

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** B0715A270013 Strojní inženýrství  
**Studijní specializace:** Strojírenská technologie – technologie obrábění

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Možná rizika při práci s kovovým práškem u 3D tisku**

**Autor:** Simona SVOZILOVÁ  
**Vedoucí práce:** Ing. Ivana ZETKOVÁ, Ph.D

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Simona SVOZILOVÁ</b>
Osobní číslo:	<b>S19B0612P</b>
Studijní program:	<b>B0715A270013 Strojní inženýrství</b>
Specializace:	<b>Strojirenská technologie-technologie obrábění</b>
Téma práce:	<b>Možná rizika při práci s kovovým práškem u 3D tisku</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra technologie obrábění</b>

## Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Analýza současného stavu
3. Zmapování pracoviště 3D tisku
4. Zhodnocení
5. Závěr

---

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Nařízení vlády č. 68/2010 Sb.
- GARAY, A.R., CHARLES, L. GERACI, A.S., MURASHOV.V. & HOWARD.J., (2019) Potential occupational hazards of additive manufacturing, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 16:5, 321-328, DOI: 10.1080/15459624.2019.1591627.
- ZETKOVÁ, I. (2017) Problematika výroby strojních kovových součástí. ZČU v Plzni. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>.
- Ryan, Tim; Hubbard, Daniel. *Professional Safety*; Des Plaines Sv. 61, Čís. 6, (Jun 2016):56-62. Dostupné z: <https://search.proquest.com/docview/1797880043/4A07AC8D6BAS4A2APQ/3?accountid=14965#center>.
- Rui Chen; Hong Yin; Ivan S. Cole; Shirley Shen; Xingfan Zhou; Yuqian Wang; Shichuan Tang; (2020) Exposure, assessment and health hazards of particulate matter in metal additive manufacturing: A review.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Václava Pokorná**  
Katedra technologie obrábění

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2022**

L.S.

---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan

---

**Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**  
vedoucí katedry

---

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování za pomoc při vypracování bakalářské práce**

V první řadě patří poděkování vedoucí bakalářské práce Ing. Ivaně Zetkové, Ph.D. a konzultantce Ing. Václavě Pokorné, za velmi vstřícný přístup, podnětné rady a velkou trpělivost. Dále patří mé poděkování všem kolegům z Regionálního technologického institutu při Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni za veškeré rady a připomínky, pomoc při analýze a konzultace k tématu.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Svozilová	<b>Jméno</b> Simona		
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013Strojní inženýrství			
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Zetková, Ph.D	<b>Jméno</b> Ivana		
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST-KTO			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Možná rizika při práci s kovovým práškem u 3D tisku			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	51	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	38	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Bakalářská práce se zabývá riziky spojenými s použitím kovového prášku pro 3D tisk. Především je pozornost namířena na prašnost v zkoumané laboratoři. V práci jsou popsány změny vybavení laboratoře a používané ochranné pomůcky pro snížení rizik spojených s prašností kovových částic. V laboratoři byla provedena dvě měření, která ukazují vliv změn na snižování rizika.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	3D tisk kovů, kovový prášek, prašnost, rizika při 3D tisku kovů, aditivní technologie

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Svozilová	<b>Name</b> Simona	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013Mechanical Engineering		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Zetková, Ph.D	<b>Name</b> Ivana	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Possible risks at working with metal powder in 3Dprinting		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	51	<b>TEXT PART</b>	38	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The bachelor's thesis deals with the risks associated with the use of metal powder for 3D printing. Above all, the attention is directed to the dustiness in there searched laboratory. The work describes changes in laboratory equipment and used protective equipment to reduce the risks associated with the dustiness of metal particles. Two measurements were made in the laboratory to show the impal of the changes on risk reduction.
<b>KEY WORDS</b>	3D printing of metal, metal powder, dustiness, risks in 3D printing of metal, additive technology

## Obsah

Obsah.....	8
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	9
Seznam obrázků.....	11
Seznam tabulek.....	12
1 Úvod.....	13
1.1 Cíle a význam bakalářské práce.....	14
2 Analýza současného stavu.....	15
2.1 Aditivní technologie.....	15
2.1.1 Norma ISO/ASTM 52900:2015.....	16
2.1.2 Přehled nejpoužívanějších aditivních technologií.....	17
2.1.3 3D tisk.....	18
2.1.4 Druhy materiálu pro 3D tisk.....	18
2.2 Kovový prášek.....	20
2.2.1 3D tisk kovů.....	21
2.2.2 Celkový postup práce při 3D tisku.....	22
2.2.3 Obecná rizika při práci s kovovým práškem.....	23
2.2.4 Rizika kovového prášku působící přímo na zdravotní stav.....	24
2.2.5 Kategorizace pracovního prostředí z hlediska prachu.....	26
2.2.6 Ochranné pomůcky používané v analyzované laboratoři.....	27
2.3 Porovnání původního a současného vybavení laboratoře.....	29
2.4 Technika prostředí.....	31
2.4.1 Technika prostředí a vybavení v analyzované laboratoři.....	31
3 Zmapování pracoviště 3D tisku.....	34
3.1 Provedená měření prašnosti v analyzované laboratoři.....	34
3.1.1 Interní měření pomocí magnetů.....	34
3.1.2 Měření přístrojem TestoDiSCmini.....	35
3.1.3 Měření pomocí pěti rozmístěných sond.....	36
4 Zhodnocení.....	41
4.1 Výsledky prvního měření prašnosti.....	41
4.2 Výsledky druhého měření prašnosti.....	43
5 Závěr.....	50



Seznam použitých zdrojů.....51

## Přehled použitých zkratk a symbolů

AM	-	Additive manufacturing – Aditivní výroba
LAV	-	Laboratoř aditivní výroby
3D	-	Three dimension – tří rozměrný (obraz)
RTI	-	Regionální technický institut
ISO	-	Mezinárodní organizace pro normalizaci
ASTM	-	Americká společnost pro testování a materiály
PJ	-	Polyjet
LENS	-	Laser Engineered Net Shaping - spékání pomocí laseru
FDM	-	Fused deposition modeling - výroba metodou natavování nití
NPJ	-	NanoParticleJetting - tryskání nanočástic
MJF	-	Multi Jet Fusion – Víceproudová fúze
SLS	-	Selective Laser Sintering - selektivní spékání laserem
DMLS	-	Direct Metal Selective Laser Melting - přímé kovové laserové spékání
SLM	-	Selective Laser Melting - selektivní spékání laserem
EBM	-	Electron Beam Melting - spékání svazkam elektronů
LOM	-	Laminated Object Manufacturing – výroba laminovaných předmětů
SLA	-	Stereolitografie
DLP	-	Digital light processing – digitální zpracování světla
CDLP	-	Continuous Direct Light Processing - Kontinuální přímé zpracování světla
DIN	-	Německý institut pro normy a standardizace
Fe	-	Železo
Ni	-	Nikl
Co	-	Kobalt
Mo	-	Molybden
Ti	-	Titan
Al	-	Hliník
Cr	-	Chrom
C	-	Uhlík
Mn	-	Mangan
Si	-	Křemík

P	-	Fosfor
S	-	Síra
O	-	Kyslík
C	-	Uhlík
N	-	Dusík
Ca	-	Vápník
Na	-	Sodík
Mg	-	Hořčík
Cl	-	Chlor
K	-	Draslík
Cu	-	Měď

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Výroba vrtule helikoptéry aditivní technologií [3].....	13
Obrázek 2: Rozdělení metod pro aditivní technologie [4].....	15
Obrázek 3: Procentuální přehled využití různých druhů aditivních technologií z roku 2019 [7] .....	17
Obrázek 4: Popis výroby pomocí foto-polymerizace [9].....	18
Obrázek 5: Ukázka materiálu pro 3D tisk s pevným základem (drát navinutý na cívce) [11].	19
Obrázek 6: Materiál s práškovým základem a úložný barel [13].....	19
Obrázek 7: Schéma výroby pomocí metody DMLS nebo SLS [15].....	22
Obrázek 8: Výstražný piktogram pro možné vzplanutí látky [17].....	24
Obrázek 9: Výstražný piktogram možnost výbuchu [18].....	24
Obrázek 10: Graf rozdělení velikosti částic, dle zdravotního rizika [19].....	25
Obrázek 11: Škodlivý vliv nanočástic na lidské tělo [20].....	26
Obrázek 12: Výchozí stav laboratoře při prvním měření.....	27
Obrázek 13: Barel pro použité obleky při opuštění pracoviště.....	28
Obrázek 14: Obsluha tiskárny se všemi používanými ochrannými pomůckami.....	28
Obrázek 15: Ochranné pomůcky - 3M™ Versaflo [22].....	29
Obrázek 16: Příprava tisku při původním vybavení laboratoře.....	30
Obrázek 17: Gumové návleky na ruce u dveří tiskárny.....	31
Obrázek 18: Prosévačka pro recyklaci kovového prášku.....	32
Obrázek 19: Mokrý odlučovač RUWAC.....	33
Obrázek 20: Fotografie magnetu s uchycenými kovovými částicemi.....	35
Obrázek 21: Přiblížení magnetu se zachycenými kovovými částmi na sebe.....	35
Obrázek 22: Umístění měřicího přístroje a papíru pro zaznamenání činnosti a času.....	36
Obrázek 23: Obsluha tiskárny s upevněným odběrovým zařízením (1p).....	37
Obrázek 24: Druhé odběrové zařízení ve středu místnosti (5p).....	38
Obrázek 25: Třetí odběrové zařízení u vývodu z mokrého odlučovače (3p).....	38
Obrázek 26: Čtvrté odběrové zařízení na přesívacím modulu (4p).....	39
Obrázek 27: Páté odběrové zařízení v přístupové chodbě do laboratoře (2p).....	39
Obrázek 29: Schéma odběrového zařízení pro měření prašnosti.....	40
Obrázek 30: Graf koncentrace částic v průběhu měření.....	42
Obrázek 31: Graf průměrné velikosti částic během měření.....	42

Obrázek 32: Procentuální zastoupení částic v intervalu 0 $\mu$ m - 50 $\mu$ m.....	44
Obrázek 33: Graf prvkového složení prachových částic.....	44
Obrázek 34: Graf celkové prašnosti na odběrových sondách.....	46
Obrázek 35: Graf prašnosti těžkých kovů na odběrových sondách.....	46
Obrázek 36: Graf s porovnáním hodnot při přípravě tiskárny před a po instalaci sekundárních dveří.....	48
Obrázek 37: Graf s porovnáním hodnot při přesívání prášku před a po instalaci prosévacího modulu.....	49

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled kategorií aditivní výroby podle normy ISO/ASTM 52900:2015 [6].....	16
Tabulka 2: Používané materiály pro AM kovů [2].....	21
Tabulka 3: Proces výroby pomocí 3D tisku s možnými riziky.....	23
Tabulka 4: Porovnání předchozího a současného stavu.....	30
Tabulka 5: Záznam pracovníka o činnostech v průběhu měření.....	36
Tabulka 6: Mikroklimatické podmínky při druhém měření v laboratoři.....	37
Tabulka 7: Počet nalezených částic na plochách filtrů.....	43
Tabulka 8: Složení EOS Martenzitické oceli MS1 (hmot. %). .....	44
Tabulka 9: Prvkové složení prachových částic.....	44
Tabulka 10: Výsledky měření prašnosti.....	45
Tabulka 11: Výsledky měření koncentrace těžkých kovů.....	47
Tabulka 12: Tabulka s výsledky z původního měření.....	48

## 1 Úvod

Technologický vývoj se musí stále přizpůsobovat poptávce produktů, které jsou čím dál náročnější na výrobu. S velkými nároky na výrobek, přicházejí i nové technologie. Mezi jedny z nejnovějších a nejprogresivnějších technologií se řadí aditivní výroba, což je název procesu vznikání výrobku postupným nanášením tenkých vrstev na sebe [1]. Aditivní technologie mají širokou oblast použití, a to nejen ve strojírenství, ale například i ve zdravotnictví, kosmickém nebo leteckém průmyslu. Velký nárůst využití byl zaznamenán také díky pandemii COVID-19. Zejména ve výrobě zdravotnických a ochranných pomůcek, ale také v ostatních odvětvích, kde je využíván zejména pro výrobu prototypů.

Technologie 3D tisku je intenzivně používána lze s ní počítat i v budoucnosti. I přesto, že je relativně novou metodou, lze o ní mluvit jako o revoluční, díky posunutí výrobku na zcela jinou úroveň než doposud, zejména díky možnosti výroby v různých oblastech. Tento způsob výroby dříve nazýván Rapid Prototyping, především kvůli využití při rychlé výrobě prototypů, dnes spíše Additive Manufacturing (AM) využívaný pro kusovou, malosériovou, i hromadnou výrobu nejen prototypů.[2]

AM se dočkalo ohromného využívání v různých odvětvích i v domácnostech některých nadšenců. Rychlý nárůst poptávky zaznamenalo zejména lékařství, letecký a kosmický průmysl, který v tomto případě spadá pod strojírenství.



Obrázek 1: Výroba vrtule helikoptéry aditivní technologií [3]

Možnosti při výrobě jsou opravdu velmi rozmanité, oproti konvenčním metodám, lze vyrobit základní tvary, ale i velmi složité, a to v poměrně krátkém čase. V případě použití kovového materiálu, se minimalizuje množství odpadu možnostmi opětovného použití

nespotřebovaného prášku. Nevýhodou, ovšem je, využití podpor při tisku, možná deformace výrobku a případný postprocesing, pro úpravu zejména povrchu výrobků.

Vzhledem k poměrně krátké době využívání aditivních technologií, nejsou dány přesné postupy pro používání tiskáren, spojené s ochranou obsluhy. A stejně tak nejsou známa veškerá rizika na zdravotní stav člověka, spojená s touto technologií, zejména v případě kovové výroby. Největší zastoupení má v tomto případě na trhu plastový materiál, který je levný a obsluha zde bývá jednodušší. Oproti tomu kovové materiály nejsou tak hojně rozšířeny, a proto ani tolik prozkoumány jejich výhody, nevýhody a případná rizika. Ovšem potenciál této technologie je velký, a proto je nutné věnovat ji velkou pozornost ve všech ohledech.

## 1.1 Cíle a význam bakalářské práce

Aditivní výroba představuje nejen nový přístup v případě konstrukce a přípravy výroby, ale znamená i definování nových požadavků. Jak na proces výroby samotný, tak i na pracoviště a v neposlední řadě i na obsluhu tiskárny. Vzhledem ke krátké historii nasazení aditivních technologií kovů do průmyslové praxe nejsou dostatečně známá všechna úskalí a rizika, která jsou spojena s technikou prostředí a bezpečností na pracovišti.

