANIHER a A. TALLEVI. Monitoring high-shear granulation using sound and vibration measurements. *International Journal of Pharmaceutics* [online]. 2007, **331**(1), s. 54–60 [cit. 2023-01-20]. ISSN 0378-5173. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2006.09.012>
- [12] THE JAPANESE SOCIETY FOR NON-DESTRUCTIVE INSPECTION. *Practical Acoustic Emission Testing*. Tokyo, Japan: Springer, 2016, 142 s. ISBN 978-4-431-55071-6.
- [13] *Acoustic emission testing: [basics for research - applications in civil engineering]*. Editor Christian Ulrich GROSSE, editor Masayasu OHTSU. Berlin: Springer, ©2008. ISBN 978-3-540-69895-1.
- [14] CAI, M., P.K. KAISER, H. MORIOKA, M. MINAMI, T. MAEJIMA, Y. TASAOKA a H. KUROSE. FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* [online]. 2007, **44**(4), s. 550–564 [cit. 2023-01-11]. ISSN 1365-1609. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.09.013>
- [15] IOWA STATE UNIVERSITY CENTER FOR NONDESTRUCTIVE EVALUATION (CNDE). Physics: Sound. *Iowa State University Center for Nondestructive Evaluation (CNDE)* [online]. Ames, Iowa [cit. 2023-01-14]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/Physics/Sound/index.xhtml>
- [16] IOWA STATE UNIVERSITY CENTER FOR NONDESTRUCTIVE EVALUATION (CNDE). Physics: Waves. *Iowa State University Center for Nondestructive Evaluation (CNDE)* [online]. Ames, Iowa [cit. 2023-01-14]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/Physics/Waves/index.xhtml>

- [17] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [18] PECORARI, Claudio. Characterizing Particle Flow by Acoustic Emission. *Journal of Nondestructive Evaluation* [online]. 2013, **32**(1), s. 104–111 [cit. 2023-02-03]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10921-012-0163-7>
- [19] TSUJIMOTO, Hiroyuki, Toyokazu YOKOYAMA, C.C HUANG a Isao SEKI-GUCHI. Monitoring particle fluidization in a fluidized bed granulator with an acoustic emission sensor. *Powder Technology* [online]. 2000, **113**(1–2), s. 88–96 [cit. 2023-02-03]. ISSN 0032-5910. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00205-9)
- [20] BASTARI, Alessandro, Cristina CRISTALLI, Roberto MORLACCHI a Eraldo POMPONI. Acoustic emissions for particle sizing of powders through signal processing techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2011, **25**(3), s. 901–916 [cit. 2023-02-03]. ISSN 0888-3270. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.08.019>
- [21] BRANDT, Anders. *Noise and vibration analysis: signal analysis and experimental procedures*. Chichester: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-74644-8.
- [22] YU, A.B. a N. STANDISH. A Study of Particle Size Distribution. *Powder Technology* [online]. 1990, **62**(2), s. 101–118 [cit. 2023-03-06]. ISSN 0032-5910. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(90\)80073-8](https://doi.org/10.1016/0032-5910(90)80073-8)
- [23] DASGUPTA, Anirban. Normal Distribution. In: DASGUPTA, Anirban. *Fundamentals of Probability: A First Course* [online]. New York, NY: Springer New York, 2010, 2010-03-17, s. 195–212 [cit. 2023-03-06]. Springer Texts in Statistics. ISBN 978-1-4419-5779-5. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5780-1_9
- [24] CROW, Edwin L. a Kunio SHIMIZU, ed. *Lognormal Distributions* [online]. Routledge, 2018 [cit. 2023-03-30]. ISBN 9780203748664. Dostupné z: [doi:10.1201/9780203748664](https://doi.org/10.1201/9780203748664)
- [25] ALDERLIESTEN, Maarten. Mean Particle Diameters. Part VII. The Rosin-Rammler Size Distribution:: Physical and Mathematical Properties and Relationships to Moment-Ratio Defined Mean Particle Diameters. *Particle & Particle Systems Characterization* [online]. John Wiley & Sons, 2013, **30**(3), s. 244–257 [cit. 2023-03-06]. ISSN 1521-4117. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ppsc.201200021>

- [26] MACIAS-GARCIA, A, Eduardo M CUERDA-CORREA a M.A DIAZ-DIEZ. Application of the Rosin—Rammler and Gates—Gaudin—Schuhmann models to the particle size distribution analysis of agglomerated cork. *Materials Characterization* [online]. 2004, **52**(2), s. 159–164 [cit. 2023-03-30]. ISSN 10445803. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2004.04.007>
- [27] KEPRT, J. *Primární kalibrace snímačů akustické emise*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 171 s. Vedoucí dizertační práce Ing. Petr Beneš, PhD.
- [28] UT-1000 Sensor: Wideband Sensor. In: *Physical Acoustic* [online]. MISTRAS Group, © 2011 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: https://www.physicalacoustics.com/content/literature/sensors/Model_UT-1000.pdf
- [29] Ultrasonic Transducers: WEDGES, CABLES, TEST BLOCKS. In: *Olympus: Your Vision, Our Future* [online]. USA: Olympus NDT, © 2010 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/panametrics-UT.en.pdf>
- [30] AE Measurement System DAKEL-ZEDO©. *Dakel* [online]. Rpety, © 2006–2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: https://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/dev/zedo_en

Seznam příloh

A	Přehledová tabulka dostupných dat	100
B	Tabulky míry separability	103
B.1	Flow Single Thick	103
B.2	Flow Double Thick Aura003	104
B.3	Flow Multi Thick Aura003 – poměry	106
B.4	Flow Multi Thick Aura003 – rozložení	108
B.5	Flow Single Aura004	110
B.6	Flow Single Fraction – neextrahované signály	112
B.7	Flow Single Fraction – extrahované signály	114
C	Grafy příznaků	116
C.1	Flow single thick	116
C.2	Flow double thick	117
C.3	Flow Single Fraction – neextrahované signály	118
C.4	Flow Single Fraction – extrahované signály	120
D	Obsah elektronické přílohy	121

A Přehledová tabulka dostupných dat

Tabulka popisuje souhrn informací o datových sadách. Žlutě jsou vyznačeny buňky, u kterých se daná datová sada zaměřuje na konkrétní parametr.

