

Kalle Juntunen

**LASTUAMISARVOJEN MÄÄRITYS ROBOTILLA TEHTÄVÄLLE PUUN
JYRSINNÄLLE**

Insinööriö
Kajaanin ammattikorkeakoulu
Tekniikan ja liikenteen ala
Kone- ja tuotantotekniikan
koulutusohjelma
Kevät 2008



**Kajaanin
ammattikorkeakoulu**

OPINNÄYTETYÖ TIIVISTELMÄ

| | |
|--|---|
| Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala | Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan ala |
| Tekijä(t) Kalle Juntunen | |
| Työn nimi Lastuamisarvojen määrittäminen robotilla tehtävälle puun jrsinnälle | |
| Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Tietokoneavusteinen tuotanto ja kunnossapito | Ohjaaja(t) Eero Pikkarainen Toimeksiantaja Kajaanin ammattikorkeakoulu |
| Aika 9.5.2008 | Sivumäärä ja liitteet 60+10 |
| <p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli selvittää robotilla suoritettavalle puun jrsinnälle oikeat lastuamisarvot ja menetelmiä lastuamisarvojen määrittämiseksi. Metalleille on määritetty paljon lastuamisarvoja, mutta puun lastuamisarvoista löytyi hyvin vähän tietoa.</p> <p>Oikeista työstöarvoista on hyötyä Kajaanin ammattikorkeakoululle ja Kuhmossa toimivalle Woodpolikselle. Molemmilla on ABB 140 IRB -robotti käytössä puun jrsintään. Lastuamisarvojen testaamisessa käytettiin Kajaanin ammattikorkeakoulun robottia ja siihen kiinnitetty Mannesmann Demag ES 170 ZG -jrsinkaraa sekä Numo 5.0 NC -jrsintäkonetta. Testeissä selvitettiin myös, kuinka robotilla ja NC -jrsinkoneella tulokset eroavat toisistaan.</p> <p>Testeissä muuttuvia arvoja olivat karan pyörimisnopeus, syöttönopeus, lastuamissyvyys, jrsimen halkaisija ja työstösuunta. Näillä arvoilla saatiin paljon tietoa puun lastuamisesta. Lisäksi mitattiin, onko äänenvoimakkuudella yhteyttä jrsinnan pinnanlaatuun. Puulajeina testeissä käytettiin koivua ja mäntyä.</p> <p>Robotisoitu puun jrsintä lisääntyy tulevaisuudessa huomattavasti, koska robottien ominaisuudet monipuolistuvat ja ne esimerkiksi puun jrsintään. Lisäksi tulevaisuudessa robottien hinnat laskevat, mikä lisää niiden käyttöä puuteollisuudessa.</p> <p>Testien tuloksena saatiin paljon tietoa puun jrsintäarvoista ja menetelmistä, joilla oikeiden lastuamisarvojen määrittäminen onnistuu. Tärkeimpänä tuloksena saatiin suosituslastuamisarvoja robotilla tehtävälle puun jrsinnälle.</p> | |
| Kieli | Suomi |
| Asiasanat | |
| Säilytyspaikka | <input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun Kaktus-tietokanta <input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto |

| | |
|--|--|
| School Engineering | Degree Programme Mechanical and Production Engineering |
| Author(s) Kalle Juntunen | |
| Title Definition of Cutting Parameters in Wood Milling by Robot | |
| Optional Professional Studies Computer Aided Production and Maintenance | Instructor(s) Eero Pikkarainen |
| | Commissioned by Kajaani University of Applied Sciences |
| Date 9.5.2008 | Total Number of Pages and Appendices 60+10 |
| <p>The purpose of this bachelor's thesis was to find the accurate cutting parameters in wood milling by robot and methods to define the cutting parameters. Lots of cutting parameters have been defined for metals, but there is not much information about cutting parameters for wood milling.</p> <p>The accurate cutting parameters can be used by the Kajaani University of Applied Sciences (=UAS) and the Woodpolis center in Kuhmo. Both places have the ABB 140 IRB robot used for wood milling. For testing the cutting parameters the Kajaani UAS ABB IRB 140 robot was used with the Mannesmann Demag Es 170 ZG milling spindle and Numo 5.0 NC milling machine. The tests also compared the differences between robotic wood milling and NUMO 5.0 NC milling machine test results.</p> <p>The tests included variables like spindle speed, feed speed, depth of cut, diameter of the milling tool and direction of the milling. These variables gave a lot of information about wood cutting. Also it was tested if there is a connection between sound volume and the surface quality of milling. Birch and pine trees were used in the tests.</p> <p>Wood milling by robot will increase considerably, because robot are very suitable for milling wood. Also the robot prices will decrease, which will increase their use in wood industry.</p> <p>The results of these tests gave a lot of information about the wood milling parameters and method to define the accurate cutting parameters. The most important result of the test is the recommended values for cutting parameters in wood milling by robot.</p> | |
| Language of Thesis | Finnish |
| Keywords | |
| Deposited at | <input type="checkbox"/> Kaktus Database at Kajaani University of Applied Sciences <input type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences |

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| 1 JOHDANTO | 1 |
| 2 LASTUAMISEN TEORIA | 2 |
| 2.1 Lastunmuodostumisen teoria | 2 |
| 2.2 Jyrsiminen | 4 |
| 2.3 Metallien lastuamisarvoja ja ominaisuuksia | 6 |
| 2.4 Työkalun muoto ja materiaali | 7 |
| 2.5 Terän geometria ja teräkulmat | 8 |
| 2.6 Terän halkaisija ja leikkaavien terien lukumäärä | 9 |
| 2.7 Terän kuluminen | 10 |
| 2.8 Leikkuu- ja syöttönopeus | 10 |
| 3 PUUN TYÖSTÖTEKNISET OMINAISUUDET | 11 |
| 3.1 Puulajit | 11 |
| 3.1.1 Männyn puutekniset ominaisuudet | 11 |
| 3.1.2 Koivun puutekniset ominaisuudet | 13 |
| 3.2 Lastuamissuunnat | 14 |
| 3.3 Puun ja metallien välinen ero | 16 |
| 3.4 Hyvän lastuamistuloksen määrittely | 17 |
| 4 ROBOTTI PUUTUOTTEIDEN JYRSINNÄSSÄ | 20 |
| 4.1 ABB 140 IRB -robotin ominaisuudet | 20 |
| 4.2 Mannesmann Demag ES 170 ZG -jyrsinkara | 21 |
| 5 TUTKIMUSJÄRJESTELYT | 23 |
| 5.1 Tutkimuksen tavoitteet | 23 |
| 5.2 Tutkimuksen vaiheet ja suoritus | 24 |
| 5.2.1 NUMO NC-jyrsinkonetestit | 24 |
| 5.2.2 ABB 140 IRB -robotin jyrsintätestit | 24 |
| 5.3 Tutkimuksen rajaus | 26 |

| | |
|--|----|
| 6 TUTKIMUSTULOKSET | 28 |
| 6.1 NUMO 5.0 NC -jyrsinkonetestit | 28 |
| 6.1.1 Koivu | 28 |
| 6.1.2 Mänty | 31 |
| 6.1.3 Kaarien lastuaminen | 34 |
| 6.1.4 Äänenvoimakkuuden mittaustulokset | 34 |
| 6.1.5 Parhaat syöttönopeudet eri karanpyörimisnopeuksille | 37 |
| 6.1.6 Terien kuluminen | 42 |
| 6.2 ABB 140 IRB -jyrsintätestit | 42 |
| 6.2.1 Koivu | 43 |
| 6.2.2 Mänty | 44 |
| 7 TULOSTEN TARKASTELU JA TYÖSTÖARVOSUOSITUKSET | 45 |
| 7.1 NUMO 5.0 NC -jyrsinkonetestien tulostarkastelu | 45 |
| 7.1.1 Koivu | 46 |
| 7.1.2 Mänty | 47 |
| 7.2 Lastuamisarvosuositukset koivulle NC -jyrsinkonetestien perusteella | 48 |
| 7.3 Lastuamisarvosuositukset männylle NC -jyrsinkonetestien perusteella | 51 |
| 7.4 ABB 140 IRB -jyrsintätestien tulostarkastelu ja lastuamisarvosuosituksia | 54 |
| 7.4.1 Koivu | 54 |
| 7.4.2 Mänty | 54 |
| 8 JOHTOPÄÄTÖKSET | 56 |
| 9 YHTEENVETO | 58 |

LÄHTEET:

LIITTEET:

1 JOHDANTO

Tämä insinöörityö on tehty Kajaanin ammattikorkeakoululle. Insinöörityön aiheena on työstöarvojen määrittäminen robotilla tehtävälle puun jyrinnälle sekä menetelmien kehittäminen sopivien työstöarvojen määrittämiseen.

Kajaanin ammattikorkeakoululle hankittiin syksyllä 2007 puun jyrintään tarkoitettu Mannesmann Demag ES 170 ZG -jyrinkara, joka toimii paineilmalla. Karan pyörimisnopeus on täyden paineen saadessaan koko ajan vakio 15000 kierrosta minuutissa. Jyrinkara kiinnitettiin ABB 140 IRB -robotin ranteeseen. Kuusiakselisena robottina ABB 140 IRB pystyy tekemään monipuolisia jyrintöjä.

Insinöörityöstä saatuja tuloksia voi hyödyntää myös Kajaanin ammattikorkeakoulun kanssa yhteistyötä tekevä Woodpolis. Woodpolis sijaitsee Kuhmossa ja se on keskittynyt energiatehokkaaseen asumiseen ja puurakentamiseen. Lisäksi Woodpolis tarjoaa maamme nykyaikaisimman oppimisympäristön koulutuskäyttöön. Woodpoliksessa on myös ABB 140 IRB -robotti ja siinä taajuusmuuntajalla ohjattu sähkökäyttöinen jyrinkara, jonka pyörimisnopeutta pystytään säätämään.

Jyrintä on lastuava työstömenetelmä, jossa jyrinterät leikkaavat materiaalista lastun kerrallaan. Jyrintäarvoja on määritetty pääasiassa metalleille. Niistä ei ole paljon hyötyä puuta jyrittäessä. Puu on materiaalina epätasalaatuista ja työstöarvojen tarkkamäärittäminen on erittäin hankalaa. Metalleille hyvien työstöarvojen määrittäminen onnistuu huomattavasti helpommin.

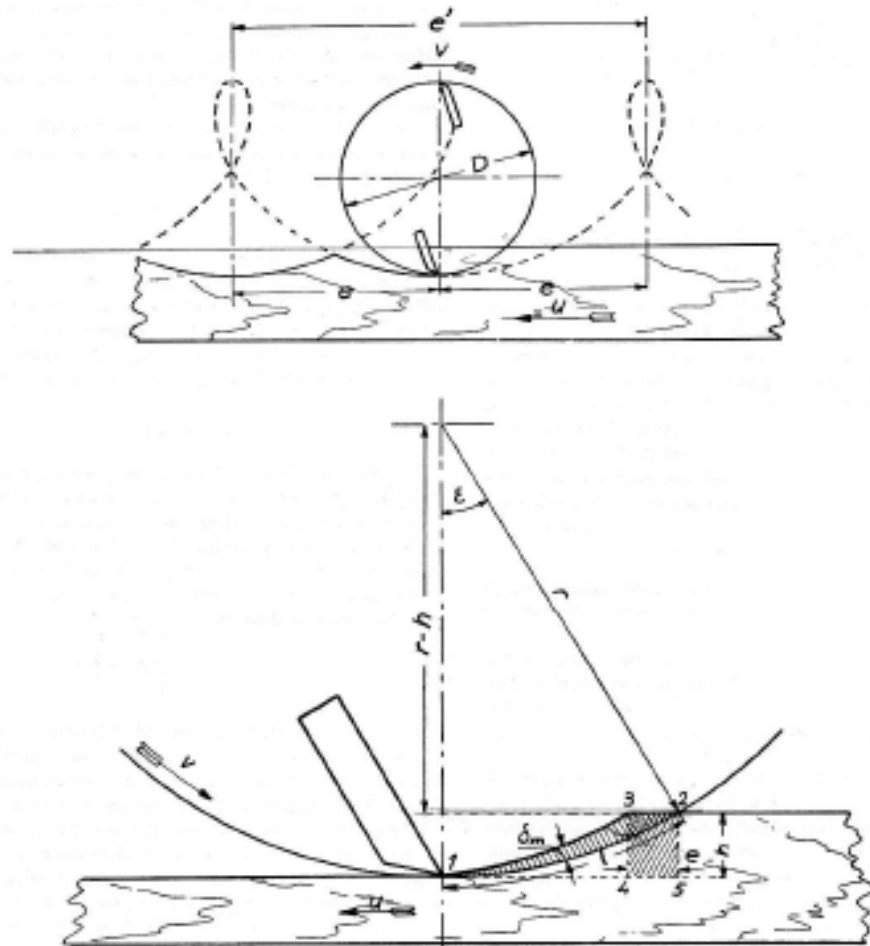
Robotisoitu puun jyrintä tulee tulevaisuudessa lisääntymään merkittävästi. Koneistettavat puutuotteet ovat yleisesti kolmiulotteisia ja robottien ominaisuudet mahdollistavat erittäin haastavien pinnanmuotojen jyrinnän.

Insinöörityön tavoitteena on selvittää robotisoidulle puun jyrinnälle parhaat mahdolliset työstöarvot sekä tutkia menetelmiä, joilla pystyttäisiin määrittelemään parhaat työstöarvot. Jyrintätestien tulosten perusteella voidaan antaa suositusarvoja robotisoidulle puun jyrinnälle.

2 LASTUAMISEN TEORIA

2.1 Lastunmuodostuksen teoria

Lastuttavuus koostuu materiaalin ominaisuuksista, jotka vaikuttavat sen työstämiseen lastuvilla työstömenetelmillä. Työstettäessä pyörivillä jyrsinterillä lastun paksuus muuttuu koko ajan jyrsinnän aikana. Lastun paksuus voidaan laskea kuvassa 1 esitettyjen arvojen avulla.



Kuva 1. Teräpään irrottaman lastun muoto [1.]

Keskimääräinen lastunpaksuus δ_m [mm] on

$$\delta_m = e * \sqrt{\frac{h}{D}}, \quad (1)$$

missä e on syöttö hammasta kohti [mm / hammas]

$$e = \frac{u}{n * z}. \quad (2)$$

Joten keskimääräinen lastunpaksuus pystytään ilmoittamaan

$$\delta_m = \frac{u}{n * z} * \sqrt{\frac{h}{D}}. \quad (3)$$

Kaavoissa käytetyt muuttujat ovat:

u = syöttönopeus mm/min,

n = teräpään kierrosluku 1/min,

z = työstävienterien lukumäärä,

h = työstösyvyys ja

D = teräpään halkaisija.