Hlavní cíl práce spočívá v zmapování a hodnocení rizik, které souvisí především s prašností. V laboratoři budou provedena měření prašnosti a výchozí data budou použita pro tuto práci. Měření proběhne v Laboratoři aditivní výroby (LAV), která je součástí RTI na ZČU v Plzni. V tomto prostředí již bylo v předchozích letech provedeno měření prašnosti, s výsledným návrhem zařazení pracoviště do kategorie 4. Tím byla laboratoř označena jako pracoviště s vysokým rizikem ohrožení zdraví při práci. Mezi prvním a nadcházejícím měřením, byly v laboratoři provedeny změny, pro zlepšení kvality techniky prostředí a bezpečnosti práce. Nová měření pomohou odhalit funkčnost těchto změn, případně upozornit na největší rizika spojená s prašností. V závěru práce bude vyhodnocení výsledků měření prašnosti v pracovním prostředí, případně zde budou navrženy změny pro zvýšení bezpečnosti a komfortu na pracovišti.

První část práce bude zaměřena na teorii ohledně řešené problematiky, která je doposud známa. Budou vysvětleny základní pojmy a naznačena rizika spojená s aditivními technologiemi, především kovové výroby. Budou sumarizovány poznatky dosavadního používání a jejich postupné aplikování do provozu. Druhá část práce, stěžejní, se bude zabývat plánem a následným měření kvality prostředí na daném pracovišti, ze které bude vycházet hodnocení rizik v laboratoři a určení stupně rizika v oblastech definovaných v první části práce.

Splnění cílů bude mít přínos, jak pro analyzovanou laboratoř, tak i pro ostatní uživatele. Taktéž pro dodavatele materiálu a strojů, pro zavedení nových opatření, zaměřených na ochranu zdraví osob obsluhujících 3D tiskárny. Ovšem hlavní přínos je předpokládán pro zkoumanou laboratoř a metodiku práce v ní.

## 2 Analýza současného stavu

Přestože aditivní výroba je uplatňována stále více v různých odvětvích průmyslu a její možnosti využití se neustále rozšiřují, rizika pro člověka při využití aditivní technologie, nejsou zcela zmapované. S aditivní výrobou souvisí rizika, která jsou známa a jsou řešena výrobci tiskáren a jsou dána charakteristikou výroby. Z těch, která jsou nejčastěji definována, jde o využití laserového paprsku ve vakuovém pracovním prostoru. Dalším významným rizikem, týkající se především obsluhy tiskárny je riziko zvýšené prašnosti. Z toho vyplývají 3 hlavní oblasti řešení a to možnost exploze, eventuální příležitost vzplanutí a průnik prášku do těla osob, které se pohybují v laboratoři s 3D tiskárnou kovů a následky tím způsobené. V tomto případě je brán kovový prášek jako jedno z největších rizik, proto je celá práce zaměřena výhradně na nebezpečí z tohoto hlediska.

### 2.1 Aditivní technologie

Konstrukce některých výrobků může být složitá, například svým tvarem. Vhodným řešením výroby může být využití aditivních technologií. Ty jsou v podstatě totéž, co 3D tisk, nebo rapid prototyping, ačkoliv tyto pojmy se využívají zejména pro označení procesů, při nichž vzniká jen prototyp, nikoliv konečný výrobek. Aditivní technologie využívají různé materiály a způsoby výroby ukázané na obrázku 1. Na obrázku je vidět dělení podle normy ISO/ASTM 52900:2015, popsané detailněji v následující kapitole. U každého procesu jsou vyjmenovány všechny použitelné technologie pro něj a materiály vhodné pro ně. Také jsou představeni výrobci tiskáren podle druhu technologie.



Obrázek 2: Rozdělení metod pro aditivní technologie [4]

### 2.1.1 Norma ISO/ASTM 52900:2015

Vzhledem ke krátkodobému uplatnění aditivních technologií v praxi výroby, není příliš zmapované riziko při jejich používání. Základní parametry jsou dány normou ISO z roku 2015.

Norma ISO/ASTM 52900:2015 stanovuje a definuje pojmy používané v technologii aditivní výroby (AM), která uplatňuje princip postupného nanášení materiálu, a tak tvorbu fyzické 3D geometrie. [5] Tato norma definuje, a tím také dělí aditivní výrobu do 7 kategorií procesů, které jsou popsány v tabulce 1.

Název procesu	Charakteristika procesu	Technologie
Binder Jetting	Při tomto procesu dochází tryskami k nanášení tekutého pojiva ve formě kapiček na základní materiál v podobě prášku. Pojivo působí jako adhezivum mezi jednotlivými vrstvami prášku	BJ
Directed Energy Deposition	Pod tímto pojmem se skrývá soubor procesů, které využívají soustředěnou tepelnou energii pro roztavení a spojení materiálu, který je ve formě prášku nebo drátu cíleně přiváděn do místa působení tepelného zdroje. Obvyklým tepelným zdrojem bývá laser nebo elektronový paprsek.	LENS, EBAM
Material Extrusion	Materiál je nanášen na platformu tryskou, přes kterou je veden. Při průchodu dochází k roztátí zahřátím, před nanášením na platformu.	FDM
Material Jetting	Proces spočívá v selektivním nanášení malých kapek na stavební platformu. Běžně se používají fotosenzitivní termosetové polymery, jež jsou po každé nanášené vrstvě vytvrzovány.	MJ, NPJ, DOD
Powder Bed Fusion	Při tomto procesu dochází k vystavení celé plochy nanášeného materiálu tepelnému zdroji, jenž umožní spojení výchozího práškového produktu. Klasický tepelný zdroj představuje laserový nebo elektronový paprsek.	MJF, SLS, DMLS/SLM, EBM
Sheet Lamination	U těchto procesů je každá vrstva tvořena tenkým plátem či listem materiálu. Při každém nanášení dojde ke slepení vrstvy, resp. listu s předchozím a k vyřezání tvarových kontur.	LOM
Vat Polymerization	Pomocí ultrafialového laseru se v nádrži s tekutou fotosenzitivní pryskyřicí mění struktura materiálu na pevnou látku. K tomuto vytvrzování dochází vždy po vrstvách v konkrétních místech působení ultrafialového světla	SLA, DLP, CDLP

Tabulka 1: Přehled kategorií aditivní výroby podle normy ISO/ASTM 52900:2015 [6]



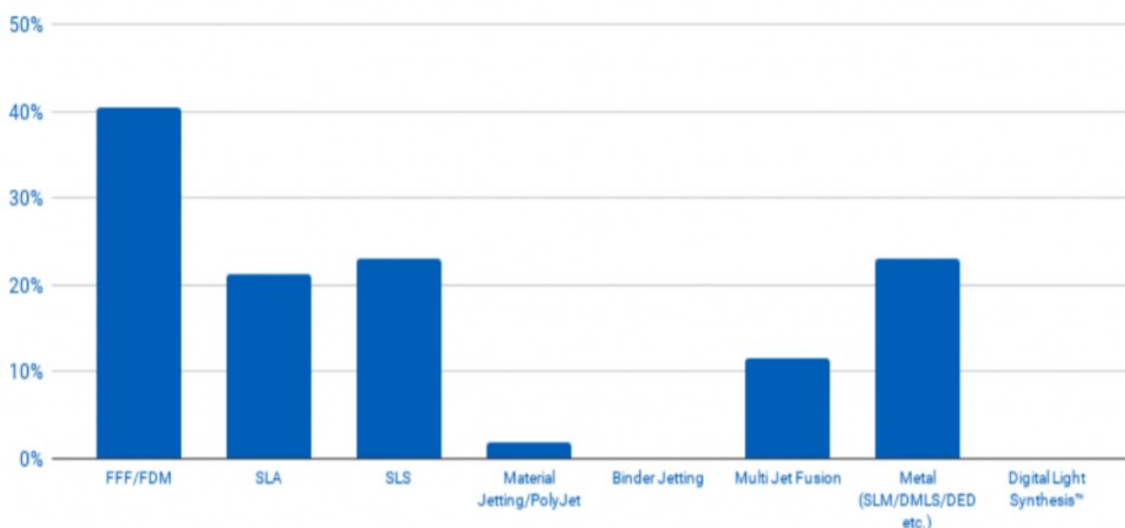
### 2.1.2 Přehled nejpoužívanějších aditivních technologií

Na obrázku 1 je vidět několik druhů technologií, které se odlišují například tím, jaký materiál využívají. Některé jsou využívány podstatně více než jiné, v následujícím textu jsou popsány ty nejpoužívanější a na obrázku 3 je vidět procentuální využití těchto metod z roku 2019. Momentálně jsou dle mého názoru, stále nejvíce využity metody vyzdvižené zde.

**FDM (Fused Depositon Modeling)** – Je nejrozšířenější aditivní metoda. Můžeme ji najít také pod názvem FFF (Fused Filament Fabrication), díky ochranné známce firmy Stratasys na název FDM. Jedním z důvodů, proč je tento druh výrob nejvíce využíváný, je nízká pořizovací cena. Nejčastěji využíváný materiál pro tuto výrobu je plast, ale může být použit i kompozitní materiál.

**DMLS (Direct Metal Selective Laser Melting)** - Na druhém místě jsou dvě technologie, jednou z nich je metoda DMLS, která je nejvíce využívanou metodou, jejíž materiál je kov. Tato metoda byla vyvinuta v roce 1995 německou firmou Electro Optical Systems (EOS) ve spolupráci s Rapid Product Innovations (RPI). Ve své době to byla první komerční metoda RP, která byla schopna vyrobit kovové díly v jednom procesu. Tato metoda je využívána také v laboratoři, kde budou zhodnocena možná rizika nebezpečí.

**SLS (Selective Laser Sintering)**– Jedná se o druhou technologii, která patří do stejné kategorie jako metoda DMLS. Rozdíl mezi těmito dvěma sekundárně nejvíce rozšířenými druhy výroby je použitý materiál. Oproti DMLS metoda SLS vyrábí produkty z plastu, stejně jako FDM.



Obrázek 3: Procentuální přehled využití různých druhů aditivních technologií z roku 2019 [7]

### 2.1.3 3D tisk

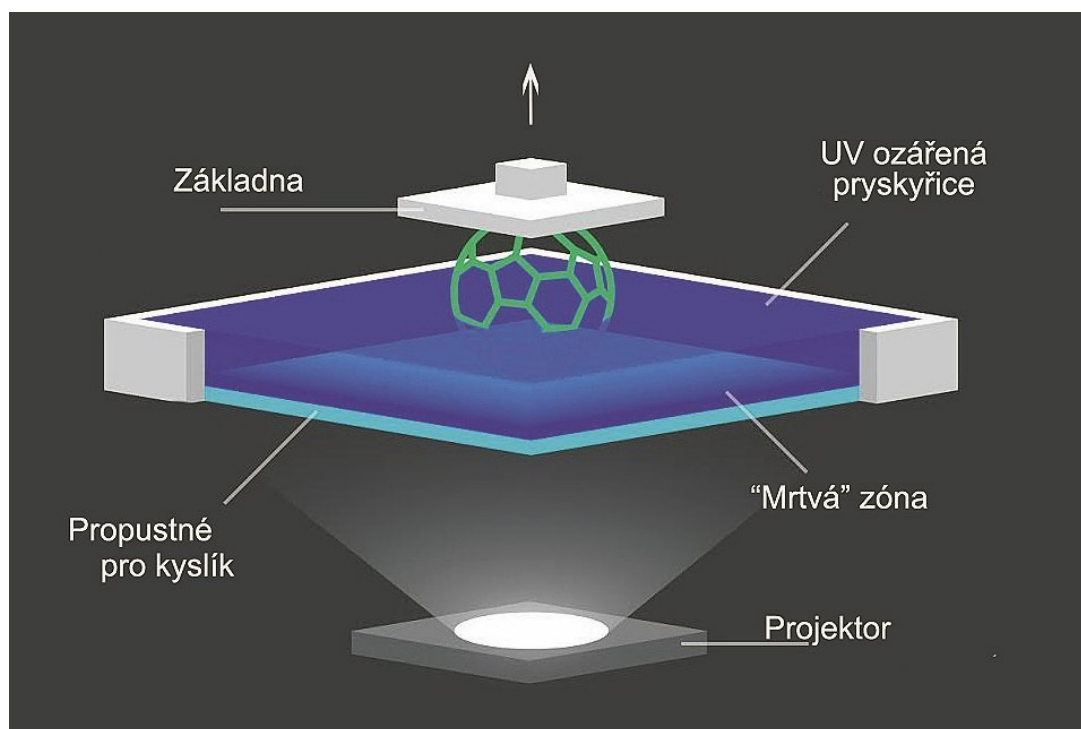
Trojrozměrný tisk nebo zkráceně 3D tisk je možné charakterizovat více způsoby tvoření objektů, avšak v podstatě jde o aditivní proces, tedy přidávání materiálu [8]. V dnešní době je tento proces výroby velmi využíván v různých odvětvích. Existují například i domy vybudované 3D tiskem, což dokazuje velkou variabilitu a rozšíření tohoto druhu výroby.

### 2.1.4 Druhy materiálu pro 3D tisk

3D tisk je technologie použitelná v různých odvětvích průmyslu, jako například automobilový, letecký, kosmický, zdravotnický atd.. Důvodem takto širokého využití je nejen možnost výroby složitých modelů jako celek, ale i velká škála materiálů, které lze zvolit, a to od velice nečekaných jako je čokoláda po nejpoužívanější, kterými jsou plasty, kov a keramika.

Původní materiál pro 3D tisk může být dodáván v různé formě. Podle struktury základu, jsou výchozí materiály děleny do tří skupin popsanych v následujícím textu:

*TEKUTÝ ZÁKLAD*-Technologie založené na tekutém základě využívají vlastností foto-vytvrditelné pryskyřice. Jedná se o organickou pryskyřici, která je vytvrzována působením světla.[12] Tato struktura není příliš vyhledávána výrobci, i přesto se dá využít. Metoda, která má jako základní formu materiálu tekutinu, je jen jedna a to foto – polymerizace. Na obrázku 4 je schéma, které ukazuje proces výroby s tekutou základní strukturou.



Obrázek 4: Popis výroby pomocí foto-polymerizace [9]

*PEVNÝ ZÁKLAD*-Tuto skupinu tvoří pevné materiály, které jsou ve formě drátu navinutého na cívce (ukázka na obrázku 5) nebo ve formě fólií [10]. Metody tvořící skupinu se základním materiálem v pevném skupenství jsou nanášení tryskáním materiálu, laminace plátů a vytlačování materiálu. Tato struktura je jednou z nejvyužívanějších, a to zejména díky tomu že je takto zpracováván materiál pro 3D tisk z plastu.