	POPIS	ČÁSTICE/MASA	POČET ZÁZ. / VELIKOST	FRAKCE [mm]	VÝŠKA [m]	VLNOVOD	NÁSYPKA	SNÍMAČ	ROZSAH AD / ZESILOVAČ	FVZ [ks/s]	DATA K DISPOZICI
AURA_VLNOVODY	různé druhy vlnovodů	ČÁSTICE	151 / 33,6 GB	3,15 - 4 5 - 6,3 7,1 - 8	0,85 1,225 1,6	Čtverec 20x1mm - rovnoběžné Kulatina 20x1mm snímač - radiálně, axiálně Šipka 20x1,2,3mm	Klepací násyпка 12V 10Hz	AURA SV416	2 Vpp, bez ZES (některé s)	500	Foto Data Detekované částice v obraze (rychlost, úhel)
DIGITIZER_5922		NIC	2 / 17.8 MB	-	-	-	-	-	10 Vpp 2 Vpp	-	Data Obrázky černé
FLOW_DOUBLE _THICK_AURA003	dopad směsi ze dvou různých druhů částic	MASA	350 / 15,2 GB	<u>Směs:</u> 5 a 3,15 6,3 a 3,15 7,1 a 3,15 <u>Poměry:</u> (1:9, 9:1, 3:7, 7:3, 1:1)	0,85 1,225 1,6	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	Gravitační zásobník s magnetickou spouští	AURA SV416 003	2 Vpp, bez ZES	500	Foto Data Hmotnosti směsi v excelu
FLOW_MULTI _THICK_AURA003	dopad směsi s různým rozložením a frakcemi	MASA	270 / 11,8 GB	<u>Směsi se třemi rozloženými:</u> Normal, LogNorm, Ros Ramm <u>S různým pokrytím:</u> 80, 90, 99 % <u>S různými frakcemi:</u> 2-3,15; 3,15-4; 4-5; 5-6,3; 6,3-7,1; 7,1-8	0,85 1,225 1,6	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	Gravitační zásobník s magnetickou spouští	AURA SV416 003	-	-	Foto Data Obrázky s rozloženými Excel s informacemi o rozložení
FLOW_SINGLE _AURA004	různá frekvence klepací násyanky	MASA	90 / 19,8 GB	3,15-4 5-6,3 7,1-8	0,85 1,225 1,6	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	Klepací násyпка Thicker: 12/16 Hz 14/12 V Thinner: 8/12 Hz 14/12 V	AURA SV416 004	2 Vpp, bez ZES	500	Foto Data
FLOW_SINGLE _FRACTION	různá frekvence klepací násyanky	MASA	180 / 39,5 GB	2-3,15 3,15-4 4-5 5-6,3 6,3-7,1 7,1-8	0,85 1,225 1,6	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	Klepací násyпка Thicker: 12/16 Hz 14/12 V Thinner: 8/12 Hz 14/12 V	AURA SV416	2 Vpp, bez ZES	500	Foto Data

	POPIS	ČÁSTICE/MASA	POČET ZÁZ. / VELIKOST	FRAKCE [mm]	VÝŠKA [m]	VLNOVOD	NÁSYPKA	SNÍMAČ	ROZSAH AD / ZESILOVAČ	FVZ [ks/s]	DATA K DISPOZICI
FLOW_SINGLE_THICK	dopad masy s použitím mag. spouště	MASA	180 / 7,98 GB	2-3,15 3,15-4 4-5 5-6,3 6,3-7,1 7,1-8	0,85 1,225 1,6	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	Gravitační zásobník s magnetickou spouští	AURA SV416 003	2 Vpp, bez ZES	500	Foto Data
IZOL_NASYP	izolované upevnění násypky	Frakce v násypce	52 / 5,67 GB	4-5	1,1	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	Mg. násyp. - bez/včetně žlab Klep. násyp. - 12/14 V, 5/10/15 Hz, bez/s žlabem	-	2 Vpp, bez ZES	500	Foto Některé Foto černé Data
KLEPACI_NASYPKA_RUSENI	vliv klepací násypky	Frakce v násypce	4 / 447 MB	4-5	1,1	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	Klepací násypka - VYP, ZAP Záslepka na konci žlabu	-	2 Vpp, bez ZES	500	Foto Data
MAG_NASYP	magnetická násypka: Bez částic Bez částic se záslepkou ve žlabu Včetně částic se záslepkou ve žlabu	bez/s frací v násypce	6 / 670 MB	bez/ 4-5	1,1	-	Magnetická: úroveň 5,5 bez a s záslepkou	-	2 Vpp, bez ZES	500	Foto černé Data
MERENI_CASTIC_AURA	snímač Aura	ČÁSTICE	146 / 32 GB	2-3,15 3,15-4 4-5 5-6,3 6,3-7,1 7,1-8	0,85 0,975 1,1 1,225 1,35 1,475 1,6 1,75	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	Klepací násypka 12 V, 10 Hz ve žlabu vodící Al lišta	AURA SV416	2 Vpp, bez ZES	500	Foto Data
MERENI_CATSIC_OLYMPUS	snímač Olympus	ČÁSTICE	24 / 5,14 GB	3,15 - 4 5 - 6,3 7,1 - 8	0,85 1,225 1,6	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	Klepací násypka 12V 10 Hz ve žlabu Al lišta	OLYMPUS V103	2 Vpp, bez ZES	500	Foto Data
MERENI_CASTIC_PA	snímač PA	ČÁSTICE	23 / 4,92 GB	3,15 - 4 5 - 6,3 7,1 - 8	0,85 1,225 1,6	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	Klepací násypka 12 V, 10 Hz ve žlabu vodící Al lišta	Physical acustic UT1000	2 Vpp, bez ZES	500	Foto Data

	POPIS	ČÁSTICE/MASA	POČET ZÁZ. / VELIKOST	FRAKCE [mm]	VÝŠKA [m]	VLNOVOD	NÁSYPKA	SNÍMAČ	ROZSAH AD / ZESILOVAČ	FVZ [ks/s]	DATA K DISPOZICI
MERENI _RYCHLOST	měření rychlosti	ČÁSTICE	16 / 33,9 MB	3,15 - 4 4-5 7,1 -8	0,7 0,85 1,1 1,35 1,6	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	-	-	-	-	Data Bez Foto Excel s rychlostmi
MERENI _VLIVU_FVZ	měření vlivu vzorkovací frekvence	ČÁSTICE	50 / 1,34 GB	4-5	1,1	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	-	-	2 Vpp, bez ZES	125 250 500 1000 2000	Data Foto Excel s rychlostmi
MERENI _VLIVU_ZES	měření vlivu zes	ČÁSTICE	80 / 3,6 GB	2-3,15 4 - 5	0,85 1,1	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	-	-	2 Vpp, bez ZES 10 Vpp, s ZES	500	Data Foto Excel s rychlostmi
TEST_FLOW	různá frekvence klepací náspěvky	MASA	15 / 3,27 GB	3,15-4	0,975	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	Klepací násepka 12 V, frekvence 8,10,12 Hz	AURA SV416	2 Vpp, bez ZES	500	Foto Data
VLIV_NASYPKAI	bez opěrek, bez kuliček bez opěrek, včetně kuliček včetně kuliček, včetně opěrek	bez/s frací v násypce	40 / 4,36 GB	bez/ 4-5	1,1	Čtverec 20x1 mm - kosočtverec	Klepací násepka 12 V, 10 Hz ve žlabu vodící Al lišta	-	2 Vpp, bez ZES	500	Foto Data
VLIV_NASYPKY	bez ZES/s ZES VIBR ON/OFF	Frakce v násypce	40 / 4,37 GB	4-5	1,1	-	Klepací násepka 12 V, 10 Hz ve žlabu vodící Al lišta	-	2 Vpp, bez ZES	500	Data Foto černé power spectrum obrázek, hanning.esp

B Tabulky míry separability

V tabulkách jsou uvedeny hodnoty míry separability, která je určována v procentech. Tyto hodnoty slouží pro selekci vhodných příznaků a jejich výpočet je popsán v kapitole 5.4.