Esimerkiksi arvoilla

$$u = 300$$

$$n = 15000$$

$$z = 2$$

$$h = 5$$

$$D = 10$$

Saadaan laskettua kaavalla (3)

$$\delta_m = \frac{600}{15000 * 2} * \sqrt{\frac{5}{10}} = 0,0141 \text{ mm.}$$

2.2 Jyrsiminen

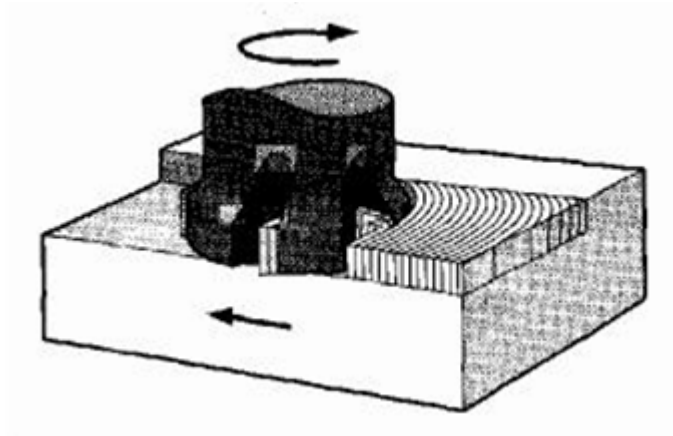
Jyrsiminen on lastuava työstömenetelmä, jossa pyörivää yksi- tai monihampaista työkalua käyttäen irrotetaan lastuja työstettävästä kappaleesta.

Jyrsimisessä työkalu pyörii akselinsa ympäri. Syöttöliikkeen suunta on normaalisti kohtisuorassa työkaluun nähden. Eräillä jyrsimillä voidaan myös porata, ja silloin syöttöliike on suoraan työkalun akselin suuntainen. Jyrsinnässä esiintyvät lastuamisvoimat ovat jaksoittaisia, ja tämän takia niitä on huomattavasti vaikeampi hallita kuin muilla työstömenetelmillä. [2.]

Jyrsinnällä voidaan valmistaa monimutkaisia muotoja, joiden valmistus ei onnistu millään muulla työstömenetelmällä. Jyrsintä on erittäin monipuolinen työstömenetelmä, koska sillä voidaan koneistaan tasoja, käyriä pintoja, uria, hammasmuotoja ja kierteitä. Tärkeä ominaisuus jyrsinnällä on, että sillä voidaan koneistaa kolmiulotteisia pintoja. [2.]

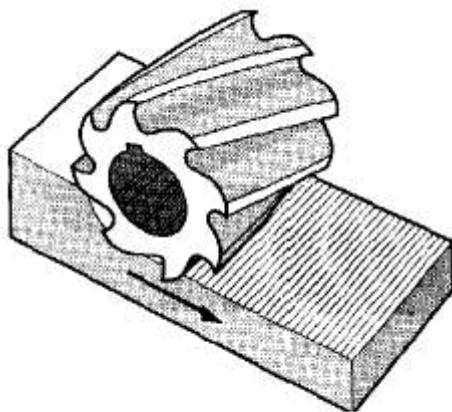
Jyrsinnässä työkalun akseli on yleensä kohtisuorassa työstettävään pintaan nähden. Tätä työtä kutsutaan otsajyrsinnäksi. Yleisimmin näin jyrsitään tasopintoja, kuten kuvassa 2. Muita jyrsintämuotoja on muun muassa lieriöjyrsintä, jota on esitetty kuvassa 3.[2.]

Otsajyrsinnässä esiintyy sekä vasta- että myötäjyrsintää riippuen siitä, missä asennossa terä on työstettävään kappaleeseen nähden. Jos jyrsin on sijoitettu samankeskeisesti jyrsittävän pinnan kanssa, niin työstö tapahtuu tasapuolisesti vasta- ja myötäjyrsintänä. Tällöin lastun poikkipinta kasvaa suurimmilleen terän särmän liikkeessä keskiöön ja vastaavasti pienenee keskiön jälkeen. Lastun poikkipinta muuttuu jyrsinnässä kaiken aikaa. [3, s. 199.]



Kuva 2. Otsajyrsintää teräpäällä [3, s. 198.]

Lieriöjyrsinnässä työkalun akseli on samansuuntainen työstöpinnan kanssa, kuten kuvassa 3. Lieriöjyrsinnässäkin käytetään vasta- ja myötäsyöttöä. Lieriö- eli kehäjyrsinnässä lastuaminen tapahtuu kehäpinnan hampailla. Lieriöjyrsinnässä jyrsinkone rasittuu epätasaisesti johtuen lastunpaksuuden vaihtelusta.



Kuva 3. Lieriöjyrsinnässä työkalun akseli on samassa suunnassa työkappaleen kanssa [3, s. 198.]

Peruslastuamisarvot jyrinnässä ovat:

lastuamisnopeus v ,
pyörimisnopeus n ,
syöttönopeus u ,
hammaskohtainen syöttö S_z ,
lastuamissyvyys a ja
kosketusleveys e .

Jyrinnän lastuamisnopeus määräytyy jyrinän halkaisijan ja pyörimisnopeuden mukaan. Lastuamisnopeuden valintaan vaikuttaa terän raaka-aine, jyrittävä raaka-aine sekä käyttöolosuhteet, missä jyrintä tapahtuu.

2.3 Metallien lastuamisarvoja ja ominaisuuksia

Hiilipitoisuus on tärkein hiiliterästen eli seostamattomien rautojen lastuttavuuteen vaikuttava tekijä. Hiilipitoisuudesta riippuvat terästen kovuus, lujuus ja sitkeys. 0,15 ... 0,30 prosentin hiilipitoisuuksilla lastuaminen onnistuu tyydyttävästi valssatussa, hehkutetussa ja normalisoidussa tilassa, kun rakenne on enimmäkseen perliittinen. Hiiliterästen, joiden hiilipitoisuus on 0,30 ... 0,50 prosenttia ja rakenne on pallomainen, parhaiten lastuaminen onnistuu hehkutetuna. Jos rakenne ei ole täysin pallomainen, niin kovuus voi olla liian suuri ja lastuaminen ei onnistu kunnolla. Hiilipitoisuus vaikuttaa myös työstetyn pinnan laatuun; parhaat tulokset pinnanlaadun suhteen saadaan 0,25 ... 0,35 prosentin hiilipitoisuuksilla. Taulukossa 1 on esitetty eri metallien ja muovien optimaalisia työstöarvoja. Mitä kovempi materiaali on, sitä hitaampia täytyy olla syöttönopeudet. [4.]

Taulukko 1. Suositussyöttöarvoja eri materiaaleille [5.]

| Materiaali | Syöttö | |
|------------------------|----------|-------------|
| | m/mm | mm/hammas |
| Normaali rakenne teräs | 15 - 30 | 0,05 - 0,20 |
| Ruostumaton teräs | 10 - 20 | 0,05 - 0,15 |
| Harmaa valurauta | 10 - 25 | 0,10 - 0,15 |
| Alumiini | 50 - 130 | 0,05 - 0,30 |
| Kupari | 20 - 40 | 0,05 - 0,20 |
| Muovit | 80 -150 | 0,05 - 0,20 |

2.4 Työkalunmuoto ja materiaali

Jyrsintyökalua eli jysinterää kutsutaan yleisimmin jysimeksi. Siinä on yleensä useita leikkaavia särmiä. Puun jysinnässä yleisimmin käytetään 1- tai 2-leikkuista terää, koska puuta jysittäessä täytyy olla paljon tilaa lastunpoistolle. Kuvassa 4 on esitetty jysinterä, joka soveltuu hyvin puun jysintään.



Kuva 4. 2-leikkuinen jysinterä on eniten käytetty terämalli puun jysintään. [6.]

Jotta jysiminen onnistuisi parhaalla mahdollisella tavalla, on osattava valita oikeanlainen jysinterä kuhunkin työhön ja kiinnittää se oikealla tavalla jysinkoneeseen. Terämateriaalin valinta riippuu jysintätavasta ja työkappaleen materiaalista. Yleisesti jysimet valmistetaan pikateräksestä tai kovametallista. Optimaalinen terämateriaali on samaan aikaan erittäin sitkeää

ja kovaa. Pinnoitteiden avulla terän kovuutta voidaan kasvattaa ja jyrksinnässä tapahtuvien kuluttavien reaktioiden vaikutusta pienentää sekä samalla lisätä jyrsimen käyttöikä. [7.]

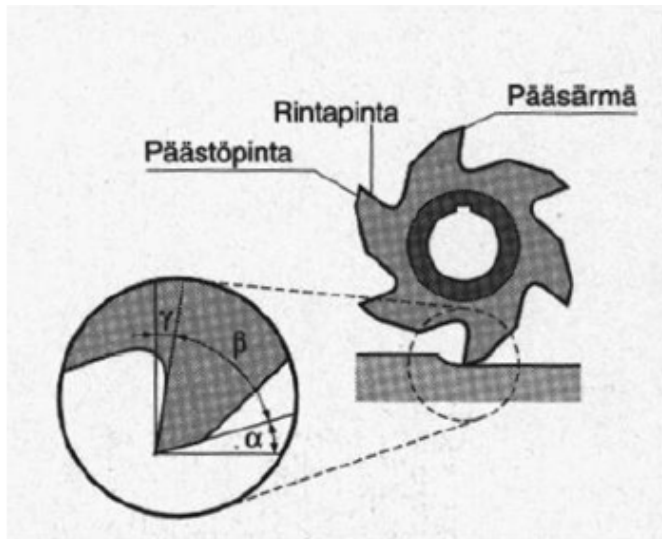
Pikateräs on runsasseosteinen teräs, jonka seosaineita ovat kromi, volframi, nikkeli ja koboltti. Karkaistuna pikateräs on kova, iskuja ja kulutusta kestävä terämateriaali. Se ei kuitenkaan kestä kovin suuria lämpötiloja teräksen päästymisen takia. Kovametalli kestävä pikaterästä paremmin kulutusta ja korkeita lämpötiloja. Se on kuitenkin hauraampaa kuin pikateräs. Kovametallin ominaisuuksien ansiosta voidaan käyttää suurempia lastuamisnopeuksia kuin pikateräksillä. Molempien terämateriaalien ominaisuuksia pyritään parantamaan pinnoitteilla. Pinnoitusaineina käytetään erilaisia nitridejä, joista yleisin on titaaninitridi (TiN). Karbidit ovat myös yleisiä pinnoitteita. [7.]

2.5 Terän geometria ja teräkulmat

Terän muodon vaikutusta lastunmuodostukseen ei ole tutkittu paljon. Teräkulmat vaikuttavat yhdessä leikkuusuunnan kanssa lastunmuodostukseen. Rintakulman vaikutuksen on havaittu yleensä lisäävän lastun määrää.

Jyrsimen pinnat ja särmät on esitetty kuvassa 5. Rintapinta on se pinta, jota pitkin poistuva lastu kulkee. Päästöpinna on pääleikkuusuuntaa vastaan oleva terän pinta, joka sisältää pääsärmän. Terässä voi olla varsinaisen päästöpinnan lisäksi myös sivupäästöpinnoja. Pääsärmä on terän syöttösuunnan puoleinen lastuava särmä. Pääsärmä leikkaa lastun irti kappaleesta. [3, s. 23.]

Kuvasta 5 nähdään myös teräkulmat. Rintakulma on rintapinnan ja perustason välinen kulma. Rintakulma voi olla joko positiivinen, negatiivinen tai nolla. Jyrsimen terässä arvo on yleensä -5° - $+25^{\circ}$. Rintakulman tunnus on γ (gamma). Päästökulma on päästöpinnan ja perustason vastaan kohtisuoran tason välinen kulma. Päästökulma ei voi olla negatiivinen, sillä silloin se hankaisi työstettävään kappaleeseen. Päästökulman tunnus on α (alfa). Teroituskulma on rintapinnan ja päästöpinnan välinen kulma kohtisuoraan pääsärmää vastaan mitattuna. Jos rinta- ja päästökulmat ovat mahdollisimman suuret, niin teroituskulma on vastaavasti pieni. Teroituskulman tunnus on β (beeta). [3, s. 23.]



Kuva 5. Jyrsimen pinnat ja kulmat [3, s. 184.]

Jyrsimessä täytyy olla oikeat teräkulmat. Teräkulmien suuruus riippuu jyrsintätavasta ja työstettävästä materiaalista. Metalleja jyrsittäessä jyrsimen hampaisiin voidaan tehdä lastunkatkaisu-uria, joilla saadaan lyhennettyä irtoavan lastun pituutta.

2.6 Terän halkaisija ja leikkaavien särmien lukumäärä

Terän halkaisija D [mm] on terän pyöriessä suurin suurimman leikkaavan särmän piirtämä halkaisija. Terän halkaisija ei välttämättä ole suurin halkaisija, sillä esimerkiksi kartioterillä työstettäessä työstösyvyys vaikuttaa siihen kuinka suuri on terän halkaisija. [8.]

Hammasluku kertoo, kuinka monta leikkaavaa särmää on jyrsimessä. Puuta jyrsittäessä on yleensä yksi tai kaksi leikkaavaa särmää. Jyrsinten hammasjako on eri raaka-aineita varten erilainen. Pehmeät materiaalit, kuten puu, vaativat terältä paljon lastutilaa. Tällöin jyrsimen hammasjaksi valitaan mahdollisimman pieniksi. Kovemmilla materiaaleilla käytetään tiheää hammasjakoa.

2.7 Terän kuluminen

Lastuamisessa jysinterä joutuu alttiiksi suurille mekaanisille rasituksille. Lastuamisvoimat ovat erittäin suuria. Terä joutuu kestäämään dynaamista kuormitusta. Jysittäessä terä joutuu kestäämään myös lämpötilan muutoksien aiheuttamia lämpöjännityksiä. Vaikka jysinterässä ei näkyisikään päällepäin murtumia tai muodonmuutoksia, niin siitä irtoaa jatkuvasti pieniä aineshiukkasia.

Terän kuluminen aiheuttaa lastuamisvoimien kasvua ja tehon tarpeen lisääntymistä. Kulunut jysinterä aiheuttaa mittaepätarkkuuksia ja pinnanlaadun heikkenemistä.

Puuntyöstössä kuluvat leikkaavan terän särmä, rinta- ja päästökulma. Terän kulumisen mittaamiseksi ei ole olemassa yhtä yleisesti hyväksyttyä mittausta. Lähtökohtaisesti usein terän vaihto- ja teroitusväliä valittaessa on, että pyritään optimoimaan tuotantoon vaikuttavia tekijöitä tavoitteena mahdollisimman suuri tuottavuus. Laatuvaatimuksiin ei kiinnitetä tarpeeksi suurta huomiota.[8.]