Obrázek 5: Ukázka materiálu pro 3D tisk s pevným základem (drát navinutý na cívce) [11]

*PRÁŠKOVÝ ZÁKLAD* - Technologie založené na práškovém základě využívají základní materiál v sypkém stavu. Prášek je umístěn v boxu a vytvrzován vrstvou po vrstvě laserem, elektronovým paprskem nebo chemickou reakcí za použití pryskyřic, tmelu nebo lepidel. Práškový materiál může být z nylonu, elastomeru, polystyrenu, oceli nebo slévárenských ošřiv [12]. Do této kategorie spadají metody: spékání práškové vrstvy, přímé energetické nanášení a tryskání pojiva. Na obrázku 6 je ukázka práškového materiálu a jeho ukládání.



Obrázek 6: Materiál s práškovým základem a úložný barel [13]

## 2.2 Kovový prášek

Materiál zpracovaný při 3D tisku kovů je dodáván v práškové podobě, ta je skladována v uzavřených barelech. Tento prášek obsahuje kulovité částice o velikostech nejčastěji 20  $\mu\text{m}$  až 100  $\mu\text{m}$ . Na každém barelu jsou umístěny pentagramy upozorňující uživatele na možná rizika. Na nádobě je také rozepsáno složení materiálu, případně je dodáván materiálový list, který obsahuje přesný popis základu včetně procentuálního obsazení prvků. K dispozici jsou v současnosti bezpečnostní listy.

Využití prášku je velmi ekonomické, díky možnosti přesívání nespečených z materiálu použitého při tisku, který je možné opět využít. Tato recyklace prášku je možná dokonce několikrát. Oproti tomu je kovový základ jedním z hlavních rizik. V bezpečnostních listech je upozorněno, mimo jiné, že v důsledku manipulace nebo vdechování par z těchto materiálů může dojít k vážnému podráždění očí a kůže, a také možným alergickým reakcím. Možná rizika způsobená kovovým práškem, byla v této práci rozdělena do dvou skupin, a to obecná a rizika působící přímo na zdravotní stav obsluhy. Detailnější popis těchto dvou kategorií je v podkapitolách 2.2.3 a 2.2.4.

Při výrobě pomocí aditivních technologií kovů jsou využívány materiály s různým složením, rozděleny do skupin podle hlavního prvku použitého ve slitině. Dodavatelů prášku je spousta a jejich název se může lišit, proto je uvedeno i označení podle DIN – Německý institut pro normy a standardizace, který stanovuje požadavky na výrobu a procesy, pro dodržení požadovaných vlastností [14]. V tabulce 2, jsou uvedeny nejpoužívanější kovové prášky pro aditivní výrobu. Materiály v tabulce označeny zelenou barvou, jsou ty, které používá analyzovaná laboratoř.

	Materiál	DIN
Hliníkové slitiny	AlSi10Mg	3.2381
	AlSi7Mg	3.2371
	AlSi12	3.3581
Kobaltové slitiny	ASTM F75	2.4723
	CoCrWC	
Nástrojové oceli	AISI 420	1.2083
	Marage 300	1.2709
	H13	1.2344
	AISI D2	1.2379
	AISI A2	1.2363
	AISI S7	1.2357
Niklové slitiny	Inconel 718	2.4668
	Inconel 625	2.4856
	Inconel 713	2.4670
	Inconel 738	
	Hastelloy X	2.4665
Nerezové oceli	SS 304	1.4301
	SS 316 L	1.4404
	SS 410	1.4006
	SS 440	1.4110
	15-5 PH	1.4540
	17-4 PH	1.4542
Titanové slitiny	Titanium Grade 2	3.7035
	Ti6Al4V	3.7165
	Ti6Al4V ELI	3.7165 ELI
	TiAl6Nb7	
Drahé kovy	zlato	18 Carat
	stříbro	930 Sterling
Slitiny mědi	CC 480 K	2.1050

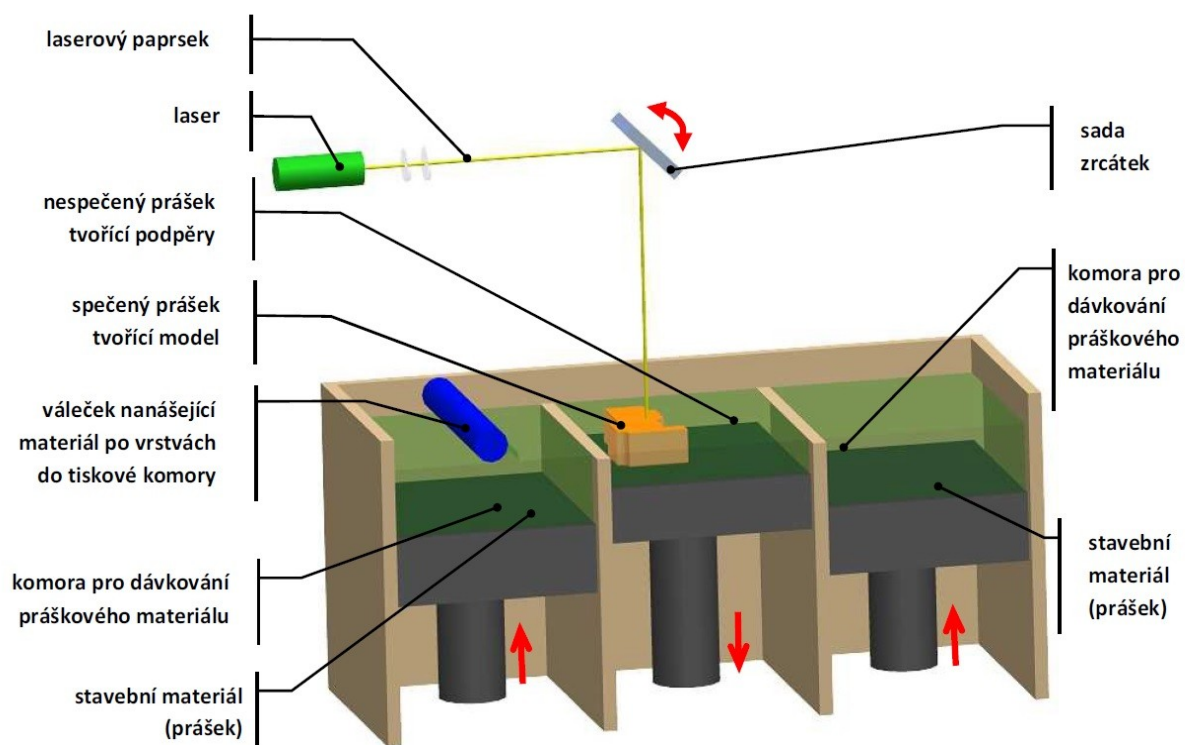
Tabulka 2: Používané materiály pro AM kovů [2]

### 2.2.1 3D tisk kovů

Obecně je aditivní způsob výroby kovových dílů založen na principu nanášení tenké vrstvy kovového prášku, tato vrstva se pohybuje mezi 20 µm až 100 µm. Nanášení probíhá recoterem, neboli nanášecím pravítkem na základnu. Zde na prášek působí energetické paprsky, nejčastěji laserové, a ty jej spečou do daných tvarů

pomocí příčných průřezů, které se generují CAD modelem. Zbylý kovový prášek zůstává nespečen. Poté se platforma posune o přírůstek vrstvy níž a nanese se další vrstva prášku. Takovýmto způsobem se proces opakuje, dokud není vytvořena celá součást. Vytisklý výrobek je obklopen neexponovaným práškem, který se následně recykluje, a je využit pro další tisk. Na obrázku 7 je schematicky ukázán princip výroby pomocí metody DMLS případně SLS.[2]

Po dokončení tisku, bývá výrobek odnesen do trouby, pro dohotovení výrobku. Nakonec musí být vždy odstraněny podpory 3D tisku a velmi často je nutný takzvaný postprocessing, kde je díl dokončen či upraven pomocí konvexních metod obrábění. Proto je absurdní tvrzení, že nové metody aditivní výroby, by vytlačovali klasické druhy výroby. Naopak tyto dvě složky se navzájem doplňují a navzájem rozvíjejí.



Obrázek 7: Schéma výroby pomocí metody DMLS nebo SLS [15]

### 2.2.2 Celkový postup práce při 3D tisku

Hlavním cílem celé práce je analyzovat rizika spjatá s používáním kovového prášku v dané laboratoři. Celkový proces, ale zahrnuje i úkony, kdy pracovníci nejsou v kontaktu s kovovým práškem vůbec nebo je riziko minimální. V tabulce 3 jsou vypsány všechny operace procesu od začátku až do konce a zároveň je zde zhodnoceno riziko spojeno s kovovým materiálem. Tomuto hodnocení, byla určena škála: žádné - velmi malé – malé – vysoké – velmi vysoké. Hodnocení je založeno na mých vědomostech, ohledně postupů při 3D tisku.

Pořadí	Úkon	Pracoviště	Riziko
1	Konstrukce modelu v CAD	Kancelář	Žádné
2	Import modelu do zařízení AM (možné malé úpravy, např. orientace tisku)	Kancelář/ Počítač tiskárny	Velmi malé
3	Nastavení a příprava zařízení, příprava materiálu pro tisk	Laboratoř	Velmi Vysoké
4	Tisk objektu (není potřeba přítomnost obsluhy, tisk někdy trvá několik hodin)	Laboratoř (nepřítomnost obsluhy)	Malé/ Žádné
5	Vyjmutí objektu - velmi často nutno odnést do pece	Laboratoř/ Dílna/ Pec	Vysoké
6	Úklid pracoviště - odebrání a prosévání nespečeného prášku, vysávání, kompletní úklid pracoviště do původního stavu	Laboratoř	Velmi Vysoké
7	Postprocessing - odstranění podpor úpravy konvenčním obráběním	Laboratoř/Dílna	Vysoké
8	Použití - objekt je připraven pro zadané účely		Žádné

Tabulka 3: Proces výroby pomocí 3D tisku s možnými riziky

### 2.2.3 Obecná rizika při práci s kovovým práškem

Jako obecná rizika kovového prášku jsou označeny možnosti vzplanutí nebo výbuchu. Materiály používané v laboratoři jsou kovové směsi velmi malých kulovitých částic. Podrobný obsah s procentuálním obsazením jednotlivých prvků je popsán v materiálových listech, dodávaných společně s práškem výrobcem. Používané materiály obsahují prvky nebo látky, u kterých hrozí riziko výbuchu nebo vzplanutí za určitých podmínek.

Možnost vzniku těchto podmínek je malá, i přesto se nesmí zanedbávat předcházení těmto rizikům. Nádoby, ve kterých je kovový prášek uchováván, jsou zavřené po celou dobu uskladnění. Výstražné piktogramy upozorňující na nebezpečí, jsou umístěny na obalu kovového prášku a na dveřích laboratoře, jsou také ukázány na obrázcích 8 a 9. Nebezpečí nastává zejména při přesypávání materiálu za dostatečné přítomnosti kyslíku a určité teplotě. Za všechnu manipulaci s práškem v laboratoři, je zodpovědná obsluha tiskárny. Každý člen obsluhy, musí být obeznámen s možnými riziky a musí být dostatečně proškolen co dělat v případě vzplanutí a jak zabránit nebezpečí vzplanutí a výbuchu. Požáry se řadí do několika tříd, tento druh by byl zařazen jako třída D, tedy požár kovů. V žádném případě se zde nesmí hasit pěnou nebo vodou, jediný možný hasicí přístroj, je zde pouze hasicí přístroj plněný práškem M.[16]



Obrázek 8: Výstražný piktogram pro možné vzplanutí látky[17]



Obrázek 9: Výstražný piktogram možnost výbuchu [18]

#### 2.2.4 Rizika kovového prášku působící přímo na zdravotní stav

Přestože 3D tisk kovů je stále používanější metodou, rizika ohledně jeho používání nejsou stále dokonale prozkoumána, a to jak v krátkodobém, tak v dlouholetém horizontu. Vzhledem k tomu, že se ve výrobách preferuje při 3D tisku využití plastových materiálů, kov je poněkud zanedbáván v tomto směru, přestože má také vlastní roli a je důležité zjistit více o bezpečnosti jeho používání při aditivních metodách.

Jak bylo již zmíněno, u kovového materiálu hrozí nebezpečí vznícení či výbuchu. Prášek je ale především nebezpečný v přímém působení na lidský organismus. Při manipulaci jsou prachové částice rozvířeny v prostorách laboratoře. Při zvržení nebo jakémkoliv pohybu je zde riziko zanesení prachu do oka, a tím znemožnění či zhoršení viditelnosti obsluhy, i na tento fakt by mělo být každé pracoviště připraveno. Přesto, že by se dalo předpokládat, že



kovová zrna padají ihned na podlahu, opak je pravdou. Tyto malé kulovité částice se udržují v prostoru laboratoře ve všech výškách až několik hodin. Jejich pohyb je závislý na aktuálních podmínkách laboratoře. Například, zda právě obsluha manipuluje s věcmi nebo obsluhuje tiskárnu, či jiné zřízení, otevírání a zavírání dveří a proudění vzduchu způsobené například klimatizací.

