

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Majandusteaduskond

Ärikorralduse instituut

Margus Veide

TÖÖKESKKONNA RISKID

KIHTLISANDUSTEHNOLOOGIATE KASUTAMISEL

TOOTMISES TALTECH LABORI NÄITEL

Magistritöö

Õppekava JUHTIMINE JA TURUNDUS, peeriala tootmise ja teeninduse juhtimine

Juhendaja: Karin Reinhold, PhD

Kaasjuhendaja: Meelis Pohlak, PhD

Tallinn 2019

Deklareerin, et olen koostanud töö iseseisvalt ja olen viidanud kõikidele töö koostamisel kasutatud teiste autorite töödele, olulistele seisukohtadele ja andmetele ning ei ole esitanud sama tööd varasemalt ainepunktide saamiseks. Töö pikkuseks on 11448 sõna sissejuhatusest kuni kokkuvõtte lõpuni.

Margus Veide

(allkiri, kuupäev)

Üliõpilase kood: 181902TATM

Üliõpilase e-posti aadress: margus.veide@gmail.com

Juhendaja: Karin Reinhold, PhD:

Töö vastab kehtivatele nõuetele

.....

(allkiri, kuupäev)

Kaasjuhendaja: Meelis Pohlak, PhD:

Töö vastab kehtivatele nõuetele

.....

(allkiri, kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Lubatud kaitsmisele

.....

(nimi, allkiri, kuupäev)

SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTE	3
SISSEJUHATUS	4
1. 3D PRINTIMISE KUJUNEMINE, TÖÖKESKKOND JA TEHNOLOOGIAD.....	7
1.1. 3D printimise kujunemine ja võimalused	12
1.2. 3D printimise tehnoloogiate kirjeldus	13
1.3. 3D printimise töökeskkond.....	15
2. UURIMISTÖÖ OBJEKTID JA METOODIKA	20
2.1. Uuritavate seadmete tööpõhimõtted	20
2.1.1. Formiga P100	20
2.1.3. SLM 280 2.0.....	24
2.1.3. SLM 50.....	26
2.1.4. Leapfrog Creatr HS	27
2.2. Mõõtmis- ja andmeanalüüsimeetod.....	29
3. MÕÕTETULEMUSED.....	36
3.1. Füüsilised ohutegurid.....	36
3.1.1. Müra mõõtmised.....	36
3.1.2. Mikrokliima mõõtmised	38
3.1.3. Elektromagnetväljade mõõtmised	42
3.2. Keemilised ohutegurid.....	45
4. ETTEPANEKUD TÖÖTERVISHOIU JA TÖÖOHUTUSE PARENDAMISEKS	53
KOKKUVÕTE	58
SUMMARY	61
KASUTATUD ALLIKATE LOETELU	65
LISAD	69
Lisa 1. Formiga P100 sagedusvahemike magnetvälja (nT) amplituudi kestusmõõtmine	69
Lisa 2. SLM 50 sagedusvahemike magnetvälja (nT) amplituudi kestusmõõtmine.....	70

LÜHIKOKKUVÕTE

Viimastel aastakümnetel on tootmisettevõtete töökeskkonna ohutusele pööratud üha rohkem tähelepanu. Väga suure panuse positiivsesse arengusse annab töötajatest hoolivates ettevõtetes teadmiste põhine juhtimine, insenerlahendused ja ohutuskultuuri juurutamine. (Kim *et al.* 2016, 89)

Uute tehnoloogiate kasutusele võtmisega tekivad töökeskkonnas riskid, millega ei osata alati arvestada, sest puudub vastav kogemus. Viimasel kümnel aastal on jõudsalt kasvanud kihtlisandustehnoloogial põhinevate 3D printerite kasutusele võtmine. Uute tehnoloogiate levimine on igati positiivne, kuid võib endaga kaasa tuua uusi riske. Nii võib see olla ka suhteliselt kiiret kasvu näitavas 3D printerite sektoris. Tööohutuse ja tervishoiu juhtimine ettevõtetes aitab vähendada töökeskkonnas tekkivaid riske. Lähtuvalt eeltoodust on antud magistr töö eesmärg tuvastada TalTech mehaanika ja tööstustehnika instituudi laboris kasutatavate kihtlisandusseadmete töökeskkonna riskid ning koostada ettepanekud tootmise töökeskkonna parendamiseks kihtlisandustehnoloogia seadmete kasutamisel.

Ohutegurite tuvastamine toimub instituudi tööruumides ning riske mõõdetakse Ergonoomialabori mõõtevahenditega. Autor annab töös ülevaate teostatud mõõtmistulemustest ning tõlgendab tulemusi lähtuvalt õigusaktidega kehtestatud piirnormidest.

Läbiviidud mõõtmised TalTech mehaanika ja tööstustehnika instituudi töökeskkonnas kinnitavad, et seal esinevad riskid, millega tööandja peab tegelema. Tööandja peab seadmete soetamisel arvestama ka töötaja tervist kahjustavate võimalike teguritega ja töötajatele kujundama seadmete kasutamiseks sobiva töökeskkonna. Kuna kihtlisandustehnoloogiad on jõudnud igapäevasesse kasutusse tootmisettevõtetes, siis tuleb riskide kaardistamiseks ja riskide vähendamise meetmeteks viia läbi täiendavaid uuringuid.

Võtmesõnad: Kihtlisandustehnoloogia, mikrokliima, müra, tolm, õhus leiduvad kemikaalid.

SISSEJUHATUS

Viimastel aastakümnetel on tootmisettevõtete töökeskkonna ohutusele pööratud üha rohkem tähelepanu. Võib julgelt väita, et ettevõtted panustavad järjest enam tööohutusse ja töökeskkonda, mis omakorda on loonud soodsad tingimused töökeskkonnast tingitud haigestumiste vähenemisse. Väga suure panuse positiivsesse arengusse on andnud töötajatest hoolivates ettevõtetes teadmiste põhine juhtimine, insenerlahendused ja ohutuskultuuri juurutamine. (Kim *et al.* 2016, 89)

Käesoleval sajandil on töökeskkondades tekkinud uusi terviseriske, millega siiani ei ole osatud arvestada. Kasutusele tulevad uued tehnoloogiad ja koos uute tehnoloogiatega ka uued riskid töökeskkonnas.

Viimasel kümnendil on hakanud populaarsust võitma kihtlisandustehnoloogial põhinevad 3D printerid. Tegemist on 3D töötlemise edasiarendusega täiesti uue tootmisprotsessina. Oleme harjunud vaatama tootmisprotsesse siiani selliselt, kus toormaterjalist eemaldatakse reeglina üleliigsed materjalitükid ja valminud detailid ühendatakse sobivaks mudeliks. Kihtlisandustehnoloogia läheneb tootmisele hoopis uuel tootmisprotsessil. Nimelt toimub 3D mudeli valmistamine 2D kihtide lisamise abil, mille puhul kasutatakse toormaterjali ainult mudeli moodustamiseks. Uus tootmistehnoloogia muudab tänaseid ärimudeleid ja tootmistegevusi.

Pakutavate printerite valik on kujunenud aastate jooksul mitmekesiseks. Pakutakse erinevaid tehnoloogiaid laial hinnaskaalal. 2011. – 2014. aastani kasvas 3D printerite ja printeritega seotud teenuste hulk 33%. Tehnoloogia kiire arengu tõuke andis varasemalt kehtinud patentide aegumine. (Stansbury, Idacavage 2016, 55)

Kui varasemalt olid 3D printerid peamiselt entusiastide huviorbiidis, siis tehnoloogia kiire areng on loonud printerite kasutamise võimalusi väga erinevatele sihtgruppidele. Kindlasti jätkavad uuel tehnoloogial tootmist tänased tootmisettevõtted. Lisaks nähakse printerite odavuse tõttu laia levikut ka inimeste kodudes, kes soovivad hakata tegelema väikeettevõtlusega. (3D printing ... 2017)

Tehnoloogiliste võimaluste areng on alati teretunud, kuid tihti kipuvad uued tehnoloogiad tulema millegi arvelt. Esmased töökeskkonna alased uuringud 3D printerite kasutamisel on tuvastanud, et uus tehnoloogia tekitab töökeskkonnas erinevaid ohutegureid. Kui siiani toimus näiteks toormetalli tootmine metallurgiatehastes, siis kihtlisandustehnoloogia seadmete tekkega on sisuliselt metallide sulatamise võimalus toodud kabinettidesse, tootmisruumidesse ja inimeste kodudesse. Töökeskkonna riskide poole pealt on uus tehnoloogia veel suhteliselt tundmatu.

Tööohutuse ja tervishoiu juhtimine ettevõtetes aitab vähendada töökeskkonnas tekkivaid riske. Kui vaadata tavapäraseid tootmiskeskondade rajamisi, siis reeglina tehnoloogia tootja tarnib seadmed ja ehitaja ehitab hooned või ruumid. Sagedasti esineb olukordi, kus ehitaja ja seadme tootja teineteise ootusi ja nõudeid ei tea ning valmida võib töökeskkond, kus töötajatel on ohtlik või ebatervislik töötada.

Magistritöö eesmärk on tuvastada TalTech-is kasutatavate 3D printerite näitel töökeskkonna riske ja leida lahendusi tuvastatud riskide ohjamiseks. Et eesmärki täita, püstitas autor järgmised uurimisküsimused:

- 1) Kas 3D printerite kasutamisel tekivad ohutegurid, mida tuleb töökeskkonnas ohjata?
- 2) Kui suur on antud ohuteguritega kokkupuude ning kas see võib olla oluline risk töötaja tervisele?
- 3) Kas majanduslikult on mõistlik töökeskkonna riske ohjata?
- 4) Milliseid lahendusi saab pakkuda tuvastatud ohuteguritest tulenevate riskide ohjamiseks?

Antud magistritöö on koostatud neljas peatükis. Magistritöö esimene peatükk on jaotatud kolmeks alalõiguks, millest esimene osa keskendub kihtlisandustehnoloogia kujunemisele. Esimese peatüki teine osa annab ülevaate kihtlisandustehnoloogiast ning toob välja autori poolt käsitletavad tehnoloogiad. Esimese peatüki kolmandas osas annab autor ülevaate varasemalt teostatud uuringutest 3D printerite töökeskkonnast ja tuvastatud riskidest.

Magistritöö teine peatükk keskendub uurimistöö ülevaate andmisele. Autor annab ülevaate uuritavatest seadmetest ning teostatud mõõtmiste meetodikast.

Magistritöö kolmandas peatükis toob autor välja mõõtmistulemused ning võrdleb saadud tulemusi kehtestatud piirnormidega ja annab omapoolse tõlgenduse tuvastatud riskidele.

Magistritöös neljandas peatükis toob autor välja meetmed, mida tuleks rakendada riskide vähendamiseks.

Autor tänab magistritöös nõustamise ja soovitude jagamise eest juhendajaid Karin Reinholdi ja Meelis Pohlakut, samuti Tarmo Koppelit, kes jagas oma teadmisi elektromagnetväljadest.

1. 3D PRINTIMISE KUJUNEMINE, TÖÖKESKKOND JA TEHNOLOOGIAD

3D töötlemisega on tegeletud juba väga ammustest aegadest. Siiani on tootmisettevõtted peamiselt keskendunud toormaterjalist tükk tüki haaval materjali eemaldamisele, mille tulemusel valmib lõpliku kujuga toode. Antud töötlemise viis on ajamahukas ja ressursi raiskav meetod, sest praktiliselt jääb alati järgi suures koguses toormaterjalist eemaldatud materjalijääke. Samuti on tihti keerukas toota ühe protsessiga tooteid, mis on seest ruumilised ja asuvad teine teise sees. Järjest enam hakkab jõudma töökeskkondadesse uuenduslik 3D kihtlisandusmeetodil tootmisviis.

Printimistehnoloogia või täpsemini öeldes kihtlisandustehnoloogia kasutusele võtmisel muutus tootmisprotsess, toorainet kasutatakse praktiliselt ainult nii palju, kui on tarvis toote valmistamiseks. Keerukas 3D toode valmistatakse 2D kihtide kiht kihi haaval lisamisel. Sellist toote ehitamise protsessi on võimalik automatiseerida. Loomulikult ka kihtlisandustehnoloogia kasutamisel ei pruugi kogu tootmisahel olla veel täiesti automaatne. Kihtlisandustehnoloogia kasutamisel toote ehitamine algab nullist. Erinevad tooraine kihid omavahel sulatatakse või liimitakse kokku. Kasutatav toormaterjal võimaldab printida õhukesi 2D kihte ning tänu sellele võimaldab kihtlisandustehnoloogia toota suhteliselt kergesti keerulise ehituse ja disainiga tooteid.

Kihtlisandustehnoloogia on töökeskkondades veel suhteliselt uus ja tundmatu tehnoloogia. Kuid uuel tehnoloogial nähakse suurt tulevikku ning seoses sellega on teostatud ka esmaseid töökeskkonna alaseid uuringuid kolmemõõtmeliste printimiste töökeskkondade kohta. Oma uurimistöös tõdevad USA teadlased, et 3D printimisel eralduvad mürgised ained on ohuks kardiovaskulaarsete haiguste tekkeks. Antud uuringus kasutati katseloomadena rotte ning uuriti muutusi enne ja pärast mürgiste ainetega kokkupuutumist. Ning oma järeldest toovad nad välja, et töökeskkonnas on võimalik ohtusid vältida või vähendada sobiva ventilatsioonisüsteemi kasutamisega. (Stefaniak *et al.* 2017, 1)

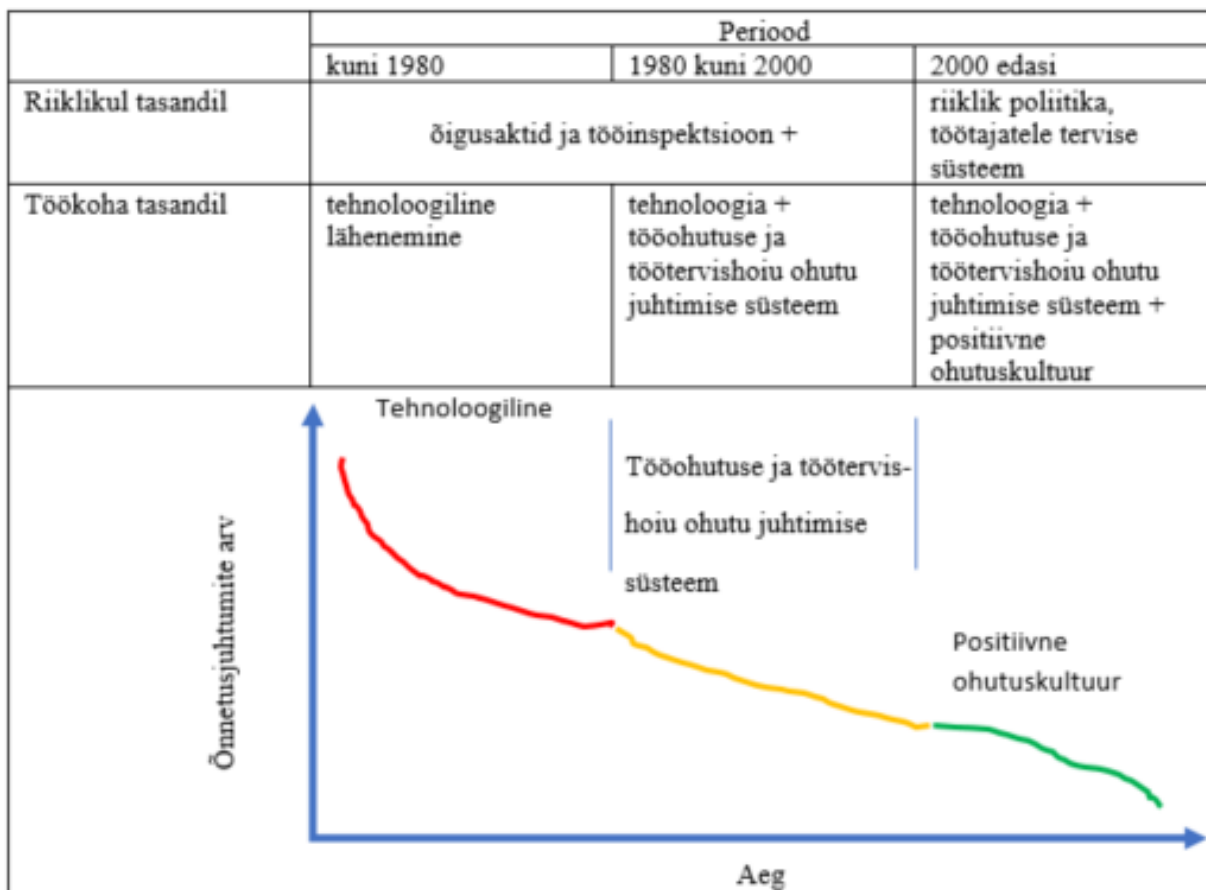
Töökeskkonda reguleerivad mitmed õigusaktid. Töötervishoiu ja tööohutuse seaduses on kehtestatud viis ohutegurite gruppi, millega tuleb tööandjal lähtuda töökeskkonna kujundamisel (TTOS §-d 6-9¹):

1. „Füüsikalised ohutegurid on 1) müra, 2) vibratsioon, 3) ioniseeriv kiirgus, 4) elektromagnetväli, 5) õhu liikumise kiirus, 6) õhutemperatuur, 7) õhuniiskus, 8) kõrge ja madal õhurõhk, 9) masinate ja seadmete liikuvad osad, 10) valgustuse puudused, 11) kukkumis-, elektrilöögi-, plahvatusoht 12) muud samalaadsed tegurid“ (TTOS §6).
2. „Keemilised ohutegurid moodustavad ohtlikud kemikaalid ja neid sisaldavad materjalid“ (TTOS §7).
3. „Bioloogilised ohutegurid on mikroorganismid ... ja muud bioloogiliselt aktiivsed ained, mis võivad põhjustada nakkushaigust, allergiat või mürgitust“ (TTOS §8).
4. „Füsioloogilised ohutegurid on 1) füüsilise töö raskus, ... 2) sundasendid, 3) sundliigutused“ (TTOS §9).
5. „Psühhosotsiaalsed ohutegurid on 1) õnnetus- või vägivallaohuga töö, 2) ebavõrdne kohtlemine, 3) kiusamine, 4) ahistamine, 5) töötaja võimetele mittevastav töö, 6) pikaajaline töötamine üksinda, 7) monotoonne töö... . Samuti muud juhtimise, töökorralduse ja töökeskkonnaga seotud tegurid, mis võivad mõjutada töötaja vaimset või füüsilist tervist, sealhulgas põhjustada stressi“ (TTOS §9¹).

Ohutu töökeskkonna juhtimise ja kujundamise on ettevõtted järjest enam hakanud panustama. Rahvusvaheline Tööorganisatsioon ILO on selle valdkonnaga pidevalt tegelenud. Oma 2001 aasta suunistes toob ILO välja, et inimväärne töö on ohutu ning ohutus aitab kaasa tootlikkusele ja majanduskasvule. Kiirelt arenev tehnoloogia toob kaasa muutusi töötingimustes ja protsessiahelas. Riiklikul tasandil kehtestatud õigusaktid on ILO hinnangul ebapiisavad, et muutustega sammu pidada. ILO asetab rõhu just ettevõtetele, kes peavad tööohutuse ja terviseprobleemidega tõhusalt tegelema. Koostatud suunised on mõeldud töötajate kaitseks, et vältida töökohtadel vigastusi, halba tervist, haiguseid ja surmajuhtumeid. (Guidelines ... 2001)

Tööohutuse ja töötervishoiu parendamisele aitab kaasa tööohutuskultuuri edendamine ettevõtetes. Tänu teaduse ja tehnoloogia arengutele on vigastuste ning haiguste esinemissagedus ettevõtetes vähenenud. Samas on 21. sajandi töökohad tekitanud ettevõtetes uusi terviseriske. Uute tehnoloogiate kasutusele võtmisel peaks olema suur roll just ennetustegevustel. Esmakordselt hakati rääkima ohutuskultuurist 1986 aastal, kui toimus Tšernobõli tuumakatastroof. Eraldi tuuakse välja suurõnnetuste uurimiste raportites, et õnnetused on toimunud just ohutuskultuuri

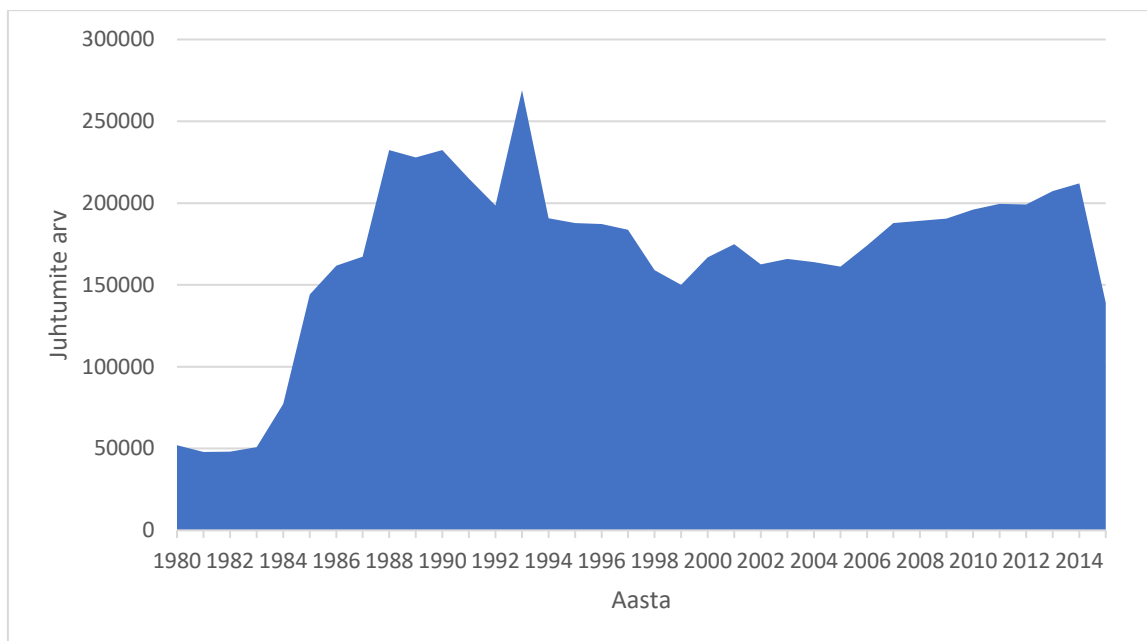
puudumise tõttu. Toimunud õnnetustest järeldati, et kultuur, kus ohutus on prioriteet number üks, on õnnetuste arv oluliselt madalam. Oma uurimistöös toovad autorid välja tegevused, mida on rakendatud, et juhtida töökeskkonda töötaja tervist ja tööohutus arvestades. Tegevused on kirjeldatud joonisel 1. (Kim *et al.* 2016)



Joonis 1. Ennetuskultuuri loomine

Allikas: Kim *et al.* (2016,90); autori poolt uuesti loodud

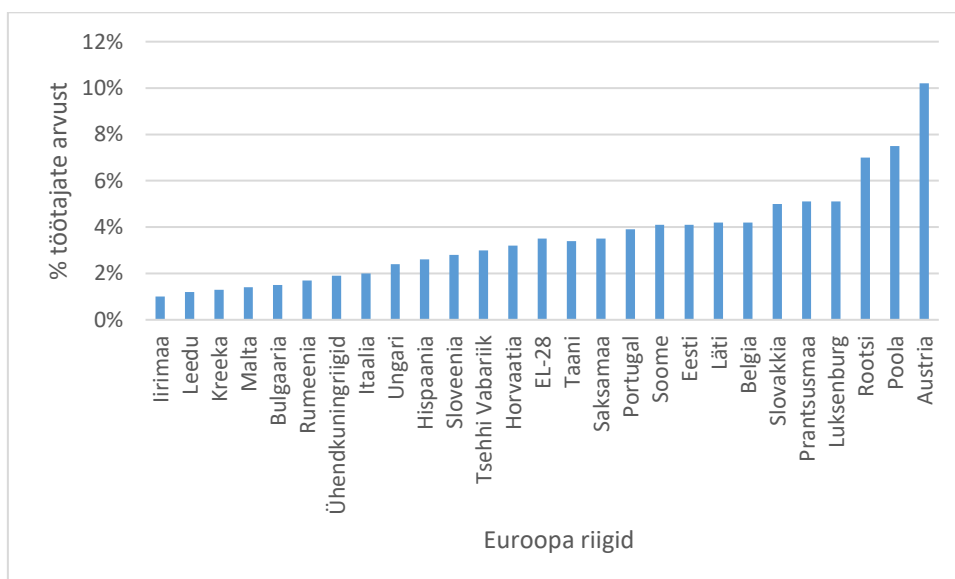
Maailma Terviseorganisatsioon (WHO) kogub riikide lõikes statistikat tööst põhjustatud haigestumiste kohta. Statistikat kogutakse kõikide riikide kohta, kuid statistika andmeid uurides selgub, et kõik riigid ei kogu andmeid ja statistika ei anna 100% ülevaadet. Kogutud statistika hõlmab ka Euroopa riike ja kõiki arenenud riike. Seega peab autor statistikat piisavalt usaldusväärseks. Statistika põhjal selgub, et tööst tingitud haigestumiste arv hakkas kasvama oluliselt alates 1983. aastast. Alates 1994. aastast saavutati tööst tingitud haigestumiste osas teatud stabiilsus, mis näitab, et suurõnnetustest tingitud haigestumised on vähenenud, kuid üldine kasvutrend on alates aastast 2000 võtnud suuna kasvu poole. Haigestumised on esitatud joonisel 2.