2.8 Leikkuu- ja syöttönopeus

Leikkuunopeus v [m/min] on terän leikkaavan särmän kehänopeus. Leikkuunopeus riippuu monista eri tekijöistä. Esimerkiksi työstettävä materiaali, terän geometria ja terän materiaali vaikuttavat. Terän valmistajalta saa yleensä leikkuunopeudelle suositukset. Syöttönopeus tarkoittaa yleisesti nopeutta, jolla terää syötetään työstettävään kappaleeseen. Akselin suuntaisessa liikkeessä akselin nopeus on sama kuin ratanopeus. Ympyrän ajossa ratanopeudet muuttuvat. [7.]

Vääristä leikkuu- ja syöttönopeuksista voi aiheutua lastutilan tukkeutumista. Lastutilan tukkeutuminen aiheuttaa lämmön nousua, kun lastut eivät pääse poistumaan jysitystä urasta ja tämä näkyy ennen kaikkea palamisena uran pinnalla sekä huonona pinnanlaatuna. Lämpötilan kohotessa todella korkeaksi se kuluttaa myös jysinterää.

3 PUUN TYÖSTÖTEKNISET OMINAISUUDET

3.1 Puulajit

Suomessa käytetään teollisessa tuotannossa muutamia kymmeniä puulajeja. Puu on luonnonmateriaali, jonka ominaisuudet vaihtelevat eri puulajien välillä, saman puulajin eri yksilöiden välillä ja samassa puussa sekä rungon pituussuunnassa että ytimestä pintaan. Yleisesti puut luokitellaan niiden kovuuden mukaan pehmeisiin havupuihin ja kovempiin lehtipuihin. Tällä luokittelulla ei ole suoraa yhteyttä puiden oikeisiin kovuuksiin. Tämän takia luokittelua ei ole aina helppo tehdä, ja luokittelu saattaa muuttua lähteestä riippuen. Puun ominaisuuksiin vaikuttavat perintö- ja ympäristötekijät. Yleisimmät Suomessa käytetyt puulajit ovat mänty, kuusi, koivu ja pyökki. Puun optimaalisen käytön kannalta on erittäin tärkeää tuntea raaka-aineen ominaisuudet ja niiden vaihtelu sekä eri tekijöiden vaikutus niihin. [10, s.47.]

3.1.1 Männyin puutekniset ominaisuudet

Männyin puuaine koostuu 93-prosenttisesti trakeideista, jotka ovat puutuneita, kuolleita soluja. Näiden trakeidien pituus on keskimäärin 2,9 mm ja paksuus noin sadasosa niiden pituudesta. Puuaineen tiheys vaihtelee riippuen sen kasvuympäristöstä. Kuiva-tuoretiheys on männyllä keskimäärin 390–420 kg/m^3 eli mänty on kevyempää kuin koivu, mutta painavampaa kuin kuusi. Taulukossa 2 on esitetty muita materiaalitekniisiä ominaisuuksia männylle. [10, s.47.]

Männyin sydänpuu ja pintapuuta erottuvat selkeästi toisistaan. Pintapuuta on melko vaaleaa ja pihkaista, kun taas sydänpuu muuttuu valon vaikutuksesta vaaleasta tummanruskeaksi. Rungon poikkileikkauksen pinta-alasta vanhoilla männyillä on yli puolet sydänpuuta. Pihkatiheydet ovat suhteellisen suuria, ja tämän takia sydänpuu on melko kestävä. Rakenteeltaan mänty on suorasyistä ja ulkonäöltään karkeahkoa. Teknisesti paras mäntypuu on suhteellisen hitaasti kasvanutta, jolloin vuosilustot ovat yhtä paksuja ja tiivistä kesäpuuta on paljon. Kuvassa 16 nähdään männyin halkileikkauksia. [10, s 47.]



Kuva 6. Männyn halkileikkauksia [11.]

Taulukko 2. Männyn materiaalitekniisiä ominaisuuksia [12.]

| Ominaisuus | Tuore | Kuiva | Yksikkö |
|---------------------|-------|-------|-----------------------|
| Taivutuslujuus | 862 | 448 | Kg/cm ² |
| Maksimi murtolujuus | 214 | 464 | Kg/cm ² |
| Iskulujuus | 69 | 71 | Cm |
| Jäykkyys | 79 | 109 | 1k kg/cm ² |
| Maksimi kuorma | 0,58 | 0,86 | cm-kg/cm ³ |
| Kovuus | | 284 | Kg |
| Halkaisulujuus | | 114 | Kg/cm ² |
| Ominaispaino | 0,42 | 0,51 | |
| Paino | 625 | 513 | Kg/m ³ |
| Tiheys (ilmakuiva) | | 513 | Kg/m ³ |

3.1.2 Koivun puutekniset ominaisuudet

Koivun kuidut ovat pitkiä, ohuita, paksuseinäisiä ja päästään sulkeutuneita. Kuidut ovat yleensä kuolleita soluja. Kuidut voidaan jakaa kahteen ryhmään: kuitutrakeideihin ja puusyihin. Koivun puuaines kostuu 68-prosenttisesti näistä kuitutrakeideista ja puusyistä. Koivun kuiva-tuoretiheys on 500 kg/m^3 luokkaa ja se on selvästi mäntyä painavampaa. Taulukossa 3 on esitetty lisää koivun materiaalitekniisiä ominaisuuksia.[10, s. 48.]

Koivun suhteellisen suuri tiheys tekee siitä helposti työstettävän, ja se soveltuu erinomaisesti puusepän- ja huonekaluteollisuuden käyttöön. Koivu on parhaimmillaan, kun puulta vaaditaan lujuutta, kimmoisuutta ja sitkeyttä. Koivuilla suurimmaksi ongelmaksi muodostuvat sen suurioksisuus, mikä rajoittaa sen käyttöä mekaanisen jalostuksen raaka-aineena. Kuvassa 7 on esitetty koivun halkileikkauksia. [13.]

Taulukko 3. Koivun materiaalitekniisiä ominaisuuksia. [14.]

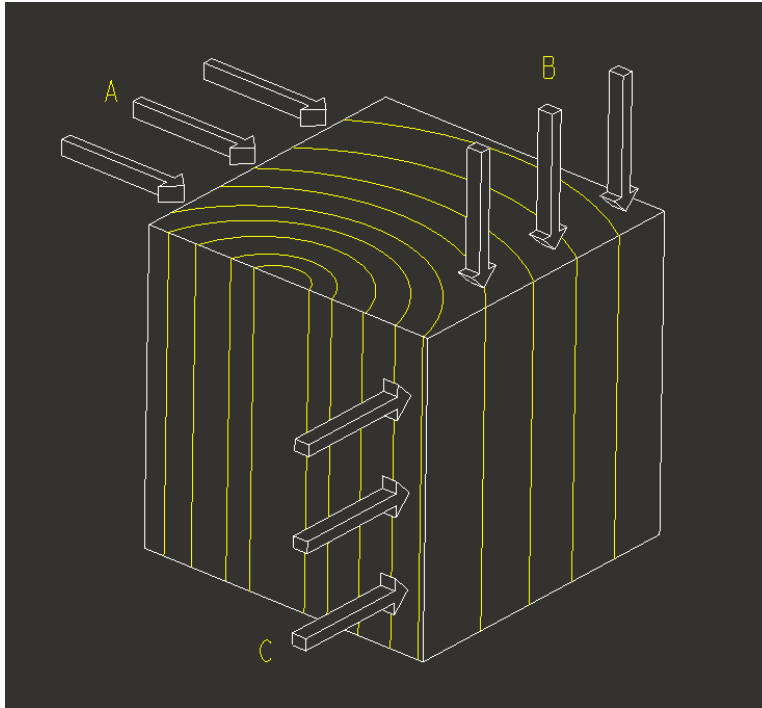
| Ominaisuus | Tuore | Kuiva | Yksikkö |
|---------------------|-------|-------|-----------------------|
| Taivutuslujuus | 1189 | 608 | kg/cm ² |
| Maksimi murtolujuus | 258 | 586 | kg/cm ² |
| Iskulujuus | 76 | 104 | cm |
| Jäykkyys | 108 | 145 | 1k kg/cm ² |
| Maksimi kuorma | 0,91 | 1 | cm kg/cm ³ |
| Kovuus | | 558 | kg |
| Halkaisulujuus | | 145 | kg/cm ² |
| Ominaispaino | 801 | 673 | kg/cm ³ |
| Paino | | 657 | kg/m ³ |
| Tiheys (ilmakuiva) | | 657 | kg/cm ³ |



Kuva 7. Koivun halkileikkaus. [15.]

3.2 Lastuamissuunnat

Jyrsittäessä puuta on otettava huomioon puun syyt. Työstötulokseen vaikuttaa erittäin huomattavasti se, onko työstösuunta poikki- vai myötäsyin. Kuvassa 8 on esitetty puun perustyöstösuunnat. A:ssa ja B:ssä jyrsintä tapahtuu puun syiden suuntaisesti ja C:ssä poikkisyin. Lastuamissuunnalla on myös suuri vaikutus lastun muotoon. Kuvassa 9 nähdään, kuinka poikkisyin jyrsitty lastu on kierteelle mennyttä ja paksumpaa kuin myötäsyin jyrsitty lastu, joka on ohutta ja kevyttä.



Kuva 8. Puun eri lastuamissuunnat.



Kuva 9. Vasemmalla poikkisyyin jyrsettä lastua ja oikealla myötäsyyin jyrsettä.

3.3 Puun ja metallien välinen ero

Puu on helposti muokattavaa ja oikein käsiteltynä myös kestävä materiaalia. Esimerkiksi kuusi on 50 prosenttia terästä lujempaa painoonsa verrattuna. Puulle voidaan käyttää huomattavasti metalleja korkeampia lastuamisnopeuksia, koska puu on metalleja pehmeämpää materiaalia.

Puulle ominaista käyttäytymistä jyrsittäessä on nukkaantuminen. Jyrsittyyn pintaan voi tulla nukkaa, joka voi haitata puun jälkikäsittelyä. Metalleilla nukkaantumista ei esiinny materiaalin kovuuden takia.

Metallien rakenne koostuu atomeista. Nämä muodostavat säännöllisen rakenteen, jota kutsutaan hilarakenteeksi. Esimerkiksi puhdas rauta on suhteellisen pehmeä ja sinertävän valkoinen metalli. Sen tiheys on $7,8 \text{ kg/dm}^3$ ja sulamispiste $1535 \text{ }^\circ\text{C}$ ja lastuaminen on hankalaa. Puun rakenne koostuu muun muassa kuiduista ja syistä, joiden ominaisuudet vaihtelevat puulajeittain. Esimerkiksi teräs sisältää pelkistetysti kahta alkuainetta, rautaa ja hiiltä. Tällaista terästä kutsutaan seostamattomaksi teräkseksi. Teräksessä on rautaa vähintään 50 prosenttia, ja sen hiilipitoisuus vaihtelee 0,3–2,06 prosenttia. Hiili on raudassa kemiallisena yhdisteenä. Seostuksen avulla teräksestä tulee karkenevaa, ja se on tällöin paremmin lastuttavaa. Hiilipitoisuus määrittelee metallien lastuamisominaisuuksia. [16.]

Puuta lastuttaessa käytetään 1- tai 2-särmäisiä jyrsimiä, koska puuta jyrsitään kovilla syöttönopeuksilla ja tarvitaan runsaasti tilaa lastunpoistolle. Metalleilla syöttönopeudet ovat huomattavasti alhaisemmat ja jyrsimissä on monta leikkaavaa särmää. Yleisesti kaikki puulajit ovat pehmeitä materiaaleja, kun verrataan metalleihin. Puun ominaisuuksista johtuen sitä pystytään jyrsimään paljon suuremmilla lastuamisnopeuksilla kuin metalleja.

3.4 Hyvän lastuamistuloksen määrittely

Hyvän lastuamisarvon määrittelyssä käytetään apuna silmämääräistä tarkastelua lastuttujen pintojen laadulle. Testeissä saatuja tuloksia verrataan aiemmin tehtyjen koejyrsinnöistä saattuihin pinnanlaatu. Eri suuret luokitellaan kuuteen eri luokkaan ykkösestä kuutoseen, jossa ykkönen on paras ja kuutonen huonoin. Testeissä tutkitaan pinnan nukkaantumista, tikkuuntumista ja palamista.

Pinnan nukkaantumisessa jyrsittävän puun pinnalle jää nukkamaista nöyhtää. Nukkaantumista voi tapahtua jyrsittävän kappaleen pohjapinnalla ja uran laidoilla. Nukkaantuminen johtuu syntyvän pinnan ja työkalun välillä tapahtuvasta puukuitujen hiertämisestä. Nukkaantuneen pinnan lakkaus- ja maalaustulokset ovat erittäin huonoja. Tämä aiheuttaa sen, että nukkaantunut pinta täytyy hioa ennen kappaleen jälkikasittelyä. Kuvassa 10 nähdään että parhaat arvot ovat kahdessa keskimmaisessä urassa. Tosin niilläkin on pientä nukkaantumista. Oikean laidan kahdessa urassa on erittäin paljon nukkaa



Kuva 10. Jyrsittyjen urien pohjalla näkyy eriasteista nukkaantumista.

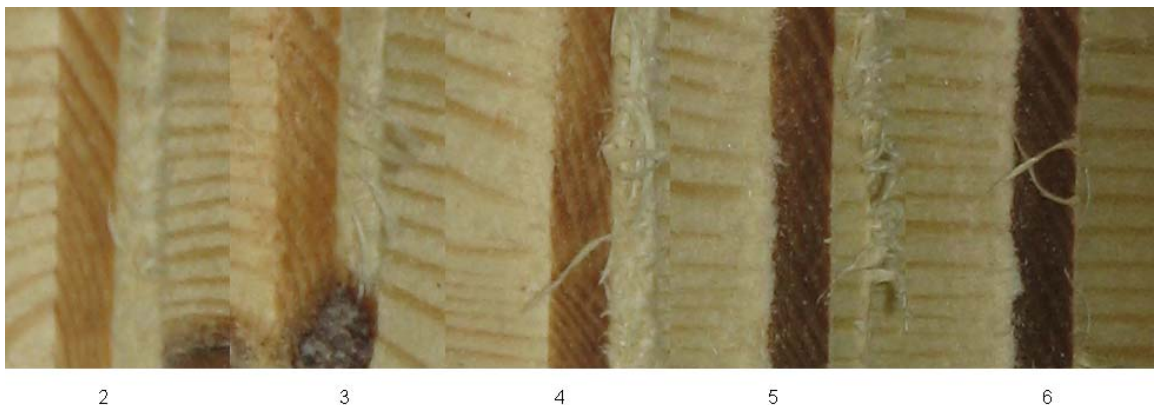
Tikkuuntumisessa jyrsittävän kappaleen laidoille jää kiinni tikkuja. Tikkuuntuminen on ennen kaikkea ongelma poikkisyin jyrsittäessä, mutta tikkuuntumista tapahtuu myös myötäsyin jyrsittäessä. Tikkuuntumista esiintyessä jyrsityn työkappaleen reuna täytyy viimeistellä ja se voidaan joutua pyöristämään, jos pelkkä hionta ei riitä tikkujen poistoon. Kuvassa 11 on esitetty tikkuuntumisen mittausasteikko, josta huomataan, kuinka tikkujen pituus lyhenee mentäessä pienempään arvoon ja parempaan tulokseen.



