

Kirill Tarassov

**PRAAGI VÄHENDAMISE VÕIMALUSED  
3D LÕIKEPEAGA LASERPINGI  
KASUTAMISEL ETTEVÕTTES WELDMET  
SOLUTION OÜ**

LÕPUTÖÖ

Tehnoloogia ja ringmajanduse instituut  
Tootmise juhtimine ja digitaliseerimine  
Juhendaja: Anna Truver, *Msc*

Mõdriku 2026

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Kirill Tarassov

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Praagi vähendamise võimalused 3D lõikepeaga laserpingi kasutamisel Weldmet Solution OÜ näitel

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

### **Autorideklaratsioon**

Mina, Kirill Tarassov

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

Juhendaja Anna Truver

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	5
1. TEOREETILINE KÄSITLUS: PRAAGI VÄHENDAMINE JA SEADME TÖÖKINDLUS .....	7
1.1 Laserpingi ja 3D lõikepead tootmises .....	7
1.1.1 3D lõikepea tööpõhimõtte ja eripära .....	8
1.1.2 2D ja 3D lõikepeade võrdlus.....	9
1.2 Kvaliteedi mõjutegurid lõikeprotsessis .....	11
1.2.1 Lõikeprotsessi parameetrid ja seadistus.....	11
1.2.2 Materjali omadused ja nende mõju lõikekvaliteedile .....	12
1.3 Praagi olemus ja tekkepõhjused .....	13
1.3.1 Praagi liigid tootmises .....	14
1.3.2 Praagi tekkepõhjused 3D lõikeprotsessis .....	15
1.4 Kvaliteedi ja töökindluse tagamine tootmissüsteemis.....	16
1.5 Lean-põhimõtted ja tootmise pidev parendamine .....	16
1.5.1 5S ja töökoha korrastatus.....	17
1.5.2 TPM ja seadmete ennetav hooldus .....	18
1.5.3 Põhjuse-tagajärg diagramm (Ishikawa diagramm).....	18
2 HETKEOLUKORRA ANALÜÜS ETTEVÕTTES WELDMET SOLUTION OÜ .....	20
2.1 Uurimistöö meetodid ja strateegia .....	20
2.2 Ettevõtte tutvustus.....	20
2.3 3D lõikepeaga laserpingi kirjeldus ja tehnilised andmed .....	21
2.4 Lõikeprotsessi töövoog ja osalised .....	22
2.5 Praagi tekkepõhjused ja kordumustrite tuvastamine .....	23
2.6 Töötajate intervjuude kokkuvõte .....	25
2.7 Põhjuse-tagajärg diagrammi koostamine .....	26
2.8 Probleemi määratlemine ja analüüsi tulemused.....	27
3 PARANDUSMEETMED JA PRAAGI VÄHENDAMINE .....	30
3.1 Rakendatud Lean tööriistad .....	30
3.2 Praagi jälgimine ja mõõtmise tulemused .....	30

3.2.1	Seinte paksuse mõju tulemusele.....	32
3.2.2	Profiili sirguse mõju tulemusele .....	32
3.3	Uued töövõtted ja seadistuste täpsustamine.....	33
3.4	Lahenduseettepanekud praagi ennetamiseks.....	34
3.5	Rakendatud muudatuste mõju analüüs .....	37
3.6	Järeldused ja soovitused edaspidiseks .....	38
KOKKUVÕTE .....		40
SUMMARY.....		42
VIIDATUD ALLIKAD.....		44
LISA 1. TÖÖTAJATE KÜSIMUSTIK JA VASTUSED .....		46
LISA 2. TOOTMISJUHI KÜSIMUSTIK JA VASTUSED .....		48

## SISSEJUHATUS

Lõputöö teemaks on 3D lõikepeaga laserpingi praagi analüüs ja selle vähendamise võimalused tootmisettevõttes Weldmet Solution OÜ. Teema valik tuli soovist uurida tootmist keskkonnas, kus valmistatakse metalloosi. Eesmärk oli paremini mõista, kuidas tootmise efektiivsus ja kvaliteet omavahel seotud on. Idee teha uurimistöö suuremas tootmisettevõttes tekkis tänu koolikaaslasemale, kes töötas ettevõttes, kus hiljuti võeti kasutusele uus 3D torulõikepink Nukon NK-T125. Kuna see seade on ettevõtte jaoks uus ja tööprotsessid alles kujunevad, oli see hea võimalus uurida lähemalt laserlõikuse kvaliteeti ja praagi tekkepõhjuseid. Teema tundus praktiline, ajakohane ja kasulik nii ettevõtte seisukohalt kui ka minu enda erialase arengu mõttes.

Lõputöö eesmärk on välja selgitada 3D lõikeprotsessis tekkiva praagi peamised põhjused ja pakkuda välja võimalusi nende ennetamiseks. Eesmärgi saavutamiseks analüüsitakse praagi tekkimist mõjutavaid tegureid, tööprotsessi korraldust ning seadme seadistamisega seotud eripärasid. Töö fookuses on leida praktilised lahendused, kuidas vähendada praaki ja parandada lõikeprotsessi kvaliteeti.

Uurimistöö käigus oli viidud läbi küsimustik ettevõtte Weldmet Solution OÜ laserpingi operaatoritega ja tootmisjuhiga, et koguda praktilist teavet 3D lõikeprotsessi käigus esinevate probleemide ja praagi tekkepõhjuste kohta. Saadud vastuseid kasutatakse parendusettepanekute koostamisel ja töö empiirilises osas andmete analüüsimisel.

Töö uurimisülesanded on järgmised:

1. Koguda ja analüüsida teoreetilist materjali laserlõikuse, kvaliteedijuhtimise ja praagi olemuse kohta.
2. Kirjeldada uuritavat ettevõtet ja selle kasutuses olevat 3D lõikepingi tehnoloogiat.
3. Viia läbi intervjuu küsimustiku vormis, et koguda teavet 3D lõikeprotsessi probleemide ja praagi tekkepõhjuste kohta.
4. Selgitada välja praagi tekkepõhjused 3D lõikeprotsessis ning analüüsida kordumustreid.
5. Pakkuda välja parendusettepanekud ja meetmed praagi vähendamiseks tulevikus.

Lõputöö struktuur koosneb kolmest peatükist. Esimene peatükk käsitleb teoreetilist tausta, kus antakse ülevaade laserpingi tööpõhimõttest, lõikeprotsessi kvaliteeti mõjutavatest teguritest ja praagi olemusest. Teises peatükis tutvustatakse uuritavat ettevõtet ja

kirjeldatakse kasutatavat 3D lõikepingi tehnoloogiat, ning analüüsitakse praagi tekkepõhjuseid ja esitatakse kogutud andmete põhjal tehtud järeldused. Kolmandas peatükis tehakse analüüs ja selle põhjal koostatakse parendusettepanekud ning antakse soovitused edaspidiseks, et vähendada praagi osakaalu ja tõsta tootmise kvaliteeti.

# 1. TEOREETILINE KÄSITLUS: PRAAGI VÄHENDAMINE JA SEADME TÖÖKINDLUS

## 1.1 Laserpingi ja 3D lõikepead tootmises

Laserpingid on tänapäeva tootmises laialdaselt kasutusel, kuna need võimaldavad lõigata metalle väga täpselt, kiiresti ja väikese energiakuluga. Laserlõikus sobib eriti hästi materjalidele, mis vajavad puhtaid servasid ja minimaalset järelviimistlust. Kuna lõikamine toimub laserkiire abil, mitte mehaanilise kontaktiga, on seadme kulumine väike ja töö täpsem. Sellest on saanud paljudes metalliettevõtetes üks olulisemaid tehnoloogiaid mida kasutatakse töös [1].

Laserpingid võib üldiselt jagada kaheks: 2D-lõikepingid ja 3D-lõikepingid.

- 2D-lõikepink on mõeldud lehtmaterjali töötlemiseks, kus lõiked tehakse kahes tasapinnas (X ja Y). Seda tüüpi masinad sobivad hästi detailide jaoks, mille kuju on tasapinnaline ehk lapik.
- 3D-lõikepink töötab lisaks kolmandas mõõtmes (Z-teljel) ja võimaldab lõikepead kallutada nurga alla, mis teeb võimalikuks keerukamate kujundite, torude ja profiilide töötlemise. See annab suurema paindlikkuse, eriti kui on vaja lõigata nurga all keevitusservi või keeruka kujuga torudetaile [2].

3D lõikepeaga laserpingid on muutumas üha populaarsemaks just tänu sellele, et need suudavad asendada mitmeid eraldi tööetappe. Kui tavalise 2D-lõike puhul tuleb keerulisema detaili valmistamiseks teha lisatöid, siis 3D lõikepea võimaldab need lõiked teha kohe ühes tööetapis. See vähendab tööaega ja parandab lõike täpsust. Samas nõuab 3D lõikepea kasutamine operaatorilt rohkem teadmisi ja kogemust, sest lõike nurkade ja fookuse täpne seadistamine mõjutab otseselt lõikekvaliteeti ja mõõdutäpsust.

Käesolevas töös keskendutakse 3D lõikepeaga laserpingi kasutamisele, kuna see on ettevõtte X jaoks uus tootmissuund, mille rakendamisel on tekkinud mitmeid praktilisi väljakutseid. Uue tehnoloogia kasutuselevõtt annab ettevõttele lisaks töökiiruse parandamisele ka võimaluse laiendada teenuste valikut ja parandada tootmise paindlikkust. Samal ajal tuleb tähelepanu pöörata seadme seadistamise täpsusele sest ebatäpne seadistus võib põhjustada praaki ja vähendada seadme töökindlust, mis omakorda pikendab tööprotsessi ja suurendab tootmiskulusid.

### 1.1.1 3D lõikepea tööpõhimõte ja eripära

3D lõikepea tööpõhimõte põhineb fiiberlaseri kasutamisel, mis suunab väga täpse ja tugeva valguskiire läbi optilise süsteemi materjali pinnale. Laserenergia sulatab või aurustab lõigatava metalli, samal ajal kui abigaas (tavaliselt lämmastik või hapnik) eemaldab sulanud metalli lõikekohast. Nii saadakse puhas ja täpne lõikejoon ilma mehaanilise kontaktita [1].

Erinevalt tavapärasest 2D lõikepeast, mis liigub ainult horisontaalsuunas (X ja Y telg), saab 3D lõikepea liikuda ka vertikaalselt (Z-teljel) ja kallutada end erinevate nurkade alla. See tähendab, et lõikepea saab lõigata mitmest suunast ning teha kaldlõikeid, mis on vajalikud näiteks keevitusservade ettevalmistamisel või keerukate toru- ja profiildetailide töötlemisel. Lisaks 3D-lõikepeade liikumisvabadus võimaldab töödelda materjali, mille kuju või nurk muutub lõikeprotsessi käigus, ilma et tuleks detaili ümber paigutada [2].

3D lõikepea üks suurimaid eeliseid on võimalus vähendada järelprotsesse. Kui varem tuli detailide faasimine, puurimine või servade töötlemine teha eraldi seadmetel, siis nüüd saab paljud neist etappidest teha juba lõikeprotsessi käigus. See säästab nii aega kui ka tööjõukulu ning vähendab riski vigade tekkimisel, mis võivad tekkida detaili mitmekordsel käsitlemisel erinevate seadmete peal.

Kuna 3D lõikepead kasutatakse sageli torude ja profiilide lõikamiseks, peab seade olema varustatud ka täpse materjali fikseerimis- ja positsioneerimissüsteemiga, mis hoiab materjali kindlalt lõike ajal paigal. Väiksemgi kõrvalekalle materjali asendis võib muuta lõike nurka ja täpsust. Mõned seadmed võimaldavad lisavarustusena ka automaatset tsentreerimist või keevisejoone tuvastamist, et tagada iga detaili korrektne asend enne lõikamist (seda võimalust pakub ka Nukon NK-T125, kuid see ei kuulu standardvarustusse).

3D lõikepea suurim väärtus mitmeteljelisus, suurem liikumisvabadus ja paindlikus, mis võimaldab vähendada mehaanilisi tööetappe ning suurendada terve tootmise efektiivsust (Joonis 1).

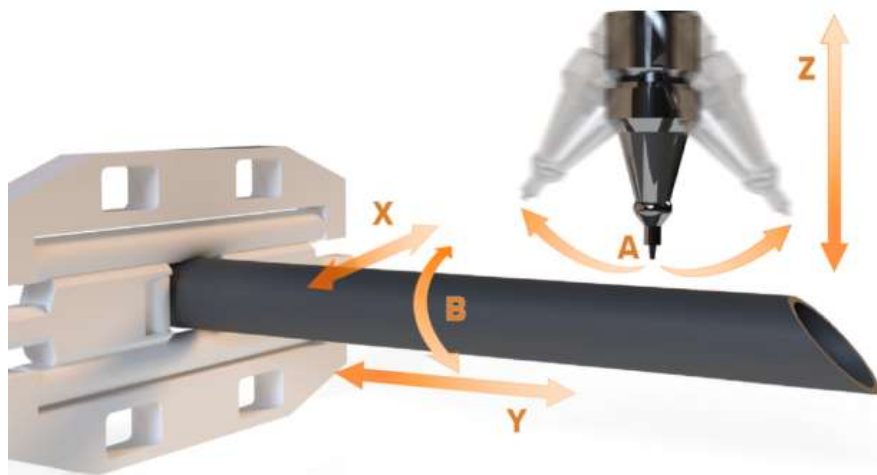
X-axis: Progresses from left to right.

Y-axis: Forward movement.

Z-axis: Ascends and descends.

A-axis: Rotation around the X-axis within a range of +/- 45 degrees.

B-axis: A full 360-degree rotation around the Y-axis.