Joonis 2. Kutsehaiguste juhtumid aastast 1980 - 2015

Allikas: WHO; autori koostatud

Sarnast statistikat kogutakse ka Euroopa Liidus liikmesriikide kohta. Joonisel 3 on kuvatud Tervishoiu- ja ohutusameti (HSE) andmed Euroopa riikides toimunud tööst tingitud haigestumiste kohta töötajate arvust.



Joonis 3. Tööst põhjustatud haigestumised Euroopa riikides 2013. aastal

Allikas: Annual Statistics (2018), autori poolt uuesti loodud

Autori hinnangul võib kogutud statistika põhjal järeldada, et ilmselt ei koguta tabelis kuvatud esimese poole riikide hulgas piisavalt tööst tingitud haigestumiste statistikat või ei tehta seda lahus muudest haigestumistest. Autori arvates ei ole tõenäoline, et heaoluühiskondades on tööst tingitud haigestumisi rohkem kui riikides, kus töökeskkonnale ilmselgelt ei pöörata nii palju tähelepanu. Samuti võib järeldada, et heaoluühiskondades tegeletakse tööst tingitud haigestumistega süvitsi ning teadlikult suurema fookusega. (Annual statistics 2018)

Sotsiaalministeerium toob välja, et „arenenud riikides moodustavad tööõnnetuste ja töötajate haigestumistega seotud kulud hinnanguliselt 2–4% sisemajanduse koguproduktist“ (Report on ... 2006 viidatud Rünkla 2013, 1). Eestis võib vastav kulu 2018. aastal olla 520 miljonist 1 miljardini (EUROSTAT table *Gross domestic ...*). Euroopa Komisjoni koostatud suunistest selgub, et „tööst tuleneva vähi tõttu sureb igas tunnis 10 inimest“ (Euroopa Komisjon) ja „vähemalt 32 miljonit töötajat töötab vähkitekivas keskkonnas“ (Euroopa Komisjon). Samuti tuuakse välja, et töökeskkonnale „1 kulutatud euro toob vähemalt 2 eurot tagasi“ (Euroopa Komisjon). Tabelis 1 on antud ülevaade töövõimetushüvitiste kohta.

Tabel 1. Eesti Haigekassa töövõimetusstatisitika 2014-2018

	2014	2015	2016	2017	2018
Töövõimetushüvitise tasumine (tuhat eurot)	103902	116977	130269	141297	157570
Töövõimetushüvitisi kasutanud inimeste arv	160857	168816	174187	179012	186223
Haigekassa hüvitatud töövõimetuspäevade arv	5362002	5670910	5905352	6113148	6458021
Ühe päeva töövõimetushüvitise maksumus (eurot)	19,4	20,6	22,1	23,1	24,4

Allikas: Eesti Haigekassa (2018); autori koostatud

Arvestades Eesti töövõimelist elanikkonda, siis ca 6,5 miljonit töövõimetuspäeva on suur number. Samuti töövõimetuspäevadega tekkinud kulud riigi tasandil. Kui siia oleks võimalik juurde lisada ka äri sektori kahjud töötaja töölt eemaloleku aja kohta, siis tõenäoliselt on kulu number kordades suurem.

Tervise Arengu Instituut viitab enda uurimustöös, et „Kanadas Ontarios oli mõni aasta tagasi keskmine kaotatud töötaja kulu 59 000 dollarit. Kuueprotsendilise kasumimarginaaliga äritegevuseks on vaja umbes 1 miljoni dollari suurust müügitulemit, et kompenseerida ühe vigastusjuhtumi kulusid“ (Rucci *et al.* 1998 viidatud Soon 2010, 25).

1.1. 3D printimise kujunemine ja võimalused

3D kihtlisandustehnoloogia on kindlasti tubli edasiarendus siiani laialt levinud tootmismudelile, kus toorainelt eemaldati üleliigsed kohad, välja lõigatud detailid ühendati ning siis valmis toode, mida tarbida. Juba rohkem kui kümme aastat tagasi on võetud kasutusele uus meetod, kus toorainet kasutatakse nii palju, kui toote tootmiseks tarvis on. Antud tehnoloogial nähakse suurt potentsiaali ja käib uue tehnoloogia piiride kompamine. Kui algselt oli uuenduslik kihtlisandustehnoloogia entusiastide mängumaa, siis lihtsamad 3D printerid on täna poes riiulitel müügil ja on tekkinud rida ettevõtteid, kes toodavad ka juba tööstuslikke seadmeid. Autori arvates muutuvad kihtlisandustehnoloogia levikuga täielikult siiani toimunud ärimudelid ning tootmistegevused. Sellega kaasnevalt muutub ka kogu tootmisjuhtimine. Siiani toimus metallurgiatehastes toormetalli tootmine lehtedena, lattidena jne. Sellele järgnes tehastes mitmetes etappides edasine töötlus sepistamise, lõikamistehnoloogia ja keevitamise kasutamisel. Uuema tehnoloogia kihtlisandusmeetodiga tuuakse sisuliselt sama metallurgiatehas tootmiskeskonda ning metallpulbri sulatamise teel toodetakse juba lõpptoode. Või võrdluseks plastitööstus, kus siiani levinud tootmismudel näeb ette plastigraanuli sulatamist, mida survevalu meetodil valatakse vormidesse, siis kihtlisandusmeetodi puhul toimub plastipulbri sulatamine valmistooteks ilma eraldi vormi kasutamata.

Kasutatavad toorained on tööstuses olnud kasutusel juba pikka aega ja võib öelda, et tänaseid ohte kasutatavatest tehnoloogiatest teatakse juba päris hästi. Siis uute tehnoloogiate kasutamisega kaasnevaid ohte ei tea täpselt veel ka seadmete tootjad, rääkimata seadmete operaatoritest. Euroopa Tööohutuse ja Töötervishoiu Agentuur on oma uurimises 3D printimistehnoloogia leviku osas toonud raporti järeldustes välja, et tekkinud kihtlisandustehnoloogia töökeskkonna probleemid ei tohi jääda ainult kasutajate mureks ja lahenduste otsimiseks. Peamise põhjusena tuuakse välja seda, et kihtlisandustehnoloogial nähakse globaalset levikut ja sellest lähtuvalt tuleb lahendused leida terviklikult kogu Euroopa tasemel. Tuleb töötada välja piisavad abinõud töökeskkonna probleemide lahendamiseks kihtlisandustehnoloogiatele. Samuti tuuakse raportis ära ühe ärisuunana, et väiksemaid printereid hakatakse koduses keskkonnas kasutama ärilistel eesmärkidel. See omakorda tähendab, et tootmiskeskond võib jõuda inimeste kodudesse, milles inimesed viibivad nii töö kui ka puhkeajal. (3D printing ... 2017)

Esimese kolmemõõtmelise tootmise patenteeris Chuck Hull. Tema patenteeris 1986. aastal vedela plastikihi kihtlisamise meetodi kasutades ultraviolettkiirgust. (United States ...)

Kuigi esimesest tehnoloogia patenteerimisest on möödas juba kolm aastakümnet, siis ei ole tehnoloogia areng olnud nii kiire, et oleks suutnud vahetada välja laialt levinud materjalide eemaldamise tehnoloogiad.

Sama tões oma töös ka Mishra ning nimetab peamisteks põhjusteks hilisema pinnatöötuse ning tootest lähtuvalt toote omaduste säilimise, et materjalile esitatud mikrostruktuuri ja tugevuse nõuded oleks alati täidetud. Tema nägemusel peaks tehnoloogia arenema nii kaugele, mis suudab oma tehtud tööd analüüsida ja järgmiste kihtide lisamisel parandada varem tehtud vead. Professor tõdeb, et kihtlisandustehnoloogial on ees suur tulevik ning siiani traditsioonilised tootmistegevused on muutumas. Suurt muutust näeb ta just ehitussektoris. (Mishra 2013)

Tegemist on tehnoloogiaga, mille võimaluste piirid on veel avastamata. 2014. aastaks oli viimase kolme aastaga kasvanud 3D printimisega seotud tehnoloogiad ja teenused 33%. Peamine tõuge kiireks kasvuks tuli varasemalt kehtinud patentide aegumisest. Selle tulemusel on mitmeid ettevõtteid, kes on asunud tootma ja müüma tehnoloogia seadmeid. Ligi 300 ettevõtet on need, kes müüvad odavamaid seadmeid. Tänu soodsale hinnale on sellised printerid juba laialt levinud tööstuskeskkondades, koolides ja laborites. (Stansbury, Idacavage 2016)

1.2. 3D printimise tehnoloogiate kirjeldus

Kihtlisandustehnoloogiad leiavad järjest rohkem populaarset kasutamist. Kasutatavad seadmed töötavad väga erinevate tootmisprotsesside põhiselt ning kasutavad erinevaid tooraineid.

Lähtuvalt standardist „ISO 10303-1:1994 Tööstusautomaatika süsteemid ja integreerimine - tooteandmete esitamine ja vahetamine - Osa 1: Ülevaade ja aluspõhimõtted“ (Standard Terminology ...) on koostatud kihtlisandustehnoloogiale oma terminoloogiline standard. Antud standard grupeerib sarnased protsessid ja tehnoloogiad. (Standard Terminology ...)

3D printimise all mõistetakse esemete valmistamist sadestamise teel, kus lisatav materjal lisatakse prindipea abil. Lisandustehnoloogia all mõistetakse kiht kihi peale materjalide ühendamise protsessi. (*Ibid*)

Printimise protsessid jaotuvad standardi põhiselt järgnevalt (Standard Terminology ...):

1. „Sideaine kasutamisel põhineva printimisprotsessi käigus kasutatakse vedelat sideainet, millega ühendatakse omavahel pulbriosakesi“ (Standard Terminology ..., 1).
2. „Suunatud energia kasutamisel põhinev printimisprotsess kasutab tooraine sulatamiseks energiaallikat: 1) laser, 2) elektroonkiir, 3) plasma kaar), mille *fokuseeritud soojusenergia* suunatakse materjali sulatamiseks“ (Standard Terminology ..., 1).
3. „Materjali ekstrusiooni puhul surutakse toorainet välja läbi düüsi või ava kaudu valikuliselt. Antud protsessis on kasutusel sulatatud materjali sadestumise tehnoloogia (FDM)“ (Standard Terminology ..., 1, 2).
4. „Materjali jootmise korral paigaldatakse lisaainet valikuliselt tilkadena (1) fotopolümeer, 2) vaha“ (Standard Terminology ..., 1).
5. „Pulbervooderdisprotsess kasutab termilist energiat valikuliselt pulbervooderdise piirkonnas. Pulbervooderdisprotsess kasutab selektiivset lasertehnoloogiat (SLS) ja otsene metalli laserdamistehnoloogiat (DMLS, SLM)“ (Standard Terminology ..., 1, 2).
6. „Lehtmaterjali lamineerimisprotsessis toimub materjali lehtede omavaheline liimimine ning laseriga kihtide lõikamine“ (Standard Terminology ..., 1).
7. „Fotopolümerisatsiooni tootmisprotsess toimub keskkonnas, milles vedel fotopolümeer kuivatatakse selektiivselt ultraviolet (UV) kiire abil. Kasutatavad tehnoloogiad on stereolitograafia (SLA) ja digitaalsel valgustöötusel põhinev tehnoloogia (DLP)“ (Standard Terminology ..., 1, 2).

Standard on osad tehnoloogiad täpsemalt lahti selgitanud (Standard Terminology ...):

- 1) „SLA seadmega toimub fotopolümerisatsioon, mille käigus fotopolümeerset vedelat materjali selektiivselt UV laseriga kiht kihi haaval kõvendatakse“ (Standard Terminology ..., 2).
- 2) „FDM tehnoloogia puhul toimub tahke materjali ekstrusioon, mille käigus termoplastset materjali lisatakse kihtide haaval“ (Standard Terminology ..., 2).
- 3) „SLS tehnoloogia seadmed selektiivselt laserpaagutavad laotatud pulbrikihti kiht kihi haaval“ (Standard Terminology ..., 2).
- 4) „DMLS ja SLM tehnoloogia on sarnane SLS tehnoloogiaga, kuid see tehnoloogia suudab sulatada metalli. Selle tulemusel on valminud metall tugevama ehitusega. Seade tarbib suuremat energiat“ (Standard Terminology ..., 2).

Tallinna Tehnikaülikooli laboris on kasutusel SLS, SLM, SLA ja FDM tehnoloogial põhinevad 3D printerid. Oma uurimustöös teostab autor mõõtmisi SLS, SLM ja FDM tehnoloogia seadmete juures.

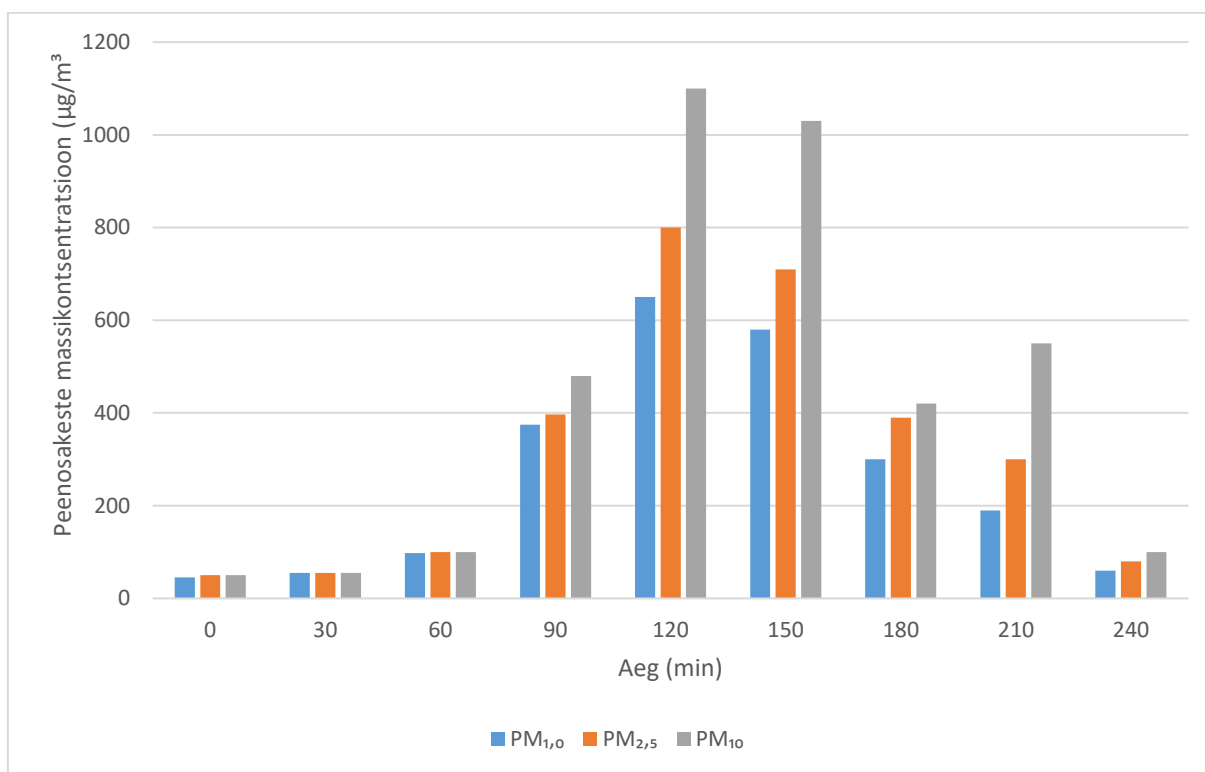
Kolmemõõtmeline trükkimine on tekitanud omamoodi revolutsiooni prototüüpide tootmises ning on loonud mitmeid eeliseid tavapäraste või siiani kasutusel olnud tootmismeetodite osas. Peamine erinevus tavapärase tootmisega võrreldes on see, et on võimalik CAD programmi põhjal luua kolmemõõtmeline objekt järjestikuste kihtide lisamise teel. Samuti on võimalik kihtlisandusmeetodiga luua objekti sisse tühimikke, ilma, et neid oleks tarvis luua mõnda teist spetsiifilist tööriista kasutades. Kolmemõõtmeliste printerite populaarsus on kiiresti kasvanud alates kodukasutajatest kuni Rahvusvahelise Kosmosejaamani välja. Printerite rakendusvaldkond on väga laiaulatuslik. (Afshar-Mohajer *et al.* 2015)

1.3. 3D printimise töökeskkond

Printimise ajal, kuiva pulbri pideva liikumise tõttu printimiskambris, eraldub protsessi käigus peenosakesi ja sulatamisest kõrgel temperatuuril lenduvaid orgaanilisi ühendeid. Printimisprotsess on varieeruv ja sõltub tootmismahjust, mis võib kesta järjest tunde. Tootmise käigus eralduvad peenosakesed ja lenduvad orgaanilised ühendid halvendavad tööruumide õhukvaliteeti. Saastunud töökeskkonnas viibimine mõjub töötajate tervisele. Materjalide ohutuskartidelt selgub, et pulbrite korduval kokkupuutel töökeskkonnas võib tekkida silmade ärritus, köha, aevastamised, rindkere valu ja kopsuhaigused. Sideained omakorda võivad põhjustada iiveldust, peavalu ning võivad ärritada limaskesti ja ülemisi hingamisteid. (Afshar-Mohajer *et al.* 2015)

Oma uurimistöös viisid Florida Ülikoolis teadlased läbi mõõtmised ning analüüsisid printeri ruumis tekkivaid peenosakesi ja lenduvaid orgaanilisi ühendeid. Katsete teostamiseks kasutati printerit ZPrinter 310. Tegemist on printeriga, mis kasutab pulbrilist komposiitpulbrit ja sideainet kihtide ühendamiseks. Katsemõõtmine kestis kokku 240 minutit ja hõlmas endas mõõtevahendite ülesse panekut ning mõõtmise teostamist enne printimise alustamist, printimise ajal ja peale printimise lõpetamist. Enne mõõtmiste teostamist ei olnud antud ruumis viis päeva teostatud printimist. Mõõteseadmed asusid seadmest 1 meetri kaugusel. Erinevate suurustega peenosakeste

konsentratsiooni teke on esitatud joonisel 4. Joonisel on esitatud kolme osakese suuruse kohta mõõtetulemused. (*Ibid*)



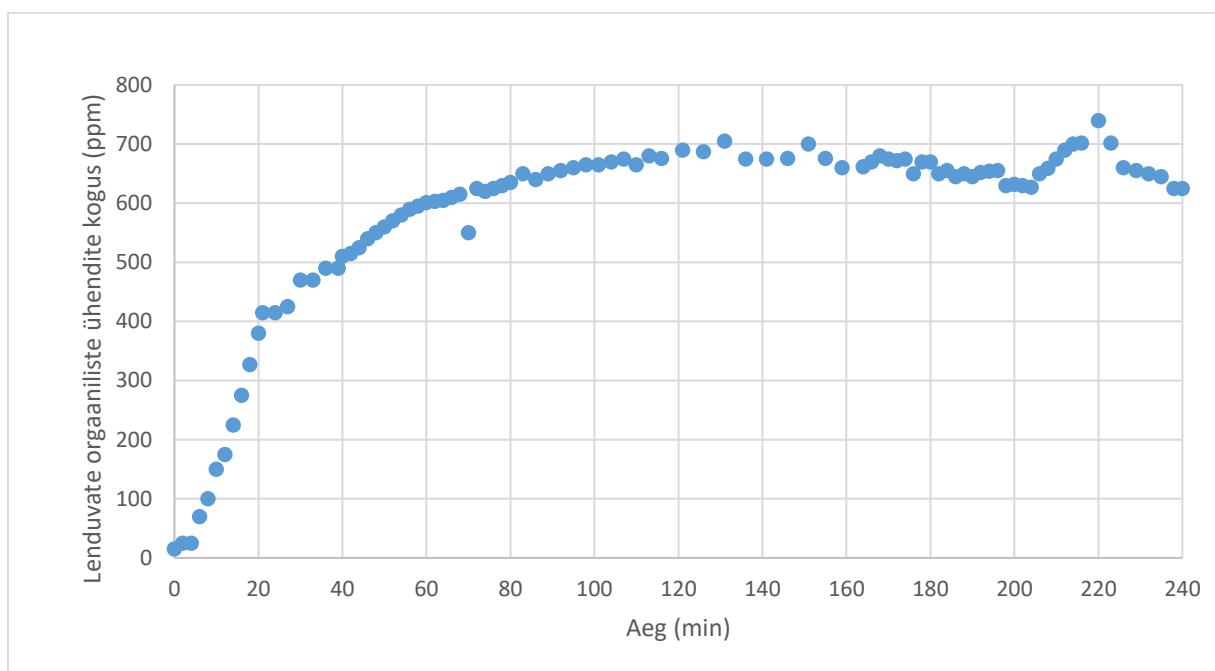
Joonis 4. Peenosakeste kogus mõõteperioodi jooksul
Allikas: Afshar-Mohajer *et al.* (2015), autori poolt uuesti loodud

Peenosakeste kõik kolm fraktsiooni hakkasid printimise ajal kasvama ja saavutasid peale kahte tundi töötamist maksimum taseme ning püsisid seal kuni printimistegevuse lõpuni. Mõõtmise lõpufaasis toimus õhus peenosakeste sisalduse kasv, mille tingis prinditud toote harjaga pulbrist puhastamine. Mõõtmise tulemusena järelitati, et osakese suurus PM_{2,5} ületas piirnormi 10 korda ja osakese suurus PM₁₀ ületas piirnormi 3 korda. (*Ibid*)

Joonisel 5 on esitatud lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsiooni teke ja kasv printimise ruumis. Mõõtmine toimus paralleelselt peenosakeste mõõtmisega. Seega on tingimused ja mõõtmise periood samad. (*Ibid*)

Lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioon hakkas sarnaselt peenosakeste kasvuga koheselt kasvama ning püsis suhteliselt stabiilsena kogu printimise perioodi. Kuid printimise lõpus, toote puhastamisel harjakesega, kasvas kontsentratsioon ja see on seletatav sellega, et emissiooni kogus

printimise kambri on printimise ajal suurem ning printimiskambri avamisel pääseb jääkreostus kambri välja. (*Ibid*)



