

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra technologie staveb**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
Studie k třídění jemných materiálů na bázi
vedlejších energetických produktů**

**Markéta Duchoslavová
2019**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předkládanou bakalářskou práci vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze

.....

Markéta Duchoslavová

Poděkování:

Děkuji především vedoucímu mé práce Ing. Rostislavu Šulcovi Ph.D. za odborné rady, pomoc při vypracování a čas, který mi věnoval při konzultacích. Dále bych ráda poděkovala Ing. Bc. Adéle Peterové, Ph.D. a Ing. Martině Šídlové, Ph.D. z Ústavu skla a keramiky VŠCHT v Praze za poskytnutí laboratoře, ochotu a rady při provádění laboratorních zkoušek.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Duchoslavová</u>	Jméno: <u>Markéta</u>	Osobní číslo: <u>460416</u>
Zadávací katedra: <u>K122 - Katedra technologie staveb</u>		
Studijní program: <u>SI - stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>L - příprava, realizace a provoz staveb</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Studie k třídění jemných materiálů na bázi vedlejších energetických produktů</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Study of sorting of fine materials on the basis of secondary energy products</u>	
Pokyny pro vypracování: 1) Rešerše k problematice využití popílků ze složišť v ČR a ve světě. 2) Rešerše ke stavu vybraných složišť v ČR - lokality Mělník. 3) Určení základních fyzikálních vlastností popílků ze složišť (zejména jemnost materiálu). 4) Vyhodnocení vlastností popílků ze složišť vzhledem k požadavkům ČSN 72 2071 a ČSN EN 450-1. 5) Návrh experimentu pro způsoby třídění odtěženého materiálu. 6) Úprava materiálu vzhledem k požadavkům norem. 7) Vyhodnocení experimentu a návrh metodiky pro třídění jemných materiálů na bázi VEP.	
Seznam doporučené literatury: 1) BENSCHIEDT, N., R. HELA a Asociace pro využití energetických produktů. Příručka Popílek V Betonu: Příručka: Základy Výroby a Použití. 2.přeprec. vyd. Hostivice: ČEZ Energetické produkty vydává pro ASVEP, 2013. 2) FEČKO, Peter. Fly Ash. Ostrava: VŠB, 2005 3) ČSN 72 2071. Popílek pro stavební účely - Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>19.2.2019</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>26.5.2019</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
_____	_____
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

_____	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Studie k třídění jemných materiálů na bázi vedlejších energetických produktů

Tato práce se zabývá studiem jemnosti deponovaných popílků. Navrhuje metodu pro úpravu jemnosti tak, aby materiál splňoval požadavky norem a mohl být využíván stejně jako čerstvý vysokoteplotní popílek jako příměs do betonu. Poskytuje informace o produkci a využití vedlejších energetických produktů v ČR i ve světě. Seznamuje s chodem Elektrárny Mělník a stavem nedalekého odkaliště Panský les. Odtud pochází všechny zkoumané vzorky. Dále popisuje metodu měření částic pomocí laserové difrakce, další použité metody a zkoušky, které se týkají jemnosti materiálu. Nakonec se zaměřuje na interpretaci a vyhodnocení výsledků těchto zkoušek a také na porovnání těchto výsledků s požadavky norem.

Klíčová slova

Popílek, složiště, jemnost deponovaných popílků, třídění

Study of sorting of fine materials on the basis of secondary energy products

This bachelor thesis deals with the study of fineness of deposited fly ash. It proposes a method for fine-tuning so that the material meets the requirements of standards and can be used as well as fresh high-temperature fly ash as a concrete admixture. It provides information about the production and use of secondary energy products in the Czech Republic and abroad. It introduces the operation of the Mělník Power Plant and the status of the nearby fly ash dump Panský les. All the examined samples come from there. Further, it describes the method of particle diffraction using laser diffraction, other used methods and tests concerning the fineness of the material. Finally, it focuses on the interpretation of results, evaluation of results of these tests and also comparison these results with standards.

Key words

Fly ash, fly ash dump, fineness of deposited fly ash, sorting

Obsah

ÚVOD	10
1 TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1 Vznik popílku	11
1.2 Chemické a fyzikální vlastnosti.....	12
1.3 Požadavky dle ČSN EN 450-1	12
1.4 Produkce a využití popílku v ČR a ve světě.....	14
1.4.1 Využití popelovin z elektrárny Mělník.....	17
1.5 Tepelné elektrárny	18
1.5.1 Elektrárna Mělník	18
1.6 Složiště	20
1.6.1 Odkaliště Panský les	21
1.7 Vrty na odkališti Panský les	24
1.7.1 Vrt V2	24
1.8 Měření velikosti částic pomocí laserové difrakce	26
1.8.1 Fraunhoferova a Mieho teorie	28
MOTIVACE	30
2 PRAKTICKÁ ČÁST	31
2.1 Vstupní materiál	31
2.1.1 Chemické vlastnosti.....	31
2.1.2 Mechanické vlastnosti	32
2.2 Použité metody	32
2.2.1 Rentgenfluorescenční analýza – XRF	32
2.2.2 Laserová difrakce	33
2.2.3 Prosévání za sucha.....	34
2.2.4 Prosévání za mokra.....	37

2.2.5	Normová zkouška	37
2.3	Výsledky a diskuse	40
2.3.1	Určení síta	40
2.3.2	V2-1	41
2.3.3	V2-2	43
2.3.4	V2-3	44
2.3.5	V2-4	45
2.3.6	V2-5	46
2.3.7	V2-6	47
2.3.8	V2-7	48
2.3.9	V2-8	49
2.3.10	V2-9	50
2.3.11	V2-10	51
2.3.12	V2-11	52
2.3.13	V2-12	53
2.3.14	V2-13	54
2.3.15	V2-14	55
2.3.16	V2-15	56
2.3.17	V2-16	57
2.3.18	V2-17	58
2.3.19	V2-18	59
2.3.20	V2-19	60
2.3.21	V2-20	61
2.3.22	V2-21	62
2.3.23	V2-22	63
2.3.24	V2-23	64

2.3.25	V2-24	65
2.3.26	V2-25	66
2.3.27	V2-26	67
2.3.28	Shrnutí výsledků	68
ZÁVĚR	70
Použitá literatura	71

ÚVOD

V souvislosti s ochrannou životního prostředí dochází téměř v celé Evropě k odklonu od uhelné energetiky, v několika zemích už dokonce určili přesné datum odstoupení od používání uhlí. V dnešní době je také kladen stále větší důraz na znovuvyužití druhotných surovin a stejně je tomu tak i u popílku. Využívání čerstvého vysokoteplotního popílku je dnes již samozřejmostí, za několik let však bude tohoto cenného materiálu nedostatek. Nabízí se zde tedy možnost využívat popílky uložené na složištích. Hlavním úkolem této práce je zkoumání a navržení úpravy jemnosti popílku ze složiště Elektrárny Mělník tak, aby materiál splňoval požadavky norem a bylo možné ho použít jako příměs do betonu.

Cíle práce

- Rešerše k problematice využití popílků ze složišť v ČR a ve světě
- Rešerše ke stavu vybraných složišť v ČR – lokalita Mělník
- Určení základních fyzikálních vlastností popílků ze složišť (zejména jemnost)
- Vyhodnocení vlastností popílků ze složišť vzhledem k požadavkům ČSN EN 450-1
- Návrh experimentu pro způsoby třídění odtěženého materiálu
- Úprava materiálu vzhledem k požadavkům norem
- Vyhodnocení experimentu a návrh metodiky pro třídění jemných materiálů na bázi vedlejších energetických produktů (VEP)

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Vznik popílku

Elektrárenský popílek tvoří nejjemnější frakci zbytku ze spalování uhlí, jehož zrnitost se pohybuje mezi 0-1 mm. Jedná se tedy o odpad související se spalovacím procesem. Takto vzniklé látky se označují jako vedlejší energetické produkty a patří sem:

- popel, který obsahuje popílek a škváru
- energosádrovec
- produkt polosuché metody odsíření kouřových plynů
- produkt spalování uhlí ve fluidních kotlech s odsířením
- produkt suché aditivní metody odsíření.

Z celkového množství energetického odpadu ze spalování fosilních paliv tvoří popílek cca 75-85 %. Jedná se o heterogenní materiál s rozdílnými vlastnostmi, které jsou ovlivňovány kvalitou spalovaného uhlí a technologií spalovacího procesu. [1]

Uhlí z elektrárenských zásobníků se pomele na jemný prach, který se společně se spalovacím vzduchem dopraví k hořákům a tím se dostane do ohniště. Zde se během několika sekund organické složky uhlí spálí za současného uvolnění tepla. Nehořlavé složky se shlukují do větších částic a dopadají v kapalné nebo tuhé formě (záleží na druhu spalování) na dno kotle. Takto vzniká v tavicí komoře ohniště při teplotě 1500-1700 °C sklovitý granulát, v granulačním ohništi při teplotách 1100-1300 °C pak struska. [2]

Jemné minerální částice ve spalinách se také roztaví, jsou strženy spalinami a při prudkém ochlazení ztuhnou na sklovito-amorfní částice popela s kulovitým tvarem. Tyto částice jsou známy jako úletový popílek neboli fly ash a jsou následně odděleny od spalin a zachytávány pomocí soustavy vícenásobných mechanických a elektrostatických odluhovačů a filtrů. [2]

1.2 Chemické a fyzikální vlastnosti

Chemicky je popílek tvořen třemi základními složkami, kterými jsou oxid křemičitý (SiO_2), oxid hlinitý (Al_2O_3) a oxid železitý (Fe_2O_3). Tyto oxidy zastupují asi 90 % celkového obsahu. V menším množství se zde vyskytují také oxid vápenatý, oxidy alkalických kovů, oxid sírový a další. Zastoupení jednotlivých oxidů je však variabilní a závisí na typu uhlí. Je tedy třeba každý popílek posuzovat samostatně. [2]

Důležitým parametrem při posuzování použitelnosti popílku je ztráta žíháním. Jedná se o množství zbytkového uhlíku, který v popílku zůstal po spálení uhlí. Pokud je jeho obsah příliš vysoký, je tento popílek nepoužitelný jako příměs do betonu. [2]

Chemické složení popílků určují druhy minerálů přítomné v uhlí. Nejčastěji se setkáváme s jílovitými minerály, sulfidy železnaté a uhličitanu. Dále je přítomen křemen a oxidy i hydroxidy železa. Při spalování dochází k roztavení převážného podílu minerálních látek a následnému ztuhnutí po ochlazení v proudu spalin. Výsledný popílek obsahuje 60 až 85 hm.% skla. [2]

Při roztavení minerálů uhlí dochází k tvorbě kulovitých částic s uzavřeným povrchem. Kromě těchto plných kuliček se mohou vyskytovat jednotlivě duté a vyplněné kuličky (cenosféry a plerosféry). Objemová hmotnost vlastního zrna se pohybuje v rozmezí 2000 až 2500 kg/m^3 . Velikost částic popílku by se dala přirovnat k cementu, avšak granulometrické složení má jiný průběh. Střední průměr zrn nabývá hodnot v rozmezí 10 až 30 μm . [2]

1.3 Požadavky dle ČSN EN 450-1

Podle ČSN EN 450-1: Popílek do betonu je popílek jemný prášek převážně z kulovitých sklovitých částic, které vznikají při spalování práškového uhlí samotného, nebo i se spoluspalovaným materiálem. Má pucolánové vlastnosti a sestává převážně z SiO_2 a Al_2O_3 . Získává se elektrostatickým nebo mechanickým odlučováním z plynů topenišť elektráren otápěných a může se před použitím upravovat tříděním, výběrem, proséváním, sušením, smícháváním, mletím, snižováním uhlíku nebo kombinací těchto procesů ve vhodném výrobním zařízení. Takto upravený popílek může sestávat z popílků různých zdrojů, přičemž každý popílek musí vyhovovat definici uvedené v této normě. [3]

Tato norma stanovuje požadavky na chemické a fyzikální vlastnosti a dále postupy kontroly jakosti pro použití popílku jako příměsi druhu II do betonu. Popílek, který vyhoví této normě se též může použít v maltě a injektážní maltě.

Příměs druhu II znamená jemně zrnitý anorganický pucolánový nebo latentně hydraulický materiál, který se může přidávat do betonu za účelem zlepšení jeho určitých vlastností nebo docílení speciálních vlastností (viz EN 206-1). [3]

Požadavky na chemické a fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 1: Požadavky na chemické vlastnosti dle ČSN EN 450-1

Vlastnost	Požadavek (maximální hodnota)
Ztráta žíháním	kategorie A: max. 5 % hmotnosti kategorie B: max. 7 % hmotnosti kategorie C: max. 9 % hmotnosti
Obsah chloridů	0,10 % hmotnosti
Obsah oxidu sírového	3,0 % hmotnosti
Volný oxid vápenatý	1,5 % hmotnosti, pokud více zkouška na objemovou stálost
Aktivní oxid vápenatý	10,0 % hmotnosti, pokud celkový obsah oxidu vápenatého není vyšší než 10 % hmotnosti, požadavek na volný oxid vápenatý lze považovat za splněný
Aktivní oxid křemičitý	nesmí být méně než 25 % hmotnosti
Oxid křemičitý, hlinitý, železitý	nesmí být méně než 70 % hmotnosti
Celkový obsah alkálií	5,0 % hmotnosti
Oxid hořečnatý	4,0 % hmotnosti
Rozpuštěný fosforečnan	5,0 % hmotnosti

Převzato z ČSN EN 450-1

Tab. 2: Požadavky na fyzikální vlastnosti dle ČSN EN 450-1

Vlastnost	Požadavek (maximální hodnota)
Jemnost (v % zůstatku při prosévání na síti 0,045 μm)	kategorie N: max. 40 % hmotnosti kategorie S: max. 12 % hmotnosti
Variabilita jemnosti	± 10 % deklarované hodnoty (jen kat. N)
Index účinnosti	10 mm
Měrná hmotnost	± 200 kg/m ³ od hodnoty výrobce
Množství vody	kategorie S: max. 95 % kategorie N: neuplatňuje se
Počátek tuhnutí	2krát déle než počátek tuhnutí cementu bez popílku

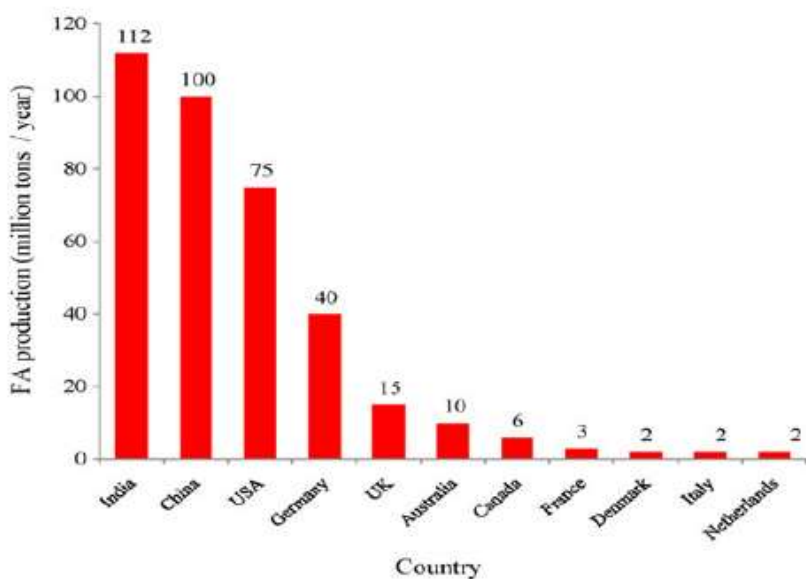
Převzato z ČSN EN 450-1

Další normou, která se zabývá popílkem, je norma ČSN 72 2071: Popílek pro stavební účely. Jejím předmětem jsou postupy pro stanovení vlastností včetně systému kontroly pro popílky pro stavební účely. Předepisuje jednotlivé metody zkoušení. [4]

1.4 Produkce a využití popílku v ČR a ve světě

Kolem 40 % celkové elektřiny ve světě je produkováno z elektráren využívající uhlí. Ročně se na světě vytěží 7,2 miliard tun uhlí, z toho černé uhlí tvoří 86 %. Největšími producenty popílku a dalších produktů vzniklých spalováním uhlí jsou Indie, Čína a USA. V Indii se vyprodukuje až 112 milionu tun popílku ročně. Česká republika se pohybuje okolo 10 milionu tun ročně, což je v porovnání s ostatními evropskými státy poměrně nezanedbatelné číslo. [5]

Některé další státy a jejich roční produkce popílku je znázorněna v následujícím grafu.



Graf 1: Produkce popílku v různých zemích [6]

Vzhledem k tomu, že ubývá přírodních surovin, je v dnešní době kladen důraz na znovuvyužití různých odpadů. Stejně je tomu tak i u popílků. Z větší části (přibližně 70-80 %) se využívá k rekultivaci terénu, odstraňování následků důlní činnosti a podobně. Ze zbývajících 20 % se nejčastěji setkáváme s využitím ve stavebnictví. [1]

Nejčastěji se setkáváme s využitím při výrobě betonů a malt. Popílek zde může působit jako aktivní či neaktivní složka, což znamená, že může nebo nemusí přispívat k procesu tvrdnutí. Při výrobě cementu lze popílek použít dvěma způsoby. Přidáním popílku do suroviny se z něj stává plnohodnotný zdroj všech základních oxidů (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 a CaO). Druhý způsob je přidávání již k hotovému cementu a využití jeho pucolánových vlastností, které se cementem aktivují. Popílek lze rovněž využít při výrobě cihlářských výrobků, jako přísada do asfaltu atd. Za zmínku stojí využívání popílku americkou firmou Castone, která vyrábí cihly obsahující 90 % popílku a celý proces je velmi energeticky úsporný. Tyto cihly mají navíc velmi dobré vlastnosti a jsou dostupné v mnoha barvách, proto se používají na vnější neomítané zdivo. [7]

Dalším odvětvím využití je výroba umělého kameniva. V Nizozemsku je až 20 % produkce využíváno právě tímto způsobem. Existují dvě technologie výroby, za studena a za horka. Při první metodě dochází ke zpracování granulovaného popílku při teplotách okolo $1100\text{ }^\circ\text{C}$ a dochází k tzv. slinutí (natavení a částečné spojení) zrn. Po vychlazení se vzniklé granule třídí. Vzniká materiál srovnatelný s přírodním kamenivem, výjimku tvoří nižší objemová hmotnost, proto se využívá při stavbách mostů a tam, kde je třeba snížit celkovou hmotnost konstrukce. Druhá technologie je založena na reakci hydroxidu vápenatého s oxidy, které popílek obsahuje. Dochází k podobnému procesu jako je tvrdnutí betonu a výsledkem je tvrdý a stabilní materiál. V porovnání s výsledkem první metody má sice horší vlastnosti, ale celý proces je energeticky šetrnější. [7]

Mezi další způsoby využití patří například výroba náplní do filtrů pro čistírny odpadních vod, zneškodňování nebezpečných odpadů nebo různé způsoby injektáže. V následující tabulce jsou uvedeny údaje o využití VEP v ČR.