Joonis 1. 3D lõikepea teljed [3]

### 1.1.2 2D ja 3D lõikepeade võrdlus

Laserpingid jagunevad peamiselt kaheks: 2D-lõikepingid ja 3D-lõikepingid. Nende erinevus seisneb peamiselt selles, milliseid liikumistelgi ja nurki lõikepea suudab kasutada, mis omakorda määrab ära, milliseid detaile on võimalik toota.

2D-lõikepingid on mõeldud tasapinnaliste lehtmaterjalide töötlemiseks. Lõikamine toimub kahel teljel – X ja Y – ning lõikepea liigub ainult horisontaalselt. Selline lahendus sobib väga hästi standardsete detailide, plaatide ja konstruktsioonelementide valmistamiseks, kus lõiked on sirged ja puuduvad kaldenurgad. 2D-lõikepingid on enamasti lihtsama ehitusega, kiiremad seadistada ja soodsamad hooldada, mistõttu on need levinud valik väiksemates tootmisettevõtetes või kohtades, kus toodetakse suures mahus sarnase kujuga detaile. Näiteks on 2D-fiberlaseri eelis väike energiakulu, kõrge lõikekiirus ja stabiilne kvaliteet õhukeste materjalide puhul [1].

3D-lõikepingid suudavad lisaks horisontaalsele liikumisele ka vertikaalselt liikuda (Z-teljel) ja lõikepead kallutada. See võimaldab teha lõikeid nurga all ning töödelda torusid, profiile ja ruumilisi detaile, mida 2D-lõikepink ei suuda. 3D-lõikepea kasutamine annab võimaluse teha kaldega lõikeid ja keerukaid kujundeid ühes tööetapis, ilma vajaduseta täiendavate

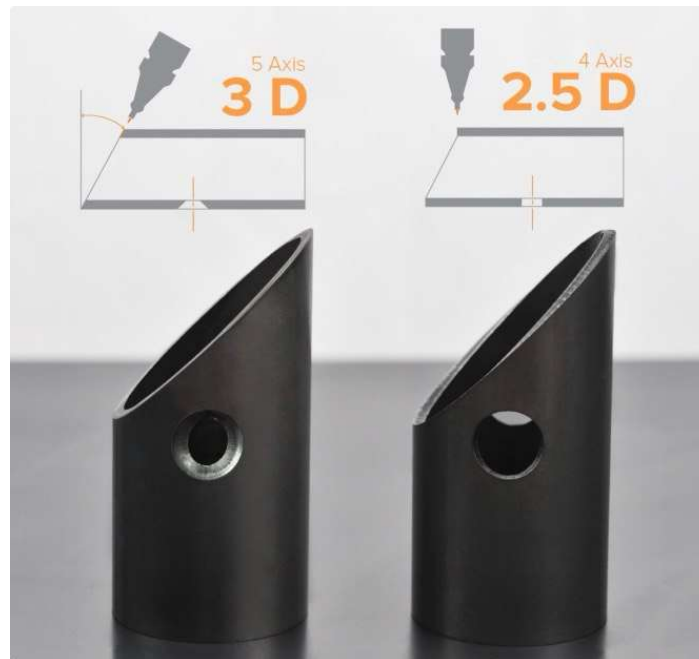
töötluste järele. Samas on 3D-seadmete töö keerukam ja nõuab täpsemat seadistust, sest lisatelgede tõttu on rohkem muutujaid, mis võivad mõjutada lõikekvaliteeti.

3D lõikepingid on eriti kasulikud torutöötlemisel ja masinatööstuses, kus kasutatakse palju nurklõikeid ja spetsiaalseid keevitusvalmidusi. Näiteks Nukon NK-T125 mudel võimaldab kaldlõikeid kuni  $\pm 45^\circ$ , mis on vajalik keerukamate konstruktsioonide tootmisel [2].

Peamine erinevus kahe tehnoloogia vahel seisneb seega paindlikkuses ja rakendusalas:

- 2D-lõikepink on parim tasapinnaliste detailide massiliseks tootmiseks;
- 3D-lõikepink sobib keerukamate ja ruumiliste detailide valmistamiseks, kus on vaja lõike nurki või eri tasapindasi (Joonis 2).

Kuigi 3D-lõikepink pakub suuremat täpsust ja võimalusi, on selle kasutuselevõtt seotud kõrgema seadme maksumuse ning pikema seadistamisajaga. Sellest tulenevalt kasutatakse 2D-lõikepinke eelkõige lihttootmisel, samas kui 3D-lahendused sobivad paindlikumatele ja väiksematele toodetavatele toodetele.



Joonis 2. 2D ja 3D lõike võrdlus [3]

## 1.2 Kvaliteedi mõjutegurid lõikeprotsessis

Laserlõikuse kvaliteet sõltub mitmete tegurite koostõjust, mis jagunevad peamiselt seadmega seotud, materjalipõhisteks ja protsessilisteks teguriteks. Kõik need mõjutavad lõike täpsust, servade puhtust ja detaili mõõtude eksimus taluvusest. Seadmega seotud tegurid hõlmavad näiteks laservõimsust, fookust ja lõikekiirust, materjalipõhised aga paksust, pinnaseisundit ja sisepinget. Samuti mängivad rolli lõikegaas ja rõhk, mis aitavad eemaldada sulametaili lõikejoonelt ning tagada ühtlase lõikepinna. Laserlõikuse kvaliteedi säilitamiseks on oluline, et kõik need tegurid oleksid omavahel tasakaalus ja vastavalt materjali eripäradele õigesti seadistatud.

### 1.2.1 Lõikeprotsessi parameetrid ja seadistus

Lõikekvaliteeti hinnatakse eelkõige selle järgi, kui hästi vastab lõige nõutud mõõtmetele ja kui puhas on lõikepind. Kuna laserpingi töö on automatiseeritud, sõltub lõpptulemus suuresti seadistustest ja materjali omadustest. Seetõttu on oluline, et enne tootmise alustamist määrataks õiged lõikeparameetrid – näiteks laservõimsus, lõikekiirus, fookuse asukoht ja gaasirõhk – mis vastavad konkreetsele materjalile ja selle paksusele. Seadistused määratakse tavaliselt kas seadme automaatsete funktsioonide abil või tehakse testlõiked, mille käigus kontrollitakse lõike kvaliteeti ja vajadusel korrigeeritakse parameetreid.

Üks peamisi näitajaid on lõike serva siledus ja puhtus. Kvaliteetne laserlõige peab olema ühtlane, ilma liigse sulamiseta, jämeda pinnastruktuuri või põlenud jälgedeta. Kui lõike serv on kare või ebahütlane, viitab see sageli valele lõikekiirusele, fookusele või gaasirõhule. Siledad servad tähendavad, et laser on materjali ühtlaselt sulatanud ja gaas on sulanud metalli tõhusalt eemaldanud [4].

Teiseks oluliseks kriteeriumiks on mõõdutäpsus. Laserlõikus võimaldab saavutada väga väikeseid tolerantse, kuid täpsus sõltub seadme mehaanilisest seisukorrast ja materjali omadustest. Hea kvaliteediga lõike korral vastab detail joonisel toodud mõõtmetele ilma vajaduseta järeltöötlemiseks. Kui mõõtmed erinevad nõutust, võib põhjuseks olla vale fookuskaugus, kulunud optika või seadme vibratsioon. Tavaliselt peetakse heaks tulemuseks kõrvalekallet alla  $\pm 0,1$  mm õhemate materjalide puhul [1].

Lisaks vaadeldakse lõike kvaliteedi hindamisel servade nurka ja ristlõiget. Ideaalis peab lõike serv olema risti materjali pinnaga. Kui lõige kaldub ühele poole, tähendab see, et laserkiir ei ole õigesti fokuseeritud või on lõikepea liiga kõrgel või madalal. Selliste probleemide vältimiseks kasutatakse mõnel seadmel automaatseid fookuse

jälgimissüsteeme ja tarkvarapõhist kõrguse kontrolli, mis tagab lõikepea õige kauguse materjali pinnast.

Praktilises tootmises kasutatakse sageli ka visuaalset kontrolli ja vajadusel mõõtmisi, et hinnata lõikepinna kvaliteeti enne detaili edasist kasutamist. Samas on oluline, et iga partii eelneks korrektne seadistuse kontroll, kuna juba väike fookuse nihe või gaasirõhu muutus võib põhjustada praagi kasvu.

### **1.2.2 Materjali omadused ja nende mõju lõikekvaliteedile**

Laserlõike tulemus sõltub otseselt sellest, millist materjali ja paksust lõigatakse ning milline on materjali pind. Materjali paksus mõjutab nii laseri tugevust kui ka lõikejoone kuju: mida paksem on detail, seda võimsam laser ja aeglasemat kiirust on vaja, vastasel juhul võib lõige jääda mittetäielikuks või serv jääb ebaühtlaseks. Uuringud näitavad, et nii materjali tüüp (nt süsinikteras, roostevaba, alumiinium) kui ka paksus muudavad märgatavalt lõike serva karedust, lõikejoone laiust ja lõike sirgust; õhemad lehed annavad üldiselt ühtlasema tulemuse, paksuse kasvades suureneb oht serva "koonilisuseks" ja karedamaks pinnaks [5].

Teine oluline omadus on laserkiire neeldumine vs peegeldumine. Näiteks alumiinium ja vasesegud on väga peegeldavad (eriti CO<sub>2</sub>-laseri lainepikkusel), mistõttu jõuab osa energiast materjali asemel tagasi optikasse; see raskendab lõikamist ja sunnib kasutama teistsuguseid seadistusi või suuremat võimsust. Ka üldisemalt määrab lainepikkus koos materjaliga, kui hästi energia neeldub – mõni lainepikkus sobib terasele paremini, teised on tõhusamad värviliste metallide puhul [6], [7].

Lisaks loevad pinna seisukord ja kattekihid. Õli, kiled, värvid, oksüdatsioonikihid või tsingitus muudavad neeldumist ja gaasi tööd lõikejoonel. Valele laserile mõeldud kaitsekile (nt CO<sub>2</sub> jaoks) võib fiiberlaseriga lõigates jätta ebaühtlase serva, samas kui õigele lainepikkusele mõeldud kile või puhas pind aitab hoida lõike ühtlase ja heleda [8].

Kindlasti mõjutab lõike kvaliteeti ka materjali sirgus ja jäikus, eriti 3D lõikeprotsessis, kus kasutatakse torusid ja profiile. Kui toru on veidi kõver või sisaldab sisepinget, võib lõikepea fookus muutuda pööramisel ja lõige kalduda soovitud trajektooriga kõrvale. Seetõttu on oluline, et torud oleksid enne lõikamist visuaalselt kontrollitud ja õigesti kinnitatud.

Kui need omadused on arvesse võetud (ja vajadusel tehakse lühike proovilõige), on lihtsam saavutada puhta, ühtlase ja mõõdus lõige.

### 1.3 Praagi olemus ja tekkepõhjused

Praak ehk tootmisdefekt on iga tootmisprotsessi loomulik osa, kuid selle hulk ja mõju sõltuvad otseselt tootmise kvaliteedist ja protsessi optimeerimisest. Lihtsamini öeldes tähendab praak olukorda, kus valmistatud detail ei vasta joonisel, standardile või tellimuses toodud nõuetele ja parameetritele – olgu selleks vale mõõt, kare lõikepind, vale nurk või kahjustatud serv. Praagi tekkimine toob kaasa lisakulusid nii majanduslikult kui ka ajaliselt, sest defektne detail tuleb kas parandada või asendada, mis omakorda suurendab töökoormust ja materjalikulu.

Praagi põhjused võivad olla tehnilised, organisatsioonilised või inimlikud. Tehnilised põhjused on seotud seadmete või tööriistade kulumise, vale seadistuse või ebatäpse kalibreerimisega. Näiteks laserlõikuse puhul võib praaki tekkida siis, kui fookus on valesti seadistatud, laservõimsus liiga madal või materjal ei ole õigesti fikseeritud. Sellisel juhul jäävad lõiked ebaühtlased, servad võivad sulada või detaili mõõtmed ei vasta nõutule [1].

Organisatsioonilised põhjused tekivad tavaliselt planeerimise ja protsessi juhtimise tasandil. Näiteks võib praaki põhjustada vale tööjärjekord, ebapiisav kvaliteedikontroll või vähene juhendamine. Kui tootmisel puudub selge väljatöötatud süsteem defektide tuvastamiseks ja parandamiseks, võivad vead korduda mitmes järjestikusis partiis. Seetõttu on oluline, et ettevõttes oleks paigas tagasiside süsteem, mille abil saab võimalikult varakult tuvastada vea põhjuse ja võtta kasutusele parandusmeetmed [9].

Inimlikud põhjused on seotud operaatori kogemuse ja tähelepanelikkusega. Kui töötaja ei tunne seadet ja selle eripärasid või ei kontrolli lõikeparameetreid enne töö alustamist, võib lõpptulemus erineda soovitud. Samuti võib vigu tekkida väsimusest, kiirustamisest või vähesest väljaõppesest. Et neid olukordi vältida, on oluline tagada töötajate pidev koolitus ja selged tööjuhendid, mis aitavad vähendada valesti seadistamisest või tähelepanematuses tulenevat praaki.

Laserpingi ja eriti 3D-lõikeprotsessi puhul on tüüpiline, et praaki põhjustavad väiksed kõrvalekalded toru või profiili asendis, mille tõttu lõige ei jää täpselt soovitud trajektoorile. Seetõttu on seadme kalibreerimine ja õigesti valitud kinnitused on kriitilise tähtsusega, et vältida mõõtmisvigude ja korduslõikeid.

Praak vältimatu osa tootmisest, kuid selle osakaalu saab oluliselt vähendada, kui kombineeritakse tehniliselt korrektsed seadistused, täpne töökorraldus ja pädevad operaatorid. Mida varasemas etapis viga avastatakse, seda väiksem on selle mõju tootmisele ja kuludele.