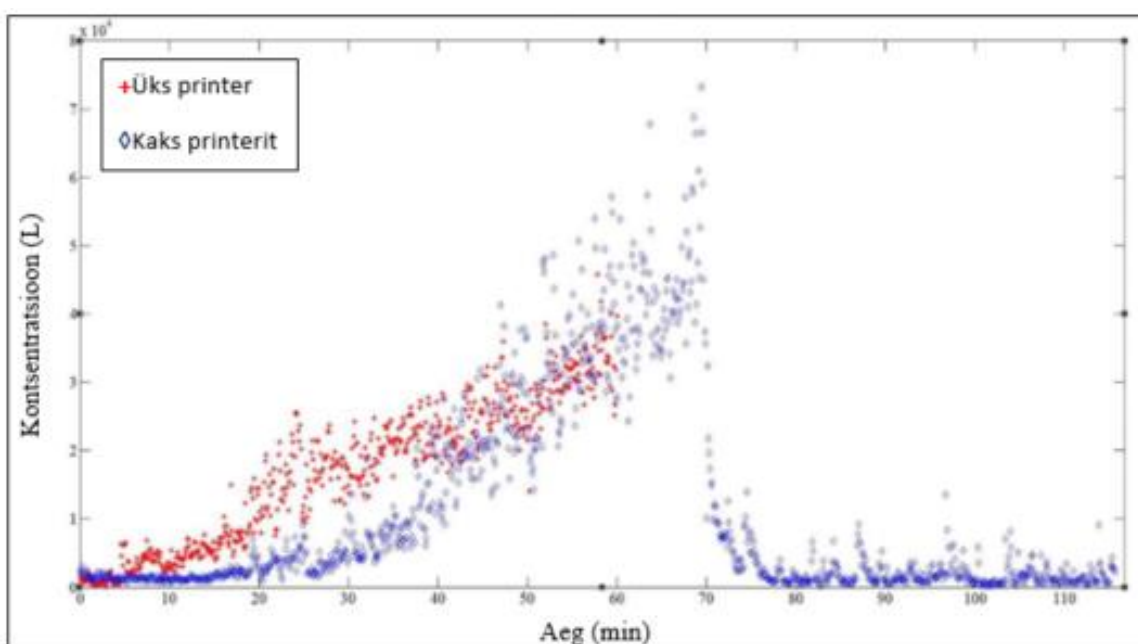
Joonis 5. Lenduvate orgaaniliste ühendite kogus mõõteperioodi jooksul
Allikas: Afshar-Mohajer *et al.* (2015), autori pool taastatud

Uurimustöö lõpus jõuti autorite poolt järeldusteni, et kõik edaspidised uuringud kolmemõõtmelise printimise töökeskkonnas on õigustatud ning seal tuleb rakendada meetmeid, mis vähendavad heidete kogust ja kaitsevad töötajaid, eraldades selleks printeri töökeskkonnast, täiustades ventilatsiooni ning väljastades töötajatele sobivaid hingamisteede kaitsevahendeid. (*Ibid*)

Oma uurimistöös teostasid USA-st ja Prantsusmaalt pärit teadlased samuti kolmemõõtmelise printimise käigus tööruumi eralduvate emisioonide mõõtmist. Katsed teostati akrüünitriilbutadienstüreeni (ABS) ja polüpiimhappe (PLA) sulatamisel kihtlisandusmeetodil. Katse jaoks kujundati eraldi ruum, kuhu paigutati viis 3D printerit, millest kaks töötasid PLA materjaliga ja kolm printerit ABS materjaliga. Kokku kestsid printimised 2,5 tundi. Mõõtmised teostati kahe PLA printeri töötamise ajal ja kahe PLA ja kolme ABS printeri töötamise ajal. Samuti mõõdeti kontsentratsiooni ka lagunemisperioodil. Oma uurimistöös jõuti järeldusele, et suure emissiooni tõttu on töökeskkond ohtlik, kui puudub ventilatsioon või filtersüsteem. Kasutamisel sisetingimustes tuleb suhtuda ettevaatlikult. Samuti tuuakse välja, et ABS tooraine printimisel

tekkib suurusjärgu võrra kõrgem heitkogus ja ABS termilisel lagunemisel tekkivad toksilised ühendid. (Stephens *et al.* 2013)

Ka Hiina ja Singapuri teadlaste töögrupp uuris ABS toorainel töötavate printerite töökeskkonda. Ruum enne printimise algust ventileeriti korralikult, et vältida varasem saastumine. Katseid tehti nii ühe printeriga töötades kui ka kahe printeriga töötades. Printerite soojenemine 220° juurde võttis aega kuni 10 minutit. Kokku teostati kuus mõõtmist, millest kolm toimusid ühe printeriga töötades ja kolm katset toimusid kahe printeriga töötades. Joonisel 6 on kuvatud mõõtetulemused erinevate ühendite sisalduses kõikides mõõtmistes. (Zhou *et al.* 2013)



Joonis 6. Aerosoolide emissioon mõõteperioodide jooksul
Allikas: Zhou *et al.* (2013)

Uuringu tulemustest järeldati, et printerite lisandumisel kasvas saaste kontsentratsioon tööruumis. Samuti järeldati, et tekkiv õhusaaste on tõsine probleem, mis võib tekitada hingamisteede ja kardiovaskulaarsete haiguste teket. (*Ibid*)

Töökeskkonnas on oluline tagada, et saastunud õhk ruumis vahetuks. Hea siseõhk soodustab töötajate jõudlust. Oma uuringus uurisid soomlased õhutemperatuuri, suhtelise niiskuse ja süsinikdioksiidi sisaldust töökeskkonnas. Katsed teostati konverentsi saalis, kus mõõdeti näitajate muutusi töötava ventilatsiooniga ja mitte töötava ventilatsiooniga. Katsetes osalesid inimesed

vabatahtlikult ning kogu tegevuse vältel jälgis ja mõõtis katsealuste tervist meedik. Mõõtmised teostati nii inimtühjas ruumis, kui töötajatega hõivatud ruumis. Tabel 2 annab mõõtetulemustest ülevaate. (Vehviläinen *et al.* 2016)

Tabel 2. Mikrokliima näitajate mõõtmistulemused (ppm, °C, %)

Mikrokliima parameetrid	Ventilatsioonita, töötajate vaba	Ventilatsiooniga, töötajate vaba	Ventilatsioonita, töötajatega	Ventilatsiooniga, töötajatega
CO ₂ (ppm)	476 ±7	407 ±2	2756 ±1100	906 ±249
Temperatuur (°C)	21 ±1	20 ±1	26 ±2	25 ±1
Suhteline niiskus (%)	13 ±1	11 ±2	21 ±4	12 ±2

Allikas: Vehviläinen *et al.* (2016); autori koostatud

Mõõtmistulemustest järeldati, et ventilatsiooni mõju mikrokliimale on oluline. Katsed, kus ventilatsioon ei töötanud ja CO₂ näit kasvas kordades, tuvastati töötajate tervise juures südamelöökide sageduse muutused ja perifeerse vereringe suurenemine. Jõuti järeldusele, et CO₂ tase on kõige olulisem mikrokliima näitaja töökeskkonnas. (Vehviläinen *et al.* 2016)

2. UURIMISTÖÖ OBJEKTID JA METOODIKA

Uurimustöös teostati kohapealseid seadmete töö vaatlusi ja mõõtmisi TalTech mehaanika ja tööstustehnika instituudis. Seadmeid tutvustas ja tööpõhimõtteid näitas vanemteadur Meelis Pohlak. Instituudil on kasutusel metallipulbrite, plastipulbrite ja sulatatud plastijoal ning vaigu valgusega kõvendamisel põhinevad seadmed.

Vaadeldavate seadmete juures teostati autori poolt Ergonoomialabori seadmetega elektromagnetväljade, mürataseme, tolmu- ja kemikaalide sisalduse mõõtmisi töökeskkonna õhus.

2.1. Uuritavate seadmete tööpõhimõtted

Metalli- ja plastpulberkihtide lisamise SLS ehk laserpaagutusseadmetena on instituudi laboris kasutusel kolm seadet, millest Formiga P100 teeb plastipulbrite laserpaagutus ja SLM Solutions 280 2.0 ja SLM 50 metallpulbrite kihtlisamist. FDM seadmena on kasutamisel Leapfrog Creatr HS printer, mis kasutab toorainena termoplastikut: 1) PLA, 2) poluvinüülatsetaat (PVA), 3) ABS.

Järgnevalt annab autor ülevaate kasutatavatest seadmetest ja kirjeldab seadmete tööpõhimõtet ning lühidalt tootmisprotsessi.

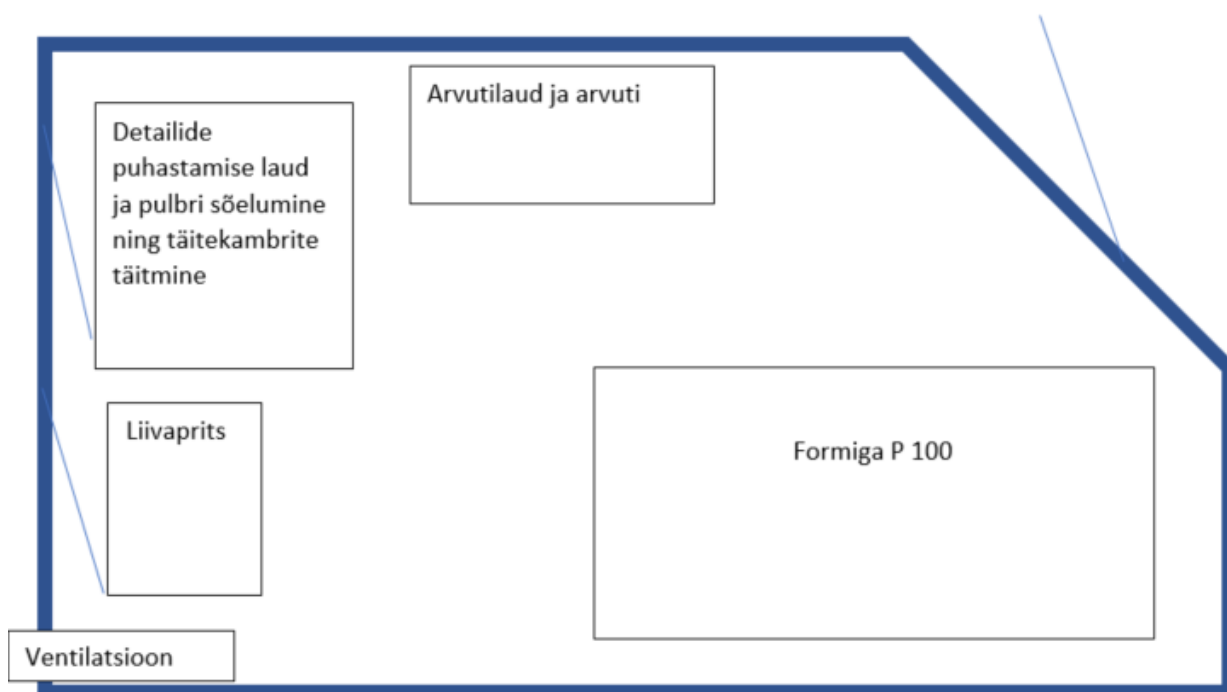
2.1.1. Formiga P100

Laserpaagutusseade Formiga P100 on toodetud Saksamaal EOS GmbH poolt. Seadme kaal on 600 kg ning seadme pikkus on 1320 mm, laius 1067 mm ja kõrgus 2204 mm. Seadme töötemperatuur on 20°C–25°C. Seade vajab töötamiseks voolu 400 V ja 3 x 16 A. Seadme tööks on vaja 20 m³/h õhku survega 7 bar. Soovitav ruumi suurus on pikkus 3,2 m, laius 3,5 m ja kõrgus 3,0 m (33,6m³). (Technical ... 2007)

Lisaks paagutusseadmele kuulub seadme juurde valminud detailide puhastamise laud, taaskasutatava ja jääkpulbri sõelumise ning täitmise töölaud. Samuti on seadmete komplektis

liivpritsi kamber ning tolmuimeja. Toodete modelleerimiseks ja seadmele töökäsu andmiseks on kasutusel arvuti, milles toimub mudelite modelleerimine või ka juba faili kujul alla laadimine.

Instituudi tööruum on kujundatud nii, et kogu tegevus, alates arvutiga seadmele sobivaks muudetud andmete töötlemisest kuni laserpaagutuseni, puhastamise ning pulbrisõelumiseni, toimub ühes ruumis. Tööruumi suurus on 58 m³. Ruum on varustatud sundventilatsioonisüsteemiga, mille saab seadmega töötamise ajaks töötaja poolt tööle rakendada. Ruumi pääseb läbi akna loomulikku valgust ning päikesekiirguse tõkestamiseks on akendel rulood ees. Ruumi seinad on värvitud heledates toonides ning põrandal on linoleum. Tööruumi plaan on kuvatud joonisel 7.



Joonis 7. Formiga P100 tööruum

Allikas: Autori koostatud

Kogu protsessist andis autorile ülevaate vanemteadur Meelis Pohlak. Töö algab esmalt arvutis, kus 3D mudel paigutatakse sobivasse asendisse ja muudetakse 2D kihtideks, mis määravad laserkiire liikumised ning peale seda on andmed Formiga P 100 jaoks kasutatavad. Arvuti on ühendatud laserpaagutusseadmega. Esmalt tuleb teha ettevalmistavad tööd, et saaks toodete tootmisega alustada. Selleks tuleb täita täitekambriid toormaterjal PA 2200-ga. Täidetud konteiner asetatakse materjali toorainepunkrisse. Seadme uks suletakse ja seade lülitatakse tööle ning esmalt toimub seadme töökambri eelkuumutamine, et saavutada tootmiseks optimaalne keskkond. Kogu

töötlemisprotsess toimub suletud lämmastiku keskkonnas. Seadme kuumenemine võtab aega kuni 120 minutit. Joonisel 8 on kuvatud pilt seadmest.



Joonis 8. Formiga P 100
Allikas: Autori pildistatud

Sobiva temperatuuri saavutamisel hakkab seade tööle ning esmalt kantakse tööplatvormile õhuke kiht pulbrit, mille silub tasaseks materjali laotur. Peale seda alustab tööd laserkiir, mis sulatab vastavalt etteantud mudelile pulbrikihi. Peale lasertöötlust langeb tööplatvorm 0,1 mm võrra alla poole koos sulatatud esimese kihiga. Järgnevalt toimub taas pulbrikihi pealekandmine, millele järgneb järgmine laseriga töötlus ning esimesele kihile sulatatakse teine kiht sulamaterjali külge. Kogu pulbri lisamise ja lasertöötlemise protsessi jätkatakse, kuni on toimunud planeeritud toote viimase kihi lisamine. Valminud toode asub protsessi lõpus tööplatvormil pulbri sees. Pulber on piisavaks toetusmaterjaliks ehitatavale mudelile. Samuti on võimalik seadmega toota tooteid, mis on seest tühjad või keeruka sisestruktuuriga. Toote töötlemise aeg sõltub toote suuruselt ja keerukusest, mis võib kesta 20. minutist kuni mitme ööpäevani. Selle aja jooksul eraldub seadmest ka hulgaliselt soojusenergiat. Toote valmimisel lülitub kuumutus välja ning peale seda on võimalik eemaldada tööplatvorm koos toote ja jääkpulbriga. Edasi toimub toodetud detailide puhastamine töölaual, kus harjaga eemaldatakse tootelt lahtine pulber. Toodet ümbritseva lahtise pulbri kogus on mitmeid kordi suurem kui toode, samuti on pulbriga täidetud ka toote tühimikud. Joonisel 9 on kuvatud töölaud mudeli pulbrist puhastamiseks.



Joonis 9. Detailide puhastamise ja kasutatud materjali sõelumise töölaud
Allikas: autori pildistatud

Töötlemise ajal lendub pulbrit ka õhus ning ladestub ruumis erinevatele tööpindadele. Peale toote puhastamist toimub toote liivapritsis töötlemine, et eemaldada üleliigset pulbrit ja vajadusel toetusstruktuuri. Tööruumis kasutatav liivaprits on kuvatud joonisel 10.



Joonis 10. Liivaprits detailide puhastamiseks
Allikas: autori pildistatud

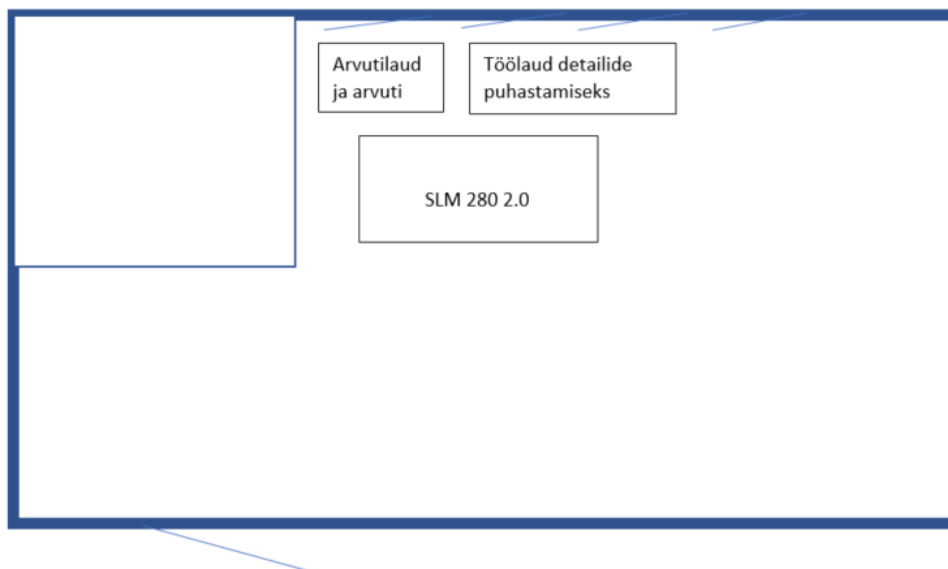
Peale seda on võimalik jätkata uute toodete tootmisega. Tööpäeva lõpus toimub tööruumi koristamine, kus tööpindadele ladestunud tolm imetakse tolmuimejaga kokku. Tolmuimeja tekitab kuuldavalt müra ning kogu puhastamise protsess võtab aega orienteeruvalt 30 minutit.

Peamised ohud, mis töötlemisega kaasnevad on peenike lenduv tolm, mida hingatakse sisse ja millega töötaja nahk ning silmad puutuvad kokku toodete puhastamisel. Samuti ruumi õhutemperatuuri kasv töötlusprotsessi ajal ning seadmete tööst kaasnev müra. Seadme töös on kasutusel laserkiirgus.

2.1.3. SLM 280 2.0

SLM Solutions 280 2.0 on toodetud Saksamaal SLM Solution Group AG poolt. Seadme mõõdud on 2600 mm x 1200 mm x 2700 mm ja seade kaalub 1300 kg. Seade vajab töötamiseks 400 V, 63 A voolu. Seadme töötamise ajal peab olema tagatud õhuvool 15 l/min survega 6 bar. (Selective ... 2012)

Ka antud seadmega valmistatud tooted vajavad puhastamist ning järeltöötlust. Järeltöötuse jaoks on eraldi puhastamise laud ning poleerimiseks tööpink. Töötamiseks mõeldud ruum on 180 m³ suur ning antud ruumis asub ka teisi metallitöötluspinke. Ruumi üks sein on akendega varustatud ning ruumi pääseb loomulikku valgust. Kardinaid päikesekiirguse piiramiseks akendel ei ole. Seinad ruumis on värvitud heledates toonides ning põrandal on kattedeks epovalu. Joonisel 11 on kuvatud tööruumi plaan.



Joonis 11. SLM 280 2.0 tööruum
Allikas: Autori koostatud

Ka antud seadme tööst andis autorile ülevaate vanemteadur Meelis Pohlak. Tööks ettevalmistav osa toimub samuti eraldi arvutis, kus 3D mudel jaotatakse õhukesteks kihtideks, et seade saaks kiht kihi haaval printida kolmemõõtmelise toote. Peale andmete edastamist seadmele tuleb valmistada ette seade töötamiseks. Joonisel 12 on pilt pulbermetalli kasutatavast seadmest.



Joonis 12. SLM 280 2.0
Allikas: Autori pildistatud

Antud seadme erisus on selles, et kasutatakse printimiseks peenikest metallpulbrit. Kogu pulbri edastamine toimub kinnises süsteemis. Antud seadme käivitamisest printimise alustamiseni läheb orienteeruvalt 20 minutit, et seade saavutaks sobiva töötemperatuuri ning sobiva koostisega gaasikeskkonna. Antud seadmest on kasutusel eraldi jahutus ja heitgaaside väljutus töötluskambri. Tootmisprotsess seadme sees näeb välja nii, et esmalt tasandatakse õhuke kiht metallpulbrit seadme töötlusplatvormile ning toimub metallipulbri tasandamine. Sobiv jäämaterjal läheb uuesti ringlusesse. Peale seda alustab tööd laser, mis sulatab metalliosakesed sobivaks kihiks vastavalt etteantud mudelile. Töötlusplatvorm laskub kihi paksuse võrra alla poole. Peale esimese kihi valmimist tsükkel kordub ja tegevuste kordusi jätkatakse kuni on valminud soovitud 3D toode. Antud tegevuse käigus kuumutatakse metalli pulbrit sulamistemperatuurini ($>1000^{\circ}\text{C}$) ja eralduvad heitgaasid. Töö toimub suletud süsteemis, kus keskkonnaks on sõltuvalt kasutatavast pulbri, kas lämmastik või argoon. Peale printimise lõpetamist asetab töötaja käed seadme ukse sees olevatesse kinnastesse ning teostab seadme sees oleva voolikuga valminud detaili küljest lahtise pulbri eemaldamise. Peale seda saab valminud detaili seadmest eemaldada ning järgneb

detaili puhastamine ja lõpptöötlemine. Antud seadme eelis on kindlasti see, et töötaja kontakt pulbriga on väiksem ning samuti ei lendu seda töökeskkonda. Ka selles lõigus toimub detailide puhastamine liivapritsiiga.

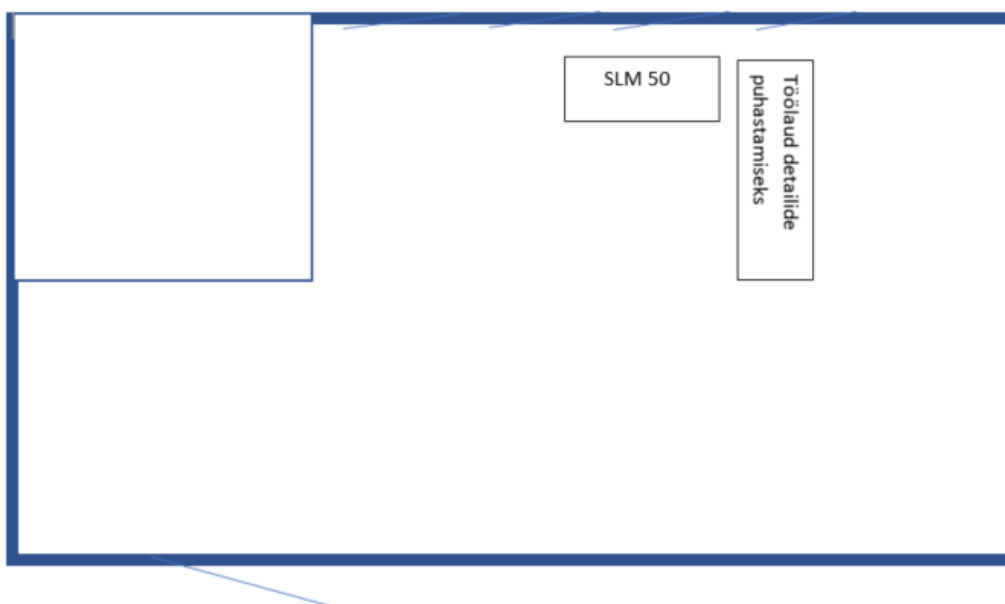
Peamisteks ohtudeks seadmega töötamisel on töötlemise ajal eralduvad heitgaasid, seadmes sulatatavas piirkonnas kõrge töötemperatuur, laserkiirgus ning ka peenike metallipulber. Seadme jahutussüsteem tekitab müra.

