

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
LUT School of Energy Systems  
LUT JEDI Konetekniikka

*Osku Luoma*

**PITUUSLEIKKURIN TERIEN AUTOMAATTISEN PAIKOITUS- JA  
LUKITUSMENETELMÄN VALINTA JA KEHITTÄMINEN**

Päivitetty 5.6.2021

Tarkastaja(t) Dosentti Harri Eskelinen

TkT Kimmo Kerkkänen

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto  
LUT Energiajärjestelmät  
LUT JEDI Kone

Osku Luoma

### **Pituusleikkurin terien automaattisen paikoitus- ja lukitusmenetelmän valinta ja kehittäminen**

Diplomityö

2021

77 sivua, 48 kuvaa, 11 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastaja: Dosentti Harri Eskelinen  
TkT Kimmo Kerkkänen

Työn ohjaaja: Insinööri Pentti Perämäki

Hakusanat: kelalinja, pitkittäisleikkaus, nauhaleikkuri, pyöröleikkaus

Tässä työssä tavoitteena oli tutkia kelalinjojen rakenneratkaisuja ja niillä tehtävää teräksen pitkittäisleikkaukseen sekä valita ja kehittää Rodstein Oy:lle pitkittäisleikkausyksikön leikkuuterien automaattinen paikoitus- ja lukitusmenetelmä.

Työn tutkimusosuus tehtiin kirjallisuustutkimuksena käyttäen materiaalina alan kirjallisuutta, tieteellisiä julkaisuja, lehti- ja internet-artikkeleita sekä koneenvalmistajien esittelymateriaaleja. Valinta ja kehitystyön työn perustana käytettiin systemaattisen tuotekehityksen ohjeistoa VDI 2221.

Tutkimuksellisen osuuden pohjalta saatiin luotua kattava kuva pitkittäisleikkaustapahtumasta ja siinä vaikuttavista parametreista. Tämän materiaalin pohjalta yritys pystyy aloittamaan teräksen pitkittäisleikkauksen testaamisen.

Tutkimuksessa valittiin ja kehitettiin yritykselle soveltuvat ratkaisut automaattiseen terien paikoitukseen ja lukitukseen ja näiden perusteella tehtiin alustavat komponenttivalinnat ja sekä kehitettiin alustava teräsrakenne.

Pitkittäisleikkaustapahtumassa vaikuttavien parametrien suuren määrän ja leikkauslaitteistolta vaadittavan valmistustarkkuuden vuoksi pitkittäisleikkaustapahtuma on haastava toimenpide ja tulee vaatimaan suuren määrän testausta, että lopulliset tavoitellut laadulliset tulokset saavutetaan.

## **ABSTRACT**

LUT University  
LUT School of Energy Systems  
LUT JEDI Mechanical Engineering

Osku Luoma

### **Selection and development of an automatic positioning and locking method for a slitting knives**

Master's thesis

2021

77 pages, 48 figure, 11 table and 3 appendices

Examiner: Docent Harri Eskelinen  
D. Sc. (Tech.) Kimmo Kerkkänen

Instructor: B.Eng. Pentti Perämäki

Keywords: coil line, slitting, roller shearing

The aim of this work was to get acquainted with the coil lines and the slitting of steel on them, and to select and develop for Rodstein Oy an automatic positioning and locking method for the cutting blades of the slitting device.

The research part of the work was done as a literature study, using material in the field, scientific publications, journal and Internet articles, and machine manufacturers' presentation materials. The selection and development work was based on the guidelines for systematic product development VDI 2221.

On the basis of the research part, a comprehensive picture of the slitting event and the parameters affecting it was created. Based on this material, the company will be able to start testing the slitting of steel.

In the work, solutions suitable for the company for automatic blade locking and positioning were selected and developed, and on the basis of these, preliminary component selections were made and a preliminary steel structure was developed.

Due to the large number of parameters affecting the slitting operation and the manufacturing accuracy required of the cutting equipment, the slitting operation is a challenging operation and will require a large amount of testing to achieve the final desired results.

## SISÄLLYSLUETTELO

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

### SISÄLLYSLUETTELO

### SYMBOLILUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO.....</b>	<b>7</b>
1.1	Kohdeyritys.....	7
1.2	Tutkimuksen tausta.....	7
1.3	Tutkimuksen tavoite.....	9
1.4	Tutkimusongelma.....	10
1.5	Tutkimuskysymykset.....	10
<b>2</b>	<b>TUTKIMUKSEN METODOLOGINEN TOTEUTUS.....</b>	<b>11</b>
2.1	Tiedonhaun toteutus.....	11
2.2	Benchmarkingin toteutus.....	11
2.3	VDI2221 systemaattisen tuotesuunnittelun ohjeisto.....	11
2.4	Arvoanalyysi.....	13
2.5	Morfologinen analyysi.....	16
2.6	Tutkimuksen kulku.....	18
<b>3</b>	<b>TULOKSET PITKITTÄISLEIKKAUSLAITTEISTON</b>	
	<b>RATKAISUVAIHTOEHTOJEN HAUSTA.....</b>	<b>20</b>
3.1	Tiedonhaun tulokset.....	20
3.2	Benchmarkingin tulokset.....	39
3.3	VDI2221:n avulla tuotetut ratkaisuvaihtoehdot.....	46
3.4	Arvoanalyysin tulokset.....	58
3.5	Morfologisen analyysin tulokset.....	61
<b>4</b>	<b>TULOSTEN ANALYSOINTI.....</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>POHDINTA.....</b>	<b>69</b>
5.1	Tutkimuksen objektiivisuus ja luotettavuus.....	69
5.2	Keskeiset johtopäätökset.....	70
5.3	Tulosten hyödynnettävyys.....	70
5.4	Jatkotutkimusaiheet.....	71

<b>6 YHTEENVETO .....</b>	<b>72</b>
---------------------------	-----------

<b>LÄHTEET .....</b>	<b>74</b>
----------------------	-----------

## **LIITTEET**

LIITE I: Vaakasuuntaisen paikoituksen toleranssiketjun laskenta

LIITE II: Terärungon ja tartuntaelimen sovitteen toleranssiketjun laskenta

LIITE III: Terien lukitusvoiman laskenta

## SYMBOLILUETTELO

$\alpha$	Leikkauskulma [°]
$CL_v$	Pystysuuntainen välys [mm]
$CL_h$	Vaakasuuntainen välys [mm]
$CL_{vp}$	Paikoitukseen käytettävä pystysuuntainen välys [mm]
$D$	Käyttävän akselin ulkohalkaisija [mm]
$ep$	Maksimipoikkeama kuularuuvin kierteen efektiivisellä pituudella [mm]
$F_{terä}$	Leikkausterän kehävoima [N]
$L_1$	Paikoitustarkkuus terän vaakasuuntaisen välyksen siirrolle [mm]
$L_2$	Paikoitustarkkuus terän leikkausmitan siirrolle [mm]
$M_v$	Leikkausterän momentti [Nm]
$n$	Pyörimisnopeus [ $\text{min}^{-1}$ ]
ppr	Pulssia kierrosta kohden []
$p$	Kuularuuvi kierteen nousu [mm]
$P$	Leikkausteho [W]
$P_1$	Pääleikkausvoima [N]
$P_2$	Sivuttaisleikkausvoima [N]
$P_3$	Poikittaisleikkausvoima [N]
$R_m$	Materiaalin murtolujuus [MPa]
$REZ$	Enkooderin resoluutio [bit]
$t_m$	Materiaalipaksuus [mm]
$t_i$	Materiaalipaksuus [in]
$v_{2\pi}$	Maksimipoikkeama kuularuuvin yhden kierroksen mitalla [mm]
$v$	Kuularuuvin aksiaalisuuntainen nopeus [m/s]
$v_h$	Vaakasuuntainen paikoitusnopeus [m/s]
$v_v$	Pystysuuntainen paikoitusnopeus [m/s]
$\omega$	Kulmanopeus [rad/s]

## 1 JOHDANTO

Tässä tutkimuksessa tutkitaan teräksen pitkittäisleikkaustapahtumaan sekä siihen käytettäviä laitteistoja sekä valitaan ja kehitetään kohdeyritykselle konseptiratkaisut pitkittäisleikkausyksikön terien automaattiselle paikoitukselle ja lukitukselle.

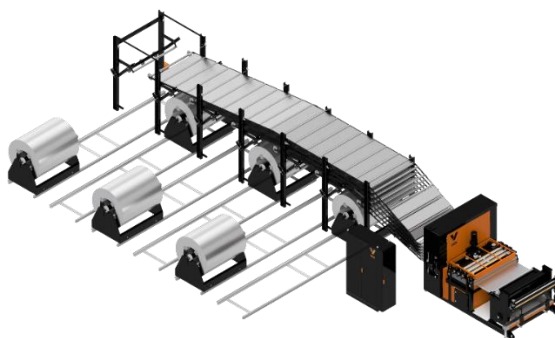
### 1.1 Kohdeyritys

Rodstein Oy on vahvassa kasvussa oleva koneenrakennukseen erikoistunut yritys. Yritys valmistaa sarjatuotteina mm. teräslevyn pitkittäis- ja poikittäisleikkausta tekevää arkkileikkauslinjaa sekä erilaisia kuparisen virtakiskon muokkausta tekeviä koneita. Yritys valmistaa myös erikoiskoneita ja tuotantolinjoja asiakaskohtaisiin sovellutuksiin.

Yrityksen kotipaikka ja tuotantotilat ovat Suomessa Seinäjoella. Yhtiö on perustettu 2005. Henkilöstöä yrityksessä oli vuonna 2020 15 henkilöä ja liikevaihto noin 1,6 miljoonaa euroa. Tuotannosta yli 90 prosenttia menee vientiin suoraan ulkomaiselle asiakkaalle tai suomalaisen toimijan loppuasiakkaalle. Tämän tutkimuksen tuloksia hyödyntämällä yritys pystyy kehittämään kelalinjatuotteitaan ja tarjoamaan asiakkailleen tuottavampia koneita.

### 1.2 Tutkimuksen tausta

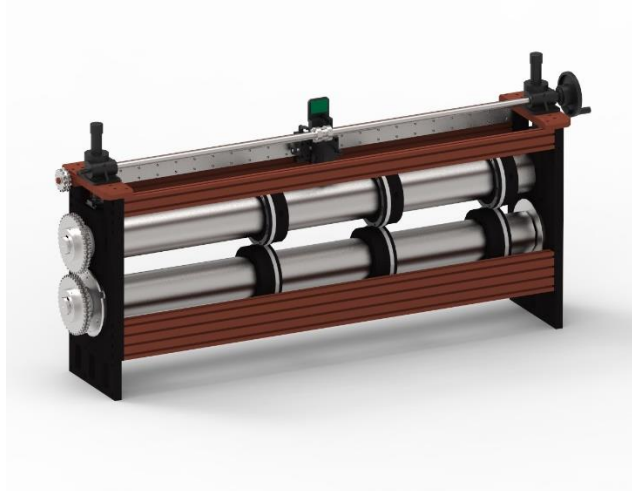
Yritykselle tuli vuonna 2020 yrityskaupan mukana valmistusdokumentaatio ja immateriaalioikeudet kelalinjaan, jolla voidaan poikittäisleikata teräskelalta tulevaa teräslevyä halutun mittaisiin arkkeihin tai pitkittäisleikata levyä halutun levyisiin nauhoihin. Kelalinja on esitetty kuvassa 1.



**Kuva 1.** Teräslevyn poikittäis- ja pitkittäisleikkausta tekevä kelalinja (Rodstein Oy 2021).

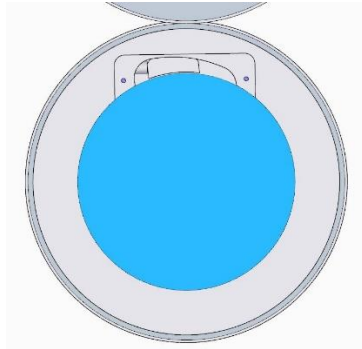
Kelalinjassa on lukuisia tuotekehityskohteita, joihin edellinen valmistaja ei ole ollut valmis käyttämään kehitysresursseja. Yksi tällainen tuotekehityskohde on pitkittäisleikkaukseen käytettävien terien automaattinen paikoitus. Jotta automaattinen paikoitus olisi mahdollista, on myös terien ja niitä käyttävän akselin välisen lukitusliitoksen avaaminen ja sulkeminen tapahduttava automaattisesti.

Nykyisellään terien paikoitus tapahtuu siten, että koneen operaattori pysäyttää koneen ja siirtyy leikkausyksikölle siirtämään teriä haluttuun paikkaan. Operaattori avaa terän lukituksen yksi kerrallaan työkalulla ja leikkausyksikön runkoon tehtyä mitta-asteikkoa apuna käyttäen siirtää terän halutulle paikalle ja tämän jälkeen sulkee terän lukituksen. Lisävarusteena leikkausyksikköön on saatavilla myös digitaalinen mitta-apuväline terien oikean paikan mittaamiseen. Digitaalisella mitta-apuvälineelle varustettu pitkittäisleikkausyksikkö esitetty kuvassa 2.



**Kuva 2.** Käytössä oleva pitkittäisleikkausyksikkö manuaalisella teränsiirrolla ja paikoituksella (Rodstein Oy 2021).

Nykyisessä konstruktiossa terien lukitus perustuu kitkaliitokseen, joka on toteutettu terän ja käyttävän akselin välisellä kiilalla. Terään on muotoiltu paikka kiilalle ja kiilaa kiristävälle ruuville. Kiila kiristetään paikalleen kiristysruuvilla. Kuvassa 3 on esitetty kiilamekanismi, jolla terä lukitaan paikalleen käyttävälle akselille.



**Kuva 3.** Kiilalla toteutettu kitkaliitos, jolla terä lukitaan käyttävälle akselille (Rodstein Oy 2021).

Terän paikoituksen ja lukituksen automatisoinnilla on saavutettavissa monia hyötyjä, muun muassa koneen operaattorilta jää yksi tarkkuutta vaativa työvaihe pois, terien paikoitusnopeus ja -tarkkuus paranee, sekä paikoituksen inhimillisen virheen mahdollisuus poistuu. Terien paikoituksen nopeutuminen nostaa samalla koko leikkauslinjan tehokkuutta, joka on etu asiakkaalle ja on siten markkinointivaltti konetta myyvälle yritykselle.

### 1.3 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen päätavoite on valita sekä kehittää yritykselle menetelmät pitkittäisleikkausterien automaattiseen paikoitukseen ja lukitukseen. Keräämällä tietoa siitä minkälaisia ratkaisuja markkinoilla on käytössä terien automaattisen paikoitukseen ja lukitukseen, tuotetaan pohjatietoa, jota analysoimalla ja kokemusperäistä tietoa hyödyntäen voidaan valita yritykselle soveltuvat menetelmät ja kehittää niistä konseptitason ratkaisut lopullista tuotekehitysprojektia varten.

Päätavoitteen lisäksi tutkimuksessa tutkitaan minkälaisia laitteistoja käytetään metallin pitkittäisleikkauksessa, mitä pitkittäisleikkaustapahtumassa tapahtuu ja mitkä parametrit vaikuttavat leikkaustulokseen. Pitkittäisleikkauksilaitteistojen tutkimuksessa etsitään erilaisia yleisesti käytössä olevia ratkaisuja leikkaukseen, jotta voidaan verrata yrityksessä käytössä olevaa laitteistoa näihin. Tämän vertailun pohjalta voidaan arvioida, olisiko käytössä olevaa laitteistoa mahdollista parantaa muuttamalla käytettyjä ratkaisuja.

Pitkittäisleikkaustapahtuman tutkimisella myös luodaan selkeä kuva siitä, mitä leikkaustapahtumassa tapahtuu ja mitkä parametrit siihen vaikuttavat. Tämän tutkimuksen pohjalta pyritään tuottamaan yritykselle tietoa, jota voidaan hyödyntää pitkittäisleikkausyksikön tuotekehityksessä.

#### 1.4 Tutkimusongelma

Tämän tutkimuksen tutkimusongelma on valita ja kehittää kohteeseen soveltuva menetelmä pitkittäisleikkauksessa käytettävien terien automaattiseen paikoitukseen ja lukitukseen. Tutkimusongelma muodostui kohdeyrityksen tuotekehitystarpeesta kehittää leikkuuterien automaattinen paikoitus- ja lukitusmenetelmä olemassa olevaan pituusleikkausyksikköön. Tutkimusongelman ratkaisun on tarkoitus tuottaa kohdeyritykselle konseptitason suunnitelma ratkaisusta, joista tämän jälkeen voidaan kohdeyrityksen omana tuotekehitysprojektina tuottaa valmis tuote.

#### 1.5 Tutkimuskysymykset

Tutkimuksen tutkimuskysymykset ovat:

1. Minkälaista laitteistoa käytetään metallin pitkittäisleikkauksessa, mitä pitkittäisleikkaustapahtumassa tapahtuu sekä mitkä parametrit siihen vaikuttavat?
2. Minkälaisia automaattisia paikoitus- ja lukitusmenetelmiä on käytössä pitkittäisleikkauksessa käytettävien terien paikoitukseen ja lukitukseen?

Hakemalla vastauksia esitettyihin tutkimuskysymyksiin, tuotetaan pohjatietoa tutkimusongelman ratkaisemiseen. Näistä vastauksista syntyy myös tietoa leikkaustapahtumasta kohdeyrityksen käyttöön tulevia leikkaustestejä varten.

## 2 TUTKIMUKSEN METODOLOGINEN TOTEUTUS

Tutkimuksessa käytetään tiedonhakuja tieteellisistä tietokannoista, benchmarking-tyyppistä kilpailija-analyysiä sekä VDI2221:n mukaista systemaattisen tuotesuunnittelun ohjeistoa tutkimuskysymyksiin vastaamiseksi sekä tutkimusongelman ratkaisemiseen. Tutkimusongelman ratkaisujen vertailuun ja valintaan käytetään arvoanalyysiä sekä morfologista analyysiä. Tässä luvussa kuvataan näiden menetelmien toteutus- ja soveltamistavat.

### 2.1 Tiedonhaun toteutus

Tietoa pitkittäisleikkaustapahtumasta ja kelalinjalaitteista haettiin tieteellisistä tietokannoista kuten Scopus, Elsevier-ScienceDirect, Knovel, Google Scholar sekä Espacenet patenttitietokannasta. Hakuja tehtäessä käytettiin hakusanoina muun muassa ”steel slitting”, ”coil line”, ”rotary shear slitting” ja ”roller shear”. Hakuihin ei pääsääntöisesti tehty rajauksia, koska aihealue on suppea ja sitä haluttiin tutkia mahdollisimman laaja-alaisesti.

### 2.2 Benchmarkingin toteutus

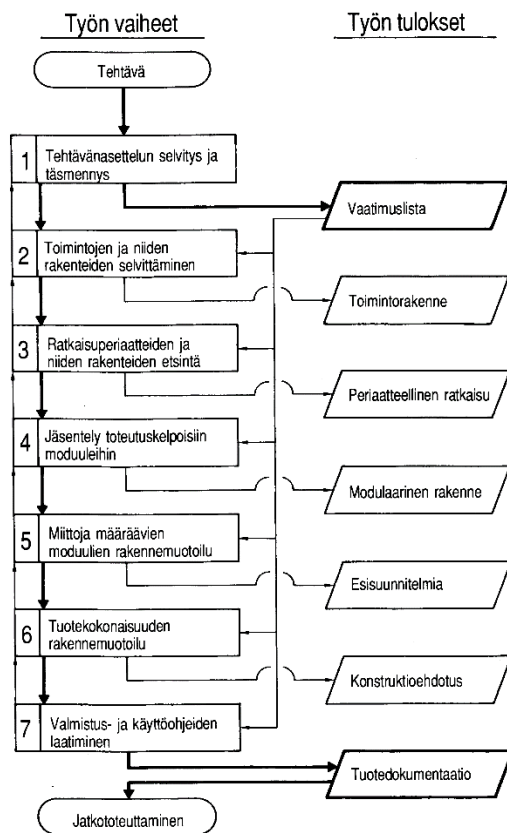
Ratkaisuvaihtoehtoja terien paikoitukseen ja lukitukseen etsittiin tekemällä benchmarking-tyyppistä kilpailija-analyysiä kelalinjoja valmistavien yritysten välillä. Vertailua tehtiin jo tiedossa olevien koneenvalmistajien sekä uusien, internet-hakukoneiden hakujen perusteella löydettyjen yritysten välillä. Konevalmistajia etsittiin tekemällä hakuja hakukoneella käyttäen hakusanoina ”coil line”, ”slitting line” ja ”blanking line”.

Yritysten kotisivuilta etsittiin ja vertailtiin kelalinjojen teknisiä ominaisuuksia ja suoritusarvoja sekä tutkittiin teknisiä ratkaisuja eri toimintojen toteuttamiseen. Teknisten ratkaisujen tutkimiseen hyödynnettiin yritysten julkaisemaa video- ja valokuvamateriaalia.

### 2.3 VDI2221 systemaattisen tuotesuunnittelun ohjeisto

VDI 2221 on ohjeisto, joka esittää tuotteen kehittelylle ja konstruoinnille systemaattisen seitsemän askeleen etenemistavan. Ohjeisto on laadittu käytettäväksi koneenrakennuksen, hienomekaniikan, elektroniikan kytkentöjen ja ohjelmistojen kehittelyn sekä

prosessitekniisten laitteiden suunnittelussa. (Pahl & Beitz 1986, s. 47) Konstruoinnin seitsemän askeleen työnkulku on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** VDI 2221 mukainen konstruoinnin työnkulku (Pahl & Beitz 1986, s. 47).

VDI 2221 jakaa tuotekehitysprosessin karkeasti neljään päävaiheeseen seuraavasti (Pahl & Beitz 1986, s. 48):

- Tehtävänasettelun selvitys
- Luonnostelu
- Kehittely
- Viimeistely.