### 1.3.1 Praagi liigid tootmises

Praak ei ole alati ühesugune. Sõltuvalt vea iseloomust ja selle parandus võimalusest, jaotatakse see tavaliselt parandatavaks ja mitteparandatavaks praagiks. Selline eristus aitab tootmisettevõttel paremini hinnata, millised detailid on võimalik päästa ning millised tuleb utiliseerida või uuesti valmistada. Õige liigitus on oluline ka tootmise kulude ja kvaliteedinäitajate arvestamisel, sest see mõjutab nii materjalikulu kui ka tööaja planeerimist [10].

Parandatav praak tähendab olukorda, kus defekt on võimalik eemaldada lisa töötuse või viimistluse abil, ilma et detaili kvaliteet või mõõdutäpsus kannataks. Näiteks võib laserlõikuse puhul parandatavaks praagiks lugeda väikeseid ülekuumenemise jälgi serval, mida saab eemaldada lihvimise või poleerimisega. Samuti võivad parandatavad olla detailid, kus lõike algus või lõpp vajab korrigeerimist, kuid üldmõõdud ja kuju vastavad siiski nõuetele. Parandatav praak võimaldab vähendada materjalikadu ja tootmise kulusid, kuid nõuab lisatööaega ning võib mõjutada üldist tootlikkust.

Mitteparandatav praak tekib siis, kui detaili defekt on nii suur, et selle kõrvaldamine ei ole majanduslikult otstarbekas või kvaliteedinõuded ei ole enam täidetavad. Näiteks kui laser ei lõika materjali täielikult läbi, lõikejoon on oluliselt kaldu või mõõtmed ei vasta joonisele, tuleb detail ära visata või taaskasutada ja uus valmistada. 3D lõikeprotsessis on mitteparandatav praak sagedane just torude ja profiilide lõikamisel, kus väiksemgi kõrvalekalle asendis või fookuses võib mõjutada kogu detaili sobivust.

Lisaks parandusvõimalustele jaotatakse praaki veel ka selle päritolu järgi:

- Sisemine praak avastatakse ettevõtte sees enne, kui toode kliendini jõuab. Seda saab veel parandada või välja sorteerida, mis aitab hoida mainet, kuid tekitab lisakulu.
- Väline praak ilmneb alles kliendi juures või pärast toote kasutuselevõttu. Sellisel juhul on tagajärjed tavaliselt tõsisemad, sest lisaks remondile või asendusele võib kannatada ka ettevõtte maine ja usaldusväärsus [11].

Ettevõtetes, kus eesmärk on tootmise efektiivsuse tõstmine, on oluline pidada täpset arvestust praagi liikide üle. See aitab näha, millised probleemid on korduvad ja kas need on seotud seadmete, materjalide või töökorraldusega. Selline info on aluseks parendusmeetmete ettepanekule ja kvaliteedijuhtimise täiustamisel.

### 1.3.2 Praagi tekkepõhjused 3D lõikeprotsessis

3D lõikeprotsessis on praagi tekkepõhjused tihedalt seotud seadme seadistuse, materjali omaduste ning operaatore oskustega. Kuigi laserpingid on üldiselt väga täpsed, võib väike kõrvalekalle parameetrites põhjustada olulise erinevuse lõike kvaliteedis ja mõõdutäpsuses.

Üheks sagedasemaks praagi allikaks on materjali vale paigutu. Kuna 3D-lõikepink töötab mitmel teljel ning detail võib olla toru või profiili kujuline, mõjutab väiksemgi nihe lõike nurka ja mõõtmeid. Kui materjal pole täpselt fikseeritud, võivad lõigatud servad jääda ebaühtlased või mitte vastata joonisel toodud nurkadele. Sellised kõrvalekalded on eriti sagedased torude lõikamisel, kus on oluline toru sirgus ja keevisejoone õige orientatsioon [12].

Teiseks oluliseks teguriks on fookuskauguse ja lõikepea kalde täpsus. 3D lõikepea võimaldab lõigata nurga all, kuid ebatäpne fookus või vale kallutusnurk tekitab ebaühtlase lõikepinna ja võib põhjustada materjali sulamise või põletusjälgi. Eriti kriitiline on see torude ja paksude profiilide lõikamisel, kus laser peab läbima erineva paksusega materjali [1].

Praagi võivad põhjustada ka gaasirõhu ja otsiku seisukorraga seotud probleemid. Kui lõikegaasi rõhk on liiga madal või otsik on kulunud, ei eemaldata sulametalli lõikekohast piisavalt tõhusalt. Selle tulemusel tekivad lõikepinna alumisse serva metalliligid või jämedad servad, mis rikuvad detaili mõõdutäpsust ja välimust [4].

Lisaks tehnilistele teguritele mängivad rolli ka inimlikud vead ja kogemuste puudumine. 3D-lõikepingi seadistamine nõuab kogemust ja materjalitundmist, sest iga materjal ja lõikenurk vajavad erinevaid parameetreid. Vale lõikeparameetrite valik või ebapiisav kontroll esimeste lõigete üle võib viia terve partii praagini. Seetõttu on testlõigete tegemine ja lõikeparameetrite dokumenteerimine oluline osa kvaliteedikontrollist [13].

Teatud juhtudel võib praagi põhjus olla ka seadme hoolduse ja optika seisukorras. Tolmu, suitsu või metalliosakeste kogunemine laserpeeglitele ja läätsedele vähendab laseri võimsust ning põhjustab ebaühtlast lõikeenergiat. See väljendub tavaliselt lõikepinna ebaühtluses või sulamisjälgedes, mis omakorda suurendavad ümbertöötlemise vajadust [14].

Kokkuvõtlikult võib öelda, et 3D-lõikeprotsessis tekib praak peamiselt kolmel põhjusel:

1. seadme seadistus- ja hooldusvead (vale fookus, kulunud otsik, määrduvad optika);
2. materjali omadused ja asend (kõverus, ebatasane pind);
3. inimlikud tegurid (kogemuse puudumine, valed parameetrid, ebapiisav järelkontroll).

Nende tegurite kombineeritud mõju võib oluliselt vähendada tootmise efektiivsust ja lõike kvaliteeti, mistõttu on oluline rakendada süsteemset kontrolli ja standardiseeritud seadistusprotseduure iga tööetapi juures.

#### **1.4 Kvaliteedi ja töökindluse tagamine tootmissüsteemis**

Laserlõikuse kvaliteedi ja seadme töökindluse tagamine on oluline eeldus et tootmine oleks sujuv ja kulutõhus. Kõrge kvaliteet tähendab vähem praaki, vähem ümbertöötlemist ning stabiilsemat tootmist. 3D torulõikuse puhul on täpsus veelgi olulisem, sest lõikenurkade ja teljeasendite kõrvalekalded võivad põhjustada raskusi detailide hilisemal kokkupanemisel ja keevitamisel.

Kvaliteedi hoidmiseks on oluline regulaarselt kontrollida lõikeprotsessi parameetreid, lõikepea optika seisukorda, materjali fikseerimist ning tagada sobiv abigaasi rõhk. Kõrvalekallete varajane tuvastamine aitab vältida suuremat praagiteket ja hoida laserpingi töö ilma katkestusteta. Samuti toetab stabiilset lõikekvaliteeti hästi juhitud töövoog ja selged juhised operaatoritele.

Kui lõikeprotsess on korrapäraselt jälgitud ning seadme seisukord kontrollitud, on võimalik märgata muutusi lõikekvaliteedis enne, kui need põhjustavad olulisi tootmisseisakuid või kulukaid parandusi.

#### **1.5 Lean-põhimõtted ja tootmise pidev parendamine**

Lean-põhimõtete eesmärk on tagada tootmisprotsessi sujuvus ja kõrge kvaliteet, eemaldades tegevused, mis ei loo lõpptootetele väärtust. Laserlõikuse kontekstis tähendaks see eelkõige praagi ja ootamatute seisakute vähendamist, materjali ja tööaja säästmist ning seadme töökindluse säilitamist. Lean tootmine keskendub töö ühtlustamisele, liigsete tegevuste vähendamisele ning probleemide süsteemsele kõrvaldamisele, et parandada tootmiseparemaks [15].

3D torulõikuse puhul avalduvad Lean-põhimõtted järgmiselt:

- vigade ennetamine: lõikeparameetrite, fookuskauguse ja toru asendi korrapärane kontroll enne töö alustamist vähendab defektide teket;
- ühtlane töövoog: materjali ettevalmistus ja kinnitamine tuleb teha õigesti juba esimesel katsel, et vältida ümberseadistusi ning lisatööd;
- standardsed töövõtted: korduvate detailide lõikamisel tagavad dokumenteeritud seadistused ühtlase kvaliteedi jaoks;
- probleemide kiire tuvastamine: lõike kvaliteedi muutuse korral tuleb kõrvalekalle kiirelt avastada, et vältida suuremahulist praaki.

Süsteemne tähelepanu praagi tekkepõhjustele ja nende kordumise ennetamisele aitab tagada, et Nukon NK-T125 töötab stabiilselt, vähese praagiga ja maksimaalse tootlikkusega.

### **1.5.1 5S ja töökoha korrastatus**

5S on tootmiskeskonna korrastamise meetod, mille eesmärk on tagada puhas, organiseeritud ja ohutu tööala. Hästi korraldatud töökoht toetab kvaliteetset laserlõikust, kuna töövahendid ja seadistamiseks vajalikud abivahendid on alati kergesti leitavad ja heas seisukorras kindlatel kohtadel. See vähendab otsimisele kuluvat aega, vältida valede tööriistade kasutamist ning aitab ennetada vigu lõikeprotsessis.

3D lõikepea kasutamisel on eriti oluline, et:

- otsikute ja optika hooldusvahendid oleksid õiges kohas ja puhtad;
- kinnitusdetailid ja võtmed oleksid selgelt sorteeritud ja käeulatuses;
- abigaasi torustik ja filtrid oleksid visuaalselt kontrollitavad;
- tööala oleks vaba metallipurust ja lõikejääkidest, mis võivad segada detaili õiget asendit.

5S rakendamine aitab hoida laserpingi läheduses stabiilset töövoogu ja vähendab töötajate sõltuvust individuaalsetest harjumustest – iga operaator leiab vajalikud vahendid samast kohast ning saab jätkata tööd ilma viivitusteta [16].

Korrapärane töökoha korrashoid toetab nii lõikekvaliteeti kui ka seadme töökindlust, sest mustus, metallipuru või valed töövahendid võivad põhjustada lõikepea defekte, valesid seadistusi või ootamatuid katkestusi.

### **1.5.2 TPM ja seadmete ennetav hooldus**

TPM (*Total Productive Maintenance*) keskendub seadmete töökindluse tagamisele ennetava hoolduse kaudu. Selle eesmärk on vältida ootamatuid rikkeid, vähendada seisakuaega ja tagada laserlõike stabiilset kvaliteeti. TPM rõhutab operaatori rolli masina igapäevases kontrollis ja seisundi jälgimises, et probleemid avastatakse enne, kui need mõjutavad tootmist negatiivselt [18].

Nukon NK-T125 puhul tähendab TPM järgmiste tegevuste regulaarset läbiviimist:

- optika ja kaitseklaasi puhastus ja kontroll – mustus optikal halvendab lõikekvaliteeti ja võib vigastada laserallikat;
- otsikute ja abigaasi filtrite seisukorra kontroll – kulunud või mustunud otsik põhjustab ebaühtlase lõikepinna;
- fookuse ja kõrguse jälgimise süsteemi kalibreerimine – tagab täpse lõike nurga ja mõõtude vastavuse;
- lekete ja ebatavaliste häälte varajane tuvastamine – aitab ära hoida suuremaid rikkeid.

TPM paneb rõhu sellele, et operaator pole ainult masina kasutaja, vaid ka seadme seisukorra eest vastutaja, kes märkab tootmise käigus väikeseid kõrvalekaldeid ja saab need koheselt fikseerida. See aitab hoida masinat töövalmis ning vähendab riski, et praak suureneb seadme tehnilise rikke tõttu [15].

Seega ennetav hooldus toetab 3D torulõikeprotsessi stabiilsust ning aitab tagada, et seadme investering tasub end ettevõttele võimalikult hästi ära.

### **1.5.3 Põhjus-tagajärg diagramm (Ishikawa diagramm)**

Praagi ja kvaliteediprobleemide põhjuste analüüsimiseks kasutatakse tootmises sageli põhjus-tagajärg diagrammi, mida tuntakse ka Ishikawa diagrammina või kalaluu diagrammi nime all. Meetodi töötas välja Kaoru Ishikawa ning selle eesmärk on struktureerida võimalikud probleemi põhjused loogilistesse kategooriatesse, et paremini mõista, millised tegurid mõjutavad lõpptulemust kõige enam [17].

Ishikawa diagrammi eesmärgiks on uuritav probleem ehk tagajärg, milleks tootmiskeskkonnas on sageli praak, kvaliteedi kõikumine või protsessi ebastabiilsus. Selle ümber rühmitatakse võimalikud põhjused kindlatesse kategooriatesse. Tootmises kasutatakse enamasti 6M-lähendamist, milleks on materjal, masin, meetod, töäjõud (inimfaktor), mõõtmine ja keskkond. Selline jaotus aitab tagada, et analüüs ei keskendu ainult ühele tegurile, vaid hõlmab kogu tootmisprotsessi.

Põhjuse-tagajärg diagrammi eelis seisneb selles, et see ei paku valmis lahendusi, vaid aitab leida ja kaardistada probleemide allikaid ning tuvastada korduvaid mustreid. Diagrammi koostamine toimub sageli meeskonnatöona, kasutades vaatlusandmeid, töötajate kogemusi ja mõõtmistulemusi. See muudab meetodi eriti sobivaks olukordades, kus probleemide põhjused on mitmetahulised ja omavahel seotud.