B.1 Flow Single Thick

	0,850 m	1,225 m	1,600 m		0,850 m	1,225 m	1,600 m
Mean	0	0	0	Sum OCV POS 1/12	0	0	0
RMS	0	0	0	Amplitude OCV POS 1/12	0	0	0
Median	0	0	0	Peak Freq OCV pos 1/12	0	0	0
Variance	0	0	0	Bandwidth OCV POS 1/12	100	68	91
Skewness	0	0	0	Sum OCV POS 1/24	0	0	0
Kurtois	0	0	0	Amplitude OCV POS 1/24	0	0	0
Energy	0	0	0	Peak F OCV POS 1/24	0	0	0
Mean PWR	0	0	0	Bandwidth OCV POS 1/24	57	0	82
RMS PWR	0	0	0	Sum OCV PWR 1/3	0	0	0
Energy FFT	0	0	0	Amplitude OCV PWR 1/3	0	0	0
RMS FFT	0	0	0	Peak Freq OCV PWR 1/3	0	0	0
Peak FFT	0	0	0	Bandwidth OCV PWR 1/3	0	45	76
Sum OCV 1/3	0	0	0	Sum OCV PWR 1/6	0	0	0
Amplitude OCV 1/3	0	0	0	Amplitude OCV PWR 1/6	0	0	0
Peak Freq OCV 1/3	0	69	0	Peak Freq OCV PWR 1/6	0	0	0
Bandwidth OCV 1/3	83	96	99	Bandwidth OCV PWR 1/6	0	21	0
Sum OCV 1/6	0	0	0	Sum OCV PWR 1/12	0	0	0
Amplitude OCV 1/6	0	0	0	Amplitude OCV PWR 1/12	0	0	0
Peak Freq OCV 1/6	0	0	0	Peak Freq OCV PWR 1/12	0	0	0
Bandwidth OCV 1/6	59	0	96	Bandwidth OCV PWR 1/12	0	0	0
Sum OCV 1/12	0	0	0	Sum OCV PWR 1/24	0	0	0
Amplitude OCV 1/12	0	0	0	Amplitude OCV PWR 1/24	0	0	0
Peak Freq OCV 1/12	0	0	0	Peak Freq OCV PWR 1/24	0	0	0
Bandwidth OCV 1/12	47	0	0	Bandwidth OCV PWR 1/24	58	0	0
Sum OCV 1/24	0	0	0	Band Freq 1/3	100	100	96
Amplitude OCV 1/24	0	0	0	Band Freq 1/6	83	83	100
Peak Freq OCV 1/24	0	0	0	Band Freq 1/12	54	0	0
Bandwidth OCV 1/24	97	80	99	Band Freq 1/24	96	100	100
Sum OCV POS 1/3	0	0	0	Band Freq POS 1/3	81	83	0
Amplitude OCV POS 1/3	0	0	0	Band Freq POS 1/6	0	0	0
Peak Freq OCV POS 1/3	0	0	0	Band Freq POS 1/12	96	96	100
Bandwidth OCV POS 1/3	94	81	17	Band Freq POS 1/24	83	82	98
Sum OCV POS 1/6	0	0	0	Band Freq PWR 1/3	83	71	93
Amplitude OCV POS 1/6	0	0	0	Band Freq PWR 1/6	83	55	98
Peak Freq OCV POS 1/6	0	0	0	Band Freq PWR 1/12	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/6	0	0	0	Band Freq PWR 1/24	99	55	82

Obr. B.1: Tabulka datové sady Flow Single Thick, část 1/1

B.2 Flow Double Thick Aura003

	5_3,15 0,850 m	5_3,15 1,225 m	6,3_3,15 0,850 m	6,3_3,15 1,225 m	6,3_3,15 1,600 m	7,1_3,15 0,850 m	7,1_3,15 1,225 m
Mean	0	0	0	0	0	0	16
RMS	0	0	0	0	0	0	3
Median	0	0	0	0	0	0	0
Variance	0	0	0	0	0	0	13
Skewness	0	0	0	0	0	0	0
Kurtois	0	0	0	0	0	0	0
Energy	0	0	0	0	0	0	0
Mean PWR	0	0	0	0	0	0	13
RMS PWR	0	0	0	0	0	0	0
Energy FFT	0	0	0	0	0	36	48
RMS FFT	0	0	0	0	0	0	0
Peak FFT	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV 1/3	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV 1/3	65	37	70	62	0	66	65
Peak Freq OCV 1/3	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/3	88	77	71	96	72	68	53
Sum OCV 1/6	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV 1/6	0	25	0	46	0	0	49
Peak Freq OCV 1/6	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/6	76	25	0	0	0	0	0
Sum OCV 1/12	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV 1/12	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/12	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/12	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV 1/24	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV 1/24	21	46	0	55	56	0	68
Peak Freq OCV 1/24	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/24	77	64	63	62	76	50	64
Sum OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0	30
Peak Freq OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0

Obr. B.2: Tabulka datové sady Flow Double Thick, část 1/2

	5_3,15 0,850 m	5_3,15 1,225 m	6,3_3,15 0,850 m	6,3_3,15 1,225 m	6,3_3,15 1,600 m	7,1_3,15 0,850 m	7,1_3,15 1,225 m
Sum OCV POS 1/12	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/12	0	45	0	32	0	0	14
Peak Freq OCV pos 1/12	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/12	69	40	48	81	76	46	0
Sum OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/24	0	0	0	21	0	0	0
Peak F OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/24	45	50	42	65	81	3	0
Sum OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/3	0	0	0	20	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/3	0	0	20	25	34	8	0
Sum OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/6	54	0	19	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/24	0	0	0	0	4	0	0
Amplitude OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq 1/3	91	80	73	100	76	75	63
Band Freq 1/6	83	3	44	0	0	0	0
Band Freq 1/12	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq 1/24	77	64	63	63	76	65	65
Band Freq POS 1/3	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq POS 1/12	73	35	60	88	86	56	0
Band Freq POS 1/24	57	60	53	74	87	33	0
Band Freq PWR 1/3	27	40	21	48	50	52	0
Band Freq PWR 1/6	60	0	40	0	0	0	0
Band Freq PWR 1/12	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0

Obr. B.3: Tabulka datové sady Flow Double Thick, část 2/2

B.3 Flow Multi Thick Aura003 – poměry

	LogNormal			Normal			Rossin & Rammrel		
	0,850 m	1,225 m	1,600 m	0,850 m	1,225 m	1,600 m	0,850 m	1,225 m	1,600 m
Mean	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RMS	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Median	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variance	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Skewness	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kurtosis	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Energy	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mean PWR	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RMS PWR	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Energy FFT	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RMS FFT	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak FFT	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV 1/3	0	0	0	75	51	66	0	0	0
Amplitude OCV 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/3	0	0	28	0	0	23	0	0	0
Sum OCV 1/6	0	0	0	47	24	37	0	0	0
Amplitude OCV 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/6	0	0	88	0	60	56	0	0	0
Sum OCV 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV 1/24	0	0	0	58	53	89	0	0	0
Amplitude OCV 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/3	0	0	0	62	0	0	0	0	0
Sum OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. B.4: Tabulka datové sady Flow Multi Thick pro různá pokrytí, část 1/2