Tehtävänasettelun selvityksessä haetaan informaatiota ratkaisusta sekä sen vaatimuksista ja niiden merkityksestä. Tästä tiedosta syntyy vaatuslista, joka seuraa mukana ja jota pidetään ajan tasalla läpi tuotekehitysprosessin. (Pahl & Beitz 1986, s. 478)

Luonnosteluvaiheessa määritetään periaatteellinen ratkaisu vaatimuslistan pohjalta. Siihen päästään oleellisten ongelmien abstrahoinnin, toimintorakenteiden laatimisen sekä vaikutusperiaatteiden hakemisen ja yhdistelyn jälkeen. Periaatteellinen ratkaisu voidaan esittää toimintorakenteen lohkokaaavana, kytkentäkaavana tai kulkukaavana. Joissakin tapauksissa vapaakätinen luonnos riittää tai joskus saattaa olla tarve tehdä karkeamittakaavainen luonnos. Huomattavaa on myös, että hyväksikin havaitussa periaatteellisessa ratkaisussa vaikeudet aiheutuvat tavallisimmin yksityiskohdissa. (Pahl & Beitz 1986, s. 49)

Kehittelyvaiheessa periaatteellisesta ratkaisusta suunnitellaan teknisen tuotteen kokoonpanorakenne täydellisesti ja yksikäsitteisesti teknisten ja taloudellisen näkökohtien mukaan. Monessa tapauksessa joudutaan tekemään rinnakkain tai peräkkäin useampia alustavia ehdotuksia, jotta havaittaisiin eri muunnelmien edut ja haitat ja voidaan tehdä päätös lopullisesta kokonaiskehittelyn rakennemuotoilusta. Lopullisessa kokonaiskehittelyssä on tarkastettu toiminnot, kestävyys, tilankäytön sopivuus jne. sekä viimeistään tässä yhteydessä on osoitettu, että myös kustannuksia koskevat vaatimukset täyttyvät. (Pahl & Beitz 1986, s. 49)

Viimeistely on se osa konstruointia, jossa teknisen rakennelman kokoonpanorakennetta täydennetään lopullisilla muotoa ja kaikkien yksittäisosien mitoitus ja pinnanlaatua koskevilla määräyksillä. Tässä vaiheessa myös määritellään materiaalit sekä tarkistetaan valmistusmahdollisuudet ja muut asiakirjat, että suunnitelma voidaan toteuttaa lopullisesti. Kuten aikaisemmin todettu, vaikeudet piilevät detaljeissa. Tästä syystä viimeistely vaiheesta voidaan vielä joutua palaamaan aikaisempiin työaskeleisiin yksityiskohtien muuttamisen vuoksi. (Pahl & Beitz 1986, s. 50)

#### 2.4 Arvoanalyysi

Alun perin arvoanalyysi kehitettiin olemassa olevien tuotteiden paranteluun rakenteiden, valmistusmenetelmien ja materiaalivalinnan kehittämisen kautta. Arvoanalyysia on myöhemmin käytetty menestyksekkäästi myös uusien tuotteiden kehittämiseen. Arvoanalyysi muodostuu useasta vaiheesta, joiden läpiviennissä yhdistyy analyyttinen eli erittelevä sekä synteettinen eli luova ajattelu. (Meskanen 2017, s. 5 - 6)

Arvoanalyysin peruskäsite on arvo, joka määritellään kaavan 1 mukaan seuraavasti (Meskanen 2017, s. 6):

$$\text{arvo} = \text{toiminto} / \text{kustannus} \quad (1)$$

Toiminnolla tarkoitetaan tarkasteltavan kohteen ominaisuutta tai ominaisuuksien yhdistelmää, joka tekee sen käyttökelpoiseksi tai hyödylliseksi. Kustannus syntyy toiminnon valmistamisesta, kokoonpanosta, laatuongelmista tai takuukustannuksista. Arvoanalyysissä pyritään nostamaan kohteen arvoa. Se voidaan tehdä joko toiminnon ominaisuuksia parantamalla tai kustannuksia alentamalla. (Meskanen 2017, s. 6)

Kohteen toiminnot määritellään vastaamalla kysymykseen ”Mitä se tekee?”. Kysymykseen vastataan kahdella sanalla, verbillä ja substantiivilla. Tällä tavalla saadaan selvitettyä ja erotettua toisistaan kaikki kohteen toiminnot. Toiminnot jaetaan perustoimintoihin ja sivutoimintoihin, joista perustoiminto on oleellisin asia, miksi kyseinen tuote on olemassa ja sivutoiminnot antavat kohteelle lisäpiirteitä tai esimerkiksi parantavat tuotteen käyttökelpoisuutta. (Meskanen 2017, s. 7)

Toimintojen määrittelyn jälkeen suoritetaan toimintojen ideointi. Ideointi on arvoanalyysin tärkein vaihe. Siinä vastataan kysymykseen ”Millä eri tavoin tämä toiminto voidaan toteuttaa?”. Ideointivaiheen tarkoitus on tuottaa mahdollisimman paljon ideoita ilman, että kritiikki haittaa niiden syntymistä. Erityisesti on syytä tuoda julki mahdottomilta ja hassuilta tuntuvia ideoita, sillä ne saattava olla juuri ne ajatukset, joista syntyy lopullinen hyvä idea. (Meskanen 2017, s. 7)

Arvosteluvaiheessa käydään läpi tuotetut ideat ja selvitetään niiden käyttökelpoisuus. Perinteinen arvostelumenettely perustuu puhtaasti päättelyyn, määritellään kustannukset sekä edut ja haitat huomioon ottaen ideoiden arvo. Lopuksi valitaan parhaita arvoja edustavat ideat edelleen kehitettäväksi. (Meskanen 2017, s. 7)

Päätoiminnon parhaiten toteuttava ratkaisu saadaan laskemalla ratkaisujen ”hyvyyttä” kuvaava suhdeluku. Laskennan ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan sivutoimintojen parivertailu, jossa jokaista sivutoimintoa verrataan vuorotellen jokaiseen muuhun

sivutoimintoon ja tulokset lasketaan yhteen. Kuvassa 5 on erään tuotteen sivutoimintojen vertailutaulukko. Sivutoiminnoille KL, JL, SM, KK ja SV on suoritettu parivertailu ja taulukon oikeanpuolimmaiseen sarakkeeseen on kirjattu sivutoiminnon painoluku. (Meskanen 2017, s. 13)

-	KL	JL	SM	KK	SV	painoluku
KL	KL	KL	KL	KL	KL	9
JL	KL	JL	JL	JL	JL	7
SM	KL	JL	SM	KK	SV	1
KK	KL	JL	KK	KK	KK	5
SV	KL	JL	SV	KK	SV	3
yht.						25

**Kuva 5.** Sivutoimintojen parivertailu. Sivutoiminnon painoluku merkitty viimeiseen sarakkeeseen (Meskanen 2017, s. 13).

Painolukujen laskennan jälkeen suoritetaan ratkaisuvaihtoehtojen arvostelu. Jokaiselle vaihtoehdolle annetaan arvosana väliltä 0 – 5 riippuen siitä, miten hyvin ratkaisu toteuttaa sivutoiminnon vaatimukset. Mikäli ratkaisu toteuttaa vaatimukset erinomaisesti, saa se arvosanaksi arvon 5 tai mikäli se ei täytä vaatimusta ollenkaan, saa se arvosanaksi arvon 0. (Meskanen 2017, s. 13) Kuvassa 6 on esitetty esimerkki ratkaisujen arvostelusta.

Sivutoiminto	Ratkaisu			
	a	b	c	d
ST1	1	5	3	0
ST2	5	0	2	1

**Kuva 6.** Ratkaisuvaihtoehtojen sivutoimintojen arvostelu esimerkki.

Viimeisenä vaiheena lasketaan sivutoimintojen painoarvoilla painotettu yhteenvetotaulukko kaikille ratkaisuvaihtoehdoille kaavan 2 mukaisesti.

$$\text{painotettu pistearvo} = \text{painoluku} \times \text{arvosana} \quad (2)$$

Kuvassa 7 esitetään erään tuotteen yhteenvetotaulukko. Samasta kuvasta havaitaan, että ratkaisu c on täyttänyt sivutoimintojen vaatimukset parhaiten, eli saanut suurimman pistemäärän, eli on paras ratkaisuvaihtoehto päätoiminnon toteuttamiseen. (Meskanen 2017, s. 14)

-	a)	b)	c)	d)
<b>KL</b>	9	18	36	9
<b>JL</b>	21	7	28	21
<b>SM</b>	3	1	4	3
<b>KK</b>	10	15	10	10
<b>SV</b>	10	15	10	10
<b>yht.</b>	49	47	90	46

**Kuva 7.** Ratkaisuvaihtoehtojen suhdeluvut laskettuna kaavan 2 mukaisesti (Meskanen 2017, s. 14).

Mikäli ratkaisujen suhteelliset kustannukset tiedetään, voidaan ratkaisut vielä halutessa tarkastella kustannusten suhteen, jakamalla saadut suhdeluvut suhteellisilla kustannuksilla (Meskanen 2017, s. 15).

## 2.5 Morfologinen analyysi

Morfologinen analyysi on alun perin Sveitsiläisen astronomin Fritz Zwickyyn kehittämä menetelmä kompleksisten ongelmien ratkaisemiseen ja analysointiin. Zwicky käytti morfologista analyysiä muun muassa suihkumoottoriteknologian kehittämiseen toisen maailmansodan jälkeen. (Childs 2014, s. 79)

Morfologinen analyysi on menetelmä, jolla voidaan tuotteen konseptivaiheessa luoda vaihtoehtoisia toteutusratkaisuja, joita ei välttämättä muuten tulisi miettineeksi. Analyysissä päätoiminto pilkotaan osatoiminnoiksi ja näille osatoiminnoille mietitään erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja. Kuvan 8 taulukossa on esitetty periaatetaulukko, jossa esitetään analyysin periaate. Jokaiselle riville ensimmäiseen sarakkeeseen on kirjattu osatoiminta ja

rivin seuraaville sarakkeille ratkaisuvaihtoehtoja osatoiminnon toteuttamiseen. (Childs 2014, s. 78)

Subsystem	Means			
Subsystem 1	Method 1 of fulfilling subsystem 1	Method 2 of fulfilling subsystem 1	Method 3 of fulfilling subsystem 1	Method <i>n</i> of fulfilling subsystem 1
Subsystem 2	Method 1 of fulfilling subsystem 2	Method 2 of fulfilling subsystem 2	Method 3 of fulfilling subsystem 2	Method <i>n</i> of fulfilling subsystem 2
Subsystem 3	Method 1 of fulfilling subsystem 3	Method 2 of fulfilling subsystem 3	Method 3 of fulfilling subsystem 3	Method <i>n</i> of fulfilling subsystem 3
Subsystem 4	Method 1 of fulfilling subsystem 4	Method 2 of fulfilling subsystem 4	Method 3 of fulfilling subsystem 4	Method <i>n</i> of fulfilling subsystem 4
Subsystem 5	Method 1 of fulfilling subsystem 5	Method 2 of fulfilling subsystem 5	Method 3 of fulfilling subsystem 5	Method <i>n</i> of fulfilling subsystem 5

**Kuva 8.** Morfologisen analyysin periaatekuva (Childs 2014, s.78).

Kun päätoiminto on pilkottu osatoiminnoiksi ja osatoiminnoille mietitty ratkaisuvaihtoehdot, kirjataan ne taulukkoon ja valitaan soveltuvat ratkaisuvaihtoehdot. Valituista osatoimintojen ratkaisuista syntyy päätoiminnon kokonaisratkaisu tai useita ratkaisuvaihtoehtoja edelleen kehitettäväksi. Kuvassa 9 on esitetty miten osatoimintojen ratkaisuvaihtoehdoista valitaan kohteeseen soveltuvat vaihtoehdot. (Childs 2014, s. 82)

Feature	Means				
<b>Support</b>	Track	Wheels	Air cushion	Slides	Pedipulators
<b>Propulsion</b>	Driven wheels	Air thrust	Moving cable	Linear induction	Toothed wheel and rack
<b>Power</b>	Electric	Diesel	Petrol	Bottled gas	Steam
<b>Transmission</b>	Belts	Chains	Gears and shafts	Hydraulics	Flexible cable
<b>Steering</b>	Turning wheels	Air thrust	Rails	Magnetism	Drag
<b>Stopping</b>	Brakes	Reverse thrust	Ratchet	Magnetism	Anchor
<b>Lifting</b>	Hydraulic ram	Rack and pinion	Screw	Chain or rope hoist	Telescopic linkage
<b>Operator</b>	Standing	Walking	Seated at front	Seated at rear	Remote control

**Kuva 9.** Osatoimintojen vaihtoehdoista valitaan soveltuvat ratkaisut (Childs 2014, s.82).

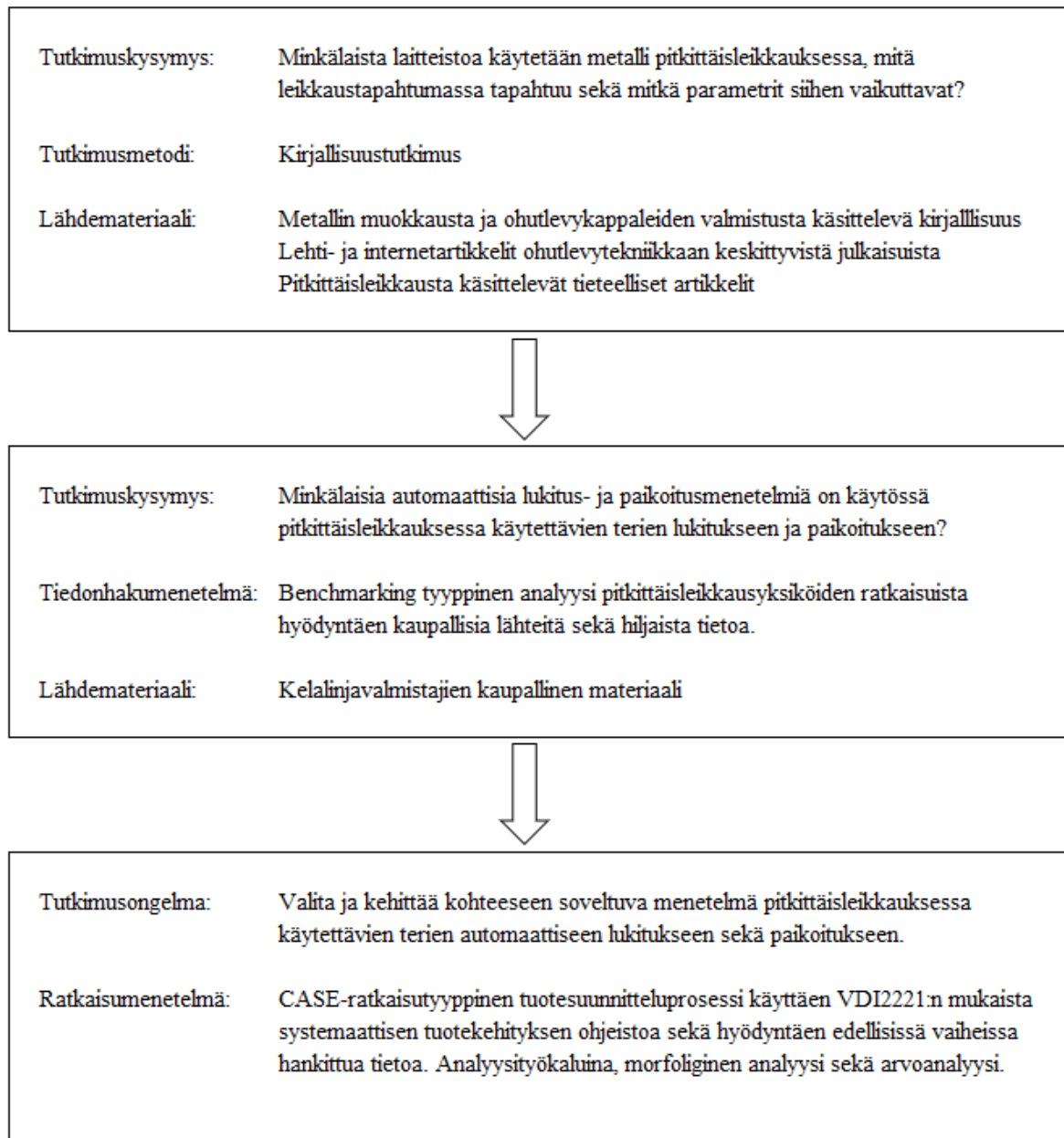
## 2.6 Tutkimuksen kulku

Ensimmäisen tutkimuskysymyksen vastauksen haku aloitettiin tutustumalla käytössä oleviin pitkittäisleikkauslaitteistoihin sekä teräksen pitkittäisleikkaukseen prosessina, ymmärtämään mitä leikkauksessa tapahtuu ja mitä leikkaustulokseen vaikuttavia tekijöitä prosessissa vaikuttaa. Tätä tutkimusta tehtiin kirjallisuustutkimuksena hakemalla tietoa alan kirjallisuudesta, tieteellisistä julkaisuista sekä lehti- ja internet-artikkeleista. Kirjallisuutena käytettiin metallien muokkausprosesseja käsitteleviä sekä ohutlevykappaleiden valmistukseen keskittyviä kirjoja. Lehti- ja internetartikkelit olivat pääasiallisesti ohutlevytekniikkaan keskittyvien lehtien artikkeleita.

Jälkimmäiseen tutkimuskysymykseen vastausta haettiin tutkimalla käytössä olevia ratkaisuja terien automaattiseen lukitukseen sekä paikoitukseen. Tätä tutkimusta tehtiin benchmark-tyyppisenä kilpailija-analyysinä, jossa lähdemateriaalina hyödynnettiin kone- ja komponenttivalmistajien verkkosivuja sekä heidän julkaisemiaan videoita ja valokuvia koneiden ja tuotteiden toiminnasta.

Tutkimuksen konseptisuunnitteluosuudessa terien paikoitus- ja lukitusmenetelmän valinta- ja kehitysvaiheen menetelmänä käytettiin systemaattisen tuotesuunnittelun ohjeistoa VDI 2221 sekä menetelmien osatoimintojen ratkaisuperiaatteiden etsintään ja valintaan morfologista analyysiä sekä arvoanalyysiä.

Tutkimuksen eteneminen tutkimuskysymyksiin vastaamisesta tutkimusongelman ratkaisuun on esitetty kaaviona kuvassa 10.



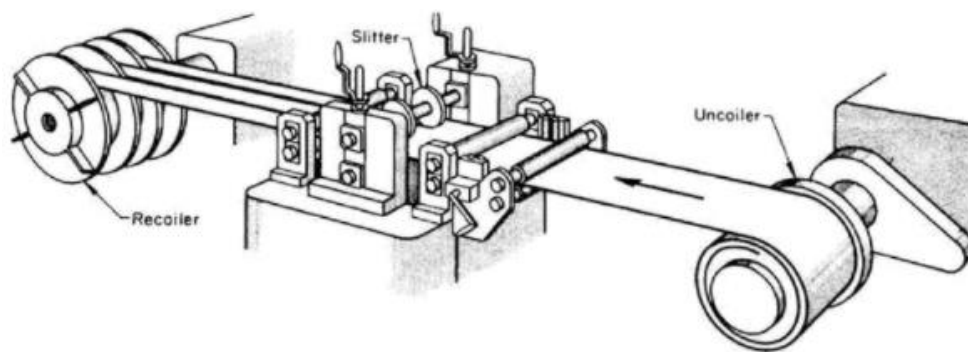
**Kuva 10.** Tutkimuksen kulku metodiikan näkökulmasta.

### 3 TULOKSET PITKITTÄISLEIKKAUSLAITTEISTON RATKAISUVAIHTOEHTOJEN HAUSTA

Tutkimuksen tässä luvussa esitellään vastaukset tutkimuskysymyksiin ja ratkaisu tutkimusongelmaan. Tulokset on saatu käyttämällä edellisessä luvussa esiteltyjä tutkimusmetodeja, analyysejä sekä systemaattisen tuotesuunnittelun ohjeistoa. Tiedonhaku ja benchmarkingia on käytetty ensimmäisen ja toisen tutkimuskysymyksen vastauksien hakuun. Hyödyntämällä tutkimuskysymysten vastauksia voidaan pitkittäisleikkaustaputuma ja siihen vaikuttava parametrit kuvata siten, että niin perusteella voidaan lähteä ratkaisemaan tutkimusongelmaan käyttäen VDI2221 ohjeistoa sekä arvoanalyysiä ja morfologista analyysiä.

#### 3.1 Tiedonhaun tulokset

Nauhaleikkauslinja koostuu lähtökelasta, joka pitelee materiaalikelaa, nauhaleikkurista, jossa voi olla yksi tai useampi teräpari leikkaukseen, sekä vastaanottokelasta, jolle leikatut teräsnauhat rullataan uudelleen kelalle (Davis 1998, s. 818). Kuvassa 11 on esitetty periaatekuva nauhaleikkauslinjasta.



**Kuva 11.** Nauhaleikkauslinjan periaatekuva (Davis 1998, s. 819).

Nauhaleikkauslinjat ovat yleisesti jaettu kahteen tyyppiin toimintaperiaatteensa mukaan. Toimintaperiaatteet eroavat toisistaan siinä missä kohtaa halkaisulinjaa tuotetaan voima,

joka siirtää materiaalin linjan päästä päähän ja suorittaa halkaisuprosessin. (Asco Inc. 2005, s. 15)

Pull-Through -tyyppinen toimii siten, että lähtökelan ja nauhaleikkurin ajomoottoreilla ajetaan materiaali lähtökelalta nauhaleikkurin läpi vastaanottokelalle ja kun materiaali on kiinnitetty vastaanottokelaan kytketään lähtökelan ja nauhaleikkurin ajomoottorit pois käytöstä ja vastaanottokelan ajomoottorilla tuotetaan tarvittavat voimat

- Materiaalin purulle lähtökelalta
- Pitkittäisleikkausterien pyöriykselle
- vastaanottokelan pyöriykselle.

Driven -tyyppisessä toteutuksessa on ajomoottori myös lähtö- ja vastaanottokelassa sekä nauhaleikkurissa. Käytön aikana ajetaan kaikkia ajomoottoreita materiaalin siirtoa varten. Moottorit ovat synkronoitu keskenään, että materiaali saadaan kulkemaan samalla nopeudella koko prosessin läpi. (Asco Inc. 2005, s. 15)

Nauhaleikkauslinjan toimintaperiaatteen valintaan vaikuttavat seuraavat seikat:

- Materiaalin leikkauslujuus ja paksuus
- Pitkittäisleikkausteräparien lukumäärä
- Leikkausnopeus

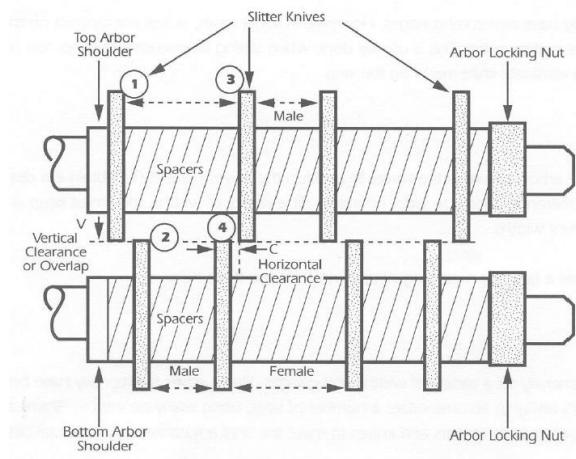
Lähtökohtaisesti materiaalivahvuuden ollessa alle 0.25 mm, driven -tyyppinen toimintaperiaate on suositeltu, koska ohut teräs materiaali todennäköisesti repeää, kun sitä vedetään suurella voimalla, kuten Pull-through toimintaperiaatteella toimivassa nauhaleikkauslinjassa tapahtuu (Davis 1998, s. 818).

Pituusleikkausyksikkö muodostuu kahdesta käytävästä akselistä, joihin on kiinnitetty leikkuuterät, tukirenkaat ja paikoitusrenkaat. Käyttävät akselit on laakeroitu tukevaan runkorakenteeseen. Lisäksi pituusleikkausyksikköön kuuluu säätömekanismi terien vaaka- ja pituussuuntaiselle välyksen säädölle.

Leikkausterät ovat teräsrenkaita, joiden ulkosärmät on teroitettu leikkausta varten. Terän molemmat ulkosärmät on teroitettu, joten toisen särmän tylsyttyä terä voidaan kääntää ja saadaan uusi terävä leikkaussärmi käyttöön.

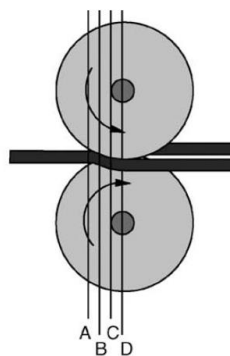
Tukirenkaat ovat kumilla päällystettyjä teräsrenkaita ja niitä on kahden tyyppisiä riippuen niiden käyttötarkoituksesta halkaisuuskokossa. Urostyypiset tukirenkaat tulevat leikkausterien siihen väliin, jossa ei tapahdu leikkausta. Urostyypinen rengas on ulkohalkaisijaltaan samankokoinen, kuin leikkausterä tai hieman sitä suurempi. Renkaan tehtävä on pitää materiaali irrallaan leikkausterän vapaasta leikkuusärmästä, että siitä ei jää jälkiä leikattuun materiaaliin. Naarastyypinen tukirengas tulee leikkuuterien siihen väliin, jossa leikkaus tapahtuu. Naarastyypisen renkaan ulkohalkaisija ja kumin kovuus riippuvat leikattavasta materiaalista ja käytetyn halkaisuuskokoon rakenteessa olevista joustoista. Naaraspuolisen tukirenkaan tehtävä on toimia vastavoimana leikkaustapahtumalle ja tukea materiaalia leikkaustapahtuman aikana, että materiaali ei taivu ja jää jumiin leikkausterien väliin. Paikoitusrenkailla paikoitetaan ensimmäiset ja viimeiset leikkausrenkaat oikeille paikoilleen käytävillä akselilla. (Asco Inc. 2005, s. 24, Rubber Stripper Rings 2021)

Nauhaleikkurin osat kootaan käytävälle akselille tiettyyn järjestykseen riippuen leikattavien nauhojen määrästä. Yleisesti käytetty järjestys on kuvattu kuvassa 12. Komponenttien ladonta alkaa ylemmästä käytävältä akselista. Akselille asetetaan ensimmäisenä leikkaava terä. Tämän jälkeen alemmalle akselille asetetaan paikoituslevyjä, jotka ovat vahvuudeltaan leikkuuterän leveys lisättyinä vaakasuuntaisella leikkuuterien välisellä välyksellä. Alemman akselin ensimmäinen leikkuuterä asetetaan nyt akselille. Ylemmälle akselille asetetaan halutun nauhan levyinen naaraspuolinen tukirengas ja leikkuuterä. Lopuksi alemmalle terälle asetetaan urospuolinen tuki- ja leikkuuterä. Urospuolisen terän mitassa on huomioitava leikkuuterien välinen vaakasuuntainen välyys. Näin toimien komponentteja asetetaan haluttu määrä käytävälle akselille ja lopuksi komponentit lukitaan paikalleen tarvittavalla määrällä paikoitusrenkaita. (Asco Inc. 2005, s. 24)



**Kuva 12.** Komponenttien ladontajärjestys nauhaleikkurin käyttävälle akselille (Asco Inc. 2005, s. 24).

Metallin pitkittäisleikkaus perustuu materiaalin murtumiseen. Materiaali ajetaan leikkuuterien läpi, jolloin materiaaliin kohdistuu niin suuri puristava voima, että materiaalissa alkaa plastinen muodonmuutos, joka johtaa lopulta materiaalin murtumiseen. Kuvassa 13 on esitetty mitä pituusleikkaustapahtumassa tapahtuu, kun materiaali etenee leikkausterien välissä. Alueella A-B alkaa materiaalin plastinen muodonmuutos. Materiaalin edetessä alueelle B-C alkaa materiaalin murtuminen ja kohdassa D levyn puoliskot ovat irronneet kokonaan toisistaan. (Wisselink & Huétink 2002, s. 338)



**Kuva 13.** Pituusleikkaustapahtuman eteneminen. Alueella A-B tapahtuu plastinen muodonmuutos, alueella B-C murtuminen ja kohdassa D osien irtoaminen (Wisselink & Huétink 2002, s. 338).