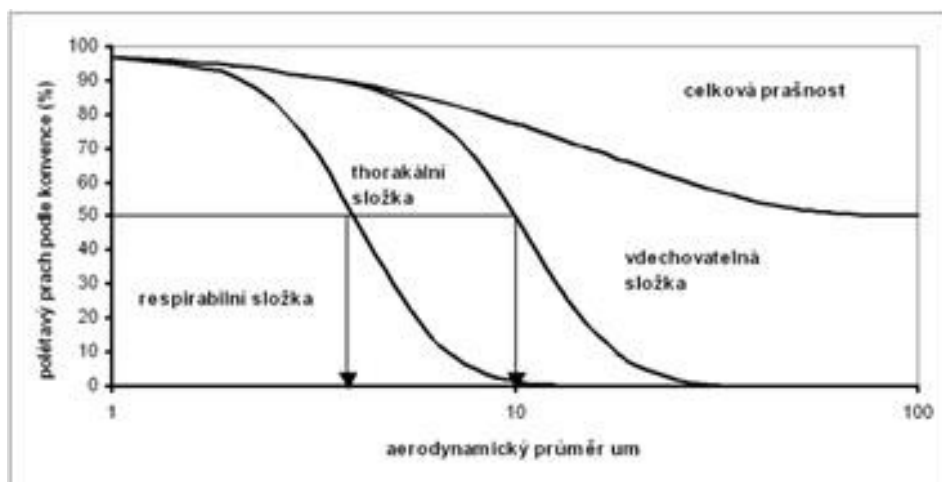
Kovový prach lze dělit podle chemických, fyzikálních či biologických vlastností. V tomto případě je na místě hodnocení dle zdravotního rizika, podle velikosti částic. Dělením podle rozměru, lze zjistit skutečnost hloubky proniknutí kovových částic do lidského těla. Dělení je rozděleno do tří skupin:

Vdechovatelná frakce – polétavý prach, který je vdechnutelný nosem a ústy

Thorakální frakce – vdechované částice proniknutelné za hrtan

Respirabilní frakce – částice, které pronikají do dýchacích cest, kde není řasinkový epitel[19]

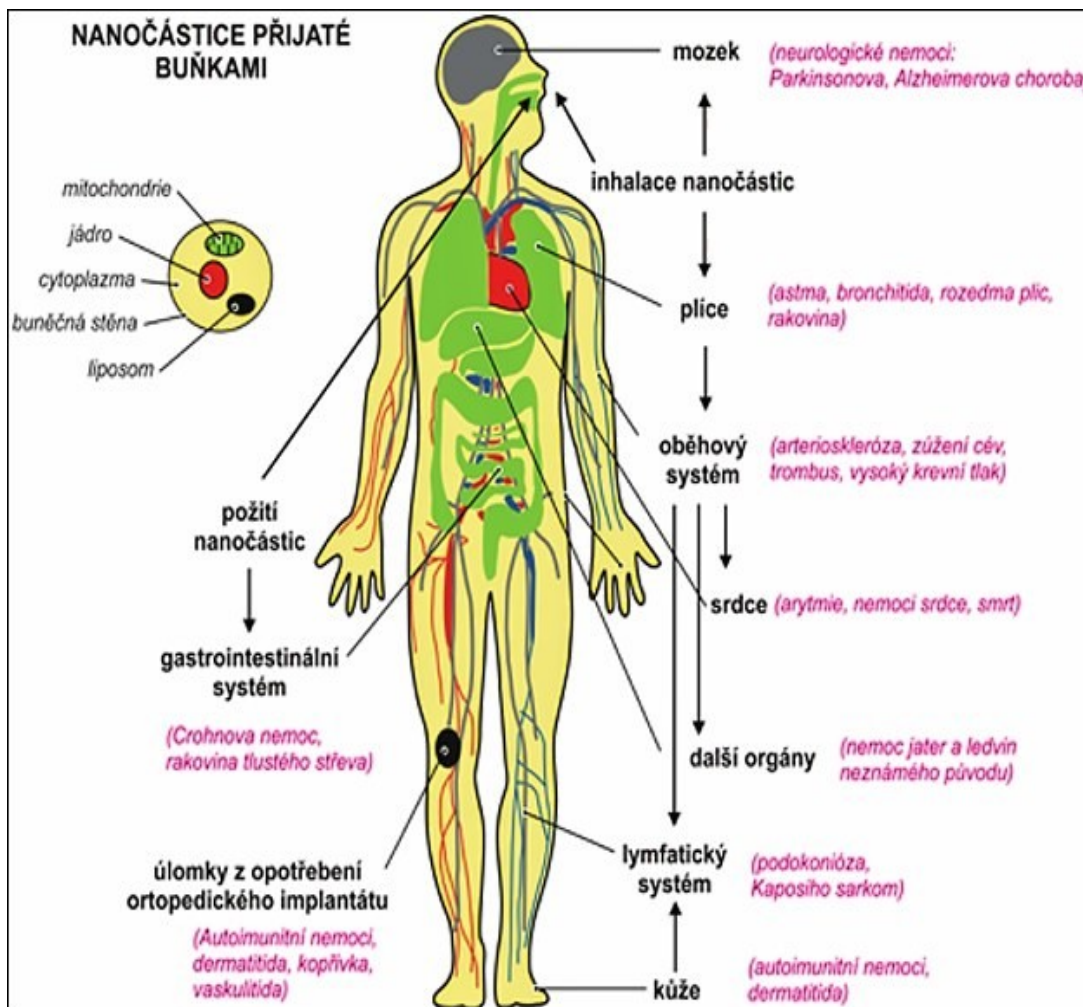
Pro přehlednost je přidán obrázek 10 s grafem rozčleňujícím tyto frakce.



Obrázek 10: Graf rozdělení velikosti částic, dle zdravotního rizika[19]

V kovovém prášku jsou mimo jiné, zastoupeny těžké kovy. Ty se mohou usazovat v těle a způsobit mnoho zdravotních potíží. Proto je nutné analyzovat jejich vliv na lidský organismus a možnosti kontaktu obsluhy a kovových částic. Proniknutí kovového prášku do těla je možné třemi hlavními způsoby. První z nich je inhalace, částice mohou být nejen obsluhou tiskárny vdechnuty. Na obrázku 10 je ukázán graf, který popisuje rozdělení velikosti částic, podle zdravotního rizika při vdechnutí. Pomocí dýchacích cest se mohou dostat například do plic, oběhového systému nebo například do mozku. Dalším způsobem je jejich požití. Tato možnost je velmi nepravděpodobná, z důvodu zákazu konzumování potravin či nápojů na pracovišti. Přesto se může stát, že obsluha si odnese částice například na oblečení či obuvi domů nebo do své kanceláře, kde může být způsobeno pozření kovového materiálu. Poslední možností vstřebání kovového prachu do těla je prostřednictvím kůže. Jak bylo již řečeno částice kovového materiálu použitého pro 3D tisk, dosahují velmi malých rozměrů. Existuje tedy možnost jejich průniku do těla prostřednictvím kůže, kde může ohrozit například lymfatický systém. Na obrázku 11 jsou všechny možnosti popsány i s možnými zdravotními komplikacemi, které mohou nastat. Na obrázku je demonstrována problematika

nanočástic, které nejsou otázkou analyzované laboratoře, přesto je ukázka velmi názorná a dostačující z hlediska kovových částic na pracovišti.



Obrázek 11: Škodlivý vliv nanočástic na lidské tělo [20]

### 2.2.5 Kategorizace pracovního prostředí z hlediska prachu

Pro práci v prašném prostředí, jsou řešeny podmínky ochrany zdraví pomocí nařízení vlády č.361/2007 Sb. Dle přípustného expozičního limitu (PEL), který se vyjadřuje v předem určených jednotkách  $\text{mg}/\text{m}^3$  nebo  $\text{vláken}/\text{cm}^3$  a dalších faktorů spojených s hodnocením pracovních podmínek a rizik, se podle vyhlášky č. 432/2003 Sb. Dělí práce do čtyř kategorií (v tomto případě se jedná hlavně o faktory spojené s prašností):

Kategorie 1 – zde není očekáván žádný nepříznivý vliv na zdraví

Kategorie 2 – průměrná celosměnová koncentrace PEL vyšší než 30%, ochranu osob zde stanovuje nařízení vlády č.361/2007 Sb. Hodnota PEL zde ale není překročena

Kategorie 3 – vyšší hodnota PEL než je určena pro toto prostředí opět zmiňovaným nařízením vlády, ale není překročena více jak o trojnásobek stanovené hodnoty

Kategorie 4 – v tomto případě je na pracovišti vysoké riziko ohrožení zdraví, vyšší koncentrace prachu než v případě třetí kategorie

Všechny kategorie jsou brány v jako pět osmihodinových směn v týdnu, pokud tomu tak není, počítá se s týdenním hodinovým průměrem za určité období. Poté se zařazuje do předem zmíněných kategorií.[21]

### 2.2.6 Ochranné pomůcky používané v analyzované laboratoři

Výchozí vybavení laboratoře bylo odlišné od nyní, byla zde pouze jedna tiskárna bez ochranných sekundárních dveří a pro následný úklid byl používán suchý vysavač, oproti nyní mokrému odlučovači. Původní vybavení laboratoře je ukázáno na obrázku 12. Vzhledem k prvotnímu měření prašnosti na pracovišti, které prokázalo velkou míru nebezpečí pro zaměstnance, a tím zařadilo laboratoř do čtvrté kategorie, musely být provedeny určité změny, a to zejména v ochraně obsluhy tiskáren. Kromě obnovy některých zařízení, o kterých bude hovořeno později, byly zaměstnancům pořízeny ochranné pomůcky, které zamezují kontaktu s kovovým práškem, a také možným rizikům vyplývajícím z jeho přítomnosti.



Obrázek 12: Výchozí stav laboratoře při prvním měření

Protože u tiskáren hrozí jiskření a tím vzniká možnost vznícení. Jsou v laboratoři rozmístěny antistatické podložky. Obsluha využívá při práci speciální obuv a gumové rukavice, a také všechny pomůcky jsou pogumované, pro největší možné uzemnění, a tím maximální eliminaci rizika spojeného s jiskřením a celkově elektrickým proudem.

Pro případ přímého kontaktu obsluhy s materiálem, například při přesívání prášku nebo přípravě tiskárny, jsou v laboratoři používány ochranné obleky. Ty jsou používány

jednorázově a po použití jsou ukládány do speciálně označeného barelu – obrázek 13. Tím je sníženo riziko šíření kovových částic po ostatních prostorách haly, či možné vynesení mimo pracovní prostředí. Součástí oděvu jsou zároveň gumové rukavice, které plní zaprvé funkci antistatickou, a zadruhé opět zamezují fyzickému kontaktu obsluhy tiskárny s kovovým práškem. Na obrázku 14 je zachycen pracovník analyzované laboratoře v kompletním ochranném vybavení pro obsluhu stroje a přidružené činnosti spjaté s výkonem činnosti a tisku.



Obrázek 13: Barel pro použité obleky při opuštění pracoviště



Obrázek 14: Obsluha tiskárny se všemi používanými ochrannými pomůckami

Z mého pohledu, je hlavním bezpečnostním prvkem filtrační jednotka, přichycena na opasku obsluhy, spojená přes trubici s obličejovou maskou, tento systém slouží jako přívod a pohon vzduchu. Zařízení je poháněno dobíjecí baterií, která je součástí filtrační jednotky, manipulace s ní je nenáročná na obsluhu, pro umožnění co největšího komfortu při používání. Z okolní atmosféry je vzduch nasáván přes vyměnitelný filtr, u kterého výrobce deklaruje funkčnost na 99,9%. V případě ucpání filtru nebo vybití baterie, by měl zaměstnanec proudit do masky stále čistý vzduch, problém je s množstvím odfiltrovaného prachu. Protože laboratoř nefunguje jako klasický směnový provoz, u filtrů nastává otázka, ohledně výměny. Kdy filtr dokáže ještě zachytit maximální možné množství kovového prachu, a kdy jsou jeho limity přečerpány? Odpověď je velmi nejasná, s ohledem na rozdílný čas strávený přípravou, následným úklidem pracoviště a podobně. I přes tuto komplikaci, je filtrační jednotka a ochranná maska jedním z největších kroků pro bezpečí pracovníků u 3D tiskárny. Kompletní sada chrání dýchací ústrojí a obličej, která je používána na konkrétním pracovišti, je na obrázku 15.



Obrázek 15: Ochranné pomůcky - 3M™ Versaflo[22]

### 2.3 Porovnání původního a současného vybavení laboratoře

Po prvním měření prašnosti, bylo pracoviště zařazeno do kategorie 4. Tedy prostředí s vysokým rizikem ohrožení zdraví. Nejen z tohoto důvodu byly v laboratoři provedeny změny pro bezpečnosti na pracovišti. Některé z úprav byly již zmíněny v předchozím textu, zde je porovnán předchozí stav (obrázek 12) se současným a případné změny jsou odůvodněny. Pro lepší přehlednost byla vytvořena tabulka 4.

Předchozí stav	Současný stav
Jedna tiskárna	Dvě tiskárny
Manuální přesívání přes síta	Prosévačka
Suchý vysavač	Mokrý odlučovač
Přímá manipulace s práškem	Gumové návleky na ruce

Tabulka 4: Porovnání předchozího a současného stavu



Původně byla laboratoř vybavena pouze jednou 3D tiskárnou, později bylo provedeno rozhodnutí o pořízení druhého přístroje. Tato změna by ovšem neměla mít vliv, ohledně rizik spojených s kovovým práškem, pokud jsou prostory přizpůsobeny pro oba stroje. Obě tiskárny jsou v laboratoři postaveny výstupní částí směrem k sobě, pro jednodušší obsluhu v případě využití najednou.

Vzhledem k tomu, že zaměstnanci laboratoře si jsou vědomi rizika spjatého s používáním kovového prášku, je v laboratoři vyvinuta snaha o minimalizaci přímého kontaktu obsluhy s kovovými částicemi. Dalším krokem zvýšení komfortu a bezpečnosti na pracovišti bylo tedy pořízení přešívacího stroje. Ten umožňuje nasypání přebytečného prášku po dokončení tisku, a poté jej recykluje. Není tedy nutné manuální přesívání přes síta, kde velmi jednoduše vířil prach v místnosti, a obsluha byla v přímém kontaktu.

Pro minimalizaci přímého kontaktu se vstupním materiálem, byla instalována dvířka s gumovými návleky na ruce. Obsluha proto nemusí do tiskárny při přípravě aplikovat kovový prášek přímo, pouze v ochranném obleku, ale je zde přidán další element, pro zvýšení bezpečnosti. Na obrázku 16 je znázorněna příprava tiskárny před pořízením zmíněného ochranného prvku.



**Obrázek 16: Příprava tisku při původním vybavení laboratoře**

V neposlední řadě byla provedena výměna přístroje na úklid po ukončení procesu tisku. Původní technický vysavač byl obměněn za vlhký odlučovač. Při vysávání je nasátý vzduch s nečistotami hnán přes vodu, ve které se lépe zachytí i kovové částice, a tím se razantně snižuje jejich následný výskyt v prostoru a tím i riziko s nimi spjaté. Součástí vlhkého odlučovače, je řada filtrů, například u vývodu vzduchu. Tyto filtry je nutné po

určitém období, předepsaném výrobcí, měnit. Diskutabilní, ovšem je, jak důsledný je zaměstnanec při úklidu, a tím pádem, v jakém stavu bude filtr po ukončení.

## 2.4 Technika prostředí

Tato kapitola se zabývá mikroklimatem prostředí, jeho tepelným klimatem a celkovou pohodou prostředí. Pod technikou prostředí jsou řazeny zdroje hluku a vibrací, a také jejich šíření. Problematikou vybrané laboratoře je primárně tepelný stav a hlavně proudění vzduchu, odvod pevných a plyných znečišťujících látek, systém větrání a klimatizační zařízení.

Celá práce je zaměřena na rizika spojena s kovovým práškem, používaným jako vstupní materiál pro 3D tisk. Proto zde bude řešena především technika odvodu pevných částic, možnosti větrání a možnosti víření vzduchu v laboratoři. Během procesu 3D tisku v místnosti narůstá teplota, z toho důvodu je také nutné větrání či instalace klimatizace.