Kuva 11. Tikkuuntumisen mittausasteikko. Kuutosessa on eniten tiheää tikkua ja kakkosessa lievää lyhyttä tikkua.

Palaminen on helppo havaita. Jyrsittäessä sen huomaa jyrsittyyn pintaan jääneestä tummemmasta kohdasta. Palaminen johtuu ennen kaikkea siitä, että lastunpoisto ei toimi kunnolla. Tällöin terä kuumenee ja polttaa puuta. Palaminen johtuu vääristä työstöarvoista, mutta myös kulunut terä aiheuttaa helpommin palamista.

Palamisen aiheuttamaa tummumista mitataan kuvassa 12 olevilla pinnan tummumisarvoilla. Kuvassa 12 on numero kuutonen pahasti tummunut ja kakkonen lievästi tummunut. Ykköstä ei ole lisätty kuvaan, koska silloin palamista ei tapahdu huomattavissa määrin.



Kuva 12. Palamisesta johtuvan tummumisen asteikko.

Metallien jrsinnässä on todettu, että mitä matalampi on työstöstä syntyvä ääni, sitä lähempänä ollaan optimaalisia työstöarvoja. Äänenvoimakkuutta mitattiin, jotta saataisiin selville onko äänenvoimakkuus myös puulla matalampi hyvillä lastuamisarvoilla.

Äänenvoimakkuutta mitataan desibelimittarilla. Ensimmäisenä mitataan pelkän pyörivän NC-jyrsinkoneen ääni ajamalla työstörata ilmassa kaksi millimetriä työstettävän kappaleen yläpuolelta. Seuraavaksi mitataan jrsinnän äänenvoimakkuus oikeassa lastuamissyvytydessä työstettäessä. Näiden kahden testaustuloksen erotus lasketaan ja saadaan selville, kuinka paljon lisää melua aiheuttaa puuhun jrsiminen.

Desibelimittari asetetaan mahdollisimman lähelle työstettävää kappaletta, suojaileksin sisään, jolloin äänet saadaan mitattua tarpeeksi tarkasti.



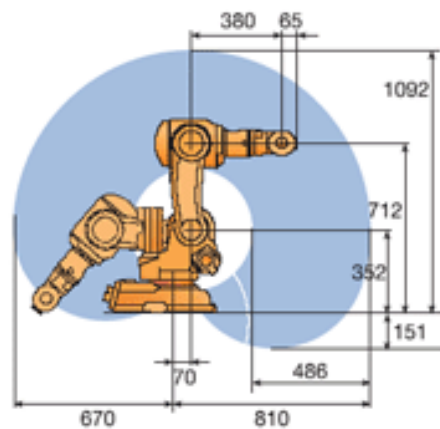
Kuva 13. Desibelimittari on äänenvoimakkuutta mittaamassa.

4 ROBOTTI PUUTUOTTEIDEN JYRSINNÄSSÄ

4.1 ABB 140 IRB -robotin ominaisuudet

ABB 140 IRB -robotti on kompakti ja tehokas teollisuusrobotti. Robotissa on kuusi vapausastetta, mikä tarkoittaa, että siinä on kuusi liikkuvaa niveltä. Robotteja käytetään monipuolisesti teollisuudessa. Monipuoliset käyttösovellukset mahdollistavat robotin joustavuus, luotettavuus, nopeus ja tarkkuus sekä lukuisat erilaiset tarttujat. [17.]

Tärkeä ominaisuus jyrsittäessä robotisoidusti on toistotarkkuus. Robotti pystyy toistamaan ohjelmoidut liikesarjat keskimääriin 0,03 mm:n tarkkuudella, mikä on hyvä tulos, tämän kokoluokan robotille. ABB 140 IRB -robotti on kokoluokassaan erittäin nopea robotti. Robotti pystytään kiinnittämään myös seinälle ja kattoon, mikä lisää sen käyttömahdollisuuksia. Ensimmäisen akselin pyöräytys on 360 astetta ja ulottuvuus 810 mm, mikä takaa laajat työstöalueet. Kuvassa 15 on esitetty robotin mittoja sekä liikeratojen laajuuksia. [17.]



Kuva 14. ABB 140 IRB -robotin mitat ja liikeratojen laajuudet. [18.]

Hyvät ulottuvuusominaisuudet tuottavat myös ongelmia robotilla jyrsittäessä. Robotin pitkät ja suhteellisen hennot varret ovat alttiita värinälle ja taipumille, jolloin työstötarkkuus huononee. Kyseinen robotti pystyy käsittelemään maksimissaan viiden kilogramman painoisia kappaleita. Tämä tulee ottaa huomioon valittaessa robotille karamoottoria. Karamoottorin pitää olla mahdollisimman kevyt, että robotti pystyy liikkumaan menettämättä jyrsinnässä tarvittavia syöttövoimiansa.

4.2 Mannesmann Demag ES 170 ZG -jyrsinkara

Robotin karamoottori voi olla joko taajuusmuuntajalla ohjattu sähköinen tai paineilmalla toimiva. Taajuusmuuntajalla ohjatussa kokonaisuudessa voidaan karamoottorin pyörimisnopeutta säätää. Paineilmalla toimivan karamoottorin pyörimisnopeus on aina sama, kun karamoottori saa täyden paineen. Paineilmalla toimivat karamoottorit ovat yleensä kevyempiä ja soveltuvat tältä osin paremmin robottikäyttöön kuin sähkökäyttöinen taajuusmuuntajalla ohjattu karamoottori.

Mannesmann Demag ES 170 ZG -jyrsinkaran maksimikierrosnopeus on 15000 r/min ja teho 800 wattia, jotka ovat hyvät lukemat tämän kokoluokan karalle. Täyden kierrosnopeuden ja tehon saavuttamiseksi jyrsinkaran täytyy saada paineilmaa 15,8 litraa sekunnissa sekä 600 kPa:n painetta. Paineilmaletku kiinnitetään omaan paineilmatuloon 10/12 (sisä-/ulkomitta)-letkulla ja viedään venttiilin sekä huoltoyksikön läpi karalle. Huoltoyksikössä täytyy olla sumuvoitelu, jolloin paineilman mukaan tuleva öljy voitelee karaa. [19.]

Kuvasta 16 nähdään jyrsinkaran kiinnitys robottiin. Jyrsinkara on kiinnitetty kahden alumiinista tehdyn yhteen kiritettävän tuen väliin. Tuki kiinnitetään paineilmalla robotin työkalulaippaan. Valkoinen tukiosa on tehty estämään jyrsinkaran taipumista alumiinisen tuen ja robotin työkalulaipan välillä.

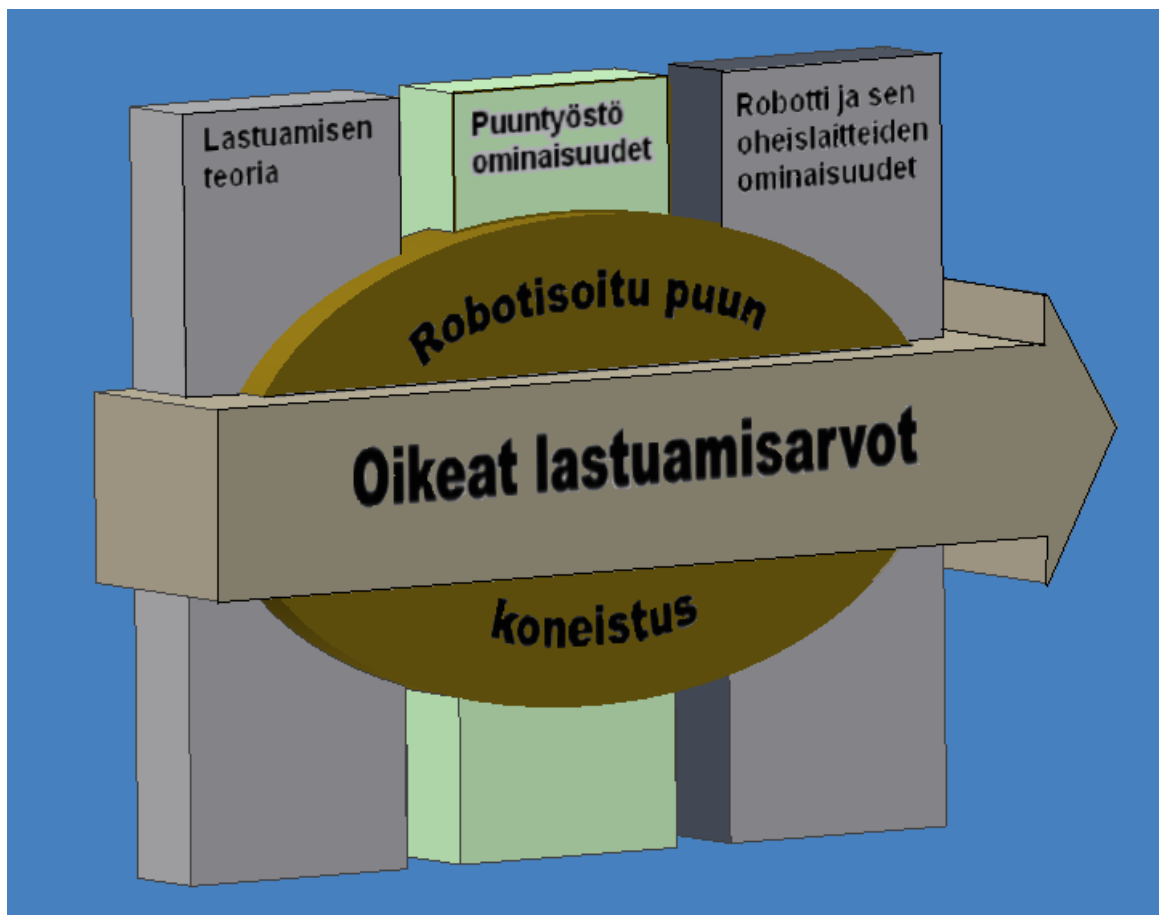


Kuva 15. Mannesmann Demag ES 170 ZG -jyrsinkara.

5 TUTKIMUSJÄRJESTELYT

5.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää robotisoidulle puun jrsinnälle mahdollisimman hyvät lastuamisarvot. Tulosten perusteella voidaan myös kehittää menetelmiä työstöarvojen määrittämisen. Työstä saaduilla tuloksilla voidaan lyhentää tuotantoon kuluva aikaa, kun ei tarvitse ennen jrsintää tehdä aikaa vieviä testijrsintöjä oikeiden lastuamisarvojen löytymiseksi. Tarvittaessa saadaan valittua kullekin työstötavalle helposti oikeat arvot lastuamisarvosuosituksista. Kuvassa 16 nähdään, mistä oikeat lastuamisarvot koostuvat ja mitä täytyy ottaa huomioon niitä tutkittaessa.



Kuva 16. Viitekehys tutkimukselle.

5.2 Tutkimuksen vaiheet ja suoritus

Tutkimus aloitettiin suunnittelemalla, millaisia jyrsintätestejä on tehtävä, että oikeat lastuamisarvot löytyisivät. Puuta jyrsittäessä täytyy ottaa huomioon, että puun materiaalitekniset ominaisuudet voivat muuttavat samassakin työstökappaleessa. Puuta jyrsittäessä lastuamissuunnalla on merkittävä vaikutus työstöarvoihin. Tämän takia jyrsintöjä oli tehtävä eri lastuamissuunnista. Ensimmäiset testit suoritettiin myötä- ja poikkisyin. Jokaiseen jyrsittävään testikappaleeseen tuli niin monta uraa kuin kappaleeseen oli mahdollista tehdä.

5.2.1 Numo 5.0 NC -jyrsinkonetestit

Ensimmäinen vaihe oli suunnitella Pro/Engineer -ohjelmalla tarvittavat työstöradat. Pro Engineerin Manufacturing (NC Assembly)-toiminnolla luotiin työstöradat testattaville kappaleille ja voitiin määrittää työstöarvoja, kuten syöttönopeus, jyrsimen pyörimisnopeus ja jyrsintäsyvyys.

Tutkimuksessa tehtiin ensin jyrsintätestejä Numo 5.0 NC -jyrsimellä, ja hyvien lastuamisarvojen löydyttyä siirryttiin tekemään jyrsintestit ABB 140 IRB -robotilla käyttäen hyväksi Numo 5.0 NC -jyrsimellä saatuja testituloksia. Suurin osa jyrsintesteistä tapahtui Numo 5.0 NC -jyrsimellä.

Numo 5.0 NC -jyrsinkone on kolmeakselinen ja se koostuu ISEL -automaatiikasta. Jyrsinkaran maksimikierto nopeus on 15000 r/min. Jälkeenpäin jyrsinkoneelle on asennettu taajuusmuuntajalla ohjattava moottori, joka on aiempaa tehokkaampi. Jyrsinkaraan voidaan jyrinistukan avulla asentaa erilaisia jyrsinteriä. Jyrsinkoneen ohjauksen muodostavat PC-tietokone ja Primcam-ohjelmisto. Jyrsinkone ymmärtää standardin mukaista NC-ohjelmaa.