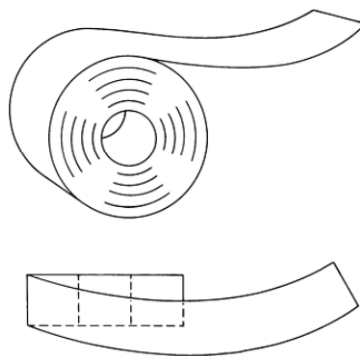
Pituusleikkaustapahtumaan ja valmistettavan materiaalin laatuun vaikuttaa moni tekijä. Leikattavan materiaalin ominaisuuksien lisäksi vaikuttavia parametrejä ovat leikkuuterien vaaka- ja pystysuuntainen vällys, leikkuuterien materiaali ja leikkaussärmän terävyys, tukirenkaiden koko ja kovuus, leikkausyksikön rakenne, joustot ja välykset sekä myös koko halkaisulinjan ominaisuudet kuten materiaalinopeuden ja materiaalin pituussuuntaisen jännityksen hallinta. (The Art of Slitting 2016)

Valmistettavan nauhan laatua määrittävät seuraavat tekijät:

- Leikkuureunan laatu
- Leikkuureunan aaltoilu
- Leveysmitan tarkkuus
- Suoruus
- Pinnanlaatu
- Tasokaareutuminen

(Zelt 2006)

Tasokaareutumisvirhe tarkoittaa sitä, että leikatussa nauhassa toinen reuna on lyhyempi, kuin toinen ja siten nauhalla on taipumus taipua oikealle tai vasemmalle. (Theis 1993, s. 1542) Kuvassa 14 esitetty miltä materiaalissa oleva tasokaareutuminen näyttää.



**Kuva 14.** Tasokaareutumisvirhe taivuttaa nauhaa oikealle tai vasemmalle (Theis 1993, s.1543).

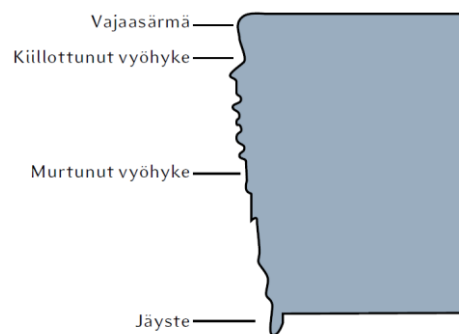
Tasokaareutumisvirhe johtuu pääsääntöisesti materiaalin sisäisistä jännityksistä. Materiaalia leikatessa sisäiset jännitykset vapautuvat osittain ja synnyttävät muodonmuutoksen. Kylmä-

ja kuumavalssatuissa levyissä mahdolliset sisäiset jännitykset ovat vastakkaisuuntaiset, joten vapautuessaan ne myös taivuttavat materiaalia eri suuntiin. (Kauste & Kostamo 1980, s. 19)

Leikkuureunan laatu muodostuu neljässä muutosalueesta (Rautaruukki Oyj 2011, s. 4):

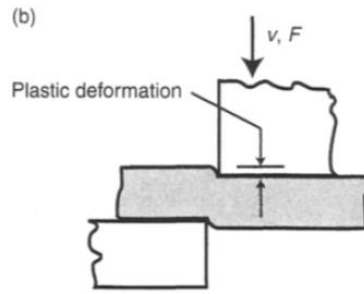
- Vajaasärmä
- kiillottunut vyöhyke
- murtunut vyöhyke
- jäyste.

Leikkuureunan muodostumisen vaiheet näkyvät kuvassa 15.



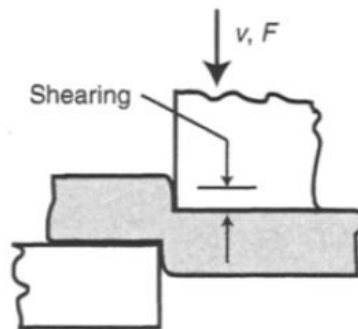
**Kuva 15.** Leikkuureunan muodostumisen vaiheet (Rautaruukki Oyj 2011, s. 5).

Leikkauksen ensimmäisessä vaiheessa, vajaasärmän muodostumisessa, materiaali saapuu terien väliin ja alkaa kimmainen myötäminen. Materiaalille ominaisen myötölujuuden ylityttyä alkaa plastinen muodonmuutos ja leikkuuterien välitys synnyttää materiaaliin nurkan pyöristymän, ns. vajaasärmän. Kuvassa 16 nähdään materiaaliin muodostuva nurkan pyöristymä. (Kauste & Kostamo 1980, s. 3)



**Kuva 16.** Leikkuuterät muodostavat voimaparin ja synnyttävä leikkuupintaan reunapyöristyksen (Beddoes & Bibby 2003, s. 144).

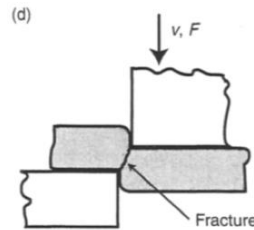
Seuraavassa vaiheessa leikkuuterät painuvat syvemmälle leikattavaan materiaaliin ja materiaali muovautuu plastisesti vasten leikkuuteriä. Tähän osuuteen muodostuu kiiltävä ja suhteellisen tasainen leikkuupinta. (Rautaruukki Oyj 2011, s. 4) Kiiltävän tasaisen alueen kohta on merkitty kuvassa 17.



**Kuva 17.** Terien painuessa syvemmälle materiaaliin, syntyy siihen kiiltävä ja suhteellisen tasainen leikkuupinta (Beddoes & Bibby 2003, s. 144).

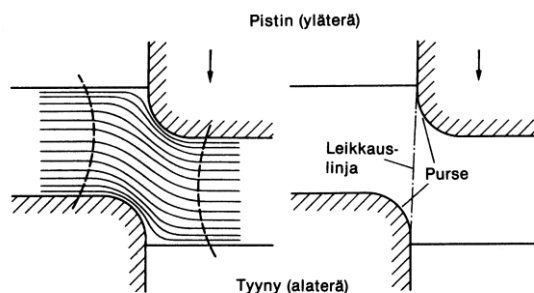
Kolmannessa vaiheessa terien aiheuttama puristusvoima ylittää materiaalin murtolujuuden ja materiaali murtuu. Materiaalin murtumisvaihe on leikkausvaiheista vaikein hallittava, koska murtumiseen vaikuttavia parametrejä on paljon. Murtumiseen vaikuttaa muun muassa materiaalin kovuus sekä leikkuuterien välitys. Materiaalin kovuudesta riippuu, kuinka syvälle materiaaliin terien on upottava, että materiaali murtuu. Normaali rakenneteräs vaati keskimäärin yhden kolmasosan materiaalin vahvuudesta, lujat teräkset noin 15% ja ruostumaton teräs noin 5%. (Bresnahan 1996, s. 58) Materiaali murtuu 7–9 asteen kulmassa

riippumatta siitä osuvatko leikkuuterien särmät murtumatasoon (The Art of Slitting 2016). Kuvassa 18 nähdään materiaalin murtumisvaihe.



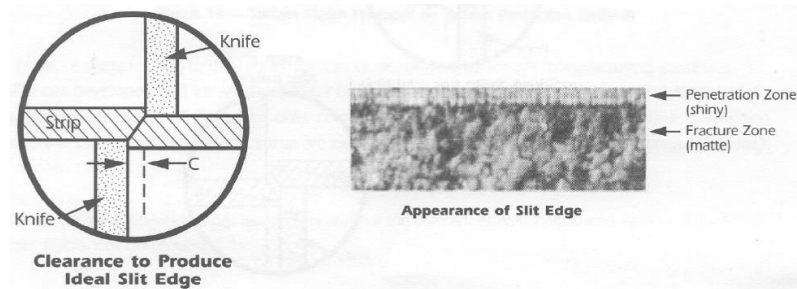
**Kuva 18.** Materiaalin murtumisvaihe (Beddoes & Bibby M. 2003, s. 144).

Leikkauksen viimeisessä vaiheessa leikkuupintaan muodostuu jäyste (purse). Jäysteen muodostuminen on paras indikaattori kertomaan leikkausprosessin laadusta. Suurimmat puristusjännitykset suuntautuvat yläterästä vinosti kohti alaterän leikkaavaa särmää. Tämä aiheuttaa venyvään aineeseen poikittaisjännityksen, mikä parantaa sen muodonmuutoskykyä. Siten aine ei repeä aivan leikkaavan särmän kohdalla, vaan sen vierestä, jossa muokkauslujittuminen on vähäisempää. Tällöin aine murtuu vasta sen liu'uttua leikkaavan särmän ohii ja jäljelle jää terävä kohouma, jäyste. Jäysteen muodostuksessa terien kuluminen katsotaan olevan merkittävä tekijä vaakasuuntaisen leikkausvälyksen ohella. (Kauste & Kostamo 1980, s. 7) Kuvassa 19 on esitetty jännitysvuon kulku materiaalissa ja jäysteen muodostuminen tylsyneen leikkaussärmän ympärille.



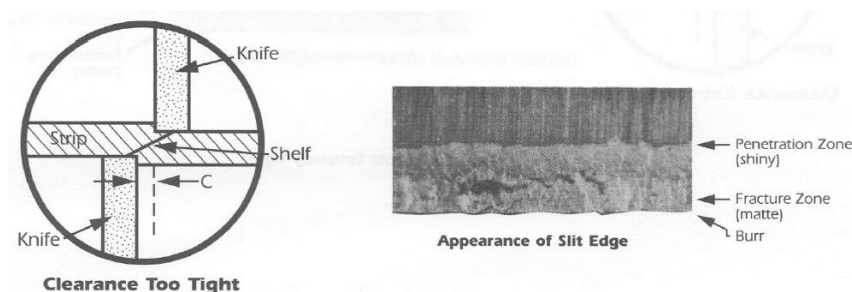
**Kuva 19.** Jäyste syntyy leikkausterän pyöristyneen särmän ympärille (Kauste & Kostamo 1980, s. 7).

Leikkuuterien välyksensäädöllä, pysty- ja vaakasuuntaisella on suuri merkitys leikattuun materiaalin laatuun, tarvittavaan halkaisuvoimaan sekä terän kulumiseen. Kuvassa 20 nähdään, että terien ollessa terävät ja oikein säädetyt, leikkuujälki on laadukas. Leikkuupintaan syntyy pieni kiillottunut alue ja suuri murtuma-alue ja hyvin vähän tai ei ollenkaan jäystettä. (Bresnahan et al. 1999, s. 119)



**Kuva 20.** Terien ollessa säädetty oikein, leikkuupintaa syntyy pieni kiillottunut alue ja suuri murtuma-alue sekä hyvin vähän tai ei ollenkaan jäystettä (Bresnahan et al. 1999, s. 119).

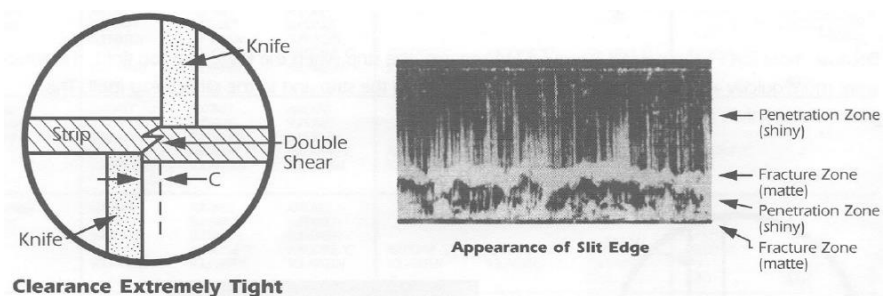
Käytettäessä liian pientä vaakasuuntaista välystä terän leikkaava särmä ei enää osu murtumatason lähtöpisteeseen ja tekee terän ulkopinnan kohdalle materiaaliin portaan. Muodostuva porras on merkitty kuvaan 21 sekä kuvassa nähdään, että murtumataso ei osu terän leikkaavaan särmään. Mikäli leikkuuterä on terävä, se leikkaa muodostuvan portaan pois. Leikkautuva porras irtoaa materiaalista lankamaisena. Tämä lanka saattaa alkaa kiertyä leikkuuterän ympärille. Leikkuuterän ollessa tylsä, taipuu muodostunut porras leikkuupintaa vasten. (The Art of Slitting 2016)



**Kuva 21.** Liian pienellä vaakasuuntaisella välyksellä murtumataso ei osu terän leikkusärmään sekä leikkuupintaan syntyy ylimääräinen porras (Bresnahan et al. 1999, s. 119).

Liian pienellä vaakasuuntaisella välyksellä leikattaessa materiaalin leikkuupintaan muodostuu normaalia suurempi leikkautunut pinta, normaalia pienempi murtumapinta sekä rosainen epämääräinen linja erottamaan leikkautuneet materiaalit toisista. Leikkuupinnan alareunaa muodostuu myös jäystettä. Leikkuuterät myös tylsyvät nopeammin ja leikattuun nauhaan tulee kuppimaista muotoa. (The Art of Slitting 2016)

Leikattaessa paksumpia ja / tai kovempia materiaaleja ja vaakasuuntaisen välyksen ollessa todella pieni, materiaalin leikkuupintaa muodostuu kaksoismurtuma. Tässä tapauksessa molemmista leikkuuteristä lähtee oma murtumaviiva, jotka eivät kohtaa samalla linjalla. Molemmat murtumat kulkeva omaa linjaansa, kunnes ne saapuva niin lähelle toisiaan, että niiden välinen kannas murtuu materiaalin leveyssuunnassa. Leikattujen nauhojen toisistaan erottamisen tarvitaan tässä tapauksessa leikkuuteriltä huomattavan suuri painuma materiaaliin. (The Art of Slitting 2016) Tuplamurtuman eteneminen on esitetty kuvassa 22.

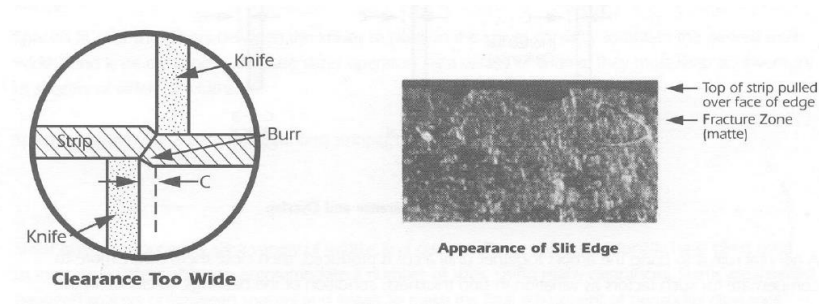


**Kuva 22.** Tuplamurtuman eteneminen materiaalissa (Bresnahan et al. 1999, s. 120).

Yleensä tällaisessa leikkautumisessa leikkauspinnassa ei näy ollenkaan murtumapintaa, vaan leikkuupinta on kauttaaltaan kirkas. Tällainen leikkaustapahtuma on erittäin rasittava leikkuuterille. Terät voivat vaurioitua ja niistä voi lohkeilla paloja. Materiaalin jää kiiltävän leikkuupinnan taakse piiloon särö, josta saattaa tulla suurempi murtuma, jos materiaali aletaan hitsaamaan tai työstämään. (The Art of Slitting 2016)

Vaakasuuntaisen välyksen ollessa liian suuri terän leikkuusärmä ja murtumataso eivät osu samalle linjalle. Leikkautumisen sijaan materiaali repeää. Leikkuureunassa näkyy erittäin suuri roll-over alue ja erittäin pieni tai ei ollenkaan leikkautunutta aluetta. Murtumaviiva

kulkee lähes koko materiaalinpaksuuden läpi ja leikattuun nauhaan tulee suuri jäyste. Tällainen halkaisutapa aiheuttaa suuren kuormituksen leikkuureunaan sekä -terään. Terästä saattaa myös lohkeilla paloja irti. (The Art of Slitting 2016) Murtumaviivan muodostuminen liian suurella vaakasuuntaisella välyksellä esitetty kuvassa 23.



**Kuva 23.** Murtumataso muodostuu lähes koko materiaalinpaksuuden läpi, kun vaakasuuntainen välyys on liian suuri (Bresnahan et al. 1999, s. 120).

Metallin pitkittäisleikkauksessa leikkuuterien vaaka- ja pystysuuntaisella välyksellä on suora korrelaatio keskenään. Yleisesti kovemmalla materiaalilla pystysuuntaista välystä, teriä painautumaa materiaaliin, tarvitaan vähemmän materiaalin murtumiseksi, kuin pehmeämmillä materiaaleilla. Vastaavasti vaakasuuntaista välystä tarvitaan enemmän kovemmilla materiaaleilla ja vähemmän pehmeillä materiaaleilla. Koska kova materiaali murtuu jo lyhyen leikkautumisen jälkeen ja murtuma taso kulkee aina samassa kulmassa materiaaliin nähden, kulkee murtumataso pidemmän vaakasuuntaisen matkan, että se saavuttaa toisen leikkaavan särmän. Näin ollen leikkuuterien vaakasuuntainen välyskin on oltava suurempi. (Bresnahan et al. 1999, s. 121)

Yleinen tapa säätää pystysuuntaista välystä on ensin ajaa käyttäviä akseleita niin lähelle toisiaan, että leikkaus onnistuu ja sitten vielä hieman lähemmäs. Tällä tavoin kompensoidaan leikkaukseen vaikuttavien tekijöiden kuten, materiaalin paksuusvaihtelu, käytävien akselien ja muun rakenteen joustot sekä terien tylsyminen ja voidaan varmistaa leikattujen nauhojen irtoaminen toisistaan. (Bresnahan et al. 1999, s. 121)

Terien liian pientä pystysuuntaista välystä, terien liiallista painumista materiaaliin on syytä välttää. Terien painuminen liian syväälle materiaaliin aiheuttaa nopeuseron materiaalin ja

leikkuuterän kontaktipisteeseen. Nopeusero terien ja materiaalin välillä aiheuttaa kasvaneesta kitkasta johtuvaa lämpötilan nousua terän ja materiaalin välille. Lämpötilan nousu aiheuttaa terään vaurioita sekä leikatun materiaalin hitsaantumista terään kiinni. (Bresnahan et al. 1999, s. 121)

Taulukoon 1 on koottu välysten vaikutus leikkaustapahtumaan.

*Taulukko 1. välyksen vaikutus leikkaustapahtumaan.*

Välyksen suunta	Välyksen koko	Vaikutus leikkaustapahtumaan
Vaakasuuntainen	Liian pieni	Syntyy huono leikkuupinta, sekä jäystettä. Paksuilla ja kovilla materiaaleilla kaksoismurtuman mahdollisuus. Terät tylsyvät nopeasti.
Vaakasuuntainen	Liian suuri	Leikkautumisen sijaan materiaali repeää ja muodostuu suuri jäyste. Suuri kuormitus leikkuureunaan ja -terään. Terässä lohkeamisvaara.
Pystysuuntainen	Liian pieni	Syntyy kitkan aiheuttamaa lämpöä terän ja materiaalin välille. Terän ominaisuudet heikkenevät lämmön vuoksi ja materiaali voi hitsaantua terään kiinni.
Pystysuuntainen	Liian suuri	Terät eivät painu riittävän syväälle materiaaliin, eikä leikkausta tapahdu.

Leikkuuterien vaakasuuntainen välys on tyypillisesti 5 – 7 prosenttia materiaalin vahvuudesta. Rakenneteräksillä tyypillinen pystysuuntainen välys on 25 – 30 prosenttia ja vaakasuuntainen välys 10 prosenttia materiaalin vahvuudesta. Ruostumattomalla teräksellä ja lujilla teräksillä murtuma alkaa jo 5 – 10 prosentin pystysuuntaisella välyksellä, joka johtaa materiaalin 90 – 95 prosenttiseen murtuma-alueeseen. Tällaisissa tapauksissa vaakasuuntainen välys on 20 prosenttia, tai jopa enemmän. (The Art of Slitting 2016)

Kirjassa ASM Handbook Vol 14 Forming and Forging esitetään lukuarvoja halkaisuterien välisille vaaka- ja pystysuuntaisille välyksille. Taulukossa 2 ja 3 on esitetty välysten lukuarvoja eri materiaalivahvuuksille. Huomattavaa on, että materiaalivahvuuden ylittäessä 0,15 tuumaa, muuttuu pystysuuntainen välys positiivisesta negatiiviseksi eli terät eivät ole enää lomittain toisiinsa nähden. Positiivisen ja negatiivisen välyksen ero on näytetty kuvassa 25.

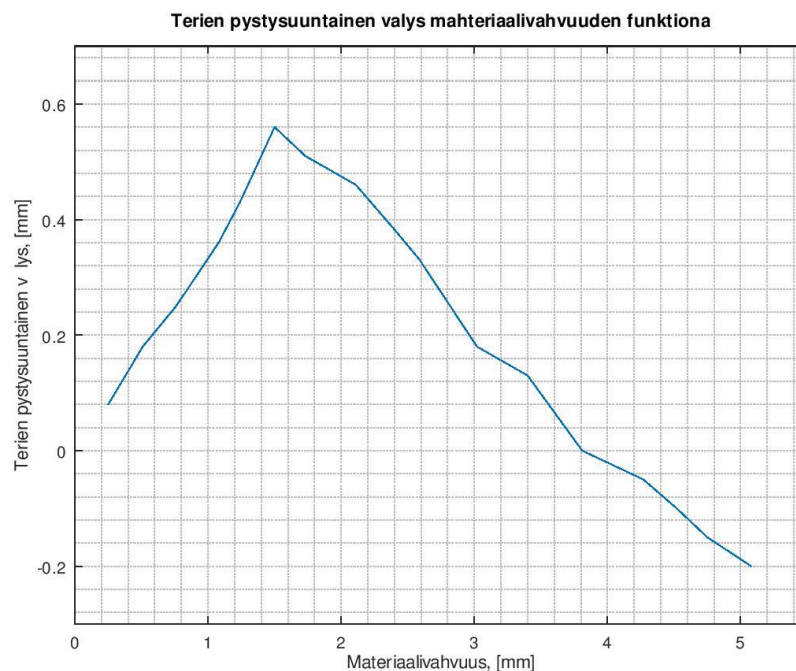
*Taulukko 2. Eri materiaalivahvuuksille soveltuvia pysty- ja vaakasuuntaisia välyksiä (Theis 1993, s. 1541).*

Materiaalin vahvuus, $t_m$ [mm]	Materiaalin vahvuus, $t_i$ [in]	Pystysuuntainen välys, $CL_v$ [mm]
0,250	0,010	0,080
0,510	0,020	0,180
0,760	0,030	0,250
1,070	0,042	0,360
1,240	0,049	0,430
1,500	0,059	0,560
1,730	0,068	0,510
2,110	0,083	0,460
2,410	0,095	0,380
2,590	0,102	0,330
3,020	0,119	0,180
3,400	0,134	0,130
3,810	0,150	0,000

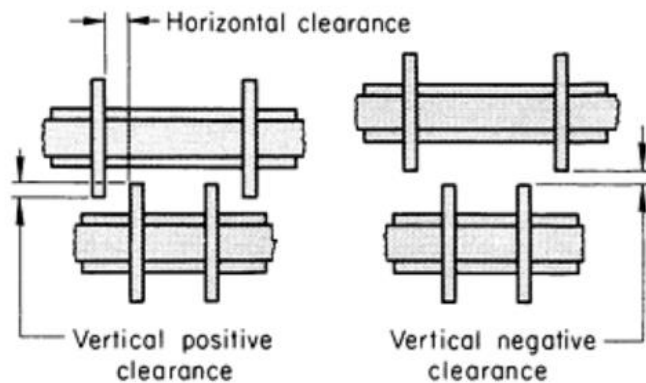
Seuraavilla materiaalivahvuuksilla negatiivinen pystysuuntainen vällys		
4,270	0,168	0,050
4,520	1,780	0,100
4,750	1,870	0,150
5,080	0,200	0,200

Taulukko 3. Vaakasuuntainen vällys (Theis 1993, s. 1542).