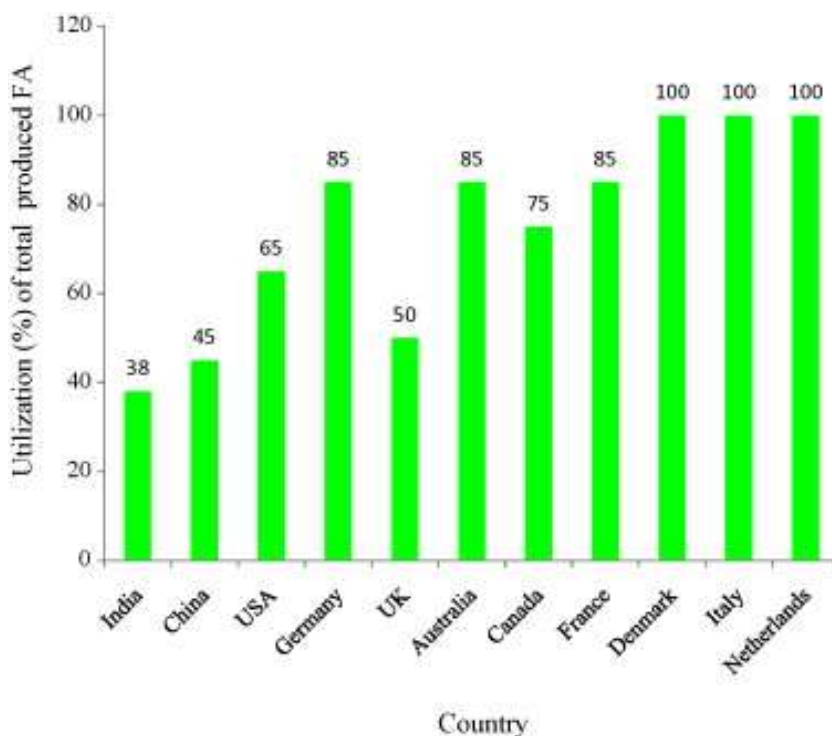
Tab. 3: Použití VEP v ČR

Použití vedlejších energetických produktů	t	%
Beton, cement, pórobeton, cihlářské výrobky	1 678 298	12,8
Komunikace – stabilizát, granulát	92 543	0,7
Povrchové doly	6 803 639	52,0
Hlubinné doly	288 497	2,2
Ukládání na volný povrch (asanace a rekultivace postižených)	3 599 116	27,5
Sádkartonové desky, sádra, cement	404 382	3,1
Odpad	111 992	0,9
Sklad energosádrovce	82 690	0,6
ostatní	16 611	0,1

Převzato z www.prumyslovaekologie.cz [8]

Pro porovnání v Indii se v betonářském průmyslu využívá cca 50 % z celkového využití. Dalšími oblastmi použití jsou výplně nízkých oblastí v terénu, silnice a nábřeží, výroba cihel, zemědělství atd. [6]

V následujícím grafu je znázorněno procentuální využití vyprodukovaného popílku v různých zemích.



Graf 2: Využití vyprodukovaného popílku v různých zemích [6]

Jak je patrné z předchozího grafu, velmi vyspělé v oblasti znovuvyužití energetických odpadů jsou země Beneluxu, Itálie a Dánsko. S vývojem technologií a uvědomováním si globální důležitosti recyklace se však využívání VEP dynamicky rozvíjí i v ostatních zemích.

1.4.1 Využití popelovin z elektrárny Mělník

Popílek, který vzniká v elektrárně Mělník spalováním hnědého uhlí prošel sérií několika zkoušek. Stejně tak i následné výrobky z něj. Na základě výsledků těchto zkoušek se ukázalo, že nejvýhodnějším využitím bude pneumatická doprava suchého popílku do sil a poté zpracování. [9]

V této elektrárně se popílek zpracovává metodou aglomerace, tento proces bude popsán níže v kapitole věnované přímo mělnické elektrárně. Výrobek se certifikuje ve dvou kategoriích:

- Aglomerát pro technickou rekultivaci
- Granulát do výsypek povrchových dolů.

V případě granulátu se jedná o směs aglomerátu a strusky. Jde o stabilizační materiál pro separátní a směsné zakládání s výsypkovými zeminami. Tento materiál lze použít stejně jako aglomerát také pro tvarování, uzavření a rekultivaci odkaliště. Aglomerát se na odkaliště dopravuje pomocí trubkového dopravníku a po dobu dalších několika let se bude využívat jako certifikovaný materiál pro potřeby elektrárny. [9]

Jemná a hrubší frakce popílku má však i komerční využití. Převážně je odebírána betonáry, kde slouží jako příměs betonových směsí. Do nedávna také probíhala spolupráce s firmou HEBEL, která vyrábí pórobetonové tvárnice a využívala popílek k jejich výrobě. [9]

Při rozhodování o dalším využití popílku se zvažovaly i další alternativy. Ukázalo se však, že tyto metody jsou pro EMĚ neefektivní, to znamená nákladnější než suchý odběr a výroba aglomerátu. Jednalo se o Lytag, což je umělé kamenivo z popílku, a Rhenipal neboli materiál používaný pro likvidaci odpadů z čistíren odpadních vod. Je to směs popílku (68 %), cementu (30 %) a aditiva (2 %). Po

smíchání této směsi s kaly vzniká stabilizát, který je možné volně ukládat do krajiny. [9]

Vzhledem k úbytku přírodních surovin se dá očekávat, že se např. zmiňovaný Lytag stane výhodným materiálem s využitím v různých oblastech stavebnictví. [9]

1.5 Tepelné elektrárny

Základní princip fungování uhelných elektráren spočívá v přeměně tepelné energie na mechanickou a mechanické na elektrickou. Většina takových elektráren je uspořádána do tzv. elektrárenských výrobních bloků. Jedná se o samostatnou jednotku skládající se z kotle, turbíny a příslušenství, z generátoru, odlučovačů popílku, chladicí věže, blokového transformátoru a v novější době také z odsiřovacího zařízení. Zařízením, které může být společné pro několik bloků, je zauhlování, vodní hospodářství (přivaděče, čerpadla a chemická úprava vody), komín, pomocná zařízení k odběru popílku a odsiřování. [10]

V České republice se nachází celkem 26 tepelných elektráren s instalovaným výkonem větším než 100 MW. Pro účely této práce se však budeme zabývat pouze elektrárnou Mělník, ze které pochází zkoumaný popílek.

1.5.1 Elektrárna Mělník

Elektrárna Mělník (EMĚ) patří společnosti ČEZ a ze všech jejích výroben je nejbližší Praze. Leží ve vzdálenosti asi 13 km od soutoku řek Labe a Vltavy. Původně se skládala ze tří technologických celků, konkrétně EMĚ I, EMĚ II a EMĚ III. Tyto celky byly postupně vybudovány v rozmezí šedesátých a sedmdesátých let jako kondenzační elektrárny spalující převážně hnědé uhlí. To se na místo dopravovalo vlaky z dolů na severu a západě Čech. Instalovaný výkon v současnosti činí 4 x 60 MW, 2 x 110 MW a 1 x 500 MW. [11]



Obr. 1: Pohled na celou lokalitu Elektrárny Mělník z ptačí perspektivy [12]

Instalovaný výkon EMĚ I činí 240 MW, skládá se ze čtyř turbogenerátorů po 60 MW. Stavba této elektrárny započala roku 1956, provozována začala být o čtyři roky později v roce 1960. V osmdesátých letech se zahájila její přestavba na teplárnu a současně výstavba tepelného napáječe, který slouží k dodávce centrálního tepla do Pražské teplárenské soustavy. Dodávka tepla pro Prahu začala roku 1995 a od té doby je Elektrárna Mělník I jejím primárním výrobcem tepla. Od roku 2003 navíc zásobuje i město Neratovice. Napáječ přenáší výkon 650 MW a ročně dodává 9800 TJ tepla. V roce 2003 se provozovatelem EMĚ I stala společnost Energotrans. [13]

Další část tvoří Elektrárna Mělník II. Její původní čtyři bloky byly uvedeny do provozu v roce 1971. V následujících pěti letech docházelo k optimalizaci hlavního technologického zařízení. Během dalších let pak probíhala modernizace technologie zařízení. U všech bloků proběhla rekonstrukce elektroodlučovačů, jejichž účinnost se nyní pohybuje nad hodnotou 99 %. Kvůli útlumovému programu zdrojů ČEZ se po nabytí nové ekologické legislativy od 1.1.1999 nadále provozují pouze dva bloky. Tyto dva bloky prošly v letech 1994-1996 celkovou rekonstrukcí. Byly instalovány nové turbíny, moderní řídicí systém Westinghouse WPDF II, radikální rekonstrukcí prošly také kotle. V roce 1998 bylo do provozu uvedeno odsiřovací zařízení. EMĚ II dodává teplo do regionálního napáječe pro město Mělník a obce Horní Počaply a Dolní Beřkovice. [14]

V roce 1981 byla do trvalého provozu uvedena poslední část mělnické elektrárny – EMĚ III. Blok s výkonem 500 MW byl největším uhelným blokem

v České republice až do zprovoznění zdroje v Ledvicích a díky své koncepci patří mezi neekonomičtější energetické bloky uhelných elektráren. Stejně jako předchozí dvě části elektrárny Mělník i tato prošla modernizacemi a rekonstrukcemi. Cílem investice devadesátých let bylo prodloužení životnosti na dalších minimálně 20 let. Zrekonstruovalo se těleso turbíny, na kotli byly provedeny opatření ke snížení produkce oxidů dusíku a v roce 1998 bylo do provozu uvedeno odsiřování spalin. [14]

V EMĚ vznikají tři základní skupiny vedlejších energetických produktů, jsou jimi energosádrovec, struska a popílek. Množství jednotlivých druhů VEP je uvedeno v tabulce níže. Energosádrovec je v plné výši zpracováván v nedalekém závodě Rigips na výrobu sádkartonových desek. Struska i popílek jsou taktéž upravovány na certifikované stavební materiály. Popílek se zpracovává separátně pomocí aglomerace. Výsledkem je tzv. aglomerát, což je směs pevného produktu po spalování hydratovaného analyticky ověřenou záměsovou vodou v míchacím centru. Takto vyrobený materiál vykazuje lepší fyzikální i chemické vlastnosti, než má výchozí selektovaný popel. [14]

Tab. 4: Produkční údaje včetně predikce

	2018	2019	2020	2021	2022
VEP celkem [t]	1 363 791	1 245 058	1 056 995	549 094	545 795
popílek	1 003 941	936 301	792 490	420 901	421 497
struska	92 383	86 237	73 191	39 787	39 864
energosađrovec	267 467	222 520	191 314	88 407	84 434

Převzato z roční zprávy o řešení projektu v programu Trio v roce 2018 [15]

Díky certifikaci všech VEP a poslední větší investici se výroba elektřiny a tepla v mělnické elektrárně blíží bezodpadové technologii. V roce 2002 získala EMĚ certifikát „Systém environmentálního managementu“ v souladu s normou ISO 14001. [14]

1.6 Složiště

V minulosti se jen velmi malá část produkce popílků skladovala suchým způsobem nebo se znovu využívala, proto se téměř všechny popílek i struska ukládaly ve formě hydrosměsi na tzv. odkalištích. Jedná se o místa určená pro trvalé uložení sypkých odpadů z průmyslových provozů, které jsou plaveny a usazovány pomocí

vody. Popílek se na místo transportuje hydraulicky (v potrubí jako suspenze) nebo nákladními vozy a autocisternami. [16]

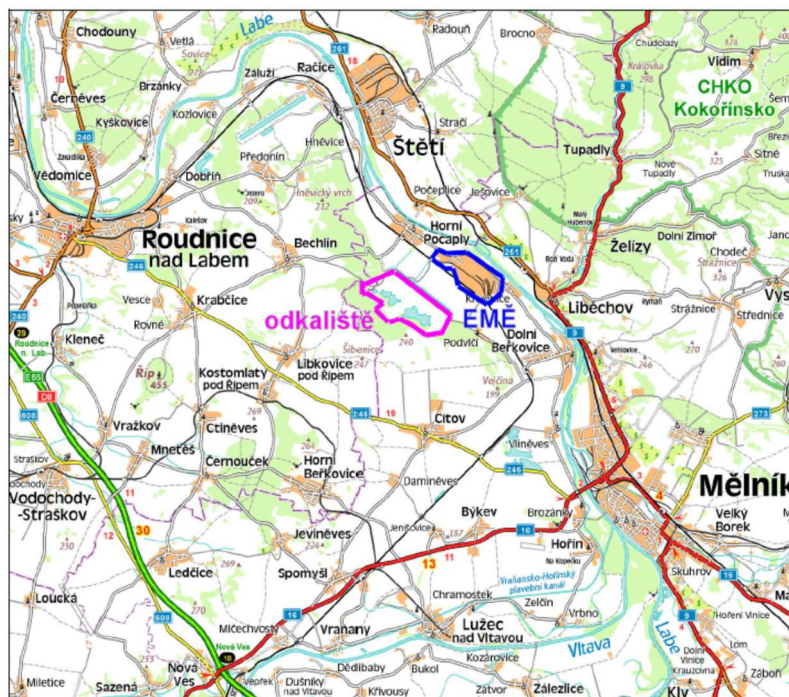
Nevýhodami tohoto způsobu ukládání jsou:

- dlouhodobý zásah do krajiny
- neekonomické čerpání velkého množství vody
- některé VEP se nalepují a ucpávají potrubí a nelze tuto metodu použít
- plavení omezuje možnosti využití popílku

Proto se v současnosti přechází spíše na suché způsoby odběru, dopravy a ukládání. [16]

1.6.1 Odkaliště Panský les

Odkaliště Panský les slouží k ukládání VEP z nedaleké elektrárny Mělník. Skládá se ze dvou částí – kazeta I a kazeta II a je klasifikováno jako vodní dílo druhé kategorie bez pohyblivých jezů, které je průtočné. Přebytná voda je sváděna do přilehlé řeky Labe. Dílo bylo budováno od roku 1960 jako odkaliště svahového typu a je založeno na sedimentech labské terasy a zároveň opřeno o svahy morfologické elevace. Poloha tohoto odkaliště i elektrárny Mělník je vidět na následující mapě. [15]



Obr. 2: Přehledná situace zájmové lokality [15]

Základová spára první hráze se nacházela v úrovni 160 m. n. m., zatímco koruna poslední zvyšovací hráze je výšce 208 m. n. m. Všechny zvyšovací hráze měly vlastní drenážní systém a sklon cca 7°. Jedná se o 48 m vysoký hrázový systém vybudovaný ze dvou typů zemin. Nejprve byly hráze budovány z místních štěrkopískových zemin, pro následující zvyšovací hráze byly použity VEP. Po zahájení provozu byl vybudován hloubkový obvodový drén odvádějící průsakové vody z odkaliště do Labe. Důvodem bylo zabránění případné kontaminaci kolektoru pod úložným prostorem a okolí stavby. [15]

V 70. letech minulého století se objevily problémy stability hrázového systému. Nárůst vody v úložném prostoru byl hlavním důvodem projevu nestability hrází. Jako řešení tohoto problému byly na úpatí hrází vybudovány tři sací koše, jejichž úkolem bylo snižovat hladinu vody v hrázi. V současnosti jsou však téměř bez vody. Další problémy nastaly v roce 1981, kdy stoupla mělká hladina podzemní vody v obci Podvlčí. V té době dosahovala hladina odkaliště úrovně 190 m. n. m. a plocha až 500 ha. [15]

Při provádění následných inženýrsko-geologických prací se ukázalo, že zvětralý povrch sedimentů v podloží nebyl dostatečným hydrogeologickým izolátorem, a tak docházelo k infiltraci průsakových vod do kolektoru. Došlo tedy k výstavbě hydrogeologické bariéry v podobě vsakovacích jímek a odvodňovacích vrtů. V následujících letech provozu docházelo k doplňování dalších vrtů. [15]

V roce 2000 bylo započata rekultivace kazety I a pro kazetu II je připraven projekt na rozdělení do menších celků. Ty mají sloužit jako rezerva pro havarijní plavení strusky. Ostatní plocha bude rekultivována pomocí aglomerátu. [15]

Do odkaliště Panský les se ukládají VEP již od roku 1960, v současné době probíhá manipulace s nimi v distribučním a míchacím centru. Suché frakce popela z výsypek odlučovačů a elektrofiltrů EMĚ II a EMĚ III putují do mezisila, které má dvě komory a umožňuje tak ovlivnit zrnitost v jednotlivých komorách. Odtud je směs popílku pneumaticky dopravována do dvou míchacích center. V distribučním centru se nachází dvě sila o objemu 500 m³. Z těchto sil je možné suchou směs expedovat na autocisterny nebo na železniční vozy. Existuje také možnost míchat suchou směs s vápenným nebo cementovým aditivem. [15]

Z obou sil je také možné zásobovat cyklický míchač pro výrobu vlhké popelové směsi. Při výrobě aglomerátu se jako záměsová voda používá voda labská, která se odebírá z bagrovací stanice BS2. Vzniklý aglomerát byl nejprve dopravován do lomu J. Šverma Mostecké uhelné společnosti, současně byl od roku 1999 ukládán do odkaliště Panský les. Na místo je dopravován pomocí pásových dopravníků, kde je poté rozvážen nákladními automobily. Následuje rozprostírání do vrstev a hutnění. [15]

Na odkaliště Panský les byla plavena také struska z bagrovacích stanic pomocí několika potrubních tras. V současné době je struska strojně odvodňována v areálu elektrárny. Do roku 2017 se však v případě poruchy plavilo do kazety II, nyní je havarijní plavení povoleno pouze do vymezených sedimentačních kazet s odvodem transportní vody z hydrosměsi přes systém zachycení pevných částic. [15]

V letech 1987-1999 se do odkaliště plavily také směsi energosádrovce z EMĚ a AD SEPAP Štětí. [15]

V současné době (konkrétně od roku 2005) se tedy do odkaliště Panský les VEP již neplaví, pokud nedojde k havarijnímu stavu, kdy nefunguje odvodnění strusky v elektrárně. Dochází k minimální dotaci vodou a za stávajících podmínek běžného provozu se sem dostává pouze voda srážková a voda přitékající z okolních elevací. [15]



Obr. 3: Situace odkaliště-letecká mapa z r. 2017 [15]

1.7 Vrtý na odkališti Panský les

Na složištích se setkáváme i s materiály, které jsou nekvalitní, a tedy nepoužitelné v betonu. Mezi ně patří tzv. stabilizáty neboli stabilizované směsi s popílkem. Většinou jsou stabilizovány páleným vápnem a podlely již hydratačním procesům. Popílek tím pádem ztrácí pucolánovou aktivitu, respektive latentní hydraulicitu. [17]

Vyskytují se zde také popílký s příměsí energosádrovce. Nejvýznamnějším materiálem na odkališti je již zmiňovaný aglomerát. Bylo by zajímavé tyto dva materiály srovnat, proto na odkališti Panský les došlo k realizaci několika vrtů. [17]

Celkem zde bylo provedeno 5 vrtů – V1, V2, V3, V4 a S1. V této práci se však budeme zabývat pouze vrtem V2, ze kterého pochází zkoumaný popílek. Výběr zhotovitele na provádění vrtů byl vzhledem k období sucha náročný. Z tohoto důvodu se začalo později, než se původně plánovalo. [17]



Obr. 4: Lokalizace realizovaných vrtů v odkališti Panský les EMĚ [15]

1.7.1 Vrt V2

Prvním dodavatelem se stal Ing. Jan Valenta, který zajišťoval ohlášení vrtů na báňský úřad, zpracoval podklady a zajistil vrtnou soustavu. V červnu roku 2018 se tak zahájila série sondážních vrtů na odkališti Panský les. První byly provedeny vrty V1 a

V2. Oba se provedly bez vystrojení a do hloubky asi 25 metrů. Nacházejí se v prostoru kazety I na okrajových částech odkaliště. Poloha vrtů je znázorněna na předchozím obrázku. Vrtů V1-V4 odpovídají číslům 1-4, vrt S1 je uveden pod číslem 5. [17]



Obr. 5: Fotodokumentace V2 [17]

Cílem těchto vrtů bylo zjistit, zda se zásadním způsobem mění vlhkosti vzhledem k dispozici terénu. Další otázkou bylo, zda je chemické složení a zrnitost materiálu kompaktní nebo se výrazně liší. Z každého metru hloubky byl odebrán vzorek, celkem jich bylo 26.