### 2.4.1 Technika prostředí a vybavení v analyzované laboratoři

Prostory vyhrazené pro laboratoř nebyly původně určeny pro účely 3D tisku. Proto je v některých případech komplikované zakomponovat do prostředí prvky určené pro bezpečnost a komfort obsluhy. Původně byla pořízena jedna tiskárna, poté byla přidána druhá a u obou byly doplněny dveře o gumové návleky pro ruce. Celkově se vybavení v prostoru laboratoře postupně přidávalo směrem k lepšímu, toto téma bude podrobněji rozebráno v následující podkapitole, zde bude popsáno současné vybavení.

Hlavními stroji v laboratoři, jak již bylo zmíněno, jsou dvě 3D tiskárny kovu od značky EOS. Jedna je původní a druhá dodatečně pořízena. Laboratoř je uzpůsobena, pro možnost provozu obou strojů najednou, i každého zvlášť. K oběma tiskárnám byly dodatečně instalovány do dveří gumové návleky na ruce. Rukavice minimalizují kontakt obsluhy s kovovým práškem, a tím zvyšují bezpečnost na pracovišti. Inovace zařízení tímto bezpečnostním prvkem, je znázorněna na obrázku 17.



Obrázek 17: Gumové návleky na ruce u dveří tiskárny

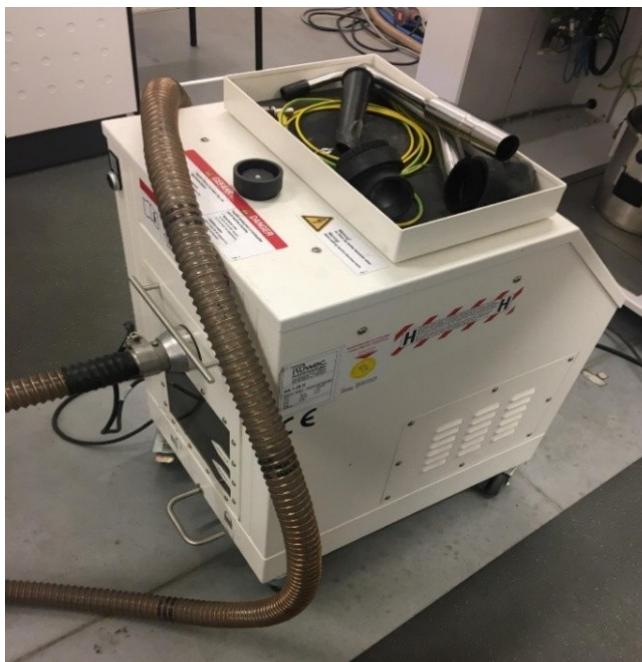
Dalším strojem, který je součástí prostor laboratoře je prosévačka. Tento přístroj byl také pořízen až dodatečně, pro možnost opětovného použití zbylého prášku. Jak bylo již dříve zmíněno, proces tisku metodou DMLS, tedy používanou metodou v analyzované laboratoři, má několik kroků. První nanesení vrstvy kovového prášku, druhý spečení zadaného tvaru a tak dále. Spékána ovšem není celá vrstva a tak z každé vrstvy zůstane část neexponovaného materiálu, který je možné využít pro další výrobu. Tento prášek je ovšem nutné přesít. Dříve pro tyto účely musela obsluha manuálně přesít zbylý prášek přes síta, kde bylo velké riziko kontaktu s práškem a nastávalo zde víření prachu. Momentálně je v laboratoři instalována prosévačka, zobrazena na obrázku 18, do které se nasype shromážděný nevyužitý materiál, který je ze stroje vrácen zpět do barelu pro možné opětovné použití. Tím se opět snižuje možnost kontaktu s práškem a podstatně se zamezuje riziko víření prachu v prostoru.



Obrázek 18: Prosévačka pro recyklaci kovového prášku

Další ze zásadních změn, bylo pořízení nového vysavače. Při uklízení pracoviště je v současné situaci využíván mokrý odlučovač od firmu RUWAC, ukázán na obrázku 19. Mokrý odlučovače jsou doporučovány dodavateli tiskáren. Dříve byl v laboratoři používán klasický vysavač s filtry, kde hrozilo velké riziko úniku a víření prachu přes zadní vývod vzduchu. V případě využití mokrého odlučovače je většina prachových zrn zachycena ve vodě a následně případně ve filtrech. I přesto, dle mého názoru při využití těchto přístrojů hrozí nebezpečí úniku a víření kovových částic, ale podstatně menší. Tento odhad, je podložen interním měřením pomocí magnetů. Zmíněný experiment je popsán v následující kapitole.





**Obrázek 19: Mokrý odlučovač RUWAC**

Pro regulaci teploty a odsávání vzduchu je v laboratoři nainstalována klimatizace. Ta je aplikována především pro udržení komfortní teploty, protože při procesu ze strojů sálá teplo, to je nekomfortní pro obsluhu, obzvláště v ochranném obleku, ale hrozí zde i riziko pro běh strojů. Vzhledem ke konstrukci laboratoře, která se nachází v přízemí budovy, muselo být odsávání vzduchu a tím i kovových částic vyřešeno operativně. Je zde instalováno odsávání u stropu místnosti s ústícím otvorem do volného venkovního prostoru.

### 3 Zmapování pracoviště 3D tisku

V předchozích kapitolách bylo již řečeno, že byla laboratoř zařazena do kategorie 4, tedy označena jako pracoviště s velmi vysokým rizikem pro zdravotní stav zaměstnanců. Bylo tedy nezbytně nutné, zabírat se nejen vývojem aditivní výroby, ale také bezpečností v těchto prostorách. Dříve byly v textu popsány změny, aby bylo možné analyzovat vývoj zvyšování bezpečnosti na pracovišti, je nutné měření prašnosti.

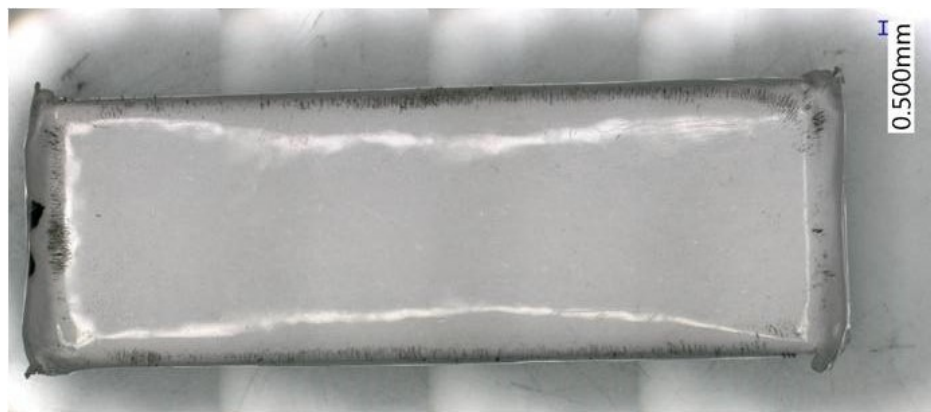
#### 3.1 Provedená měření prašnosti v analyzované laboratoři

Po provedených úpravách a instalaci nových zařízení byla provedena dvě měření společnostmi oprávněnými k vydávání protokolu o měření a jedno interní, které probíhalo průběžně. Podle výsledků je ukázáno, zda jsou provedená opatření dostačující či naopak a ukazují v jakých místech laboratoře a při jakých činnostech hrozí největší riziko spojené s použitím kovového prášku. Na pracovišti je několik míst, u kterých je předpoklad vyšší prašnosti než jinde, proto se při měření, využívalo těchto předpokladů a především se měřilo na těchto místech. Mezi tato místa patří především okolí prosévačka a vývod vzduchu o odlučovače.

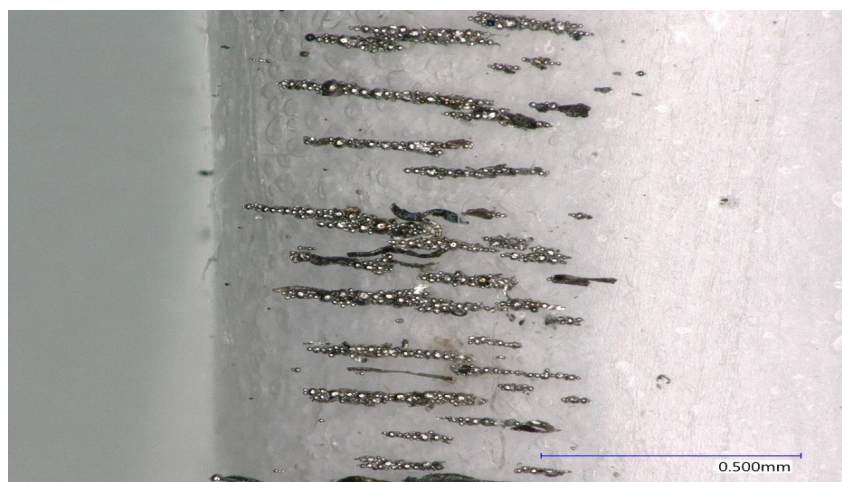
##### 3.1.1 Interní měření pomocí magnetů

Pro účely pracoviště se hledalo nejvhodnější řešení pro zkoumání prašnosti v místnosti, a tím bylo prozatím vyhodnocení měření pomocí magnetů. V laboratoři jsou používány magnetické, i nemagnetické materiály. Přesto byl tento způsob prozatím vyhodnocen jako neúčinnější. Tímto měřením bylo zkoumáno především zlepšení či zhoršení prašnosti v prostoru, a také analyzování míst s největší prašností. Mezi místa s největším podezřením, patří již zmíněný vývod z mokrého odlučovače.

Byly pořízeny magnety, které byly rozmístěny na různá místa po laboratoři, při následujících měřeních byly magnety umístěny i mimo prostory laboratoře, aby byla zjištěna možnost úniku částic mimo vyhrazené prostory pro 3D tisk. Protože magnety mají velmi podobnou barvu jako kovové částice, byly zabaleny do bílého papíru a následně průhledné samolepící pásky. Pomocí této úpravy je usnadněno i následné očištění magnetu, pro možnost dalšího využití. Na obrázku 20 je fotografie magnetu použitého pro měření, kde je vidět zachycení částic především na hranách, kde má magnetická síla největší účinek. Na obrázku 21 je vidět přiblížená část magnetu, kde se na sebe skládají kulovité kovové částice. Díky svému kulovitému tvaru jsou částice rozeznatelné od jiných, například při měření mimo pracoviště.



Obrázek 20: Fotografie magnetu s uchycenými kovovými částicemi



Obrázek 21: Přiblížení magnetu se zachycenými kovovými částmi na sebe

### 3.1.2 Měření přístrojem TestoDiSCmini

Prvním měřením, které bylo provedeno kvalifikovanou společností, bylo měření 8.9. 2021. Použití přístroj slouží pro měření nanočástic, stanovuje množství naměřených prachových zrn na  $\text{cm}^3$  v místnosti. Dokáže analyzovat počet a velikost částic v prostoru v určitém okamžiku, ovšem měřený rozptyl je pouze 10–750 nm. V tomto rozmezí dokáže přístroj analyzovat střední hodnotu zachycených částic. Tímto způsobem měření nelze analyzovat rozbor částic, či stanovit limitní hodnoty pro laboratoř. Přesto jsou výstupy tohoto měření obohacující z hlediska nových informací ohledně prašnosti prostředí.

Průběh měření probíhal dvě hodiny, v tuto dobu prováděla obsluha stroje všechny procesy spjaté s přípravou tiskárny, tiskem a úklidem pracoviště. Po celou dobu byl přístroj uložen na pracovním stole, jak je znázorněno na obrázku 22. Vedle stroje byl položen papír, na kterém do tabulky pracovník zaznamenával činnosti a čas, pro možné vyhodnocení činností s největším rizikem spojeným s prašností v místnosti. Tento časový rozvrh činností je uveden v tabulce 5, přesně podle záznamů pracovníka.



Obrázek 22: Umístění měřicího přístroje a papíru pro zaznamenání činnosti a času

Čas	Činnost
12:00	Odsávání prášku z tiskárny
12:15	Vyndání tisku na stůl + čištění
12:33	Spouštění prosévání + zakládání nové platformy
13:15	Plnění tiskárny práškem
13:29	Vysátí místnosti
13:44	Konec (konec měření 14:00)

Tabulka 5: Záznam pracovníka o činnostech v průběhu měření

### 3.1.3 Měření pomocí pěti rozmístěných sond

Další měření proběhlo 1.12.2021 s ponecháním přístrojů do dalšího dne, měření bylo tedy ukončeno 2.12.2021. Úkolem bylo stanovení celkové prašnosti v prostoru se zaměřením na vybrané prvky těžkých kovů (Cr, Co, Mo, Ni) v prostředí laboratoře. Měření proběhlo jako osobní odběr vzdušnin, kde bylo stanoveno pět pozic, kam byly odběrové sondy umístěny. První byla přichycena na oděv obsluhy v oblasti dýchacích cest, druhá stacionárně do středu místnosti, mezi výstupy tiskáren, třetí na vývod vzduchu a vlhkého odlučovače, čtvrtá u přešívacího zařízení a poslední do chodby před laboratoří, umístění je ukázáno na obrázcích 23 – 27. Pro přehlednost výsledků je u každé odběrové sondy uvedeno označení používané ve výsledném protokolu (1p – 5p). Pro měření byly zaznamenány mikroklimatické podmínky, a to v tabulce 6. Na obrázku 28 je uvedena ukázka, jednoho z mnoha vyhodnocování přidruženého měření velikosti částic a procentuálního obsazení chemických prvků v částicích.