Materiaalin vahvuus, $t_m$ [mm]	Materiaalin vahvuus, $t_i$ [in]	Vaakasuuntainen vällys, $CL_h$ [mm]
0,200 tai vähemmän	0,008 tai vähemmän	0,000
0,230 – 0,250	0,009 – 0,010	0,013
0,280 – 0,480	0,011 – 0,019	0,025
0,510 tai enemmän	0,020 tai enemmän	7% – 8% materiaalinvahvuudesta



**Kuva 24.** Kuvassa nähdään, miten terien pystysuuntainen vällys muuttuu materiaalivahvuuden mukaan.



**Kuva 25.** Kuvassa esitetty pystysuuntaisen positiivisen ja negatiivisen välyksen ero (Theis 1993, s. 1542).

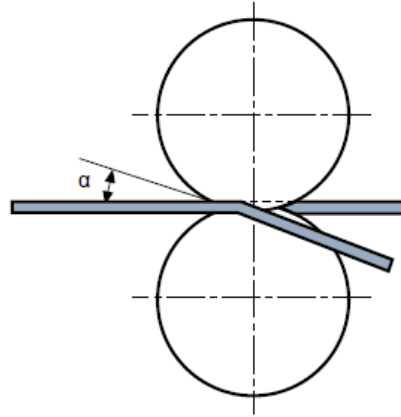
Rautaruukki, nykyinen SSAB esittää omassa materiaalissaan vaakasuuntaiselle välykselle suurempia arvoja. Materiaalista riippuen vaakasuuntainen välyks on 15 – 29 prosenttia materiaalin vahvuudesta. Rautaruukin suosittelemat arvot materiaaleille on esitetty taulukossa. 4 (Rautaruukki Oyj 2011, s. 7)

*Taulukko 4. Rautaruukin suosittelemat vaakasuuntaiset välykset eri teräksille (Rautaruukki Oyj 2011, s. 7).*

	Standardi	Leikkausväli levyn paksuudesta, [%]
S235J0	EN 10025-2	15 – 26
Ruuki Laser 230 C	Ruukki	15 – 26
Ruukki Laser 350 MC	Ruukki	17 – 28
Multisteel	Ruukki	18 – 27
Optim 650 MC	Ruukki	20 – 29

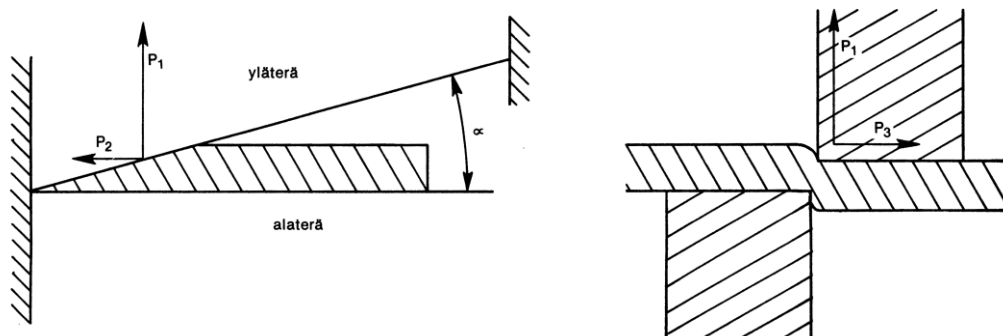
Nauhaleikkurilla tehtävää leikkausta kutsutaan pyöröleikkaukseksi. Pyöröleikkauksessa leikkauskulma on nolasta poikkeava, joten leikkaustapahtuma on vastaavan kaltainen, kuin levyleikkurissa. Tästä syystä pyöröleikkauksen leikkausgeometriaa tarkasteltaessa se rinnastetaan usein saksimaiseen leikkaukseen. Kuvassa 26 nähdään, miten leikkauskulma

$\alpha$  muodostuu pyöröleikkauksessa. (Rautaruukki 2011, s. 4) Leikkauskulma muodostuu teräsnauhan keskilinjan ja leikkurin terälle levyn kosketuskohtaan piirretty tangentin välille.



**Kuva 26.** Leikkauskulman  $\alpha$  muodostuminen pyöröleikkauksessa (Rautaruukki Oyj 2011, s 4).

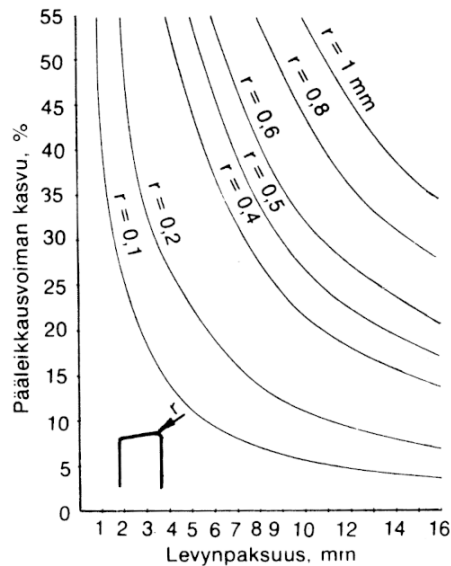
Materiaalin pitkittäisleikkauksessa syntyy kolme erilaista voimaa, pääleikkausvoima  $P_1$ , sivuttaisvoima  $P_2$  ja poikittaisvoima  $P_3$ . Kuvassa 27 on esitetty miten voimat muodostuvat leikkaustapahtumassa.



**Kuva 27.** Kuvassa esitetty saksileikkauksessa vaikuttavat voimat,  $P_1$ ,  $P_2$  ja  $P_3$  (Kauste & Kostamo 1980, s. 14).

Pääleikkausvoima  $P_1$  on suurin ja vaikuttavin voima. Pääleikkausvoiman suuruuteen vaikuttaa moni asia, yhtenä suurimpana tekijänä vaikuttaa terän tylsyyt. Kuvassa 28 on

esitetty käyrästä, josta havaitaan miten terän leikkausärmän pyöristymisen vaikuttaa pääleikkausvoiman kasvuun (Kauste & Kostamo 1980, s. 14).



**Kuva 28.** Terän leikkausärmän pyöristymisen vaikutus pääleikkausvoimaan (Kauste & Kostamo 1980, s. 14).

Monista päävoiman suuruuteen vaikuttavista tekijöistä huolimatta on havaittu, että voiman suuruus voidaan laskea riittävällä tarkkuudella seuraavalla kaavalla (Kauste & Kostamo 1980, s. 13):

$$P_1 = 0,5 \times t_m^2 \times \cos \alpha \times 0,8 \cdot R_m \quad (3)$$

Yhtälössä 3  $t_m$  on leikattavan materiaalin vahvuus,  $\alpha$  on leikkauskulma ja  $R_m$  on materiaalin murtolujuus. Yhtälössä leikattavan pinta-alan oletetaan olevan kolmio, jonka korkeudeksi ja kannan pituudeksi on määritelty materiaalin vahvuus. Tämä ala kerrotaan leikkauskulmalla ja 0,8 kertaisella materiaalin murtolujuudella. Näin saadaan materiaalin leikkautumiseen tarvittava pääleikkausvoima.

Sivuttaisvoima  $P_2$  on riippuvainen pääleikkausvoimasta ja yleensä suuruudeltaan niin pieni, että sen kumoamiseen riittää syntyvä kitkavoimat (Kauste & Kostamo 1980, s. 13). Nauhaleikkauslinjassa sivuttaisvoimia syntyy, jos materiaalin syöttönopeus poikkeaa

leikkuuterien pyörimisnopeudesta. Tällainen tilanne voi syntyä mahdollisesti Driven-tyyppisessä nauhaleikkauslinjassa, ei niinkään Pull-Through tyyppisessä linjassa, jossa materiaali vedetään koko linjan läpi vastaanottokelaimella.

Poikittaisvoima  $P_3$  vaikuttaa kohtisuoraan leikkaustasoa vasten ja näin pyrkii työntämään teriä kauemmas toisistaan. Voiman suuruuteen vaikuttaa erityisesti terien kuluminen ja voima voi tylsillä terillä olla jopa päälleikkausvoiman suuruinen. (Kauste & Kostamo 1980, s. 15)

Kirjallisuudesta ei löydy suoraa laskentamenetelmää, jolla voitaisiin arvioida pyöröleikkauksessa syntyviä voimia. Voimia voidaan arvioida epäsuorasti leikkaukseen vaaditun laskennallisen tehon kautta. Bresnahan (1999, s.77) esittää kirjoituksessaan kaavan 4, jolla voidaan laskea leikkauksessa vaadittava teho, kun tiedetään leikkausten määrä, syöttönopeus sekä materiaalin paksuus ja leikkausmurtolujuus.

$$P = \frac{\text{No.of cuts} \times 1,44 \times \text{Speed} \times (\text{Thickness})^2 \times \text{Shear Stress}}{50000 \times (\% \text{ Efficiency})} \quad (4)$$

Kuten aikaisemmin on todettu, pitkittäisleikkauksessa tarvitaan tarkkaa paikoitusta kahteen suuntaan. Terät on paikoitettava oikeaan etäisyyteen toisistaan siten, että terien välille saadaan tarvittava pysty- ja vaakasuuntainen vällys. Lisäksi terät pitää paikoittaa vaakasuunnassa siten, että voidaan leikata halutun levyistä nauhaa vaaditulla mittatarkkuudella.

Terien vaakasuuntainen paikoitus tehdään siirtämällä terät oikeille paikoille käyttävällä akselilla. Tilanteesta riippuen teriä siirretään yksittäin tai ylä- ja alaterää pareittain. Pystysuuntainen vällys säädetään siirtämällä käyttävää akselia pystysuunnassa haluttuun paikkaan. Pituusleikkausyksikön rakenteesta riippuen, toinen käyttävä akseli on kiinteä ja toista siirretään tai molemmat akselit siirrettäviä.

Terän vaadittuun vaakasuuntaiseen paikoitustarkkuuteen vaikuttaa leikatun nauhan leveysmitta ja sen tarkkuus. Yleisesti koneenvalmistajat ovat käyttäneet

nauhaleikkauslinjojen tarkkuustoleranssina yleistoleranssia SFS-EN 22768-1 ja toleranssiluokkana luokkaa m. (Legionnaire | Slitter 2021, Slinet ASCO machines 2019)

Toleranssit toleranssiluokittain on esitetty kuvassa 29. Kuvasta nähdään, että ohuimman nauhan olleessa leveydeltään suurempi kuin 30 mm, mutta pienempi kuin 120 mm, on leveystoleranssi silloin  $\pm 0,3$  mm. Tämän perusteella voidaan määrittellä terän paikoituksen toleranssiksi suurimmillaan  $\pm 0,15$  mm, jolloin terien paikoittuessa toleranssialueen äärioloihin, saavutetaan vielä riittävä tarkkuus leikatun nauhan leveydessä.

		Arvot mm							
Toleranssiluokka Tunnus	Kuvaus	Sallitut poikkeamat nimellismitta-alueella							
		> 0,5 <sup>1)</sup> ≤ 3	> 3 ≤ 6	> 6 ≤ 30	> 30 ≤ 120	> 120 ≤ 400	> 400 ≤ 1 000	> 1 000 ≤ 2 000	> 2 000 ≤ 4 000
f	hieno	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5	-
m	keskikarkea	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2
c	karkea	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3	±4
v	erittäin karkea	-	±0,5	±1	±1,5	±2,5	±4	±6	±8

<sup>1)</sup> Nimellismitoille < 0,5 mm, eromitat tulee merkitä vastaavan nimellismitan viereen.

**Kuva 29.** Yleistoleranssit toleranssiluokittain (SFS-EN 22768-1 1993, s. 5).

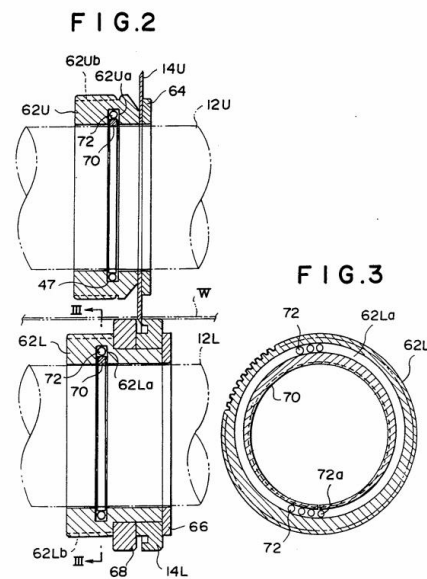
Vielä nauhan leveystoleranssiakin suuremman paikoitustarkkuusvaatimuksen asettaa terien välisen vaakasuuntaisen välyksen säätö. Leikattaessa ruostumatonta terästä ja vaakasuuntaisen välyksen ollessa 20 % materiaalinvahvuudesta on välys 0,5 mm materiaalilla 0,1 mm ja 0,75 mm materiaalilla 0,15 mm. Välyksien ero on 0,05 mm, eli tämän perusteella voidaan määrittellä, että vaakasuuntaisen välyksen säädön paikoitustarkkuuden on oltava pienempi, kuin  $\pm 0,025$  mm, että toleranssialueet eivät mene päällekkäin eri materiaalinvahvuuksilla.

Pystysuuntainen paikoitustarkkuusvaatimus tulee terien pystysuuntaisen välyksen vaatimuksesta. Taulukosta 2 voidaan lukea, että materiaalinvahvuuden ollessa 0,51 mm on pystysuuntainen välys 0,18 mm ja materiaalinvahvuuden ollessa 0,76 mm on välys 0,25 mm. Välyksien ero on 0,07 mm. Tämän perusteella voidaan todeta, että pystysuuntaisen paikoituksen tarkkuusvaatimus on samaa suuruusluokkaa, kuin vaakasuuntaisen paikoituksen.

### 3.2 Benchmarkingin tulokset

Tutkittaessa muiden koneenvalmistajien terien automaattisia lukitusmekanismeja havaittiin, että lukitusvoima perustuu kitkaan ja sen synnyttämiseen on käytössä kaksi erilaista ratkaisua. Kitkaliitos on toteutettu joko paisuvalla käytävällä akselilla tai leikkuuterän ja akselin epäkeskeisyyteen perustuvalla kitkaliitoksella. Kuvassa 30 on esitetty eräs ratkaisu, jossa käytetty epäkeskeisyyttä kitkaliitoksen tekemiseen.

Teränpitimessä 62L on ura 62La, jonka yläpinta on epäkeskeinen teränpitimen keskireikään nähden. Lukitusrenkaan 70, ulkopinta on myös epäkeskeinen keskireikäänsä nähden. Pyöritettäessä teränpidikettä ja lukitusrengasta toisiinsa nähden, teränpidikkeen urassa olevat teräskuulat 72 hakevat paikkansa urassa siten, että ne muodostavat kiristävän liitoksen lukitusrenkaan ja käytävän akselin 12L kanssa. Liitos avautuu, kun akselia ja teränpidikettä pyöritetään vastakkaiseen suuntaan toisiinsa nähden. Teränpitimen ulkokehällä on hammaskehä, johon tarttumalla saadaan teränpitimestä pitävä ote, että käyttävää akselia pyörittämällä teränpitimen akselin välille saadaan liitoksen avaava ja sulkeva pyöriysuuntaero. Samalla otteella voidaan terää myös siirtää akselilla, kun terän ja akselin välinen liitos on avattu. (Pat. EP 0 444 612 A1 1991, s. 4)



**Kuva 30.** Kuvassa esitetty epäkeskeisyyteen perustuva terän kitkaliitos (Pat. EP 0 444 612 A1 1991, s. 9).

Paisuvassa akselissa paisuntatoiminnan aktivoimisen jälkeen akselin pinnasta nousee haittoja, jotka suurentavat akselin halkaisijaa. Halkaisijan kasvaessa leikkuuterän ja akselin välille muodostuu kitkaliitos, joka estää leikkuuterän liikkumisen akselin pituussuunnassa sekä kiertymästä akselin ympäri. Haitat voivat olla eri muotoisia. Akselin pituussuuntaisia haittoja näkyy kuvassa 31.

Akseleita on pneumatiikalla, hydraulikalla sekä mekaanisella liikkeellä toimivia malleja. Pneumaattisissa ja hydraulisissa akseleissa ilmamäärä, tilavuusvirta sekä paine liikuttaa haittoja, jotka suurentavat akselin halkaisijaa. Mekaanisissa akseleissa on kierretanko, jota kiertämällä liikutetaan haittoja. Mekaaninen akseli esitetty kuvassa 32.



**Kuva 31.** Akselin pituussuuntaiset haitat näkyvät tummina raitoina akselin pinnassa (Pneumatic self-expanding shafts with ledges mod. 640 PQL 2021).



**Kuva 32.** Mekaanisesti laajenevassa akselissa laajeneminen perustuu ruuviin (Mechanical expanding shafts with leaves mod. 636 MS 2021).

Leikkuuterien automaattiseen lukitukseen paisuvat akselit ovat helppokäyttöisempiä, kuin epäkeskeisyyteen perustuvat liitokset. Paisuvassa akselissa riittää, että terässä tartuntapinnat pelkästään terän akselin pituussuuntaista siirtämistä varten. Käytettäessä epäkeskeisyyteen perustuvaa lukitusmenetelmää, tarvitaan terässä tartuntapinta terän kiertymisen suunnassa, että terän ja akselin välille saadaan pyörimissuuntaero, joka avaa ja lukitsee lukituksen. Paisuva akseli vaatii toimiakseen paineilma- tai hydraulikkaliittynän tai mekaanisesti toimiva akseli toimilaitteen, joka pyörittää akselin käyttöruuvia.

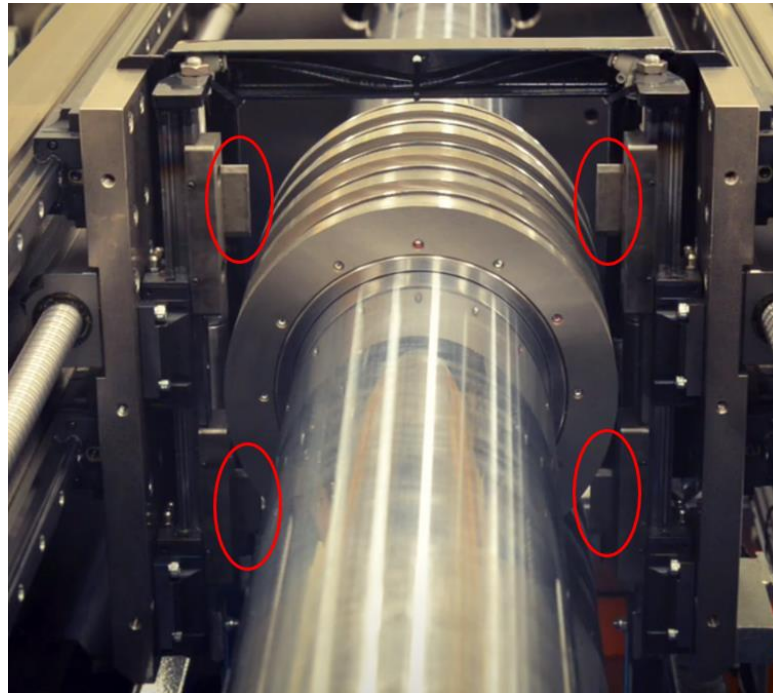
Usealla konevalmistajalla on käytössä ratkaisu, jossa leikkuuterä muodostuu kahdesta erillisestä osasta, runko-osasta ja ruuveilla kiinnitettävästä leikkuuterästä. Runko-osassa on muoto, johon siirtoelin kiinnittyy, että terää voidaan siirtää. Lukitusmenetelmästä riippuen terässä on muoto pelkästään aksiaalista siirtoa varten (paisuva akseli) tai myös terän pyörimistä estävä muoto. Pyörimistä estävällä muodolla voidaan vapauttaa terän lukitus käyttävään akseliin, silloin, kun terän lukitus on toteutettu epäkeskeisyyteen perustuvalla ratkaisulla.

Mikäli pääsääntöisesti leikataan saman vahvuista tai hyvin lähellä toisiaan olevia materiaalivahvuuksia, voidaan ylä- ja alapuolisen terän vaakasuuntainen vällys säätää kiinteäksi leikkuuterän runko-osan mitoituksella ja vällyslevyillä. Tällä tavalla toimittaessa runko-osan säätöelimen kiinnittymismuoto voidaan tehdä runko-osissa samaan kohtaan ja tartuttaessa teriin samalla otteella pysyy terien vaakasuuntainen vällys koko ajan säädettynä ja teriä voidaan siirrellä samalla liikkeellä yhtenä kokonaisuutena. Tästä saadaan merkittävä hyöty verrattuna tilanteeseen, jossa ylä- ja alapuolista terää jouduttaisiin siirtämään erikseen ja hallitsemaan terien vällys siirtoelimen paikoituksella.

Australialainen konevalmistaja SWI Machinery käyttää omissa nauhaleikkauskoneissaan terän lukitukseen hydraulikalla paisuvaa akselia ja terien paikoitukseen kuularuuvilla siirrettävää lineaarijohteilla liikkuvaa paikoituselintä. Yleinen menetelmä tämän kaltaisissa paikoitussovelluksissa on käyttää kuularuuvia servomoottorilla, joten voidaan olettaa, että myös tässä koneessa on tehty samoin.