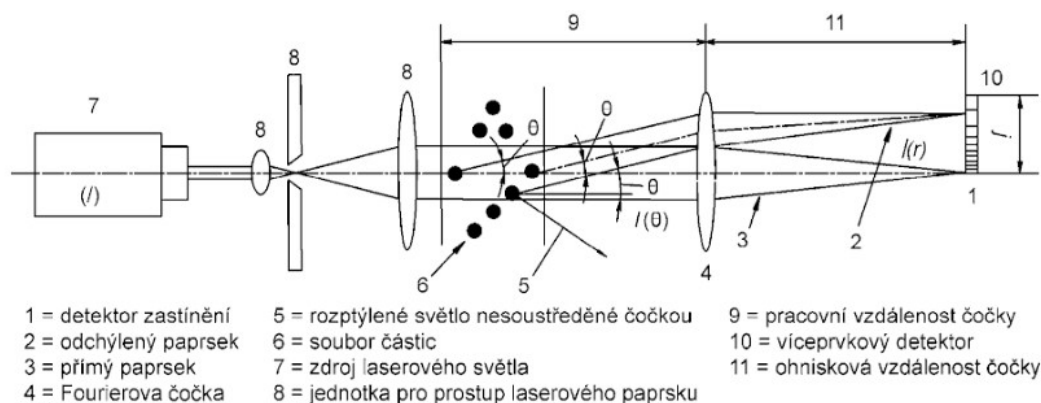
Obr. 6: Jádrové odvrty V2 [17]

1.8 Měření velikosti částic pomocí laserové difrakce

Granulometrické složení neboli rozdělení velikosti částic se u všech 26 vzorků zjišťovalo pomocí laserové difrakce.

Měření velikosti částic pomocí této metody může poskytnout údaje i u velmi jemných prášků. Musí být však splněn předpoklad, že vzorek i přístroj jsou důsledně kontrolovány. Původně bylo měření laserovou difrakcí omezeno na částice velikosti přibližně 0,1 μm až 3 mm. V dnešní době díky vývoji nových čoček a dalšího vybavení jsou přístroje schopny tento rozsah přesáhnout. [18]

Přístroj se skládá ze zdroje laserového světla, optiky, která upravuje postup paprsku, zóny pro měření vzorku, Fourierovy čočky a detektoru pro zachycení difrakčního obrazce. Nesmí zde chybět také systém pro sběr a zpracování dat. Ten je určen pro dekonvoluci difrakčních údajů na objemovou distribuci částic a k uvedení výsledků. Zařízení musí být v prostředí, kde nedochází ke kolísání teplot, vlhkosti a kde není vystaveno elektrickému šumu, mechanickým vibracím, nebo přímému světlu. Na následujícím obrázku je uvedeno možné uspořádání přístroje pro laserovou difrakci. [18]



Obr. 7: Příklad sestavy zařízení pro laserovou difrakci [18]

Částice se mohou s laserovým paprskem setkat ve dvou místech. Běžně dochází k setkání paralelního paprsku s částicemi před spojnou čočkou v její pracovní vzdálenosti. Druhá možnost je použití tzv. Fourierovy optiky, kdy dojde k dopadu světla na částice až za spojnou čočkou ve sbíhavém paprsku. Tento způsob umožňuje měřit světlo rozptýlené ve větších úhlech a využívá se, pokud jsou ve vzorku částice menší než mikrometr. Interakcí paprsku světla a částic dochází k vytvoření difrakčního obrazce s rozdílnou intenzitou světla v různých úhlech. Úhel ohybu světla je nepřímo

úměrný velikosti částic. Celková úhlová distribuce intenzity, která je tvořena přímým i rozptýleným světlem, se čočkou soustředí na víceprvkový detektor. Tato čočka vytvoří nový difrakční obrazec. Na detektoru je pak souvislá úhlová distribuce intenzit převedena dělenou prostorovou distribucí intenzity. Naměřený obrazec by měl být totožný se součtem difrakčních obrazců všech částic. Měření obvykle probíhá ve vodném prostředí. [18]

Následný převod difrakčního obrazce na distribuci velikosti částic probíhá pomocí reciprokého výpočtu. Významný je zde předpoklad kulovitého tvaru částic. Většina algoritmů totiž využívá matematické řešení pro difrakci kulovitého tvaru částic. Naměřené hodnoty vždy obsahují nahodilé nebo systematické chyby, které mohou výsledek narušit. Byla vyvinuta spousta postupů, které zahrnují porovnání odchylek naměřených a vypočtených obrazců a zavádějí různá omezení nebo zaoblení křivky distribuce velikosti. Každý přístroj má specifický algoritmus. Výsledkem měření je procentuální objemové rozdělení velikosti zrn v celku od 0 do 10 000 mikronů. Pro ilustraci je níže ukázka výstupu z přístroje na měření částic. [18]

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.34	11.482	2.73	120.226	2.81	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.40	13.183	3.07	138.038	1.83	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.47	15.136	3.39	158.489	1.01	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.53	17.378	3.68	181.970	0.33	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.60	19.953	3.93	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.67	22.909	4.14	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.01	2.512	0.73	26.303	4.34	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.07	2.884	0.80	30.200	4.54	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.08	3.311	0.87	34.674	4.76	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.10	3.802	0.95	39.811	5.00	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.12	4.365	1.05	45.709	5.25	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.14	5.012	1.18	52.481	5.45	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.16	5.754	1.34	60.256	5.55	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.18	6.607	1.53	69.183	5.46	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.21	7.586	1.78	79.433	5.14	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.25	8.710	2.07	91.201	4.56	954.963	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.29	10.000	2.39	104.713	3.74	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925	0.00		

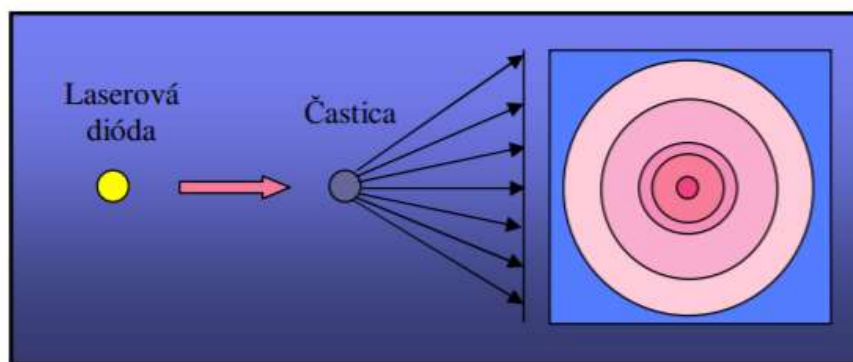
Obr. 8: Výstup měření z přístroje Mastersizer 2000/MU

Výsledky distribuce velikosti částic se vyjadřují jako kumulativní distribuční závislost nebo jako frekvenční distribuční křivka. V grafickém znázornění se na osu x nanáší velikost částic a na osu y proměnná Q3, která vyjadřuje podíl částic menších než hodnota x. Často se setkáváme s použitím velikosti částic v hodnotách 10 %, 50 % a 90 %. Hodnota x_{50} , častěji značená jako d_{50} , udává střední hodnotu velikosti částic. [18]

1.8.1 Fraunhoferova a Mieho teorie

Pro výpočet je nutný výběr správného optického modelu. Ten závisí na různých předpokladech jako např. velikost částic, index lomu, povrchové nerovnosti apod. Většina zařízení využívá k výpočtu Fraunhoferovu nebo Mieho teorii. Hranice použití Mieho a Fraunhoferova modelu se s ohledem na obvykle používané světelné zdroje v analyzátoch pohybuje v rozmezí od 3 do 50 μm . U hrubého vzorku, kdy je minimální velikost částic větší než 20 mikronů, jsou výsledky obou teorií téměř stejné. [18, 20]

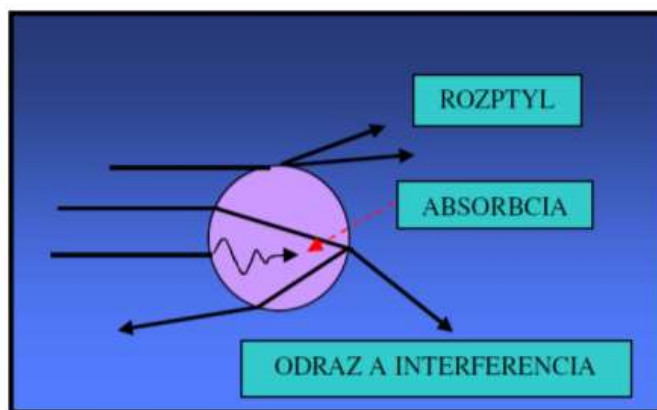
O Fraunhoferově teorii hovoříme v případě, kdy velikost částic výrazně překračuje vlnovou délku světla. Z hlediska analýzy velikosti částic jde o jednoznačně jednodušší případ, než je teorie Mie. Předpokládá se, že částice je neprůhledná, a tudíž se neuplatňuje absorpce, interference ani lom světla. V mnoha ohledech je Fraunhoferova difrakce speciálním případem Fresnelovy difrakce. Difrakce označuje interferenční jevy, které jsou způsobeny přítomností štěrbinou nebo překážky ve směru šíření vlny. Dopadá-li na štěrbinu svazek rovnoběžných paprsků, dostáváme po průchodu ostrý obraz na stínítku. Difrakční obrazec vytvářen za částicí tvoří soustředné kruhy, kde se střídá několik maxim a minim. Vznik těchto kruhů je spojený s ohybem světla a je znázorněn na následujícím obrázku. [19, 20]



Obr. 9: Vznik soustředných kruhů spojený s ohybem světla [20]

Asi 75 % energie světla za částicí je soustředěna v centrální části obrazce, směrem od středu kruhu intenzita klesá. Poloha minim na křivce závislosti intenzity na úhlu rozptylu je jednoznačně závislá na velikosti částic, což umožňuje z charakteristik záření získat informace o jejich velikosti. Při analýze velkého souboru částic se využívá skutečnost, že částice se stejnou velikostí konvergují světelný paprsek do stejného bodu. [20]

Mie teorie je na rozdíl od předchozí teorie velice přesná, ale předpokládá znalost optických charakteristik analyzovaných částic. Z hlediska velikosti částic se jedná o případ, kdy průměr částic je srovnatelný s vlnovou délkou primárního záření. Jde o obecně známou teorii popisující chování světla při odrazu a pohlcování světla na různých typech materiálů. Vztah mezi intenzitou rozptýleného světla a velikostí částic je dost složitý, protože při interakci primárního paprsku s částicí dochází kromě zpětného odrazu také k absorpci, interferenci a přestupu světla přes částici. Ten je spojený minimálně s dvojnásobným lomem na vstupu a výstupu z částice. Tento jev se všeobecně označuje termínem Mieův rozptyl. Situace je znázorněna na následujícím obrázku. [20]



Obr. 10: Předpoklad Mieovy teorie [20]

Charakteristickým rysem teoretického modelu tohoto rozptylu je to, že částice se považuje za rezonanční oscilátor vydávající záření téže frekvence jako má primární světlo a že zohledňuje absorpci a prostup světla částicí. Mie ve své práci z roku 1908 navrhl matematické řešení pro homogenní systém kulových částic, které je založeno na použití Maxwellových rovnic a využívá tzv. komplexní index lomu částice. Jde o komplexní číslo, jehož reálnou část tvoří standartní index lomu částice a imaginární část reprezentuje absorpční záření. Základní myšlenkou algoritmu navrženého výpočtu je součástí většiny moderních laserových analyzátorů. Z uživatelského hlediska je důležité, že do vstupních parametrů pro vyhodnocení je nutné zadat index lomu částic, dále index lomu prostředí a absorpční koeficient částic. Tato teorie poskytuje přesnější výsledky hlavně pro vzorky, které obsahují velké množství malých průhledných částic. Pokud by se použil Fraunhoferův model, může dojít k napočítání podstatně většího množství malých částic. [18, 20]

MOTIVACE

Využití popílků ze složišť v oblasti stavebnictví je v dnešní době předmětem mnoha výzkumů. Z jejich výsledků je patrné, že uplatnění těchto popílků jako součást stavebních materiálů by bylo možné, což by přineslo mnoho výhod. Došlo by ke snížení záboru ploch pro budování dalších úložišť a k velké úspoře primárních surovin na výrobu betonu. Výhodou přítomnosti popílku v betonu je nejen úspora plniva a pojiva, ale také zlepšení zpracovatelnosti, snížení vývoje hydratačního tepla a také zlepšení pevnosti s dlouhodobým růstem v čase.

Zkoumáním některých vzorků z lokality mělnické elektrárny se ve své práci zabývala také Kristýna Sokolová. Předmětem jejího výzkumu byly některé mechanické a chemické vlastnosti. Nezabývala se však jemností materiálu, proto na její výzkum navazujeme a zaměříme se na tuto dle normy důležitou vlastnost.

Hlavním úkolem je najít způsob úpravy jemnosti materiálu tak, aby vyhověl požadavkům normy a aby byla možná rychlá kontrola v případě, že by se tato úprava prováděla na lince. Normovou zkoušku, která ověřuje jemnost a bude popsána níže, totiž nelze při linkové výrobě uplatnit.

Hlavním předpokladem pro úpravu jemnosti bylo prosévání, což je metoda normou povolená.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

V této kapitole je popsán vstupní materiál, všechny použité metody, výsledky jednotlivých zkoušek a jejich interpretace.

2.1 Vstupní materiál

Pro účely praktické části bylo použito celkem 26 vzorků. Všechny vzorky pocházely z odkaliště Panský les, konkrétně z vrtu V2. Každý vzorek reprezentuje 1 hloubkový metr vrtu.

2.1.1 Chemické vlastnosti

Chemické vlastnosti byly zjišťovány pomocí rentgenfluorescenční analýzy (XRF), která bude popsána v kapitole použitých metod. Výsledky obsahu nejvíce zastoupených chemických složek včetně maximálních povolených hodnot dle normy ČSN EN 450-1 jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5: Chemické vlastnosti vzorků

Vlastnost	Průměrná hodnota	Požadavek (maximální hodnota)
Obsah chloridů	0,0180 %	0,10 % hmotnosti
Obsah oxidu sírového	0,2878 %	3,0 % hmotnosti
Volný oxid vápenatý	nebylo měřeno	1,5 % hmotnosti, pokud více zkouška na objemovou stálost
Aktivní oxid vápenatý	1,9304 %	10,0 % hmotnosti, pokud celkový obsah oxidu vápenatého není vyšší než 10 % hmotnosti, požadavek na aktivní oxid vápenatý lze považovat za splněný
Aktivní oxid křemičitý	51,62 %	nesmí být méně než 25 % hmotnosti
Oxid křemičitý, hlinitý, železitý	92,2133 %	nesmí být méně než 70 % hmotnosti
Celkový obsah alkálií	0,3721 %	5,0 % hmotnosti
Oxid hořečnatý	0,9947 %	4,0 % hmotnosti
Rozpustný fosforečnan	0,1694 %	5,0 % hmotnosti

Jak je patrné, většina požadavků je splněna. Při analýze však dochází k měření pouze celkového množství oxidu vápenatého a křemičitého. Protože celkový obsah oxidu vápenatého není vyšší než 10 %, požadavek na aktivní oxid vápenatý můžeme považovat za splněný. Na základě zkušeností z předchozích měření předpokládáme, že aktivní oxid křemičitý tvoří necelé 2/3 celkového obsahu oxidu křemičitého, proto tento požadavek můžeme taktéž požadovat za splněný.

2.1.2 Mechanické vlastnosti

Měření a popis mechanických vlastností bylo předmětem bakalářské práce kolegyně Sokolové [21]. V závěru její práce se dozvídáme, že jsou srovnatelné s vlastnostmi čerstvého popílku. Dále se budeme zabývat pouze jemností. Aby popílek vyhověl požadavku normy ČSN EN 450-1, musí být maximální zbytek na síť 45 mikronů maximálně 40 %.

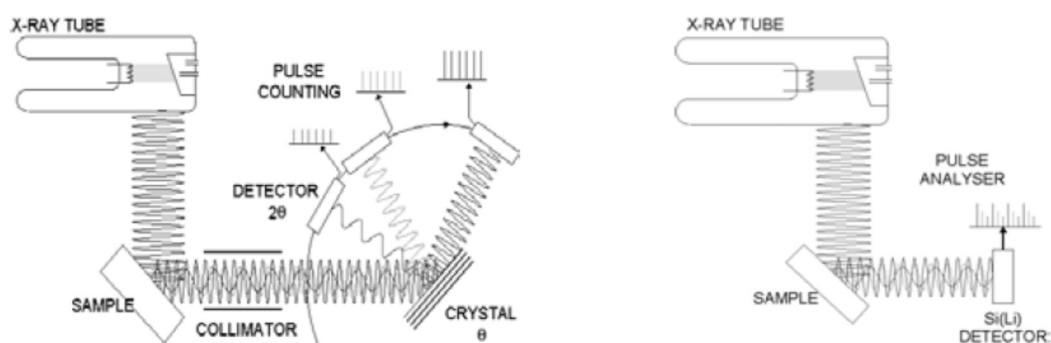
2.2 Použité metody

2.2.1 Rentgenfluorescenční analýza – XRF

Jedná se o jednu z nejuniverzálnějších metod a lze ji využít pro analýzu téměř všech prvků ve vzorcích pevného i kapalného skupenství. Umožňuje analyzovat současně prvky s koncentračním rozsahem od 0,0001 % hmotnosti až po 100 %. Další výhodou je nedestruktivnost analýzy a snadná příprava vzorků, ve srovnání s ostatními metodami, kdy vzorek musí být převeden do roztoku. [22]

Rentgenfluorescenční spektrometrie využívá interakci záření o vysoké energii s atomy vzorku. Důsledkem je vysokoenergetická ionizace atomu, při které dochází k vyrazení elektronu na některé z vnitřních hladin. Jeho místo je okamžitě nahrazeno elektronem z vyšší energetické hladiny atomu. Tento jev je doprovázen uvolněním přebytečné energie ve formě fotonu. Množství energie je dáno energetickým rozdílem hladin, mezi kterými došlo k přeskočení elektronu. Tento rozdíl udává vlnovou délku emitovaného fotonu charakteristického záření. V případě XRF se ionizuje rentgenovým zářením a detekuje se vzniklé charakteristické rentgenové záření. [23]

Přístroje používané pro tuto metodu se nazývají rentgenfluorescenční spektrometry a dělíme je na dva základní typy. První z nich je vlnově disperzní spektrometr, který k buzení využívá tzv. rentgenky. Monochromatizace záření je prováděna difrakčními krystaly a k detekci se využívá plynově proporcionální detektor. Druhým typem je energiově disperzní spektrometr. Funkci monochromátoru zde přebírá polovodičový detektor a dopadají do něho fotony vybuzeného charakteristického záření všech prvků najednou. K buzení se používají rentgenky nebo radionuklidové zdroje. Schémata obou typů zařízení jsou znázorněna na následujícím obrázku. [23]



Obr. 11: Vlnově a energiově disperzní spektrometr [23]

Analýza XRF byla provedena v laboratoři rentgenové difraktometrie a spektrometrie na Vysoké škole chemicko-technologické v Praze.