Käesolevas lõputöös kasutatakse Ishikawa diagrammi analüüsivahendina, et koondada ettevõttes kogutud vaatlused ja intervjuude tulemused ning visualiseerida 3D löikeprotsessi käigus tekkiva praagi peamised põhjused. Diagrammi abil on võimalik selgemalt eristada, millised tegurid on seotud materjali omadustega, millised seadme piirangutega ning millised tulenevad töökorraldusest või inimfaktorist.

## **2 HETKEOLUKORRA ANALÜÜS ETTEVÕTTES WELDMET SOLUTION OÜ**

### **2.1 Uurimistöö meetodid ja strateegia**

Käesolev lõputöö on rakenduslik uurimistöö, mille eesmärk on analüüsida 3D lõikepeaga laserpingi kasutamisel tekkiva praagi põhjuseid, ning leida võimalusi selle vähendamiseks tootmisettevõttes. Uurimistöö keskendub reaalse tootmisprotsessi analüüsile ning tugineb peamiselt empiirilistele andmetele.

Uurimistöö läbiviimisel kasutati kombineeritud uurimisstrateegiat, mis hõlmas vaatlust tootmises, mõõtmistulemuste kogumist ning intervjuusid laserpingi operaatoritega. Tootmisprotsessi vaatluse käigus jälgiti 3D lõikeprotsessi voogu, detailide kinnitust, toruprofiilide käitumist lõike ajal ning lõikepindade kvaliteeti. Lisaks dokumenteeriti visuaalselt praagiga seotud detailid ja lõikepinnad.

Mõõtmismeetodina kasutati toruprofiilide seina paksuse mõõtmist, mille eesmärk oli hinnata, kas materjali paksuse varieerumine võib mõjutada lõiketulemust. Sirgsuskõrvalekalde ehk banaanikujulisuse hindamisel kasutati visuaalset kontrolli kuna täpne geomeetiline mõõtmine ei ole pärast igat lõikamist usaldusväärne seoses kinnitustega ja sisepingetega.

Täiendava sisendi saamiseks viidi läbi intervjuud laserpingi operaatoritega kui ka tootmisjuhiga, et kaardistada nende kogemused, tähelepanekud ja hinnangud 3D lõike kvaliteedile ning praagi tekkepõhjustele. Kogutud andmed kasutati põhjus-tagajärg analüüsis (Ishikawa diagramm), mis võimaldas grupeerida probleemitegurid materjali, masina, meetodi, inimfaktori, keskkonna ning mõõtmise vaatenurgast.

Selline mitme meetodi kasutamine võimaldas vaadelda uuritavat probleemi terviklikult ning luua tugev alus edasisteks analüüsideks ja parendusettepanekuteks.

### **2.2 Ettevõtte tutvustus**

Käesolevas lõputöös analüüsitakse tootmisprotsessi ja praagi vähendamise võimalusi ettevõttes Weldmet Solution OÜ, mis tegeleb metalltoodete ja konstruktsioonide tootmisega peamiselt laevanduseks. Ettevõtte asub Viimsis, Harjumaal ning tegutseb peamiselt metallitöötluste ja lehtmaterjali keevitus-, lõike- ning painutustööde valdkonnas. Ettevõtte pakub oma klientidele terviklikke lahendusi, hõlmates nii detailide projekteerimist, tootmist kui ka järelviimistlust, mis võimaldab tagada paindliku tootmisprotsessi ja kvaliteetse lõpptulemuse.

Ettevõtte peamiseks tegevusaladeks on keevitus, laserlõikus, painutamine, CNC-töötlus, samuti vajadusel koostetööd ja pinnaviimistlus. Lisaks on viimastel aastatel ettevõtte laiendanud oma tootmisvõimekust, tuues kasutusse 3D lõikepeaga toru- ja profiillaserpingi, mis võimaldab valmistada keerukama kujuga detaile. Tegemist on uue suunaga ettevõtte arengus, mille eesmärk on pakkuda klientidele veelgi mitmekesisemaid tootmisvõimalusi ja lühendada tarneaegu.

Weldmet Solution OÜ kliendibaas koosneb peamiselt välismaistest B2B sektori ettevõtetest, kelle tellimused nõuavad kõrget mõõdutäpsust, korratavust ja usaldusväärset tarnelogsistikat. Välismaiste partnerite osakaal on aastate jooksul pidevalt kasvanud, mis näitab ettevõtte suutlikkust konkureerida rahvusvahelisel turul ning pakkuda kvaliteetseid ja ajakohaseid metallitöötluslahendusi.

Ettevõtte tootmisüksus on varustatud kaasaegse seadmepargiga, mis võimaldab töödelda erinevaid metallmaterjale, sealhulgas süsinik- ja roostevaba terast ning alumiiniumi. Nende eesmärgiks on pakkuda täpset, efektiivset ja kvaliteetset tootmisteenust, mis vastab kaasaegse tööstuse nõudmistele ning toetab pidevat parendamist ja tootmisprotsesside optimeerimist.

### **2.3 3D lõikepeaga laserpingi kirjeldus ja tehnilised andmed**

Ettevõttes on kasutusel Nukon NK-T125 3kw mudeliga 3D lõikepeaga toru- ja profiillaserpink, mis on mõeldud eeskätt torude, nelik- ja ristkülikprofiilide lõikamiseks. Tegemist on fiiberlaseril põhineva seadmega, mille eeliseks on kõrge lõikekiirus, madal energiakulu ja suurepärase lõikekvaliteet. Seade võimaldab lõigata nii sirgeid kui ka nurga all kaldes lõikeid, mis on vajalikud näiteks keevitavate servade ettevalmistamiseks või keerukate detailide valmistamiseks.

Nukon NK-T125 on varustatud täisautomaatse 3D lõikepeaga, mis võimaldab lõikepead kallutada kuni  $\pm 45^\circ$ , pakkudes paindlikkust erinevate nurkade ja erikujundite töötlemisel. 3D lõikepea kasutamine vähendab vajadust järelprotsesside järele (nt faasimine, lihvimine), mis aitab vähendada nii praagi hulka kui ka säästa tööaega.

Masin suudab töödelda ümmargusi torusid kuni  $\varnothing 180$  mm, ruudukujulisi profiile kuni  $125 \times 125$  mm ja ristkülikprofiile kuni  $150 \times 100$  mm. Seadme maksimaalne sisestuspikkus on 6500 mm ja maksimaalne laadimiskaal kuni 30 kg meetri kohta, mis teeb selle sobivaks ka raskemate materjalide töötlemiseks. Seadme jääkpikkus, ehk ala millest pukk kinni hoiab, on umbes 185 mm, mis vähendab tooraine kadu ja tõstab materjali kasutuse efektiivsust.

Laserpingi võimsus on sõltuvalt konfiguratsioonist 2 kW, 3 kW (ettevõtte Weldmet Solution OÜ pink) või 4 kW, võimaldades lõigata:

- pehmet terast kuni 10 mm;
- roostevaba terast kuni 8 mm;
- alumiiniumi kuni 8 mm paksusega.

Kõik seadistused ja lõikeprogrammid juhitakse puutetundliku juhtpaneeli kaudu. Tarkvara võimaldab CAD/CAM integreeritud programmide kasutamist, mis toetab 3D mudelite otse importimist ja automaatset lõikeprogrammide genereerimist järgnevas lõpp korrigeerimiseks. See vähendab oluliselt aega, inimlikke vigu ja parandab lõikamise täpsust.

Nukon NK-T125 mudelile võimalik integreerida mitmeid valikulisi lisavarustusi, mis võimaldavad seadme töövõimekust ja automatiseerituse taset tõsta vastavalt tootmise vajadustele. Nende hulka kuuluvad automaatne tsntreerimis- ja keevitusasendi tuvastamine, automaatne laadimissüsteem, mis võimaldab torude ja profiilide sisestamist pikkusega 3000–6300 mm, vähendades manuaalse tõstmise vajadust ja tõstes tööohutust, ning automaatne väljalaadimissüsteem, mille standardpikkus on 4000 mm ja mida saab laiendada kuni 6000 mm, tagades valmisdetailide kiire eemaldamise tööalalt ja tööprotsessi järjepidevuse. Samuti on võimalik lisada kaldlõike funktsioon, mis võimaldab lõikepead kallutada kuni  $\pm 45^\circ$ , et valmistada keerukamaid nurk- ja servalõikeid, näiteks keevitusservade ettevalmistamiseks.

Masina kaal on ligikaudu 23 000 kg, mis tagab tugeva ja vibratsioonivaba tööpinna. Kogu süsteem töötab automaatses režiimis, võimaldades operaatoril jälgida tööprotsessi reaajas ning vajadusel kiiresti sekkuda, kui süsteem tuvastab kõrvalekaldeid või tõrkeid.

Tänu oma konstruktsioonile ja nutikale juhtimis süsteemile pakub Nukon NK-T125 ettevõttele kõrget tootlikkust, täpset lõikekvaliteeti ning võimaldab praagi vähendamist läbi täpsema seadistuse ja automaatse kontrolli. Samas nõuab antud seade regulaarset hooldust ja täpset seadistust, kuna väiksemadki kõrvalekalded fookuse või kaldenurga osas võivad viia praagi tekkeni. Seetõttu on oluline tagada korrapärane hooldus, töötajate koolitus ja seadistusprotseduuride standardiseerimine [2].

## **2.4 Lõikeprotsessi töövoog ja osalised**

Weldmet Solution OÜ-s algab lõikeprotsess tellimuse ja vastavate tehniliste jooniste laekumisega. Tootmisjuht koordineerib tööde järjekorda ja annab operaatorile üle vajalikud andmed, sealhulgas lõikefailid ja materjali spetsifikatsioonid. Enne lõike

alustamist valmistatakse materjal ette: laost tuuakse vajalik profiil või toru ning kontrollitakse selle mõõte ja visuaalset seisukorda.

Laserpingi operaator vastutab masina seadistamise eest. See hõlmab programmi laadimist, lõikeparameetrite valimist ning vajadusel testlõike tegemist, eriti uute detailide või materjalide puhul. Testlõige aitab veenduda, et fookuskaugus, kõrguseandur ja gaasirõhk on sobivad. Seejärel kontrollitakse materjali kinnitust pingil uuesti, kontrollitakse selle paiknemist ning vajadusel tehakse käsitsiseadistusi, et vähendada võimalikke vigu toru sirguse või kõveruse tõttu.

Lõikeprotsess ise on automatiseeritud – masin viib läbi nii sirglõikeid kui ka 3D kaldlõikeid vastavalt programmile. Operaator jälgib lõikamist, et tuvastada võimalikke kõrvalekaldeid (näiteks serva ebapuhtus, sädemete muutus või gaasirõhu kõikumine). Mustmetalli lõikamisel pööratakse erilist tähelepanu optika puhtusele, sest hapnikuga töötades tekib mustust kiiremini.

Pärast lõikamist eemaldab operaator detailid, puhastab seda, kontrollib mõõte ja visuaalset kvaliteeti ning otsustab, kas detail vastab nõuetele või on vajalik ümberlõikus. Kvaliteedikontroll on esmalt visuaalne, kuid keerukamate detailide korral mõõdetakse ka konkreetseid nurki ja pikkusi. Kui lõikeprotsessi käigus ilmneb probleem, fikseeritakse see ja vajadusel muudetakse lõikeparameetreid või programmi.

Protsessi osalised on tootmisjuht, kes vastutab töö planeerimise eest; operaator, kes teeb seadistused ja jälgib lõikamist; ning vajadusel hooldustehnik, kes teostab regulaarseid hooldusi ning lahendab tehnilisi tõrkeid. Selline töövoog (Joonis 3) tagab, et masin töötab stabiilselt ja lõikeprotsess oleks võimalikult täpne ka 3D kaldlõigete puhul, mis on materjali kvaliteedi suhtes tundlikumad.



Joonis 3. Ettevõtte standardne töövoog lõikamisel

## 2.5 Praagi tekkepõhjused ja kordumustrite tuvastamine

Tehases kohapeal viibides oli selgelt näha, et lõikeprotsess töötab 2D lõigete puhul stabiilselt ning lõike kvaliteet on üldjuhul ühtlane. Probleemid ilmnesis peamiselt siis, kui kasutati 3D lõikepead ja tehti kaldlõikeid toruprofiilidele. Mitme töö juures kordus sama muster: kui toru pöörati lõike ajal, ei langenud lõikenurk täpselt kokku soovitud algväärtusega ning detailide omavaheline kokkusobivus muutus keeruliseks. Kohapeal

nähtud näidete puhul oli näha, et toru lõikepinnal tekkis nurga hälve ning mõnes nurgas esines ka kerge põletusjälge.

Visuaalselt oli võimalik märgata, et väikene kõrvalekalle toru asendis (Foto 1) või profiili geomeetrias mõjutab lõike tulemust rohkem kui esmapilgul eeldada võiks. 3D pea lõikab detaili teatud nurga all ning isegi väga väike nihkumine muudab lõike suunda. Masin ise järgib programmi täpselt, kuid ei korrigeeri toru pööramisel tekkivaid geomeetrisi muutusi. Seetõttu jäi esmamuljena mulje, et probleem on seotud masina seadistusega, keskpunktiga või 3D pea tööpõhimõttega.