	LogNormal			Normal			Rossin & Rammrel		
	0,850 m	1,225 m	1,600 m	0,850 m	1,225 m	1,600 m	0,850 m	1,225 m	1,600 m
Sum OCV POS 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV pos 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak F OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/6	0	0	0	7	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Bandwidth OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq 1/6	0	0	0	0	60	64	0	0	0
Band Freq 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq POS 1/3	0	0	0	67	0	0	0	0	0
Band Freq POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq POS 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq POS 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq PWR 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq PWR 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq PWR 1/12	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Band Freq PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. B.5: Tabulka datové sady Flow Multi Thick pro různá pokrytí, část 2/2

B.4 Flow Multi Thick Aura003 – rozložení

	LogNormal			Normal			Rossin & Rammrel		
	0,850 m	1,225 m	1,600 m	0,850 m	1,225 m	1,600 m	0,850 m	1,225 m	1,600 m
Mean	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RMS	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Median	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variance	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Skewness	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kurtosis	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Energy	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mean PWR	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RMS PWR	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Energy FFT	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RMS FFT	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak FFT	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV 1/3	0	0	0	75	51	66	0	0	0
Amplitude OCV 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/3	0	0	28	0	0	23	0	0	0
Sum OCV 1/6	0	0	0	47	24	37	0	0	0
Amplitude OCV 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/6	0	0	88	0	60	56	0	0	0
Sum OCV 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV 1/24	0	0	0	58	53	89	0	0	0
Amplitude OCV 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/3	0	0	0	62	0	0	0	0	0
Sum OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. B.6: Tabulka datové sady Flow Multi Thick pro různá rozložení, část 1/2

	LogNormal			Normal			Rossin & Rammrel		
	0,850 m	1,225 m	1,600 m	0,850 m	1,225 m	1,600 m	0,850 m	1,225 m	1,600 m
Sum OCV POS 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV pos 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak F OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/6	0	0	0	7	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Bandwidth OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq 1/6	0	0	0	0	60	64	0	0	0
Band Freq 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq POS 1/3	0	0	0	67	0	0	0	0	0
Band Freq POS 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq POS 1/12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq POS 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq PWR 1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq PWR 1/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Band Freq PWR 1/12	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Band Freq PWR 1/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. B.7: Tabulka datové sady Flow Multi Thick pro různá rozložení, část 2/2

B.5 Flow Single Aura004

	0,850 m		1,225 m		1,600 m	
	THICKER	THINNER	THICKER	THINNER	THICKER	THINNER
Mean	93	61	99	96	100	92
RMS	98	65	100	99	100	96
Median	27	60	0	49	0	88
Variance	97	65	100	99	100	96
Skewness	0	0	0	0	0	0
Kurtois	100	68	99	97	100	93
Energy	83	0	61	0	69	0
Mean PWR	97	65	100	99	100	96
RMS PWR	100	68	100	98	100	95
Energy FFT	83	58	91	99	100	100
RMS FFT	82	95	99	96	100	96
Peak FFT	12	0	0	0	0	0
Sum OCV 1/3	100	89	100	100	100	100
Amplitude OCV 1/3	100	58	100	96	100	100
Peak Freq OCV 1/3	100	100	100	86	100	100
Bandwidth OCV 1/3	100	100	100	100	100	100
Sum OCV 1/6	100	94	100	100	100	100
Amplitude OCV 1/6	100	56	100	92	100	100
Peak Freq OCV 1/6	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/6	100	100	100	92	100	100
Sum OCV 1/12	100	86	100	94	100	100
Amplitude OCV 1/12	100	83	100	100	100	100
Peak Freq OCV 1/12	0	0	86	0	86	0
Bandwidth OCV 1/12	100	100	100	79	100	100
Sum OCV 1/24	100	91	97	100	100	100
Amplitude OCV 1/24	98	67	93	100	100	74
Peak Freq OCV 1/24	0	86	67	67	0	67
Bandwidth OCV 1/24	100	92	100	100	100	100
Sum OCV POS 1/3	100	72	100	94	100	98
Amplitude OCV POS 1/3	100	58	100	89	100	95
Peak Freq OCV POS 1/3	100	93	100	86	100	67
Bandwidth OCV POS 1/3	100	100	100	99	100	98
Sum OCV POS 1/6	100	80	100	73	100	100
Amplitude OCV POS 1/6	100	85	100	80	100	90
Peak Freq OCV POS 1/6	100	62	100	68	100	100
Bandwidth OCV POS 1/6	100	85	100	79	100	98

Obr. B.8: Tabulka datové sady Flow Single Aura004, část 1/2

	0,850 m		1,225 m		1,600 m	
	THICKER	THINNER	THICKER	THINNER	THICKER	THINNER
Sum OCV POS 1/12	100	70	97	100	100	96
Amplitude OCV POS 1/12	98	66	88	100	100	59
Peak Freq OCV pos 1/12	100	47	100	66	100	95
Bandwidth OCV POS 1/12	100	56	100	100	100	83
Sum OCV POS 1/24	100	62	82	100	100	93
Amplitude OCV POS 1/24	100	55	88	94	100	91
Peak F OCV POS 1/24	76	0	44	71	74	0
Bandwidth OCV POS 1/24	96	88	100	93	100	55
Sum OCV PWR 1/3	100	66	100	95	100	97
Amplitude OCV PWR 1/3	100	65	100	91	100	100
Peak Freq OCV PWR 1/3	0	64	0	0	67	0
Bandwidth OCV PWR 1/3	100	89	100	68	97	98
Sum OCV PWR 1/6	100	71	100	95	100	97
Amplitude OCV PWR 1/6	100	77	100	95	100	100
Peak Freq OCV PWR 1/6	0	66	40	0	67	86
Bandwidth OCV PWR 1/6	100	95	100	80	100	85
Sum OCV PWR 1/12	100	89	100	100	100	96
Amplitude OCV PWR 1/12	100	88	100	100	100	99
Peak Freq OCV PWR 1/12	0	74	0	0	86	100
Bandwidth OCV PWR 1/12	100	89	100	81	85	92
Sum OCV PWR 1/24	100	72	99	100	100	93
Amplitude OCV PWR 1/24	100	70	100	93	100	85
Peak Freq OCV PWR 1/24	0	12	67	0	67	62
Bandwidth OCV PWR 1/24	87	53	81	0	100	81
Band Freq 1/3	100	100	100	100	100	100
Band Freq 1/6	100	100	100	92	100	100
Band Freq 1/12	100	100	100	84	100	100
Band Freq 1/24	100	94	100	100	100	100
Band Freq POS 1/3	100	100	100	95	100	100
Band Freq POS 1/6	100	100	100	84	100	100
Band Freq POS 1/12	100	68	100	100	100	100
Band Freq POS 1/24	100	99	100	95	100	56
Band Freq PWR 1/3	100	96	100	83	100	98
Band Freq PWR 1/6	100	98	100	79	100	88
Band Freq PWR 1/12	100	100	100	90	92	93
Band Freq PWR 1/24	100	90	95	0	100	72