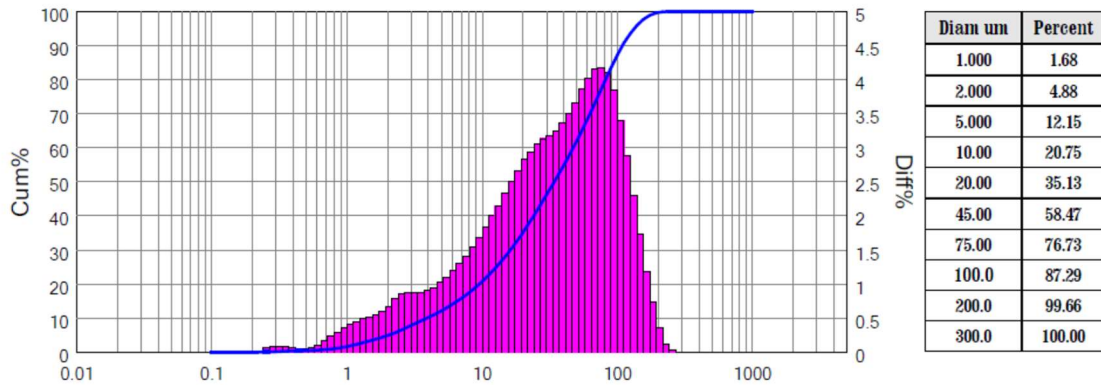
2.2.2 Laserová difrakce

Tato metoda byla podrobně popsána v kapitole 1.6 Měření velikosti částic pomocí laserové difrakce v teoretické části.

Pro určení granulometrie vzorků z vrtu V2 byl použit přístroj Mastersizer 2000/MU (Malvern Instruments Ltd., UK), který pro vyhodnocení využívá Fraunhoferovu aproximaci. Měření probíhá v průtočném systému. Výsledek je průměrem ze tří měření, přičemž každé měření sestává z 12 000 snímků. Měření bylo prováděno na katedře anorganické technologie fakulty chemicko-technologické na Univerzitě Pardubice.

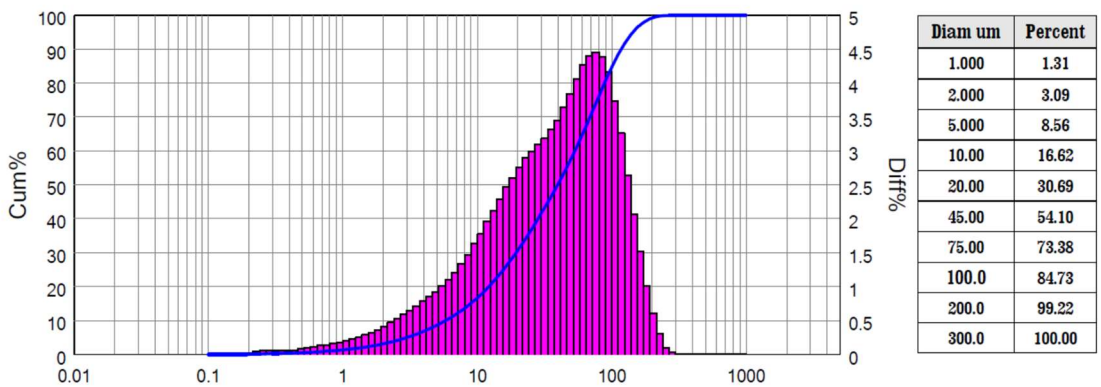
Pro srovnání výsledků vyhodnocených pomocí Fraunhoferovy teorie a teorie Mie, byl jeden vzorek zkoumán na přístroji Bettersizer ST, který umožňuje použití obou dvou teorií. Ukázalo se, že Mie teorie hodnotí vzorek jako hrubší.

D[4,3]: 47.05 um	D[3,2]: 8.975 um	SSA: 278.6 m ² /kg	OBS.: 10.12 %	
D[2,1]: 1.169 um	D[1,0]: 0.471 um	SPAN: 3.084	Residual: 1.345 %	
D03 = 1.382 um	D06 = 2.364 um	D10 = 3.904 um	D16 = 7.135 um	D25 = 12.71 um
D75 = 71.64 um	D50 = 34.13 um	D84 = 91.10 um	D90 = 109.1 um	D97 = 148.6 um



Obr. 12: Výstup z přístroje Bettersizer ST-Fraunhoferova teorie

D[4,3]: 52.26 um	D[3,2]: 11.07 um	SSA: 225.9 m ² /kg	OBS.: 7.12 %	
D[2,1]: 1.084 um	D[1,0]: 0.396 um	SPAN: 2.813	Residual: 0.371 %	
D03 = 1.950 um	D06 = 3.553 um	D10 = 5.857 um	D16 = 9.604 um	D25 = 15.68 um
D75 = 77.95 um	D50 = 39.67 um	D84 = 98.13 um	D90 = 117.4 um	D97 = 159.9 um



Obr. 13: Výstup z přístroje Bettersizer ST-teorie Mie

2.2.3 Prosévání za sucha

Prosévání neboli mechanické síťování je nejjednodušším postupem frakcionace. Pojmem frakcionace označujeme separační metodu, používanou k rozdělení sypkého materiálu na frakce, které obsahují částice s přibližně stejnou velikostí. Při síťování látka prochází přepážkou (sítím) s otvory vymezené velikosti.

Cílem této metody je hodnocení složení látky nebo získání potřebné frakce k dalšímu zpracování. [24]

Síta se vyrábí z odolného materiálu jako je např. mosazné pletivo. Pro jemnější síta se používá hedvábí nebo polyamid. Tvar ok je nejčastěji kruhový nebo čtvercový. Vlastní síto bývá fixováno v kovovém rámu. Dále je potřeba víko síta a záchytná nádoba. Podíl částic, který zůstane na síti, se nazývá nadsítiné a obsahuje veškeré částice větší, než je oko síta. Naopak podíl, který sítem projde, zahrnuje částice menší než oko síta a nazývá se podsítiné. [24]

K sítování se používají vibrační prosévací přístroje, obsahující vibrační zařízení, které pohybuje síty ve vertikálním směru s frekvencí 2000-7000 kmitů za minutu. Kmity jsou vyvolávány elektromagneticky nebo výstředníkem. Účinnost těchto přístrojů je poměrně vysoká. [24]

Průběh sítování se nesmí urychlovat tlakem, třením nebo poklepáváním na prosévanou látku. Další podmínkou účinného prosévání je použití dokonale suchého materiálu, který proséváme po menších částech, aby nedocházelo k ucpávání ok síta. Po ukončení procesu se síto opatrně rozebere, tak aby nedošlo ke ztrátě materiálu. Použité síto se důkladně očistí jemným kartáčkem nebo štětcem. [24]

Cílem tohoto experimentu bylo oddělit hrubou část vzorku sítem určité velikosti tak, aby nově vzniklý vzorek vyhověl podmínce normy, že zbytek na síti 45 mikronů musí být maximálně 40 %. Parametrem pro určení vhodného síta byl tedy zbytek na síti 45 μm . Vycházelo se z modelu, který byl k dispozici ještě před zahájením této práce a byl zpracován z výsledků granulometrie vzorků, které byly odebírány přímo při provádění vrtu V2.

Před provedením samotného prosévání, byly nejprve všechny vzorky vysušeny do ustálené hmotnosti. Vysoušení probíhalo v sušárně při teplotě 105°C. Následovalo prosévání vzorku o hmotnosti 200 gramů na elektromagnetické prosévače značky Matest ve třech pětiminutových cyklech.



Obr. 14: Elektromagnetická prosévačka

Pro zvýšení účinnosti byly ke vzorku přidávány 3 keramické kuličky. Po každém cyklu bylo zváženo podsítné i nadsítné. Po ukončení experimentu byly z podsítného i nadsítného odebrány vzorky, které se následně odeslaly na granulometrický rozbor pomocí laserové difrakce.



Obr. 15: Ukázka nadsítného a podsítného po třetím cyklu

2.2.4 Prosévání za mokra

Další vyzkoušenou metodou bylo prosévání za mokra. Nejprve se vzorek vysušil na ustálenou hmotnost. Následovalo zvlhčení vzorku do jeho původní vlhkosti, která byla opět zjištěna z modelu a rozboru vlhkosti provedeného dříve. Takto navlhčený vzorek byl přesunut na stanovené síto, jako v předchozí metodě a síto bylo proplachováno vodou. Protože v nádobě s podílem podsítného bylo velké množství vody, bylo třeba přebytečnou vodu vyvařit a následně zbytek vložit do sušárny, vysušit a zvážit. Podíl nadsítného, který zůstal na síti se vypláchl vodou do jiné nádoby, opět se přebytečná voda vyvařila a zbytek se vysušil a následně zvážil.

Jak je patrné z postupu, tato metoda je velice časově náročná. Vyváření jednoho vzorku trvalo několik hodin. Navíc po porovnání výsledků této metody a metody prosévání za sucha, se ukázalo, že se prošlo mnohem méně materiálu. Z těchto důvodů se metoda provedla pouze na jednom zkušebním vzorku a dále se v ní nepokračovalo.

2.2.5 Normová zkouška

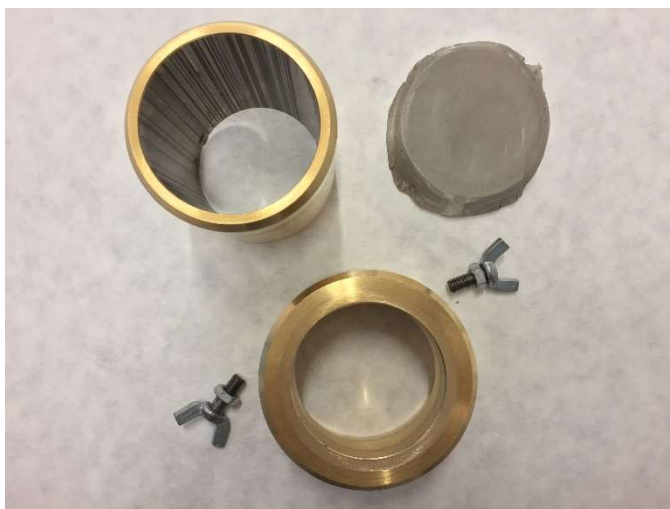
Pro ověření výsledků zkoušky proséváním za sucha bylo nutné použít normovou zkoušku, která je popsána v normě ČSN EN 451-2. Tato norma nese název Metoda zkoušení popílku – Část 2: Stanovení jemnosti proséváním za mokra a uvádí postup pro stanovení jemnosti popílku proséváním za mokra na síti 0,045 mm. [25]

Kompletní přístroj potřebný pro tuto metodu je znázorněn na obrázku níže a obsahuje následující součásti:

- síto,
- rozstříkovací trysku,
- tlakoměr. [24]

Rám síta musí být z trvanlivého materiálu, který nepodléhá korozi. Jedná se v podstatě o trubku jmenovitého průměru 50 mm se zařízením na uvolnění a výměnu tkaniny. Tkanina síty je z nerezavějící oceli a má rozměr otvorů 45 mikronů. Nesmí mít viditelné záhyby, vrypy, nedostatečné napnutí nebo jiné nepravidelnosti zjištěné

vizuální kontrolou. Tkanina síta musí být utěsněna v pouzdře a napnutá v rámu, aby nedošlo ke ztrátě materiálu. [25]



Obr. 16: Sítko s rámem

Rozstříkovací tryska musí být také zhotovena z kovu, který je odolný vůči korozi působením vody a její vnitřní průměr je 17,5 mm. Tryska obsahuje několik otvorů o průměru 0,5 mm, které musí být plně funkční. Uprostřed je otvor vyvrtaný rovnoběžně s podélnou osou. Dále zde musí být mezilehlá řada s 8 otvory vyvrtaných pod úhlem 5° k podélné ose, vzdálenost jejich středů musí být 6 mm. Poslední je řada krajní, obsahující také 8 otvorů, které jsou vyvrtané pod úhlem 10° k podélné ose a vzdálenost jejich středů činí 11 mm. [25]



Obr. 17: Rozstříkovací tryska

Minimální průměr tlakoměru musí být 80 mm a maximální rozsah 160 kPa s dělením maximálně po 5 kPa. Přesnost tlakoměru musí odpovídat ± 5 kPa. [25]



Obr.18: Zařízení potřebné pro normovou zkoušku

Dále je potřeba sušárna s nucenou cirkulací vzduchu nastavitelná na (105 ± 5) °C a váhy s přesností 0,001 g. [25]

Vzorek o hmotnosti minimálně 1 gram se vysuší v sušárně do ustálené hmotnosti. Vysušený vzorek o hmotnosti přibližně 1,0 g se zváží s přesností na 0,001 g a vloží se na suché, čisté síto. Vzorek se navlhčí například ruční oplachovací stříčkou. Nastaví se tlak vody na (80 ± 5) kPa, síto se umístí pod trysku a promývá se po dobu (60 ± 10) sekund. Horní konec trysky musí být udržován mezi 10 a 15 mm pod horní hranou rámu síta. Sítem se vodorovně krouží rychlostí asi 1 otočení za sekundu. Po dokončení se síto odejme od trysky, opláchne se asi 50 ml alkoholu nebo destilované vody a odsaje se zbytek vlhkosti ze spodní strany tkaniny. Síto se zůstatkem vzorku se vysuší do ustálené hmotnosti při teplotě (105 ± 5) °C. Po vyjmutí ze sušárny se síto nechá vychladnout a zváží se zůstatek s přesností 0,001 g. [25]

Následuje výpočet jemnosti vzorku. Ta se vypočte jako hmotnostní procento s přesností na 0,10 % podle vzorce:

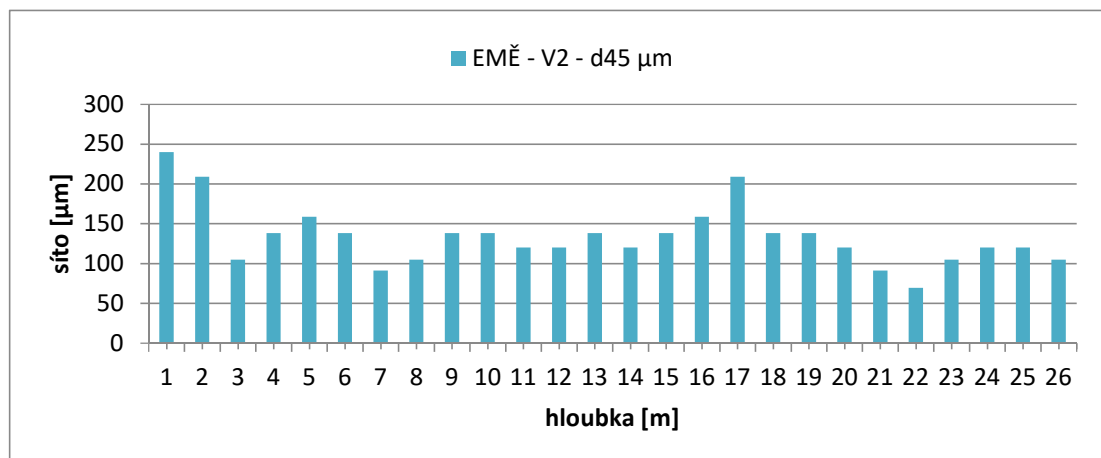
$$r = \frac{f \times m_s}{m_0} \times 100$$

kde	r	je jemnost vzorku vyjádřena zůstatkem podílu na síti 0,045 mm v procentech hmotnosti
	f	korekční faktor (v našem případě $f = 1$, předpokládáme síto bez vad)
	m_s	hmotnost zůstatku vzorku (g)
	m_0	hmotnost zkušebního vzorku. [25]

2.3 Výsledky a diskuse

2.3.1 Určení síta

Výběr velikosti síta vycházel z modelu, který byl zpracován dříve. Parametrem byla hodnota zbytku na síti velikosti 45 mikronů, která dle normy nesmí být větší než 40 %. Hledali jsme tedy takové síto, přes které když prosejeme vstupní materiál, dostaneme popílek, který na síti 45 mikronů bude mít maximální zbytek 40 %. Jinými slovy odebíráme ze vzorku tu část, která je nad danou velikostí síta tak, aby po prosetí zbytek vyhovoval zmíněné podmínce. K dispozici byla síta s velikostí ok 75, 90, 100, 125, 150, 200 a 250 mikronů.



Graf 3: Výchozí graf pro výběr velikosti síta

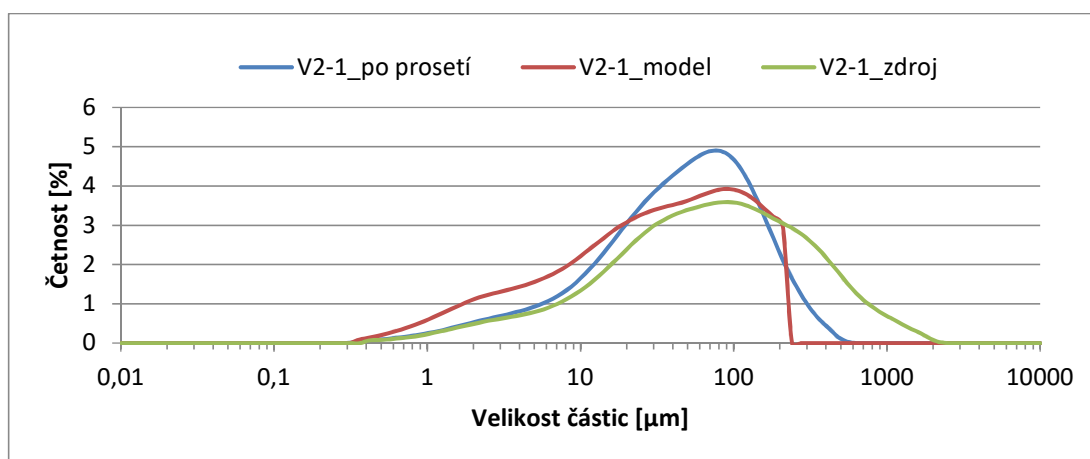
Vzhledem k tomu, že velikost reálného síta není shodná s tou modelovou, byla vždy vybrána nejbližší možná velikost. Zvolená síta pro jednotlivé vzorky jsou uvedena v následující tabulce.

Tab. 6: Zvolené velikosti sít pro jednotlivé vzorky

Velikost síta [μm]	Vzorek-hloubka [m]
75	22
90	7, 21
100	3, 8, 23, 26
125	4, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 20, 24, 25
150	5, 16
200	2, 17
250	1

2.3.2 V2-1

Na následujícím grafu je znázorněno rozložení velikosti částic ve vzorku. Řada V2-n_zdroj ukazuje granulometrii původního vzorku, řada V2-n_model znázorňuje předpokládaný stav po oddělení nejhrubších frakcí zvoleným sítem. Řada V2-n_po prosetí odpovídá výsledkům laserové difrakce po prosetí. Je patrné, že zde není vidět ostrá hranice v místě velikosti síta, a tedy fakt, že frakce nadsítná není ve vzorku přítomna. Křivka tedy vykazuje jistý podíl nad velikostí oka použitého síta. To je dané tím, že při měření laserovou difrakcí model předpokládá normální rozdělení velikosti částic. Jiné rozdělení bohužel nelze použít.