2.1.3. SLM 50

Realizer SLM 50 on samuti toodetud Saksamaal SLM Solution Group AG poolt. Seadme mõõdud on 800 mm x 700 mm x 500 mm. Seadme töötamise ajal peab olema tagatud argoon 30 l/tunnis. Laseri võimsus on 120 W. (Realizer SLM-50,2009)

SLM 50 on oma tööpõhimõttelt ja mudeli hilisema töötlemisvajaduse poolest sarnane, kuid on esmaseid mudeleid SLM sarjas (Wohlers, Gornet 2014).

SLM 50 printeriga valmistatud tooted vajavad samuti puhastamist ning järeltöötlust. Järeltöötlus toimub eraldi puhastamise laul. Poleerimist teostatakse poleerpingil. Seade asub samas tööruumis, kus SLM 280. Joonisel 13 on kuvatud tööruumi plaan.



Joonis 13. SLM 50 tööruum
Allikas: Autori koostatud

SLM 50 puhul toimub tööks ettevalmistav osa samuti eraldi arvutis, kus 3D mudel jaotatakse õhukesteks kihtideks, et seade saaks kiht kihi haaval printida kolmemõõtmelise toote. Peale andmete edastamist seadmele tuleb valmistada ette seade töötamiseks. SLM 50 on oma mõõtmetelt väiksem ja antud seadmega saab printida väiksemaid mudeleid kui SLM 280 mudeliga. Joonisel 14 on pilt SLM 50 seadmest.



Joonis 14. SLM 50
Allikas: Autori pildistatud

Eraldi tasub antud seadme juures ära märkida, et detaili puhastamine toimub väljaspool printeri töökambrit. Antud mudelil puuduvad seadme kaanes kätele mõeldud kohad, mille kaudu oleks võimalik valminud mudelit toormaterjalist puhastada.

2.1.4. Leapfrog Creatr HS

FDM printeriga töötamine meenutab kõige rohkem tänast tavapärast tootmist, kus näiteks plastivalu valatakse vormidesse. FDM printer on arendus edasi, kus printimiseks kasutatakse plastiktraati, mis sulatatakse ja läbi düüsi valikuliselt väljutatakse printimisalasse, kus toimub samuti kiht kihi haaval detaili kasvatamine valmivaks tooteks. Printeri pikkus on 633 mm, laius 486 mm ja kõrgus 523 mm. Printer vajab töötamiseks 230V ja 6,4A. Suurim töötemperatuur on 275° C. Tööruumi suurus antud seadmel on 72m³ ja samas tööruumis asub lisaks erinevaid seadmeid. Joonisel 15 on kuvatud FDM tehnoloogiat kasutatav printer. (User Manual ...; Leapfrog ...)



Joonis 15. Leapfrog Creatr HS
Allikas: Autori pildistatud

Seadme töötamine on suhteliselt lihtne ning ka antud seade oma maksumuse poolest on odavam, võrreldes eelpool kirjeldatud seadmetest. Seega on sarnased seadmed huvikasutajate käes laialt levinud. Ka antud seadmega töötades on tarvis esmalt luua 3D mudel ning viilutada mudel 2D kihtideks. Printer on arvutiga ühendatud ja printer saab arvutist töökäsu. Seadme enda töösse seadmine on samuti lihtne. Seadmele tuleb paigaldada plastiktraadi rull ning sööta plast sisse läbi printeri sulatusdüüsi. Seadme soojenemine võtab kuni 10 minutit aega ning sobiva temperatuuri saavutamisel hakkab printeri pea düüsist sulaplastikut valikuliselt väljutama ja sulatab plastikut vastavalt arvutist tulevale mudelile. Erisus printimisel on selles, et tugimaterjal seinte kasvatamiseks puudub ning selleks teeb printer samast materjalist tootetoed, et säiliks prinditav kuju. Prinditud toed tuleb hiljem eemaldada. Valminud toode eemaldatakse printerist ning toimub toote järeltöötlus.

Peamisteks ohtudeks antud printeri kasutamisel on samuti plasti kuumutamisel õhku eralduvad keemilised ühendid ja tööorganite liigutamiseks kasutatavate mootorite müra ning plasti sulamisel tekkiv kõrge materjali temperatuur.

2.2. Mõõtmis- ja andmeanalüüsimeetod

Uuringu teostamiseks viidi töökeskkondades läbi mõõdistused. Mõõdistuste käigus mõõdeti erinevaid töökeskkonna ohutegureid:

- mikrokliima näitajad: 1) õhutemperatuur, 2) suhteline niiskus, 3) süsihappegaas;
- müratase;
- kemikaalide sisaldus õhus;
- tolmu sisaldus õhus;
- elektromagnetväljad.

Mõõtmised toimusid Mehaanika ja Tööstustehnika Instituudi ruumides. Seadmete töötamise ajal viibis mõõtmiste juures vanemteadur Meelis Pohlak. Mikrokliima, müra, elektromagnetväljade, tolmu ja kemikaalide mõõtmised teostati autori poolt Ergonoomialabori seadmetega. Mõõtmisel olid abiks Karin Reinhold ja Tarmo Koppel. Kasutatud mõõtevahendid ja mõõtevahendite andmed on kuvatud tabelis 3.

Tabel 3. Mõõtevahendite andmed

Mõõteseadme nimetus	Kalibreerimis-tunnistus	Mõõtepiirkond	Mõõtevead
Mikrokliima: Testo 435 (VV013293) andurid VV013294 ja 10207870/001. Lisavahendid: mõõdulint, statiiv	ATLT-17/0428	mõõtepiirkondade suhteline niiskus 1,0...99,9%	U= ±2,2%
		õhutemperatuur 0,1...50,0°C	U= ±0,4°C
		süsihappegaas 1...10000 ppm	U= ±5%
		õhu liikumiskiirus 0,01...20m/s	U= ±0,05 m/s
Müra: TES 1358 (040406075) akustiline müramõõtja tüüp1, helikalibraator HD9102 klass 2	KL-165-16-054	mõõtepiirkond 30...130dB(A)	U= ±1,5dB(A)
Tolm: HazDust EPAM-5000 (VV013353)	EDCQP200-4.11.5	mõõtepiirkonnaga PM10 0,001...20,0mg/m ³	U= ±10%
Kemikaalid: Infrapuna spektromeeter 300-X, Pump SKC AirCheckXR (71294), küvett Secac T10, 2.4L	-	lainepikkused 7000...400 cm- 1, resolutsioon 1 cm-1, teepikkus 26,4 cm, vahemik 2,1...10,6 m	U= ±15%
Elektromagnetväljad: NFA 400 3D-NF-Analyser	-	5Hz...400Hz	U= ±30%

Allikas: Autori koostatud

Mikrokliima mõõtmiseks kasutati kalibreeritud mõõteseadet Testo 435 ja andureid, mis on esitatud tabelis 3. Mikrokliima mõõtmisi teostati nii soojal kui ka külmal aastaajal. Printerite töötamise protsessis eraldub suurel hulgal soojust. Ruumides töötas hoone kütte- ja ventilatsioonisüsteem vastavalt aastaaja režiimile. Parameetreid mõõdeti kolmes ruumis, sõltuvalt seadme asukohast. Mõõtmise eesmärk oli fikseerida õhutemperatuuri ja suhtelise niiskuse ning süsihappegaasi koguse muutus kihtlisandusseadmete töötamise ajal. Mõõtevahendi anduri kõrgus põrandapinnast oli 1,1 meetrit.

Eesti õigusaktidega ei ole täpselt kehtestatud nõudeid mikrokliimale, mis seab tööandjad töökohal sobiva mikrokliima kujundamisel teadmatusse. Ülikooli raamatukogus on toodu ära rida standardeid, mida on sobiv kasutada töökeskkonna kujundamisel. Mikrokliima mõõtmistel lähtuti järgmistest standarditest:

1. EVS-EN 15251:2007 Sisekeskkonna algandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast.
2. EVS-EN ISO 7726:2003 Keskkonna soojuslikud omadused. Mõõteriistad füüsikaliste suuruste mõõtmiseks.
3. Süsihappegaasi mõõtmise puhul EVS-EN 689:1999 Töökeskkonna õhu kvaliteet. Juhised keemiliste toimeainete sissehingamise mõju hindamiseks, piirnormide toimega võrdlemiseks ja mõõtemeetodite kohta.

Õhutemperatuuri ja suhtelise niiskuse ning süsihappegaasi norme töökeskkonnas ei ole kehtestatud. Samuti ei kajastata õigusaktides tööandjatele nõudeid töökeskkonna sobiva mikrokliima tagamiseks. Mõneti võib olla tegu olukorraga, kus tööandjad ei pruugi teada, kuidas töökeskkonnas sobiv mikrokliima tagada. Reeglina tehakse töö ajal erinevaid ülesandeid ning sellest lähtuvalt peaks olema sõltuvalt töö iseloomust tagatud ruumides erinevad mikrokliima näitajad. Töökeskkonna kujundamisel võib aluseks võtta standardi EVS-EN 15251:2007, millel on rahvuslik lisa EVS 916:2012 (EVS-EN). Antud lisa on sobiv, millest tööandja võiks tootmistöö korraldamisel lähtuda.

Müra mõõtmised teostati kalibreeritud mõõteseadmega TES 1358 ja müramõõtjat kalibreeriti enne mõõtmiste alustamist HD9102 seadmega. Seadme tehnilised näitajad on kuvatud tabelis 3. Mõõtemikrofoni hoiti mõõtmise hetkel töötava inimese pea kõrgusel. Mõõtmise käigus fikseeriti

A-kaalitud ekvivalentstasemed korduvate mõõteagade jooksul. Seadme sisene programm fikseeris maksimaalse ja minimaalse tulemuse ning teostas kokkupuute taseme arvutuse.

Töökeskkonnas müra kujundamise osas on tööandjad piisavalt informeeritud. Riigi Teatajas on toodud määrus töötervishoiu ja tööohutuse nõuded mürast mõjutatud töökeskkonnale, töökeskkonna müra piirnormid ja müra mõõtmise kord.

Müra all mõistetakse määruses heli, mis on tervist kahjustav. Määruses on esitatud piirnormid, millest alates on töötajal oht saada tervisekahjustus. Tervistkahjustavaks müratasemeks on määruse kohaselt esitatud ekvivalentne müratase, milleks on 80 dB(A) ja suurem müra või tipphelirõhk alates 135 dB(C) ja suurem tipphelirõhk. Samas on kehtestatud määrusega kokkupuutetase, mis ei tohi 8-tunnise tööpäeva korral olla suurem kui 85 dB(A) või suurem tipphelirõhk üle 137 dB(C). (Töötervishoiu ... §2-3)

Mõlemate tasemete juures toob määrus välja tegevused, mida tööandja peab töökeskkonnas rakendama. Kui müratase ületab 80 dB(A), siis peab tööandja märgistama müraallikad ja ohuala müra hoiatusmärkidega. Samuti peab tööandja esmalt vähendama mürataset (Töötervishoiu ... §5-6):

- 1) kas uute seadmete soetamisel kasutama madalama müratasemega töövahendeid;
- 2) tõkestama müralevikut tehniliste abinõudega;
- 3) vähendama töötajate kokkupuudet müra kestvusega;
- 4) hooldama regulaarselt töövahendeid, et vältida töövahendite mitte korrasoleku tõttu mürataseme kasvu.

Kui loetletud ühismeetmetega ei ole võimalik mürataset vähendada, siis on tööandja kohustatud töötajatele, kes töötavad müratsoonis, väljastama individuaalsed kuulmiskaitsevahendid ja töötajal on võimalus neid müratsoonis kasutada. (Töötervishoiu ... §5-6)

Kui töökeskkonnas müratase on 85 dB(A) või suurem, siis on tööandjal kohustus paigaldada müratsooni kuulmiskaitsevahendite kandmise kohustumärgi ja peab nõudma töötajatelt kuulmiskaitsevahendite kandmist ohualas või töötades mürarikka seadmega. Sõltuvalt müratasemest peab tööandja valima sobivad kuulmiskaitsevahendid. Kuulmiskaitsevahendid peavad vähendama kuulmist ohustava müra mõju. See tähendab, et töötades 100 dB(A) müras, peavad kuulmiskaitsevahendid vähendama mürataset alla 80 dB(A). (Töötervishoiu ... §5)

Kuna müra on tervistkahjustav, siis peab tööandja müraga kokkupuutuvatele töötajatele regulaarselt korraldama tervisekontrolli. Tervisekontrolli regulaarne korraldamine on vajalik, et avastada võimalikult varakult tekkinud tervisekahjustus. (Töötervishoiu ... §8)

Mürataseme välja selgitamiseks peab tööandja teostama müramõõtmised. Müra mõõtmistel tuleb lähtuda mõõteseadusest ja standardist EVS-NE ISO 9612. Müra tasemete võrdlemist piirnormiga võetakse arvesse ka mõõtemääramatust. (Töötervishoiu ... §9)

Keemiliste ohutegurite kohta tuleb lähtuda kemikaaliseadusest ning kolmest määrusest, mis on kehtestatud töökeskkonnas kasutamiseks (Riigi Teataja):

- 1) ohtlike kemikaalide ja neid sisaldavate materjalide kasutamise töötervishoiu ja tööohutuse nõuded;
- 2) töökeskkonna keemiliste ohutegurite piirnormid;
- 3) kantserogeensete ja mutageensete kemikaalide käitlemisele esitatavad töötervishoiu ja tööohutuse nõuded.

Kogu sisend kemikaalide olemuse ja määramise kohta pärineb REACH määrusest, mille on kinnitanud Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu. „Kemikaalina käsitletakse ainet või ainete segu, mis omakorda jagunevad ohtlikeks ja mitteohtlikeks kemikaalideks“ (Euroopa ... 2007). „Ohtlik aine põhjustab aine omaduste poolest ohtu inimese tervisele ja/või keskkonnale“ (Euroopa ... 2007). „Aine või ainete segu mõjust inimese tervisele hinnatakse aine: 1) toksikokineetilisi omadusi, 2) akuutseid mõjusid, 3) sensibiliseerimist, 4) korduvannuste toksilisust 5) kantserogeensete, 6) mutageensete, 7) reproduktiivtoksilisuse mõjusid“ (Euroopa ... 2007).

Ohtliku aine korral peab tootja koostama kemikaali ohutuskaardi ning koos ohtliku kemikaali müümisega peab kasutaja saama liikmesriigi keeles kemikaali ohutuskaardi. Ohutuskaart on kasutajale oluline infoallikas, millest selgub aine või ainesegu ohtlikkus, meetmed tagajärgede likvideerimiseks ning nõuded töökeskkonna kujundamise kohta. Kokku koosneb kemikaali ohutuskaart 16 kohustuslikust infolõigust. (Euroop ... 2007)

Ülikool kasutab seadme Formiga P100 kihtlisandusainena Formiga P100 Fine Plyamide PA 2200. Tegemist on välimuse poolest peenikese, valge jahu taolise pulbriga. Toote ohutuskaardil on

toodud, et antud kemikaal võib termilise töötlemise ajal tekkivatest aurudest põhjustada hingamisteede ärritust. Samuti tuleb vältida tolmu sissehingamist või silma sattumist. Kuna pulber on kihtlisandusseadmes töötlemise ajal kuum, siis on oht kokkupuutel nahaga saada põletushaavu. Kuna seadmega töötamise ajal eralduvad ohtlikud aurud ning ka tahkel kujul on tolm inimesele ohtlik, näeb toote ohutuskaart ette, et tööruumis peab olema piisav ventilatsioon. Samuti peab töötaja töötlemise ajal kanda kaitseprille ning tööruumis on keelatud süüa, juua või suitsetada. Peale nahaga kokkupuudet tuleb töö lõppedes käed pesta vee ja seebiga ning naha loomuliku niiskuse taastamiseks kreemitada. (Safety ... 2007)

SLM 280 2.0 ja SLM 50 seadmetes on võimalik kasutada tunduvalt suuremas valikus pulbrite segusid ning pulbri valik sõltub valmistavale tootele esitavatest nõuetest. Vaatluse hetkel oli kasutusel pulber TiAl6V4 ELI. Võrreldes plastiku pulbriga, on tegemist kordades raskema pulbriga. Tükiosakese erikaal on suurem ja sellest võib järeldada, et pulber ei ole nii kergesti lenduv. Seda võib ka visuaalselt kinnitada, sest õhus ei ole märgata pulbri tolmu, võrreldes kõrvalruumis kasutatava PA2200-ga. Toote materjali kaart ja pakendil olevad ohulaused ütlevad, et materjal on tuleohtlik ning tuleb vältida kuumade pindadega kontakti. (Material data ... 2018)

Sama kinnitab ka Meelis Pohlak ning kirjeldab, et pulber liigub kihtlisandusseadmes kinnises süsteemis ning pulbri liigutamisel anumast seadmesse ja seadmest anumasse tagasi, kasutatakse inertgaasi keskkonda. Inertgaasina kasutusel kokkusurutud lämmastik. Lämmastiku ohutuskaart toob nõude hoida gaasiballooni hästi ventileeritavas kohas.

Pulbermaterjali kasutamisel seadmes tuleb arvestada, et toimub metallpulbri sulatamine ning selle käigus eraldub erinevaid heitgaase. Samuti toimub valminud toote puhastamine metallipulbri jääkidest hiljem käsitsi.

Leapfrog Creatr HS seadmes kasutatakse materjalina PLA-d ja ABS, mis välimuse poolest meenutab plastikust traati. Tootete info põhjal on PLA toodetud taimedest ja on biolagunev. ABS puhul on tegemist plastiseguga. Tahkel kujul on mõlemad toorained ohutud, kuid kuumutamisel printeris võivad eralduda kahjulikud ühendid ning töökeskkond peab olema hästi ventileeritud. Vaatluse hetkel oli printimisel PLA materjal kasutusel. (Material data ... 2017)

Antud materjalide kasutamise juures tuleb arvestada, et toimub materjali kuumtöötlemine ning töökeskkond on printimise ajal avatud.

Tolmu mõõtmisel kasutati kalibreeritud mõõteseadet HazDust EPAM-5000. Seadme tehnilised näitajad on kuvatud tabelis 3. Töökeskkonnaõhus leiduvat tolmu mõõdeti töötaja hingamistsoonis kestvalt ühikutes mg/m^3 . Tolmumõõtmisi teostati mitmeid. Peamiselt mõõdeti töötaja hingamistsoonis leiduvat tolmu ning ruumi õhus sisalduvat tolmu. Samuti teostati tolmu mõõtmised nii soojal kui ka külmal aastaajal. Ruumides töötas hoone kütte- ja ventilatsioonisüsteem vastavalt aastaaja režiimile. Ülikooli raamatukogus on toodud rida standardeid, millest tolmu mõõtmistel lähtuti:

1. EVS-EN 689:1999 Töökeskkonna õhu kvaliteet. Juhised keemiliste toimeainete sissehingamise mõju hindamiseks, piirnormide toimega võrdlemiseks ja mõõtemetodite kohta.
2. NIOSH meetod 0500 osakesed, mida ei ole muul viisil reguleeritud, kogutolm.
3. NIOSH meetod 0600 tahked osakesed, mida ei ole muul viisil reguleeritud, on sissehingatav tolmu.

Kemikaalide mõõtmistel kasutati mõõteseadet infrapunaspektromeeter 300-X, pumpa SKC AirCheckXR ja küvett Secac T10, millede tehnilised näitajad on kuvatud tabelis 3. Kemikaale mõõdeti varem määratud punktides tootmisruumides. Selleks kasutati pumpa ja mürgiste gaaside määramiseks kaasaskantavat infrapunaspektromeetrit. Mõõtmised kestsid 3 min (vastavalt pumpamise ajale) ning filtrit hoiti töötaja hingamistsooni kõrgusel. Kogutud proovid salvestati arvutisse ning töödeldi vastava programmiga Essential Ftir. Kemikaalide mõõtmisel lähtuti järgmistest standarditest:

1. EVS-EN ISO 10882-2:2001. Keevitamise ja sellega seotud protsesside tervis ja ohutus. Õhust eralduvate osakeste ja gaaside proovide võtmine käitaja hingamisalas. Osa 2: Gaaside proovide võtmine.
2. ISO 16200-2:2001 Töökeskkonna õhukvaliteet. Lenduvate orgaaniliste ühendite proovide võtmine ja analüüs lahusti desorptsiooni / gaasikromatograafia abil. Osa 1: Pumbatud proovivõtumeetod.
3. EVS-EN 689:1999 Töökeskkonna õhu kvaliteet. Juhised keemiliste toimeainete sissehingamise mõju hindamiseks, piirnormide toimega võrdlemiseks ja mõõtemetodite kohta.

Elektromagnetväljade mõõtmisel kasutati kalibreeritud mõõteseadet NFA 400 3D-NF-Analyser. Seadme tehnilised näitajad on kuvatud tabelis 3. Mõõtmised toimusid inimese südame kõrgusel.

Esmalt teostati seadme ümber magnetvälja näitajate fikseerimine ning välja kõige suurema näitaja mõõtmine kuni 2 meetri kauguseni seadmest. Domineeriv sagedus mõõtmiste ajal oli 50,0 Hz. Samuti teostati elektrivälja mõõtmised. Elektromagnetvälja mõõtmisel lähtuti järgmisest õigusaktist töötervishoiu ja tööohutuse nõuded elektromagnetväljadest mõjutatud töökeskkonnale, elektromagnetväljadega kokkupuute piirnormid ja rakendusväärtused ning elektromagnetväljade mõõtmise kord.

Elektromagnetvälja mõõtmisi reguleerivad järgmised standardid:

- 1) EVS-EN 50413:2009 Inimesele toimivate elektri-, magnet- ja elektromagnetväljade (0 Hz kuni 300 GHz) mõõtmis- ja arvutusviiside põhistandard.
- 2) EVS-EN 50499:2009 Töötajale toimiva elektromagnetvälja määramine.
- 3) EVS-EN 62233:2008 Inimesele toimivate majapidamis- ja muude taoliste seadmete elektromagnetväljade mõõtmismeetodid.

Magnetvälju mõõdeti kahe seadme korpuse ümber 20cm kaugusel seadmetest. Kogu mõõteperioodi jooksul fikseeriti magnetvälja näitajad. Mõõdetud välja näitajatest valiti edasiseks mõõtmiseks mõlema seadme puhul kõige suurema väärtusega punkt ning teostati 25 sentimeetrise vahedega kuni 2 meetri kauguseni välja tugevuse mõõtmised. Iga 25 cm tagant fikseeriti välja näitaja. Logitud andmeid analüüsiti elektromagnetvälja tootja Gigahertz Solutions andmeanalüüsi tarkvara NFAsoft ver 144 abil.

Õigusaktidega on töökeskkonnas kehtestatud mitmete väärtustele piirnormid. Mõõdetud tulemusi võrdleb töö autor piirnormidega ja annab hinnangu tulemuste tõlgendamisel.

3. MÕÕTETULEMUSED

Kihtlisandusseadmete töökeskkonnas TalTech mehaanika ja tööstustehnika instituudi ruumides teostas autor füüsikaliste ja keemiliste ohutegurite mõõtmisi.

3.1. Füüsikalised ohutegurid

Autor on töö raames füüsikaliste ohuteguritena teostanud järgmised mõõtmised:

- 1) mikrokliima mõõtmised (1) õhutemperatuur, 2) suhteline niiskus, 3) süsinikdioksiidi sisaldus);
- 2) müra mõõtmised;
- 3) elektromagnetväljade mõõtmised.