Obr. B.9: Tabulka datové sady Flow Single Aura004, část 2/2

B.6 Flow Single Fraction – neextrahované signály

	0,850 m		1,225 m		1,600 m	
	THICKER	THINNER	THICKER	THINNER	THICKER	THINNER
Mean	0	0	0	0	0	0
RMS	0	0	0	0	0	0
Median	0	0	0	0	0	0
Variance	0	0	0	0	0	0
Skewness	0	0	0	0	0	0
Kurtosis	0	0	0	0	0	0
Energy	0	0	0	0	0	0
Mean PWR	0	0	0	0	0	0
RMS PWR	0	0	0	0	0	0
Energy FFT	0	0	0	0	0	0
RMS FFT	0	0	0	0	0	0
Peak FFT	0	0	0	0	0	0
Sum OCV 1/3	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV 1/3	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/3	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/3	95	0	24	50	83	73
Sum OCV 1/6	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV 1/6	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/6	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/6	96	0	0	77	100	89
Sum OCV 1/12	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV 1/12	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/12	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/12	73	53	96	77	67	0
Sum OCV 1/24	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV 1/24	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/24	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/24	79	53	100	81	100	92
Sum OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0
Sum OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0

Obr. B.10: Tabulka datové sady Flow Single Fraction pro neextrahované signály, část 1/2

	0,850 m		1,225 m		1,600 m	
	THICKER	THINNER	THICKER	THINNER	THICKER	THINNER
Sum OCV POS 1/12	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/12	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV pos 1/12	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/12	0	0	0	0	0	0
Sum OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0
Peak F OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0
Band Freq 1/3	100	76	83	94	94	93
Band Freq 1/6	100	73	83	96	100	90
Band Freq 1/12	89	64	96	94	83	0
Band Freq 1/24	94	58	98	81	100	92
Band Freq POS 1/3	94	38	81	74	71	50
Band Freq POS 1/6	94	0	69	0	98	84
Band Freq POS 1/12	93	0	71	0	98	89
Band Freq POS 1/24	0	0	0	0	0	57
Band Freq PWR 1/3	93	0	64	0	73	67
Band Freq PWR 1/6	91	0	77	0	73	0
Band Freq PWR 1/12	79	0	39	0	59	0
Band Freq PWR 1/24	0	0	0	0	0	0

Obr. B.11: Tabulka datové sady Flow Single Fraction pro neextrahované signály, část 2/2

B.7 Flow Single Fraction – extrahované signály

	0,850 m		1,225 m		1,600 m	
	THICKER	THINNER	THICKER	THINNER	THICKER	THINNER
Mean	67	0	0	0	0	0
RMS	72	0	0	0	0	0
Median	0	0	0	0	0	0
Variance	72	0	0	0	0	0
Skewness	55	0	0	0	0	0
Kurtosis	73	0	0	40	0	0
Energy	0	0	0	0	0	0
Mean PWR	72	0	0	0	0	0
RMS PWR	73	0	0	16	0	0
Energy FFT	62	0	0	0	0	0
RMS FFT	0	0	0	29	0	0
Peak FFT	0	0	0	0	0	0
Sum OCV 1/3	97	94	55	47	92	0
Amplitude OCV 1/3	65	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/3	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/3	80	45	16	23	98	60
Sum OCV 1/6	97	89	51	53	84	22
Amplitude OCV 1/6	64	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/6	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/6	86	4	0	59	100	49
Sum OCV 1/12	94	75	0	0	44	0
Amplitude OCV 1/12	73	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV 1/12	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/12	56	0	100	0	57	0
Sum OCV 1/24	0	83	9	37	0	42
Amplitude OCV 1/24	0	0	25	0	0	0
Peak Freq OCV 1/24	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV 1/24	0	0	90	57	77	0
Sum OCV POS 1/3	73	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/3	47	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/3	0	0	0	0	0	0
Sum OCV POS 1/6	74	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/6	45	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/6	0	0	0	0	0	0

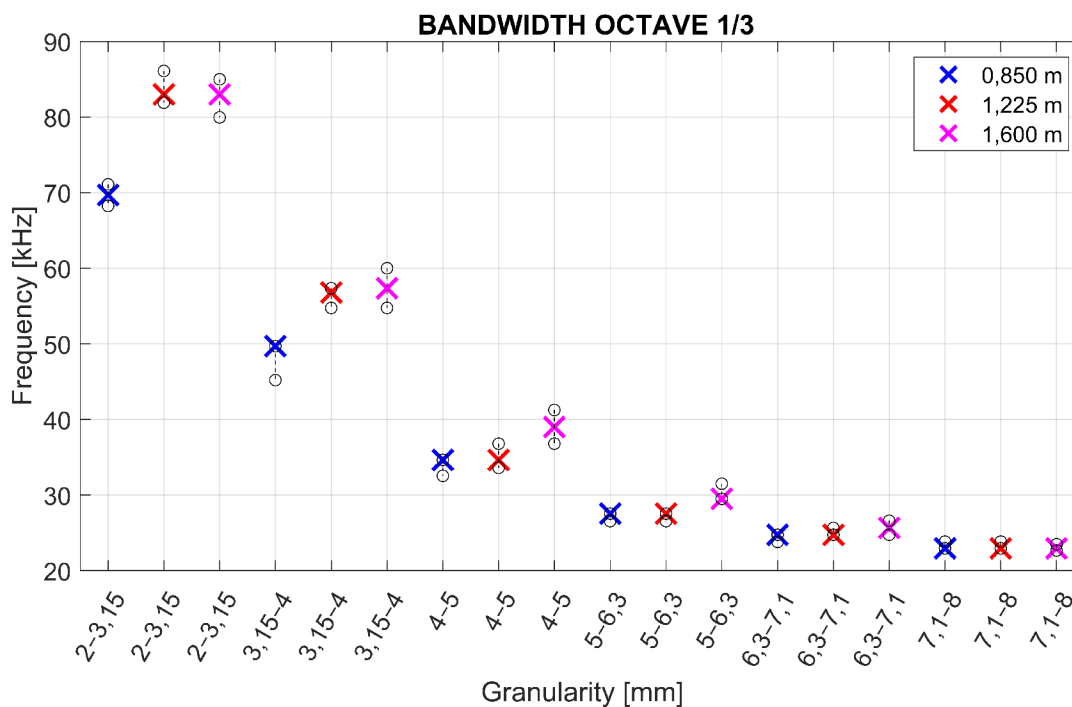
Obr. B.12: Tabulka datové sady Flow Single Fraction pro extrahované signály, část 1/2

	0,850 m		1,225 m		1,600 m	
	THICKER	THINNER	THICKER	THINNER	THICKER	THINNER
Sum OCV POS 1/12	2	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/12	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV pos 1/12	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/12	0	0	0	0	0	0
Sum OCV POS 1/24	79	0	0	0	0	0
Amplitude OCV POS 1/24	41	0	0	0	0	0
Peak F OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV POS 1/24	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/3	73	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/3	68	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/3	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/6	73	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/6	67	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/6	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/12	73	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/12	63	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/12	0	0	0	0	0	0
Sum OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0
Amplitude OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0
Peak Freq OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0
Bandwidth OCV PWR 1/24	0	0	0	0	0	0
Band Freq 1/3	83	69	83	41	100	73
Band Freq 1/6	100	71	82	73	100	54
Band Freq 1/12	63	6	100	0	94	0
Band Freq 1/24	0	0	92	65	77	0
Band Freq POS 1/3	60	34	81	0	83	82
Band Freq POS 1/6	0	0	60	0	96	0
Band Freq POS 1/12	58	30	0	0	71	0
Band Freq POS 1/24	0	0	33	45	0	0
Band Freq PWR 1/3	88	0	64	39	57	66
Band Freq PWR 1/6	51	0	39	0	65	0
Band Freq PWR 1/12	0	0	36	0	70	0
Band Freq PWR 1/24	0	0	0	0	0	0