Graf 4: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-1

Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje více hrubších částic, a naopak méně těch jemnějších, než předpokládal model.

Vzhledem k tomu, že původní vzorky odesílané na granulometrický rozbor byly odebírány v červnu roku 2018 přímo na složišti, a tedy za jiných podmínek než

používané vzorky, které byly skladovány v plastových kyblících v laboratoři, byly všechny odeslány na nový rozbor granulometrie. Výsledky budou tedy porovnávány s výsledky tohoto nového měření.

Protože velikost ok skutečných sít neodpovídá těm z laserové difrakce, jak bylo již zmíněno výše, byl proveden dopočet pomocí lineární interpolace.

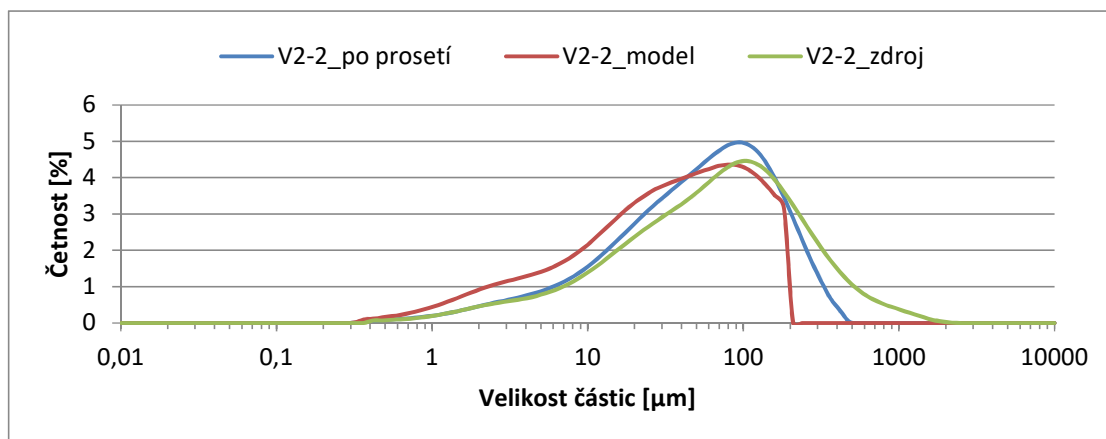
Nakonec byl proveden ještě dopočet velikosti síta tak, abychom po provedení normové zkoušky po prosetí dostali výsledek, který vychází z modelu. Opět byla použita lineární interpolace.

Tab. 7: Výsledky vzorku V2-1

V2-1				
	síto	dopočet z modelu	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	239	21,90 %		
	250	21 %	39 %	
	275	18,97 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	239	48,6831		
	250	49,2501	57,5769	51,24
	275	50,5387		
dopočet síta	208	46,5976		
	217,8488	47,2602		49,2501
	239	48,6831		

Dle dopočtu ze vstupního vzorku by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 250 mikronů měl činit 21 %, po prosetí tento zbytek vychází 39 %. To znamená, že propadlo o 18 % materiálu méně a teoreticky je tento vzorek na vstupu hrubší, než se předpokládalo. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 40,92 %, po provedení nového měření už tento zbytek vychází 49,25 %. Po prosetí zbytek zjištěný laserovou difrakcí činil 57, 58 %. Dle normové zkoušky bylo zjištěno nadsítné na síť 45 mikronů v tomto případě 51,24 %, což potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 49,25 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 217,8 mikronů, tedy o 32,2 mikronů menší, než je velikost síta použitého.

2.3.3 V2-2



Graf 5: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-2

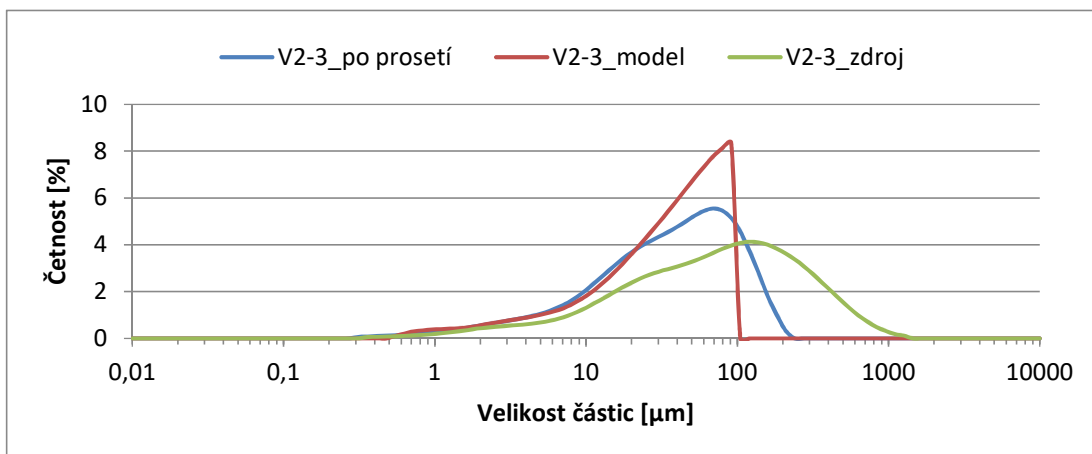
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje více hrubších a méně jemných částic, než předpokládal model.

Tab. 8: Výsledky vzorku V2-2

V2-2				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	181	22,45 %		
	200	20 %	13 %	
	208	18,84 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	181	48,7231		
	200	50,3281	54,5812	51,89
	208	51,0039		
dopočet síta	181	48,7321		
	181,5098	48,7661		50,3281
	208	51,0039		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 200 mikronů měl činit 20 %, po prosetí je tento zbytek 13 %. Propadlo tedy o 7 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 40,18 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 50,33 %. Po prosetí zbytek činil 54,58 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 51,89 %, což potvrzuje předpoklad modelu a zhruba odpovídá i kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 50,33 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 181,5 mikronů, tedy o 18,5 mikronů menší, než je velikost síta použitého.

2.3.4 V2-3



Graf 6: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-3

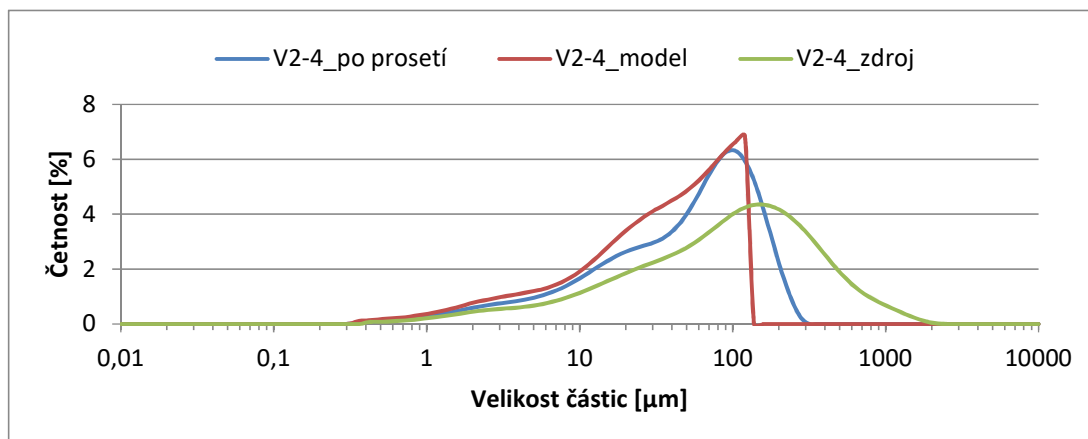
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje téměř stejné množství jemných částic, ale méně hrubších částic, než kolik předpokládal model.

Tab. 9: Výsledky vzorku V2-3

V2-3				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	91	47,20 %		
	100	44 %	40 %	
	104	43,23 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	91	27,7528		
	100	31,2506	41,7111	33,01
	104	32,8051		
dopočet síta	91	27,7528		
	95,4729	29,4911		31,2506
	104	32,8051		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 100 mikronů měl činit 44 %, po prosetí je tento zbytek 40 %. Propadlo tedy o 4 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 37,52 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 31,25 %. Po prosetí zbytek činil 41,71 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 33,01 %, což potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 31,25 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 95,5 mikronů, tedy o 4,5 mikronů menší, než je velikost síta použitého.

2.3.5 V2-4



Graf 7: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-4

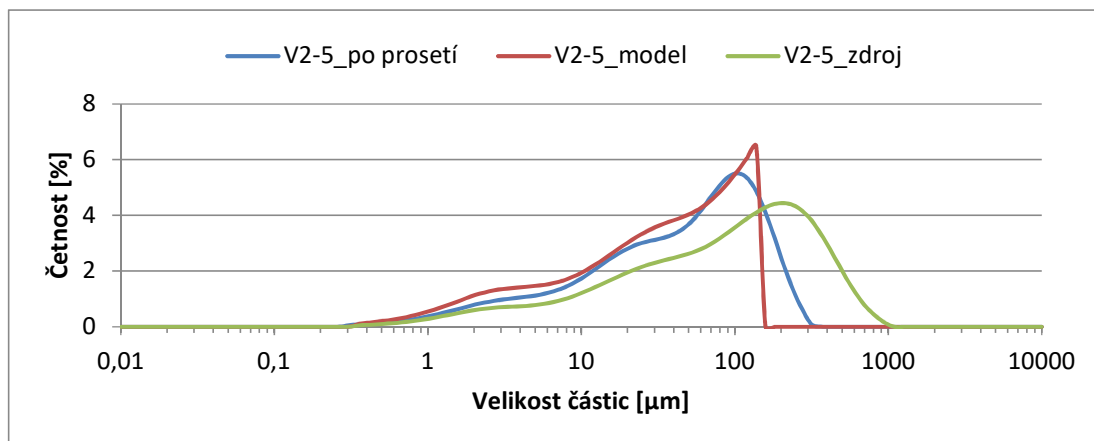
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje o něco méně jemných částic, než předpokládal model.

Tab. 10: Výsledky vzorku V2-4

V2-4				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	120	46,52 %		
	125	45 %	37 %	
	138	42,28 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	120	39,3601		
	125	40,5974	54,7748	40,75
	138	43,8146		
dopočet síta	120	39,3601		
	124,3834	40,4448		40,5974
	138	43,8146		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 125 mikronů měl činit 45 %, po prosetí je tento zbytek 37 %. Propadlo tedy o 8 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 39,00 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 40,60 %. Po prosetí zbytek činil 54,77 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 40,75 %, což potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 40,60 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 124,4 mikronů, tedy o 0,6 mikronů menší, než je velikost síta použitého.

2.3.6 V2-5



Graf 8: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-5

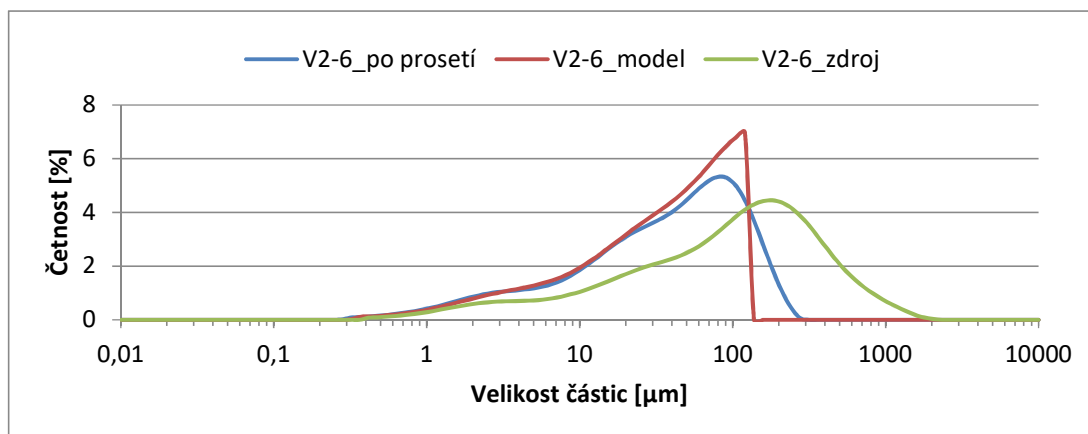
Z grafu můžeme vidět, že vzorek se téměř shoduje s předpokladem modelu, pouze zde není vidět ostrá hranice na velikosti 150 mikronů.

Tab. 11: Výsledky vzorku V2-5

V2-5				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	138	41,85 %		
	150	39 %	36 %	
	158	37,75 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	138	39,2395		
	150	41,6406	50,6519	40,80
	158	43,2414		
dopočet síta	138	39,2395		
	154,2009	42,4812		41,6406
	158	43,2414		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 150 mikronů měl činit 39 %, po prosetí je tento zbytek 36 %. Propadlo tedy o 3 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 39,88 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 41,64 %. Po prosetí zbytek činil 50,65 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 40,80 %, což potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 41,64 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 154,2 mikronů, tedy o 4,2 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.7 V2-6



Graf 9: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-6

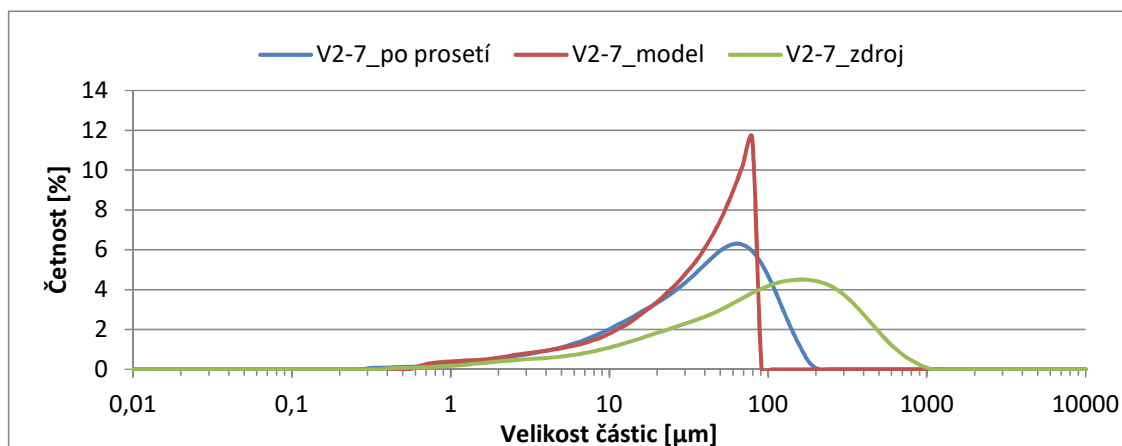
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje téměř stejné množství jemných částic, ale méně hrubších, než byl předpoklad modelu.

Tab. 12: Výsledky vzorku V2-6

V2-6				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	120	48,80 %		
	125	48 %	45 %	
	138	44,70 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	120	37,4752		
	125	38,7629	45,1821	35,39
	138	42,1109		
dopočet síta	138	42,1109		
	138,1193	42,1358		38,7629
	158	46,2874		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 125 mikronů měl činit 48 %, po prosetí je tento zbytek 45 %. Propadlo tedy o 3 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 39,86 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 38,76 %. Po prosetí zbytek činil 45,18 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 35,39 %, což potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 38,76 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 138,1 mikronů, tedy o 13,1 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.8 V2-7



Graf 10: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-7

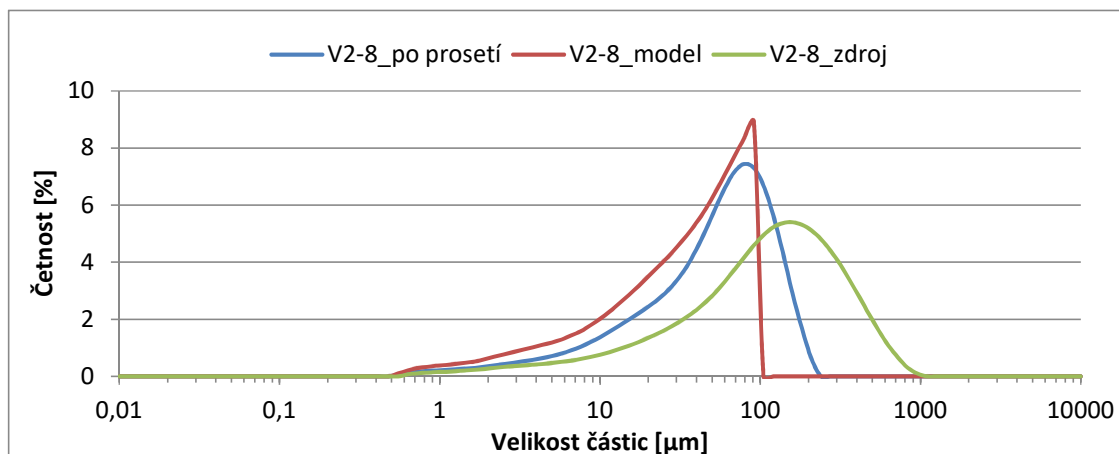
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje téměř stejně jemných částic jako mode, ale podstatně méně těch hrubších.

Tab. 13: Výsledky vzorku V2-7

V2-7				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	79	57,72 %		
	90	54 %	45 %	
	91	53,89 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	79	24,3884		
	90	30,1455	41,8452	32,47
	91	30,6688		
dopočet síta	79	24,3884		
	85,5585	27,8209		30,1455
	91	30,6688		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 90 mikronů měl činit 54 %, po prosetí tento zbytek vychází 45 %. Propadlo tedy o 9 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 38,80 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 30,15 %. Po prosetí zbytek činil 41,85 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 32,47 %, což potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 30,15 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 85,6 mikronů, tedy o 4,4 mikronů menší, než je velikost síta použitého.

2.3.9 V2-8



Graf 11: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-8

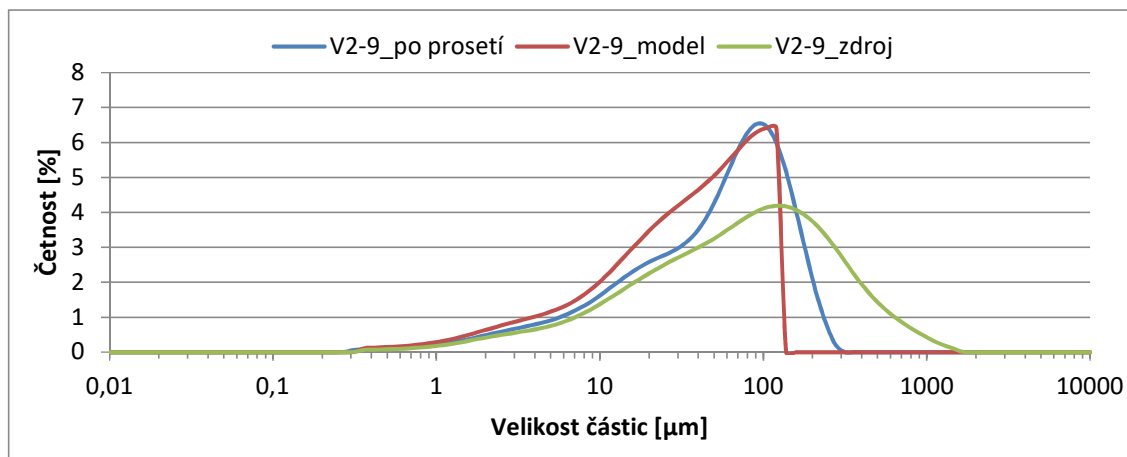
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje méně jemnějších i hrubších částic, než předpokládal model.