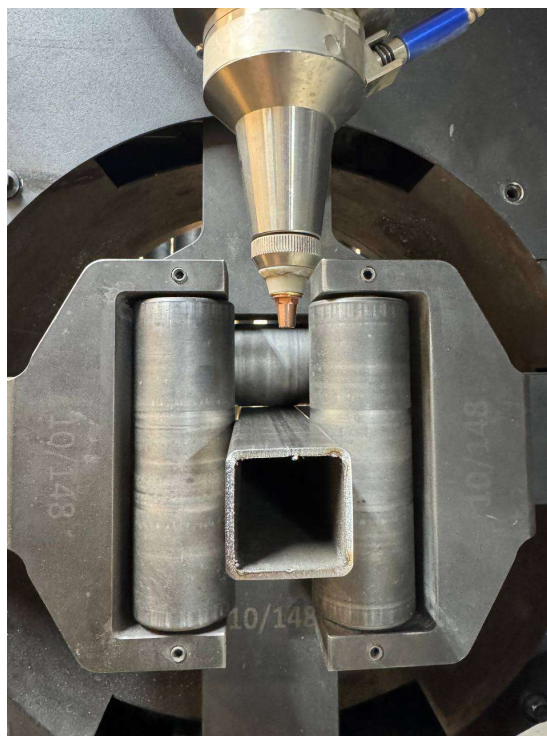


Foto 1. Toru suunajast on näha et algusest peale võib olla toru suunajas kõver

Intervjuudes (Lisa 1, Lisa 2) selgus aga, et põhipõhjus ei ole masina töös ega operaatorite oskustes, vaid materjali kvaliteedis. Operaatorid tõid välja, et toruprofiilid ei ole alati täiuslikult sirged ja olenevalt partiist, võib esineda väike „banaanisus“ — see tähendab, et profiil on kergelt kõver. Sellisel juhul nihkub toru keskpunkt pööramisel ja masin ei suuda seda kompenseerida. Lisaks esineb torudel seinapaksuse väikseid erinevusi, mis mõjutavad kaldlõike täpsust. Kõik need tegurid tugevdasid vaatluse ajal nähtud mustrit: probleem avaldub just 3D lõigete puhul, kus lõikenurk on geomeetrisest hälvetes suhtes väga tundlik.

Kokkuvõttes näitasid nii isiklikud vaatlused kui ka intervjuud, et praagi tekkimisel kordub pidevalt sama muster: 3D kaldlõige muutub ebatäpseks, kui toru ei ole geomeetriselt

ideaalne. Masin töötab ettenähtud parameetrite järgi, kuid piiratud kompensatsioonivõime tõttu liiguvad materjali väikesed hälbed otse lõike kvaliteeti. Nende tähelepanekute alusel on võimalik edasises analüüsis probleemi täpsemalt määratleda ja mõõtmistulemustega kinnitada.

## 2.6 Töötajate intervjuude kokkuvõte

Intervjuud tehti kahte laserpingi operaatoriga ning tootmisjuhti kaasates (Lisa 1, Lisa 2). Eesmärk oli selgitada, kuidas töökogemus, seadme kasutamise sagedus ja materjali omadused mõjutavad 3D lõikega detailide kvaliteeti. Intervjuude põhjal ilmses, et Nukon NK-T125 kasutatakse peamiselt 2D lõigete jaoks ning 3D lõikepead rakendatakse vaid umbes 10% töödest. Seetõttu on keerukamate kaldlõigete osakaal väike ja probleemid ilmnevad eelkõige just nendes tööetappides.

Operaatorite hinnangul on kõige sagedasemad veatüübid seotud lõikenurga hälvetega ja toru nihkumisega pööramisel. Mõlemad operaatorid töid välja, et nurga täpsus võib varieeruda juhul, kui profiil ei ole täiesti sirge või kui toru on partiist tulenevalt „banaanikujuline”. Sellisel juhul nihkub toru keskpunkt ning masin ei suuda seda automaatselt kompenseerida, mis tulenevalt väiksest distantsist töö ajal, võib põhjustada ka otsiku rikkumist (Foto 2).

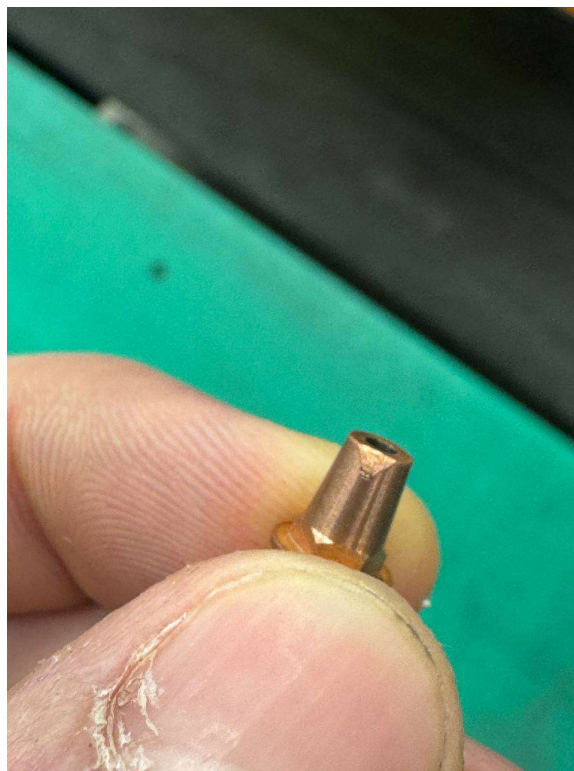


Foto 2. Vigastatud vase otsik

Materjali kvaliteeti hinnatakse partiipõhiselt, jälgides sirgsust ja paksust. Operaatorid märkisid, et kuigi materjal vastab nõuetele, on erinevate partiide vahel tuntavad erinevused, mis mõjutavad lõiketäpsust. Tootmisjuhi sõnul ei ole ettevõttes praegu realistlik liikuda kallimate ja ühtlasemate profiilide juurde, kuna tellimuste maht ei õigusta suuremaid laohoiukulusid.

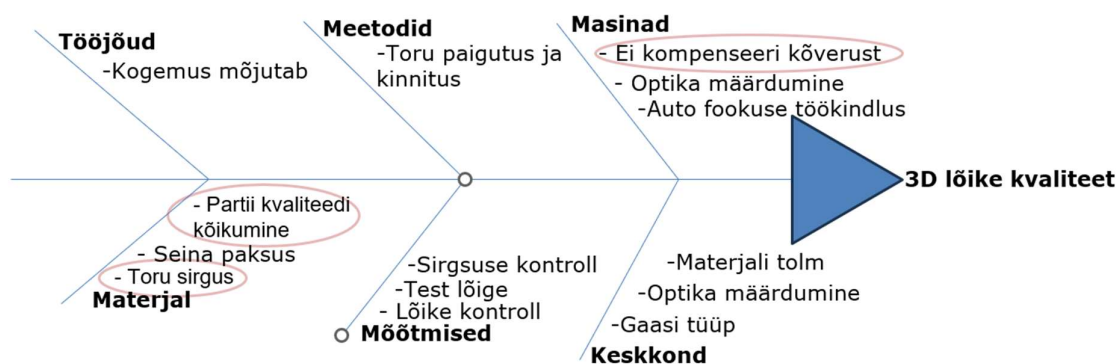
Seadme seadistamise ja dokumentatsiooni osas kirjeldasid operaatorid, et Nukon NK-T125 automaatika toimib üldiselt hästi ning programmide laadimine on lihtne. 3D lõikepea puhul seadistatakse põhifookus automaatselt, kuid lõike lõppväärtusi korrigeerib operaator ise.

Hoolduskava osas kinnitati, et masinat hooldatakse regulaarselt ning rikkeid ei ole viimastel kuudel esinenud. Optika puhastamist tehakse vastavalt vajadusele, eriti mustmetalli lõikamisel. Operaatorid ei ole teinud seni parendusettepanekuid, kuna pinki kasutatakse pigem harva 3D lõigete jaoks ja suuremaid probleemseid juhtumeid on olnud vähe.

Intervjuud näitasid, et kvaliteediprobleemid ei ole seotud masina üldise töökindlusega, vaid eelkõige materjali kvaliteedi kõikumise ja 3D lõigete spetsiifikaga. Need tähelepanekud loovad aluse järgnevas peatükis käsitletavale analüüsile.

## 2.7 Põhjuse-tagajärg diagrammi koostamine

3D lõikeprotsessi mõjutavate probleemide paremaks mõistmiseks koondati intervjuude, vaatlusandmete ja praktiliste näidete põhjal korduma kippuvad tegurid Ishikawa diagrammi. Diagramm jagab võimalikud praagi tekkepõhjused kuute peamisse kategooriasse: materjal, masinad, tööjõud, meetodid, mõõtmised ning keskkond. Selline jaotus võimaldab näha, millised tegurid mõjutavad lõike kvaliteeti kõige sagedamini ning milliseid valdkondi on vaja edaspidi täpsemalt analüüsida (Joonis 4).



Joonis 4. Tootmisprotsessi põhjuse-tagajärg diagramm

Materjali kategoorias osutusid olulisemateks põhjusteks torude sirguse kõrvalekalded ja seinapaksuse väikesed varieerumised. Need mõjutavad eriti 3D kaldlõikeid, kus profiili pööramisel nihkub detaili keskpunkt isegi siis, kui kõrvalekalle on väike. Kuna masin ei jälgi profiili kuju reaalselt, kandub see hälve otseselt lõikenurga täpsusesse.

Masina kategoorias esinesid peamiselt tehnilised piirangud, mis tulenevad seadme konstruktsioonist. Nukon NK-T125 ei kompenseeri materjali kõverust ning 3D pea töötab kõige täpsemalt sirgete profiilidega. Lisaks mõjutab mustmetalli lõikamisel tekkiv optika määrdumine lõike serva puhtust, mis võib põhjustada põletusjälgi või vajaduse järelviimistluseks.

Inimfaktori kategoorias tõid operaatorid välja, et osa lõikeparameetritest sõltub kogemusest, eriti uute detailide puhul. Dokumentatsioon ei kata kõiki erandeid ning seetõttu tehakse mõningaid seadistusi „tunde järgi“. See ei põhjusta suuremahulist praaki, kuid võib tekitada väikseid erinevusi korduvate detailide vahel.

Meetodite kategoorias avaldus probleemina see, et 3D lõikeprotsess on tundlik materjali paigutuse ja kinnituse suhtes. Kui toru ei ole pingis ühtlaselt toetud või keevisejoon satub ebasoodsasse asendisse, võib lõikenurk nihkuda. Samuti sõltub lõike lõppväärtuste seadistamine operaatori hinnangust.

Keskkonna kategoorias mõjutas kvaliteeti peamiselt see, millist gaasi parasjagu kasutati. Hapnikuga lõikamisel tekib mustust rohkem ning see mõjutab optika puhtust ja seega lõike serva kvaliteeti. Valgustus, ruumi temperatuur ja ümbritsev müra töö kvaliteeti märkimisväärselt ei mõjutanud.

Kokkuvõttes näitas diagramm, et 3D lõike kvaliteeti mõjutavad tegurid on omavahel seotud ning domineerivaks põhjuskategooriaks on materjal. Masina konstruktsioon ja operaatorite kogemused mängivad samuti rolli, kuid enamik probleeme algab profiili geomeetrias esinevatest kõrvalekalletest.

## **2.8 Probleemi määratlemine ja analüüsi tulemused**

Eelnevates alapeatükkides kogutud vaatlused, intervjuud ja põhjus-tagajärg analüüs näitasid, et ettevõtte lõikeprotsess toimib üldiselt stabiilselt ning suurem osa 2D lõigetest on kvaliteetsed. Kvaliteediprobleemid ilmnevad peamiselt siis, kui kasutatakse 3D lõikepead ja teostatakse kaldlõikeid torukujulistel profiilidele. Nii operaatorite kui tootmisjuhi hinnangul on just 3D lõigete puhul märgata suuremat varieeruvust lõikenurkades ja detailide kokkusobivuses.

Analüüsi käigus selgus, et peamine probleemi allikas on materjali geomeetria. Torude sirgsuse kõrvalekalded ja seinapaksuse väikesed erinevused põhjustavad lõikeprotsessi ajal toru keskpunkti nihkumise. Kuna Nukon NK-T125 ei jälgi profiili kuju reaajas ega kompenseeri neid hälbeid automaatselt, kanduvad need otse lõikenurga täpsusesse. See tähendab, et isegi väikene kõrvalekalle toru sirgsuses võib mõjutada lõike suunda ja põhjustada nurga hälbeid. Seinte paksus aga võib põhjustada masina tõrget, kuna keskmisest kõrgem nurga koht läheb vastu lõikeotsikut mis põhjustab seiskamist.

Intervjuud kinnitasid, et lõikeparameetrid ja masina töökindlus ei ole peamised praagi põhjustajad. Automaatne fookuse ja kõrguse seadistus töötab korrektselt, mida kontrollitakse ka test kujudel (Foto 3) ning seadme hooldus on sammuti regulaarne. Mõned käsitsi korrigeerimist nõudvad seaded tuginevad küll operatori kogemusele, kuid see ei ole korduvate probleemide peamine allikas. Probleemi kordumise mustrit oli näha eelkõige olukordades, kus toru materjal ei olnud täiesti ühtlase geomeetriaga.



Foto 3. Test kujude lõigetega valmisjupp

Nende tähelepanekute põhjal määratletakse uuritavaks probleemiks 3D lõikenurkade hälbed, mis tekivad materjali geomeetriliste kõrvalekallete ja masina piiratud kompensatsioonivõime koosmõjul. Probleem avaldub detailide kokkusobivuses (Foto 4), kus kahe lõigatud toru ühendus ei vasta nõutud nurkadele ja tekitab vajaduse täiendava korrigeerimise või ümberlõikuse järele.



Foto 4. Näide praagi koha mitteklopivusest

Analüüsi tulemusena võib järeldada, et edasine uurimine peab keskenduma just 3D lõikamise protsessile, selle täpsust mõjutavatele teguritele ning võimalustele, kuidas vähendada materjali ja masina koostoimest tulenevat lõikevariatsiooni. Need tulemused loovad aluse järgmises peatükis esitatavale empiirilisele analüüsile ja mõõtmistulemustele.