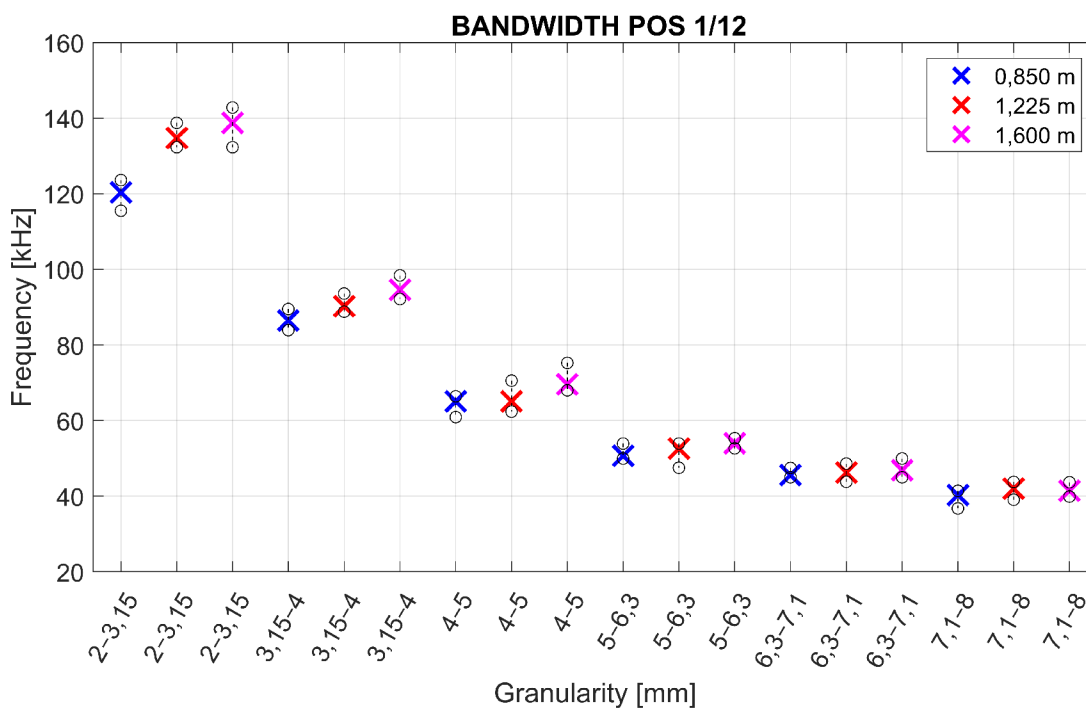
Obr. B.13: Tabulka datové sady Flow Single Fraction pro extrahované signály, část 2/2