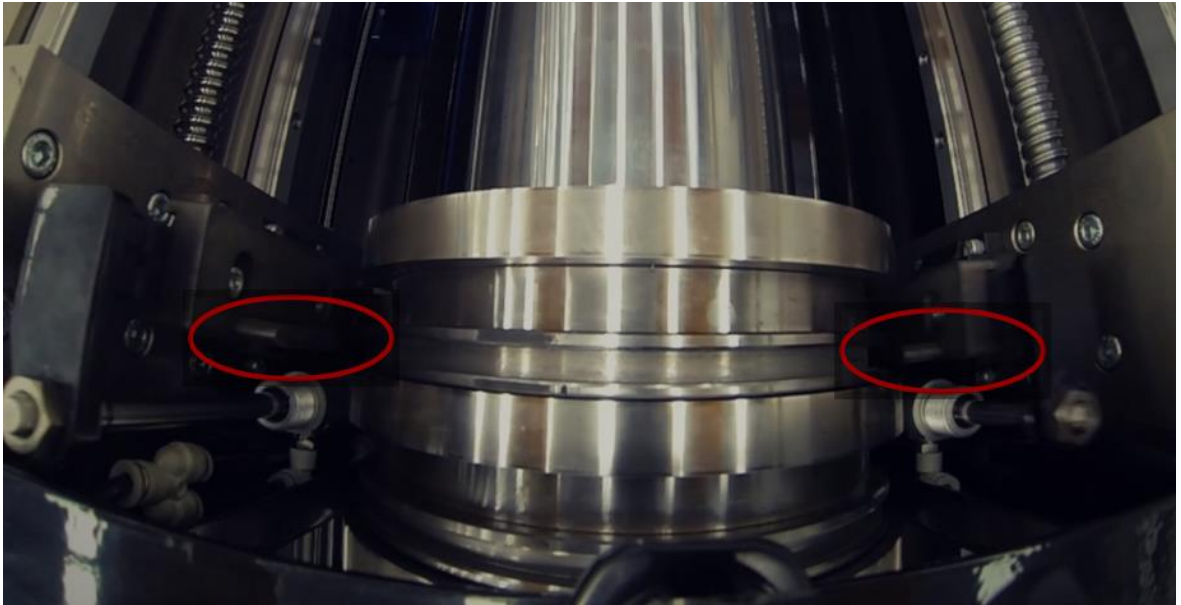
Paikoituselimestä on haitat, jotka asettuvat terissä oleviin hahloihin, jonka jälkeen terät siirretään haluttuun paikoituskoordinaattiin. Kuvassa 33 nähdään terän molemmilla puolilla

olevat haitat paikoituselimissä. Kuvassa haitat eivät ole vielä paikoittuneet terien hahloihin. SWI Machinery:n koneessa ylä- ja ala-akseleilla olevaa teräparia siirretään samanaikaisesti. (Machines4u.com.au 2015)



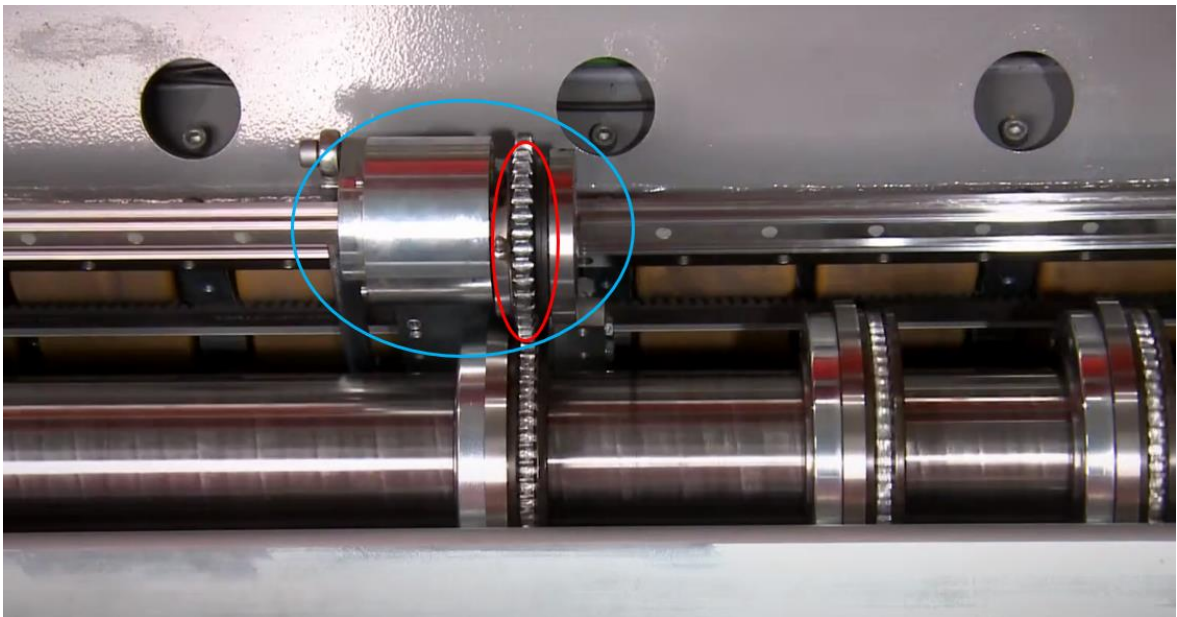
**Kuva 33.** Paikoituselimessä on haitat, jotka tarttuvat terissä oleviin hahloihin (Machines4u.com.au 2015).

Kuvassa 34 terä on kuvattu ylhäältä päin ja siinä nähdään terässä oleva hahlo, johon paikoituselimen haitat paikoittuvat, että siirto voidaan tehdä.



**Kuva 34.** Terässä on hahlo, johon paikoituselimen haitat paikoittuvat, ennen siirron alkua (Machines4u.com.au 2015).

Krasser GmbH on itävaltalainen koneenrakennus yritys, joka valmistaa ja myy arkki- ja nauhaleikkauslinjoja. Heidän pituusleikkausyksikössään terälukitukseen on käytössä epäkeskeisyyteen perustuva lukitusmenetelmä. Kuvassa 35 nähdään, että tässä pituusleikkausyksikössä leikkuuterän paikoituselimestä, merkitty sinisellä, on myös muoto (hammaskehä), merkitty punaisella, jolla voidaan tarttua leikkuuterään ja estää sen kiertyminen akselin mukana. Tällä toimenpiteellä saadaan aikaan terän ja akselin välinen pyörimissuuntaero ja voidaan avata sekä lukita epäkeskeisyyteen perustuva lukitus.



**Kuva 35.** Paikoituselimessä on myös terän kiertymisen estävä muoto, merkitty punaisella (SheetmetalMachinery 2015).

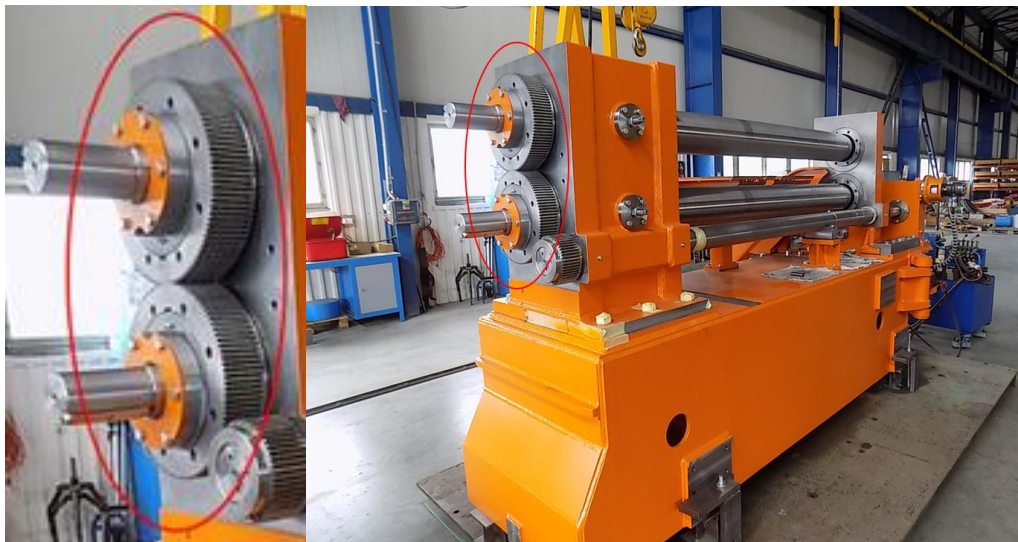
Krasserin koneessa paikoituselintä liikutetaan myös lineaarijohteella liikkuvalla kelkalla. Kelkan siirtämistä varten kelkka on kiinnitetty koneen poikki kulkevaan hammashihnaan. Hammashihnaa liikutellaan hammashihnan toisessa päässä olevalla sähkömoottorilla, joka hammaspyörän välityksellä liikuttaa hammashihnaa. (Belano Maskin AB 2021)

Terän lukitus avataan ja suljetaan kääntämällä paikoituselintä siten, että paikoituselimessä ja leikkuuterässä olevat hammaskehät vastaavat toisiinsa ja estävät terän pyörimisen käyttävän akselin mukana. Tämän jälkeen käyttävää akselia ajetaan vasta- tai myötäpäivään riippuen, siitä aiotaanko terän lukitus avata vai sulkea.

Pystysuuntaisen välyksen säätöön on yleisesti käytössä kolme erilaista menetelmään. Pinch-roll-tyyppinen, jossa toinen käyttävä akseli on kiinteästi paikallaan ja toisen käyttävän akselin paikkaa säädetään hydraulisynterillä tai ruuvilla, esitetty kuvassa 36. Toisessa menetelmässä toinen käyttävä akseli on kiinteästi paikallaan ja toinen käyttävä akseli on kiinnitetty leikkausyksikön runkoon epäkeskeisellä liitoksella. Viimeisessä menetelmässä molemmat käyttävät akselit on kiinnitetty leikkausyksikön runkoon epäkeskeisillä liitoksilla. (Bresnahan et al. 1999, s. 132) Kuvassa 37 nähdään, miten käyttävä akselin on liitetty epäkeskeisesti hammaspyöriin.



**Kuva 36.** Pinch-roll tyyppinen säätö (Slitting Heads 2012).



**Kuva 37.** Molemmat käyttävät akselit liitetty epäkeskeisesti hammaspyöriin (Bronx Slitter Head 2021).

Käyttävien akseleiden säätömenetelmistä pinch-roll tyyppinen on kustannuksiltaan edullisin toteuttaa, mutta tällaisessa rakenteessa on myös enemmän välyksiä, kuin epäkeskeisillä liitoksilla toteutetussa säätöratkaisussa. Yhdellä epäkeskeisesti liitettyllä akselilla saavutetaan lähestulkoon sama tarkkuus, kuin kahdella epäkeskeisellä liitettyllä akselilla, mutta silloin toinen akseli on liitetty kiinteästi paikalleen, mikä vähentää akseleiden säätömahdollisuuksia. (Bresnahan et al. 1999, s. 133)

### 3.3 VDI2221:n avulla tuotetut ratkaisuvaihtoehdot

Tässä tutkimuksessa käytettiin VDI2221:n mukaista systemaattisen tuotesuunnittelun ohjeistoa tuottamaan ratkaisuja tutkimusongelmaan. Tutkimusongelmassa etsitään menetelmää pitkittäisleikkauksessa käytettävien terien automaattiseen paikoitukseen ja lukitukseen. Koska paikoitus- ja lukitustoiminnot eivät ole suoraan sidoksissa toisiinsa, suoritetaan VDI2221:n mukainen prosessi molemmille toiminnoille omina prosesseina.

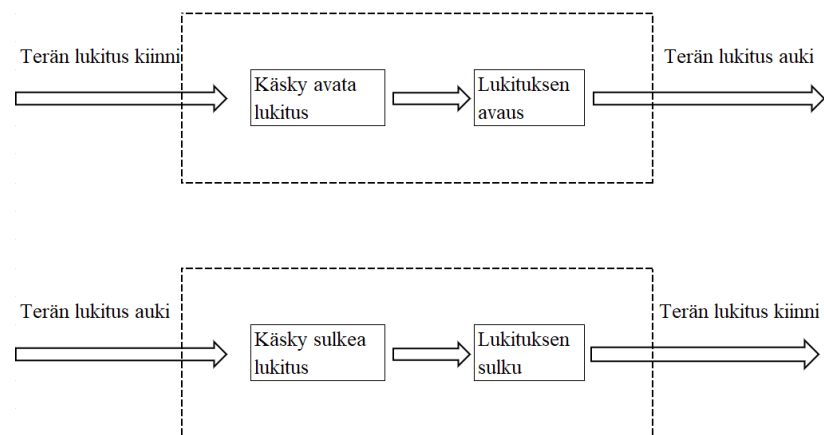
VDI 2221 ohjeiston mukaisessa tuotekehitysprosessin työnkulussa ensimmäisenä tehdään tehtävänasettelun selvitys ja täsmennys ja luodaan tehtävän vaatimuslista. Terän lukituksen tärkein tehtävä on tilannekohtaisesti lukita tai sallia terän aksiaalisuuntaisen liikkeen sekä akselinsa ympäri kiertymisen vapausasteet. Tästä syntyy vaatimukset, että lukituksen on luotava riittävän suuri pitovoima estämään terän liukuminen leikkaustapahtuman aiheuttamien voimien vuoksi akselilla aksiaalisuuntaisesti sekä kiertyminen terän ympäri. Vaadittava voima on laskettu liitteessä III. Tämän lisäksi terän lukituksen avauduttava ja lukituttava ilman koneen operaattorin toimenpiteitä. Näistä vaatimuksista syntyi vaatimuslistan kiinteät vaatimukset. Lisäksi listaan valittiin vielä muutama toiveomaisuus, jolla lopullista valintaa voitaisiin ohjata haluttuun suuntaan. Lukitustoiminnon vaatimuslista esitetty taulukossa 5.

*Taulukko 5. Lukitustoiminnon vaatimuslista.*

<b>VAATIMUSLUOKKA</b>	<b>VAATIMUS</b>	<b>TÄRKEYS</b>
KV	Riittävä pitovoima estämään terän liike aksiaalisuuntaan 1624 N	ET
KV	Riittävä pitovoima estämään terän kiertyminen akselin ympäri, 1624 N	ET
KV	Vapausasteiden vapautus/lukitus ei saa vaatia toimenpiteitä operaattorilta	ET
T	Kaikki vapausasteet on vapautettava/lukittava samalla toiminnolla	T

T	Lukitusmekanismi on mekaniikaltaan yksinkertainen.	T
T	Lukitus/vapautus ei vaadi ulkoista voimanlähdettä (hydrauliikka / pneumatiikka)	VT
T	Vapautetun terän aksiaalisuuntainen siirto ei vaadi lisätoimintoja siirron onnistumiseksi	VT
KV = kiinteä vaatimus, VV = vähimmäisvaatimus, ET = erittäin tärkeä, T = tärkeä, VT = vähemmän tärkeä		

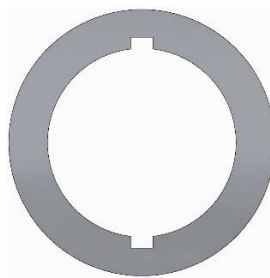
Luonnosteluvaiheessa tehtävän päätoiminto jaetaan osatoiminnoiksi ja tämän pohjalta aloitetaan periaatteellisen ratkaisun haku. Terän lukituksen toimintorakenne on hyvin yksinkertainen, toimintorakenteessa on kaksi päätoimintoa, avata tai sulkea lukitus annetun käskyn mukaan. Nämä päätoiminnot osatoimintoinen on kuvattu kuvassa 38.



**Kuva 38.** Lukituksen pää- ja osatoiminnot.

Benchmarking analyysissä havaittiin, että lukituksen toteutukseen on käytännössä kaksi vaihtoehtoista lukitustapaa. Toisessa vaihtoehdossa terä lukitaan paikalleen paisuvalla akselilla ja toisessa vaihtoehdossa terä lukitaan epäkeskeisyyteen perustuvalla lukitustavalla. Lukitusmenetelmän valinta vaikuttaa oleellisesti myös menetelmään, jolla terää siirretään akselilla, koska lukitusmenetelmät vaativat erilaiset mekanismit lukituksen käyttöön ja siten myös terän siirtoon. Näiden kahden vaihtoehdon vertailuun ja soveltuvan vaihtoehdon valintaan käytettiin arvoanalyysiä. Alaluvussa 3.4 on esitetty tämän arvoanalyysin tulokset.

Terän siirtämisen kannalta merkittäviä asioita akselissa ovat terän ulkohalkaisija, pinnanlaatu sekä haittojen koko. Akselin toimittajalta saatiin toleroitu mittakuva akselistä ja tämän tiedon pohjalta muotoiltiin ja mitoitettiin terän runko-osa niiltä osin, kun terä on kosketuksissa akseliin. Terän runko-osaan tehtiin akselinreiän lisäksi kaksi toisiinsa 180 asteen kulmassa olevaa hahloa akselissa olevia lukitushaittoja varten. Terän runko-osa esitetty kuvassa 39.



**Kuva 39.** Terän runko-osaan on mallinnettu reikä ja hahlot käyttävää akselia varten.

Airila & Kivioja (2010, s. 327) esittävät tekstissään kaavan 5, jolla voidaan arvioida S355 teräksestä valmistetun umpiakselin vähimmäisulkohalkaisijaa, kun tiedetään akselin välittämä teho. Kaavassa  $D$  on akselin ulkohalkaisija,  $P$  akselin välittämä teho ja  $n$  akselin pyörimisnopeus.

$$D = 140 \times \sqrt[3]{\frac{P}{n}} \quad (5)$$

Käyttämällä liitteen III mukaisesti laskettua tehoa ja pyörimisnopeutta, saadaan kaavan 5 mukaisesti akselin minimiulkohalkaisijaksi 64,52 mm käytettäessä viittä leikkuuterää. Verrattaessa tätä nykyisessä konstruktiossa olevaan käyttävän akselin ulkohalkaisijaan 170 mm, voidaan todeta, että uudessa konstruktiossa voidaan käyttää saman kokoista käyttävää akselia.

Pere (2009, s. 20-6) ryhmittelee toleranssiasteet kirjassaan kolmeen ryhmään ja erilaisiin käyttösovelluksiin. Tavallisimmille työstökoneen osille hän esittää käytettäväksi toleranssiastetta 5 – 6. Akselin ja leikkuuterän välistä sovitetta voidaan verrata

tarkkuusvaatimuksiltaan työstökoneen osien väliseen sovitteeseen. Tämän perusteella akselille valittiin esitetyistä vaihtoehdoista tarkempi, eli toleranssiaste 5.

Terärungon hyvä liukuminen akselilla haluttiin varmistaa, joten akselin ja terärungon väliseksi sovitteeksi valittiin välyssovite. Tällä valinnalla voitiin varmistaa, että terärungon ja akselin välisessä sovitteessa olisi aina välys, mutta välys on aina mahdollisimman pieni ja tästä johtuen terärunko asettuisi mahdollisimman suoraan akselille. Akselin ulkohalkaisijan toleranssin ollessa h5 valittiin runko-osan reiälle SFS-EN ISO 286-1 standardin kanta-akselijärjestelmän suositeltavien sovitteiden mukaisesti toleranssiksi H6 välyssovitteen saavuttamiseksi. Sovitteen ollessa 170 H6/h5 saadaan minimivälykseksi 0 mm ja maksimivälykseksi 0,043 mm.

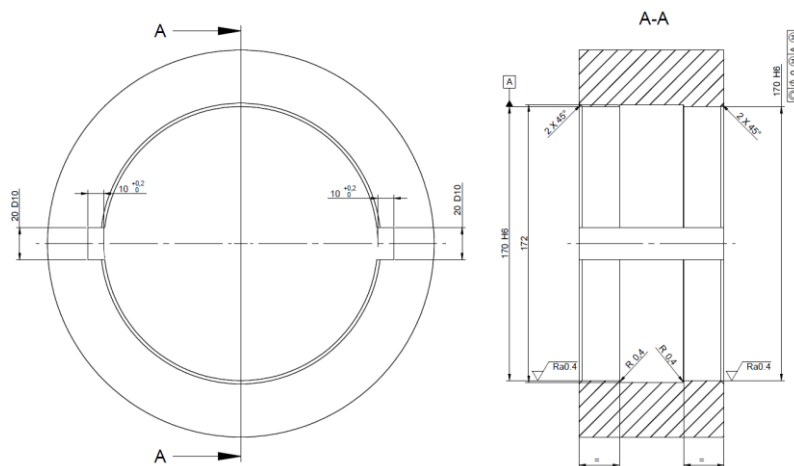
Sopivan sovitteen valinnan lisäksi terän akselille asemoitumisen ja liukumisen parantamiseksi terärungon keskireikään tehtiin reiän keskikohtaan kevennys. Kevennys esitetty kuvassa 39. Näin voitiin varmistaa, että terärunko vastaa akseliin vain terärungon etu- ja takapäätä. Tällaisella muotoilulla voitiin sulkea pois se mahdollisuus, että terärunko vastaisi akseliin vain rungon keskikohdalta ja aiheuttaisi terärungon huonon asettumisen akselille. Samalla muotoilulla saatiin aikaan se, että keskireiän kantavista osista tuli kaksi toisistaan riippumatonta sylinterimuotoa. Näiden muotojen on kuitenkin oltava sama-akselisia sekä täytettävä sovitteen määrittelemät halkaisijatoleranssit. Muodot sidottiin toisiinsa käyttämällä geometrisia toleransseja. Käyttämällä sama-akselisuuden geometrista toleranssia lisätynä maksimimateriaalin vaatimuksella saadaan muodostettua vaatimus, jossa molempien sylinterimuotojen keskiviiva on teoreettisesti oikeassa sijainnissa, eli keskiviivat ovat samalla viivalla. Asettamalla maksimimateriaalin vaatimuksen numeeriseksi arvoksi nolla syntyy vaatimus, jonka perusteella reiän pienin mahdollinen halkaisija on sovitteen vaatima nimellismitta + 0 mm ja suurin halkaisija vastaavasti nimellismitta +0,025 mm.

Terärungon asennon ja paikoituksen ohjaus otetaan terärungon keskireiästä, joten akselin lukitushaittojen hahloilta ei vaadita suurta tarkkuutta. Halojen tarkoitus on ainoastaan estää terän kiertyminen akseliin nähden. Mikäli hahlon ja lukitushaitan välillä on välys, aiheuttaa se terän akseliin nähden. Tällä kiertymisellä ei ole merkitystä leikkaustulokseen. Välys kuitenkin on oltava, että lukitushaitta ei estä terän liikkumista aksiaalisuunnassa. Hahlon

välyksen valinnassa hyödynnettiin standardia SFS 2636 Tasakiilat ja vastaavat kiilaurat. Standardista valittiin käytettäväksi välyssovite, jolloin lukitushaitan ja hahlon sovitteeksi valittiin 20 D10/h9.

Terärungon sisäreiän pinnankarheudeksi valittiin sama arvo, kuin aikaisemmassa konstruktiossa käytetyssä terärungossakin on ollut käytössä. Pinnankarheus on ollut aritmeettisena keskimääräisenä pinnankarheusarvona esitettyä Ra0.4. Tämä pinnankarheus arvo vaatii, että pinta hiotaan viimeisenä valmistusvaiheena, että saavutetaan vaadittava pinnankarheusarvo.

Lukitus tapahtuu akselista ulostulevien haittojen painautuessa terärungon keskireiän pintaan ja vapautus haittojen vetäytyessä takaisin akselin sisään. Näin ollen akselin lukituksen vapautukseen ei terärungossa tarvita erillisiä muotoja. Kuvassa 40 esitetään terärungon malli, johon on merkitty lukitukseen tarvittavat muodot, toleroidut mitat sekä pinnankarheus.



**Kuva 40.** Terärungon piirustus, johon on merkitty lukitukseen liittyvät muodot, toleroidut mitat sekä pinnankarheus.

Lukituksen osalta tuotekehitysprosessia ei viety VDI 2221 ohjeistuksen mukaiseen viimeiseen, viimeistelyvaiheeseen, koska tämän tutkimuksen tuloksena syntyy dokumentaatio, jolla voidaan valmistaa toiminto prototyypitestausta varten. Työn viimeistelyvaihe suoritetaan prototyypitestauksen jälkeen, kun mahdolliset prototyypitestauksessa havaitut muutostoimenpiteet rakenteeseen on tehty.

Myös terän paikoitusmenetelmän ratkaisuun käytettiin systemaattisen tuotekehityksen ohjeistoa VDI 2221. Paikoitusmenetelmän päätoiminnon osatoimintojen ratkaisemiseen on olemassa useita eri ratkaisuvaihtoja. Näiden vaihtoehtojen listaamiseen ja sopivimman vaihtoehdon valitsemiseen käytettiin morfologista analyysiä, aikaisemmin käytetyn arvoanalyysin sijaan.

Paikoitusmenetelmän valinta aloitettiin myös vaatimuslistan määrittelyllä. Tälle poikkileikkausyksikölle on määritelty leikkauskykyvaatimukseksi kyky leikata ruostumatonta terästä paksuudeltaan 0,5 – 2,0 mm. Kuten aikaisemmin on todettu, ruostumattomalle teräkselle hyväksi havaittu vaakasuuntainen välys on 20 % materiaalin vahvuudesta, tai jopa enemmän. Taulukoon 6 on laskettu laskennalliset välykset eri materiaalivahvuuksille 20 % välysvaatimuksella.

*Taulukko 6. Vaakasuuntainen välys, välyksen ollessa 20 % materiaalin vahvuudesta.*

Materiaalin vahvuus, $t_m$ [mm]	Laskennallinen välys, $CL_h$ [mm]
0,50	0,10
0,75	0,15
1,00	0,20
1,25	0,25
1,50	0,30
2,00	0,45

Vaakasuuntaisen välyksen toleranssiksi  $L_l$  määriteltiin  $\pm 0,025$  mm. Näin voitiin varmistaa, että välysten ollessa sallitun toleranssialueen ääriarvoissa, eivät eri materiaalivahvuuksien toleranssialueet mene päällekkäin.