Měřicí místo	Datum měření	Popis nebo název místa	Teplota vzduchu °C	Relativní vlhkost vzduchu v %	Atmosférický tlak v kPa
1p, 3p, 4p, 5p	1.12.2021	Laboratoř 3D tisku	24,0	35,2	96,7
2p		Chodba před laboratořmi 3D tisku	23,8	51,2	
	1.12.2021 (v 10 hod.)	Venkovní podmínky	7,6	83,2	

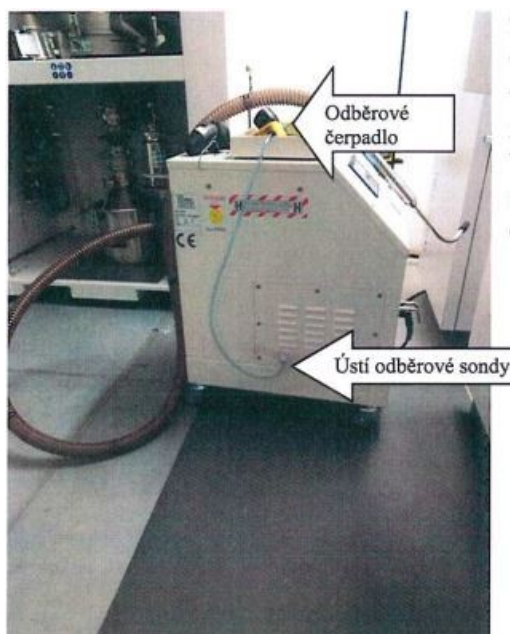
Tabulka 6: Mikroklimatické podmínky při druhém měření v laboratoři



Obrázek 23: Obsluha tiskárny s upevněným odběrovým zařízením (1p)

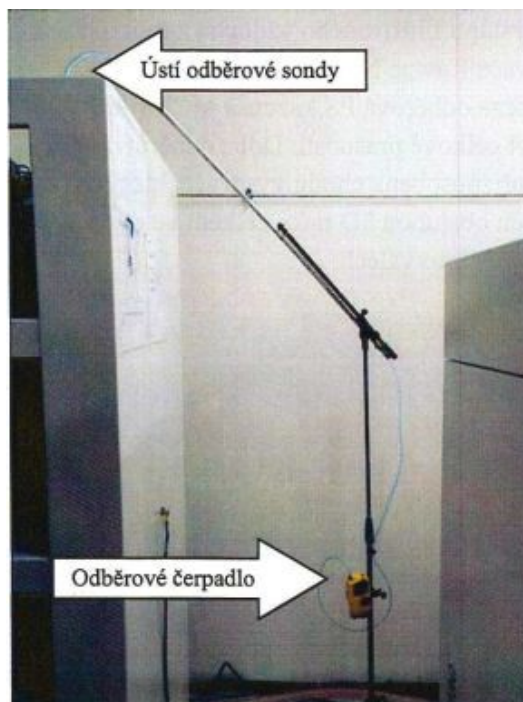


Obrázek 24: Druhé odběrové zařízení ve středu místnosti (5p)

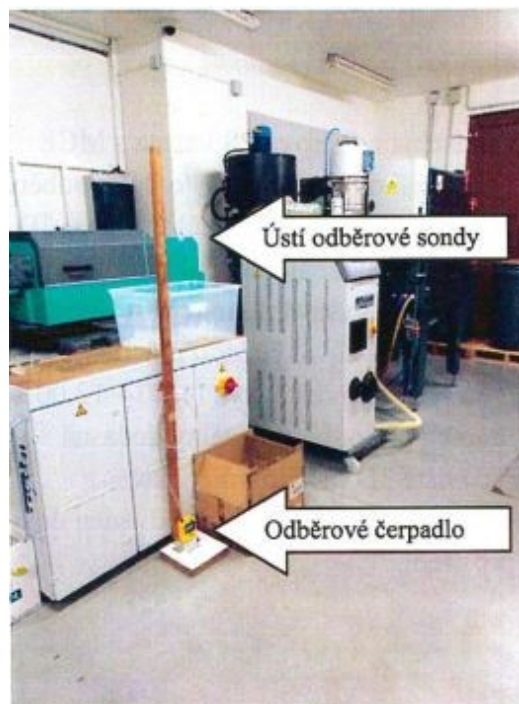


Obrázek 25: Třetí odběrové zařízení u vývodu z mokrého odlučovače (3p)

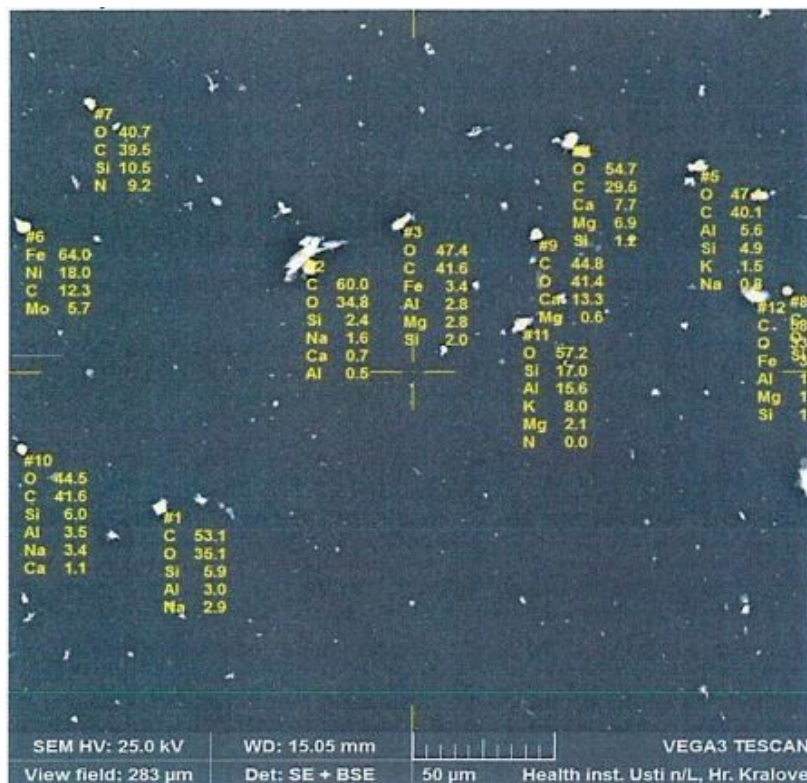




Obrázek 26: Čtvrté odběrové zařízení na přesívacím modulu (4p)

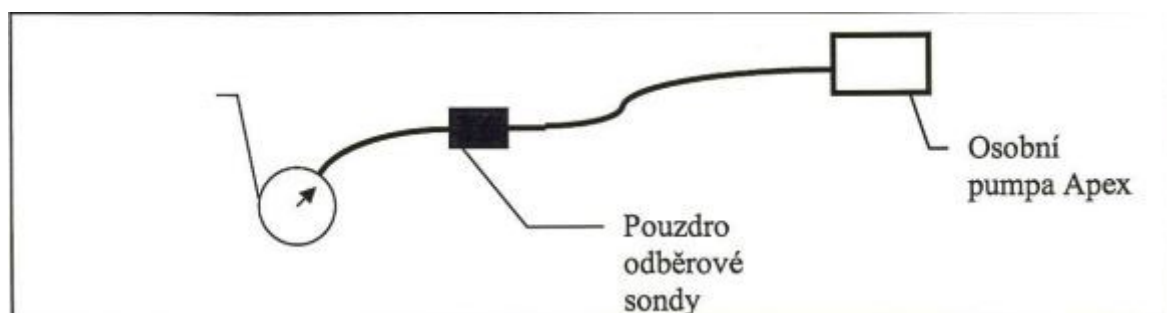


Obrázek 27: Páté odběrové zařízení v přístupové chodbě do laboratoře (2p)



Obrázek 28: Fotodokumentace k sekundárnímu měření velikosti a obsahu částic (zvětšení 1000x)

Jak bylo již řečeno, měření bylo uskutečněno pomocí pěti odběrových zařízení s předem specifikovanou pozicí umístění. Rozmístění bylo vybráno, dle podezření na místa s největším výskytem kovového prášku na pracovišti, pro získání informací o možném úniku částic mimo laboratoř a zhodnocení rizika pro zaměstnance. Princip funkce zařízení spočívá v osobním čerpadle, na které je připojena odběrová sonda, do které proudí vzduch přes ústí s filtrem. Jako názorná ukázka slouží schéma na obrázku 29.



Obrázek 28: Schéma odběrového zařízení pro měření prašnosti



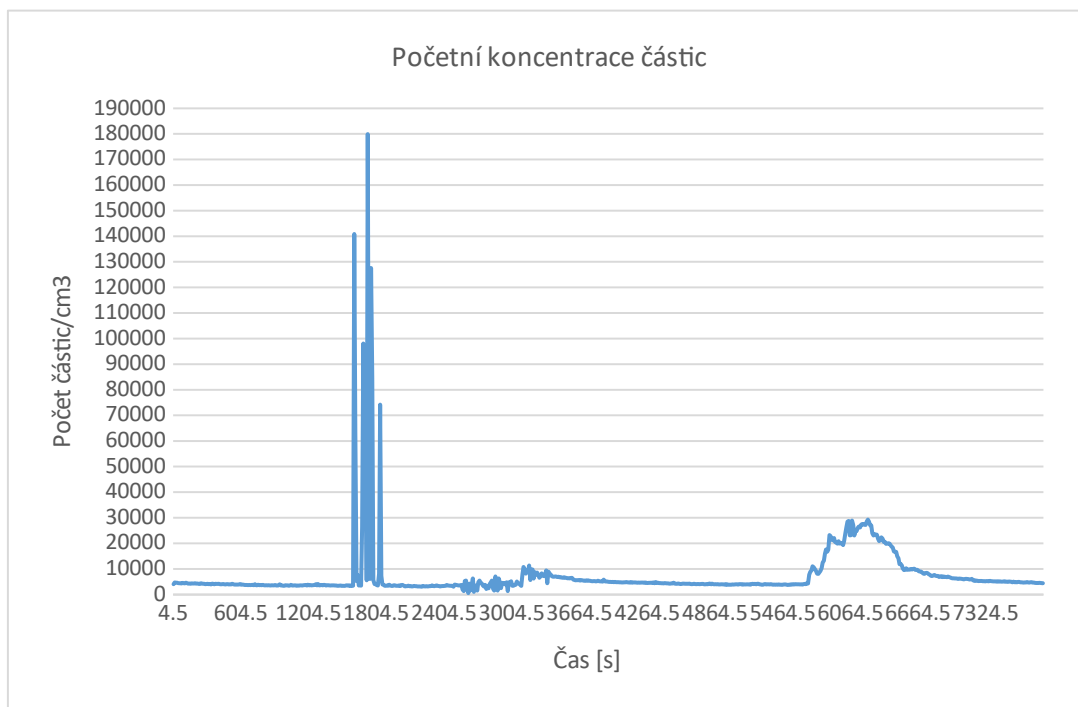
## 4 Zhodnocení

Z hlediska prašnosti, bylo zapotřebí určit jaká je v laboratoři prašnost v současné situaci, v jakých místech je výskyt kovových částic nejvyšší a jaké je složení prachového znečištění v prostoru. Prašnost se určuje podle hlediska PEL, který se vyjadřuje v předem určených jednotkách  $\text{mg}/\text{m}^3$  nebo vláken/ $\text{cm}^3$ . V předchozí kapitole byla popsána měření, která proběhla v laboratoři, z jejich výsledků lze vyvodit vyhodnocení funkčnosti zavedených změn a používaných opatření v laboratoři.

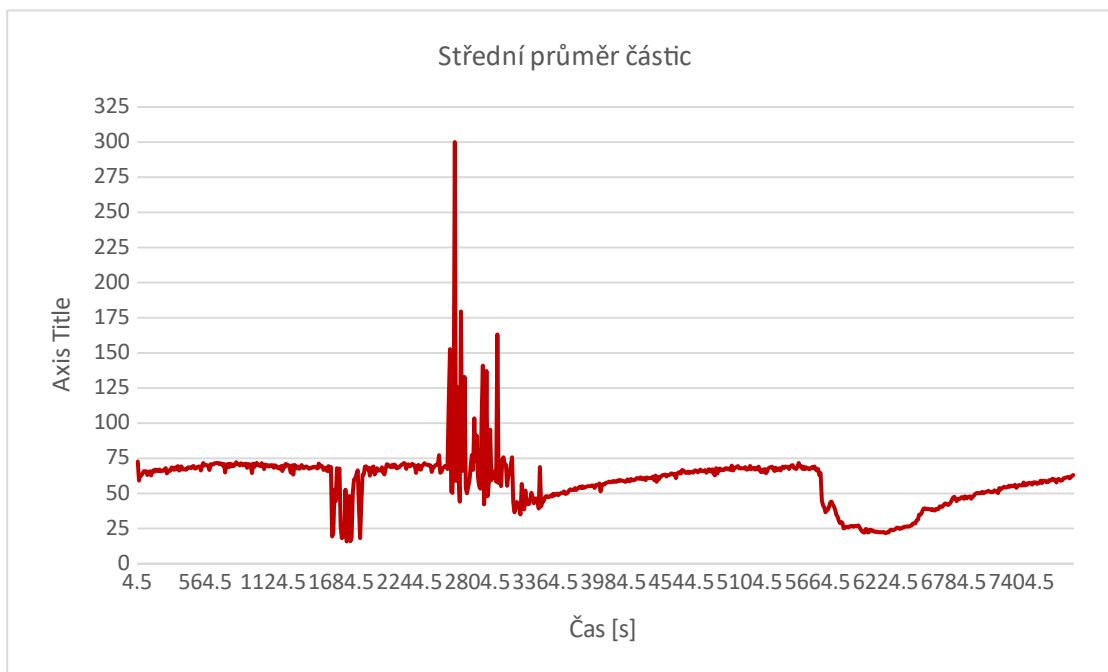
Interní měření pomocí magnetů, slouží pouze pro vlastní srovnání výsledků, ale nelze ho brát jako stěžejní. Díky magnetům lze vidět, v jakých místech, či při jakých činnostech se práší nejvíce. Vyhodnocování probíhá pouze pomocí lidského oka s přiblížením na optickém mikroskopu, a tedy záleží na úsudku osoby provádějící experiment. Není zde možnost přesného zhodnocení množství a velikosti nachytných částic nebo rozbor složení prvků obsažených na vzorcích. Další nevýhodou je možnost zachycení pouze magnetických částic. I přesto, je dle mého názoru nutné pokračovat v těchto experimentech pro možnou interní kontrolu. Ostatní dvě měření samozřejmě byla přesnější a tím svými výsledky přínosnější pro laboratoř.

### 4.1 Výsledky prvního měření prašnosti

Přestože rozsah měřených částic, tímto způsobem měření nebyl pro danou laboratoř dostačující, byly dodány výsledky, které ukázaly výkyvy při průběhu měření. Tyto výkyvky oproti průměrnému průběhu v pozadí jsou tři. Nejvyšší z nich je při vyndání výrobku z tiskárny a čištění. Velmi malá odchylka od průměru nastala při zapínání přešívacího modulu a přípravě nové platformy, poslední výkyv byl, dle měření, při vysávání laboratoře. Vliv kroků při procesech v laboratoři na koncentraci částic je znázorněn grafem na obrázku 30. Vykázané hodnoty mohou být zkreslené, jelikož měřicí přístroj byl uložen stacionárně na stole, kde by koncentrace neměla být příliš vysoká a není jisté, že měřený rozsah je dostačující. Ohledně velikosti částic je přiložen graf na obrázku 31, který ukazuje velikost částic v závislosti na čase. Největší rozsah hodnot byl naměřen v čase, kdy byla spuštěna prosévačka a probíhala příprava nové platformy, jedná se o rozmezí 50–300 nm.