Tab. 14: Výsledky vzorku V2-8

V2-8				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	91	61,04 %		
	100	58 %	47 %	
	104	56,45 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	91	37,2530		
	100	41,8314	56,9667	46,08
	104	43,8662		
dopočet síta	91	37,2530		
	91,6483	37,5828		41,8314
	104	43,8662		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 100 mikronů měl činit 58 %, po prosetí je tento zbytek 47 %. Propadlo tedy o 11 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 μm být 37,39 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 41,83 %. Po prosetí zbytek činil 56,97 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 μm 46,08 %, což zhruba potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 41,83 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 91,6 mikronů, tedy o 8,4 mikronů menší, než je velikost síta použitého.

2.3.10 V2-9



Graf 12: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-9

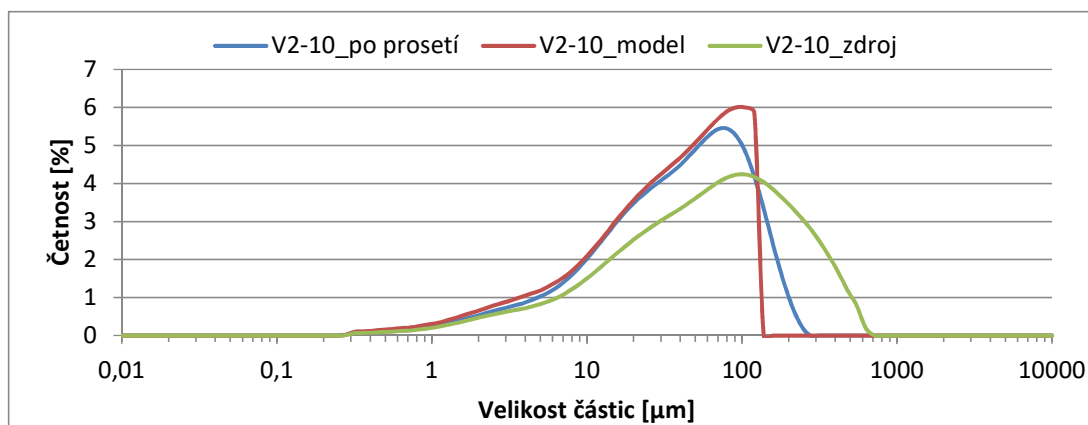
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje méně jemnějších a středně hrubých částic a téměř stejně těch hrubých, jak předpokládal model.

Tab. 15: Výsledky vzorku V2-9

V2-9				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	120	39,37 %		
	125	38 %	29 %	
	138	35,18 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	120	37,7989		
	125	38,9157	55,9712	40,90
	138	41,8196		
dopočet síta	120	37,7989		
	116,1168	37,5828		38,9157
	138	41,8196		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 125 mikronů měl činit 38 %, po prosetí je tento zbytek 29 %. Propadlo tedy o 9 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 39,26 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 38,92 %. Po prosetí zbytek činil 55,97 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 40,90 %, což potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 38,92 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 116,1 mikronů, tedy o 8,9 mikronů menší, než je velikost síta použitého.

2.3.11 V2-10



Graf 13: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-10

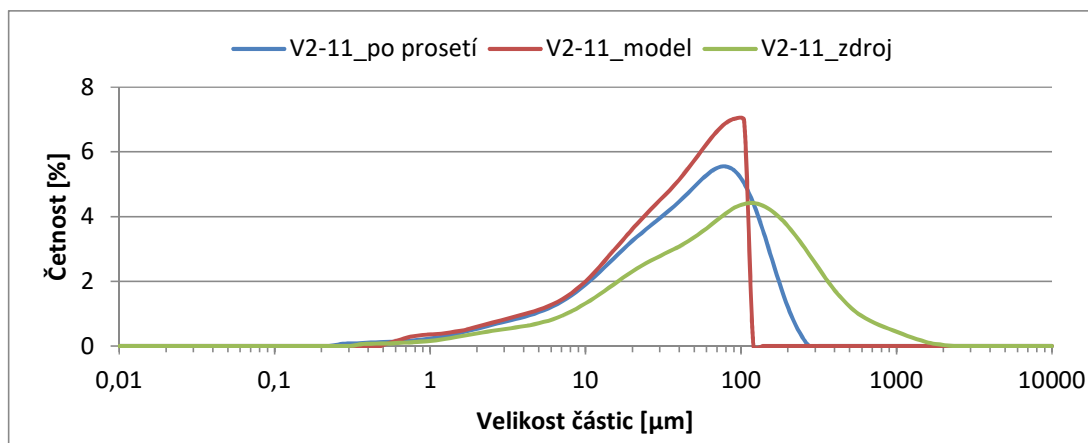
Z grafu můžeme vidět, že vzorek má téměř stejné složení jako model, pouze o něco méně hrubších částic.

Tab. 16: Výsledky vzorku V2-10

V2-10				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	120	33,43 %		
	125	32 %	23 %	
	138	29,26 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	120	36,9246		
	125	37,9575	44,3486	34,39
	138	40,6428		
dopočet síta	138	40,6428		
	143,5016	41,5250		37,9575
	158	43,8496		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 125 mikronů měl činit 32 %, po prosetí je tento zbytek 23 %. Propadlo tedy o 9 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 μm být 37,94 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 37,96 %. Po prosetí zbytek činil 44,35 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 μm 34,39 %, což zhruba potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 37,96 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 143,5 mikronů, tedy o 18,5 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.12 V2-11



Graf 14: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-11

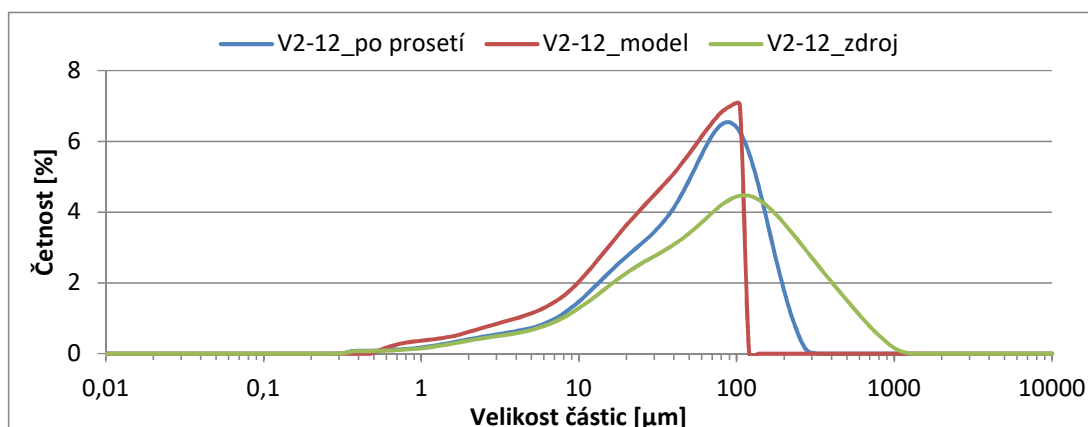
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje méně středně hrubších a hrubých částic, než předpokládal model.

Tab. 17: Výsledky vzorku V2-11

V2-11				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	120	38,46 %		
	125	37 %	26 %	
	138	34,04 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	120	39,1444		
	125	40,2772	46,1486	37,55
	138	43,2224		
dopočet síta	120	39,1444		
	137,0378	43,0044		40,2772
	138	43,2224		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 125 mikronů měl činit 37 %, po prosetí je tento zbytek 26 %. Propadlo tedy o 11 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 41,33 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 40,28 %. Po prosetí zbytek činil 46,15 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 37,55 %, což zhruba potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 40,28 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 137 mikronů, tedy o 12 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.13 V2-12



Graf 15: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-12

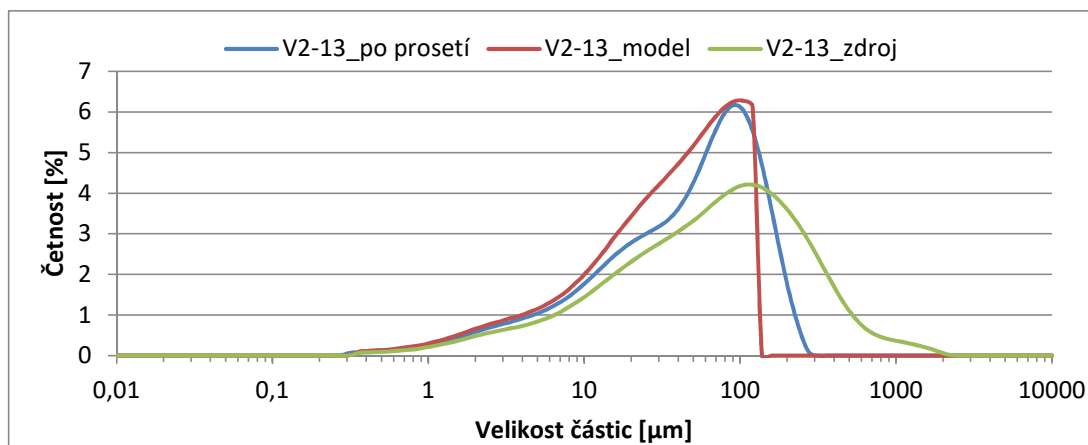
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje méně jemných i hrubých částic, než předpokládal model.

Tab. 18: Výsledky vzorku V2-12

V2-12				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	120	38,72 %		
	125	37 %	30 %	
	138	34,26 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	120	40,0651		
	125	41,1946	55,4194	38,49
	138	44,1313		
dopočet síta	120	40,0651		
	136,9726	43,8992		41,1946
	138	44,1313		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 125 mikronů měl činit 37 %, po prosetí je tento zbytek 30 %. Propadlo tedy o 7 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 40,99 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 41,19 %. Po prosetí zbytek činil 55,42 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 38,49 %, což zhruba potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 41,19 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 137 mikronů, tedy o 12 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.14 V2-13



Graf 16: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-13

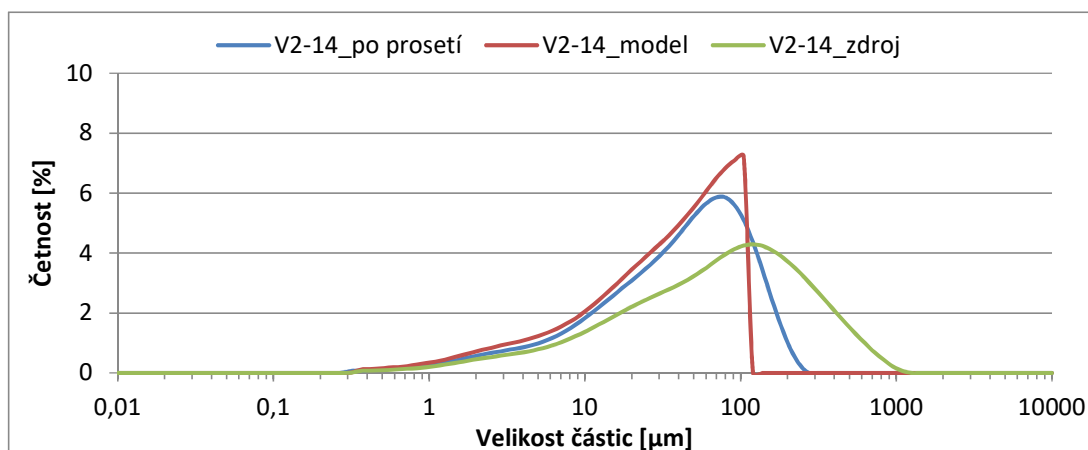
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje téměř stejně jemných a hrubých částic jako model, pouze méně těch středně hrubých.

Tab. 19: Výsledky vzorku V2-13

V2-13				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítne)	120	36,94 %		
	125	36 %	26 %	
	138	32,73 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	120	37,1010		
	125	38,1944	52,1460	35,48
	138	41,0374		
dopočet síta	120	37,1010		
	137,4122	40,9089		38,1944
	138	41,0374		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 125 mikronů měl činit 36 %, po prosetí je tento zbytek 26 %. Propadlo tedy o 10 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 μm být 39,37 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 38,19 %. Po prosetí zbytek činil 52,15 %. Dle normové zkoušky je nadsítne na síť 45 μm 35,48 %, což zhruba potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 38,19 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 137,4 mikronů, tedy o 12,4 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.15 V2-14



Graf 17: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-14

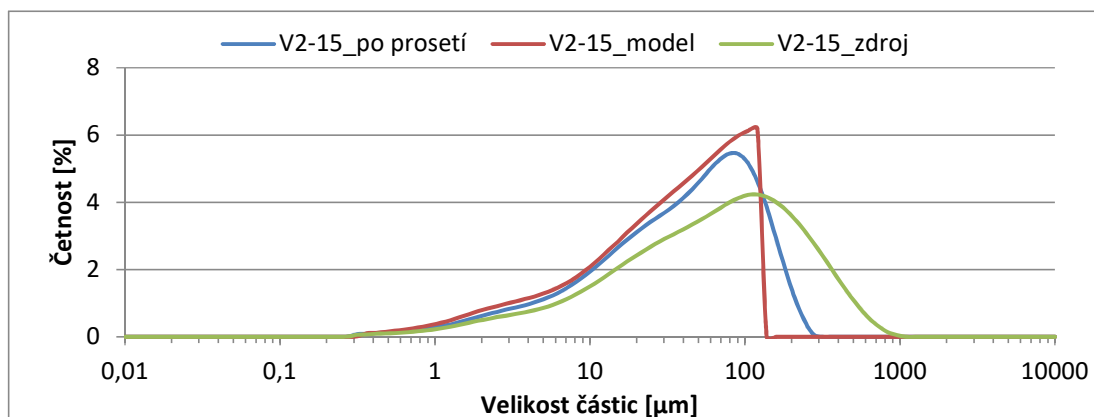
Z grafu můžeme vidět, že vzorek má téměř stejné složení jako model, pouze o něco méně hrubších částic.

Tab. 20: Výsledky vzorku V2-14

V2-14				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítne)	120	38,85 %		
	125	38 %	26 %	
	138	34,56 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	120	38,0276		
	125	39,1561	46,9987	38,51
	138	42,0902		
dopočet síta	120	38,0276		
	127,8625	39,8022		39,1561
	138	42,0902		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 125 mikronů měl činit 38 %, po prosetí je tento zbytek 26 %. Propadlo tedy o 12 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 μm být 41,10 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 39,16 %. Po prosetí zbytek činil 46,99 %. Dle normové zkoušky je nadsítne na síť 45 μm 38,51 %, což potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 39,16 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 127,9 mikronů, tedy o 2,9 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.16 V2-15



Graf 18: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-15

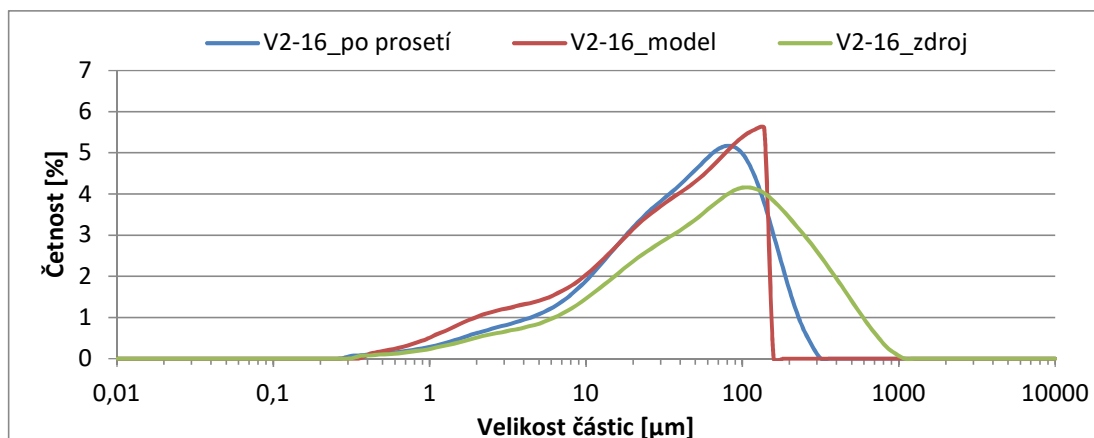
Z grafu můžeme vidět, že vzorek má téměř stejné složení jako model, pouze o něco méně hrubších částic.

Tab. 21: Výsledky vzorku V2-15

V2-15				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	120	34,82 %		
	125	34 %	26 %	
	138	30,59 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	120	36,4092		
	125	37,4857	46,7477	36,57
	138	40,2845		
dopočet síta	120	36,4092		
	129,2530	39,8022		37,4857
	138	40,2845		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 125 mikronů měl činit 34 %, po prosetí je tento zbytek 26 %. Propadlo tedy o 8 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 µm být 37,76 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 37,49 %. Po prosetí zbytek činil 46,75 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 µm 36,57 %, což potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 37,49 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 129,3 mikronů, tedy o 4,3 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.17 V2-16



Graf 19: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-16

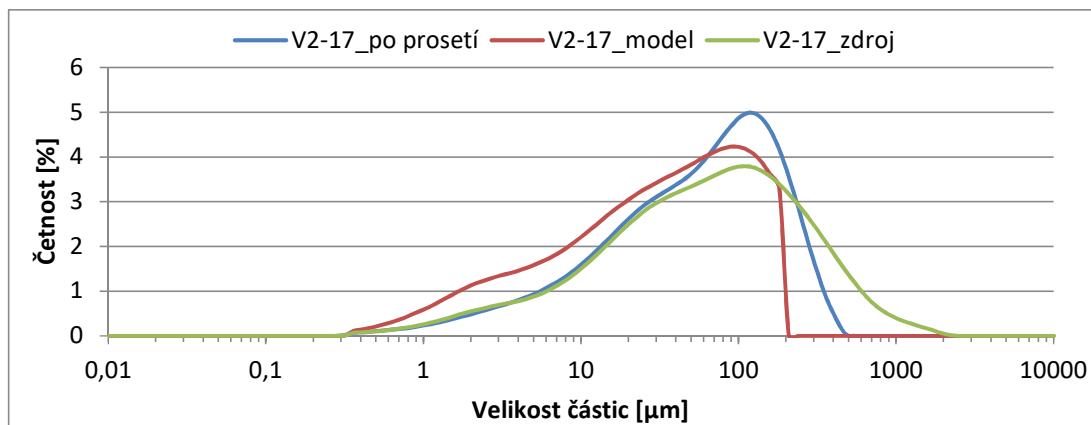
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje méně jemných a hrubých částic a téměř stejně jako předpoklad modelu těch středně hrubých.