Näin välykselle määritellyn toleranssin ja aikaisemmin yleistoleranssin pohjalta leikattavan nauhan leveydelle määritellyn toleranssin perusteella vaakasuuntaiselle paikoitustarkkuudelle saatiin kaksi raja-arvoa. Siirrettäessä terää vaakasuuntaisen välyksen verran, eli 0,10 mm – 0,45 mm tarkkuusvaatimus on  $L_l = \pm 0,025$  mm ja siirrettäessä terää leikattavan nauhan leveyden vaatimaan paikkaan voi siirtomatka olla 65 mm – 1250 mm ja tarkkuusvaatimus  $L_2 = \pm 0,15$  mm.

Pystysuuntaisen välyksen voi parhaiten määrittää leikkurikohtaisesti siten, että suurennetaan pystyvälystä niin kauan kuin leikkuri kykenee irrottamaan leikattavat kappaleet toisistaan (Rautaruukki Oyj 2011, s. 7). Taulukon 2 mukaan pystysuuntainen välys on noin 25 % leikattavan materiaalin vahvuudesta. Tämän tiedon perusteella laskettiin numeroarvot leikattaville materiaalivahvuuksille taulukkoon 7, että nähtäisiin minkä suuruisia välyksien erot ovat ja pystyttäisiin määrittelemään tarvittava paikoitustarkkuus käyttävän akselin siirrolle.

*Taulukko 7. Pystysuuntainen välys, välyksen ollessa 25 % materiaalinvahvuudesta.*

Materiaalin vahvuus, $t_m$ [mm]	Laskennallinen välys, $CL_v$ [mm]	Paikoituksessa käytettävä välys, $CL_{vp}$ [mm]
0,50	0,13	0,15
0,75	0,19	0,20
1,00	0,25	0,25
1,25	0,31	0,30
1,50	0,38	0,40
2,00	0,50	0,50

Kuten taulukosta 7 havaitaan, on pystysuuntaisen välyksen erot eri materiaalivahvuuksilla samaa suuruusluokkaa, kuin vaakasuuntainen välys. Tämän perusteella voidaan todeta, että pystysuuntaisen akselin siirrossa on päästävä suuruusluokaltaan vastaavaan paikoitustarkkuuteen, kuin terien vaakasuuntaisen välyksen asetuksessa. Samaa taulukkoon lisättiin myös sarake, jossa on laskennalliset välykset pyöristetty paikoitusta varten 0,05 mm tarkkuuteen. Näin ollen pystysuuntaiselle paikoitukselle voidaan käyttää samoja paikoitustarkkuuden toleranssiarvoja, kuin vaakasuuntaisella paikoituksella.

Paikoitusnopeuksien määrittelyyn käytettiin vertailua muiden valmistajien koneisiin. Tutkimalla konevalmistajien esittelyvideoita pystyttiin arvioimaan, että terän vaakasuuntainen paikoitusnopeus  $v_h$  oli hyvin lähellä 0,17 m/s arvoa. Tätä arvoa päätettiin tavoitella myös tässä koneessa. Pystysuuntaista paikoitusnopeutta  $v_v$  ei pystytty havainnoimaan esittelyvideoilta, joten paikoitusnopeudeksi lyhyemmän siirtomatka vuoksi arvioitiin riittävän puolet vaakasuuntaisen paikoituksen nopeudesta, eli 0,08 m/s.

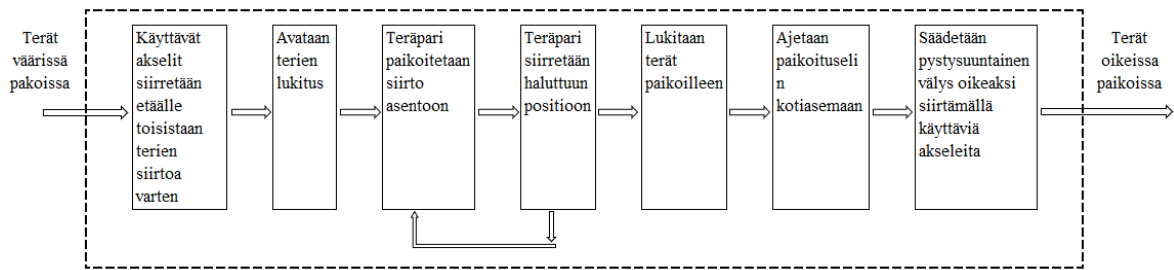
Aikaisemmin terän lukitusmenetelmäksi valittiin paisuvaan akseliin perustuva lukitusmenetelmä alaluvun 3.4 mukaisesti. Koska paisuva akseli lukitsee myös terän kiertymän akselin ympärille, ei terän ja paikoituseliminen välille tarvitse kehittää tartuntamuotoa, joka vapauttaisi terän kiertymisen estävän lukituksen.

Näiden määrittelyjen perusteella saatiin paikoitustoiminnolle taulukon 8 mukainen vaatimuslista.

*Taulukko 8. Paikoitustoiminnon vaatimuslista.*

<b>Vaatusluokka</b>	<b>Vaatus</b>	<b>Tärkeys</b>
	<b>Leikattavan materiaalin ominaisuudet</b>	
KV	Materiaalin vahvuus, min 0,5 mm	ET
KV	Materiaalin vahvuus, max 2,0 mm	ET
KV	Materiaalin laatu, ruostumaton teräs	ET
KV	Materiaalin laatu, rakenneteräs	ET
	<b>Paikoitusnopeus</b>	
VV	Vaakasuuntainen paikoitus, 10 m/min	T
VV	Pystysuuntainen paikoitus, 5 m/min	VT
	<b>Paikoitustarkkuus</b>	
VV	Nauhan leveys, yleistoleranssi ISO2768-m	ET
KV	Vaakasuuntainen vällys, $\pm 0,025$ mm	ET
KV	Vaakasuunteinen paikoitus, $\pm 0,15$ mm	ET
KV	Pystysuuntainen vällys, $\pm 0,025$ mm	ET
KV = kiinteä vaatimus, VV = vähimmäisvaatimus, ET = erittäin tärkeä, T = tärkeä, VT = vähemmän tärkeä		

Luonnosteluvaiheessa määriteltiin tehtävälle toiminnot ja selvitettiin tehtävän rakenteet. Tehtävän päätoiminto oli paikoittaa terät halutun nauhanleveyden, nauhamäärän ja käytetyn materiaalin vahvuuden mukaan oikeisiin paikkoihin. Toimintorakenne on esitetty kuvassa 41.



**Kuva 41.** Päätoiminnon toimintorakenne.

Paikoitustoiminnon vaatimuslistan ja päätoiminnon määrittelyn jälkeen kohdeyrityksen sovellukseen parhaiten soveltuvia ratkaisuja valittiin käyttämällä morfologista analyysiä. Morfologisen analyysin tulokset on esitetty alaluvussa 3.5. Näiden tulosten perusteella aloitettiin ratkaisujen yksityiskohtaisempi kehitys.

Käyttävän akselin siirrossa aikaisemmassa konstruktiossa on ollut pinch-roll tyyppinen säätö. Säätö on toteutettu ruuvitunkilla ja sitä on käytetty manuaalisesti käsipyörää operaattorin toimesta käyttäen. Tämän tutkimuksen aikarajoista johtuen päädyttiin tässä kohtaa käyttämään samaa ratkaisua, mutta muuttamaan manuaalinen käsipyöräkäyttö servomootorikäyttöiseksi. Näin säästetään suunnittelu-aikaa, kun voidaan hyödyntää jo käytössä olevaa, toimivaksi havaittua runko- ja säätölaiterakennetta. Nykyisen käytössä olevan ruuvitunkin liike on toteutettu trapetsiruuvilla. Mikäli trapetsiruuvilla kierteen välyksistä johtuen automaattisäädössä ei päästä vaadittuihin tarkkuuksiin, on ruuvitunkki mahdollista vaihtaa sellaiseen malliin, jossa trapetsiruuvi on korvattu pienivälyksisellä kuularuuvilla.

Paikotuselimen paikoituksen vaaditaan nopeaa, tarkkaa ja mahdollisimman pienellä välyksellä toimivaa paikotusmenetelmään. Tämän tyyppisen paikotusratkaisun perinteinen toteutustapa on lineaarijohteilla liikkuva kelkka, jonka liikkeen tuottamiseen käyttämiseen kuularuuvia ja liike-energian tuottamiseen ja paikoitukseen servomoottoria. Pienitoleranssisella kuularuuvilla ja esikiristetyllä kuulamutterilla liike on välyksetöntä ja servomootorilla voidaan haluttu paikka saavuttaa tarkasti halutulla nopeudella. Oikean tyyppisellä mitta-anturoinnilla varustettu servomoottori myös muistaa sijaintipaikkansa sähkökatkon jälkeen.

Kuularuuveja valmistetaan erilaisilla tarkkuustoleransseilla. Toleranssit ilmoitetaan kahdella eri tavalla, toleranssina, kun ruuvia kierretään yksi kierros tai toleranssina tietylle pituudelle. Vaakasuuntaisen välyksen siirrossa siirtomatka on lyhyt, joten voidaan olettaa, että siirto saadaan tehtyä yhdellä ruuvin kierroksella. Näin ollen vaakasuuntaisen välyksen vaatimuksia voidaan verrata ruuvin yhden kierroksen toleranssiin. Leikattavan materiaalin maksimileveys on 1250 mm, eli tämä on myös maksimi teränsiirron pituus, jos terää lähdetään siirtämään materiaalin toisesta laidasta. Näin ollen kuularuuvien valmistajan dokumentaatiosta on katsottava ruuvin toleranssi tällä pituudella ja verrattava sitä vaadittavaan tarkkuuteen.

Kuularuuvilla suoritettavan siirron tarkkuuteen vaikuttaa ruuvin tarkkuuden lisäksi myös käytetty kuulamutteri sekä kuularuuvien laakerointi käyttökohteen runkoon. Kuularuuvien valmistajan ohjeistuksen mukaan, käytettäessä kuularuuvien asennuksessa kuularuuvien tarkkuusluokkaa vastaavan tarkkuusluokan tukilaakeriyksiköitä sekä esijännitettyä kuulamutteria, saavutetaan kuularuuville annettu tarkkuus ilman, että tukilaakerointi tai kuulamutteri heikentää paikoitustulosta (Support Unit 2019, s. 2).

Valittaessa tähän sovellukseen soveltuvaa kuularuuvia valmistaja dokumentaatiosta, havaitaan, että esimerkiksi tarkkuusluokan C5 kuularuuvien tarkkuus yhdellä kierroksella on  $v_{2\pi}=0,008$  mm ja liikematkan pituuden ollessa 1000 mm – 1250 mm tarkkuus on  $ep = \pm 0,046$  mm (Ball Screws Technical Information 2018, s. 15). Kaavasta 6 havaitaan, että tarkkuus kuularuuvien yhdellä kierroksella on parempi, kuin tarkkuusvaatimus  $L_1$  sekä kaavasta 7 havaitaan, että maksimisiirron tarkkuus on parempi, kuin tarkkuusvaatimus  $L_2$ . Näin voidaan todeta, että tämän tarkkuusluokan kuularuuvilla saavutetaan siirron vaadittu tarkkuus.

$$L_1 > v_{2\pi} \quad (6)$$

$$L_2 > ep \quad (7)$$

Paikoitusnopeuteen kuularuuvikäytössä vaikuttavat kuularuuvien kierteen nousu sekä kuularuuvien kierrosnopeus. Kuularuuvien tuottama aksiaalisuuntainen nopeus  $v$  voidaan laskea kaavan 8 mukaisesti, kun tiedetään ruuvin kierteen nousu  $p$  ja pyörimisnopeus  $n$ .

$$v = p \times n \quad (8)$$

Kaavan 8 avulla voidaan laskea kuularuuvia käyttävälle servomootorille vaadittava pyörimisnopeus. Kuularuuvien kierteen nousuksi  $p$  valitaan 10 mm, joka on yleinen käytössä oleva nousu. Vaakasuuntaiseksi paikoitusnopeudeksi  $v_h$  määriteltiin aikaisemmin 0,17 m/s. Näiden arvojen perusteella servomootorin pyörimisnopeudeksi  $n$  saadaan  $1020 \text{ min}^{-1}$ . Mikäli servomootoriksi valitaan moottori, jonka nimellisnopeus on  $2000 \text{ min}^{-1}$  jää vielä mahdollisuus tarvittaessa nostaa paikoitusnopeutta suuremmaksi, kuin 0,17 m/s.

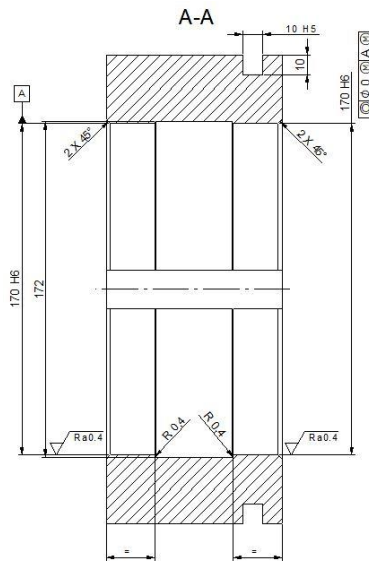
Servomootorissa käyttävän akselin asentoa mitataan enkooderilla. Enkooderin paikoitustarkkuus ilmoitetaan resoluutioluvulla, jonka yksikkö on bitti. Resoluutio,  $REZ$ , tarkoittaa, että yhdeltä servomootorin kierrokselta enkooderi antaa resoluution verran pulsseja. Näin esimerkiksi enkooderi, jonka resoluutio on 13 bittiä antaa 8192 pulssia yhdellä servomootorin kierroksella. Tiedettäessä kuularuuvien nousu  $p$  ja enkooderin resoluutio, voidaan kaavan 9 avulla laskea, kuinka pitkän matkan kuularuuvi etenee yhden pulssin aikana.

$$x = \frac{p}{REZ} \quad (9)$$

Kaavan 9 avulla laskettuna, kuularuuvien nousun  $p$  ollessa 10 mm ja servomootorin resoluution  $REZ$  ollessa 13 bittiä, eli 8192 ppr, saadaan tulokseksi, että enkooderi tuottaa pulssin aina, kun kuulamutteri on edennyt 0,0012 mm matkan. Tämän perusteella voidaan todeta, että servomootorin ja kuularuuvien paikoitustarkkuus riittää saavuttamaan vaaditut  $L_1 (\pm 0,025 \text{ mm})$  ja  $L_2 (\pm 0,15 \text{ mm})$  paikoitustarkkuustoleranssit.

Terän tartuntaratkaisuksi valittiin samankaltainen mekanismi, kuin tekstissä aikaisemmin esitellyssä SWI Machineryn pituusleikkausyksikössä. Terärunkoon valmistetaan koko terärungon ympäri kiertävä ura, johon tartuntaelimestä oleva kiilamainen muoto tarttuu. Tällä tartuntamekanismilla siirretään terää ainoastaan käyttävän akselin aksiaalisuunnassa, joten sillä ei ole tarvetta lukita terän muita vapausasteita. Terärungon uran ja siihen tarttuvan kiilamaisen kappaleen leveystoleransseilla on merkittävä vaikutus säädettäessä leikkuuterien välistä vaakasuuntaista välystä. Tarkasteltaessa paikoituksessa vaikuttavaa toleranssiketjua, valittiin uran toleranssiksi H5 riittävän tarkkuuden saavuttamiseksi ja

kiilalle vastaavan suuruinen toleranssialue, jonka yläeromitta on  $-0,044$  mm ja aleromitta  $-0,050$  mm. Tällä saavutetaan komponenteille sellainen valmistustarkkuus, että kiila mahtuu uraan toleranssiketjun kaikissa tilanteissa. Kiilan toleranssialueesta johtuen, tällä sovitteella ei enää saavuteta tavoiteltua paikoitustarkkuutta. Tämä on huomioitava paikoituksen ohjausjärjestelmää suunniteltaessa. Toleranssiketjun laskenta on esitetty liitteessä II. Kuvassa 42 esitetään terärungon piirustus, johon on lisätty tartuntauran toleroitu mitoitus.



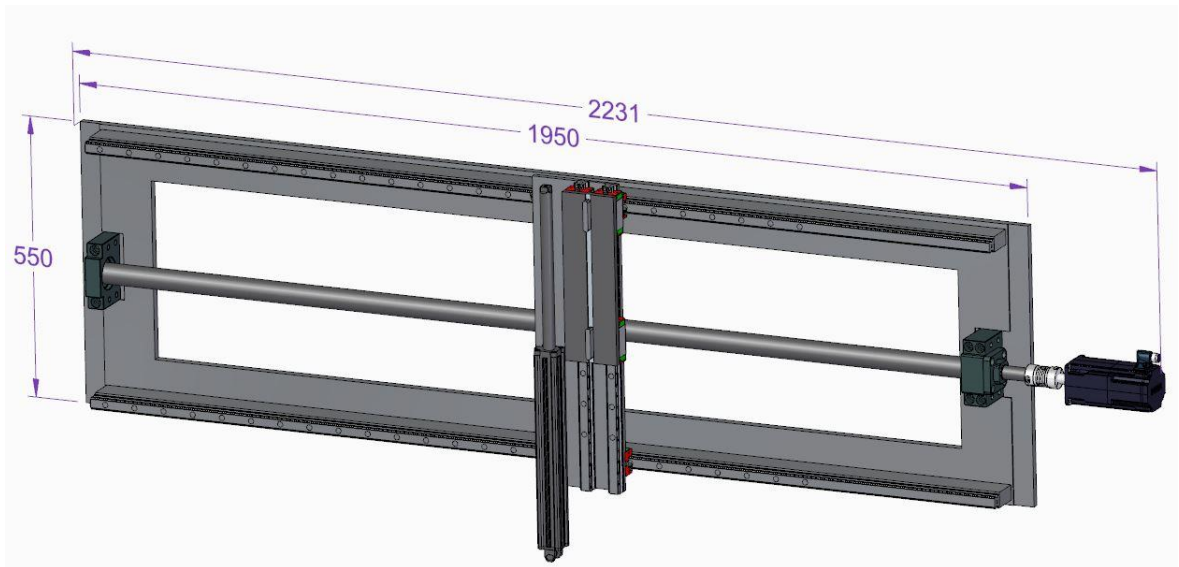
**Kuva 42.** Terärungon piirustus lisättyä tartuntauran mitoituksella.

Tartuntaelimen paikoitusmekanismiksi valittiin lineaarijohteilla liikkuva rakenne, jota liikutellaan kolmiasentoisella paineilmasylinterillä. Tartuntaelimen sivusuuntainen siirtymä on kriittinen taruntaelimen paikoituksen suhteen. Sivusuuntaista siirtymää syntyy lineaarijohteen ja johteella liikkuvan kelkan välisistä välyksistä. Käytettäessä lineaarijohteilla esijännitetyjä kelkkoja, voidaan lineaarijohteen ja kelkan välinen välyys poistaa ja näin ollen lineaarijohteen käyttö ei aiheuta vaihtelua taruntaelimen paikoitustarkkuuteen.

Kolmiasentoisella paineilmasylinterillä tartuntaelintä voidaan siirtää kolmen eri asemaan, joihin tartuntanelin on siirrettävä, että ylä- ja alaterään voidaan tarttua yhdessä tai erikseen. Sylinterinvalmistajan ilmoittama  $0,02$  mm paikoitustarkkuus on myös riittävä tähän tarkoitukseen (3 Position Cylinder 2020). Kelalinjasta löytyy myös muita paineilmalla

toimivia komponentteja, joten sylinterille tarvittava paineilma on jo valmiiksi saatavilla, eikä sitä varten tarvitse tehdä erikoisjärjestelyjä.

Valituista komponenteista koostuva paikoitusmekanismi kootaan hitsattuun ja koneistettu levyyn, josta samalla muodostuu pituusleikkausyksikön takaseinä. Kuvassa 43 esitetään alustava kokoonpanomalli paikoitusmekanismista.



**Kuva 43.** Alustava kokoonpanomalli paikoitusmekanismista.

### 3.4 Arvoanalyysin tulokset

Aikaisemman selvityksen pohjalta tiedettiin, että automaattisen lukituksen yleisesti käytössä oleva periaatteellinen ratkaisu perustuu kitkaa ja sen toteutukseen käytetään kahta erilaista sovellusta. Tämän vuoksi ei lähdetty keksimään itse uutta periaatteellista ratkaisua tai kitkaliitokseen perustuvaa sovellusta, vaan siirryttiin työnkulun kehittelyvaiheeseen, jossa arvoanalyysia käyttäen ja omaan vaatimuslistaan perustuen suoritettiin analyysi, jonka perusteella tutkittiin kumpi ratkaisu olisi parempi tähän kohteeseen.

Arvoanalyysi laadittiin taulukon 9 mukaisen vaatimuslistan toiminnollisten vaatimusten pohjalta. Koska edellytettiin, että molemmilla ratkaisuvaihtoehdoilla saavutetaan riittävä pitovoima, jätettiin tämä vaatimus pois arvoanalyysistä.

Lukitusmenetelmän pää- ja sivutoiminnot lyhenteineen on lueteltu alla olevassa listassa:

- päätoiminto
  - lukita terä
- sivutoiminnot
  - terän siirto TS
  - lukituksen vapautus LV
  - keskitys akselille KA
  - tarve voimalähteelle TV
  - mekanismin monimutkaisuus MM

*Taulukko 9. Lukitusmenetelmän sivutoimintojen painotus.*

-	TS	LV	KA	TV	MM	Painoluku
TS	TS	LV	KA	TS	TS	5
LV	LV	LV	LV	LV	LV	9
KA	KA	LV	KA	KA	KA	7
TV	TS	LV	KA	TV	TV	3
MM	TS	LV	KA	TV	MM	1
<b>Yhteensä</b>						25

Lukitusmenetelmät arvostellaan paremmuusjärjestykseen sivutoimintojen osalta arvottamalla sivutoiminnot arvosanoihin 0 – 3. Lukitusmenetelmät nimetty seuraavasti:

- a. paisuva akseli
- b. epäkeskeinen liitos

Sivutoiminnot ja eri menetelmien arvosanat on listattu alla olevaan listaukseen:

- a) Terän siirto (TS), vaaditaanko ylimääräisiä toimintoja, että terää voidaan liikuttaa akselilla lukituksen avauduttua.
  - a. Ei vaadita -> arvosana: 2
  - b. Kyllä vaaditaan -> arvosana: 0
- b) Lukituksen vapautus (LV), vaaditaanko lukituksen vapautukseen erillinen toimilaite.
  - a. Ei vaadita -> arvosana: 2
  - b. Kyllä vaaditaan -> arvosana: 0
- c) Keskitys akselille (KA), keskittykö akseli terälle lukituksen jälkeen.

- a. Kyllä keskittyy -> arvosana: 2
- b. Ei keskity -> arvosana: 0
- d) Tarve voimalähteelle (TV), tarvitaanko lukituksen avaukseen ulkoinen voimanlähde.
  - a. Kyllä tarvitaan -> arvosana: 1
  - b. Ei tarvita -> arvosana: 2
- e) Mekanismin monimutkaisuus (MM), onko lukitusmekanismi monimutkainen.
  - a. Ei ole -> arvosana: 2
  - b. Kyllä on -> arvosana: 0

*Taulukko 10. Lukitusmenetelmien vertailu painoarvojen perusteella, laskettu kaavan 2 mukaisesti.*

-	a.	b.
<b>TS</b>	10	0
<b>LV</b>	18	0
<b>KA</b>	14	0
<b>TV</b>	3	6
<b>MM</b>	2	0
<b>Yht.</b>	47	6

Taulukosta 10 havaitaan, että pisteytyksen jälkeen vaihtoehto a eli paisuvaan akseliin perustuva lukitusmenetelmä on selkeästi parempi ratkaisu vaihtoehto epäkeskeiseen lukitukseen perustavaan vaihtoehtoon nähden.

Arvoanalyysin perusteella päädyttiin kehitettäväksi lukitusmenetelmäksi valitsemaan paisuvaan akseliin perustuva lukitusmenetelmä.

Ensimmäinen tehtävä oli etsiä valmistaja paisuvalle akselille, sekä saada yhteys valmistajaan aloittaa keskustelu, jolla voidaan varmistaa heidän tuotteensa soveltuvuus tähän sovellukseen.