3.1.1. Müra mõõtmised

Müra mõõtmised teostati kolmes printerseadmega varustatud ruumis. Kõigis kolmes ruumis mõõdeti seadmete printimise ajal ruumis olevat taustmüra. Samuti vaadati üle toetavad tegevused mudeli tootmisel. Lähtuvalt sellest teostati täiendavad müra mõõtmised Formiga P100 ruumis, kui toimus detailide puhastamine liivapritsseadmega ning töökeskkonna puhastamine tolmuimejaga, peale tootmistegevuse lõppu.

Mõõtmised kestsid 10 minutit ning mõõtmisi korrati. Müra mõõtmiste tulemused on esitatud tabelis 4. Kokku teostas autor seitsmes punktis müramõõtmised. Müramõõtmiste käigus fikseeriti kõike madalam ja kõige kõrgem müratase. Lisaks arvutas mõõteseade tööpäevase kokkupuute taseme. Mõõtmistulemused on tabelis kuvatud müratasemele ja helirõhule. Mõlemale näitajale on õigusaktiga kehtestatud piirnormid. Mõõtekohad on kuvatud tähisega M ja numeratsiooniga vastavalt mõõtmiste järjekorra arvule. Samuti on mõõdetud tulemuste juures esitatud mõõtemääramatus.

Tabel 4. Mõõdetulemused töökeskkonnas (s, dB(A), dB(C))

Töökoht	Mõõteag [s]	Mõõdetulemused				Piirnormid	
		taandatud ekspositsioonitase L_{EX} 8h, dB(A)	maks. mõõdetud müratase dB(A)	min. mõõdetud müratase dB(A)	korregeeritud helirõhu tippväärtus $L_{C,tipp}$, dB(C)	taandatud ekspositsioonitase L_{EX} , dB(A)	korregeeritud helirõhu tippväärtus, $L_{C,tipp}$, dB(C)
M1: Printeri ruum 1 seadme töö	600	61,6 ±1,5	65,4 ±1,6	65,4 ±1,6	70,4 ±1,7	85	137
M2: Printeri ruum 1 seadme töö	600	60,3 ±1,4	65,5 ±1,7	65,5 ±1,7	74,5 ±1,7	85	137
M3: Printeri ruum 1 - tolmuimeja	600	80,8 ±1,6	86,0 ±1,8	62,9 ±1,5	103,0 ±2,1	85	137
M4: Printeri ruum 2 seadme töö (erinevad printimis tegevused)	600	63,5 ±1,4	69,5 ±1,6	57,8 ±1,2	71,5 ±1,7	85	137
M5: Printeri ruum 2 – seadme töö (erinevad printimistegevused)	600	65,4 ±1,5	71,3 ±1,7	61,9 ±1,5	71,0 ±1,7	85	137
M6: Metalliprinter (arvuti töökoht)	600	66,9 ±1,7	70,5 ±1,7	65,1 ±1,6	70,7 ±1,7	85	137
M7: Printeri ruum 1 seadme töö	600	62,4 ±1,5	69,2 ±1,6	57,7 ±2	77,0 ±1,8	85	137

Allikas: (Töötervishoiu ... §3); autori koostatud

Autor tõlgendab müra piisavalt tugevaks ning peab müra häirivaks, eriti, kui on vaja samal ajal seadistada arvutis mudeli parameetreid. Kõike kõrgem müratase $86,0 \pm 1,8$ dB(A) mõõdeti Formiga P100 printeri tugitegevusel, milleks on printimise käigus ruumi lendunud materjalitolmu seadmetelt ja tööpindadelt ning põrandalt kokku kogumine tolmuimejaga. Kuna tolmuimejaga töö ei toimu terve tööpäeva, siis tööpäevane kokkupuutetase müraga on $80,8 \pm 1,6$ dB(A) ja helirõhuga $103,0 \pm 2,1$ dB(C). Antud müratase ei ületa piirnormi, kuid müratase on selline, kus tööandjal on kohustus rakendada müra mõju vähendavaid meetmeid (Töötervishoiu ... §5).

3.1.2. Mikrokliima mõõtmised

Mõõtmised toimusid soojal ja külmal aastaajal. Lähtuvalt standardist on lubatud erinevatel aastaegadel väikeste kõikumistega optimaalsed vahemikud, sõltuvalt tehtava füüsilise töö raskusastmest. Lubatud optimaalne vahemik on esitatud tabelis 5.

Tabel 5. Soovituslik temperatuur sõltuvalt tehtava töö raskuskategooriast

Aasta- aeg	Töö raskuskategooria	Temperatuur °C				
		Optimaalne	Soovituslikud piirväärtused			
			Ülempiir		Alampiiir	
			alaline	mittealal.	alaline	mittealal.
Külm	Kerge Ia	20-24	25	26	19	18
	Kerge Ib	19-23	24	25	18	17
	Keskmise raskusega Ia	17-20	23	24	16	17
	Keskmise raskusega Ib	16-19	21	23	15	13
	Raske	15-18	19	20	13	12
Soe	Kerge Ia	23-25	26	28	21	20
	Kerge Ib	22-24	25	27	20	19
	Keskmise raskusega Ia	21-23	24	26	18	17
	Keskmise raskusega Ib	20-22	23	25	16	15
	Raske	18-20	22	24	15	13

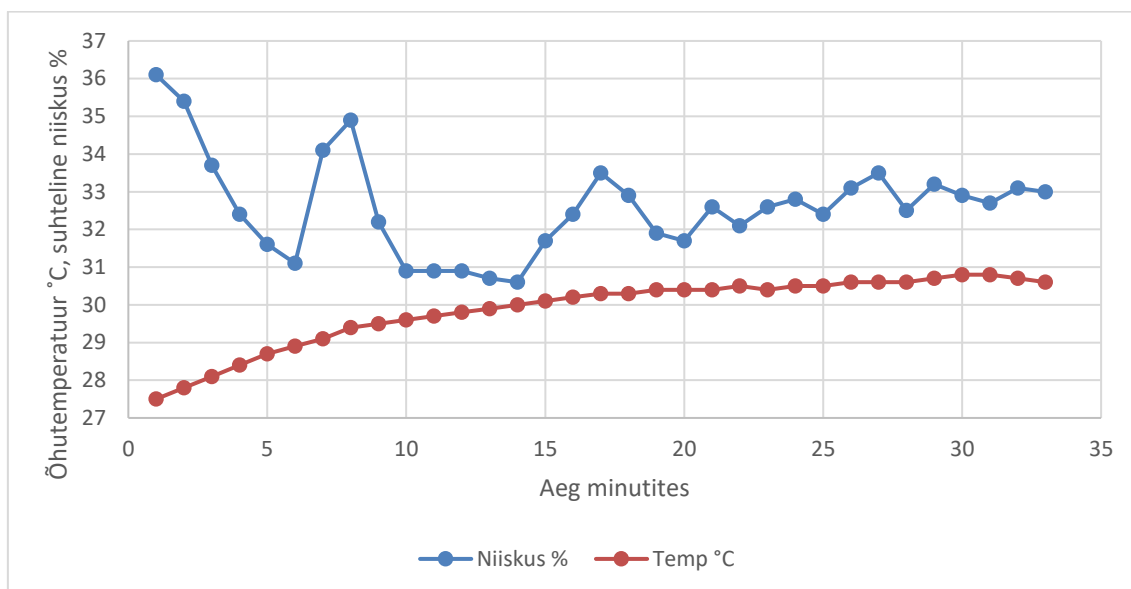
Allikas: EVS-EN 15251:2007 ja lisa EVS 916:2012, autori koostatud

Soojusmugavuse optimaalseks hindamiseks tuleb kasutada II klassi töid ning soovituslik õhu suhteline niiskus on 25-60% (EVS 916:2012).

Joonisel 16 ja 17 on kuvatud juuni 2018 toimunud mikrokliima mõõtmised Fromiga P100 tööruumis. Mõõtmised toimusid kihtlisandusseadme töötamise algusest kuni lõpuni, mis kestsid kokku 32 minutit. Mõõtmistulemused fikseeriti iga ühe minuti tagant ning kogu kihtlisandusseadme tööajast tekkis aegrida. Iga punkt joonisel tähistab mõõtmishetke.

Joonis 16 on kuvatud õhutemperatuur ning suhteline niiskus. Suhtelise niiskuse puhul on näha, et ruumis hakkab suhteline niiskus õhus koheselt vähenema ning jõuab algsest 36,1% pealt kõige madalama tasemeni 30,6% peale 14 minutilist tööd. Peale seda suhteline niiskus taastub mõne

protsendipunkti võrra. Võrreldes antud näitajat soovitusliku suhtelise niiskusega, siis soojal aastaajal ei kujune antud näitaja kriitiliseks.

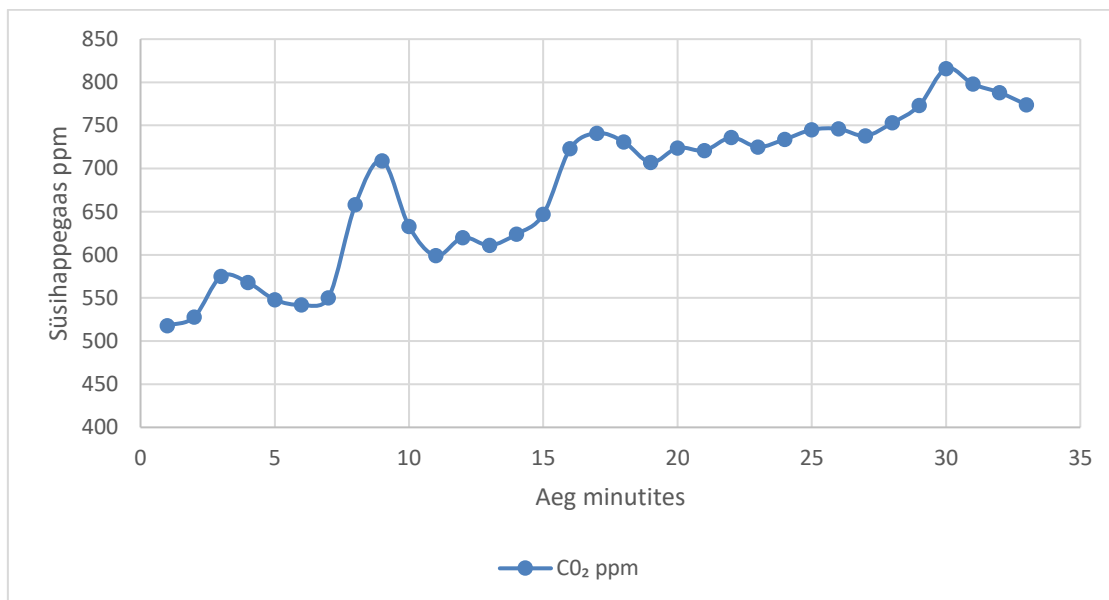


Joonis 16. Formiga P100 õhutemperatuuri ja suhtelise niiskuse muutus seadme töötamise ajal
Allikas: Juuni 2018, autori koostatud

Õhutemperatuuri puhul aga tuleb tunnistada, et ruumis on juba optimaalsest tasemest kõrgem õhutemperatuur ning seadme töösoleku ajal jätkab ruumi õhutemperatuur kasvu ning jõuab 27,5°C pealt 30,8°C peale. Antud näitaja on enne töö alustamist juba 3,5°C kõrgem ning tööprotsessi käigus ületab optimaalset ülemist piiri 6,8°C. Seda on selgelt palju ja kui võrrelda ruumi temperatuuri teiste kihtlisandusseadmete tööruumidega, tuleb järeldada, et Formiga P100 soojuskiirgus ümbritsevasse keskkonda on suur ning kohandatud ruum ei ole sobiv antud seadmega töötamiseks.

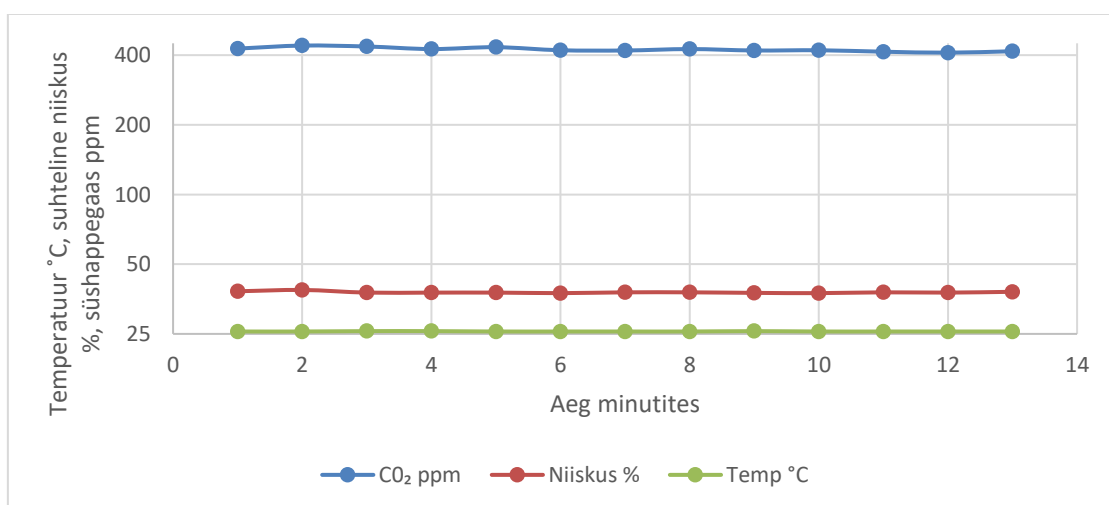
Joonisel 17 on kuvatud süsihappegaasi sisaldust tootmisruumi õhus ning süsihappegaasi sisalduse muutust seadmega töötamise ajal. Kihtlisandusseadme töötamise ajal kasvas süsihappegaasi kontsentratsioon 518 ppm juurest 816 ppm juurde. Süsihappegaasi tase jääb kogu töötusprotsessi mõistlikule tasemele. Süsinikdioksiidil on seatud piirnormiks 5000ppm (Töökeskkonna keemiliste ...). Mõõdetud tulemus moodustab 16% piirnormist. Koolides on kehtestatud piirnormiks 1000ppm (Tervisekaitseõuded). Kuid antud määruse alla Ülikooli tööruumid ei kuulu. Kontorites ja intellektuaalseks tööks on standardi põhjal piirnormiks 850 ppm (EVS-EN 15251:2007). Standardi põhjal võib järeldada, et süsihappegaasi sisaldus moodustab 96% piirnormist. Kui lähtuda, et tegemist oleks tootmiskeskonnaga, siis risk on madal. Kuid süsihappegaasi

kontsentratsiooni kiire tõus printimise ajal viitab, et tööruumi ventilatsioon ei ole piisav. Tasub märkida, et jooniselt 16 ja 17 on süsihappegaasi sisalduse muutusel ja suhtelise niiskuse näitajatel sarnased liikumised.



Joonis 17. Formiga P100 CO₂ muutus seadme töötamise ajal
Allikas: Juuni 2018, autori koostatud

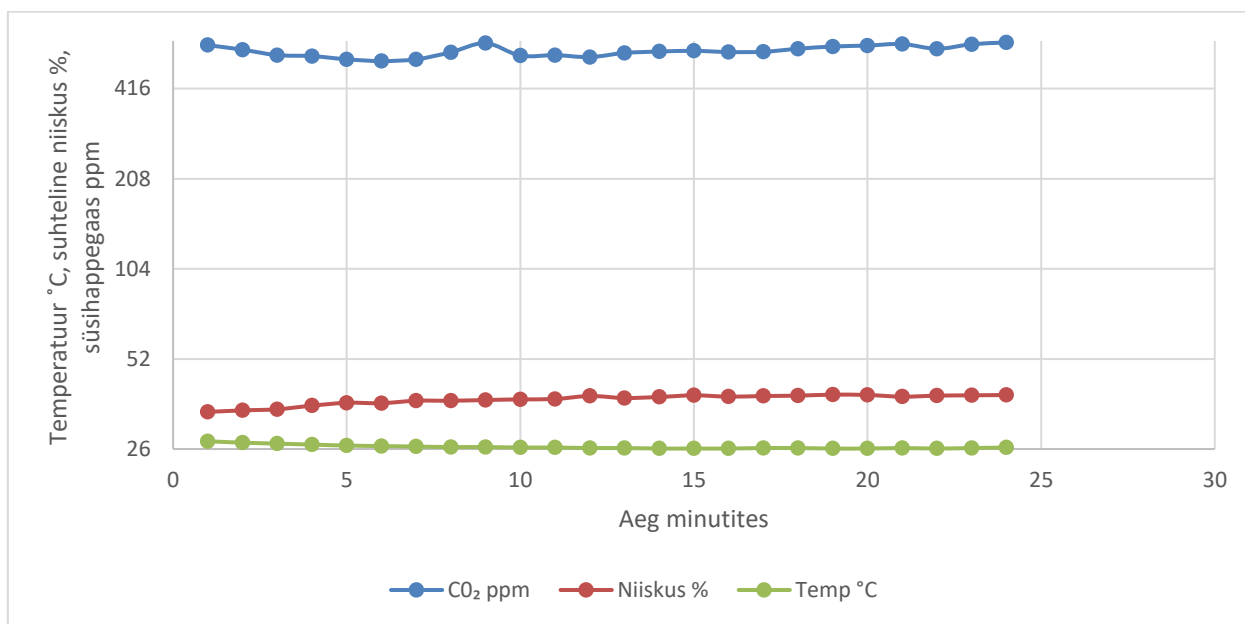
Sarnased mõõtmised toimusid seadme SLM 280 2.0 tööruumis. Mõõtmised kestsid 13 minutit. Kaantud mõõtmiste juures fikseeriti mõõtmistulemus iga ühe minuti tagant. Saadud andmete põhjal moodustus aegrida, mis on kuvatud joonisel 18.



Joonis 18. SLM 280 2.0 seadme kasutamisel õhutemperatuuri, suhtelise niiskuse ja CO₂ näitajad
Allikas: Juuni 2018, autori koostatud

Antud mõõtmised seadme kasutamise ajal ei muutunud, õhutemperatuur püsis printimise ajal 25,6°C juures, suhteline niiskus 38% juures ja süsihappegaasi sisaldus õhus langes 427 ppm juurest 416 ppm juurde. Mõõtmiste põhjal saab järeldada, et antud seade ei mõjuta ümbritsevat töökeskonda, soojuskiirguse mõju puudub ja tootmisprotsessi käigus süsihappegaasi ei eraldu ning suhteline õhuniiskus püsib stabiilselt optimaalses vahemikus. Küll aga saab täheldada, et tööruumis oli õhutemperatuur juba enne töö alustamist üle soovitusliku ülempiiri 1,7°C.

Seadme Leapfrog Creatr HS tööruumis toimusid samuti mikrokliima mõõtmised. Mõõtmised kestsid kokku 24 minutit. Õhutemperatuur töö alustamisel oli ruumis 27,6°C ja langes mõõtmisperioodi lõpuks 26,1°C peale. Suhtelise niiskuse näitaja tõusis 34,6% pealt 39,4% peale. Teatav seos on kindlasti olemas õhutemperatuuri languses ja suhtelise niiskuse kasvul. Antud juhul võiks pigem järeldada, et suhtelise niiskuse tõusul võib mõju olla hoopis seadme tööst, sest võrreldes eelpool loetletud seadmetest, on tegemist täiesti avatud seadmega ümbritsevasse keskkonda. Süsihappegaasi sisaldus seadme töötamise ajal oluliselt ei muutu, 581 ppm juurest jõuab näit 593 ppm juurde. Mõõtmistulemused on kuvatud joonisel 19.



Joonis 19. Leapfrog Creatr HS õhutemperatuuri, suhtelise niiskuse ja süsihappegaasi muutus seadme töötamise ajal

Allikas: Juuni 2018, autori koostatud

Ka antud seadme mõõtetulemuste põhjal võib järeldada, et antud tehnoloogial põhinev seade ei mõjuta töökeskkonna mikrokliimat oluliselt. Küll aga tuleb juhtida tähelepanu, et tööruumi õhutemperatuur on juba enne tööprotsessi algust üle soovitusliku ülempiiri 3,6°C.

3.1.3. Elektromagnetväljade mõõtmised

Elektromagnetvälju mõõdeti kahe seadme juures, milleks olid Formiga P100 ja SLM 50. Mõõdeti nii madal- ja kesksageduslikud elektriväljad kui magnetväljad. Tabelis 6 on kuvatud mõõtmistulemused.

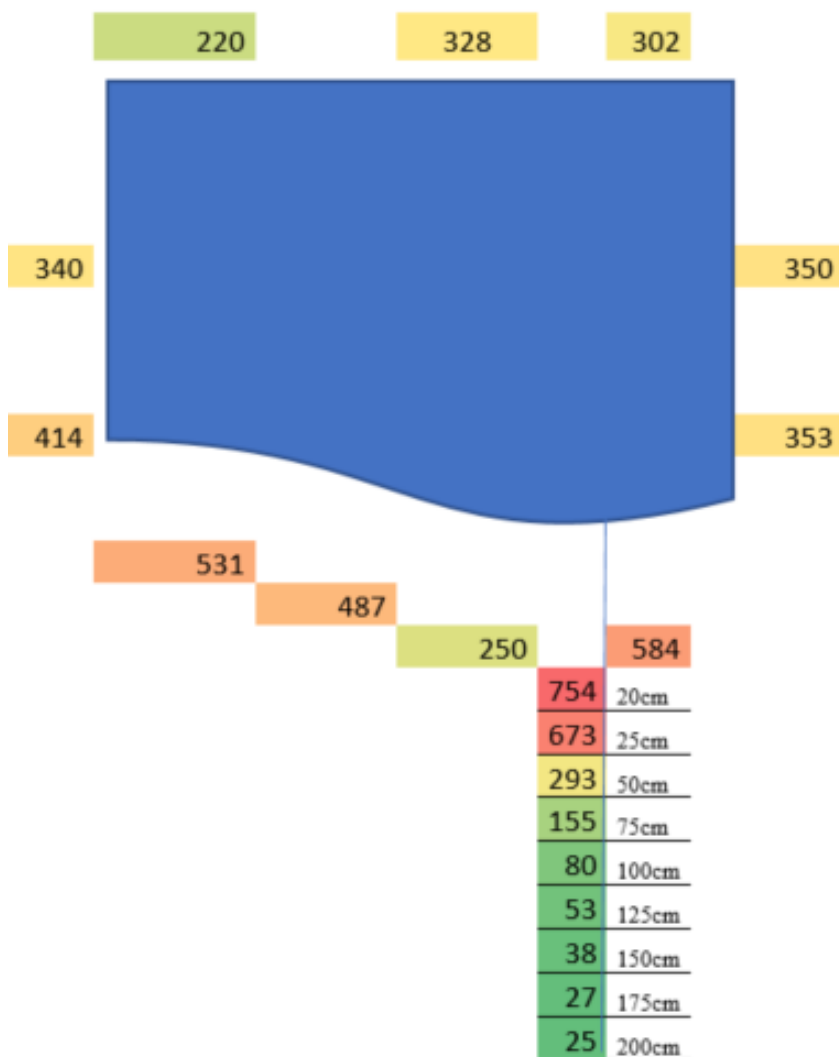
Tabel 6. Kahe seadme elektromagnetväljad, mõõdetuna ümber seadme (nT, V/m, Hz)

Seade	Magnetväli (nT)		Elektriväli (V/m)		Domineeriv sagedus (Hz)
	keskmine	maks.	keskmine	maks.	
Formiga P100	409	754	1,5	3,7	50
SLM 50	181	356	3	16	50

Allikas: autori koostatud

Kuna autori hinnangul ei ole elektriväli probleemne, siis antud väljade täpsemaid mõõtmisi edasi ei teostatud ning jätkati magnetväljade mõõtmisega.