Tab. 22: Výsledky vzorku V2-16

V2-16				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	138	31,68 %		
	150	29 %	30 %	
	158	27,66 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	138	40,4758		
	150	42,4605	46,4137	39,39
	158	43,7836		
dopočet síta	158	43,7836		
	172,2181	39,8022		42,4605
	181	46,6103		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 150 mikronů měl činit 29 %, po prosetí tento zbytek vychází 30 %. Propadlo tedy o 1 % materiálu méně a vstupní vzorek je teoreticky hrubší. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 39,71 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 42,46 %. Po prosetí zbytek činil 46,41 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 39,39 %, což potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 42,46 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 172,2 mikronů, tedy o 22,2 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.18 V2-17



Graf 20: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-17

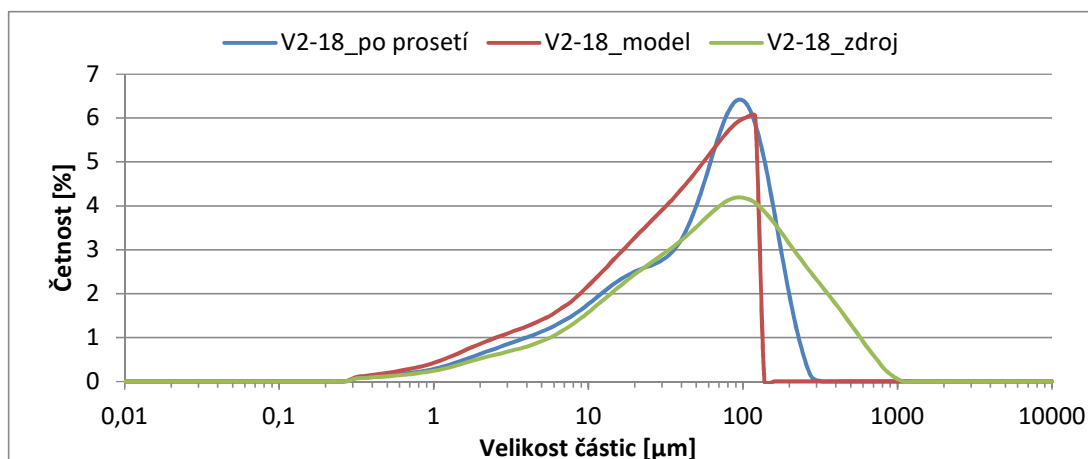
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje méně jemných a středně hrubých částic, a naopak více těch hrubých než předpoklad modelu.

Tab. 23: Výsledky vzorku V2-17

V2-17				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	181	24,61 %		
	200	22 %	18 %	
	208	21,22 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	181	43,8577		
	200	45,5577	56,1519	49,19
	208	46,2735		
dopočet síta	158	41,0669		
	165,0753	41,9254		45,5577
	181	43,8577		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 200 mikronů měl činit 22 %, po prosetí je tento zbytek 18 %. Propadlo tedy o 4 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 µm být 39,36 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 45,56 %. Po prosetí zbytek činil 56,15 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 µm v 49,19 %, což zhruba potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 45,56 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 165,1 mikronů, tedy o 34,9 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.19 V2-18



Graf 21: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-18

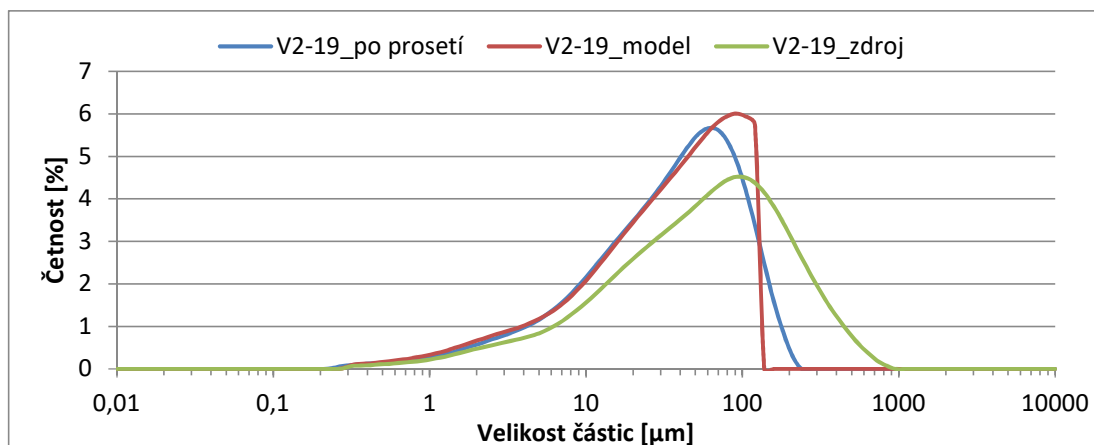
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje méně jemných a středně hrubých částic, a naopak více těch hrubých než předpoklad modelu.

Tab. 24: Výsledky vzorku V2-18

V2-18				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	120	33,21 %		
	125	32 %	22 %	
	138	29,14 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	120	36,2891		
	125	37,3056	53,9988	36,09
	138	39,9485		
dopočet síta	120	36,2891		
	130,9795	38,5213		37,3056
	138	39,9485		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 125 mikronů měl činit 32 %, po prosetí tento zbytek vychází 22 %. Propadlo tedy o 10 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 36,85 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 37,31 %. Po prosetí zbytek činil 53,99 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 36,09 %, což potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 37,31 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 131 mikronů, tedy o 6 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.20 V2-19



Graf 22: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-19

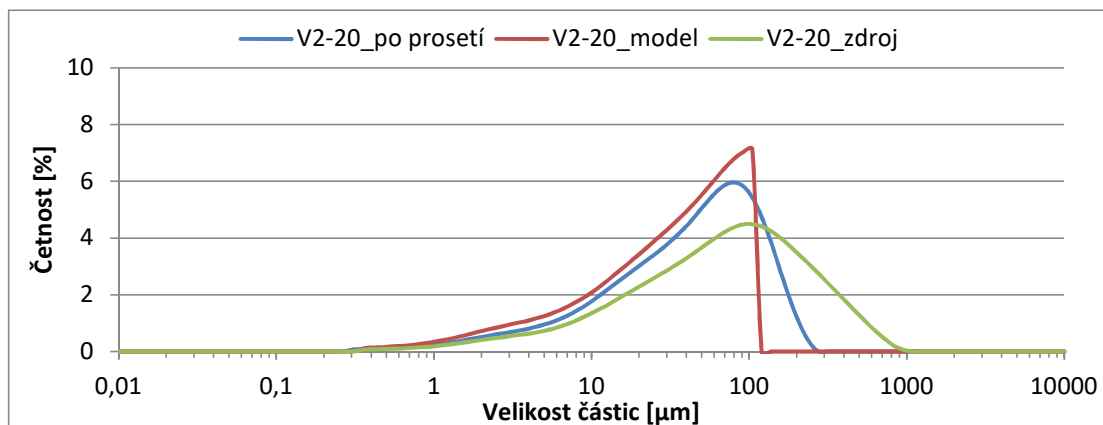
Z grafu můžeme vidět, že vzorek má téměř stejné složení jako model, pouze o něco méně hrubších částic.

Tab. 25: Výsledky vzorku V2-19

V2-19				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	120	30,19 %		
	125	29 %	18 %	
	138	25,81 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	120	37,5230		
	125	38,5475	40,6335	37,55
	138	41,2114		
dopočet síta	120	37,5230		
	129,8680	39,5451		38,5475
	138	41,2114		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 125 mikronů měl činit 29 %, po prosetí tento zbytek vychází 18 %. Propadlo tedy o 11 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 μm být 38,31 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 38,54 %. Po prosetí zbytek činil 40,63 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 μm 37,55 %, což potvrzuje předpoklad modelu a zhruba odpovídá i kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 38,54 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 129,9 mikronů, tedy o 4,9 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.21 V2-20



Graf 23: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-20

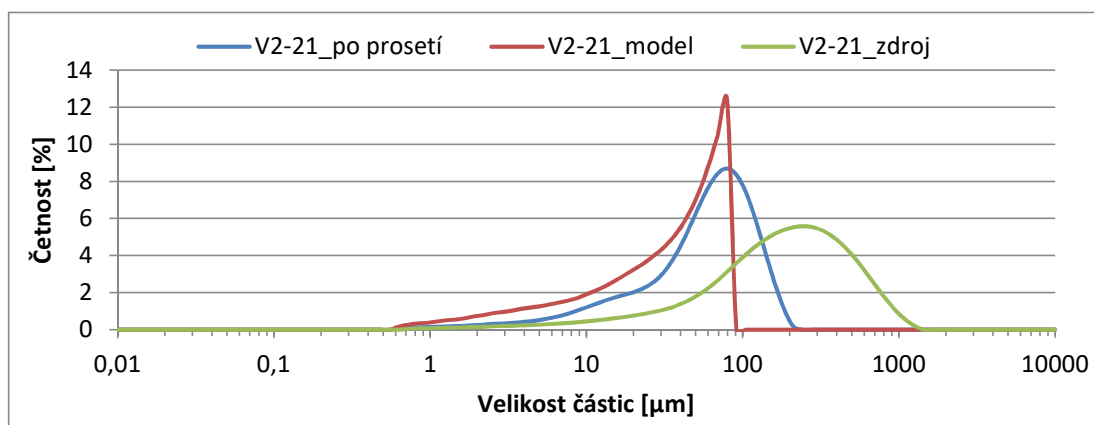
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje méně jemných i hrubých částic, než předpokládal model.

Tab. 26: Výsledky vzorku V2-20

V2-20				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	120	35,67 %		
	125	34 %	26 %	
	138	31,26 %		
zbytek materiálu na síti 45 mikronů [%]	120	39,9377		
	125	41,0081	48,9558	42,53
	138	43,7910		
dopočet síta	104	35,4312		
	118,3968	39,4862		41,0081
	120	39,9377		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síti s velikostí ok 125 mikronů měl činit 34 %, po prosetí je tento zbytek 26 %. Propadlo tedy o 8 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síti 45 μm být 40,81 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 41,01 %. Po prosetí zbytek činil 48,96 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síti 45 μm 42,53 %, což potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 41,01 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 118,4 mikronů, tedy o 6,6 mikronů menší, než je velikost síta použitého.

2.3.22 V2-21



Graf 24: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-21

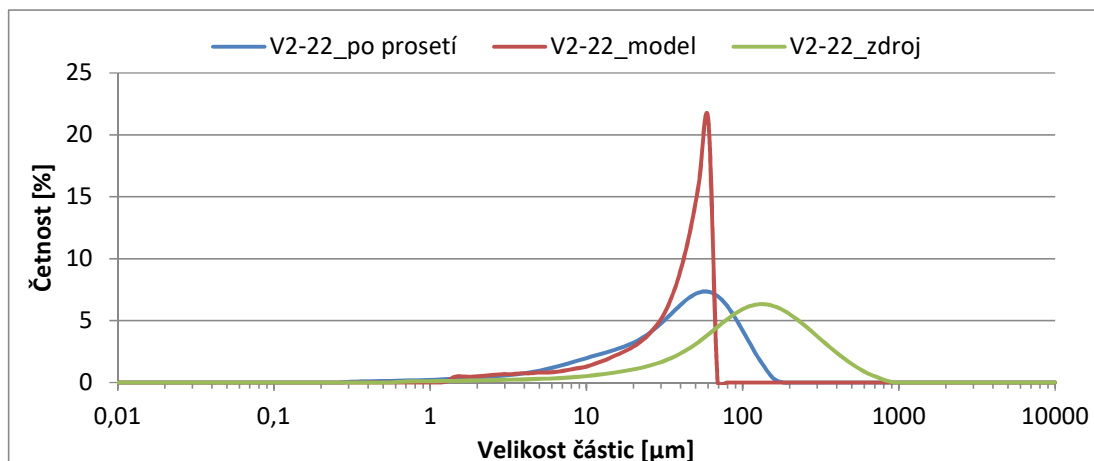
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje méně jemných i hrubých částic, než předpokládal model.

Tab. 27: Výsledky vzorku V2-21

V2-21				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	79	78,97 %		
	90	76 %	80 %	
	91	75,85 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	79	33,3026		
	90	41,2014	62,2536	47,36
	91	41,9194		
dopočet síta	79	33,3026		
	81,4233	35,0427		41,2014
	91	41,9194		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 90 mikronů měl činit 76 %, po prosetí tento zbytek vychází 80 %. Propadlo tedy o 4 % materiálu méně a vstupní vzorek je teoreticky hrubší. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 39,17 %, po provedení nového měření už tento zbytek vychází 41,20 %. Po prosetí zbytek činil 62,25 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 47,36 %, což zhruba potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 41,20 %, museli bychom použít síto s velikostí oka 81,4 mikronů, tedy o 8,6 mikronů menší, než je velikost síta použitého.

2.3.23 V2-22



Graf 25: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-22

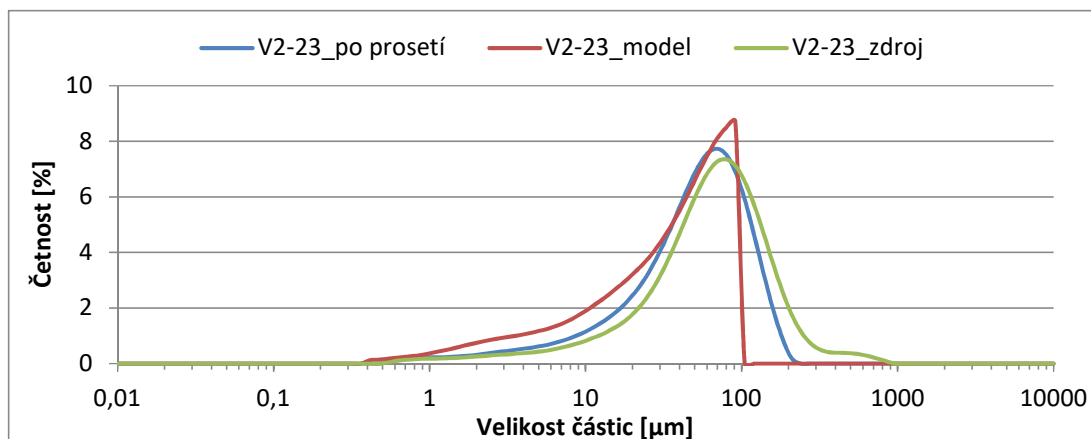
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje podstatně méně hrubých částic, než kolik předpokládal model.

Tab. 28: Výsledky vzorku V2-22

V2-22				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	69	72,78 %		
	75	70 %	61 %	
	79	68,28 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	69	27,5642		
	75	33,7299	41,3158	31,11
	79	37,8404		
dopočet síta	69	27,5642		
	77,5495	36,3499		33,7299
	79	37,8404		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 75 mikronů měl činit 70 %, po prosetí tento zbytek vychází 61 %. Propadlo tedy o 9 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 46,58 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 33,73 %. Po prosetí zbytek činil 41,32 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 31,11 %, což potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 33,73 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 77,5 mikronů, tedy o 2,5 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.24 V2-23



Graf 26: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-23

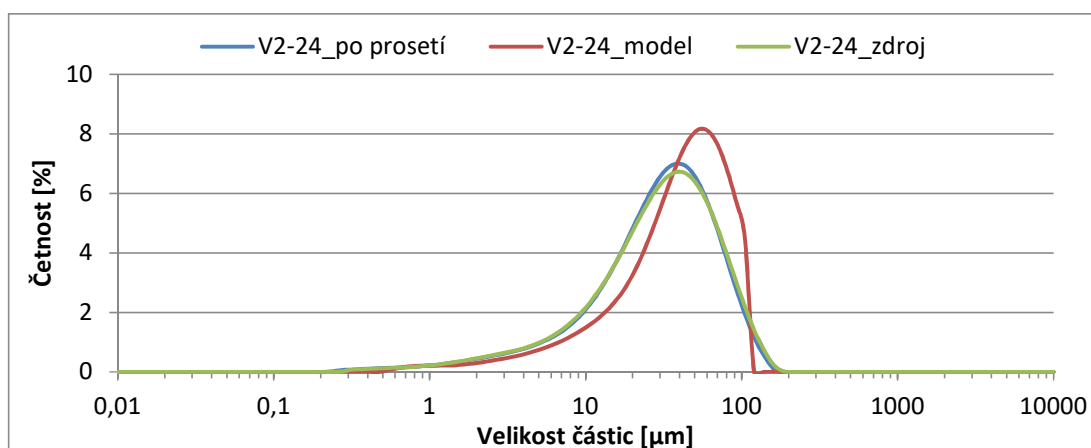
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje méně jemných i hrubých částic, než předpokládal model, ale téměř stejně těch středně hrubých.

Tab. 29: Výsledky vzorku V2-23

V2-23				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	91	36,66 %		
	100	32 %	10 %	
	104	29,54 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	91	44,6876		
	100	48,5572	54,54	42,15
	104	50,2770		
dopočet síta	120	54,5120		
	122,5891	54,9643		48,5572
	138	57,6567		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 100 mikron měl činit 32 %, po prosetí tento zbytek vychází 10 %. Propadlo tedy o 22 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 μm být 38,55 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 48,56 %. Po prosetí zbytek činil 54,54 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 μm 42,15 %, což zhruba potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 48,56 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 122,6 mikronů, tedy o 22,6 mikronů větší, než je velikost síta použitého.

2.3.25 V2-24



Graf 27: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-24

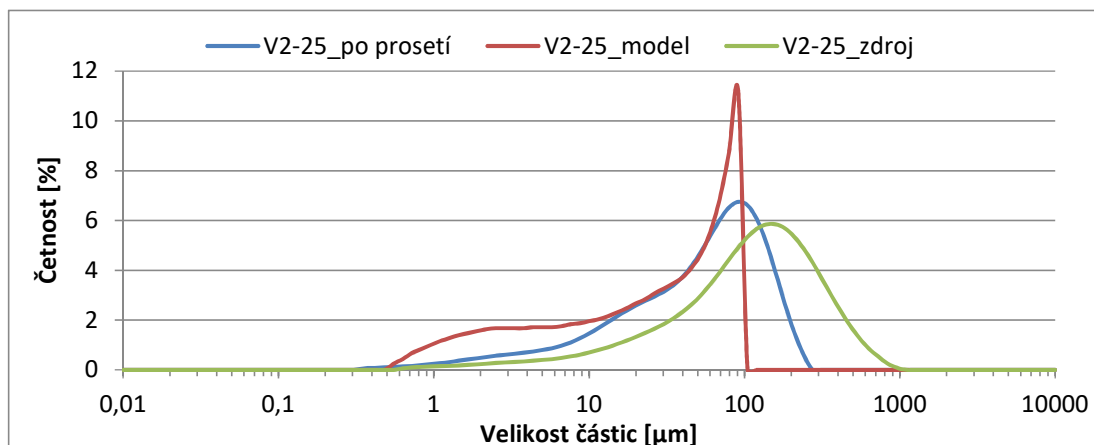
Z grafu můžeme vidět, že vzorek se po úpravě téměř nezměnil a tím pádem vyhoví požadavkům normy i bez prosévání.

Tab. 30: Výsledky vzorku V2-24

V2-24				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	120	2,48 %		
	125	2 %	1 %	
	138	1,07 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	120	27,7016		
	125	27,9878	28,3622	20,01
	138	28,7320		
dopočet síta	nelze			

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 125 mikronů měl činit 2 %, po prosetí tento zbytek vychází 1 %. Propadlo tedy o 1 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 42,64 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 27,99 %. Po prosetí zbytek činil 28,36 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 20,01 %, což neodpovídá předpokladu modelu ani kontrolnímu měření po prosetí. Dopčet potřebného síta interpolací v tomto případě nemohl být proveden. Aby normová zkouška vycházela 27,99 %, musel by zbytek dle dopočtu činit 35,97 %, ale v modelu je tato hodnota maximálně 29,51 %. Nebyly tudíž k dispozici vstupní hodnoty pro interpolaci.