## **3 PARANDUSMEETMED JA PRAAGI VÄHENDAMINE**

### **3.1 Rakendatud Lean tööriistad**

Ettevõtte töökorralduse hindamisel kasutati Lean-mõtteviisi lihtsamaid ja enimlevinud tööriistu: 5S ja TPM (Total Productive Maintenance). Neid kasutati mitte lihtsalt teooriana, vaid praktiliste vahenditena, mille abil sai hinnata tehases juba olemasolevat töökeskkonda ja tuvastada kohti, kus võiks praagi tekkimist ennetada. Lean-rakenduste eesmärk ei olnud protsessi ümberkujundamine, vaid väikeste ja realistlike täiustuste leidmine, mis sobiksid ettevõtte igapäevase töökorralduse juurde.

Lean-tööriistade rakendamise tulemusena selgus, et ettevõtte põhiprobleem ei ole seotud töökoha korrastamise ega masina töökindlusega. 5S tase on üldiselt hea ning TPM tagab masina töökindluse vastavalt tootja reglementidele, mistõttu need tegurid ei ole praagi peamised põhjustajad. Küll aga ilmnes, et töökorraldust võiks täiustada just nendes etappides, kus mõjutegurid sõltuvad materjali kvaliteedist või väiksel määral lõikeprotsessi täpsest seadistamisest. Lean-tööriistade kasutamine aitas seega selgemalt piiritleda, millised probleemid tulenevad protsessist ja millised tegurid on seotud väliste mõjuritega, nagu materjali geomeetrised kõrvalekalded.

### **3.2 Praagi jälgimine ja mõõtmise tulemused**

Empiirilise analüüsi eesmärk oli välja selgitada, millised tegurid mõjutavad 3D lõikepeaga lõigatavate detailide täpsust ning kuidas need tegurid on seotud praagi tekkimisega. Kuna probleem ilmnes peamiselt ristkülikukujuliste torude 45° kaldlõigete juures, keskenduti kahele peamisele muutujale: toruprofiili seina paksusele ja profiili sirgusele ehk nn banaanikujule. Need kaks tegurit said valitud, kuna lõikeprotsess on geomeetriseliste kõrvalekallete suhtes tundlik ning masin ei kompenseeri toru kuju muutusi reaalajas.

Esimese sammuna dokumenteeriti lõikepinnad visuaalselt, et hinnata, kus piirkondades defektid kõige sagedamini esinesid. Seejärel said mõõdetud kümne valitud toruprofiili nelja sirge seina ja nelja nurgapiirkonna paksus, et identifitseerida, kas materjali paksuse varieerumine võiks põhjustada lõikepinna ebaühtlust või lõikenurga muutust. Mõõtmistulemused võimaldasid koostada seina paksuse statistilise ülevaate, mille põhjal oli võimalik hinnata selle teguri tegelikku mõju lõiketulemusele.

Teise mõjurina käsitleti toru võimalikku sirguskõrvalekallet ehk banaanikuju. Operaatorite kogemusel on just banaanikuju lõiketulemusele kõige olulisem tegur, eriti toru pöörlemisel, kus väiksemgi kõverus võib muuta keskpunkti asendit ja põhjustada lõikenurga hälbe. Erinevalt seina paksusest ei ole banaanikuju mõõtmine otstarbekas kvantitatiivses mõttes.

Pärast iga detaili lõikamist toru geomeetria muutub – detail lüheneb, sisepinged jaotuvad ümber ning toru võib kergelt kuju muuta. Selle tulemusel ei vasta ühe detaili mõõtmine enam algsele toru kujule ning mõõtetulemus kaotaks oma mõtte. Sama profiili sirgsus sõltub ka sellest, kuidas toru parajasti toetub, millisel küljel see asub, kui palju seda masin kannab ning millised on profiili sisepinged.

Seetõttu ei annaks banaanikuju numbriline mõõtmine ühes lõikes tõeset ega üldistatavat tulemust. Selle asemel hinnati sirgsust visuaalse kontrolli käigus nelja palli skaalal tekkivate asendimuutuste kaudu, mis annab parema indikatsiooni võimaliku toru tegelikust käitumisest lõikeprotsessi ajal, kus 1 on väga halb ja ebaühtlane profiil ja 4 on peaaegu sirge. (Tabel 1).

Tabel 1. Mõõtmise tulemused

Toru nr	Keskmine seinapaksus mm	Keskmine nurgapaksus mm	Visuaalne sirgsus (1 – kõver, 4 - sirge)
1	1.61	1.99	3
2	1.60	2.00	4
3	1.62	1.97	2
4	1.60	2.01	3
5	1.62	1.99	4
6	1.60	1.97	2
7	1.60	2.01	3
8	1.59	1.97	1
9	1.62	1.99	4
10	1.61	1.98	3

Mõõtmistulemused näitasid, et torude sein- ja nurga paksus püsis kõigi proovide puhul suhteliselt ühtlane ning jäi lubatud tolerantsidesse. Samas esines märgatavaid erinevusi torude sirgsuses, mida hinnati visuaalse skaala alusel. Eriti eristus toru nr 8, mille sirgsus hinnati madalaimaks, kuigi selle sein- ja nurga paksus ei erinenud oluliselt teistest mõõdetud torudest. See viitab, et profiili sirgsus ei ole otseselt seotud paksuse varieerumisega, vaid tuleneb tõenäoliselt tootmis- või transpordiprotsessist. Kehva sirgsusega torude kasutamisel 3D lõikeprotsessis suureneb risk lõike ebastabiilsuseks, kuna toru pöörlemisel muutub selle keskpunkti asend rohkem, mis võib põhjustada lõikenurga hälbeid ning suurendada lõikeotsiku ja materjali kokkupuute ohtu.

Peatüki eesmärk on hinnata, milline kahest tegurist – seinapaksuse varieerumine või banaanikuju – põhjustab lõikepinnal esinevad hälbed ja detailide kokkusobivuse

probleemid. Uurimistulemustest ilmnes selgelt, et seinä paksus püsib tolerantsides ega mõjuta lõiketulemust märkimisväärselt, samas kui banaanikuju põhjustab toru pöörlemisel lõikenurga muutuse ning on seetõttu praagi tekkepõhjusena oluliselt määravam.

### **3.2.1 Seinte paksuse mõju tulemusele**

Esimene eesmärk oli selgitada, kas ruudukujulise toruprofiili seinä ja nurkade paksuse varieerumine võib mõjutada 3D lõike kvaliteeti ning olla praagi tekkepõhjuseks. Eelkõige sai keskendatud küsimusele, kas materjali geomeetriselised erinevused võivad lõikeprotsessi käigus põhjustada probleeme lõikenurga täpsuse või lõikepea töökindlusega.

Mõõtmiste käigus hinnati toruprofiilide seinä paksust neljal sirgel küljel ning paksust nurgapiirkondades. Mõõtmised teostati mitmel toruprofiilil, et saada ülevaade nii seinä paksuse keskmistest väärtustest kui ka võimalike kõrvalekallete suurusest. Mõõtmise tulemused näitasid, et sirgete külgede paksus püsis üldjuhul stabiilselt. Seetõttu ei olnud võimalik tuvastada otsest seost seinä paksuse varieerumise ja lõike kvaliteedi halvenemise vahel.

Erinevusi ei ilmnenu ka nurga paksuse mõõtmisel. Nurkade paksus oli sammuti üldjuhul stabiilne. Kahtlus tekkis kui 3D lõikeprotsessi ajal pöörlev toruprofiil võis puudutada lõike otsikut, ning küsimus oli, kas seos oli ka paksuse muutumise tõttu. Kõrgem nurk võib lõikepinna tegeliku kõrguse pöörlemise käigus ajutiselt suurenda. Sellistes olukordades tekkis risk, et materjal puutub kokku lõikeotsikuga.

Vaatluste põhjal ei olnud võimalik kinnitada, et toruprofiili seinä või nurkade paksuse varieerumine oleks iseseisvalt põhjustanud lõikeotsiku kahjustumist. Samuti ei ilmnenu seost sirgete, kui ka nurga seinte paksuse ja lõikeprobleemide vahel. Seetõttu võib järeldada, et paksuse erinevused jäävad käesolevas tootmiskeskkonnas tasemele, mis ei ole 3D lõike kvaliteedi seisukohast määrav.

### **3.2.2 Profiili sirguse mõju tulemusele**

Teine eesmärk oli hinnata toruprofiili sirguse ehk nn banaanikujuisuse mõju 3D lõike kvaliteedile. Eelnevalt selgus, et toruprofiili seinä ja nurkade paksuse varieerumine ei ole lõikeprobleemide tekkepõhjus. Seetõttu keskenduti edasi analüüsis materjali geomeetriselisele sirgusele, mille mõju 3D lõikeprotsessile on praktikas olulisem.

Toruprofiili banaanikujuisus tähendab olukorda, kus profiil ei ole kogu pikkuses sirge, vaid on kergelt kõver. Selline kõrvalekalle vaatlusperioodi jooksul ei olnud probleemiks tavapärase 2D lõikamise korral, kuid 3D lõikeprotsessis muutub see oluliseks, kuna detail pöörleb lõikamise ajal ning lõikenurga täpsus sõltub palju rohkem profiili keskjoone

asendist. Kui profiil ei ole sirge, nihkub pöörlemise käigus selle keskpunkt, mis võib põhjustada lõikenurga ja lõikejoone ebatäpsusi.

Banaanikuju mõju ilmneb eelkõige 45° kaldlõigete teostamisel. Profiili pöörlemisel võib kõveruse tõttu lõikepinna tegelik asend ajutiselt muutuda, mille tulemusel ei ole lõikepea ja materjali vaheline nurk kogu lõike vältel konstantne. See omakorda võib mõjutada lõikepinna kvaliteeti ning kõverus suurendab riski, et materjal puutub kokku lõikeotsikuga. Erinevalt seinapaksuse varieerumisest ei ole tegemist lokaalse kõrvalekaldega, vaid kogu profiili ulatuses esineva geomeetrilise probleemiga.

Toruprofiili sirguse kvantitatiivset mõõtmist ei peetud käesolevas töös otstarbekaks. Pärast lõikamist muutub detaili pikkus ning sisepinged jaotuvad ümber, mistõttu ei ole võimalik saada usaldusväärseid ja võrreldavaid mõõtetulemusi enne ja pärast lõikamist. Lisaks sõltub profiili tegelik kuju mitmest muutujast, sealhulgas toru pikkusest, toestuste asendist, pöörlemise hetkeseisust ning gravitatsiooni mõjust. Seetõttu hinnati banaanikujulisust visuaalse kontrolli ja lõikeprotsessi vaatluse põhjal.

Vaatluste ja operaatorite tagasiside põhjal selgus, et just profiili banaanikujulisus on peamine tegur, mis mõjutab 3D lõike stabiilsust ja kvaliteeti. Eriti probleemseks osutusid pikemad ja ebaühtlasemad profiilid, mille puhul lõikeprotsessi ajal tekkisid lõikenurga hälbed või lõikepinna ebaühtlus. Sellest tulenevalt võib järeldada, et toruprofiili sirgus on 3D lõike kvaliteedi seisukohast olulisem tegur kui materjali seinapaksuse varieerumine.

### **3.3 Uued töövõtted ja seadistuste täpsustamine**

Töö tulemused ei toonud kaasa uusi töövõtteid ega teiste seadistuste kohest kasutuselevõttu tootmises. Selle põhjuseks on asjaolu, et banaanikujulisuse mõju 3D lõike kvaliteedile oli ettevõttes juba varasemalt teada olnud ning operaatorid oskasid sellega igapäevatoos arvestada. Enne käesoleva uurimistöö läbiviimist ei olnud aga selle mõju süstemaatiliselt analüüsitud ega eristatud teistest võimalikest mõjuteguritest.

Uurimistöö käigus täpsustati olemasolevat teadmist, eristades selgelt torude seinapaksuse mõju profiili sirguse mõjust. Seinte ja nurkade paksuse mõõtmised näitasid, et nende varieerumine ei ole 3D lõike kvaliteedi seisukohast määrav. Täiendavalt hinnati kümne toruprofiili banaanikujulisust neljapalliskaala alusel, mis võimaldas anda kvalitatiivse hinnangu profiilide sirgusele ning võrrelda nende omavahelist erinevust.

Analüüsi tulemusena kinnitati, et senine praktika, arvestada 3D lõike kasutamisel eelkõige profiili sirgusega ning võimalusel vältida ebaühtlasemate profiilide kasutamist 3D lõike korral – on põhjendatud. Käesolev töö ei muutnud töövoogu ega seadistusi otseselt, kuid

aitas teadlikumalt mõista, millised tegurid mõjutavad 3D lõike stabiilsust kõige enam. Uuringu järel teadvustati riske süstemaatilisemalt, kuid kuna pärast analüüsi ei ole ettevõttes tellitud uusi 3D lõiget nõudvaid detaile, ei ole olnud võimalik hinnata võimalike täiendavate muudatuste rakendamist praktikas.

### **3.4 Lahendusettepanekud praagi ennetamiseks**

Lahendusettepanekuid tehakse 3D lõikeprotsessis tekkiva praagi ennetamiseks, tuginedes läbiviidud analüüsi tulemustele. Lahendusi hinnati eelkõige nende tehnilise teostatavuse ja majandusliku põhjendatuse alusel, arvestades ettevõtte tegelikku tootmismahtu ja probleemide esinemissagedust.

Esimese võimaliku lahendusena võib käsitleda geometriat kompenseeriva torulõikepingi kasutuselevõttu, mis suudab lõikamise ajal arvestada profiili sirgsuse ja kuju kõrvalekalletega. Sellised seadmed eksisteerivad (BLM Group) ning nende kasutamine võimaldaks vähendada lõikeprotsessi praaki. Samas on nimetatud lahendus seotud märkimisväärse investeeringuga, kuna vastavat tüüpi seadmete maksumus on oluliselt kõrgem võrreldes ettevõttes kasutusel oleva laserpingiga. Arvestades, et 3D lõikeid moodustab ligikaudu 10% kogutoodangust ning praagi osakaal nende seas on väike, ei ole selline investeering käesolevas tootmiskontekstis majanduslikult põhjendatud.