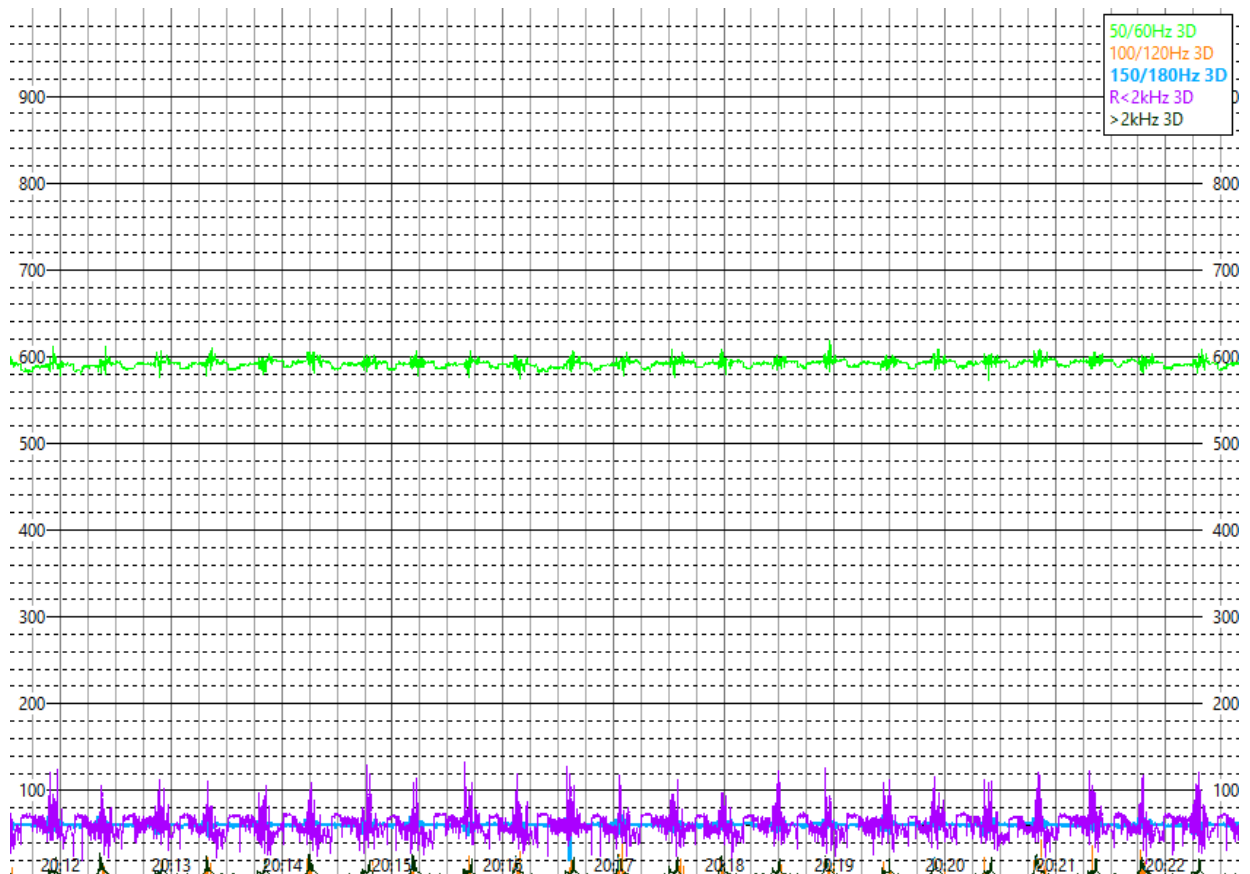
Formiga P100 seadme puhul mõõdeti kõige madalamaks magnetvälja väärtuseks 220 nT ja kõige kõrgemaks väärtuseks 754 nT. Seadme juurest mõõdetud kõige kõrgema näidu puhul teostati täiendav mõõtmine. Täiendav mõõtmine algas seadme juurest ja iga 25 cm kaugusel fikseeriti magnetvälja näit. Mõõtmised teostati antud punktist kuni 2 m kauguseni. Kõige kõrgema väärtuse punktist 2 meetri kaugusele jäi välja näit 25 nT juurde. Samuti teostati mõõtmised SLM 50 seadme ümber ning kõige kõrgemaks väärtuseks mõõdeti 356 nT ja kõige madalamaks väärtuseks mõõdeti 181 nT. Formiga P100 magnetvälja põhjal koostas autor joonise, mille põhjal on selgelt kuvatud mõõtepunktide väärtused ja kõige kõrgema väärtuse punkt koos ulatusega kuni 2 meetrit. Antud joonis sobib ka tööandjale, mille põhjal saab töötajale tutvustada magnetvälja levikut ja kohti, milles töötajal ei ole soovitatav pikemalt viibida. Mõõtepunktide tulemused on kuvatud joonisel 20. Lisaks numbrilisele väärtusele on kasutusel ka värviskaala, kus roheline värv näitab kõige madalamat väärtust ja punane värv kõige kõrgemat väärtust.



Joonis 20. Formiga P100 magnetvälja mõõtetulemused, seadme laius 1320 mm, pikkus 1067 mm, magnetvälja mõõtühik on nano Tesla (nT)
 Allikas: Märts 2019, autori koostatud

50 Hz sagedusel magnetvälja piirnorm on 100 μ T avalikele kohtadele ning 1000 μ T töökohtadele. Antud seadme puhul võib järeldada, et piirnorme seade ei ületa. (Mitteioniseeriva ... §6)

Jooniselt 21 on näha, et Formiga P100 magnetvälja domineeriv sagedus on 50 Hz, kuid esinevad madalamal tasemel ka lairibasagedused alla ja üle 2 kHz-i. Samuti avaldab kestusmõõtmise magnetvälja iseloomu, kuvades printeri tsüklilist tööprotsessi, mille käigus magnetväli mõnevõrra tõuseb. Kestusmõõtmisel on näha kokku 23 tsüklit, mille kestel väli hetkeliselt kasvas.



Joonis 21. Magnetvälja kestusmõõtmine Formiga P100 juures (20 cm korpusest); mõõtmise kestus 11 min. Ühik nanoTesla (nT)
Allikas: Märts 2019, väljavõte NFA 400 seadmest

Tabel 7 annab ülevaate erinevatest sagedusvahemikest Formiga P100 juures teostatud kestusmõõtmistest. Kestvusmõõtmiste protokollid on kuvatud lisades 1 ja 2.

Tabel 7. Formiga P100 ja SLM 50 sagedusvahemike magnetvälja (nT) amplituudid kestusmõõtmisel

Seade	Sagedus	Min.	Maks.	Keskmine	Standardhälve	95% tõenäosus
Formiga P100	16Hz – 400 kHz (All 3D)	578,20	625,70	595,85	4,12	602,94
	50 Hz	570,60	615,30	589,82	4,12	596,43
	100 Hz	0,00	41,70	0,12	1,53	0,00
	150 Hz	17,10	75,70	57,92	2,15	60,80
	< 2 KHz	12,70	131,00	58,85	12,27	72,85
	>2 KHz	0,00	25,80	1,40	3,15	6,95

Allikas: Lisa 1 andmete põhjal, autori koostatud

Antud sageduste mõõtmise juures on näha, et domineeriv sagedus on 50 Hz.

3.2. Keemilised ohutegurid

Kõigis kolmes tööruumis toimusid tolmu mõõtmised nii soojal kui ka külmal aastaajal. Mõõtmistulemused on vastavalt kuvatud tabelis 8 ja tabelis 9.

Tabelis 8 toimusid mõõtmised kolmes erinevas ruumis printerite vahetus läheduses. Formiga P100 tööruumis toimusid kahed tolmu mõõtmised, millest tabelis esimene mõõtmine toimus ruumi üldise tolmusisalduse kohta õhus ja teine detailide puhastamise töölaua juures töötaja näo piirkonnas. Vaadates seadet ennast, siis on näha, et seadme ukse katteklaasi vahelt pääseb paagutuse ajal välja gaasi. Klaasi peale on ladestunud kristallid. Ka visuaalselt on õhus näha pulbrit hõljumas. Samuti mõõdeti protsessis tööloiku, kus toimub valminud detaili pulbrist välja võtmine ja puhastamine pintsliga. Printeri ruumis 2 toimusid mõõtmised printimise ajal. Metalliprinteri ruumis toimusid mõõtmised samuti detaili puhastamise ajal.

Tabel 8. Mõõtmised soojal aastaajal (min, mg/m³)

Töökoht/ Piirkond	Tolmu kirjeldus	Mõõte- kestvus /min/	D _{min} mg/m ³	D _{max} mg/m ³	D _{kesk} ±laiend- määramatus (U= ±10%) mg/m ³
Formiga P100. Printer töötab ja prindib detaile, suletud süsteem	PA2200	28:50	0,04	0,41	0,16 ±0,02
Formiga P100. Laserpaagutus, detailide puhastus. Olemas kohtventilatsioon.	PA2200	3:40	0,12	0,83	0,76 ±0,08
Leapfrog Creatr HS	PLA	19:10	0,04	0,13	0,08 ±0,01
SLM 280 2.0	TiAl6V4 ELI	11:20	0,04	0,66	0,1 ±0,01

Allikas: autori koostatud

Tolmu mõõtmisi korrati külmal aastaajal uuesti ning valiti kolm kohta mõõtmiseks. Esmalt Formiga P100 ruumis ruumi tolmu sisaldus õhus. Teiseks seadmesse materjali lisamise tegevus, mis ei toimu kohtventilatsiooni alas. Ja kolmas mõõtmine teostati metalliprinteri juures detaili puhastamisel.

Tabel 9. Mõõtmised külmal aastaajal (min, mg/m³)

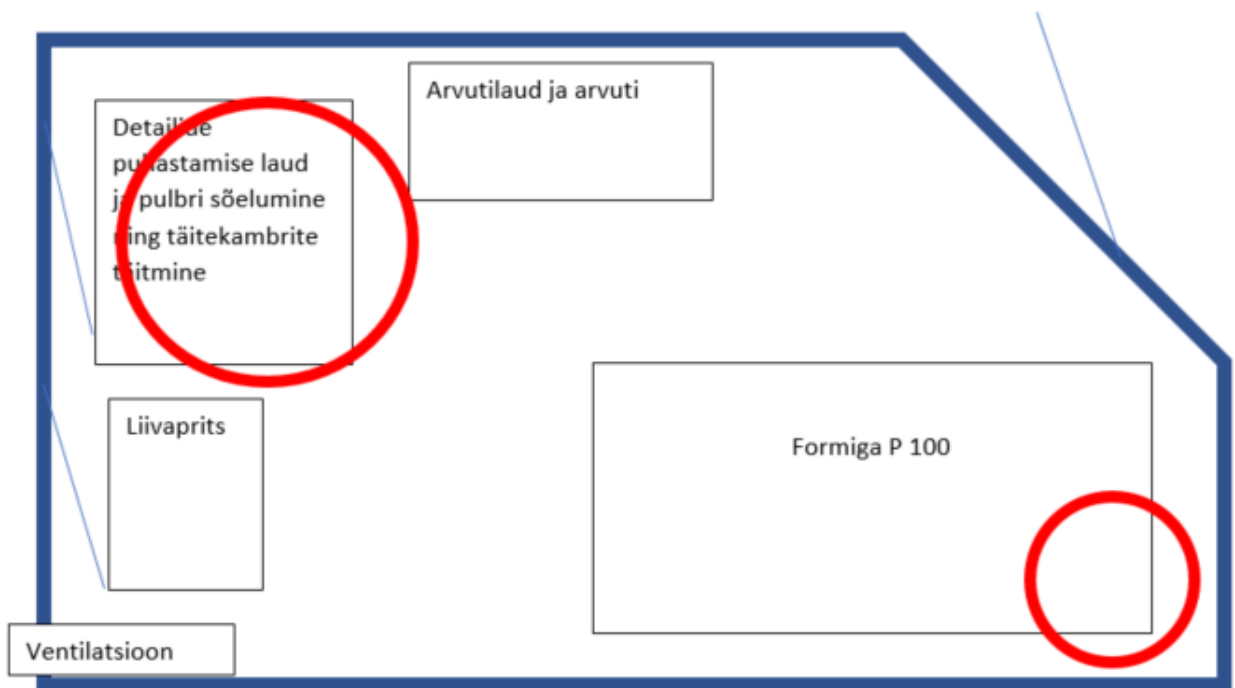
Töökoht/ Piirkond	Tolmu kirjeldus	Mõõte- kestvus /min/	D _{min} mg/m ³	D _{max} mg/m ³	D _{kesk} ±laiend- määramatus (U= ±10%) mg/m ³
Formiga P100. Printer töötab ja prindib detaile, suletud süsteem	PA2200	32:40	0,06	0,39	0,12 ±0,01
Formiga P100. Materjali lisamine printerisse. Kohtventilatsiooni ei ole.	PA2200	02:30	0,07	7,85	1,89 ±0,19
SLM 50	TiAl6V4 ELI	03:10	0,06	0,72	0,13 ±0,01

Allikas: Autori koostatud

Tabeli 8 ja 9 mõõtmiste põhjal võib järeldada, et olulist erinevust soojal ja külmal aastaajal mõõtes ei saa täheldada ning temperatuurist ja suhtelisest niiskusest tekkiv mõju on olematu. Küll aga saab järeldada, et käideldes PA2200 kohtventilatsiooniga mitte varustatud kohas, paiskub sellel hetkel töökeskkonda tavapärasest oluliselt suurem hulk pulbrit.

Plastitolmu puhul on kehtestatud piirnorm 3 mg/m³ ja metalli puhul 5 mg/m³ (Töökeskkonna ... Lisa).

Lähtuvalt piirnormist ja tolmu mõõtmiste tulemustest selgub, et maksimumväärtus 7,85 mg/m³ mõõdeti printeri ruumis 1 plastipulbri lisamisel Formiga P100 seadmesse. Mõõtmistulemus moodustab 63 % piirnormist, mis on selgelt suur risk. Formiga P100 tööruumi üldine tolmusisaldus ruumis moodustab 5,3 % piirnormist, mis on tühine risk. Töötades puhastuslaua juures, siis moodustab tolmu sisaldus õhus 25,3 % piirnormist, mis on keskmine risk. Kõik tootmistegevused, mille käigus peab seadme operaator töötama lahtist pulbrit, avaldavad otsest mõju töökeskkonnale ning mõjuvad töötaja tervisele ohtlikult. Mõõtmistulemused näitasid, et tolmu paiskub õhku just nendest tegevustest, mille jooksul käideldakse lahtist materjali, kui töötaja puhastab kohtventilatsiooniseadme all valminud detaili jääkpulbrit või lisab printimiseks täiendavalt pulbrit printerisse juurde. Antud töökeskkonnas on kasutusel üldventilatsioon ja puhastamise laua kohal täiendav kohtventilatsioon. Mõõtmistulemuste põhjal saab järeldada, et õhuvahetus ruumis tervikuna ei ole piisav. Küll, aga võib mõõtmistulemuste põhjal järeldada, et kohtventilatsioon töölaua kohal vähendab oluliselt tolmu sisaldust õhus, kui kohtventilatsioonita töökoht. Joonisel 22 on kuvatud punaste ringidega tolmu tekkekohad.



Joonis 22. Formiga P100 tööruumi tolmu tekitavad kohad

Allikas: Autori koostatud

Leapfrog printeri tööruumis moodustab tolmusisaldus õhus 2,6 % piirnormist. Tolmu sisaldus ruumis on olemas, kuid madal ja vaatluse põhjal ei tohiks olla printer tolmu põhjustajaks.

SLM 50 tööruumis moodustab tolm õhus 2,6 % piirnormist. Ka antud näitajat võib hinnata madalaks. SLM 280 tööruumis moodustab tolm õhus 2% piirnormist. Samuti võib hinnata antud näitaja madalaks. Metallitolmu puhul tasub kindlasti mõista, et tegemist on metalliga ning ka väga väikeses koguses võib antud tolm olla sissehingamisel kahjulik. Visuaalselt ei olnud vaatluse käigus märgata, et metallpulber oleks kergesti lendlev, kuid töötlemise käigus võib juhtuda kokkupuude ka juhuslikku laadi. Kindlasti ei sobi metalliline tolm sissehingamiseks.

Tabelis 10 on kuvatud kemikaalide mõõtmistulemused töökeskkonna õhus. Mõõtmised toimusid kolmes erinevas ruumis printerite töötamise ajal ja tugitegevuste ajal. Lisaks on tabelis kuvatud kehtivad piirnormid, mille puhul vaadatakse 8 tunnise kokkupuute ajaga taset ja lühiajalise kokkupuutega piirnorme.

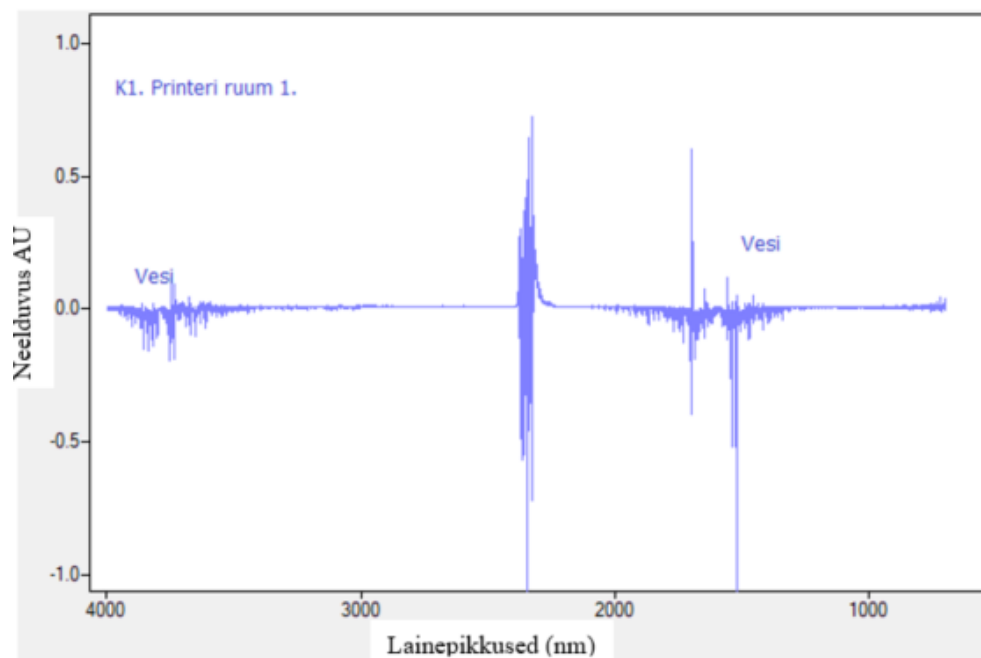
Tabel 10. Kemikaalide sisaldus töökeskkonna õhus (ppm)

Töökoht	Korrigeeritud mõõtetulemus $\pm U$ ppm	Normid	
		piirnorm 8h ppm	lühiajalise mõju piirnorm ppm
K1 Formiga P 100 printeri ruum 1	õhus ei ole detekteeritavaid lenduvad ühendid	-	-
K2 Leafrog printeri ruum 2	õhus on detekteeritavad alifaatsed ühendid väikestes kogustes, kuid individuaalselt määrata ei saa	-	-
K4 Formiga P 100 printeri ruum 1, materjali lisamine printerisse	õhus ei ole detekteeritavaid lenduvad ühendid	-	-
K5 SLM 280 printeri ruum 3	õhus on detekteeritavad alifaatsed ühendid väikestes kogustes, kuid individuaalselt määrata ei saa	-	-
K6 Metalliprinter – atsetooniga puhastamine	atsetoon 103 \pm 15 ppm	500	-

Allikas: Töökeskkonna keemiliste ... Lisa , autori koostatud

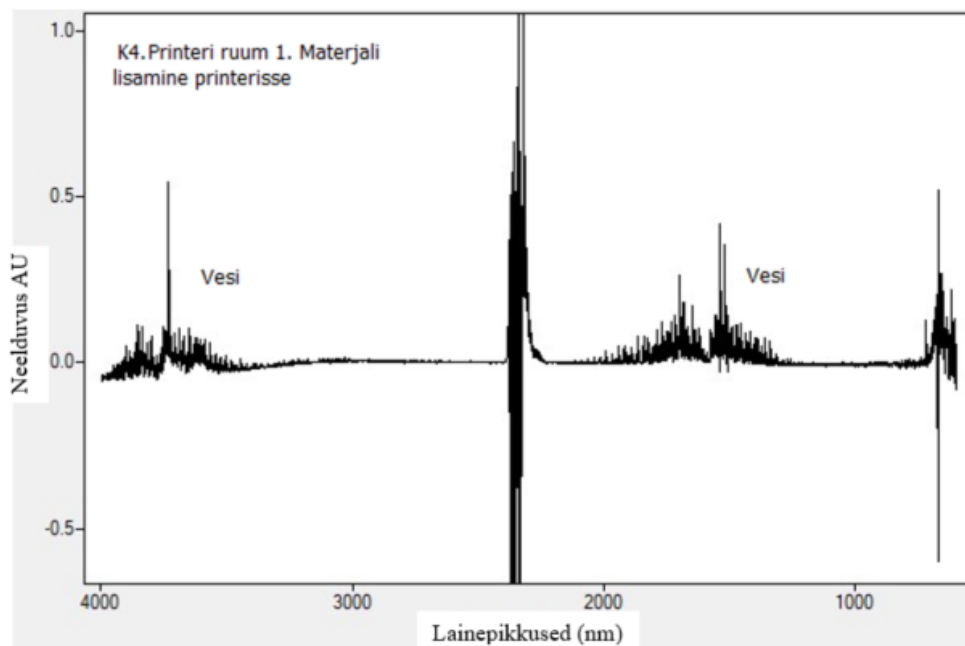
Nagu tabelist näha, siis mõõtmistulemuste korral ei tuvastatud õhus kemikaalide sisaldust Formiga P100 tööruumis. Teiste printerite töötamise ajal tuvastati ruumi õhust kemikaalide sisaldus. Mõõtmisseade ei suutnud tuvastada individuaalseid spektreid. Tegemist on tõenäoliselt spektritega, kus on mitmeid aineid madalas koguses koos. Metallpulbri printeril teostatakse regulaarselt läätse puhastamist atsetooniga. Samuti toimusid mõõtmised atsetooni kasutamise ajal. Seade tuvastas atsetooni ja mõõtmistulemuseks oli 103 ppm. Antud näit moodustab 8h kokkupuute piirnormist 20,6%. Antud sisaldust võib hinnata kõrgeks.

Järgenvates joonistes 23-27 on esitatud mõõtmiste õhuspektrid ja tuvastatud tulemused. Joonisel 23 on kuvatud mõõtetulemus Formiga P100 tööruumis. Mõõtmistulemuste põhjal võib järeldada, et PA 2200 aine kasutamisel printimise ajal ei eraldu õhku kemikaale. Mudeli tootmine toimub kontrollitud keskkonnas, kus plastipulbrit sulatatakse ainult nii palju, kui on vaja mudeli ehitamiseks ning töötlemise ajal ei kasva temperatuur nii kõrgele, kus hakkaksid eralduma kahjulikud ühendid.