2.3.26 V2-25



Graf 28: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-25

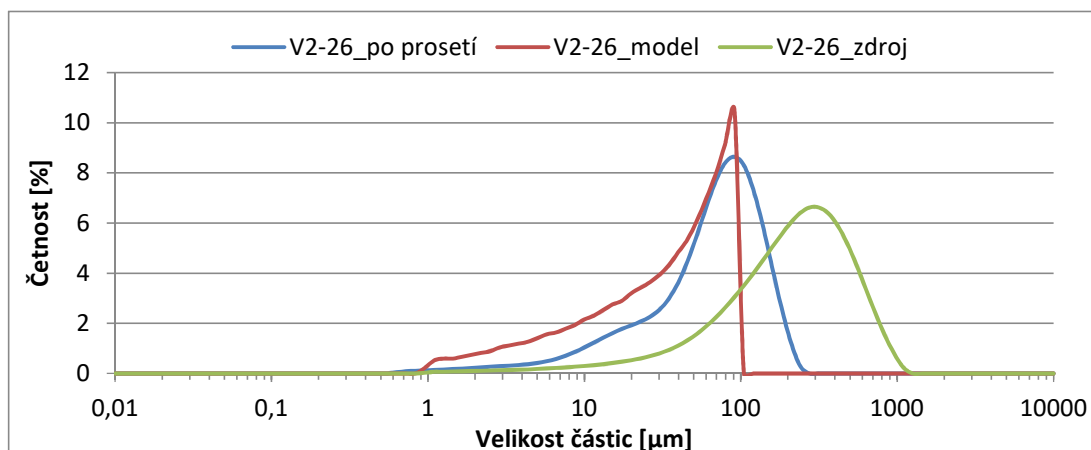
Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje méně jemných i hrubých částic, než předpokládal model, ale téměř stejně těch středně hrubých.

Tab. 31: Výsledky vzorku V2-25

V2-25				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	120	51,38 %		
	125	50 %	48 %	
	138	45,71 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	120	52,1723		
	125	53,5598	56,4525	53,28
	138	57,1674		
dopočet síta	120	52,1723		
	126,0082	53,8396		53,5598
	138	57,1674		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 125 mikronů měl činit 50 %, po prosetí tento zbytek vychází 48 %. Propadlo tedy o 2 % materiálu více a vstupní vzorek je teoreticky jemnější. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 47,22 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 53,56 %. Po prosetí zbytek činil 56,45 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 53,28 %, což potvrzuje předpoklad modelu a odpovídá i kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 53,56 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 126 mikronů, tedy o 1 mikron větší, než je velikost síta použitého.

2.3.27 V2-26



Graf 29: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-26

Z grafu můžeme vidět, že vzorek obsahuje méně jemných i hrubých částic, než předpokládal model.

Tab. 32: Výsledky vzorku V2-26

V2-26				
	síto	dopočet	po prosetí	normová zkouška
zbytek materiálu (nadsítné)	91	81,43 %		
	100	79 %	83 %	
	104	78,38 %		
zbytek materiálu na síť 45 mikronů [%]	91	45,6644		
	100	50,9711	67,4185	57,08
	104	53,3297		
dopočet síta	79	36,7391		
	89,9216	44,8623		50,9711
	91	45,6644		

Dle dopočtu by zbytek materiálu na síť s velikostí ok 100 mikronů měl činit 79 %, po prosetí tento zbytek vychází 83 %. Propadlo tedy o 4 % materiálu méně a vstupní vzorek je teoreticky hrubší. Podle výsledků původní granulometrie, ze kterých vycházel výběr síta, měl zbytek na síť 45 mikronů být 39,20 %, po provedení nového měření tento zbytek vychází 50,97 %. Po prosetí zbytek činil 67,42 %. Dle normové zkoušky je nadsítné na síť 45 mikronů 57,08 %, což zhruba potvrzuje předpoklad modelu, ale neodpovídá kontrolnímu měření po prosetí. Abychom normovou zkouškou získali modelový výsledek zbytku 50,97 %, museli bychom použít síto s velikostí oka cca 90 mikronů, tedy o 10 mikronů menší, než je velikost síta použitého.

2.3.28 Shrnutí výsledků

Průměrné nadsítné, resp. zbytek na třídícím sítu po prosetí vychází 34 %. Směrodatná odchylka je 0,19 %. Minimální hodnota 1 % byla naměřena u vzorku V2-24, naopak maximum nastává u vzorku V2-26 a činí 83 %.

Průměrný zbytek na sítě o velikosti ok 45 mikronů vychází dle dopočtu modelu 40,69 %. U vzorku V2-25 se setkáváme s nejvyšší hodnotou 53,56 %, která se od průměru liší o 12,87 %. Naopak nejnižší hodnota zbytku na sítě činí u vzorku V2-24 27,99 % a liší se tedy o 12,70 % od hodnoty průměrné. Směrodatná odchylka je zde 6,17 %.

Průměrná hodnota tohoto zbytku po prosetí je 50,29 %. S maximální hodnotou 67,42 %, která se od průměru liší o 17,13 % se setkáváme u vzorku V2-26. Minimální zbytek na sítě po prosetí je opět u vzorku V2-24, který se hodnotou 28,36 liší od průměru o 21,93 %. Směrodatná odchylka v tomto případě činí 7,98 %.

Můžeme říct, že výsledky normové zkoušky potvrzují předpoklad modelu. Hodnota průměru je zde téměř shodná s tou modelovou a činí 40,36 %. Směrodatná odchylka vychází 7,90 %. Největší zbytek na sítě 45 mikronů 57,08 % nastává u vzorku V2-26 a liší se od průměru o 16,72 %. Naopak minimální zbytek na sítě 45 mikronů 20,01 % byl naměřen u vzorku V2-24 a liší se od průměru o 20,53 %. Při porovnávání výsledků normové zkoušky s předpokladem modelu u jednotlivých vzorků se ukázalo, že nejméně se tyto dvě hodnoty liší u vzorku V2-4 a to o 0,15 %. K největší odchylce dochází u vzorku V2-24, kde je rozdíl 7,98 %. Průměrně se tato dvě čísla liší o 2,75 %. Většinou je výsledek normové zkoušky menší než dopočet.

Po zpětném dopočtu síta se ukázalo, že je potřeba síto, které se liší průměrně o 0,70 mikronů, avšak směrodatná odchylka činí 13,95 %. V absolutní hodnotě je průměrný rozdíl použitého a dopočteného síta 10,62 mikronů. Směrodatná odchylka v tomto případě je 9,07 mikronů. K extrémům dochází u vzorku V2-17, kde je potřeba síto o 34,9 mikronů menší, a u vzorku V2-23, kde by naopak bylo potřeba síto o 22,6 mikronů větší.

Dále byla dopočítána průměrná chybovost jednotlivých velikostí sít, která je pro přehlednost uvedena v následující tabulce.

Tab. 33: Chybovost sít

Velikost použitého síta [μm]	Průměrná odchylka [μm]	Směrodatná odchylka [μm]	Průměrná absolutní odchylka [μm]	Rozdíl použitého a potřebného síta [μm]
75	2,5	0	2,5	2,5
90	2,1	6,5	6,5	-4,4
100	-0,1	13,2	6,3	-13,3
125	5,1	7,6	7,3	-2,5
150	13,2	9,0	13,2	4,2
200	-26,7	8,2	26,7	-34,9
250	-32,2	0	32,2	-32,2

V tabulce vidíme hodnoty průměrné odchylky na jednotlivých sítích a také tyto odchylky v absolutní hodnotě. V posledním sloupci je uvedeno o kolik mikronů by průměrně bylo potřeba změnit síto původní. Kladné hodnoty znamenají zvětšit původní velikost ok, naopak záporné říkají o kolik je třeba velikost ok zmenšit. Tyto hodnoty vycházejí z průměrných odchylek a zahrnují směrodatnou odchylku na jednotlivých sítích.

ZÁVĚR

Tato práce se zabývá jemností deponovaného popílku ze složiště Panský les. V teoretické části seznamuje s problematikou využití popílků ze složišť v České republice, ale i ve světě. Dále je zde popsána lokalita Elektrárny Mělník i složiště Panský les, odkud byly odebrány zkoumané vzorky. Nakonec je zde popsán proces měření velikosti částic pomocí laserové difrakce.

V praktické části byly nejprve popsány a porovnány s normou dříve zjištěné fyzikální a chemické vlastnosti. Dále jsou zde popsány všechny používané metody potřebné ke zjištění jemnosti materiálu a následná normová zkouška, která je nutná pro vyhodnocení výsledků.

Navrhovaná metoda třídění sestává z vysušení vzorku a následném prosetí na předem určeném síti ve třech pětiminutových cyklech. Protože jsme proséváním odstranili zhruba 32 % materiálu, můžeme říct, že po prosévání (resp. třídění) se dá využít cca 68 % materiálu uloženého na složišti.

Laserová difrakce je vhodná metoda pro určení jemnosti materiálu uloženého na složišti, resp. materiálů s normálním rozdělením velikosti částic. Na základě těchto výsledků se dá sestavit poměrně přesný model pro určení třídícího síta, což prokázala kontrolní měření provedená normovou metodou podle ČSN EN 451-2. Průměrné hodnoty se liší o 0,33 %. Naopak metoda laserové difrakce se ukázala jako nevhodná pro měření materiálů po třídění (prosévání). Je zde potřeba uvažovat nepřesnost teorií rozdělení částic založených na normálním rozdělení. Při těchto kontrolních měřeních je potřeba počítat s nepřesností cca 10 % ve smyslu nadhodnocení skutečných hodnot zbytku na síti 45 mikronů.

Pro dosažení absolutního souladu mezi modelem vycházejícím z měření pomocí laserové difrakce a výsledky normové zkoušky by bylo nutné uvažovat velikost třídícího síta v průměru o cca 13 mikronů menší (při zahrnutí směrodatné odchylky měření). Pro praktické využití bych tak doporučila modelové síto zmenšit o 13 mikronů.

Tato práce může sloužit jako podklad pro další studium jemných materiálů na bázi vedlejších energetických produktů. Všechny vytyčené cíle byly splněny.

Použitá literatura

- [1] FEČKO, Peter. *Fly ash*. Ostrava: VŠB, 2005. ISBN 80-248-0836-6.
- [2] BENSCHIEDT, N., HELA, R. a Asociace pro využití energetických produktů. *Příručka Popílek v betonu: příručka: základy výroby a použití*. Hostivice: ČEZ Energetické produkty vydává pro ASVEP, 2013. ISBN 978-80-260-4226-6.
- [3] ČSN EN 450-1. *Popílek do betonu – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [4] ČSN 72 2071. *Popílek pro stavební účely – Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [5] ŠKARA, Vojtěch. *Materiálové charakteristiky elektrárenského popílku vyztuženého rozptýlenou výztuží*. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické. Fakulta stavební. Katedra geotechniky.
- [6] AAKASH, Dwivedi, JAIN, Manish, Kumar. Fly ash – waste management and overview: A Review. *Recent Research in Science and Technology* [online]. 2014, 6 (1): 30-35 [Přístup získán 24.3.2019]. ISSN: 2076-5061. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/277309330_Fly_ash_-_waste_management_and_overview_A_Review
- [7] *Možnosti využívání odpadu z energetiky* [online]. [Přístup získán 5.4.2019]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=2.6.7
- [8] *Ve světě na výhody použití elektrárenských popílku už přišli. A jak jsme na tom my?* [online]. © 2016 [Přístup získán 5.4.2019]. Dostupné z: <http://www.prumyslvaekologie.cz/Dokument/103597/ve-svete-na-vyhody-pouziti-elektrarenskych-popilku-uz-prisli-a-jak-jsme-na-tom-my.aspx#sdfootnote1sym>
- [9] GRZYWA, BAGAROVÁ, Martina. *Agglomeráty mají budoucnost* [online]. 2013 [Přístup získán 25.4.2019]. Dostupné z: <https://www.odpady-online.cz/aglomeraty-maji-budoucnost/>

- [10] *Proces výroby v uhelných elektrárnách* [online]. 2019 [Přístup získán 2.4.2019]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/flash-model-jak-funguje-uhelna-elektrarna.html>
- [11] *Elektrárna Mělník* [online]. 2019 [Přístup získán 12.4.2019]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/melnik.html>
- [12] SCHNEPP, Ota. *Elektrárna nejbliže Praze je středem zájmu studentů, odborníků, ale i seniorů* [online]. 2019 [Přístup získán 12.4.2019]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/5153.html>
- [13] *Elektrárna Mělník* [online]. © 2016 [Přístup získán 12.4.2019]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/uhelne-elektrarny/uhelne-elektrarny-cez/elektrarna-melnik>
- [14] *Elektrárna Mělník* [online]. 2019 [Přístup získán 12.4.2019]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/melnik.html>
- [15] SNOB, Roman a ŠULC, Rostislav a ŠKVÁRA, František. *Roční zpráva o řešení projektu v programu Trio v roce 2018*. Příloha 2 – Podrobná zpráva k dosaženým výsledkům v rámci projektu. Hostivice: 2018.
- [16] *Ukládání popele v minulosti* [online]. [Přístup získán 14.4.2019]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/ukladani_6.html
- [17] SNOB, Roman. *Vrtné práce a odtěžování popílku na složitých skupinách ČEZ v roce 2018*. Dílčí zpráva k projektu v programu Trio v roce 2018. Hostivice: 2018.
- [18] MINISTERSTVO ZDRAVOTNICTVÍ ČESKÉ REPUBLIKY. *Český lékopis 2017*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2017. ISBN 978-80-0500-7.
- [19] KOMRSKA, Jiří. *Difrakce světla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2001. ISBN 80-214-1976-8
- [20] JESENÁK, Karol. *Analýza vel'kosti částic*. Bratislava: Přírodovedecká fakulta Univerzity Komenského Bratislava, 2008. ISBN 978-80-223-2464-9

- [21] SOKOLOVÁ, Kristýna. *Vlastnosti deponovaných elektrárenských popílků*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Fakulta stavební. Katedra technologie staveb.
- [22] GOGOLKOVÁ, Klára. *Rentgenová fluorescenční analýza*. Zlín, 2009. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická.
- [23] ČERNOHORSKÝ, Tomáš a POUZAR, Miloslav. *Úvod do XRF spektrometrie* [online]. © 2019 [Přístup získán 28.4.2019]. Dostupné z: [http://www.rmi.cz/xrf-spektrometrie\[1\]](http://www.rmi.cz/xrf-spektrometrie[1])
- [24] *Fractionace a její význam* [online]. [Přístup získán 28.4.2019]. Dostupné z: <https://lat.zshk.cz/vyuka/prosevani.aspx>
- [25] ČSN EN 451-2. *Metoda zkoušení popílku – Část 2: Stanovení jemnosti proséváním za mokra*. Praha: Český normalizační institut, 1995.

Seznam tabulek

Tab. 1: Požadavky na chemické vlastnosti dle ČSN EN 450-1	13
Tab. 2: Požadavky na fyzikální vlastnosti dle ČSN EN 450-1	13
Tab. 3: Použití VEP v ČR	16
Tab. 4: Produkční údaje včetně predikce	20
Tab. 5: Chemické vlastnosti vzorků.....	31
Tab. 6: Zvolené velikosti sít pro jednotlivé vzorky	41
Tab. 7: Výsledky vzorku V2-1	42
Tab. 8: Výsledky vzorku V2-2.....	43
Tab. 9: Výsledky vzorku V2-3.....	44
Tab. 10: Výsledky vzorku V2-4.....	45
Tab. 11: Výsledky vzorku V2-5.....	46
Tab. 12: Výsledky vzorku V2-6.....	47
Tab. 13: Výsledky vzorku V2-7.....	48
Tab. 14: Výsledky vzorku V2-8.....	49
Tab. 15: Výsledky vzorku V2-9.....	50
Tab. 16: Výsledky vzorku V2-10.....	51
Tab. 17: Výsledky vzorku V2-11.....	52
Tab. 18: Výsledky vzorku V2-12.....	53
Tab. 19: Výsledky vzorku V2-13.....	54
Tab. 20: Výsledky vzorku V2-14.....	55
Tab. 21: Výsledky vzorku V2-15.....	56
Tab. 22: Výsledky vzorku V2-16.....	57
Tab. 23: Výsledky vzorku V2-17.....	58
Tab. 24: Výsledky vzorku V2-18.....	59

Tab. 25: Výsledky vzorku V2-19.....	60
Tab. 26: Výsledky vzorku V2-20.....	61
Tab. 27: Výsledky vzorku V2-21.....	62
Tab. 28: Výsledky vzorku V2-22.....	63
Tab. 29: Výsledky vzorku V2-23.....	64
Tab. 30: Výsledky vzorku V2-24.....	65
Tab. 31: Výsledky vzorku V2-25.....	66
Tab. 32: Výsledky vzorku V2-26.....	67
Tab. 33: Chybovost sít	69

Seznam obrázků

Obr. 1: Pohled na celou lokalitu Elektrárny Mělník z ptačí perspektivy [11]	19
Obr. 2: Přehledná situace zájmové lokality [15]	21
Obr. 3: Situace odkaliště-letecká mapa z r. 2017 [15]	23
Obr. 4: Lokalizace realizovaných vrtů v odkališti Panský les EMĚ [15]	24
Obr. 5: Fotodokumentace V2 [17]	25
Obr. 6: Jádrové odvrtvy V2 [17]	25
Obr. 7: Příklad sestavy zařízení pro laserovou difrakci [18]	26
Obr. 8: Výstup měření z přístroje Mastersizer 2000/MU	27
Obr. 9: Vznik soustředných kruhů spojený s ohybem světla [20]	28
Obr. 10: Předpoklad Mieovy teorie [20]	29
Obr. 11: Vlnově a energiově disperzní spektrometr [22]	33
Obr. 12: Výstup z přístroje Bettersizer ST-Fraunhoferova teorie	34
Obr. 13: Výstup z přístroje Bettersizer ST-teorie Mie	34
Obr. 14: Elektromagnetická prosévačka	36
Obr. 15: Ukázka nadsítného a podsítného po třetím cyklu	36
Obr. 16: Sítko s rámem	38
Obr. 17: Rozstříkovací tryska	38
Obr. 18: Zařízení potřebné pro normovou zkoušku	39

Seznam grafů

Graf 1: Produkce popílku v různých zemích [6].....	14
Graf 2: Využití vyprodukovaného popílku v různých zemích [6].....	16
Graf 3: Výchozí graf pro výběr velikosti síta.....	40
Graf 4: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-1.....	41
Graf 5: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-2.....	43
Graf 6: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-3.....	44
Graf 7: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-4.....	45
Graf 8: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-5.....	46
Graf 9: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-6.....	47
Graf 10: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-7.....	48
Graf 11: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-8.....	49
Graf 12: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-9.....	50
Graf 13: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-10.....	51
Graf 14: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-11.....	52
Graf 15: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-12.....	53
Graf 16: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-13.....	54
Graf 17: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-14.....	55
Graf 18: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-15.....	56
Graf 19: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-16.....	57
Graf 20: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-17.....	58
Graf 21: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-18.....	59
Graf 22: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-19.....	60
Graf 23: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-20.....	61
Graf 24: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-21.....	62

Graf 25: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-22	63
Graf 26: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-23	64
Graf 27: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-24	65
Graf 28: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-25	66
Graf 29: Rozdělení velikosti částic vzorku V2-26	67