Valmistajia kartoitettiin internetistä tekemällä hakuja hakukoneella ja käyttäen hakusanana ”expanding shaft”. Haulla löydettiin useita eri valmistajia kyseiselle tuotteelle. Lisäksi tiedossa oli yksi valmistaja, joka oli tullut esiin kartoitettaessa lukitusmenetelmien

ratkaisuja. Valmistajista valikoitui kolme ehdokasta, valmistajat X, Y ja Z. Yritykselle lähetettiin sähköpostilla yhteydenottopyyntö liittyen paisuviin akseleihin. Yhteydenottopyynnössä esiteltiin Rodstein yrityksenä ja kerrottiin meneillään olevasta pituusleikkausyksikön tuotekehityksestä ja kysyttiin heidän tuotteensa soveltuvuudesta tällaiseen sovellukseen. Yhteydenottopyynnössä tarkennettiin, että kyseessä on teräksen pituusleikkaukseen tuleva yksikkö, koska yritysten verkkosivuilta havaittiin, että heidän akseleitaan on käytössä vastaaviin sovelluksiin pituusleikkauksessa, mutta materiaalin ollessa paperi.

Kaikki yritykset vastasivat yhteydenottopyyntöön. Yksi yrityksistä kertoi, että heillä ei ole kokemusta paisuvan akselin käytöstä teräksen pitkittäisleikkaukseen, eivätkä siten halua tarjota tuotettaan tähän käyttötarkoitukseen. Kaksi muuta yritystä pyysivät lisätietoja kohteesta, johon kyseinen akseli tulisi ja tarjosivat tämän jälkeen oman näkemyksensä mukaan parhaiten tähän käyttöön sopivaa akselia.

Tarjotuissa akseleissa oli eroja terän lukitukseen liittyen. Ensimmäinen toimittaja tarjosi akselia, jossa paisumisen lisäksi oli myös kaksi kiinteää aksiaalisuuntaista haittaa, jotka estäisivät terän kiertymisen akselin ympäri. Paisumisominaisuutta käytettäisiin pelkästään terän aksiaalisuuntaisen liikkeen lukitsemiseen. Toisen toimittajan näkemyksen mukaan pelkkä paisumisominaisuus riittäisi lukitsemaan terästä kiertymisen sekä aksiaalisuuntaisen liikkeen.

Käyttäväksi akseliksi valittiin akseliratkaisu, jossa on terän kiertymisen estämistä varten kiinteät haitat. Valitsemalla tämän tyyppinen akseli, voitiin varmistaa, että terät eivät lähtisi kiertymään akselin ympäri leikkaustapahtuman aikana. Lisäksi melko suuri hintaero akselien välillä puolsi tätä valintaa.

### 3.5 Morfologisen analyysin tulokset

Terien paikoitus on mahdollista toteuttaa monella tavalla. Tästä syystä ratkaisujen hakuun käytettiin apuna morfologista analyysiä. Taulukkoon syötettiin suoritettavat toiminnot ja erilaisia vaihtoehtoja ratkaista nämä toiminnot. Näistä vaihtoehtoista valittiin parhaiten tähän sovellukseen soveltuvat ratkaisuperiaatteet. Kuvassa 44 on esitetty vaihtoehtoisia ratkaisuja terien paikoitukseen, sekä valittu soveltuvin menetelmä.

Ratkaisu	A	B	C	D	E
<b>Käyttävä akseli siirto</b>					
Siirtomekanismi	Sylinteri	Kiila	Ruuvi	Hammashihna	Ketju
Siirtoenergia	Paineilma	Hydrauliikka	Servomoottori	Oikosulkumoottori	
Siirtoliike	Lineaarijohde	Pyöröjohde	Liukupinta		
Paikoitus	Induktioanturi	Mittasauva	Enkooderi	Rajakytkin	Ajo ääriasentoon
<b>Paikoituselimen siirto</b>					
Siirtomekanismi	Sylinteri	Kiila	Ruuvi	Hammashihna	Ketju
Siirtoenergia	Paineilma	Hydrauliikka	Servomoottori	Oikosulkumoottori	
Siirtoliike	Lineaarijohde	Pyöröjohde	Liukupinta		
Paikoitus	Induktioanturi	Mittasauva	Enkooderi	Rajakytkin	Ajo ääriasentoon
<b>Tartunta terään</b>					
Suunta	Vaakasuunnasta	Pystysuunnasta			
Ote	Muotoon terässä	Pihtimäinen ote	Magneetti	Imukuppi	
Lukittavia vapausasteita	Aksiaalisuunta	Kiertymä	Aksiaalisuunta + kiertymä		
<b>Tartuntaelimen siirto</b>					
Siirtomekanismi	Sylinteri	Kiila	Ruuvi	Hammashihna	Ketju
Siirtoenergia	Paineilma	Hydrauliikka	Servomoottori	Oikosulkumoottori	
Siirtoliike	Lineaarijohde	Pyöröjohde	Liukupinta		
Paikoitus	Induktioanturi	Mittasauva	Enkooderi	Rajakytkin	Ajo ääriasentoon

**Kuva 44.** Morfologinen analyysi terien paikoitusperiaatteen valintaan.

Morfologisen analyysin pohjalta ratkaisuperiaatteiksi valikoitui seuraavasti:

- Käyttävän akselin siirtoon käytetään ruuvia, jota pyöritetään servomoottorilla. Siirtoliike tapahtuu käyttävän akselin ja runkorakenteen välissä olevalla liukupinnalla. Paikoitus tapahtuu servomoottorissa olevalla enkooderilla. Periaatteeltaan tämä ratkaisu on pintch-roll tyyppinen menetelmä.
- Paikoituselin liikkuu lineaarijohdeilla liikkuvalla kelkalla. Kelkka siirretään servomoottorikäyttöisellä kuularuuvilla ja paikoitus tapahtuu enkooderilla.
- Terään tartutaan terässä olevan muotoon, jolle vastaava muoto on lukituselimestä, terään tartutaan pystysuunnassa liikkuvassa muodossa ja terästä on tarve lukita vain aksiaalisuuntainen vapausaste
- Tartuntaelintä siirretään kolmiasentoisella paineilmasylinterillä lineaarijohdella pitkin ja paikoitus tapahtuu ajamalla sylinterin ääri- tai keskiasentoon.

#### 4 TULOSTEN ANALYSOINTI

Opinnäytetyön tutkimuksellisessa osassa tutkittiin kelalinjaa sekä kelalinjassa tehtävää pitkittäisleikkaustapahtumaa, näissä käytettäviä laitteita ja leikkaustapahtumaan vaikuttavia parametrejä. Tätä työtä tehtiin kirjallisuustutkimuksena hakemalla tietoa alan kirjallisista julkaisuista, verkkolähteistä sekä tutkimalla muiden koneenvalmistajien kelalinjoja ja sekä yksittäisiä ratkaisuja näissä.

Lähestulkoon kaikista metallin muokkausta käsittelevistä kirjoista löytyi lyhyt osuus, joka käsitteli kelalinjoja, niiden perusratkaisuja ja laitteita. Vertailemalla näitä ratkaisuja kohdeyrityksen valmistamiin kelalinjoihin, löydettiin näiden väliltä yhtäläisyyksiä ja voitiin todeta, että tämä kelalinja edustaa ratkaisuiltaan hyvin perinteistä mallia.

Nykypäivänä konevalmistajien myyntimateriaali on niin laadukasta ja laajaa, että koneisiin ja niiden yksityiskohtiin on mahdollista tutustua hyvin ilman, että tarvitsee fyysistä konetta. Tämän ansiosta myös tutkimusta teknisten ominaisuuksien osalta pystyttiin tekemään kohtalaisen laajastikin ja tutkimaan eri konevalmistajien kelalinjoja ja niissä olevia ratkaisuja. Tutkimuksessa löydettiin sellaisia ominaisuuksia koko kelalinjan osalta, joita halutaan huomioida oman kelalinjan tulevissa tuotekehitysprojekteissa. Havaittiin myös, että tämän tutkimuksen kohteen, eli pitkittäisleikkausyksikön eri toimintoja on mahdollista toteuttaa eri tavalla, kuin niitä nyt on toteutettu.

Leikkaustapahtumaa ja siihen liittyviä parametrejä tutkittaessa havaittiin, että leikkaustapahtumaan vaikuttavia parametrejä on hyvin paljon. Leikkaustapahtuma perustuu materiaalin murtumiseen. Ylä- ja alaterä painuvat materiaaliin noin kolmasosan materiaalinvahvuudesta ja näin materiaaliin muodostuu murtolujuuden ylittävä jännitys, joka murtaa materiaalin terien leikkaavien särmien väliltä. Materiaali murtuu aina 7 – 9 % kulmassa materiaalin pintaan nähden, riippumatta siitä, missä kohtaa leikkuuterien leikkaavat särmät ovat toisiinsa nähden. Paras leikkuujälki saavutetaan, kun murtumaviiva saadaan osumaan mahdollisimman tarkasti terien leikkaavien särmien välille. Leikkaustapahtumaan vaikuttavat materiaalista tulevat parametrit ovat materiaalin laatu, lujuus ja paksuus. Leikkauslaitteesta tulevia tärkeimpiä parametrejä ovat leikkuuterien

väliset välykset, vaaka- ja korkeussuuntainen. Leikkausvälysten olleessa ohuimmilla materiaaleilla sadasosamillimetrin luokkaa, alkavat välyksiin vaikuttaa myös laitteen rakenteesta tuleva joustot, käyttävien akseleiden laakeroinnit ja koneen eri osien mittatoleranssit. Leikkaukseen käytetyllä terällä on myös suuri vaikutus leikkaustulokseen. Terän materiaali vaikuttaa terän tylsymiseen sekä leikkaavan särmän lohkeiluun ja näillä on suora vaikutus terän tuottamaan leikkuujälkeen. Leikkuuterän koko ja valmistustarkkuus ovat myös parametrejä, jotka vaikuttavat leikkuujälkeen.

Leikkaustapahtuman kirjallisuustutkimuksen perusteella voidaan todeta, että löydetyn tiedon pohjalta ei saada suoraa vastausta siihen, minkälaisilla parametriarvoilla saavutetaan paras mahdollinen leikkuujälki millä tahansa materiaalilla, vaan on löydetty lista tapahtumaan vaikuttavia parametrejä sekä suuntaa antavia numeroarvoja, joilla voidaan aloittaa testausten tekeminen ja tästä saatujen havaintojen perusteella säätää omaa leikkaustapahtumaa siten, että saavutetaan paras mahdollinen leikkausjälki. Tässä tutkimuksessa varmasti suuri kokemuseräinen tieto saadaan käyttämällä hyväksi pitkittäisleikkausteriin erikoistuneen terävalmistajan tietoja ja heidän kokemustaan.

Opinnäytetyön päätehtävä oli valita ja kehittää konseptitason suunnitelma tähän kohteeseen soveltuvasta pitkittäisleikkausyksikön leikkuuterien automaattisesta paikoitus- ja lukitusmenetelmästä. Tämä osa aloitettiin myös tutkimalla kyseisiä menetelmiä kirjallisesta lähdemateriaalista sekä konevalmistajien esitteistä ja videoilta. Kirjallista materiaalia tutkimalla havaittiin, että tästä aiheesta ei juurikaan ollut yksityiskohtaista tietoa saatavilla. Maininnat olivat hyvin yleisluontoisia siitä, että teriä voidaan lukita ja paikoittaa manuaalisesti tai automaattisesti. Eräässä teoksessa mainittiin, että lukitus voi perustua epäkeskeisyyteen tai käyttävän akselin paisumiseen. Näin ollen, lähestulkoon kaikki automaattisen lukituksen ja paikoituksen yksityiskohtaisten ratkaisujen tutkiminen tehtiin tutkimalla konevalmistajien mainosvideoita, esitteitä ja tämän pohjalta päättelämällä miten toiminto toimii. Eräitä koneenvalmistajia lähestyttiin myös sähköpostilla ja tiedusteltiin, miten jokin toiminto toimii, mutta näihin tiedusteluihin ei saatu vastauksia.

Terän automaattisia lukitusratkaisuja tutkimalla havaittiin, että lukitusratkaisuja oli kahden tyyppisiä. Toisessa ratkaisussa terä lukittuu akselille terärungossa olevan epäkeskeisen elementin avulla ja toisessa ratkaisussa käyttävä akseli paisuu niin paljon, että akselin

ulkopinta painuu vasten terärungon keskireikää ja syntyy pitävä kitkaliitos. Joissakin paisuvissa akseleissa oli myös käytössä akselin aksiaalisuunnassa kiinteät kiilamaiset muodot, jotka estivät terän kiertymisen akselin ympäri.

Lukitusratkaisujen vertailuun ja valintaan käytettiin arvoanalyysi menetelmää. Arvoanalyysin perusteella käytettäväksi lukitusratkaisuksi valikoitu paisuvaan akseliin perustuva menetelmä. Valintaa puoltavia asioita olivat muun muassa terän lukitukseen tarvittavan mekaniikan yksinkertaisuus ja terän siirto akselilla ei vaadi muita toimenpiteitä siirron aikana. Haittapuolena paisuvan akselin käytössä on akselin vaatima ulkopuolinen energialähde, paineilman, lukituksen avaamiseen ja sulkemiseen. Tämä ei kuitenkaan tässä kelalinjassa ole ongelma, koska kelalinjassa on myös muita paineilmalla toimivia komponentteja.

Terän vaakasuuntaiseen paikoitukseen yleisesti käytetty ratkaisu oli lineaarijohteilla liikkuva kelkka, johon terään tarttuva tartuntaelin oli kiinnitetty. Kelkan liikuttamiseen käytettiin sähkömoottorilla pyöritettävää kuularuuvia tai hammashihnaa. Terään tarttumista varten terään oli tehty ura, johon tartuttiin tartuntaelimessä olevalla muodolla. Näiden toimintojen suorittamiseen on monia erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja. Ratkaisuvaihtoehtoja vertailtiin morfologisella analyysillä ja sen perusteella valittiin tähän tapaukseen parhaiten soveltuvat tekniset ratkaisut. Tartuntaelimen paikoitukseen valittiin lineaarijohteilla liikkuva kelkka, jota liikutetaan servomoottorikäyttöisellä kuularuuvilla. Kelkan oikea paikoitus varmistetaan servomoottorissa olevalla enkooderilla. Terään tartutaan terään tehtyyn uraan tartuntaelimessä olevalla muodolla.

Paikoitustarkkuuteen vaikuttavat mekanismissa käytettävien ostokomponenttien, kuten kuularuuvien, kuulamutterien, kuularuuvien laakeroinnin sekä lineaarijohteiden välykset ja valmistustarkkuudet. Lisäksi mekanismin valmistettavien osien sekä mekanismin kokoonpanotarkkuus vaikuttavat lopulliseen paikoitustarkkuuteen. Tarkkuuden kannalta yksi kriittisimmistä kohdista on tartuntaelimen ja terärungon välisen tartuntamuodon tarkkuus.

Paikoitustarkkuuden asettamiin haasteisiin voidaan vastata käyttämällä tarkkoihin sovelluksen tarkoitettuja välyksettömiä kuularuuvi- ja lineaarijohdekomponentteja. Näin

paikoitusliikkeestä pystytään poistamaan siirron epätarkkuutta aiheuttavia välyksiä. Osien valmistus- ja kokoonpanotarkkuuteen pystytään vaikuttamaan osien riittävän tarkalla toleroinnilla sekä huolellisella kokoonpanotyöllä.

Mikäli osien tarkan valmistuksen ja huolellisen kokoonpanotyön jälkeen mekanismiin jää vielä paikoituksessa systemaattisesti toistuvaa mittavirhettä, voidaan sitä korjata ohjausjärjestelmän suunnittelulla, esimerkiksi paikoittamalla terää haluttuun positioon sellaisesta suunnasta, että välykset jäävät paikoituksen mittatarkkuuden kannalta edullisemmalle puolelle.

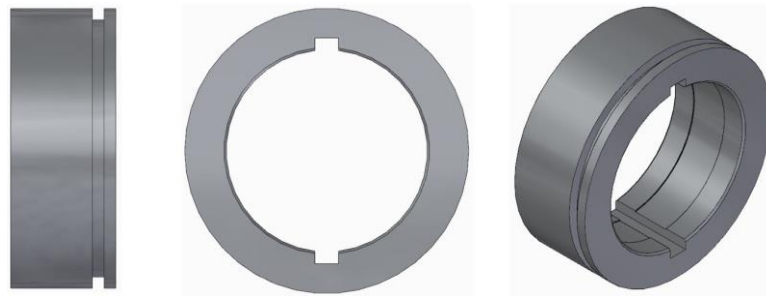
Kirjallisuudessa annetut leikkuuterien vaakasuuntaisten välysten pienet arvot tulevat asettamaan haasteet koko pituusleikkausyksikön kokoonpanossa sekä osavalmistuksessa. Ensimmäisen prototyypin asennuksessa tullaan havaitsemaan, onko tarvetta tehdä suunnittelumuutoksia kokoonpantavuuden helpottamiseksi. Lisäksi ensimmäiset leikkaustestit tulevat osoittamaan, onko mahdollista helpottaa osien tarkkuusvaatimuksia ja silti saavuttaa vaaditut mittatarkkuudet leikatuiissa nauhoissa sekä laadulliset vaatimukset reunaleikkausjäljessä.

Terien pystysuuntaisen välyksen säätö tapahtuu siirtämällä yhtä tai molempia käytäviä akseleita. Kirjallisuudesta löytyi kolme erilaista pituusleikkausyksiköissä käytössä olevaa toteutustapaa. Akseleiden korkeutta voidaan säätää menetelmällä, joka perustuu akselin epäkeskeiseen kiinnitykseen tai siten, että akseli on kiinni säätöruuvissa tai sylinterissä, jota ajetaan haluttuun suuntaan. Näistä kustannuksiltaan kalliimpi toteutustapa on epäkeskeisyyteen perustuva säätö, mutta tällä menetelmällä saavutetaan myös tarkempi säätö. (Bresnahan et al. 1999, s. 133)

Tähän pituusleikkausyksikköön valittiin jo käytössä oleva menetelmä, jossa toinen säädettävä akseli on kiinteästi paikallaan ja toisen paikkaa säädetään säätöruuvilla. Tämä valinta tehtiin sillä perusteella, että ei haluttu lähteä kehittämään uutta epäkeskeisyyteen perustuvaa ratkaisua, vaan haluttiin hyödyntää olemassa olevaa ratkaisua tämän osalta.

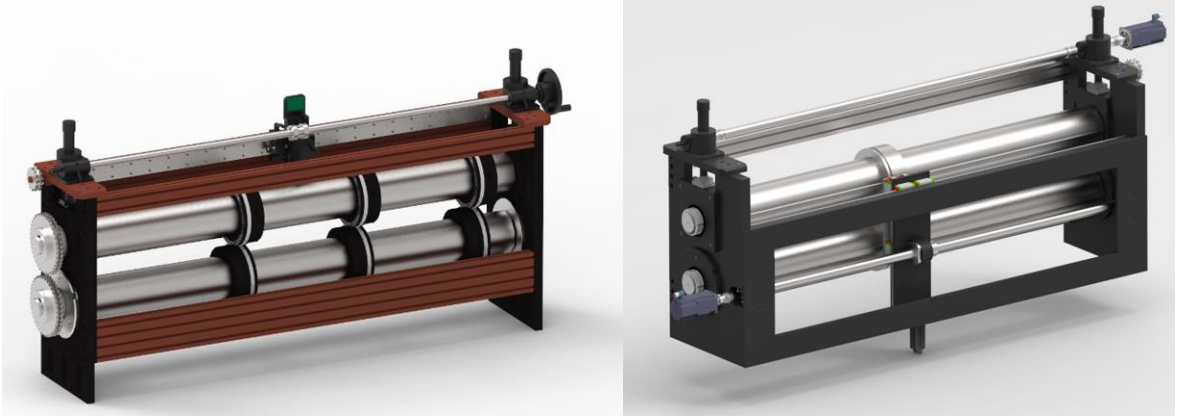
Näiden valintojen perusteella muotoutui ratkaisut, joiden pohjalta lähdettiin kehittämään kokonaisratkaisua automaattiseen paikoitukseen ja lukitukseen. Paikoitus- ja

lukitusmenetelmään oleellisena osana liittyy paikoitettava ja lukittava komponentti. Tämän vuoksi kehitettiin myös terärunko, jota näillä kehitetyillä menetelmillä pystyttäisiin paikoittamaan ja lukitsemaan. Terärunkoon suunniteltiin tarvittava muoto terän lukitsemiseen käytävällä akselilla, sekä tarvittava muoto, johon tartuntaelimellä voidaan paikoitusta varten tarttua. Terärunkoon on tarkoitus kiinnittää leikattavalle materiaalille soveltuvat terä sekä tukirenkaat. Näille osille ei vielä tehty terärunkoon tarvittavia muotoja ja kiinnitysreikiä, koska terien ja tukirenkaiden lopulliset mitat selviävät keskusteluissa terätoimittajan kanssa. Kuvassa 45 on esitetty terärungon 3D-malli.



**Kuva 45.** Terärungon 3D-malli.

Alkuperäinen ajatus, että automaattiset paikoitus- ja lukitusominaisuudet on saatava lisättyä olemassa olevaan pituusleikkausyksikköön, asetti mitoituksivaatimuksia menetelmien kehittämiseksi. Loppujen lopuksi tässä myös verrattain hyvin onnistuttiin. Uusi paisuva käyttävä akseli on valmistettu samoilla mitoilla, kuin aikaisempi akseli, joten sen kiinnitykseen on mahdollista käyttää samoja kiinnitys-, säätö- ja laakerointikomponentteja. Paikoitusominaisuuden vaatimat komponentit saatiin myös sovitettua alkuperäiseen runkorakenteeseen muuttamalla muutamia siihen liittyviä osia. Kuvassa 46 nähdään alkuperäinen manuaalisilla säädöillä oleva pituusleikkausyksikkö sekä uusilla automaattisilla säädöillä varustettu versio.



**Kuva 46.** Manuaalisilla ja automaattisilla säädöillä olevat pituusleikkausyksiköt.

## 5 POHDINTA

Tutkimuksessa tuli hyvin selkeästi esille pitkittäisleikkaustapahtuman monimutkaisuus. Pitkittäisleikkaustapahtumassa on paljon vaikuttavia parametrejä, joiden parhaat arvot löydetään leikkaustesteillä ja havainnoimalla oman laitteiston käyttäytymistä. Kirjallisuudesta löytyi tietoa, jota kohdeyritys voi hyödyntää omien testien tekoon ja nykyisen laitteiston vertailuun muihin yleisesti käytössä oleviin ratkaisuihin. Aiheeseen liittyviä jatkotutkimusaiheita löytyi muun muassa leikkuuterän kehityksestä.

### 5.1 Tutkimuksen objektiivisuus ja luotettavuus

Etsittäessä vastauksia tämän tutkimuksen tutkimuskysymyksiin, käytiin läpi alan kirjallisuutta sekä artikkeleita ja koneenvalmistajien kaupallista materiaalia. Pitkittäisleikkaustapahtumaa koskevaan tutkimuskysymykseen löytyi, yleisluontoista sekä yksityiskohtaistakin tietoa leikkaustapahtumaan vaikuttavista parametreistä. Pyöröleikkauksessa vaikuttuvien leikkausvoimien laskentaan ei kirjallisuudesta löytynyt suoria laskentakaavoja, vaan leikkaustapahtuma rinnastettiin saksimaiseen leikkaukseen ja siinä vaikuttaviin voimiin.

Terän lukitusvoiman suuruutta arvioitiin epäsuoralla laskennalla leikkaukseen vaadittavan voiman kautta. Lähdekirjallisuudessa mainitulla laskentakaavalla pystyttiin laskemaan tarvittava teho, joka vaaditaan, kun tiedetään tarvittavat arvot leikattavasta materiaalista sekä leikkausnopeudesta. Tämän laskennan tuloksena saadusta vaaditusta tehosta voitiin laskea saavutettava momentti ja kehävoima, kun tiedettiin terän halkaisija. Vertaamalla näin laskettua kehävoiman leikkausvoimaksi oletettua voimakomponenttia kaavaan 3 mukaisesti laskettuun leikkausvoimaan, havaittiin, että kaavan 3 mukaisesti laskettu leikkausvoima oli kolme kertaa suurempi. Tästä tuloksesta tultiin siihen johtopäätökseen, että pyöröleikkauksen leikkausvoimat eivät olekaan suoraan verrattavissa saksimaisessa leikkauksessa syntyviin leikkausvoimiin.