Teise võimalusena saab kaaluda kvaliteetsema toormaterjali kasutamist või tarnija vahetust. Kuigi kõrgema kvaliteediga materjal võib vähendada profiili sirgsuse kõrvalekaldeid, vastab praegune tarnija kehtivatele tolerantsidele ning probleem ilmneb peamiselt 3D lõikeprotsessi puhul. Tarnija vahetus tähendaks suuremaid tellimiskoguseid, pikemaid tarneaegu ning vajadust materjali ladustamiseks, mis suurendaks kulusid ja seaks täiendavalt ettevõtte ressursse. Arvestades, et probleem puudutab suhteliselt väikest osa toodangust, ei ole ka see lahendus proportsionaalne probleemi ulatusega.

Kolmanda ja käesoleva töö kontekstis kõige otstarbekama lahendusena käsitletakse detaili konstruktsiooni muutmist viisil, mis võimaldab vältida 3D lõike kasutamist. Lahenduse eesmärk on saavutada vajalik 90° nurk detailide ühendamisel ilma ruumilise kaldlõiketa. (Foto 5).

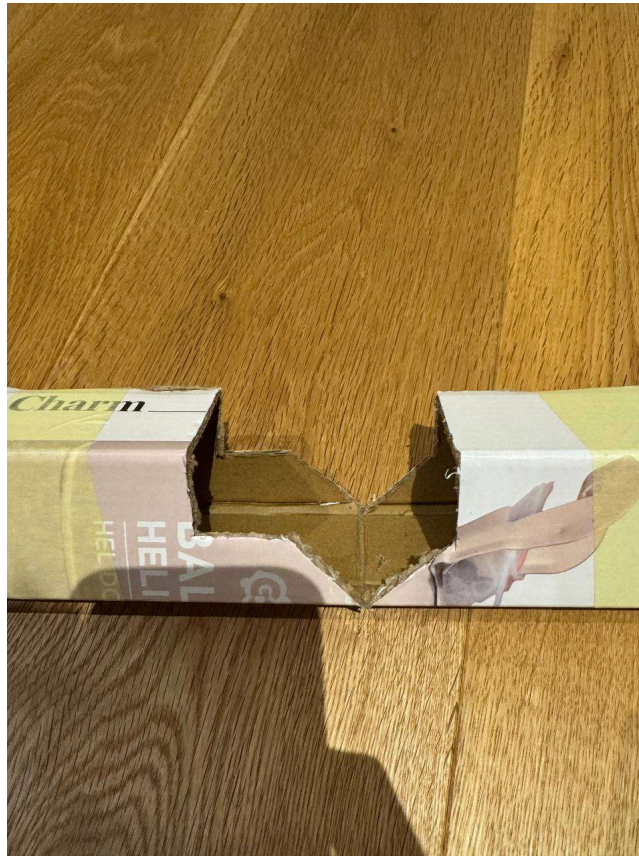


Foto 5. Näidis pakutava lahenduse lõikest

Selleks teostatakse lõiked ainult kolmel profiili pinnal, jättes ühe seina lõikamata, et säilitada detaili geomeetriline stabiilsus. Lõigatavatel külgpindadel tehakse sirged lõiked ning seejärel 45° nurga all lõige lõikamata seina suunas. Detailide lõplik kuju ja 90° ühendus saavutatakse algsest painutuse ja siis keevituse teel (Foto 6).

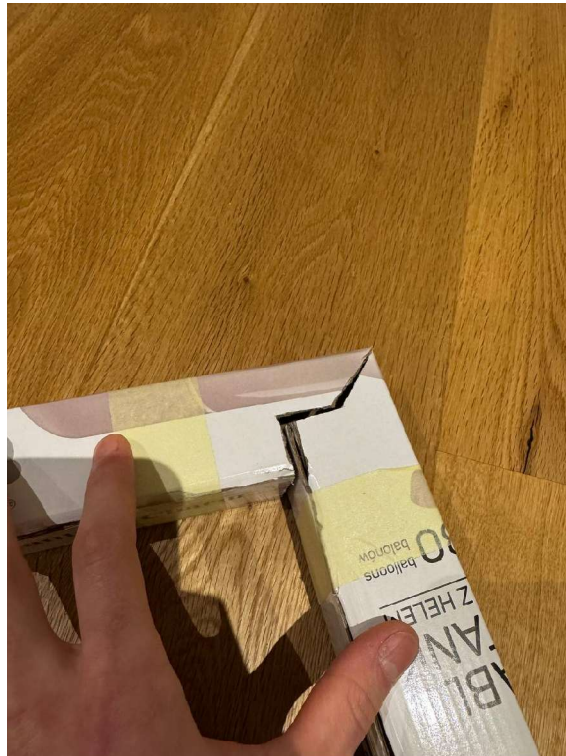


Foto 6. Näidis kokkupanduna

Selline lahendus põhineb 2D lõike kasutamisel, kus detaili pööratakse lõikamise ajal, kuid lõikepea liigub alati tasapinnaliselt. See võimaldab vältida 3D lõikeprotsessiga seotud riske, sealhulgas profiili banaanikujulisusest tulenevat lõikepea ja materjali kontakti ohtu. Lisaks ei nõua konstruktsiooni muutmine täiendavaid investeeringuid seadmetesse ega toormaterjali kvaliteedi tõstmist, vaid eeldab üksnes detaili konstruktsioonilise lahenduse ümbermõtestamist. Kuid ka antud lahendusel on mõned puudujäägid. Esiteks tähendab selline ühendus seda et detaili kogupikkuseks ei saa olla rohkem kui hetkel kasutatav 4m pikk profiil. Lisaks teiseks mureks on antud lahenduste algne konfigureerimine ja salvestamine andmebaasis, mis on ajanõudev kuna iga nurga kraadi jaoks on vaja uued andmed välja mõelda. Kuid kui antud konfigureerimine saab tehtud, on töövoog edasiselt kiire.

Lisaks oli ka katsetatud teisi lõike variante, kus detailid oleksid eraldatud (Foto 7), kuid antud juhul ei olnud võimalik loobuda avast. See omaette tähendaks detaili väiksemat vastupidavust kinnituskohas ning avatust välistingumustele.



Foto 7. Üks pakutavatest variantidest

Kokkuvõttes võib järeldada, et detaili kuju muutmine on käesolevas tootmiskeskonnas kõige kuluefektiivsem ja tehniliselt põhjendatum lahendus 3D lõikega seotud praagiprobleemide ennetamiseks, võimaldades säilitada tootmisprotsessi stabiilsuse ning vähendada riske ilma märkimisväärsete lisakuludeta.

### **3.5 Rakendatud muudatuste mõju analüüs**

Käesoleva uurimistöö raames ei rakendatud tootmises koheselt uusi töövõtteid ega muudetud lõikeparameetreid või töövoogu. Selle põhjuseks oli asjaolu, et toruprofiili banaanikujulisuse mõju 3D lõike kvaliteedile oli ettevõttes juba varasemalt teada ning operaatorid oskasid sellega igapäevatoos arvestada.

Mõõtmistulemused kinnitasid, et seina paksus püsib üldjuhul ühtlasena, ega ole lõiketulemuse kvaliteedi seisukohalt määrav, samas kui banaanikujulisus mõjutab toru pöörlemisel keskpunkti asendit ning põhjustab lõikenurga hälbeid ja lõikepinna ebaühtlust. Seetõttu saab mõju analüüsi vaadelda eelkõige kui otsustamise ja riskide juhtimise paranemist: tootmises kinnitati senist praktikat, kus 3D lõigete puhul pööratakse suuremat tähelepanu profiili sirgsusele ning võimalusel välditakse ebaühtlasemate profiilide kasutamist 3D lõike korral.

Lisaks analüüsiti lahenduseettepanekuid, mille eesmärk on vähendada 3D lõikega seotud riske tulevikus. Nendest kõige kuluefektiivsemaks hinnati detaili kuju muutmist selliselt, et kriitilised kohad oleks võimalik teostada 2D lõikega (detaili pöörates), vältides 3D lõikepeaga seotud tundlikkust materjali geometria suhtes. Selle lahenduse eeldatav mõju oleks eelkõige:

- 3D lõike kasutuse vähenemine seal, kus see pole konstruktsiooniliselt vältimatu;
- potentsiaalselt stabiilsem lõikekvaliteet ja väiksem praagirisk nurkade piirkonnas.

Samas tuleb arvestada, et konstruktsiooni muutmisel on ka piirangud. Näiteks võib see seada piirid detaili kogupikkusele, või algsele ajakulule. Need tegurid ei pruugi olla probleemiks pärast esmast seadistamist, kuid lühiajaliselt suurendavad ettevalmistusaega.

Kuna pärast analüüsi ei ole ettevõttes tellitud uusi 3D lõiget nõudvaid detaile, ei olnud võimalik hinnata rakendatud muudatuste mõju reaalse "enne-pärast" võrdlusena. Seetõttu käsitletakse mõju analüüsis eelkõige arusaamise tõstmiseks.

### **3.6 Järeldused ja soovitused edaspidiseks**

Läbiviidud mõõtmised, vaatlused ja intervjuud näitasid, et 3D lõike kvaliteeti mõjutab kõige enam toruprofiili sirgsus ehk nn banaanikujulisus, mitte niivõrd profiili seina või nurkade paksus.

Mõõtmistulemused kinnitasid, et profiili seinte ja nurkade paksus püsib üldjuhul lubatud tolerantsides ning nende mõju lõiketulemusele on minimaalne. Samas põhjustab banaanikujuline profiil toru pöörlemisel lõikeprotsessi ebastabiilsust, mis võib viia lõikenurga ebatäpsuse ning äärmuslikel juhtudel ka lõikeotsiku ja materjali kokkupuuteni. See omakorda suurendab seisakute ja hooldusvajaduse riski.

Analüüsi tulemusena selgus, et ettevõttes kasutusel olev senine praktika on põhjendatud ning operaatorite kogemus aitab võimalikke probleeme ennetada. Käesolev töö ei toonud kaasa otseseid muudatusi tootmisprotsessis, kuid võimaldas olemasoleva teadmise raagi põhjustest süstematiseerida ning eristada peamised mõjutegurid kõrvalistest.

Edaspidiseks on soovitatav:

- vältida 3D lõike kasutamist juhtudel, kus konstruktsiooniliselt on võimalik kasutada 2D lõikel põhinevaid lahendusi;
- arvestada 3D lõiget planeerides eelkõige profiili sirgsusega ning hinnata materjali sobivust enne tootmise alustamist;
- kasutada konstruktsiooni muutmist lahendusena, mis vähendab sõltuvust materjali geomeetriast;
- dokumenteerida probleemsed juhtumid ja tähelepanekud, et toetada otsuste tegemist tulevaste projektide puhul.

Kuna pärast analüüsi ei ole ettevõttes tellitud uusi 3D lõiget nõudvaid detaile, ei olnud võimalik hinnata soovitatud lahenduste mõju reaalses tootmises. Tulevikus võiks sarnase

uurimistöö käigus koguda andmeid pikema ajaperioodi jooksul ning võrrelda praagiprotsenti enne ja pärast võimalike muudatuste rakendamist. See annaks täpsema ülevaate parendusmeetmete tegelikust mõjust tootmisprotsessile.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärk oli selgitada välja 3D lõikepeaga laserpingi kasutamisel tekkiva praagi peamised põhjused ning pakkuda välja praktilisi lahendusi praagi vähendamiseks tootmisettevõttes Weldmet Solution OÜ. Töö keskendus uue 3D torulõikepingi kasutuselevõttuga seotud probleemidele, kus tootmisprotsessid ja seadistused ei olnud veel täielikult välja kujunenud ning see mõjutas otseselt lõikekvaliteeti ja tootmise efektiivsust.

Töö teoreetilises osas käsitleti laserlõikuse üldpõhimõtteid, 2D ja 3D lõikepeade erinevusi, lõikekvaliteeti mõjutavaid tegureid ning praagi olemust tootmises. Samuti anti ülevaade Lean-põhimõtetest ja tööriistadest, nagu 5S ja TPM, mis aitavad toetada tootmise stabiilsust, vähendada praaki ja parandada seadmete töökindlust. Teoreetiline raamistik lõi aluse empiirilise osa analüüsile ning aitas mõista, millised tegurid võivad 3D lõikeprotsessis põhjustada korduvaid kvaliteediga seotud probleeme.

Empiirilises osas analüüsiti ettevõtte kasutuses olevat 3D lõikepeaga laserpinkide ning selle töövoogu. Andmete kogumiseks viidi läbi intervjuud laserpingi operaatoritega ja tootmisjuhiga ning jälgiti lõikeprotsessi käigus tekkivaid praagijuhtumeid. Kogutud info põhjal tuvastati peamised praagi tekkepõhjused, milleks osutusid eelkõige materjalide mõõtude ja sirguse erinevused. Põhjus-tagajärg diagrammi abil selgus, et paljud praagijuhtumid olid seotud mitme teguri koosmõjuga, mitte üksiku vea või rikkega.

Töö kolmandas peatükis käsitleti võimalusi praagi vähendamiseks lõikeprotsessi loogika ja lõikegeomeetria muutmise kaudu. Analüüsi käigus keskenduti sellele, kuidas detaili lõikamise järjekord, lõikesuund ja lõike algus- ning lõpp punkt mõjutavad lõike kvaliteeti ja praagi tekkimist.

Töö käigus selgus, et teatud 3D lõikepeaga lõikekujude ja -järjestuste puhul suureneb oht, et lõike lõppfaasis tekivad ebatäpsused või deformatsioonid, mis võivad viia praagini. Lõikeprotsessi ümbermõtestamine ja sobivama lõikeloogika kasutamine võimaldab neid riske vähendada ning aitab teoreetiliselt ennetada praagi tekkimist juba lõike planeerimise etapis.