Joonis 23. K1 Formiga P100 printeri ruum 1
Allikas: Essential Ftir, autori koostatud

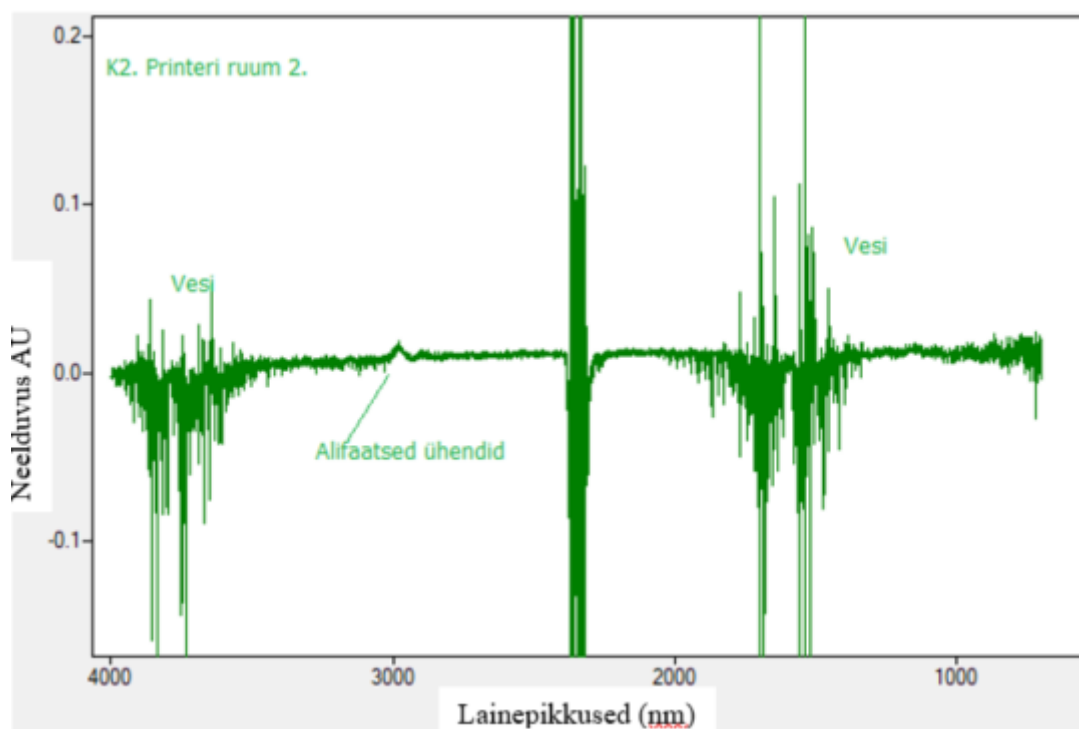
Antud tööruumis korraldi õhus leiduvate kemikaalide mõõtmist lisaks piirkonnas, kus toimub materjalipulbri lisamine seadmesse. Antud kohas tuvastati kõige suurem tolmu kontsentratsioon õhus. Mõõtmistulemus on kuvatud joonisel 24.



Joonis 24. K4 Formiga P100 printeri ruum 1
Allikas: Essential Ftir, autori koostatud

Antud mõõtmine kinnitas, et PA 2200 kasutamisel ei eraldu õhku keemilisi ühendeid ka kuumutamata kujul materjali kasutamisel. Tööandjal täiendavaid meetmeid rakendada ei ole tarvis.

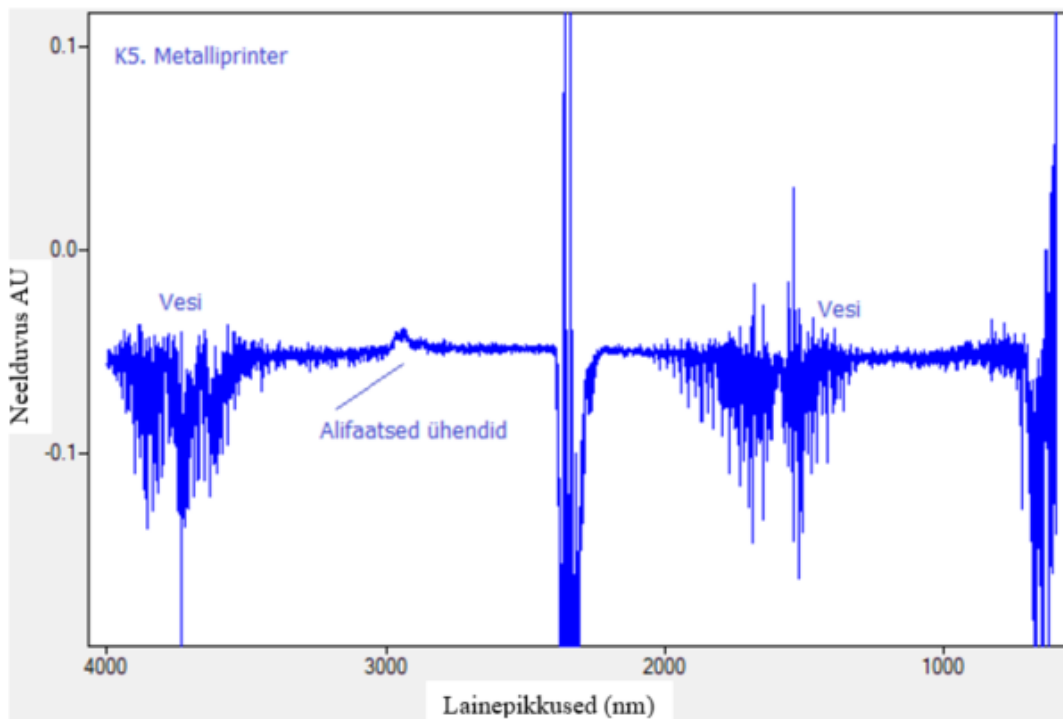
Joonisel 25 on kuvatud mõõtegraafik PLA kasutamisel Leaffrog printeri ruumis.



Joonis 25. K2 Leaffrog printeri ruum 2
Allikas: Essential Ftir, autori koostatud

Antud jooniselt on näha, et mõõteriist on tuvastanud õhus alifaatseid ehk orgaanilisi (Talvari 2006) ühendeid. Antud mõõtmistulemuse põhjal saab järeldada, et Leaffrog seadmega töötades, kasutades PLA materjali eraldub seadmest õhku kemikaale. Eralduv kogus on madal. Samuti ei ole suutnud mõõteseade määrata, millised kemikaalid õhus leiduvad. Loomulikult võib eraldumine olla suurem, kui printitakse suuremaid mudeleid või toimub printimine pikema perioodi jooksul. Kindlasti peab arvestama, et ülikooli õppevahendid ei ole planeeritud pidevaks tootmiseks. Kui, aga laiendada tegevust tootmistegevuseks, kus printimine on põhitegevus ning printereid ruumis on näiteks 50 tükki ja töötajad viibivad 8 tundi päevas töökohal, siis võib tekkida õhus leiduvatest kemikaalidest risk.

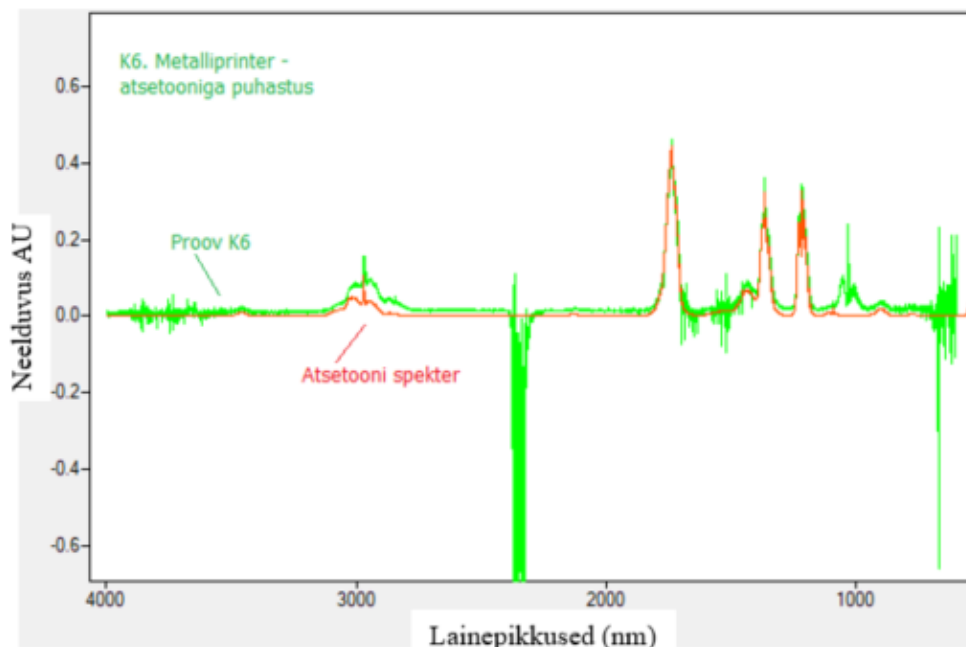
Samuti teostati õhus leiduvate kemikaalide mõõtmised metallpulbrit kasutava printeri SLM 280 tööruumis ning mõõdeti ka tugitegevust. Joonisel 26 on kuvatud õhus sisalduvate kemikaalide mõõtegraafik printimise ajal.



Joonis 26. K5 SLM 280 printeri ruum 3
Allikas: Essential Ftir, autori koostatud

Printeri SLM 280 printimise käigus kasvab töötemperatuur $>1000^{\circ}\text{C}$. Antud temperatuuri juures toimub metalli sulatamine ning sulatamise käigus eralduvad kemikaalid. Kemikaalide sisaldust õhus kinnitab ka mõõtmistulemus. Antud seadme protsess toimub suletud vaakum keskkonnas. Mõõtmistulemuse põhjal võib järeldada, et printimistegevuse käigus siiski eraldub ka töökeskkonda alifaatseid ühendeid. Ka antud mõõtmise puhul on kogus väike ja mõteseade ei suuda tuvastada, millest alifaatsed ühendid koosnevad. Mingis mõttes võib antud tehnoloogia puhul tõmmata paralleele keevitamisega ja keevitamise käigus tekkivate gaasidega. On üldteada fakt, et keevitusgaasid on inimese tervisele kahjulikud ja osad lausa kantserogeensed. Samuti antud printeri kasutamisel tuleb arvestada, et tegemist on pigem õppevahendina kasutatava seadmega. Kui sarnane seade viia tootmiskeskonda, kus toimub printimine pidevalt ja suures mahus mitme seadmega, siis on ka heitkogused õhku hoopis suuremad ja tekitab risk töötajate tervisele.

Metalliprinteri kasutamisel ladestuvad töötlemise käigus laseri läätsele kristallid ja selleks, et laseri töövoime säiliks tuleb läätse regulaarselt puhastada. Puhastamiseks kasutatakse atsetooni. Atsetooni leektäpp on madal ja selle tõttu ka kergesti lenduv (Ohutuskaart 2012). Joonisel 27 on kuvatud kemikaalide mõõtmised atsetooni kasutamisel.



Joonis 27. K6 SLM 280 printeri ruum 3
Allikas: Essential Ftir, autori koostatud

Antud mõõtmise käigus tuvastas mõõtevahend selgelt atsetooni sisalduse õhus. Antud kogus ei ületa piirnormi, kuid lenduvuse tõttu on aine kergesti tuvastatav. Samuti on toodud atsetooni ohutuskaardil, et eralduv aur on ärritav ja võib põhjustada unisust ja peapööritust. Ohutuskaardi põhjal on nõutud ventilatsiooni olemasolu, nitrilkkummist kaitsekindad, mille ohutus kasutamise aeg on >480 minutit ja liibuvad kaitseprillid. Samuti ütleb kemikaali ohutuskaart, et töötajal tuleb vältida aine sattumist nahale. (Ohutuskaart 2012)

4. ETTEPANEKUD TÖÖTERVISHOIU JA TÖÖOHUTUSE PARENDAMISEKS

Teostatud mõõtmistulemused annavad selge tagasiside, et ettevõtetes, kus on kasutusel 3D printerid on töökeskkonnas riskid, mis ohustavad töötajate tervist. On täiesti õigustatud, et EL tasandil on antud valdkonna kohta koostatud *discussion paper* (3D printing ...).

3D printerite kasutamise mõju Eestis on veel raske hinnata. Küll, aga näitab Haigekassa statistika, et töövõimetuspäevade arv on aasta aastalt kasvav (Eesti Haigekassa). See omakorda koormab riigi majandust ning vähendab ettevõtete konkurentsivõimet. Haige töötaja võrdub tegemata tööga. See omakorda tähendab tootmisvõimekuse vähenemist. Riiklikul tasandil õigusaktide ja piirnõrme kehtestamine on õigustatud.

Riiklikul tasemel on töötajate töökeskkonna muutmiseks koostatud nõuded Töötervishoiu ja tööohutuse seaduses. Tööandjal tuleb tuvastatud riskide vähendamiseks esmalt riske vältida ja kui see ei ole võimalik, siis riske vähendada. Samuti suunab seadus tegelema esmalt ühiskaitsemeetmetega ja alles siis isikukaitsevahenditega. (Töötervishoiu ... §6-7)

Mõõtmiste käigus tuvastatud riskid võivad olla omavahel täielikult või osaliselt seotud. Formiga P100 tööruumis kasutatakse tolmuimejat, et tõmmata tööpindade ja seadmete pealt tolmu. Tolmuimeja tööpõhimõte on selline, kus tolmuimeja imetakse mööda toru tolmuimejasse ja peale filtrist läbimist surutakse õhk tolmuimejast välja. See tähendab, et tekitatakse õhuringlus. Kuna tolmuimeja mõõtmistulemused näitasid, et tööruumi õhk sisaldab tolmu, siis tolmuimeja kasutamisel antud ruumis, puhutakse tolmuimejast õhu väljapuhumisega tööpindadele langenud tolmu uuesti õhku. Samuti kaasneb tolmuimeja kasutamisega müra, mille juures on tööandjal kohustus tegeleda müra mõju vähendavate meetmetega. Kõige tervislikum on vältida müra tekkimist, kuid tööpindadele langenud tolmu kokku kogumine pühkimise teel oleks tolmu õhku paiskamise mõttes veelgi ohtlikum. Seega tuleks tolmuimeja paigutada kõrvalruumi ning läbi seina või ukse tuua ainult tolmuimeja voolik. Antud tegevuse juures viiakse müraallikas tööruumist välja ja tavapärasel printimise tegevusel jääb müra oluliselt alla 80 dB(A). Lisaks väheneb tolmuimeja

kõrvalruumi paigutamise ja tolmuimejaga õhku paisatava tolmu hõljumine. Teine võimalus on väljastada töötajale kuulmiskaitsevahendid ning müra töötajale andes kuulmiskaitsevahendeid ei mõju müra töötaja kõrvakuulmisele kahjustavalt. Kuulmiskaitsevahenditeks sobivad nii kõrvatrohid, kui ka kõrvaklapid, mille sumbumistegur on alla 20 SNR.

Kõige akuutsem probleem õhus sisalduva tolmu osas on Formiga P100 tööruum, kus tööandjal tuleb rakendada täiendavaid meetmeid. Tolm paisatakse töökeskkonda lahtise materjali käitlemisel. Vaatluse põhjal võib järeldada, et lahtise materjali käitlemise osa tootmisprotsessist elimineerida ei ole võimalik. Seega tuleb keskenduda ühiskaitsemeetmete tõhustamisele. Mudelite puhastamise laua kohal asub kohtventilatsioon, mida töötajal on võimalik liigutada tolmutööde alasse. Mõõtmistulemuste põhjal ei ole paraku kasutatav kohtventilatsioon väikeses haardeulatuse tõttu piisav. Kõige parema tulemuse annab puhastusala piiramine ehk moodustada töölaust tõmbekapp sarnaselt liivapritsil. Siin võib kujundada kappi selliselt, et kõik küljed on töötlemise ajal suletud ning töötaja teeb tööd kapi külge fikseeritud kinnastega. Teine võimalus on jätta tõmbekapp kolme seinaga ja kapi esine katta läbipaistvate lamellkardinatega, mille vahelt saab operaator tööd teha. Pulbermaterjali doseerimisel printerisse tööala kinni ehitamine ei ole võimalik. Seega tööandja peab lahendama tekkinud riski ühiskaitsemeetmetega. Materjali lisamise töökohale tuleb projekteerida kohtväljatõmbega kuhu, mille kaudu on võimalik töötlemisel eralduv tolmu ära tõmmata. Peale meetmete rakendamist tuleb teostada uued mõõtmised ning võrrelda tulemusi piirnormiga.

Materjali PA2200 ohutuskaardi põhjal tuleb töötajatel vältida tolmu sissehingamist. Antud materjaliga töötades tuleb kanda kaitseprille ja hingamisteede kaitseks respiraatorit. Materjal kuivatab nahka ning pulbrit tuleb nahalt vee ja seebiga maha pesta, samuti regulaarselt kreemitada niiskuse tagamiseks. Materjali ohutuskaardil olev info tuleb tööandjal rakendada. (Safety data ...)

Kindlasti on Formiga P100 tööruumis riskiks seadmest eralduv soojus, mis peale 32 minutit väldanud mõõtmist kasvatas õhutemperatuuri ruumis 6,8°C ja jõudis üle 30°C. Kui seadmega tööaeg oleks terve tööpäeva, siis tõenäoliselt oleks mõõtmistulemus veel kõrgem. Antud seadme soojusisolatsioon on ebapiisav. Töökeskkonnas on tarvis hakata tööruumi jahutama ning optimaalne temperatuur soojal aastaajal on 21 -23°C ja külmal aastaajal 17-20°C. Antud tööruumi tuleb paigaldada konditsioneer, mis hoiab töökoha õhutemperatuuri optimaalsel tasemel. Tabelis 11 on toodud vajalike kulutuste maksumus.

Tabel 11. Tööruumi 1 töökeskkonna orienteeruv investeering eurodes

Seadmed	Hind KM-ta
Kaitseprillid EN166 TU50511	7,50
Respiraator EN149:2001 FFP1V 051085	2,00
Tõmbkapp mudelite puhastamise laua piiramiseks	500,00
Pulbri lisamise alas kohtväljatõmbega kuba koos mootoriga KLS1211M	880,00
Õhukonditsioneer 58m ³ Alpic Air inverter AWI/AWO-50HPDC1E	749,16
Tolmuimeja tööruumist välja viimine	150,00
Kokku orienteeruv maksumus	2288,66

Allikas: Ohutustoodete hinnakiri 2018, Kodukliima, Gastroeesti, autori koostatud

Antud investeering kokkuvõtvalt ei ole suure maksumusega. Kaitseprillide ja respiraatori puhul peab arvestama, et tegemist on kuluartikliga, mis tuleb kaitsevahendi aegumise korral vahetada välja uute vastu.

Tööruum 2, milles toimub töö printeriga Leapfrog, ilmnesid samuti riskina liigselt kõrge õhutemperatuur juba enne printimisprotsessi algust. Printimise protsessi enda käigus soojuseraldumist ruumi ei täheldatud, kuid töökeskkonna seisukohast ei ole õhutemperatuur sobiv pikaajaliseks tööks. Ka antud tööruumi tuleb paigaldada konditsioneer ning hoida õhutemperatuuri optimaalses vahemikus soojal aastaajal 21 -23°C ja külmal aastaajal 17-20°C vahel.

Õhus sisalduvate kemikaalide mõõtmisel tuvastas mõõtevahend, et PLA printimisel eraldub alifaatseid ühendeid. Ruumis on kasutusel, võrreldes teiste printeritega, suhteliselt väike printimisseade ning eralduvad ühendid hajuvad õhus. Sarnased uuringud, mis on kirjeldatud magistritöö esimeses peatükis, on toonud samuti välja, et PLA kasutamisel eraldub emissioone. Samas uuringus tuuakse ära, et kasutades toorainena ABS, siis on emisiooni eraldumine märgatavalt suurem. Ka magistritöö raames vaadeldud seadmega on võimalik kasutada ABS toorainet. Kindlasti tuleb seadmega töötades kasutada sundventilatsiooni ning teostada täiendavaid mõõtmisi kemikaalide sisalduse kohta töökeskkonna õhus. Soovitav on kanda töötajal seadmega töötades filtermaski orgaaniliste aurude vastu. Tabelis 12 on toodud vajalike kulutuste maksumus.

Tabel 12. Tööruumi 2 töökeskkonna orienteeruv kulu eurodes

	Hind KM-ta
Sundventilatsiooni rakendamine Vents VUT kuni 300 m ³ /h	662,50
Õhukonditsioneer 72m ³ Alpic Air inverter AWI/AWO-70HPDC1C	982,50
Kokku orienteeruv maksumus	1645,00

Allikas: Kodukliima, Gastroeesti, autori koostatud

Ka antud tööruumi investering ei ole suur. Labori mõistes on samas ruumis kasutusel ka muid seadmeid ja investeeringu summat on võimalik viia allapoole paigutades printimisseade väiksemasse tööruumi.

Tööruum 3, milles kasutatakse toorainena metalli pulbreid, tunduvad olevat ehitatud rohkem töötajasõbralikena, sest mõõtmiste käigus väga suuri mikrokliima parameetrite muutusi ei tuvastatud. Kuid kindlasti saab välja tuua, et tööruumi üldine temperatuur oli kõrgem, kui on optimaalne vahemik. Ka tööruum 3 tuleb kohandada ümber tootmistegevuseks ning tootmiskeskonda tuleb paigaldada õhukonditsioneer, mis jahutab ja hoiab ruumi temperatuuri optimaalses vahemikus soojal aastaajal 21-23°C ja külmal aastaajal 17-20°C vahel.

Õhus sisalduvate kemikaalide mõõtmine tõi välja, et seadme tugitegevus, milleks on atsetooniga laseri läätse puhastamine, moodustab näit 20,6 % piirnormist. Antud kokkupuute näit on kõrge. Atsetoon on madala leektäpiga ja kergesti lenduv, mis tähendab, et töötaja kontakt atsetooniga töötades on kaitsemeetmetena vältimatu. Atsetooniga puhastamistöid tohib teha tõmbekapis, mille jaoks tuleb tööruumi rajada tõmbekapp, mille ventilatsiooni mootor on mõeldud plahvatusohtlike gaaside keskkonda. Teine võimalus on töötajale eraldada filtermask orgaaniliste aurude vastu.

Atsetooni ohutuskaart ütleb, et töötaja tohib järjest töötada atsetooniga kuni 2 tundi, kandes samal ajal orgaaniliste gaaside filtrit A2. Lisaks peab töötaja kandma nitriliumist kindaid, mille kasutamisaeg on kuni 480 minutit. Töötajal peavad olema ees tihedalt istuvad kaitseprillid ning töötamise ajal peab töökohal olema silmade pesemise võimalus. (Ohutuskaart 2012)

Tabelis 13 on toodud vajalike kulutuste maksumus tööruumis 3. Investeeringu summa poolest on tegemist kõige suurema summaga, kuid ka selle investeeringu juures on peamine kulu tingitud ruumi jahutamisest. Antud ruum võib seadme vajadusest lähtuvalt võib tööruum olla oluliselt väiksem ning see viiks alla ka investeeringu maksumust.

Tabel 13. Tööruumi 3 töökeskkonna orienteeruv kulu eurodes

	Hind KM-ta
Õhukonditsioneer 180m ³ 3xAlpic Air inverter AWI/AWO-70HPDC1C	2947,50
Tõmkapp	500
Filtermask 3M 6002 poolmask ja A2P2 filtrite komplekt T6002C	48,33
Kaitseprillid EN166 UV360 FT1 TU6X100	26,67
Nitriilkindad EN388 (3.1.3.2) 44-710	7,42
Kokku orienteeruv maksumus	3529,92

Allikas: Ohutustoodete hinnakiri 2018, Kodukliima, Gastroesti, autori koostatud

Kokkuvõtvalt võib järeldada tehtavate investeeringute osas on mõistlik vaadata tootmiskeskonda lähtuvalt seadmetest ja tehnoloogiast ning vastavalt sellele ehitada või kujundada tootmisruumid. Vaadata tuleb tervikuna toimivat tootmist. Tõenäoliselt ei ole tarvis teha hiljem täiendavaid investeeringuid või kulutada investeeringuteks rohkem raha kui töökeskkond on planeeritud juba seadmete või tehnoloogia soetamise käigus.