Benchmarking tyyppisellä analyysillä tutkittiin olemassa olevia vaihtoehtoja terien automaattiseen paikoitukseen ja lukitukseen. Näitä tuloksia, muita analyysimenetelmiä sekä omaa kokemusta hyödyntäen valittiin tapaukseen soveltuvat menetelmät ja niille ratkaisut

sekä tehtiin alustavat komponenttivalinnat. Voidaan todeta, että varmastikaan valinta ei ollut absoluuttisesti paras mahdollinen, mutta olemassa olevan tiedon ja vaatimusten perusteella pyrittiin saavuttamaan tähän kyseiseen tapaukseen parhaiten soveltuvat menetelmät ja ratkaisut. Prototyypin rakentamisen ja testileikkausten jälkeen päästään tekemään lopullista arvioita siitä, että saavutettiinko valinnoilla haluttu tulos, vai onko tarve muuttaa joitakin ratkaisuja erilaisiksi.

## 5.2 Keskeiset johtopäätökset

Pitkittäisleikkaustapahtumaa ja siihen vaikuttavia parametrejä tutkittaessa havaittiin, että parametrejä on paljon ja niillä on suuri vaikutus syntyvään leikkausjälkeen. Osaan parametreistä pystytään vaikuttamaan säätämällä, kuten leikkausterien välyksiin, mutta esimerkiksi leikkausyksikön rakenteen joustoista ja välyksistä johtuviin laatupoikkeamiin on vaikeampi tehdä muutoksia jälkeenpäin. Leikkausyksikön rakenteen jäykkyyteen onkin syytä kiinnittää huomiota jo suunnitteluvaiheessa.

Terät on säädettävä tarkasti, että leikattaviin nauhoihin saadaan hyvä leikkauspinta. Tämä asettaa terien säädölle suuret vaatimukset. Paikotusmekanismin valinta- ja kehittämistyössä havaittiin, että tarkan säädön saavuttamiseksi liikkeen tuottavien komponenttien kuten kuularuuvien ja lineaarijohteiden on oltava välyksettömiä, sekä lisäksi valmistettavien komponenttien on oltava riittävällä tarkkuudella valmistettuja ja mekanismien kokoonpano on suoritettava huolellisesti.

## 5.3 Tulosten hyödynnettävyys

Tämän tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää ensisijaisesti lisäämään ymmärrystä pitkittäisleikkaustapahtumasta ja siihen vaikuttavista parametreistä. Tietoa voi käyttää käsikirjamaisena ohjeena, kun tehdään testileikkauksia ja haetaan optimaalisia säätöjä leikkausprosessiin. Lisäksi tutkimuksessa on esitelty leikkauslaitteistoa ja erilaisia ratkaisuja eri toimintojen toteuttamiseen. Näitä tietoja myös mahdollista hyödyntää mietittäessä leikkauslaitteiston kehittämistä.

Kohdeyritykselle tehty paikotus- ja lukitusmenetelmän valinta ja kehitystyö toimivat hyvänä pohjana ja konseptitason suunnitteluna, josta yrityksen on hyvä jatkaa lopullista mekaniikkasuunnittelua omana tuotekehitysprojektina.

#### 5.4 Jatkotutkimusaiheet

Leikkausyksikön suunnittelutyön edetessä tulee tarve tehdä jatkotutkimusta leikkausterän vaatimuksista eri materiaaleille ja materiaalivahvuuksille. Tämän tutkimuksen tulokset tulevat vaikuttamaan terärungon muotoiluun ja mitoitukseen. Leikkausterien tutkimukseen parasta tietoa on saatavilla pitkittäisleikkaukseen käytettävien terien valmistukseen erikoistuneilta terävalmistajilta.

Leikkaustapahtumassa syntyvien leikkausvoimien tutkimista on myös tarve jatkaa. Tätä tutkimusta on mahdollisuus tehdä leikkausyksikön koeajovaiheessa, kun käyttävältä moottorilta voidaan mitata sähkökulutusta leikkauksen aikana ja verrata tätä tehovaatimuksen laskentakaavalla saatuihin tuloksiin.

## 6 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa tutkittiin teräksen pitkittäisleikkaustapahtumaa sekä siihen vaikuttavia parametrejä. Lisäksi tehtiin katsaus pitkittäisleikkauksessa ja kelalinjassa käytettäviin laitteisiin ja näiden toimintaan. Tämän tiedon pohjalta valittiin kohdeyrityksen tarpeisiin pitkittäisleikkausyksikön terien automaattiseen paikoitukseen ja siirtoon soveltuvat menetelmät. Menetelmien toteuttamiseen valittiin tekniset ratkaisut perustuen, VDI 2221 ohjeiston mukaiseen systemaattisen tuotekehityksen työkulkuun sekä erilaisiin analyysimenetelmiin.

Pitkittäisleikkaustapahtumaa tutkittaessa havaittiin, että tapahtumaan vaikuttavia parametrejä on paljon. Tutkimuksessa saatiin tietoa mitenkä eri parametrit vaikuttavat leikkaustulokseen ja terien kulumiseen. Parametreille löydettiin suuntaa antavia lukuarvoja, joita voi käyttää hyväksi pohjatietona, kun leikkaustestit omalla laitteistolla aloitetaan. Leikkausyksikön rakenteesta tuleva joustot ja välykset vaikuttavat leikkaustuloksiin. Nämä vaikutukset havaitaan myös vasta laitteiston testiajossa.

Laitteiston osalta tutkitusta pohjamateriaalista löydettiin erilaisia yleisesti käytössä olevia vaihtoehtoja toteuttaa eri toimintoja sekä vaihtoehtoista tunnistettiin myös nykyisessä kelalinjassa käytössä olevat ratkaisut. Tulevaisuudessa voidaan verrata nykyisiä ratkaisuja muihin mahdollisuuksiin ja pohtia olisiko saavutettavissa jotakin hyötyjä muuttamalla tekemällä jotakin toisin.

Pitkittäisleikkausterien automaattisen lukituksen menetelmäksi valittiin kitkaan perustuva lukitus ja sen toteutukseen paineilmalla paisuva akselit. Terien vaaka- ja pystysuuntaiseen paikoitukseen valittiin ruuviin perustuva menetelmä. Vaakasuuntainen paikoitus toteutetaan servomoottorikäyttöisellä kuularuuvilla, johon on liitetty paikoituselin, jolla terään tartutaan paikoitusta varten. Pystysuuntainen paikoitus tapahtuu liikuttamalla pitkittäisleikkausyksikön ylempää käyttävää akselia servomoottorikäyttöisellä ruuvitunkilla. Lisäksi kehitettiin leikkausterää varten terärunko, jota valituilla paikoitus- ja lukitusratkaisuilla voidaan käyttää, että saavutetaan halutut toiminnot.

Teknisissä ratkaisuisa tehtiin alustavia komponenttivalintoja sekä suuntaa antavia mallinnuksia siitä, miten toiminnot voidaan toteuttaa. Samalla päästiin käsitykseen siitä, minkälaisella valmistustarkkuudella osia on valmistettava ja kokoonpano suoritettava, että terien välyksien säädössä päästään tavoiteltuihin tarkkuuksiin. Lopullinen yksityiskohtainen mekaniikkasuunnittelu jää mekaniikkasuunnittelijan tehtäväksi uuden tuotekehitysprojektin alettua tämän tutkimuksen valmistuttua.

Koska leikkaustapahtumaan vaikuttavia parametrejä on paljon, muun muassa terän välyksen säädöistä, terä terävyydestä ja materiaalista, leikkausyksikön rakenteesta ja leikattavasta materiaalista johtuvia, päästään tehtyjen ratkaisujen lopullista hyvyyttä tarkastelemaan vasta, kun leikkausyksiköllä päästään tekemään testileikkauksia.

Leikkaukseen liittyviä jatkotutkimuksia tulee tehtäväksi siinä vaiheessa, kun aletaan valitsemaan leikattavalle materiaalille soveltuvia teriä. Tässä työssä voidaan hyödyntää teränvalmistajien tietotaitoa ja kokemusta eri materiaalien pitkittäisleikkauksesta.

## LÄHTEET

3 Position Cylinder. [www-tuotedokumentti]. Spain: SMC Corporation. [Viitattu 5.6.2021]  
Saataavissa PDF-tiedostona: [https://static.smc.eu/pdf/RZQ-B\\_EU.pdf](https://static.smc.eu/pdf/RZQ-B_EU.pdf)

Airila, M. & Kivioja, S. 2010. Akselit ja akseleiden liittäminen. Teoksessa: Airila, M., Ekman, K., Hautala, P., Kivioja, S., Kleimola, M., Martikka, H., Miettinen, J., Niemi, E., Ranta, A., Rinkinen, J., Salonen, P., Verho, A., Vilenius, M., Välimaa, V. Koneenosien suunnittelu. 4-5. Painos. Helsinki: WSOYpro Oy. 2010.

Asco Inc.. 2005. Slitter Tooling Technical Brief, 5. Painos. Asco Inc.. 50 s.

Ball Screws Technical Information. 2018. [www-tuotedokumentti]. Taiwan: HIWIN Technologies Corp. 2018. [Viitattu 5.6.2021]. Saataavissa PDF-tiedostona: <https://www.hiwin.com/pdf/ballscrews.pdf>

Belano Maski AB. Kraser klipsträcka. [video]. [Viitattu: 5.6.2021]. Saataavissa: [https://www.belano.se/content/files/krasser\\_styr.mp4](https://www.belano.se/content/files/krasser_styr.mp4)

Bresnahan, F. 1996. Understanding heavy gauge slitting. Metal Center News, Vol. 36: 5. S. 58.

Bresnahan, F. 1999. Intermediate- and Heavy Gauge Slitting. Teoksessa: Theis, H. E. Handbook of Metalforming Processes. New York, USA: Marcel Decker, Inc., 1999. S. 64 – 88.

Bresnahan, F., Kerns, H., Zelt, A. 1999. Slitting Knives and Setups. Teoksessa: Theis, H. E. Handbook of Metalforming Processes. New York, USA: Marcel Decker, Inc., 1999. S. 117 – 144.

Bronx Slitter Head. 2021. [The Bronx Group www-sivuilla]. [Viitattu: 5.6.2021]. Saataavissa: <https://thebrongroup.com/bronx-slitter-head/>

Childs, P.R.N, 2014. Mechanical Design Engineering Handbook. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd. 2014. 796 s.

Davis, J.R. 1998. Metals Handbook. 2. Painos. ASM International Committee. 1436 s.

Legionnaire | Slitter. 2021. [Krasser GmbH [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. [Viitattu 5.6.2021]. Saatavissa: <https://www.krasser.at/en/products/legionnaire/legionnaire-slitter-en>

Kauste, M. & Kostamo, T. 1980. Ohutlevyn leikkaus. Helsinki: Metalliteollisuuden keskusliitto. Tekninen tiedotus 9/80. 75 s.

Machines4u.com.au. 2015. SWI Marxman Triplex AUTO SLITTER. [video]. [Viitattu 5.6.2021]. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=rSRtejPUVg8>

Mechanical expanding shafts with leaves mod. 636 MS. 2012. [Svecom-P.E. S.r.l. [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. [Viitattu 5.6.2021]. Saatavissa: <https://www.svecom.com/en/products/expanding-shafts/636-ms-mechanical-expanding-shaft-with-leaves>

Meskanen, S. 2017. ValuAtlas – Suunnittelijan perusopas. Valukomponentin suunnittelun perusteita [verkkodokumentti]. 2017. [Viitattu 5.6.2021]. Saatavissa: [https://www.valuatlas.fi/sites/default/files/docs/perusopas\\_13.pdf](https://www.valuatlas.fi/sites/default/files/docs/perusopas_13.pdf).

Pat. EP 0 444 612 A1. 1991. Slitting width changing system for slitter. Fuji Photo Film Co., LTD. Kanagawa-ke: Japani. (Sugiyama, K. & Shimizu, S.) Hak. EU 91102824.9, 26.2.1990. Julk. 4.9.1991. 13 s.

Pneumatic self-expanding shafts with ledges mod. 640 PQL. 2021. [Svecom-P.E. S.r.l. [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. [Viitattu 5.6.2021]. Saatavissa: <https://www.svecom.com/en/products/expanding-shafts/640-pql-pneumatic-self-expanding-shaft-with-ledges>

Pahl, G. & Beitz, W. 1986. Koneensuunnitteluoppi. Saksasta suomentanut Uolevi Konttinen. 2. painos. Helsinki: Suomen Metalli-, Kone- ja Sähköteknisen Teollisuuden Keskusliitto. 608 s.

Rubber Stripper Rings. 2021. [Nordic Company www-sivuilla]. 2021. [Viitattu 5.6.2021]. Saatavissa: <http://nordiccompany.com/rubber-stripper-rings/>

Rautaruukki Oyj. 2011. Kuumavalssatut teräslevy ja kelat, Mekaaninen leikkaus. Helsinki: Rautaruukki Oyj. 7 s.

SFS 2636. 1971. Tasakiilat ja vastaavat kiilaurat. Suomen Standardisoimislautakunta. 4 s.

SFS-EN ISO 286-1. 2010. Geometrinen tuotemääritelmä (GPS). Pituusmittojen toleranssien ISO-merkintäjärjestelmä. Osa 1: Toleranssien, eromittojen ja sovitteiden perusteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 81 s.

SFS-EN 22768-1. 1993. Yleistoleranssit. Osa 1: Ilman toleranssimerkintää olevien pituus- ja kulmamittojen toleranssit. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 10 s.

SheetmetalMachinery. 2015. KRASSER LEGIONNAIRE – Fully automated cutting and slitting systems. [video]. [Viitattu 5.6.2021]. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=WDerhGV9ios>

Slinet ASCO machines. 2019. [www-tuotedokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon): ASCO GmbH, 2019. [Viitattu 5.6.2021]. Saatavissa: <https://www.slinet.de/wp-content/uploads/2019/10/Slinet-image-folder.pdf>

Slitting Heads. 2021. [Independent Machine Company www-sivuilla]. 2021. [Viitattu: 5.6.2021]. Saatavissa: <https://independentusa.com/products/slitting-heads/>

Support Unit. 2019. [www-tuotedokumentti]. Taiwan: HIWIN Technologies Corp. 2019. [Viitattu 5.6.2021]. Saatavissa: <https://www.hiwin.com/pdf/hiwin-support-units.pdf>

TB F2 Shearing and Slitting Steel Sheet and Strip. 2003. [www-tuotedokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon): BlueScope Steel Limited, 2003. [Viitattu 5.6.2021]. Saatavissa: <https://bluescope.co.za/wp-content/uploads/2019/05/TB-F2-Shearing-and-Slitting-Steel-Sheet-and-Strip.pdf>

The Art of Slitting. 2016. [Verkkójulkaisu]. Fabricating & Metalworking Lokakuu 2016. [Viitattu 5.6.2021]. Saatavissa: <https://www.fabricatingandmetalworking.com/2008/10/the-art-of-slitting/>

Theis, E. 1993. Slitting. Teoksessa: ASM Handbook Volume 14 Forming and Forging. ASM International Committee. 9. Painos. S. 1538-1554.

Wisselink, H. H. & Huétink, J. 2002. 3D FEM simulation of stationary metal forming processes with applications to slitting and rolling. In: Journal of Materials Processing Technology 148. 2004. S. 328-341.

Zelt, A. 2006. How to avoid slit-in coil slitting problems [verkkodokumentti]. Julkaistu 2006. [Viitattu 5.6.2021]. Saatavissa: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/stamping/how-to-avoid-slit-in-coil-slitting-problems>.

## Vaakasuuntaisen paikoituksen toleranssiketjun laskenta

Vaakasuuntaiseen paikoitukseen vaikuttava toleranssiketju muodostuu kuularuuvien laakeroinnin välyksistä, kuularuuvien mutteri välyksistä, kuularuuvien kierteen valmistustarkkuudesta, paikoituselimen lineaarijohteiden välyksistä sekä tartuntaelimen lineaarijohteiden välyksistä.

Käyttämällä kuularuuvissa esijännitettyjä tukilaakereita sekä esijännitettyä kuulamutteria saadaan kuulamutteri kokoonpanosta poistettu tarkkuutta haittaava välykset. Näin ollen kuularuuvikokoonpanossa paikoitustarkkuuteen vaikuttavat ainoastaan kuularuuvien kierteen valmistustarkkuudesta johtuvat epätarkkuudet.

Paikoitukseen valitun kuularuuvien tarkkuusluokka on C5, jolloin kuularuuvien tarkkuus yhdellä kierroksella on  $v_{2\pi}=0,008$  mm ja liikematkan pituuden ollessa 1000 mm – 1250 mm tarkkuus on  $ep = \pm 0,054$  mm (Hiwin 2018, s. 15). Samalla valittiin käytettäväksi saman valmistajan esijännitetyt tukilaakerit sekä esijännitetty kuulamutteri.

Lineaarijohteissa on myös mahdollista käyttää esijännitettyjä kelkkoja, jolloin kelkan ja lineaarijohteen väliltä saadaan poistettua välyys.

Taulukossa 11 on laskettu toleranssiketju siirrettäessä leikkuuterää vaakasuuntaisen välyksen verran, kun leikataan 0,5 mm vahvuista ruostumatonta teräslevyä.

Taulukko 11. Toleranssiketjun laskenta terän välyksen asetuksessa.

	Poikkeama alle nimellismitan	Poikkeama yli nimellismitan
Toiminto	Pituusmitta, mm	
Siirron nimellismitta	0,100	0,100
Kuularuuvien tukilaakeroinnin välys	0,000	0,000
Kuularuuvien kuulamutterin välys	0,000	0,000
Kuularuuvien maksimipoikkeama	0,008	0,008
Paikoituselimen lineaarijohteiden välys	0,000	0,000
Tartuntaelimen lineaarijohteiden välys	0,000	0,000
Yhteensä	9,992	10,008

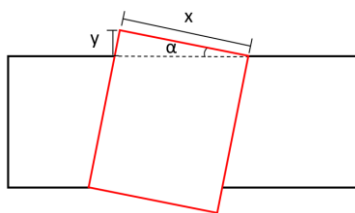
### Terärungon ja tartuntaelimen sovitteen toleranssiketjun laskenta

Toleranssiketju muodostuu terärungon ja käyttävän akselin välisen sovitteen maksimivällyksen mahdollistamasta terärungon kallistumasta sekä kallistumasta aiheutuvan terärungon tartuntauran kallistumasta.

Tartuntauran kallistuma aiheuttaa sen, että muoto, jolla terään tartutaan ei enää mahdu uraan samalla sovitteella, jolla se mahtuisi uraan uran ollessa suora. Tartuntamuodolle on laskettava uusi toleranssialue, jolla huomioidaan myös terärungon kallistuma.

Terärungon ja käyttävän akselin nimellismitta on  $\text{Ø}170$  mm ja sovitepari H6/h5, jolloin maksimivällykseksi tulee 0,043 mm. Terärungon leveyttä ei vielä suunnittelutyön vaiheessa ole määritelty, mutta arvio leveydestä on 100 mm. Tätä luku käytetään toleranssiketjun laskennassa.

Terärungon ja käyttävän akselin välykseen mahdollistaa kuvan 47 mukaisen terän kallistumisen. Kuvassa mitta  $x$  on terärungon leveys ja  $y$  mitta terärungon ja käyttävän akselin maksimivällykseen. Kulma  $\alpha$  on välyksen aiheuttama kallistuskulma.



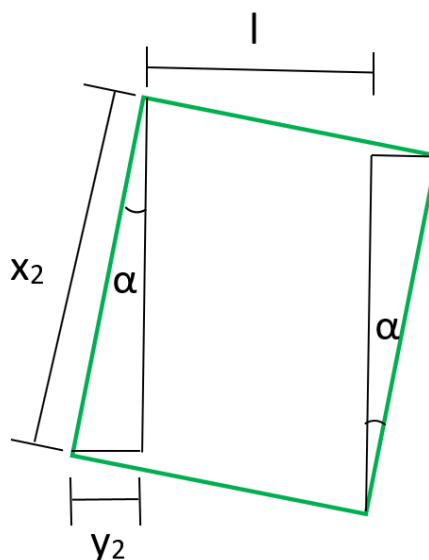
**Kuva 47.** Välyksen aiheuttama terärungon kallistuma. Mitta  $x$  on terärungon leveys, mitta  $y$  maksimivällykseen ja kulma  $\alpha$  terärungon kallistuskulma.

Trigonometrisiä kaavoja hyväksikäyttäen voidaan kaavan 10 mukaisesti laskea muodostuva kallistuskulma.

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{y}{x} \right) \quad (10)$$

Kallistuskulman  $\alpha$  arvoksi saadaan  $0,025^\circ$ .

Terärungon kallistuessa myös terärungossa oleva kiinnitysura kallistuu pystysuorassa liikkeessä liikkuvalla tartuntamuodolle jää vähemmän tilaa mahtua uraa. Tartuntamuodolle uraan jäävä tila  $l$  voidaan laskea vähentämällä uran minimileveydestä  $l_{ura}$  kuvan 48 mukaisten kolmioiden korkeus  $y_2$ . Uraan tarttuva muoto pituudeltaan 50 mm, joten kallistuma vaikuttaa uran leveyteen vain tämän pituisella alueella  $x_2$ .



**Kuva 48.** Tartuntamuodolle uraan jäävä tila  $l$  voidaan laskea vähentämällä kallistuksesta syntyvien kolmioiden korkeus  $y_2$  uran minimileveydestä.

Kolmion korkeus  $y_2$  voidaan laskea trigonometrisiä kaavoja hyväksikäyttäen kaavan 11 mukaisesti.

$$y_2 = \sin(\alpha) \times x_2 \quad (11)$$

Kolmion korkeus  $y_2$  kaavan 10 mukaan laskien on  $0,022$  mm.

Lopullinen uran leveys lasketaan vähentämällä kolmioiden korkeudet uran minimileveydestä  $l_{ura}$ , kaavan 12 mukaisesti.

$$l = l_{ura} - 2 \times y_a \quad (12)$$

Uran leveydelle on määritelty toleranssiksi H5, jolloin uran leveys pienimmillään on nimellismitta ja suurimmillaan 0,006 mm nimellismittaa leveämpi. Uran nimellimitaksi on määritelty 10 mm, joten kallistuksen aiheuttaman kapeneman jälkeen uran leveys  $l$  on kaavan 11 mukaisesti laskien 9,956 mm ja poikkeama nimellimitasta 0,044 mm.

Tartuntaelimen muodolle on määritelty nimellimitaksi uraa vastaava 10 mm. Terärungon kallistumisesta johtuen tartuntamuodon on oltava vähintään 0,044 nimellismittaa pienempi. Terärungon paikoitusuran toleranssiluokan ollessa IT5, valittiin tarttuvalle muodolle vastaava toleranssiluokka. Näin saadaan muodolle lopulliseksi mitaksi toleransseineen 10 - 0,044 – (-0,050) mm.

Näin laskettuna terärungon ja tartuntaelimen välinen vällys on minimissään 0,044 mm ja maksimissaan 0,056 mm.

## Terien lukitusvoiman laskenta

## Alkuarvot:

- Teräparien määrä: 1 kpl
- Terän halkaisija: 0,23 m
- Materiaalin syöttönopeus: 24 m/s
- Materiaalin vahvuus: 2 mm
- Materiaalin murtolujuus: 510 MPa

Lasketaan leikkaukseen tarvittava teho kaavan 4 mukaisesti:

$$P = \frac{1 \times 1,44 \times 78,74 \text{ fpm} \times 0,08^2 \text{ in} \times 0,8 \times 73969,23 \text{ psi}}{50\,000} \quad (13)$$

Tehoksi saadaan  $P = 0,86 \text{ HP}$ .

Muunnetaan teho wateiksi.

$$P = 0,75 \times 0,86 \text{ HP} = 0,65 \text{ kW} \quad (14)$$

Lasketaan teräkohtainen voima  $F_{\text{terä}}$ , joka on pysäytettävä terän lukituksella.

$$n = \frac{24 \text{ m/min}}{\pi \cdot 0,23 \text{ m}} = 33,21 \text{ min}^{-1} \quad (15)$$

$$\omega = \frac{33,21 \text{ min}^{-1}}{60} \times 2\pi = 3,48 \text{ rad/s} \quad (16)$$

$$M_v = \frac{650 \text{ W}}{3,48 \text{ rad/s}} = 186,78 \text{ Nm} \quad (17)$$

$$F_{\text{terä}} = \frac{186,78 \text{ Nm}}{0,5 \cdot 0,23 \text{ m}} = 185,35 \text{ N} \quad (18)$$