Obrázek 29: Graf koncentrace částic v průběhu měření



Obrázek 30: Graf průměrné velikosti částic během měření

## 4.2 Výsledky druhého měření prašnosti

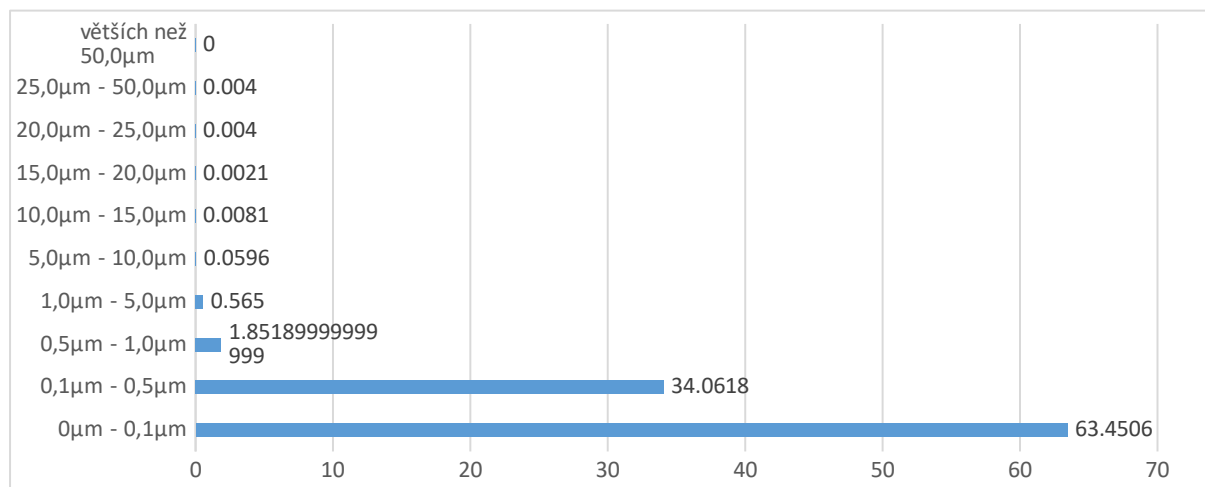
Primárním výstupem bylo změření koncentrace vybraných těžkých kovů (Cr, Co, Mo, Ni). Z měření vznikl sekundární výstup, a to rozdělení distribuce částic podle ekvivalentního průměru. Každý z výsledků byl proveden jinou laboratoří, ale se stejnými vstupními hodnotami zachycenými na pět čerpadel popsanych v předchozím textu.

Přidružené měření, bylo provedeno spíše jako informativní pro zaměstnance a provozovatele laboratoře. Výsledky ukázaly rozptyl velikostí částic a četnost v každém velikostním rozsahu, ale také procentuální zastoupení jednotlivých chemických prvků. Vzhledem k těmto poznatkům lze porovnat výstupy s hodnotami, které udávají dodavatelé kovového prášku. Dále mohou být tyto výsledky použity pro zajištění bezpečnostních pomůcek na pracovišti a celkové zajištění techniky prostředí v laboratoři. V tabulce č. 7 jsou uvedeny výsledky počtu nalezených částic zachycených na filtr, rozdělených do velikostních intervalů. Výsledky byly vyneseny do grafu na obrázku 32 pro lepší přehlednost. Největší část zaujímají částice v rozmezí 0 – 0,1 μm a dále 0,1 – 0,5 μm, jedná se tedy o velmi malé průměry částic, které jsou bohužel nejvíc nebezpečné, a proto by tomu mělo být co nejvíce přizpůsobeno pracovní prostředí. Tabulka 9 a graf na obrázku 33 uvádí procentuální rozložení prvků, které prášek obsahuje a přehledněji dáno do grafu. Pro porovnání je přidána tabulka 8 se složením, v laboratoři používané, Martenzitické oceli MS1, doložené dodavatelem.

Odebraný objem vzorku 2580,92 dm <sup>3 a)</sup>	Počet koncentrace prachových částic ne filtru (plocha filtru 1319,585 mm <sup>2</sup> )	Početní koncentrace prachových částic (přepočet na 1 m <sup>3</sup> odsátého vzduchu)	Procentní zastoupení prachových částic v odebraném vzorku
Počet nalezených a počítaných částic v intervalu 0μm - 50μm (ekvivalentní průměr)	[ks/filtr]	[ks/m <sup>3</sup> ]	[%]
0μm - 0,1μm	219321607	84978073	63,4506
0,1μm - 0,5μm	117737198	45618306	34,0618
0,5μm - 1,0μm	6401371	2480267	1,8519
1,0μm - 5,0μm	1952942	756684	0,5650
5,0μm - 10,0μm	206144	79872	0,0596
10,0μm - 15,0μm	28140	10903	0,0081
15,0μm - 20,0μm	7199	2789	0,0021
20,0μm - 25,0μm	1309	507	0,0040
25,0μm - 50,0μm	1309	507	0,0040
větších než 50,0μm	0	0	0
Celkem:	345657218		100,00

a) hodnota přepočítaná na normální stanovené podmínky dle NV 361/2007 Sb.: 20°C a 101,325 kPa

**Tabulka 7: Počet nalezených částic na plochách filtrů**



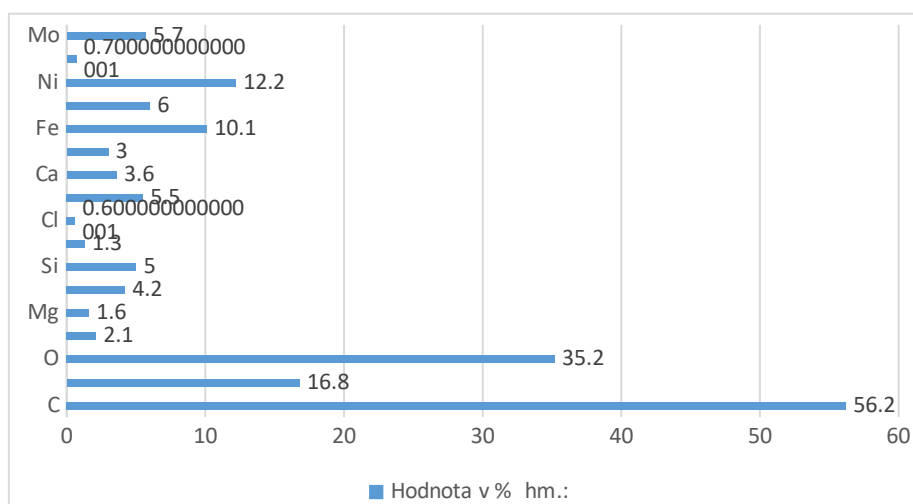
Obrázek 31: Procentuální zastoupení částic v intervalu 0µm - 50µm

Prvek	Fe	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	C	Mn,Si	P, S
Hodnota		17 -	8,5 -	4,5 -	0,6 -	0,05 -	≤	≤	každý ≤	každý ≤
v % hm.:	zbytek	19	9,5	5,2	0,8	0,15	05	0,03	0,1	0,01

Tabulka 8: Složení EOS Martenzitické oceli MS1 (hmot. %)

Prvek	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Mo
	Aritmetický průměr všech naměřených hodnot (% hm.)																
Hodnota v % hm.:	56,2	16,8	35,2	2,1	1,6	4,2	5,0	1,3	0,6	5,5	3,6	3,0	10,1	6,0	12,2	0,7	5,7

Tabulka 9: Prvkové složení prachových částic



Obrázek 32: Graf prvkového složení prachových částic

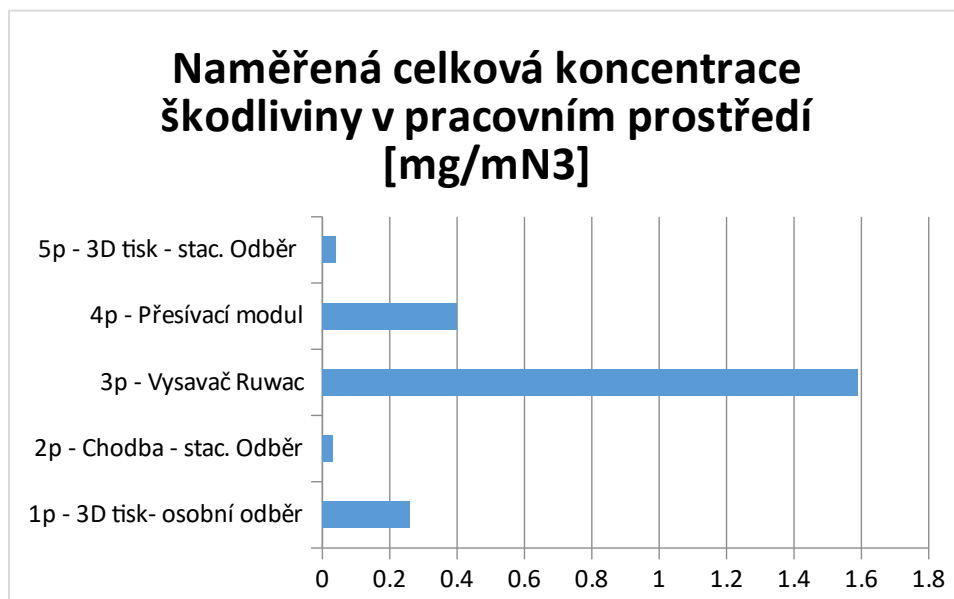
Primárně bylo měření provedeno pro zjištění celkové prašnosti v prostředí, sondy byly rozmístěny na místech s největší pravděpodobností prašnosti, na obleku obsluhy v oblasti dýchacích cest, pro zjištění velikosti možného nebezpečí a v přístupové chodbě, pro zjištění možnosti šíření částic. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 10, kde je ukázáno, že největší prašnost je u vzduchového vývodu mokrého odlučovače a druhé nejvíce koncentrované místo je v blízkosti prosévacího stroje. Naopak na zařízení umístěném v přístupové chodbě a ve středu místnosti mezi tiskárnami jsou hodnoty velmi nízké. Díky těmto výsledkům byl podán akreditovanou laboratoří, která měření prováděla, návrh na zařazení zkoumaného prostředí do bezpečnostní kategorie 1. V tabulce 10 jsou zaznamenány výsledky koncentrace vybraných těžkých kovů (Co, Cr, Ni, Mo) pro každou sondu zvlášť. Nejvyšší zastoupení má ve všech vyhodnoceních molybden. Na obrázku 34 je graf s vyhodnocením celkové prašnosti na jednotlivých sondách, kde je velmi zřetelně vidět největší naměřená hodnota u mokrého odlučovače. Obrázek 35 je graf, kde jsou hodnoty prašnosti vyobrazeny pro těžké kovy Co, Cr, Mo a Ni, kde je opět vidět že největší hodnoty jsou u mokrého odlučovače a vždy má největší zastoupení Molybden.

Měřené pracoviště	Měřená škodlivina	Naměřená hodnota škodliviny v pracovním prostředí [mg/ vzorek]	Naměřená koncentrace <sup>1)</sup> škodliviny v pracovním prostředí [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	PEL <sup>2)</sup> přípustný expoziční limit (8 hod expozice) [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
1p - 3D tisk- osobní odběr	Celková prašnost	< 0,10	< 0,26	10,0
2p - Chodba - stac. Odběr		< 0,10	< 0,03	10,0
3p - Vysavač Ruwac		< 0,10	< 1,59	10,0
4p - Přesívací modul		< 0,10	< 0,40	10,0
5p - 3D tisk - stac. Odběr		< 0,10	< 0,04	10,0

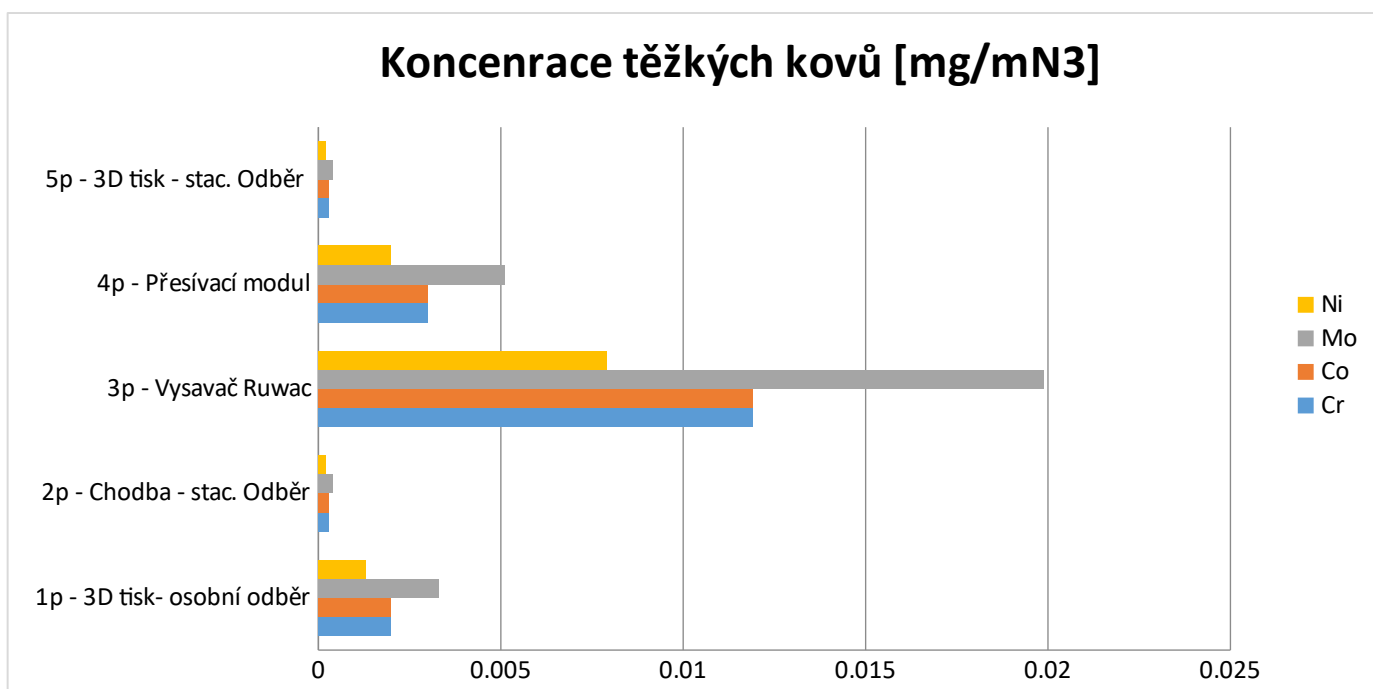
1) hodnota přepočtená na normální stavové podmínky dle NV 361/2007 Sb.: 20°C a 101,325kPa