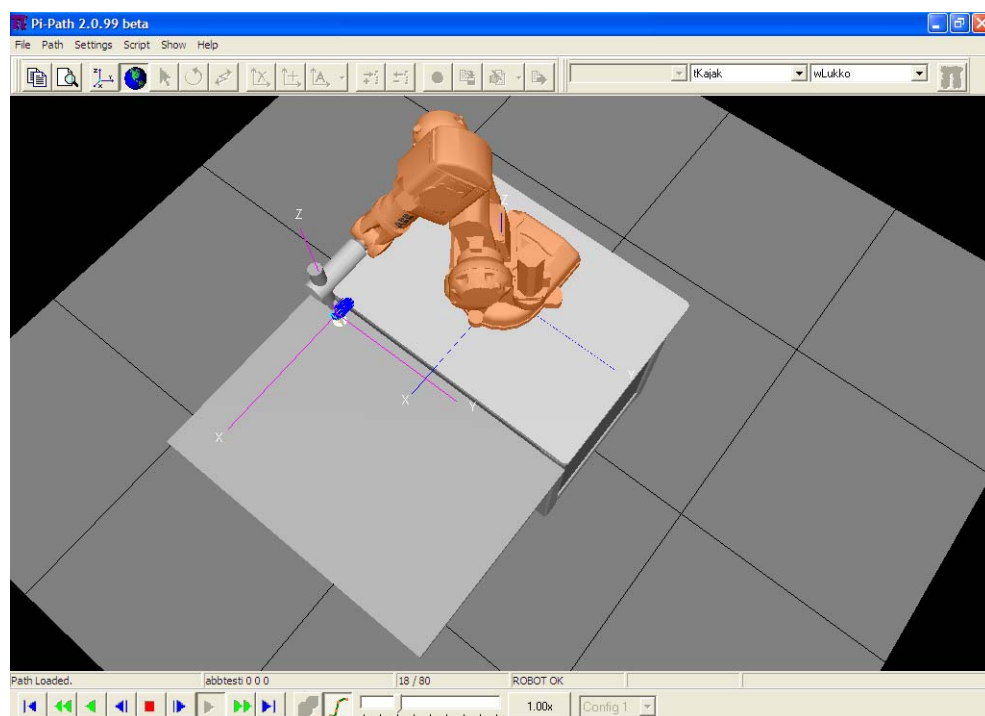
5.2.2 ABB 140 IRB -robotin jyrsintätestit

Numo 5.0 NC -jyrsinkoneella suoritettujen jyrsintöjen jälkeen testien tekeminen jatkui ABB 140 IRB -robotilla.

Robotilla testattiin Numo 5.0 NC -jyrsinkoneella saatuja lastuamisarvoja. Tutkimuksessa selvitettiin miten robotin ominaisuudet vaikuttavat työstöarvoihin ja mikä on esimerkiksi tämän vaikutus työstötulokseen. ABB 140 IRB -robotilla voidaan suorittaa testejä vain, kun karan pyörimisnopeus on 15000 r/min, koska paineilmalla toimivaa Mannesmann Demag

ES 170 ZG -jyrsinkaraa voidaan käyttää vain tällä pyörimisnopeudella. Tietysti pyörimisnopeutta voidaan säätää pyörimisnopeutta kuristamalla virtausta, mutta silloin ei hallita tarkkaan kierroslukua ja tehosta menetetään osa.

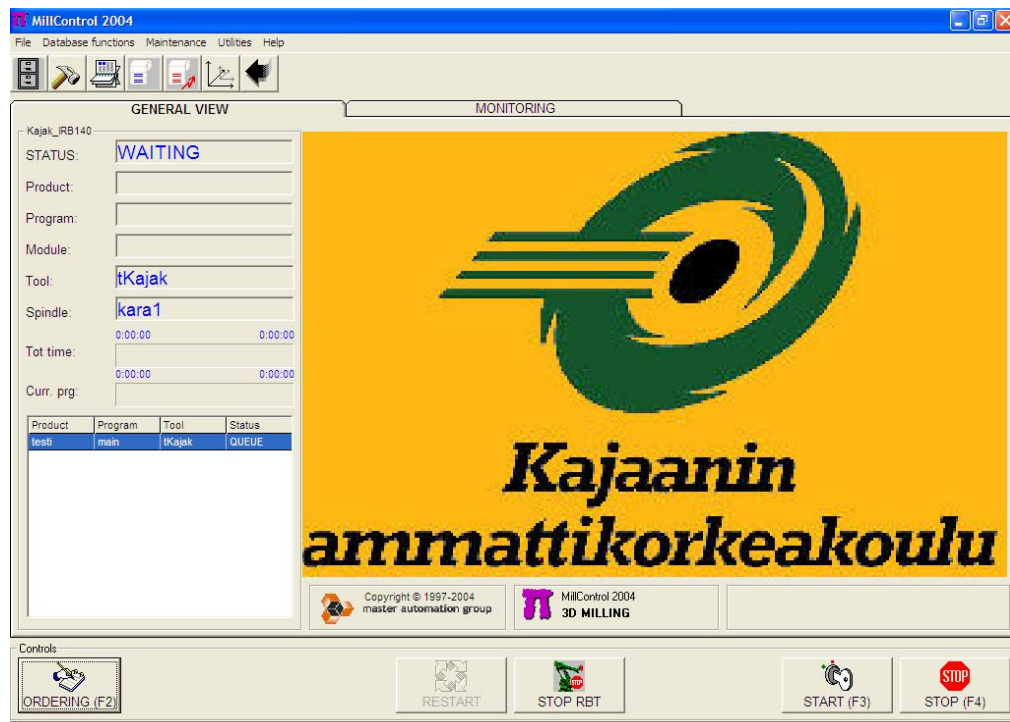
Työstöratojen siirtäminen robotille tapahtuu käyttämällä Pi-Path- ja MillControl-ohjelmia. Pi-Path-ohjelma on suunniteltu robottien offline-ohjelmointiin. Se soveltuu erinomaisesti muun muassa jyrsintäsovelluksiin. Ohjelma kääntää esimerkiksi Pro/Engineerissä tehdyt APT -työstöradat robotin ohjelmaksi. APT -tiedostot sisältävät työstöradan kolme- ja viisi akselisille NC -koneille. Pi-Path kääntää APT -tiedoston työstöradat kuusiakselisiksi. Pi-path-ohjelmalla voidaan simuloida työstöradat, ja nähdään heti pystyykö robotti suoriutumaan työstöradasta. Pi-Path-ohjelmalla pystytään määrittelemään robotille myös työstöarvoja. Ohjelmaan voi myös tuoda mallinnetun kappaleen STL -tiedostona, mikä helpottaa simulointia. Kun työstörata on todettu toimivaksi, se tallennetaan Pi-Path-ohjelmalla robotin ymmärtämään muotoon. Kuvassa 17 Pi-Path suorittaa työstöradan simulointia.



Kuva 17. Pi-Path-ohjelman mukaista simulointia kuvaruudulla.

MillControl-ohjelmalla valvotaan ja ohjataan robotilla tehtävien työstöratojen suoritusta. Pi-Path-ohjelmalla tehdyt työstöradat siirretään MillControliin. MillControl siirtää ohjelman robotille ja sillä valvotaan robottia sen työskennellessä. MillControllilla hallitaan myös työkalu-

dataa ja sillä pystytään määrittelemään robotille työjonoja. Kuvassa 18 on auki MillControl-ohjelman General View-ikkuna.



Kuva 18. MillControl-ohjelman General View-näkymä kuvaruudulla.

5.3 Tutkimuksen rajaus

Tutkimus rajattiin koskemaan tiettyjä varioitavia työstöarvoja. Ilman rajausta työn testausosuus olisi kasvanut liian suureksi. Näitä työstöarvoja varioimalla saadaan selville paljon tietoa puun jyrsimisen lastuamisarvoista.

Puulajeina tutkimuksessa käytettiin mäntyä ja koivua. Valintaperusteina on se, että molemmat puut ovat Suomessa erittäin yleisesti käytössä sekä perusominaisuuksiltaan hyvin erilaisia. Koivu on lehtipuuna kovempaa materiaalia ja mänty havupuuna huomattavasti pehmeämpää. Tutkimuksessa saadaan selville, miten puun kovuus vaikuttaa lastuamisarvoihin ja onko sillä väliä robotilla jyrsittäessä.

Jyrsiminä käytetään pikateräksisiä lieriöjyrsimiä, joiden halkaisijat ovat 8 mm ja 10 mm. Lastuamissyvyudet rajataan molemmilla jyrsimillä halkaisijan ja puolen halkaisijan syvyyteen, eli 8 mm:n jyrsin terällä lastuamissyvyys on 8 mm ja 4 mm sekä vastaavasti 10 mm:n jyrsimellä 10 mm ja 5 mm.

Karan pyörimisnopeudet ovat Numo 5.0 NC -jyrsinkoneella jysittäessä 15000, 10000, 7500 r/mm. ABB 140 -robotissa oleva Mannesmann Demag ES 170 ZG -jyrsinkara pyörii tarvittavan paineen saadessaan 15000 kierrosta minuutissa. Numo 5.0 NC -jyrsimen tuloksista voidaan ainoastaan verrata karan pyörimisnopeutta 15000 r/min ABB 140 IRB -robotin vastaaviin.

Syöttöarvoiksi valittiin alkutestien perusteella molemmille puille hiukan erilaisia työstöarvoja, johtuen materiaalieroista. Männylle valittiin yhdeksän ja koivulle kaksitoista eri syöttöarvoa. Testattavat lastuamissuunnat ovat myötäsyin, eli jysintä tapahtuu syiden suuntaisesti, ja poikkisyin, eli jysintä tapahtuu 90°:n kulmassa puun syiden suuntaan nähden. Lisäksi tutkitaan kaarevalle työstölle lastuamisarvoja.

Jyrsinterien kulumista testataan testien lopuksi vaihtamalla uusi jyrsinterä ja suoritetaan hyvillä lastuamisarvoilla testit uudelleen. Näin nähdään, onko terän kulumisesta johtuvia eroja pinnanlaaduissa.

6 TUTKIMUSTULOKSET

6.1 Numo 5.0 NC -jyrsinkonetestit

Ensimmäiset testit tehtiin Numo 5.0 NC -jyrsinkoneella. Ensimmäinen jyrsittävä puumateriaali oli koivu, jota jyrsittiin ensin halkaisijaltaan 10 mm:n ja sitten 8 mm:n jyrsimellä. Seuraavaksi jyrsittiin männylle vastaavat testit.

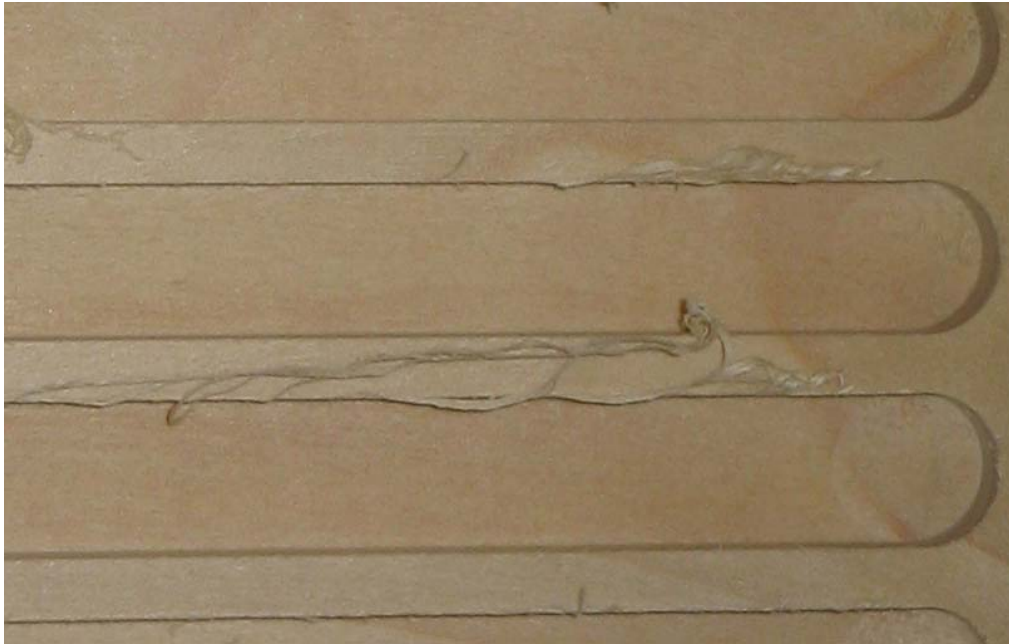
6.1.1 Koivu

Koivun nukkaantuminen ei vaihtelee halkaisijaltaan 10 mm:n jyrsimellä paljon karan pyörimisnopeuden ja lastuamissyvyyden mukana. Myötäsyin jyrsittäessä vähiten nukkaantumista ilmenee syöttöarvoilla 600–1200 mm/min. Lastuamissyvyyden muuttuessa syvemmäksi nukkaantumista tapahtuu 200–400 mm/min pienemmällä syöttöarvolla kuin matalampaa uraa jyrsittäessä. Suurin poikkeama nukkaantumisarvoissa on 10 mm:n lastuamissyvyyteen jyrsittäessä ja karan pyörimisnopeuden ollessa 15000 r/min. Silloin nukkaantumista tapahtuu vähiten jo 300 mm/min syöttönopeudella.

Poikkisyin jyrsittäessä nukkaantumista tapahtuu vähemmän kuin myötäsyin jyrsittäessä. Suuremmalla karan pyörimisnopeudella nukkaantuminen on vähäisintä pienemmällä syöttöarvoilla. Pienemmällä pyörimisnopeuksilla tarvitaan vastaavasti suurempia syöttönopeuksia nukkaantumisen estämiseksi. Poikkisyin erittäin nukkaantunutta pintaa syntyy vain aivan pienimmillä syöttöarvoilla.

Halkaisijaltaan 8 mm:n jyrsinterällä nukkaantuminen on vähäisin karan pyörimisnopeudesta riippumatta syöttöarvolla 600–1200 mm/min. Poikkisyin nukkaantuminen on vähäisin isoilla syöttöarvoilla. Nukkaantuminen häviää keskimäärin syöttönopeuden 1400 mm/min jälkeen. Lastuamissyvyydellä ei ole suurta merkitystä parhaisiin työstöarvoihin.

Tikkuuntuminen on kaikilla karan pyörimisnopeuksilla samankaltaista, ja terän halkisijan kokokaan ei vaikuta siihen millään tavalla. Työstösyvyyskään ei vaikuta tikkuuntumiseen merkittävästi. Myötäsyin jrsittäessä tikkuuntuminen on satunnaista pidempää katkeamatonta tikkua. Tikku on erittäin kierteistä, ohutta ja irtoaa todella helposti.



Kuva 19. Myötäsyin jrsittäessä tapahtuvaa pitkää, kierteistä ja ohutta tikkuuntumista.

Poikkisyin tikkuuntuminen on erittäin tiheää. Se on lähes karvamaista lyhyttä tikkua. Tikkujen pituus lyhenee mentäessä suurempiin syöttönopeuksiin. Paras tulos tikkuuntumisen suhteen saadaan suurimmilla syöttöarvoilla. Silloin tikun pituus on suunnilleen 1–2 mm. Pienimmillä syötöillä tikkujen pituus voi olla 6 mm.

Koivulla palamista esiintyi lähinnä poikkisyin jrsittäessä. Myötäsyin jrsittäessä palamista tapahtui vain karan pyöriessä 15000 r/min ja syöttönopeuden ollessa 200 mm/min. Tämäkin palaminen oli erittäin lievää.