C Grafy příznaků

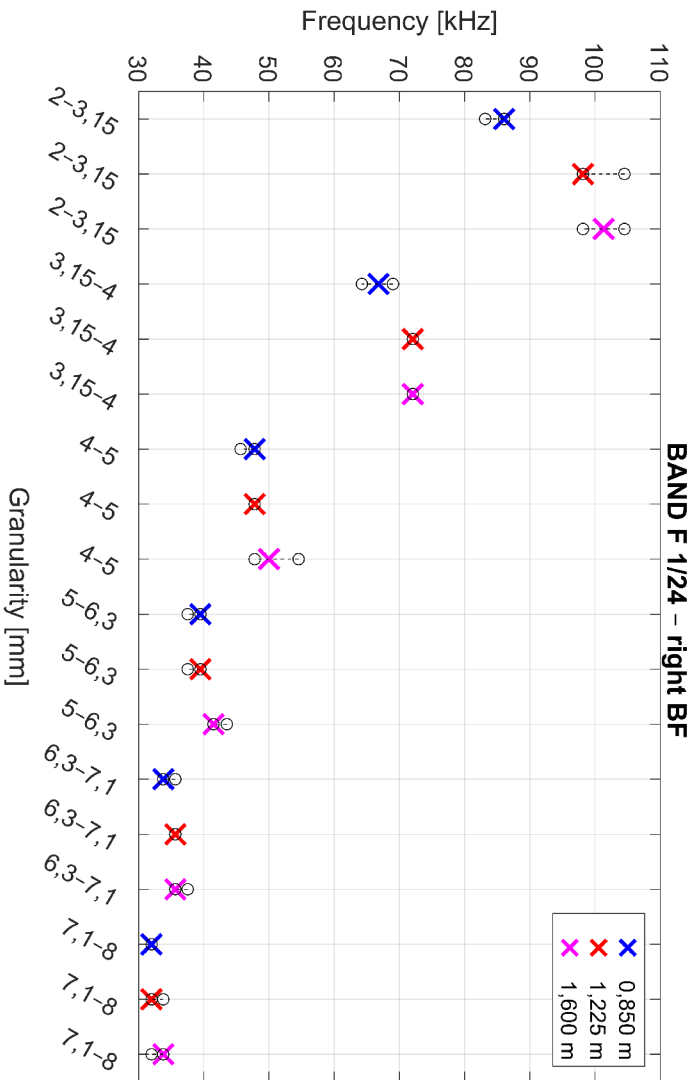
C.1 Flow single thick



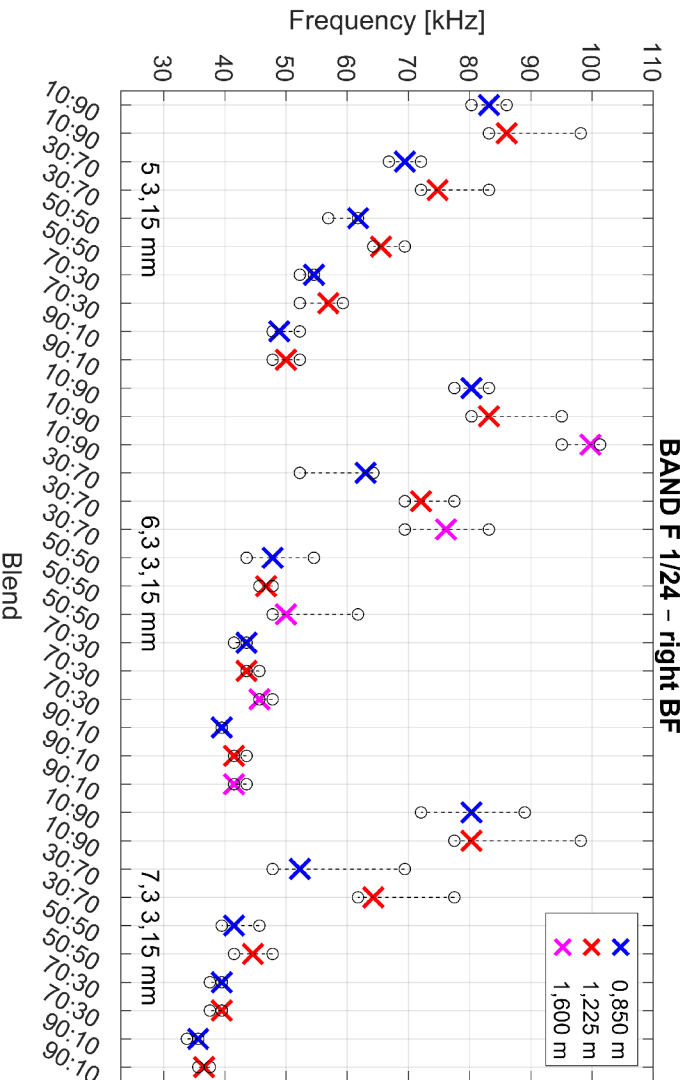
Obr. C.1: Bandwidth OCV 1/3

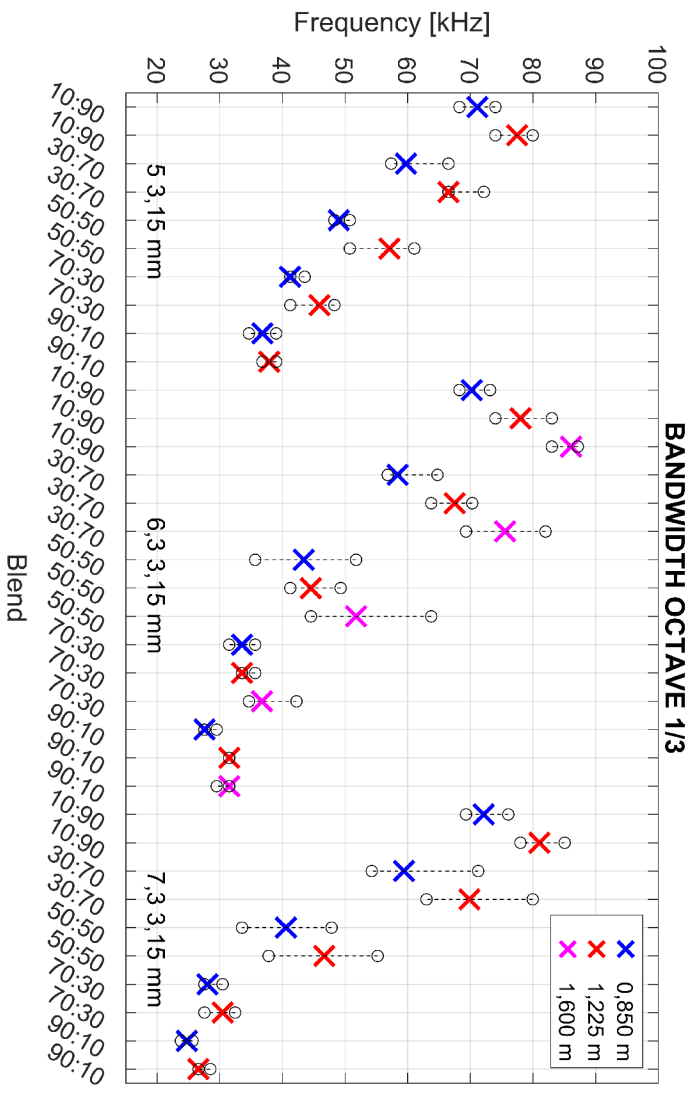


Obr. C.2: Bandwidth POS 1/12

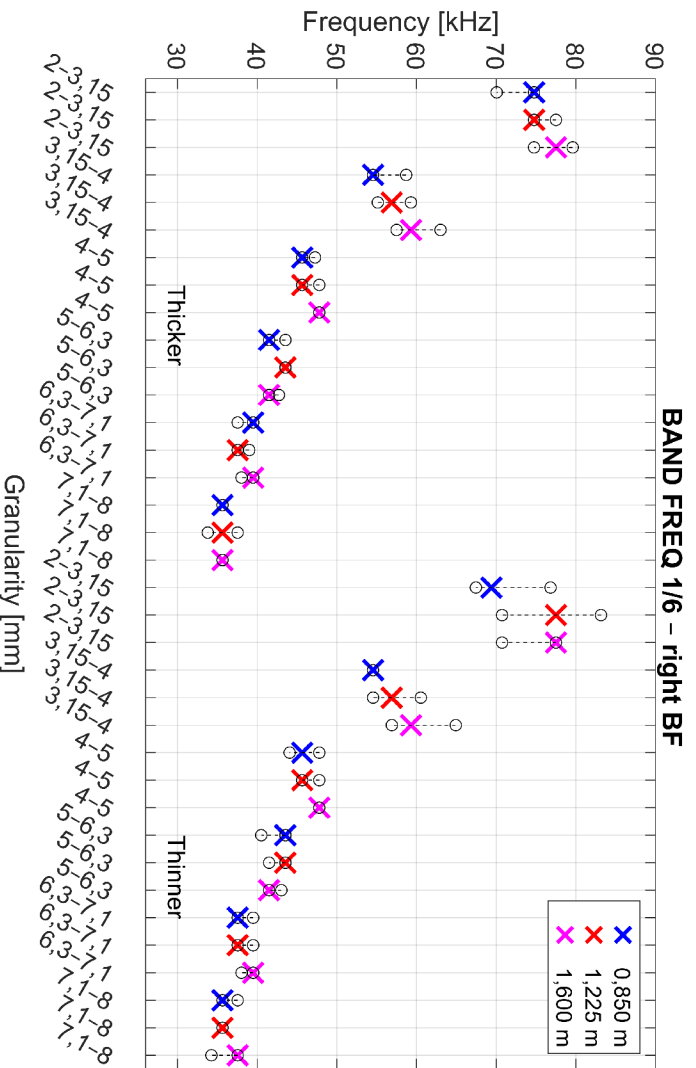


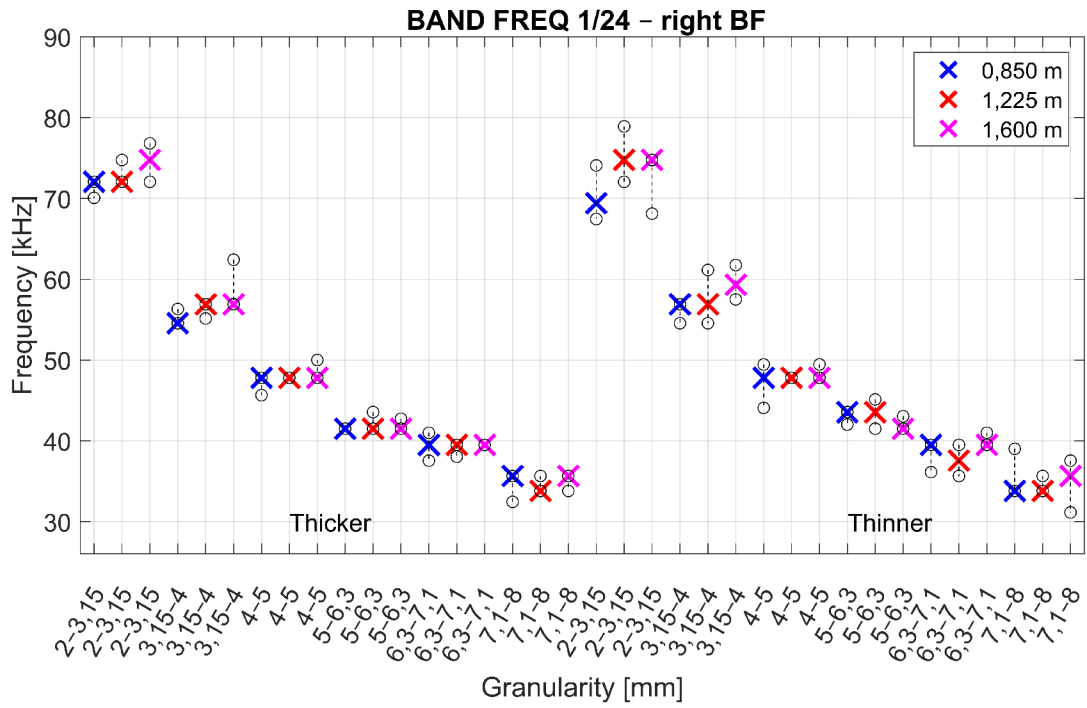
C.2 Flow double thick



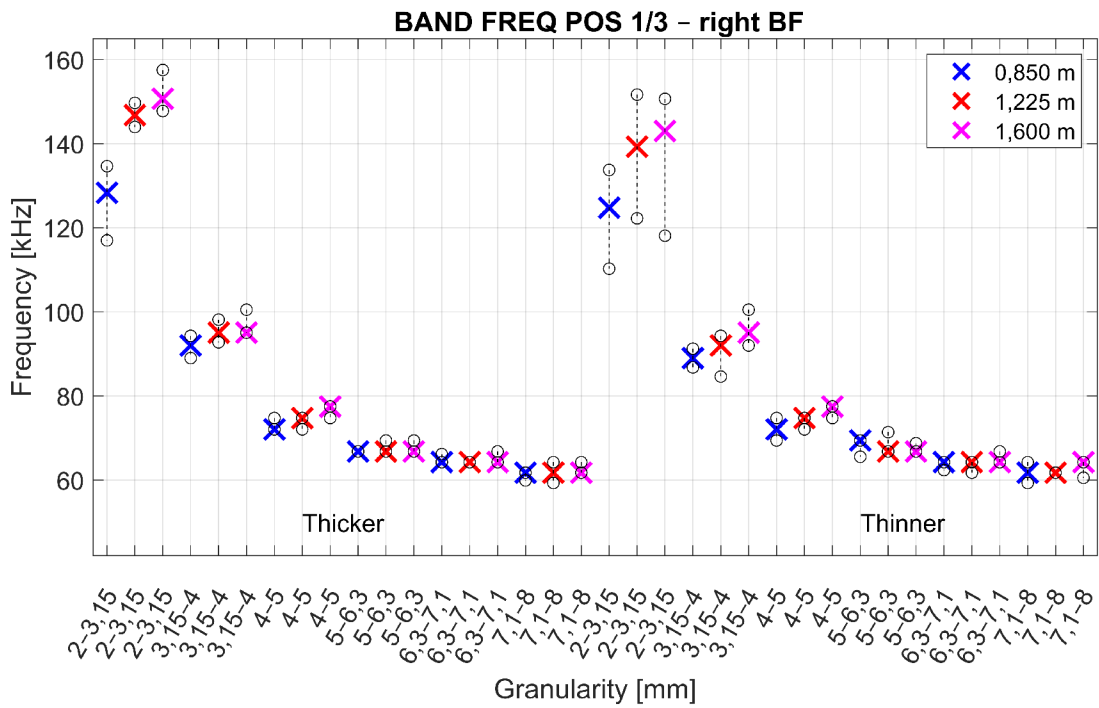


C.3 Flow Single Fraction – neextrahované signály



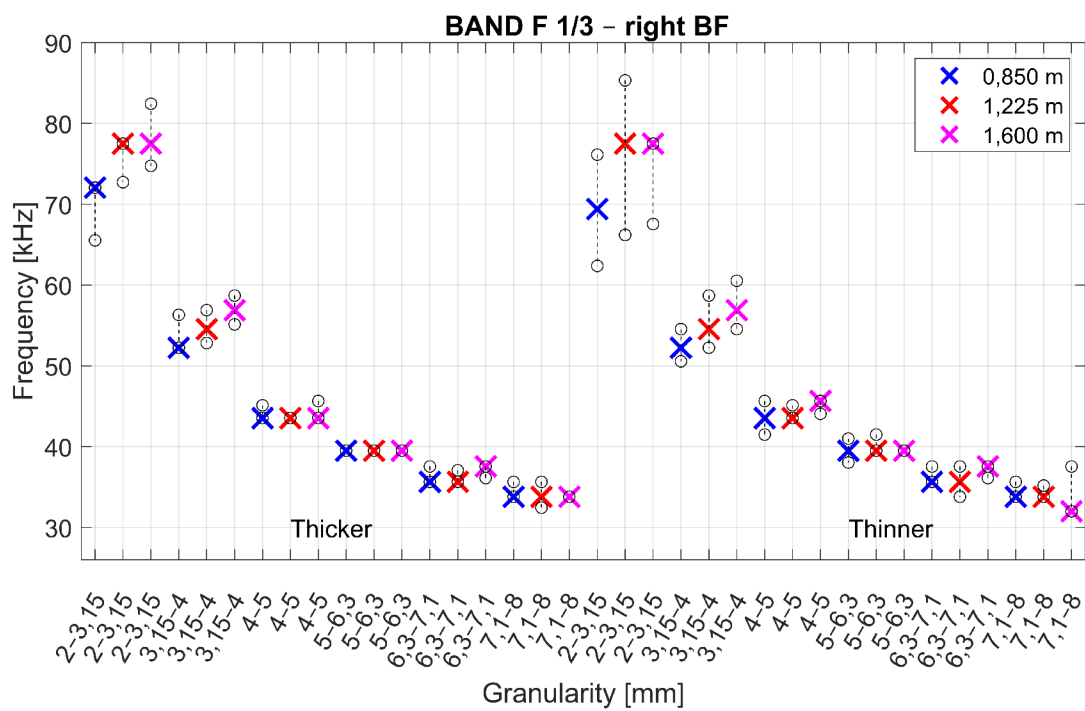


Obr. C.7: Band Freq 1/24



Obr. C.8: Band Freq POS 1/3

C.4 Flow Single Fraction – extrahované signály



Obr. C.9: Band Freq 1/3

D Obsah elektronické přílohy

DP2023_Prilohy_Tkacova_Denisa_211187

Code	
LabVIEW	
GranulometryAE_DataAnalysis.lvproj.....	soubor projektu LabVIEW
ExperimentAnalysis.vi	hlavní VI
TimeStampsAnalysis.vi	porovnání časových značek
SubVI	14 SubVI
Data	
plotLabviewData.m	program pro vykreslení grafů z LabVIEW
Ross_Ramm_Distribution.xlsx.....	určení nových parametrů RR rozložení
Prehled_dat_AE.xlsx.....	přehledová tabulka dat
Tabulky_Separabilita.xlsx	tabulky sep. pro analyzované datové sady