Elektromagnetväljade ekspositsiooni vähendamiseks tuleb vaadata eraldi elektrivälja ja magnetvälja. Elektrivälja tase on madal ja välja vähendamine pole vajalik. Magnetväli on olemas, kuid moodustas piirnormist tühise osa. Samas peab tööandja vähendama töötaja ekspositsiooni miinimumini, mistõttu peaks hoidma distantsi. Lähtuvalt mõtetulemustest, mitte olla seadme vahetus läheduses (<50cm) seadme töös olles. Tööandja peab informeerima töötajat tugevamate magnetväljaallikate asukohtadest. Kõige parem on seda teha joonisplaani abil. Samas sobib ka minimaalne nõutav ja soovituslik distants seadme või selle osade suhtes.

KOKKUVÕTE

Tootmisettevõtete töökeskkond on aegade jooksul muutunud järjest enam töötajaga arvestatavaks ning võib julgelt väita, et teadmiste põhine juhtimine, insenertehnilised lahendused, riiklikud õigusaktid ja töötajate teadlikus töökeskkonnas valitsevatest riskidest on pannud paljud ettevõtted tegelema töökeskkonna juhtimisega (Kim *et al.* 2016, 89).

Maailmas toimuvad tehnoloogilised muutused järjest kiiremini ja seda ka tootmistegevustes. Viimasel kümnendil on jõudsalt arenenud kihtlisandustehnoloogia, mis tõenäoliselt saab muutma tänaseid ärimudeleid ja tootmisprotsesse. Kuid nii, nagu uute asjadega ikka, tegelevad algselt nendega peamiselt entusiastid. Kihtlisandustehnoloogia on aga peale piiravate patentide aegumist teinud läbi vägagi mastaapsed kasvud ning uue tehnoloogia tulekuga on tekkinud juba ka arusaam, et töökeskkonnas tekivad ka riskid, mida siiani ei osatud tähele panna.

Magistritöö eesmärk oli tuvastada TalTech-is kasutatavate 3D printerite näitel töökeskkonna riske ja leida lahendusi tuvastatud riskide ohjamiseks. Et eesmärki täita, püstitas autor järgmised uurimisküsimused:

- 1) Kas 3D printerite kasutamisel tekivad ohutegurid, mida tuleb töökeskkonnas ohjata?
- 2) Kui suur on antud ohuteguritega kokkupuude ning kas see võib olla oluline risk töötaja tervisele?
- 3) Kas majanduslikult on mõistlik töökeskkonna riske ohjata?
- 4) Milliseid lahendusi saab pakkuda tuvastatud ohuteguritest tulenevate riskide ohjamiseks?

Töö käigus leidsid käsitlemist kõik küsimused. Teostatud mõõtmistulemused annavad selge tagasiside, et ettevõtetes, kus on kasutusel 3D printerid on töökeskkonnas riskid, mis ohustavad töötajate tervist. Magistritöös valmisid ettepanekud, mida tuleb rakendada kihtlisandusprinterite kasutamisel TalTech laboriruumides.

Magistritöö koosnes neljast osast. Töö esimeses osas keskendus autor tehnoloogia selgitamisele ning varasemalt toimunud uuringute leidude välja toomisele kihtlisandustehnoloogiate

kasutamisel. Teises peatükis kirjeldas autor vaadeldavaid seadmeid ning mõõtmiste metoodikat. Kolmandas peatükis tõi autor välja mõõtmistulemused ja töö neljas peatükk keskendus tuvastatud riskide põhjal ettepanekutele, millega tööandja saab riske vähendada või kõrvaldada.

Magistritöö raames teostati mõõtmised erinevatel tööpõhimõtetel töötavate seadmete töötamise ajal. Vaatlusobjektideks olid plastipulbril kihtlisandustehnoloogia, metallipulbril kihtlisandustehnoloogia ja sulatatud plasti kasutamisel kihtlisandustehnoloogia. Seadmete juures ja seadmete töökeskkonnas teostati:

- 1) mikrokliima mõõtmised (õhutemperatuur, suhteline niiskus ja süsinikdioksiidi sisaldus);
- 2) müra mõõtmised;
- 3) elektromagnetväljade mõõtmised;
- 4) tolmu sisaldus töökeskkonna õhus;
- 5) kemikaalide sisaldus töökeskkonna õhus.

Teostatud mõõtmiste tulemustel tuvastati ka näite, mis olid piinormide lähedal ja otsesed riskid printeritega töötajatele. Samuti selgus, et töökeskkonnas olev õhutemperatuur oli kõigis kolmes tööruumis üle optimaalse vahemiku. Kõige suuremat ohtu kujutavad endast kindlasti keemilised ohutegurid. Kõige rohkemate riskidega on Formiga P100 kihtlisandusprinter ja printeri tööruum ning kasutatavad tugiseadmed.

Teostuse poolest kõige keerulisemad muutused tuleb läbi viia just tööruumis 1, kus tuleb:

- 1) eraldada töötajale kaitseprillid ja hingamisteede kaitseks respiraator;
- 2) mudeli puhastamise laud piirata tõmbkapiga;
- 3) pulbermaterjali lisamise alasse printeri kohale rajada kohtväljatõmbega kubu;
- 4) paigaldada tööruumi õhukonditsioneer, et tagada optimaalne töökeskkond soojal aastaajal 21 -23°C ja külmal aastaajal 17-20°C vahel;
- 5) viia tolmuimeja tootmisruumist välja;
- 6) peale tegevuste läbiviimist teostada uued mõõtmised.

Tööruumis 2 tuleb:

- 1) seadmega töötamise ajal rakendada sundventilatsiooni;
- 2) paigaldada tööruumi õhukonditsioneer, et tagada optimaalne töökeskkond soojal aastaajal 21 -23°C ja külmal aastaajal 17-20°C vahel;
- 3) teostada täiendavaid uuringuid.

Tööruumis 3 tuleb:

- 1) paigaldada tööruumi õhukonditsioneer, et tagada optimaalne töökeskkond soojal aastaajal 21-23°C ja külmal aastaajal 17-20°C vahel;
- 2) atsetooniga töötamiseks tuleb rajada tõmkapp või eraldada töötajale orgaaniliste gaaside filtermask A2, tihedalt liibuvad kaitseprillid ja nitrilkindad;
- 3) teostada täiendavaid uuringuid.

Läbiviidud mõõtmised TalTech labori töökeskkonnas näitasid, et töökeskkonnas esinevad riskid, millega tööandja peab tegelema. On oluline, et seadmete soetamisel arvestatakse ka töökeskkonnaga ja seadmetele luuakse kasutamiseks sobiv töökeskkond. Kuna kihtlisandustehnoloogiad on rohkem jõudmas töökeskkondadesse, siis tuleb riskide kaardistamiseks ja riskide vähendamise meetmeteks viia läbi täiendavaid uuringuid.

SUMMARY

WORKING ENVIRONMENT RISKS FOR USING ADDITIVE LAYER TECHNOLOGIES ON PRODUCTION BASED ON THE EXAMPLE OF THE TALTECH LABORATORY

Margus Veide

Working environment of industrial companies has undergone and is undergoing substantial changes. One can state that companies are investing more and more into work safety and working environment, which, in turn, has created beneficial conditions for reducing professional diseases resulting from working environment. Management of occupational safety and hygiene in companies helps reduce working environment risks. Knowledge-based management, engineering solutions and the deployment of a safety culture in companies that care for employees have contributed significantly to positive development. (Kim *et al.* 2016, 89)

However, new health risks have emerged in working environments in the present century that have been ignored so far. New technologies, accompanied with new risks in working environment, have been introduced.

Over the last decade, 3D printers based on additive layer technology have been gaining popularity. It is a case of development of 3D processing as a completely new production process. Until recently we used to look at manufacturing processes in a way where excessive raw material pieces are removed from raw material, and finished parts are combined into a suitable model. Instead, the additive layer technology approaches production in a new production process. Namely, the 3D model is produced by powder printing on 2D layers, where raw material is only used to form a model. The new technology alters today's business models and production activities.

The range of available printers has evolved over the years. The technologies offered as well as the price levels of the equipment are variable. In the years of 2011 – 2014, the number of services

related to 3D printers and printer-related services grew by 33%. The expiry of patents previously in force gave rise to a rapid technological progress. (Stansbury, Idacavage 2016, 55)

While earlier 3D printers mainly existed for enthusiasts, then the rapid development of technology has created opportunities for the use of printers for very different target groups. Certainly, today's manufacturing companies will continue to manufacture based on the new technology, but in addition, due to cheap level of prices, printers are expected to become widely spread at homes of people who want to start their small-scale business. (3D printing ... 2017)

Technological advances are always welcome, though often new technologies tend to come at the expense of something else. Primary work environment studies concerning the use of 3D printers have found that new technology creates risk factors in work environment. Given that, production of, e.g., raw metal took place in metal plants, then with the advent of the additive layer technology devices, metallurgic plant in practice has entered cabinets, production facilities and people's homes. On the risk side of the working environment, the new technology is still relatively unknown.

Occupational safety and hygiene management in enterprises helps to reduce occupational risks. When ordinary industrial environment structures are reviewed, the general rule is that the manufacturer of technology supplies the equipment and the builder constructs buildings or premises. Frequently the situations arise where the builder and the manufacturer of the equipment do not know expectations or requirements of each other, which may result in the working environment that is dangerous or unhealthy for employees.

The purpose of the Master's thesis is to identify the risks of the working environment on the example of 3D printers in use at the TalTech; to analyse the risks identified; to use existing legislation and regulations for the analysis of measurement results and compare the measurement results with existing limit values. At the end of the Master's thesis, the author outlines solutions aimed at the management of the identified risks.

This Master's thesis is compiled in four chapters. Chapter 1 is divided into three subchapters, the first of which concentrates on the formation of the additive layer technology. The next subchapter gives an overview of the available additive layer technologies and the technologies considered by

the author. In the third part of Chapter 1, the author provides an overview of the earlier studies of 3D printer work environments and the risks identified.

Chapter 2 of the Master's thesis focuses on the review of the research. The author reviews the equipment under investigation and the methodology of the measurements carried out.

In Chapter 3 of the Master's thesis the author outlines the obtained measurement results and compares them with the established limits, giving his own interpretation on the risks identified.

In Chapter 4 of the Master's thesis, the author sets forth measures for reduction of risks.

As part of this Master thesis, measurements were made while the equipment was operating on different operating methods. The objects of observation were plastic powder additive layer technology, metal powder additive layer technology and additive layer technology based on the use of fused plastic. The following were performed at the equipment and in the operational environment of the equipment:

- 1) microclimate measurements (air temperature, relative humidity and content of carbon dioxide);
- 2) noise measurements;
- 3) measurements of electromagnetic fields;
- 4) dust content in the working environment air;
- 5) chemical content in the working environment air.

The results of the measurements carried out also revealed the examples close to the limit values and direct risks to employees who work with printers. In addition, it became clear that the ambient temperature in the working environment of all three work rooms was above the optimal range. The most serious risk is certainly related to the chemical risk factors. At most risks, is the Format P100 additive layer printer; the printer's working room and the support equipment used.

The measurements carried out in the working environment at the Institute of Mechanics and Industrial Technology of Tallinn University of Technology confirm the existence of the occupational exposures, which the employer must deal with. It is important that acquisition of the equipment should also take into the account the working environment and the suitable operating environment should be created for the equipment. Since additive layer technologies are

increasingly reaching working environments, further research needs to be carried out with the aim of mapping the risks and decreasing the risks.

KASUTATUD ALLIKATE LOETELU

Afshar-Mohajer, N., Wu, C., Ladun, T., Rajon, D. A., Huang, Y. (2015). Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer. – *Building and Environment*, Vol. 93, No. 2, 293-301.

Annual Statistic. European Comparisons. (2018). Health and Safety Executive. Kättesaadav: <http://www.hse.gov.uk/statistics/european/european-comparisons.pdf>, 31.märts.2019.

Eesti Haigekassa majandusaasta aruanne 2018.

EUROSTAT. (2019) tec0001: Gross domestic product at market prices (table) [Online] <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=en&pcode=tec00001>, (11.mai 2019).

Euroopa Komisjon. (2017) Komisjoni teatus Euroopa parlamendile, nõukogule, Euroopa majandus- ja sotsiaalkomiteele ning regioonide komiteele. Ohutumad ja tervislikumad töötingimused meile kõigile – ELi tööohutuse ja tervishoiu poliitika ajakohastamine. Brüssel, 10. jaanuar 2018.

Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrus (EÜ) NR 1907/2006, 18. detsember 2006, mis käsitleb kemikaalide registreerimist, hindamist, autoriseerimist ja piiramist (REACH) ning millega asutatakse Euroopa Kemikaaliamet, muudetakse direktiivi 1999/45/EÜ ja tunnistatakse kehtetuks nõukogu määrus (EMÜ) nr 793/93 ja komisjoni määrus (EÜ) nr 1488/94 ning samuti nõukogu direktiiv 76/769/EMÜ ja komisjoni direktiivid 91/155/EMÜ, 93/67/EMÜ, 93/105/EÜ ja 2000/21/EÜ, 29.5.2007.

EVS-EN 15251:2007 Sisikeskkonna algandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast. Eesti rahvuslik lisa standardile. *EVS Teataja*, 2010.

EVS-EN 15251:2007 lisa EVS 916:2012 Sisikeskkonna algandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast. *EVS Teataja*, 2012.

Gastroeesti ventilatsiooni kubud. Gastroeesti. Kättesaadav: <https://gastroeesti.ee/toode/box-cover-1-2-m-with-motor-controller-filter-and-lamp/>, 11. mai.2019.

ILO-OSH. (2001) Guidelines on occupational safety and health management systems. Geneva: *International Labour Office*, 1-40.

Kim, Y., Park, J., Park, M. (2016). Creating a Culture of Prevention in Occupational Safety and Health Practice – *Safety and Health at Work*, Vol. 7, 89-96.

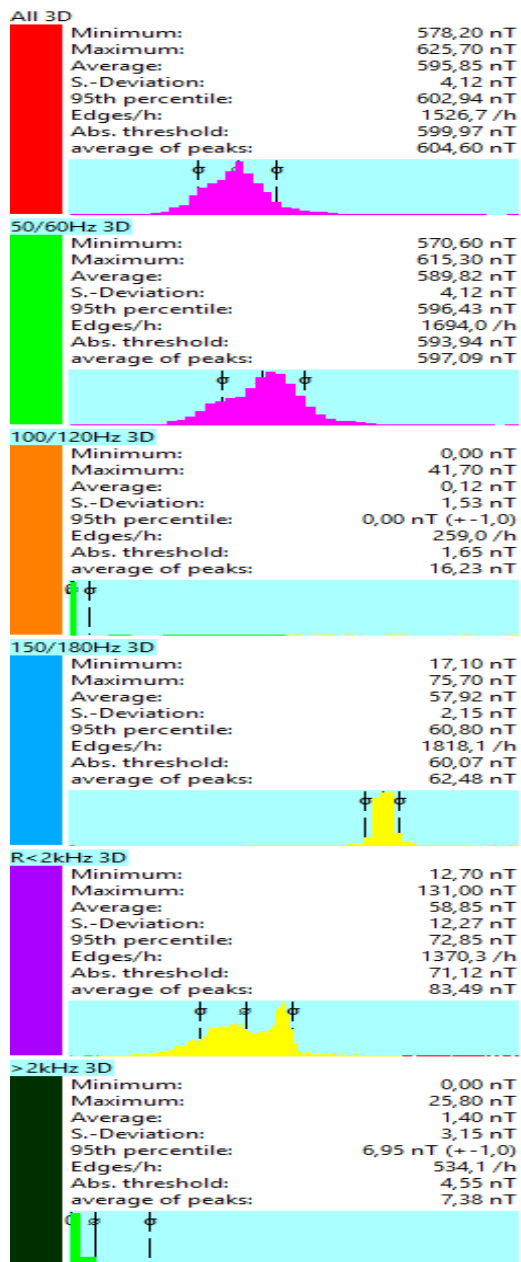
- Kodukliima tooted*. Kodukliima. Kättesaadav: https://www.kodukliima.ee/Alpic_Air_inverter/, 11. mai 2019.
- Koppel, T. Töökeskkonna- ja tööohutuse uurimisrühma teadlane. Autori intervjuu. Intervjueerija märkmed. 11.juuni.2018.
- Leapfrog Creatr HS Datasheet V01-05.
- Material data sheet. Ti-Alloy TiAl6V4 ELI (Grade 23) / 3.7165 / B348 / F136. 2018.
- Material data sheet PLA. *EOS GmbH*. 28.02.2017.
- Mitteioniseeriva kiirguse piirväärtused elu- ja puhkealal, elamutes ning ühiskasutusega hoonetes, õpperuumides ja mitteioniseeriva kiirguse tasemete mõõtmine. *RTL* 2002, 40, 563.
- Mishra, S. (2013). Helping additive manufacturing „learn“. – *Metal Powder Report*, Vol. 68, No. 4, 38-39.
- Ohutuskaart. Atsetoon. 20.04.2012
- Ohutuskaart. Lämmastik, kokkusurutud. Variant 1.0. 14.08.2017.
- Pohlak, M. Mehaanika ja tööstustehnika instituudi vanemteadur. Autori intervjuu. Intervjueerija märkmed. 10.mai.2018.
- Realizer SLM-50. 2009.
- Riigi Teataja. Kättesaadav: https://www.riigiteataja.ee/otsingu_tulemus.html?sakk=kehtivad&otsisona=kemikaal, 04.mai.2019.
- Rünkla, E. (2013). Tööõnnetusega seotud kulutused. *Sotisaalministeerium*. Kättesaadav: https://www.sm.ee/sites/default/files/content-editors/Ministeerium_kontaktid/Valjaanded/teemaleht_toonnetusega_seotud_kulutused_1.pdf, 22.märts.2018.
- Safety data sheet. Fine Polyamide PA 2200. 06.12.2007.
- Selective Laser Melting Machine SLM 280 2.0. 2012.
- Sisemajanduse koguprodukt turuhindades.
- Soon, A. (2010). Tervist edendavad töökohad. Mis need on ja kuidas neid saavutada? *Tervise Arengu Instituut*. Kättesaadav: https://intra.tai.ee/images/prints/documents/130451521339_Tervist_edendavad_tookohad_est.pdf, 11. mai.2019.
- Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies^{1,2}. (2011). F2792-12a: United States. – *ASTM International*. 1-3.

- Stansbury, W. J., Idacavage, J. M. (2016). 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. – *Dental Materials*, Vol. 32, No. 1, 54-64.
- Stefaniak, A. B., LeBouf, R. F., Duling, M. G., Yi, J., Abukabda, A. B., McBride, C. R., Nurkwicz, T. R. (2017). Inhalation exposure to three-dimensional printer emissions stimulates acute hypertension and microvascular dysfunction. – *Toxicology and Applied Pharmacology*, Vol. 335, 1-5.
- Stephens, B., Azimi, P., Orch, Z. E., Ramos, T. (2013). Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. – *Atmospheric Environment*, Vol. 79, 334-339.
- Talvari, A. (2006) *Orgaaniline keemia: õppematerjal*. Kättesaadav: http://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/16255/Orgaaniline_keemia.pdf, 24.aprill.2019
- Tamrex Ohutuse OÜ ohutustoodete hinnakiri 2018.
- Technical Description FORMIGA P 100. 16.04.2007.
- Tervisekaitsenõuded koolidele. RT I, 28.08.2013, 10.
- Töötervishoiu ja tööohutuse seadus. RT I, 13.03.2019, 177.
- Töötervishoiu ja tööohutuse nõuded mürast mõjutatud töökeskkonnale, töökeskkonna müra piirnormid ja müra mõõtmise kord¹. RT I, 05.12.2018, 12.
- Töökeskkonna keemiliste ohutegurite piirnormid¹. RT I, 06.03.2018, 11.
- Töötervishoiu ja tööohutuse nõuded elektromagnetväljadest mõjutatud töökeskkonnale, elektromagnetväljadega kokkupuute piirnormid ja rakendusväärtused ning elektromagnetväljade mõõtmise kord¹. RT I, 05.12.2018, 11.
- United States Patent. Patent Number 4,575,330. 11.03.1986.
- User Manual Creatr HS. Leapfrog BV.
- Vehviläinen, T., Lindholm, H., Rintamäki, H., Pääkkönen, A. H., Nimei, O., Vinha, J. (2016). High indoor CO₂ concentrations in an Office environment increases the transcutaneous CO₂ level and sleepiness during cognitive work. - *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, Vol. 13, No. 1, 19-29.
- WHO: *Number of new cases of occupational diseases*. Kättesaadav: https://gateway.euro.who.int/en/indicators/hfa_453-4041-number-of-new-cases-of-occupational-diseases/visualizations/#id=19488&tab=graph, 31.märts.2019.
- Wohlers, T., Gornet, T. (2014). *History of additive manufacturing*. Kättesaadav: <https://wohlersassociates.com/history2014.pdf>, 04.mai.2019.
- Zhou, Y., Kong, X., Chen, A., Cao, S. (2015). Investigation of Ultrafine Particle Emissions of Desktop 3D Printers in the Clean Room. – *Procedia Engineering*, Vol. 121, 506-512.

3D printing and additive manufacturing – the implications for OSH. European Agency for Safety and Health at Work. Discussion paper. Kättesaadav:
<https://osha.europa.eu/en/tools-and-publications/publications/3d-printing-new-industrial-revolution/view> , 18. veebruar 2018.

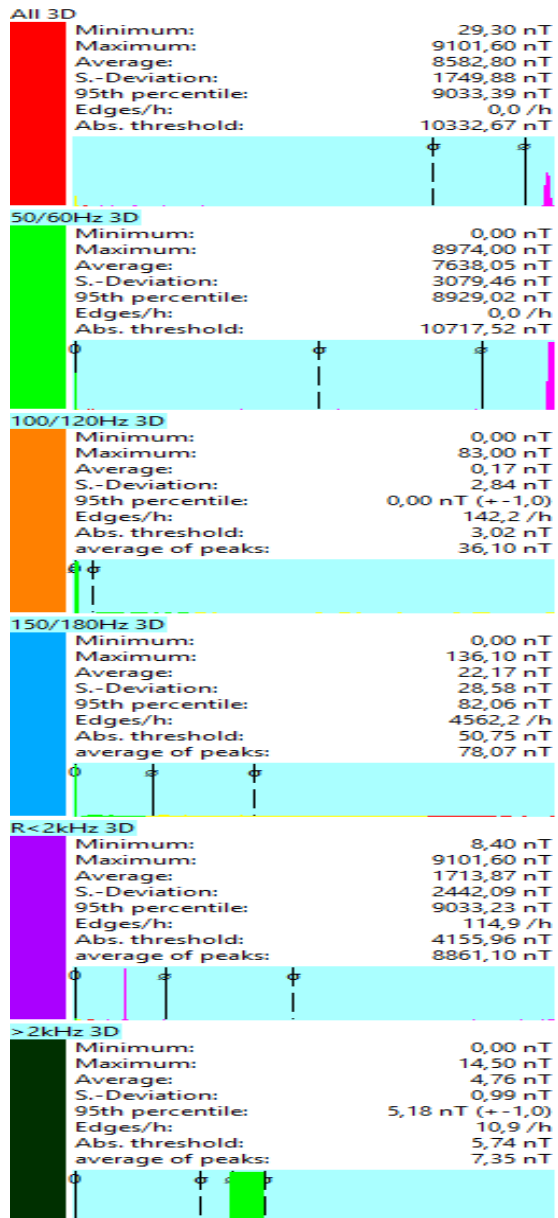
LISAD

Lisa 1. Formiga P100 sagedusvahemike magnetvälja (nT) amplituudi kestusmõõtmine



Allikas: NFA 400 3D-NF-Analyser

Lisa 2. SLM 50 sagedusvahemike magnetvälja (nT) amplituudi kestusmõõtmine



Allikas: NFA 400 3D-NF-Analyser