Poikkisyin palamista tapahtui huomattavasti enemmän ja suuremmilla syöttönopeuksilla. Palaminen näkyi erittäin tummana jälkenä uran laidoilla. Pienimmillä syöttöarvoilla jrsittäessä palamisen huomasi jo jrsinnän aikana. Palamista ei kuitenkaan tapahtunut poikkisyinkään yli 600 mm/min syötöllä karan pyörimisnopeudesta riippumatta.

Terän halkaisijalla ei ollut suurta merkitystä palamiseen, vaan molemmilla jyrsinterillä saatiin samankaltaisia tuloksia. Lastuamissyvyys vaikutti palamiseen, mutta ei kovin paljon. Syvempää jyrsintää tehtäessä laitojen palamista jatkui 100–200 mm/min syöttönopeuden verran pidempään. Taulukkoon 4 on koottu testien parhaat tulokset jokaiselle karan pyörimisnopeudelle.

Taulukko 4. Koivutestien parhaat tulokset jokaiselle karanpyörimisnopeudelle

| Puumateriaali | Jyrsinkaran pyörimisnopeus | Jyrsinterän halkaisija | Lastuamissyvyys | Työstösuunta | Paras syöttönopeus (mm/min) |
|---------------|----------------------------|------------------------|-----------------|--------------|-----------------------------|
| Koivu | 15000r/min | 10mm | 10mm | Myötäsyin | 300 |
| | | | | Poikkisyin | 2000 |
| | | | 5mm | Myötäsyin | 600 |
| | | | | Poikkisyin | 1200 |
| | | 8mm | 8mm | Myötäsyin | 600-800 |
| | | | | Poikkisyin | 1800-2000 |
| | | | 4mm | Myötäsyin | 400 |
| | | | | Poikkisyin | 1200-1400 |

| | | | | | |
|-------|------------|------|------|------------|-----------|
| Koivu | 10000r/min | 10mm | 10mm | Myötäsyin | 300 |
| | | | | Poikkisyin | 1600-1800 |
| | | | 5mm | Myötäsyin | 1200-1600 |
| | | | | Poikkisyin | 1600-1800 |
| | | 8mm | 8mm | Myötäsyin | 600-800 |
| | | | | Poikkisyin | 1400 |
| | | | 4mm | Myötäsyin | 800-1000 |
| | | | | Poikkisyin | 1600 |

| | | | | | |
|-------|-----------|------|------|------------|------|
| Koivu | 7500r/min | 10mm | 10mm | Myötäsyin | 600 |
| | | | | Poikkisyin | 1600 |
| | | | 5mm | Myötäsyin | 600 |
| | | | | Poikkisyin | 1600 |
| | | 8mm | 8mm | Myötäsyin | 800 |
| | | | | Poikkisyin | 1800 |
| | | | 4mm | Myötäsyin | 800 |
| | | | | Poikkisyin | 1800 |

6.1.2 Mänty

Jyrsinkaran kierrosnopeudella on huomattavasti vaikutusta nukkaantumiseen mäntyä jyrsittäessä. Mitä isompi on pyörimisnopeus, sitä suuremmalla syöttöarvolla syntyy hyvää nukkaantumaton pintaa. Isoimmalla 15000 r/min pyörimisnopeudella nukkaantuminen on vähäisintä 2400 mm/min syöttönopeudella, kun 7500 r/min pyörimisnopeudella vähiten nukkaantumista on 800 mm/min syöttöarvoilla. Syöttönopeuksien ero on erittäin suuri.

Poikkisyin jyrsittäessä syöttöarvot eivät eroa paljoa myötäsyin jyrsityistä tuloksista. Nukkaantuminen on poikkisyin jyrsittäessä pienillä syöttöarvoilla erittäin runsasta ja pinnanlaatu on todella huonoa. Erot syöttöarvoissa vähäisimmän nukkaantumisen saamiseksi poikkisyin ja myötäsyin eroavat kaikilla karan pyörimisnopeuksilla vain 200–400 mm/min syöttöarvon verran.

Halkaisijaltaan 8 mm:n jyrsinterällä nukkaantumistulokset poikkeavat vain vähän 10 mm:n vastaavista tuloksista. Suurimmat erot jyrsimen halkaisijoiden välillä syntyvät 15000 r/min karan pyörimisnopeudella. Halkaisijaltaan 8 mm:n terällä vähiten nukkaantumista esiintyy yli puolet pienemmällä syöttönopeudella. Suuremmalla lastuamissyvyydellä täytyy syöttöarvoa laskea 200–400 mm/min verran. Muuten lastuamissyvyys ei vaikuta merkittävästi työstöarvoihin.

Karan pyörimisnopeuden ollessa 15000 r/min ja terän halkaisijan ollessa 10 mm myötäsyin jyrsittäessä tikkuuntuminen on lievää pitkää kierteistä tikkua, joka lähtee kevyesti irti jyrsitystä kappaleesta. Eniten pitkää tikkuuntumista tapahtuu 1200–2000 mm/min syötöillä, mutta muillakin satunnaisesti. Poikkisyin tikkuuntuminen on tiheää karvamaista tikkua, joka kuitenkin lyhenee mentäessä suurempiin syöttöarvoihin.

Tikkuuntuminen on samankaltaista kaikilla karanpyörimisnopeuksilla tehdyissä testeissä. Myötäsyin tikkuuntuminen oli vähäistä ja se oli kevyttä tikkua, joka oli vain kevyesti kiinni kappaleessa. Tällainen tikku saattoi olla neljäkin senttimetriä pitkä. Poikkisyin jyrsittäessä tikkuuntuminen oli erittäin tiheää kaikilla karanpyörimisnopeuksilla. Tikut olivat kuin lyhyttä karvaa jyrsityn uran ja työstettävän kappaleen pinnantasossa. Yleinen piirre oli myös se, että tikun ovat pidempiä pienemmillä syöttöarvoilla kuin suuremmilla. Tikkuuntuminen oli myös

samanlaista jysittiin sitten 5 mm:n tai 10 mm:n lastuamissyvyyteen sekä jysittäessä halkaisijaltaan 8 mm:n terällä.

Karan pyörimisnopeuden ollessa 15000 r/min ja terän halkaisija 10 mm palamista ei voi havaita myötäsyin 5 mm:n ja 10 mm:n lastuamissyvyyteen jysittäessä. Poikkisyin 5 mm:n ja 10 mm:n syvyyteen jysittäessä 300 mm/min syötöllä laidat ovat tummuneet pahasti. Palamisesta johtuvat tummumiset vähenevät tasaisesti 800 mm/min syöttöön asti. Tämän jälkeen palamista ei ole havaittavissa. Myötäsyin palamista ei ole havaittavissa myöskään karan pyörimisnopeuksilla 10000 ja 7500 r/min riippumatta työstösyvyydestä. Poikkisyin jysittäessä, karan pyörimisnopeuden ollessa 10000 r/min ja 5 mm:n lastuamissyvyyteen jysittäessä ei palamista tapahdu. 10 mm:n lastuamissyvyyteen jysittäessä palamista tapahtuu aina 600 mm/min syöttöön saakka. Palamista tapahtuu vain 300 mm/min syötöllä, kun karan pyörimisnopeus on 7500 kierrosta minuutissa molemmilla työstösyvyyksillä.

Alla olevasta taulukosta 5 nähdään kaikilla syöttöarvoilla, työstösyvyyksillä ja karanpyörimisnopeuksilla männylle tehtyjen testien parhaat tulokset. Taulukosta nähdään, että mäntyä lastuttaessa lastuamissyvyydellä ei ole suurta merkitystä vaan parhaat tulokset syntyvät samoilla syöttönopeuksilla kumpaankin lastuamissyvyyteen. Syöttöarvojen nopeudet putoavat samassa suhteessa kuin karan pyörimisnopeus. Suuremmalla pyörimisnopeudella on myös suuremmat syöttöarvot ja vastaavasti pienemmällä pyörimisarvolla hyvän pinnan laadun saa pienemmällä syöttönopeuksilla.

Taulukosta 5 huomataan, että työstösyvyydellä on enemmän merkitystä 8 mm:n kuin 10 mm:n halkaisijalla jysittäessä. Karan pyörimisnopeuden ollessa 15000 r/min poikkisyin jysittäessä tarvitaan lähes puolet kovempi syöttönopeus. 8 mm:n terällä ei pystytä huomamaan niin selkää syöttöarvojen putoamista karan pyörimisnopeuden suhteen kuin 10 mm:n terällä.

Taulukko 5. Mäntytestien parhaat tulokset

| Puumateriaali | Jyrsinkaran pyörimisnopeus | Jyrsinterän halkaisija | Lastuamissyvyys | Työstösuunta | Paras syöttönopeus (mm/min) |
|---------------|----------------------------|------------------------|-----------------|--------------|-----------------------------|
| Mänty | 15000r/min | 10mm | 10mm | Myötäsyin | 2400 |
| | | | | Poikkisyin | 2000 |
| | | | 5mm | Myötäsyin | 2400 |
| | | | | Poikkisyin | 2000 |
| | | 8mm | 8mm | Myötäsyin | 1000 |
| | | | | Poikkisyin | 2000 |
| | | | 4mm | Myötäsyin | 800-1000 |
| | | | | Poikkisyin | 1000-1200 |

| | | | | | |
|-------|------------|------|------|------------|------|
| Mänty | 10000r/min | 10mm | 10mm | Myötäsyin | 800 |
| | | | | Poikkisyin | 1000 |
| | | | 5mm | Myötäsyin | 1200 |
| | | | | Poikkisyin | 800 |
| | | 8mm | 8mm | Myötäsyin | 800 |
| | | | | Poikkisyin | 1200 |
| | | | 4mm | Myötäsyin | 1000 |
| | | | | Poikkisyin | 1000 |

| | | | | | |
|-------|-----------|------|------|------------|-----------|
| Mänty | 7500r/min | 10mm | 10mm | Myötäsyin | 800 |
| | | | | Poikkisyin | 800 |
| | | | 5mm | Myötäsyin | 800 |
| | | | | Poikkisyin | 800-1000 |
| | | 8mm | 8mm | Myötäsyin | 1000-1200 |
| | | | | Poikkisyin | 800 |
| | | | 4mm | Myötäsyin | 800 |
| | | | | Poikkisyin | 800 |

6.1.3 Kaarien lastuaminen

Testijyrsintöjä tehtiin myös kaareville lastuamissuunnille. Kaaria jyrsimällä saatiin selkeä kuva siitä, miten myötä- ja poikkisyin jyrsintä vaikuttavat pinnanlaatuun. Kuvassa 20 on kaareviksi jyrsittyjä uria, joista nähdään heti, millainen muutos tapahtuu, kun lastuamissuunta vaihtuu myötäsyin jyrsinnästä poikkisyin jyrsintään. Lastuamissuunnan vaihtumiskohdassa nähdään pitkää kaarevaa tikkua. Lastuamissuunnan ollessa poikkisyin näkyy selvästi lyhyttä tiheää tikkua ja myötäsyin tikkuuntumista ei ole paljon.



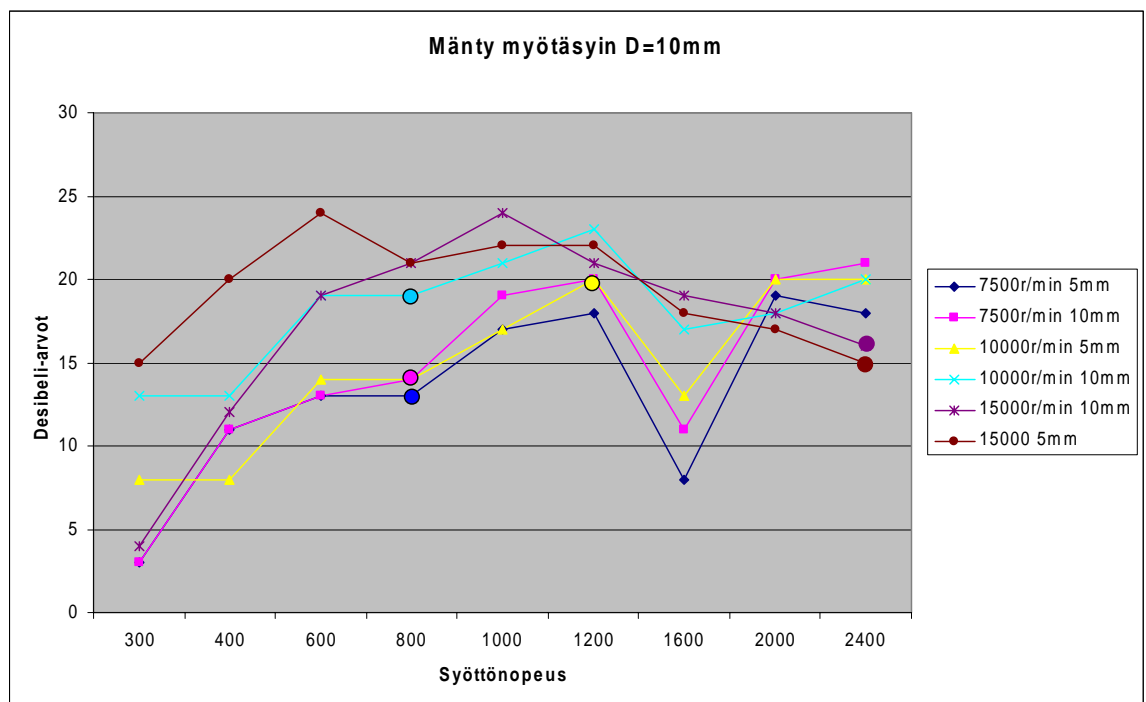
Kuva 20. Kaariuria on jyrsitty mäntyyn.