Lõputöö käigus täideti kõik püstitatud uurimisülesanded. Analüüsi tulemusena selgitati välja peamised 3D lõike kvaliteeti mõjutavad tegurid ning hinnati nende mõju lõikeprotsessi stabiilsusele. Töö põhieesmärk – leida võimalusi 3D lõikega seotud praagi vähendamiseks – sai täidetud, kuna uurimistöö käigus pakuti välja praktiline lahendus, mis võimaldab teatud juhtudel vältida 3D lõike kasutamist ning vähendada seeläbi sõltuvust materjali geomeetristest kõrvalekalletest. Uurimistulemused kinnitasid, et pakutud

lahendus on tootmiskeskonna kontekstis tehniliselt põhjendatud ja potentsiaalselt rakendatav.

## SUMMARY

The aim of this thesis was to identify the main causes of scrap occurring during the use of a 3D laser cutting head and to propose practical solutions for reducing scrap in the manufacturing company Weldmet Solution OÜ. The work focused on problems related to the introduction of a new 3D tube laser cutting machine, where production processes and setups had not yet been fully established in the company, which directly affected cutting quality and production efficiency.

The theoretical part of the thesis addressed the general principles of laser cutting, the differences between 2D and 3D cutting heads, factors influencing cutting quality, and the nature of scrap in manufacturing. In addition, an overview of Lean principles and tools, such as 5S and TPM, was provided, as these support production stability, help reduce scrap, and improve equipment reliability. The theoretical framework formed the basis for the analysis of the empirical part and helped to understand which factors may cause recurring quality-related problems in the 3D cutting process.

In the empirical part, the 3D laser cutting machine used by the company and its workflow were analyzed. Data were collected through interviews with laser machine operators and the production manager, as well as by observing scrap cases occurring during the cutting process. Based on the collected information, the main causes of scrap were identified, which were primarily related to variations in material dimensions and straightness. The cause-and-effect diagram revealed that many scrap cases were the result of the combined effect of several factors rather than a single error or failure.

The third chapter of the thesis examined possibilities for reducing scrap through changes in cutting process logic and cutting geometry. The analysis focused on how the cutting sequence, cutting direction, and the starting and ending points of the cut affect cutting quality and the occurrence of scrap.

The study showed that for certain cutting shapes and sequences when using a 3D cutting head, the risk of inaccuracies or deformations increases in the final phase of cutting, which may lead to scrap. Rethinking the cutting process and applying a more suitable cutting logic make it possible to reduce these risks and theoretically help prevent scrap already at the cutting planning stage.

During the bachelor's thesis, all of the defined research tasks were fulfilled. As a result of the analysis, the main factors influencing the quality of 3D cutting were identified, and their impact on the stability of the cutting process was assessed. The main objective of the thesis - to find possibilities for reducing scrap related to 3D cutting - was achieved, as a

practical solution was proposed during the research that enables, in certain cases, the avoidance of 3D cutting and thereby reduces dependence on geometrical deviations of the material. The research results confirmed that the proposed solution is technically justified and potentially applicable in the context of the production environment.

## VIIDATUD ALLIKAD

- [1] TRUMPF Group, „Laser cutting – Applications and principles“. Vaadatud: 15. september 2025. [Online]. Available at: [https://www.trumpf.com/en\\_INT/solutions/applications/laser-cutting/](https://www.trumpf.com/en_INT/solutions/applications/laser-cutting/)
- [2] Nukon Laser Cutting Machines, „NK-T125 Tube Laser Cutting Machine“. Vaadatud: 17. september 2025. [Online]. Available at: <https://www.nukon.com.tr/en/products/nk-t125/>
- [3] TMT Steel, „3D laser cutting of long products“. Vaadatud: 19. september 2025. [Online]. Available at: <https://tmtsteel.co.th/en/long-products/3d-laser-cutting/>
- [4] Shenchong Group, „Laser cutting quality control: important factors and solutions“. Vaadatud: 22. september 2025. [Online]. Available at: <https://www.shenchong.com/laser-cutting-quality-control-important-factors-and-solutions.html>
- [5] K. Salonitis jt, „Analysis of laser cutting process parameters“. *Applied Sciences*, 10(14), 2020. Vaadatud: 24. september 2025. [Online]. Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/14/4956>
- [6] TWI Global, „Cutting processes – laser cutting“. Vaadatud: 26. september 2025. [Online]. Available at: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/cutting-processes-laser-cutting-052>
- [7] Xometry, „Laser cutting parameters“. Vaadatud: 29. september 2025. [Online]. Available at: <https://www.xometry.com/resources/sheet/laser-parameters/>
- [8] Metal-Interface, „Laser cutting sheet metal: protective film – 4 key points“. Vaadatud: 1. oktoober 2025. [Online]. Available at: <https://www.metal-interface.com/articles-news/t/technical-repository/laser-cutting-sheet-metal-protective-film-4-key-points>
- [9] American Society for Quality, „Quality Management System (QMS)“. Vaadatud: 3. oktoober 2025. [Online]. Available at: <https://asq.org/quality-resources/quality-management-system>
- [10] Quality Magazine, „The gage selection conundrum“. Vaadatud: 6. oktoober 2025. [Online]. Available at: <https://www.qualitymag.com/articles/96044-the-gage-selection-conundrum>

- [11] American Society for Quality, „Cost of Quality (COQ)“. Vaadatud: 8. oktoober 2025. [Online]. Available at: <https://asq.org/quality-resources/cost-of-quality>
- [12] The Fabricator, „What you need to know about laser tube cutting“. Vaadatud: 10. oktoober 2025. [Online]. Available at: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/lasercutting/what-you-need-to-know-about-laser-tube-cutting>
- [13] TWI Global, „What is laser cutting?“. Vaadatud: 13. oktoober 2025. [Online]. Available at: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-laser-cutting>
- [14] The Fabricator, „The dirt on laser lenses“. Vaadatud: 15. oktoober 2025. [Online]. Available at: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/lasercutting/the-dirt-on-laser-lenses>
- [15] TWI Global, „What is Lean manufacturing?“. Vaadatud: 17. oktoober 2025. [Online]. Available at: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-lean-manufacturing>
- [16] Lean Production, „5S methodology“. Vaadatud: 20. oktoober 2025. [Online]. Available at: <https://leanproduction.com/5s/>
- [17] American Society for Quality, „Fishbone (Ishikawa) diagram“. Vaadatud: 22. oktoober 2025. [Online]. Available at: <https://asq.org/quality-resources/fishbone>
- [18] S. Nakajima, Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. Cambridge, MA: Productivity Press, 1988.

## Lisa 1. Töötajate küsimustik ja vastused

1. Kui kaua olete töötanud laserpingiga Nukon NK-T125?

Vastaja A: 2 aastat

Vastaja B: 1,5 aastat

2. Kui sageli kasutate 3D lõikepead (lainurk, kaldlõiked, torud/profiilid)?

Vastaja A: Väga sõltub tellija töö spetsiifikast, ca 10%

Vastaja B: Ca 10%

3. Milliseid lõikevea tüüpe esineb kõige sagedamini?

Vastaja A: TOP 1 on nurga täpsus; vähesel määral võib esineda nihkumist toormaterjali kvaliteedi tõttu

Vastaja B: Nurga lõige, peamiselt 40 toruga, must- ja roostevaba materjal

4. Millal tekivad lõikevead kõige sagedamini?

Vastaja A: Materjali vahetusel

Vastaja B: Uue materjaliga

5. Kuidas hindate materjalide kvaliteeti (sirgsus, keevisejoon, pinnaseisund)?

Vastaja A: Väga sõltub partiist (sirgsus, paksus); materjal tellitakse Eestist, edasine päritolu teadmata

Vastaja B: Väga sõltub partiist; mustmetall on kõige halvem

6. Kas seadme seadistuste dokumentatsioon on piisavalt arusaadav?

Vastaja A: Tulenevalt pingi spetsiifikast pigem vähe dokumenteeritud

Vastaja B: Tulenevalt pingi spetsiifikast pigem vähe dokumenteeritud

7. Kui selge on 3D lõikepea fookuse ja kalde seadistamise protseduur?

Vastaja A: Selge; seadistused käivad automaatselt, lõpp-parameetrid seadistatakse ise

Vastaja B: Automaatne

8. Kui sageli peate löike uuesti tegema (ümberlõikus)? Miks?

Vastaja A: Väga harva; kui ava jäi tegemata, tehakse lisalõige

Vastaja B: Kui tuleb timmida parameetreid uue või harva kasutatava materjali tõttu

9. Millised seadme osad vajavad kõige sagedamini reguleerimist?

Vastaja A: Seadistuse parameetrid, tugede kõrgus, klambrid (kuni 90 mm toru; suuremate puhul klambri vahetus)

Vastaja B: Taga- ja eestugi, padrunid (klambrid)

10. Kas teil on olnud probleeme toru kinnituse ja positsioneerimisega?

Vastaja A: Ei ole

Vastaja B: 1 kord masina kasutamise jooksul; üks klamber oli liiga väike ja järgmine veidi liiga suur

11. Kui hästi töötab praegune hoolduskava? Mis võiks olla parem?

Vastaja A: 2x aastas, toimib hästi

Vastaja B: Hetkel ei ole vigu olnud

12. Kas olete ise teinud ettepanekuid parendamiseks? Kas neid on rakendatud?

Vastaja A: Ei ole

Vastaja B: Jah – parameetrite soovitusel ja programmi löikejärjekorrad (ettevalmistav pool)

13. Millised täiendavad koolitused aitaksid tööd täpsemaks teha?

Vastaja A: Kuna pinki ei kasutata väga tihti, märkimisväärset vajadust hetkel ei ole

Vastaja B: Alguses kulus ca 1 kuu parameetrite paika saamiseks; praegu on asi selge

## Lisa 2. Tootmisjuhi küsimustik ja vastused

1. Miks valiti ettevõttesse just Nukon NK-T125 laserpink?

Kvaliteedi ja hinna suhe oli paigas.

2. Milliseid alternatiivseid seadmeid kaaluti enne otsuse tegemist?

Oli kaalutud BLM (TOP 1 maailmas) ja HSG (Hiina).

3. Millised olid ootused seadme kasutuselevõtul (tootlikkus, kvaliteet, täpsus)?

3D lõikepea, kuni 3 mm alumiinium, kuni 6 mm roostevaba ning kuni 6 m pikkused profiilid ja maksimaalselt 160 × 160 ristlõige.

4. Kuidas on korraldatud torude ja profiilide lõikeprotsessi töövoog ettevõttes?

Saadakse lõikeprofiilid. Need vaadatakse arvutis üle, seejärel saadetakse pingi arvutisse. Pingis valitakse vastav profiil, pannakse õige materjal pinki, tehakse testlõiked ja seejärel põhitöö. Lõpus tehakse korrastus ja puhastus.

5. Kui suur osa toodangust eeldab 3D torulõikamist ja kas selle osakaal on muutumas?

Koguaeg kasvab. Hetkel on hinnanguliselt 1–2% toodangust selline, kus kasutatakse 3D lõikepea maksimaalseid võimalusi.

6. Kuidas hindate ettevõttesse saabuvate torude ja profiilide kvaliteeti (sirgsus, keevisejoon, tolerantsid)?

Hinnanguliselt 3/5, pigem kasin.

7. Kuidas jälgitakse torulõikuse praagi taset ja mis on peamised praagi kategooriad?

Olemas varasemates vastustes operaatorite poolt.

8. Milliseid Lean-põhimõtteid kasutatakse praegu tootmise korraldamisel?

Hetkel kasutatakse pigem ERP Monitor tarkvara, kus kõik töötajad näevad, mis töö on ja kui kaugel see parasjagu on.

9. Mis on torulõikuse protsessi peamised pudelikaelad või ajakadusid tekitavad etapid?

Pingi juurutamine ettevõttes alles käib. Kuna pingi potentsiaal ei ole veel saavutatud, siis hetkel pudelikaelu ei teki.

10. Kas ettevõttes rakendatakse ametlikku 5S süsteemi?

Otseselt ei ole, kuid üritatakse jälgida selle põhimõtteid.

11. Kuidas on korraldatud Nukoni tööala korrastus, puhtus ja visuaalsed märgistused?

On eraldi arvuti ala, tööriistade ala, materjali ala (eraldi valmis toodang, väike praaginurk ja toormaterjal kasutamiseks), eraldi pink pikkade toodete vastuvõtmiseks, eraldi gaaside ala ning eraldi otsiku varuosade ala.

12. Kuidas on korraldatud Nukon NK-T125 hooldusplaneerimine (regulaarhooldus, dokumenteerimine, vastutus)?

Operaatoril on vastav koolitus, millal ja mida hooldada. Mehaanik teeb 1 kord aastas suure hoolduse suvel ning 2 korda aastas vahehoolduse.

13. Kas seadme töökindlus on vastanud ootustele ja kas on esinenud ootamatuid seisakuid?

Seadme töökindlus on vastanud ootustele. Ootamatuid seisakuid ei ole olnud, probleemid on olnud seotud materjali profiili kvaliteediga.

14. Millised parendusettepanekud on seotud olnud torulõikeprotsessi või seadme kasutamisega?

Ei ole veel tulnud.

15. Kas näete vajadust täiendava koolituse, lisavarustuse või tarkvaraliste uuenduste järele?

Elukestev õpe. Operaatoreid saadetakse koolitustele ja nad õpivad pidevalt masinat paremini tundma.

16. Millised on ettevõtte lähiaastate plaanid torulõikevõimekuse või automatiseerimise osas?

Masina vahetust kindlasti ei tule. Võimalik on lisada automaatne laadimissüsteem, kus materjal on riulitel valmis ja pink paneb selle ise hoidikusse.