2) Dle přílohy č. 3 k NV 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci

**Tabulka 10: Výsledky měření prašnosti**



Obrázek 33: Graf celkové prašnosti na odběrových sondách



Obrázek 34: Graf prašnosti těžkých kovů na odběrových sondách

Měřené pracoviště	Měřená škodlivina	Naměřená hodnota škodliviny v pracovním prostředí [mg/ vzorek]	Naměřená koncentrace <sup>1)</sup> škodliviny v pracovním prostředí [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	PEL <sup>2)</sup> přípustní expoziční limit (8 hod expozice) [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	NPK - Nejvyšší přípustná koncentrace <sup>2)</sup> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
1p - 3D tisk- osobní odběr	Chrom (Cr)	< 0,75	< 0,0020	0,50	1,50
	Kobalt (Co)	< 0,75	< 0,0020	0,05	0,10
	Molybden (Mo)	< 1,25	< 0,0033	5,00	25,00
	Nikl (Ni)	< 0,5	< 0,0013	0,50	1,00
2p - Chodba - stac. Odběr	Chrom (Cr)	< 0,75	< 0,0003	0,50	1,50
	Kobalt (Co)	< 0,75	< 0,0003	0,05	0,10
	Molybden (Mo)	< 1,25	< 0,0004	5,00	25,00
	Nikl (Ni)	< 0,5	< 0,0002	0,50	1,00
3p - Vysavač Ruwac	Chrom (Cr)	< 0,75	< 0,0119	...	...
	Kobalt (Co)	< 0,75	< 0,0119	...	...
	Molybden (Mo)	< 1,25	< 0,0199	...	...
	Nikl (Ni)	< 0,5	< 0,0079	...	...
4p – Prosévací modul	Chrom (Cr)	< 0,75	< 0,0030	...	...
	Kobalt (Co)	< 0,75	< 0,0030	...	...
	Molybden (Mo)	< 1,25	< 0,0051	...	...
	Nikl (Ni)	< 0,5	< 0,0020	...	...
5p - 3D tisk - stac. Odběr	Chrom (Cr)	< 0,75	< 0,0003	0,50	1,50
	Kobalt (Co)	< 0,75	< 0,0003	0,05	0,10
	Molybden (Mo)	< 1,25	< 0,0004	5,00	25,00
	Nikl (Ni)	< 0,5	< 0,0002	0,50	1,00

1) hodnota přepočtená na normální stavové podmínky dle NV 361/2007 Sb.: 20°C a 101,325kPa

2) Dle přílohy č. 3 k NV 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci

**Tabulka 11: Výsledky měření koncentrace těžkých kovů**

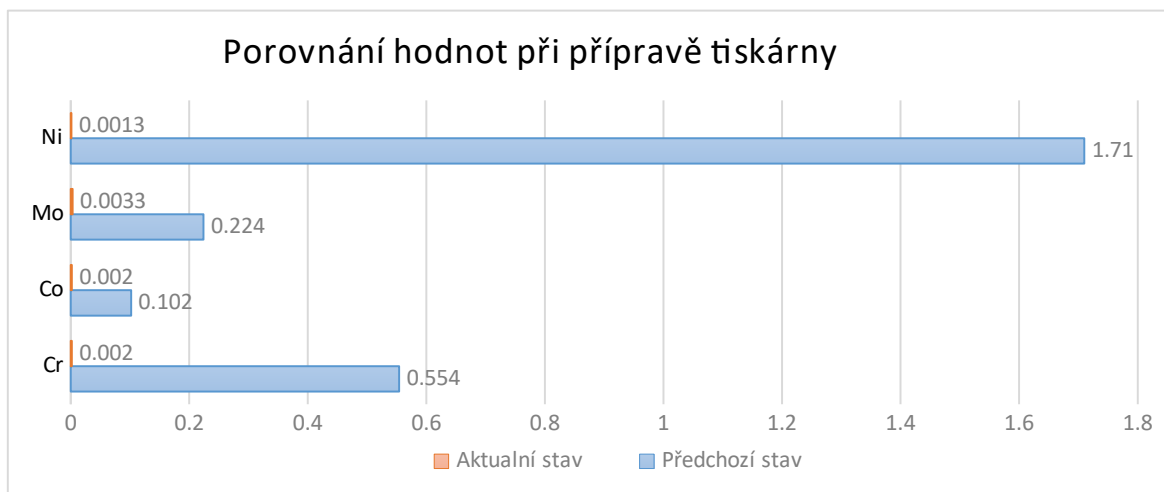
Pro porovnání je přiložena tabulka s výsledky původního měření - tabulka 12, a obrázky 36, 37 a 38. Prvotní měření bylo provedeno při pěti činnostech/ na pěti místech, zapsaných

v tabulce 12, některé. Hodnoty jsou graficky porovnány při přípravě tiskárny, před instalací sekundárních dveří s ochrannými návleky a po jejich zavedení. Druhý graf porovnává výsledky z měření prosévání před pořízením prosévacího zařízení a po jeho pořízení. Ostatní hodnoty nejsou porovnány mezi sebou, protože původní měření se v některých ohledech lišilo od aktuálního. Přesto je na grafech vidět velký rozdíl, díky zavedeným ochranným prvkům.

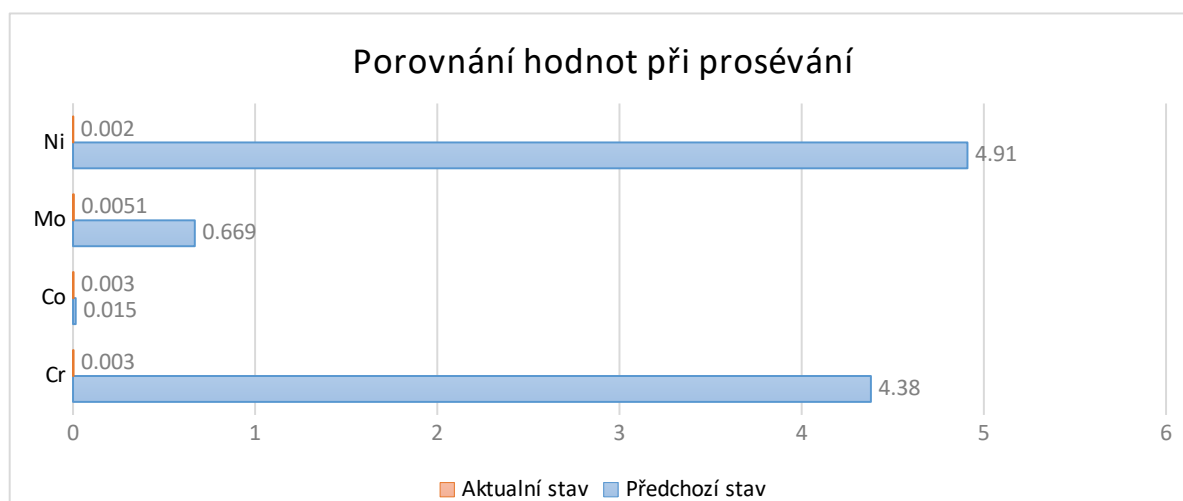
Umístění/ Činnost	Měřená škodlivina	Naměřená koncentrace - přepočítaná na celosměnovou [mg/m <sup>3</sup> ]	PEL [mg/m <sup>3</sup> ]
Vyjímání tisku, zakládání nového tisku	Fe a jeho slitiny	28,3	10
	Ni	1,71	0,5
	Co	0,102	0,05
	Cr	0,554	0,05
	Mo	0,224	5,00
Postprocessing - broušení	Fe a jeho slitiny	12,8	/
	Ni	0,714	0,5
	Co	0,324	0,05
	Cr	0,013	0,05
	Mo	0,199	5,000
Stac. odběr uprostřed laboratoře	Fe a jeho slitiny	0,3	10
Přesívání kovového prášku	Fe a jeho slitiny	44,3	/
	Ni	4,91	1,0
	Co	0,015	0,1
	Cr	4,38	1,5
	Mo	0,669	25,00
Nасыпání a pěchování kovového prášku	Fe a jeho slitiny	27,3	/
	Ni	5,76	1,0
	Co	1,34	0,1
	Cr	1,05	1,5
	Mo	0,921	25,00

Tabulka 12: Tabulka s výsledky z původního měření





Obrázek 35: Graf s porovnáním hodnot při přípravě tiskárny před a po instalaci sekundárních dveří



Obrázek 36: Graf s porovnáním hodnot při přesívání prášku před a po instalaci prosévacího modulu

## 5 Závěr

V úvodu práce byl vytyčen cíl práce, a to zmapování a zhodnocení rizik spjatých s prašností. Od posledního měření, kdy bylo pracoviště zařazeno do kategorie 4, proběhlo v laboratoři několik změn, především pro zvýšení bezpečnosti práce a kvality pracovního prostředí. Pro ověření byla provedena dvě akreditovaná měření a jedno průběžné interní. Měření pomocí magnetů zaměstnanci laboratoře, napomohlo určení kritických míst s největší prašností. Tyto znalosti byly využity pro následné měření dvěma laboratořemi. Výsledky prokázaly, že největší prašnost je u vývodu vzduchu z mokrého odlučovače. Také bylo změřeno, že největší zastoupení v zachycených vzorcích mají částice o rozměrech do 0,1  $\mu\text{m}$  a 0,1 až 0,5  $\mu\text{m}$ . U takto malých kovových částic je diskutabilní funkčnost ochranných pomůcek, jak velká část je zachycena pomocí ochranných filtrů a jaká je vstřebána obsluhou tiskárny.

Výsledkem měření pozvaných společností, bylo vyhodnocení procesů, kdy se v místnosti nejvíce praší, velikostní rozptyl a prvkové složení částic, a hlavně celková prašnost. Důležitým výsledkem pro laboratoř, je celková prašnost. Výstup tohoto měření zařadil laboratoř z původní čtvrté kategorie, tedy pracoviště s vysokým rizikem, do kategorie první, tedy s velmi nízkým rizikem. I přesto, je doporučeno zanechat zavedené bezpečnostní prvky, a i nadále se věnovat tomuto tématu. První měření pomocí čerpadla, je označeno jako poněkud zkreslené, pro svou zvolenou polohu, mimo hlavní část laboratoře, s největší předpokládanou možností prašnosti. Také je doporučeno, pokračování interního měření pomocí magnetů, pro co největší eliminaci možného rizika na pracovišti.

I přes konstrukci laboratoře v přízemí, kde jsou velmi obtížné podzemní úpravy, je jedním z návrhů, na který je apelováno nejvíce, zavedení odsávání prachových částic. Nejlepší umístění, by bylo v podlaze, kde by se odsával již spadlý prášek, a zároveň by byl urychlen dopad částic, a tím by se zároveň eliminovalo víření v místnosti. Druhým návrhem je oddělení laboratoře a chodby prostorem pro převlékání obsluhy. Zde by byly umístěny barely na použité ochranné obleky. Zaměstnanci by tím byli chráněni ještě o něco více než doposud a snížila by se možnost roznosu částic ven z laboratoře.

Do budoucna, je vyjádřeno doporučení, zaměřit se na vzduchový vývod z mokrého odlučovače, kde byly naměřeny nejvyšší hodnoty prašnosti. Další otázkou je možnost využívání filtrů pro filtrační jednotku. Vzhledem k nestandardní pracovní době v laboratoři, tedy době, která neodpovídá směnovému dělení na 8 pracovních hodin, je obtížné určit vytíženost filtru. V případě analyzované laboratoře, je obsluha v některých případech v kontaktu s kovovým práškem několik hodin, a jindy naopak pár minut. Tyto problémy mohou být součástí dalšího výzkumu v ohledu bezpečnosti a techniky prostředí, společně s dopadem technologie 3D tisku kovů na environment.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] Aditivní výroba - 3D-tisk.cz
- [2] ZETKOVA, I. (2017) Problematika výroby strojních kovových součástí. ZČU v Plzni. Dostupné z : <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.htm>
- [3] <https://www.thefabricator.com/additivereport/news/additive/ingersoll-3d-prints-a-22-ft-tool-for-making-helicopter-blades-in-75-hours>
- [4] <https://medium.com/extreme-engineering/3-additive-manufacturing-technologies-to-watch-out-for-in-2017-7226d310ca56>
- [5] CHALOUPKA, M. (2017) Konstrukce 3D tiskárny pro tisk materiálu s příměsí karbonových vláken. VUT v Brně. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=148200](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148200)
- [6] NAKLÁDALOVÁ, T. (2017) Konstrukční optimalizace výrobní linky využitím aditivní technologie SLS. VUT v Brně. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=173609](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=173609)
- [7] <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>
- [8] DVOŘÁK, J. (2017) Technologické možnosti aditivních technologií. ČVUT v Praze. [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73084/F2-BP-2017-Dvorak-Jan-BP\\_Dvorak.pdf?sequence=-1](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73084/F2-BP-2017-Dvorak-Jan-BP_Dvorak.pdf?sequence=-1)
- [9] [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/principem-fotopolymerizace-k-rychlejsimu-tisku-3d\\_44960.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/principem-fotopolymerizace-k-rychlejsimu-tisku-3d_44960.html)
- [10] JALŮVKA, J. (2017) Aditivní technologie a jejich využití pro výrobu galvanické cely. VUT v Brně. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=148556](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148556)
- [11] <https://trider.cz/material/abs>
- [12] HERZÁN, J. (2016) Možnosti uplatnění aditivních technologií při přímé výrobě slévárenských. VUT v Brně. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=148992](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148992)
- [13] <https://www.protocast.cz/cz/materialy/3d-tiskovy-material/>
- [14] <https://www.sroubyonline.cz/co-je-to-din>
- [15] <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologii-3d-tisku>
- [16] <https://www.guard7.cz/tridy-pozaru/>
- [17] [https://www.happyend.cz/znacka-ghs02-horlave-latky?gclid=CjwKCAjwo8-SBhAlEiwAopc9W4QBAPT9LvzXxoJ2tA1WyBG\\_GQsUVK54QYQrMbRV5-foVXoTzZCIwRoC3goQAvD\\_BwE](https://www.happyend.cz/znacka-ghs02-horlave-latky?gclid=CjwKCAjwo8-SBhAlEiwAopc9W4QBAPT9LvzXxoJ2tA1WyBG_GQsUVK54QYQrMbRV5-foVXoTzZCIwRoC3goQAvD_BwE)
- [18] <https://www.stromprop.cz/nebezpeci-vybuchu-piktogram-vybuch-d-3910.html>
- [19] <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/prasnost-na-pracovisti-1>
- [20] <https://zsbozp.vubp.cz/pracovni-prostredi/rizikove-factory/nanobezpecnost>
- [21] <https://www.guard7.cz/prach/>
- [22] [https://www.3m.com/3M/en\\_US/p/d/v100559008/](https://www.3m.com/3M/en_US/p/d/v100559008/)