6.1.4 Äänenvoimakkuuden mittaukset

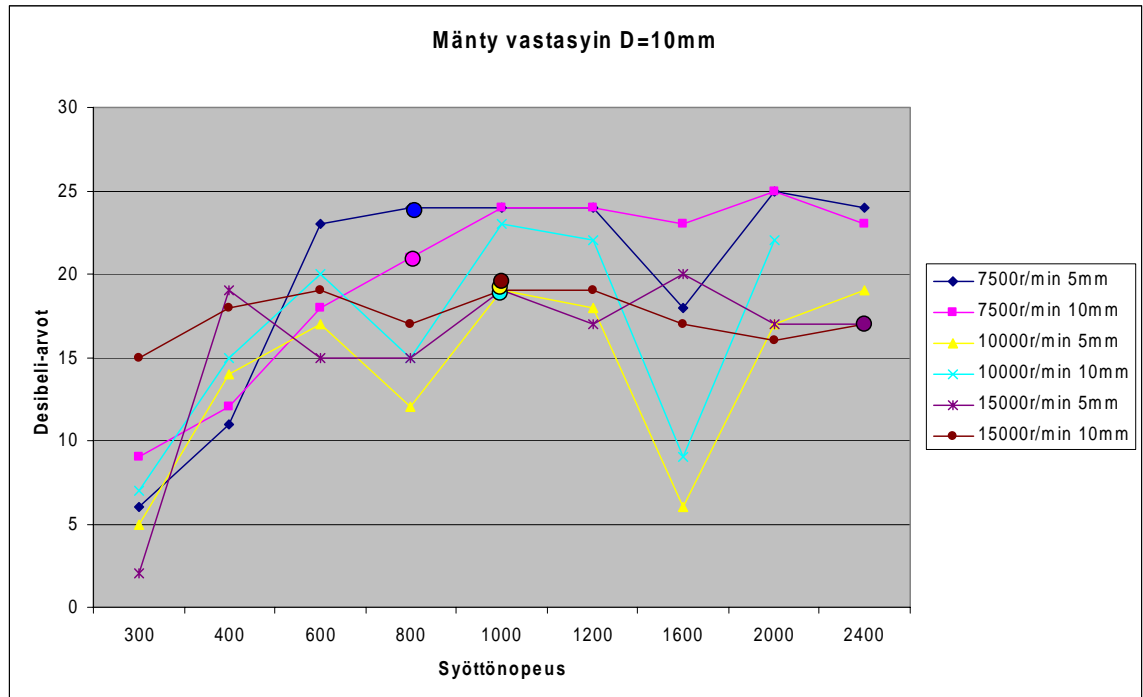
Äänenmittauksessa eliminoiditiin jyrsinkoneen synnyttämä ääni suorittamalla ensin jyrsintä ilmassa kaksi millimetriä työstettävän kappaleen yläpuolella ja sen jälkeen jyrsittiin testiura. Tuloksissa tutkitaan näiden kahden mitatun arvon erotusta. Lisäksi testissä tutkittiin pystytäänkö määrittelemään tiettyä desibelitasoa parhaille työstöarvoille.

Alla olevista kuvista nähdään mitattujen työstöarvojen äänenvoimakkuuseroja sekä arvot, joilla syntyivät parhaat tulokset. Kuvista voidaan tutkia, onko parhailla pinnalaatutuloksilla mitään yhteyttä työstöstä syntyvän äänen kanssa. Kuviin on merkitty parhaat pinnanlaadun tulokset samanvärisillä palloilla.

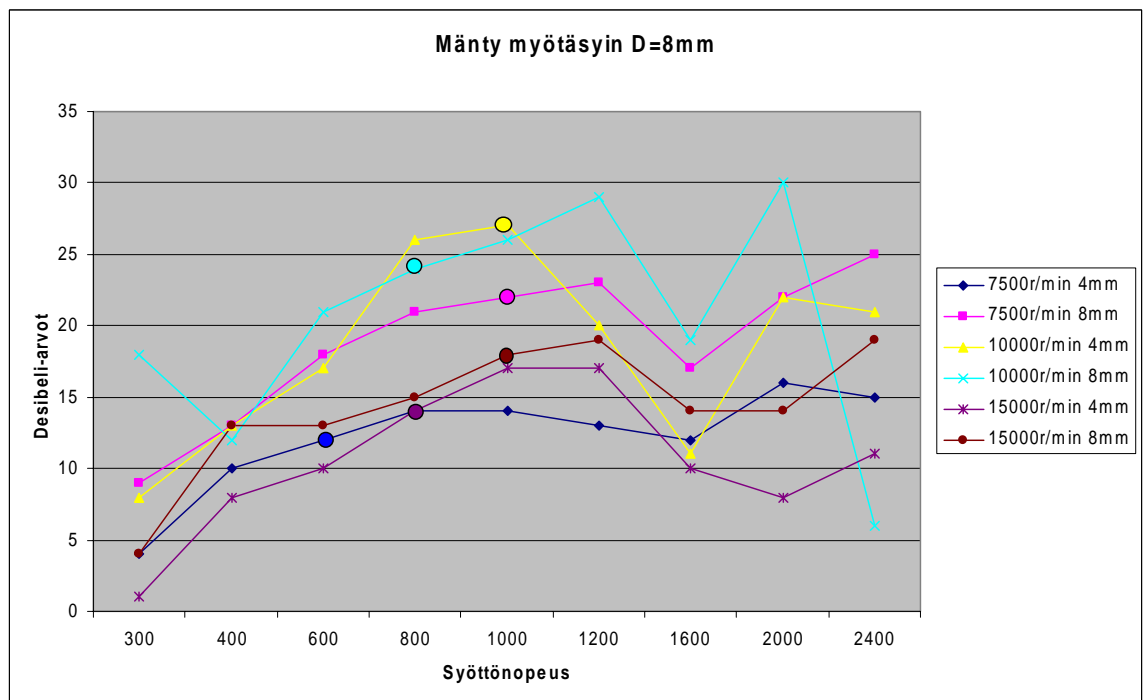
Mäntyä jrsittäessä työstöstä syntyvät äänet ovat suhteellisen samantasoisia. Kuvista 21 ja 22 voidaan nähdä, että työstösuunnalla on jonkin verran vaikutusta äänen voimakkuuteen jrsinnässä. Myötäsyin korkeimmat äänenvoimakkuudet syntyvät karan pyöriessä 15000 r/min ja poikkisyin vastaavasti 7500 r/min. Myötäsyin parhaat pinnanlaadut on saatu, kun testiajon ja jrsinnän ero oli 13–20 desibeliä. Poikkisyin jrsittäessä parhaiden pinnanlaatuojen kohdalla äänen voimakkuuksien ero oli 17–24 desibeliä.



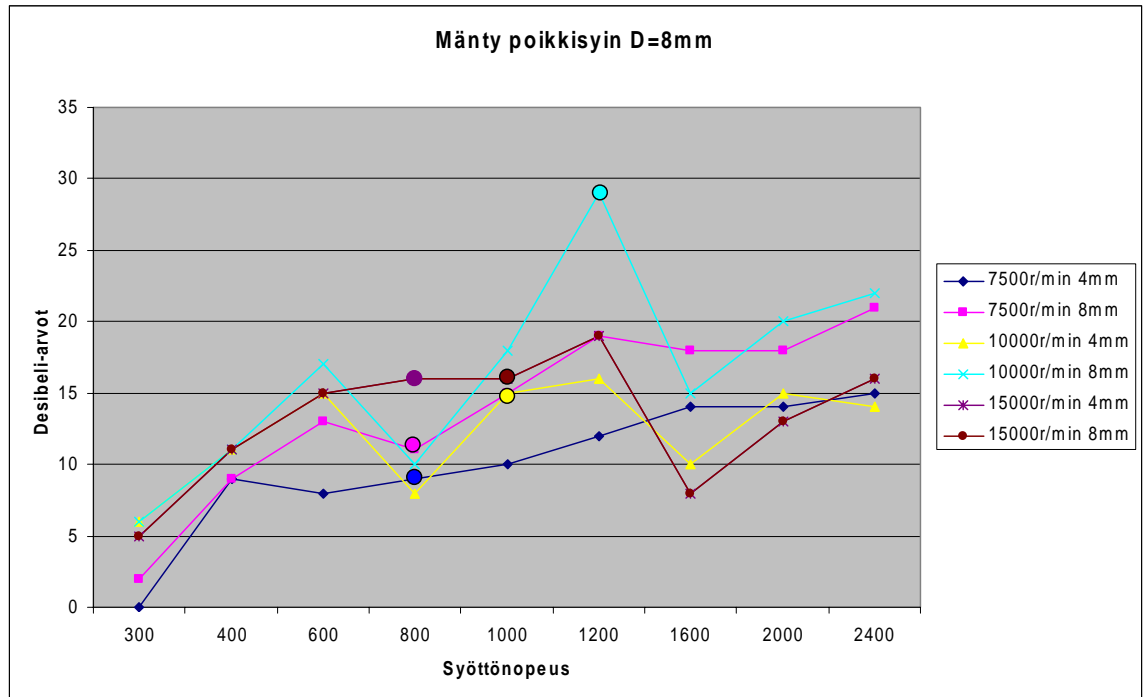
Kuva 21. Äänenvoimakkuustestien tuloksia männyn myötäsyin jrsinnässä halkaisijaltaan 10mm:n jrsimellä.



Kuva 22. Äänenvoimakkuustestien tuloksia männyn poikkisyin jyrinnässä halkaisijaltaan 10mm:n jyrsimellä.



Kuva 23. Äänenvoimakkuustestien tuloksia männyn myötäsyyin jyrinnässä halkaisijaltaan 8 mm:n jyrsimellä.



Kuva 24. Äänenvoimakkuustestien tuloksia männyn poikkisyyin jrsinnässä halkaisijaltaan 8 mm:n jrsimellä.

Halkaisijaltaan 8 mm:n jrsinterällä työstettäessä syntyvät keskimäärin suuremmat desibelli-arvot kuin vastasyin jrsittäessä. Vastasyin jrsittäessä parhaat pinnalaadut ja työstöäännet ovat suhteellisen lähellä toisiaan. Myötäsyin erot ovat huomattavasti suurempia.

Kaikilla työstöarvoilla mäntyyn jrsittäessä ominainen piirre on, että syöttönopeuden ollessa 1600 mm/min desibelitaso laskee alemmas. Tämä on selkeämmin havaittavissa myötäsyin jrsinnässä, mutta sen voi havaita tapahtuvan myös vastasyin.

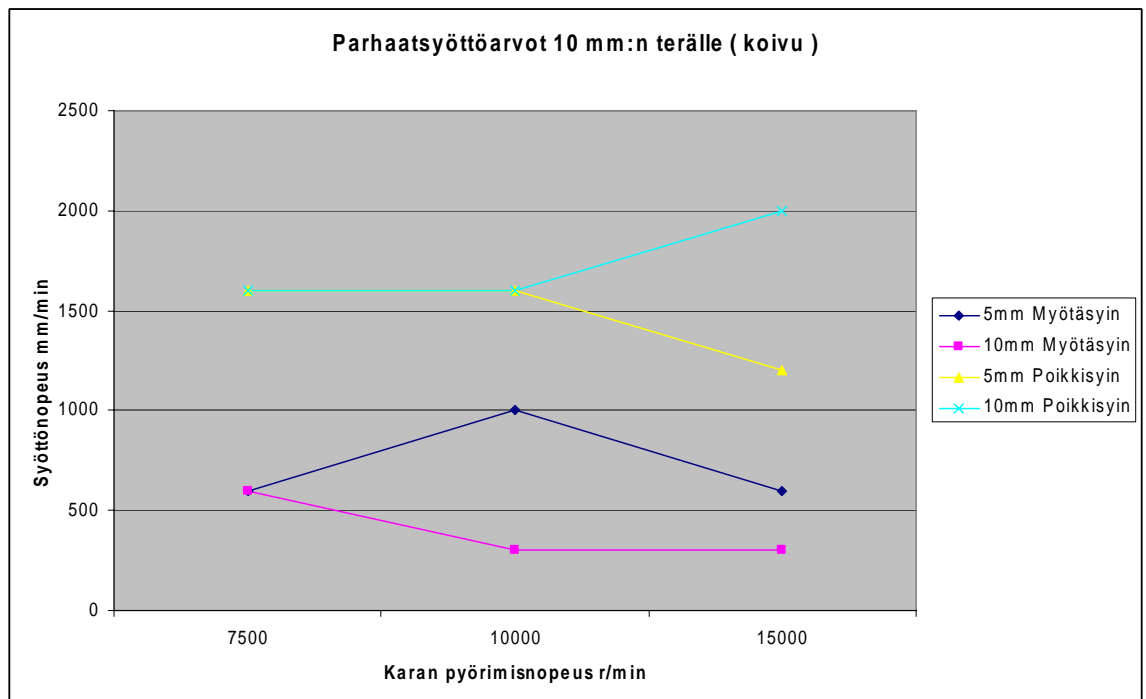
Koivun äänenvoimakkuustestien kuvat on esitetty liitteessä 1. Koivua jrsittäessä äänenvoimakkuudet vaihtelevat suuresti keskenään, eikä tuloksilla ole yhtä suurta samankaltaisuutta kuin männyn vastaavilla äänenvoimakkuuden tuloksilla.

6.1.5 Parhaat syöttöarvot eri karanpyörimisnopeuksille

Parhaista syöttönopeuksista tehdyistä kaaviokuvista nähdään selkeästi, millä jrsinkaran pyörimis- ja syöttönopeudella saadaan parhaat pinnanlaatu tulokset. Taulukoissa Y-akselilla ovat

syöttöarvot ja X-akselilla karan pyörimisnopeudet. Oikealla olevassa laatikossa ilmoitetaan ensimmäisenä työstösyvyys ja seuraavana syöttösuunta.

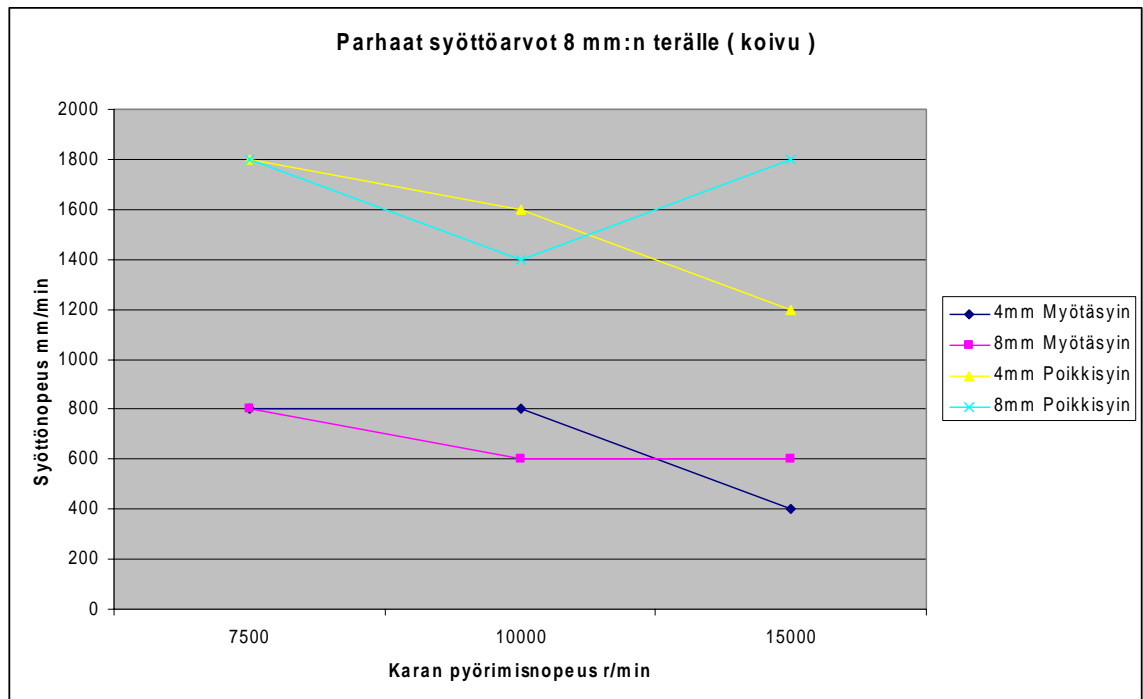
Kuvasta 25 nähdään ensimmäiseksi, että poikkisyin jrsinnässä tarvitaan reilusti isompi syöttönopeus kaikilla karanpyörimisnopeuksilla. Ero syöttönopeuksien välillä on todella iso, kun jrsitään 10 mm:n syvyyteen myötäsyyin ja poikkisyin, karan pyörimisnopeuden ollessa 15000 r/min syöttöero on 1700 mm/min. Viiden millimetrin syvyyteen jrsittäessä myötä- ja poikkisyin saadut tulokset ovat samanlaisia isoimmilla karan pyörimisnopeuksilla. Molemmissa syöttönopeudet laskevat pienemmiksi mentäessä karan pyörimisnopeudesta 10000 r/min pyörimisnopeuteen 15000 r/min samassa suhteessa.



Kuva 25. Parhaat syöttöarvot halkaisijaltaan 10 mm:n jrsimellä koivua jrsittäessä.

Myötä- ja poikkisyin jrsittäessä suurimmat erot työstösyvyyden suhteen ovat myötäsyyin työstettäessä, karan pyöriessä 10000 r/min, sekä vastasyin jrsittäessä karan pyöriessä 15000 r/min.

Kuvasta 26 nähdään, että saadut tulokset ovat suhteellisen samankaltaisia kuin halkaisijaltaan 10 mm:n varsijrsimellä jrsityt. Halkaisijaltaan 8 mm:n jrsimellä syöttöarvojen erot ovat suuria jrsittäessä myötä- tai poikkisyin. Syöttönopeuksissa ero on noin 1000 mm/min, kun jrsitään myötä- tai poikkisyin.

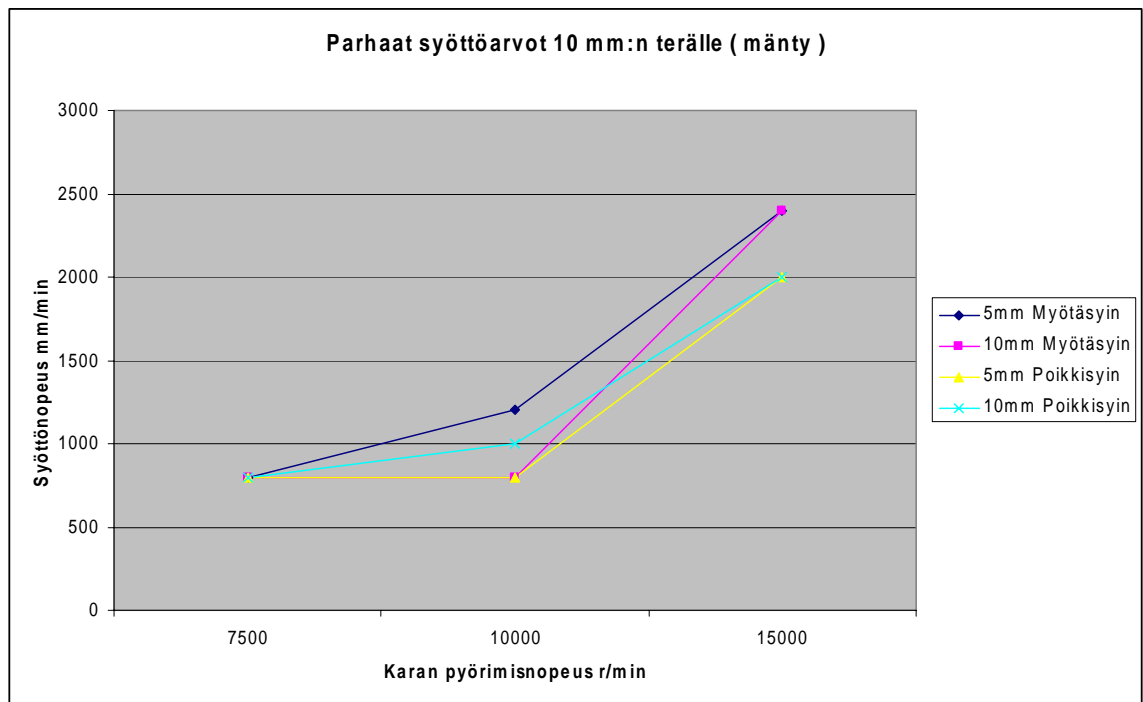


Kuva 26. Parhaat syöttöarvot halkaisijaltaan 8 mm:n jyrsimellä koivua jyrsettäessä.

Karan pyörimisnopeuden ollessa pienimmillään 7500 r/min ei eroja ole syöttönopeuden suhteen jyrsettäin sitten 10 mm:n tai 5 mm:n lastuamissyvyyteen. Poikkisyin parhaat tulokset syntyvät 1800 mm/min syötöllä ja myötäsyin 800 mm/min. 10000 r/min. Syöttönopeuksien erot työstösyvyyden muuttuessa ovat pieniä. Viiden millimetrin työstösyvyys tarvitsee sekä myötä- että poikkisyin työstettäessä noin 200 mm/min syöttönopeuden lisäyksen 10 mm:n työstösyvyyteen nähden.

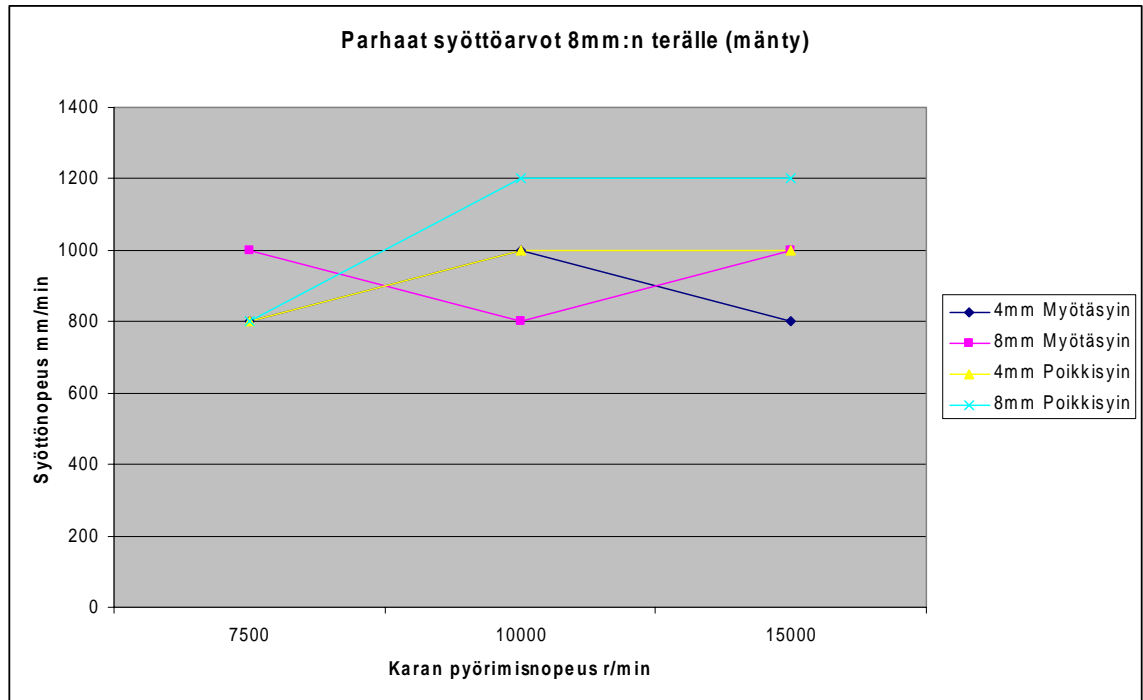
Suurimmat erot työstösyvyyden ja syöttönopeuden suhteen on karan pyöriessä 15000 r/min ja jyrsettäessä poikkisyin 10 mm:n syvyyteen. Poikkisyin jyrsettäessä tarvitaan huomattavasti isompi syöttönopeus hyvän pinnanlaadun aikaan saamiseksi.

Kuvasta 27 huomataan ensimmäiseksi, että mäntyä jyrsettäessä saadut tulokset ovat huomattavasti lähempänä toisiaan kuin koivua jyrsettäyt tulokset. Mäntyä jyrsettäessä pienimmällä karan pyörimisnopeudella 7500 r/min parhaat pinnan laadut saatiin kaikilla teränhalkaisijoilla ja työstösyvyyksillä 800 mm/min syötöillä. Karan pyörimisnopeuden kasvaessa erot kasvavat vain vähän. Isoimmalla karan pyörimisnopeudella 15000 r/min myötäsyin jyrsettäessä tarvitaan noin 400 mm/min syöttönopeuden lisäys verrattuna poikkisyin jyrsettäytyn.



Kuva 27. Parhaat syöttöarvot halkaisijaltaan 10mm:n jyrsinpäälle mäntyä jyrsittäessä.

Kuvasta 28 huomataan ensimmäiseksi, että syöttöarvot eivät kohoja työstösyvyydestä eikä syöttösuunnasta riippumatta niin korkeiksi kuin halkaisijaltaan 10 mm:n jyrsinpäällä työstettäessä. Suurimmat erot parhailla syöttönopeuksilla syntyvät suurimmilla jyrsinkaran pyörimisnopeuksilla, mutta erot ovat enimmillään 400 mm/min syöttönopeus.



Kuva 28. Parhaat syöttöarvot halkaisijaltaan 8 mm:n jyrsimellä mäntyä jyrsittäessä.

Testituloksista nähdään, että männylle tehdyt jyrsintätulokset ovat huomattavasti tasaisempia riippumatta työstösyvyydestä ja jyrsinkaran pyörimisnopeudesta. Koivulle tehdyistä jyrsinöistä huomattiin selvät erot syöttönopeuksissa, kun jyrsitään myötä- tai poikkisyin.

6.1.6 Terän kuluminen

Kuvassa 29 nähdään jysinterässä tapahtuneet muutokset poikki- ja myötäsyin tehtyjen jysintöjen jälkeen. Vasemmalla puolella kuvissa näkyy jysinnöissä käytetty jysinterä ja oikealla puolella vastaava täysin käyttämätön jysinterä. Molemmilla terillä on tapahtunut tummumista, joka johtuu liian korkeasta lämpötilasta työstön aikana.

Terien kulumisen vaikutus pinnanlaatuun testattiin suorittamalla uusilla jysinterillä jysintöjä, joissa käytettiin aikaisempien testitulosten parhaita arvoja ja verrattiin pinnanlaatuja keskenään. Tulosten vertailussa huomattiin, ettei huomattavaa eroa ollut pinnanlaaduissa. Eron huomaamiseksi tarvittaisiin paljon enemmän jysintätestejä, jotta voitaisiin päätellä tarkemmin jysinterien kulumisen vaikutus pinnanlaatuun.



Kuva 29. Terien kulumisen. Oikealla 10mm:n ja vasemmalla 8mm:n jysinterät.

6.2 ABB 140 IRB -jysintätetit

ABB 140 IRB -robotilla voitiin tehdä jysintätestejä karan pyörimisnopeudella 15000r/min. Syöttöarvoja robotilla pystyi valitsemaan ainoastaan 5 mm/s syöttönopeuden välein. Testeissä varioitiin neljää eri syöttönopeutta 5, 10, 20 ja 30mm/s. Syöttöarvot voidaan esittää myös muodossa eli 300, 600, 1200 ja 1800 mm/min. Ensimmäisenä testit tehtiin koivulle.

6.2.1 Koivu

Koivulle jrsintätestit aloitettiin halkaisijaltaan 10 mm:n jrsinterällä. Poikkisyin jrsittäessä 10mm lastuamissyvyyteen pinnanlaatutulokset olivat kaikilla syöttöarvoilla erittäin huonoja. Jrsityn uran pohjalla on robotin värinästä johtuvaa epätasaista pintaa.. Samasta syystä johtuen myös uran laidat olivat aaltomaiset. Kuvassa 30 näkyy erittäin hyvin, kuinka jrsityn uran laita on aaltomainen. 1200 mm/min syötöllä robotti ei pystynyt enää suorittamaan lastuamista 10 mm:n syvyyteen, koska robotin viidennelle akselille tuli liian suuri kuorma ja se pysäytti jrsinnän.



Kuva 30. Aaltomaista pintaa

Poikkisyin jrsittäessä viiden millimetrin lastuamissyvyyteen tulokset ovat parempia kuin 10 mm:n lastuamissyvyyteen. Silloin pinnalla on vähemmän uria, mutta lievää nukkaantumista on havaittavissa. Palamista ei tapahdu millään syötön arvolla ja tikkuuntumista on, mutta tikku erittäin lyhyttä.

Myötäsyin jrsinnän tulokset ovat parempia kuin poikkisyin jrsinnän. Myötäsyin voidaan käyttää suurempia syöttönopeuksia. Myötäsyin voidaan käyttää vielä 1200 mm/min syöttönopeutta, muttei isompaa. Pohjalla tapahtuu reilusti nukkaantumista 300 mm/min syötöllä. Parasta pinnanlaatua saadaan 600 mm/min syöttönopeudella, kun jrsitään 5 mm lastuamissyvyyteen. Pinnanlaatu huononee selvästi, kun lastutaan syvemmälle. Myötäsyin palamista eikä tikkuuntumista tapahdu ollenkaan.

6.2.2 Mänty

Poikkisyin jrsittäessä pinnalaatu on yleisesti erinomainen. 300 ja 600 mm/min syötöillä ilmenee vielä pientä nukkaantumista, mutta 1200 mm/min syötöillä ei nukkaantumista enää tapahdu lainkaan. Tikkuuntuminen on erittäin vähäistä ja palamista ei tapahdu millään syöttöarvoilla. Kuvasta 31 nähdään kuinka paljon tasaisempi on jrsinnän tulos männyllä kuin koivulla.

Myötäsyin pinnanlaatu on huomattavasti huonompaa. Jrsittyjen urien pinnalla on robotin tärinästä johtuvia jrsinterän jättämiä jälkiä. Urien laidat ovat aaltomaisia. Tikkuuntumista eikä palamista ei esiintynyt myötäsyin jrsittäessä. Mäntyä jrsittäessä lastuamissyvyydellä ei ole suurta merkitystä syöttöarvoihin. Hyvä pinnanlaatu syntyy samalla syöttöarvolla vielä 10 mm:n lastuamissyvyyteenkin. Suurin muutos NC -jrsinkone testeihin on tikkuuntumisen pituus poikkisyin jrsittäessä. Robotilla jrsityissä urissa tikku on kaikilla syöttönopeuksilla todella lyhyttä.



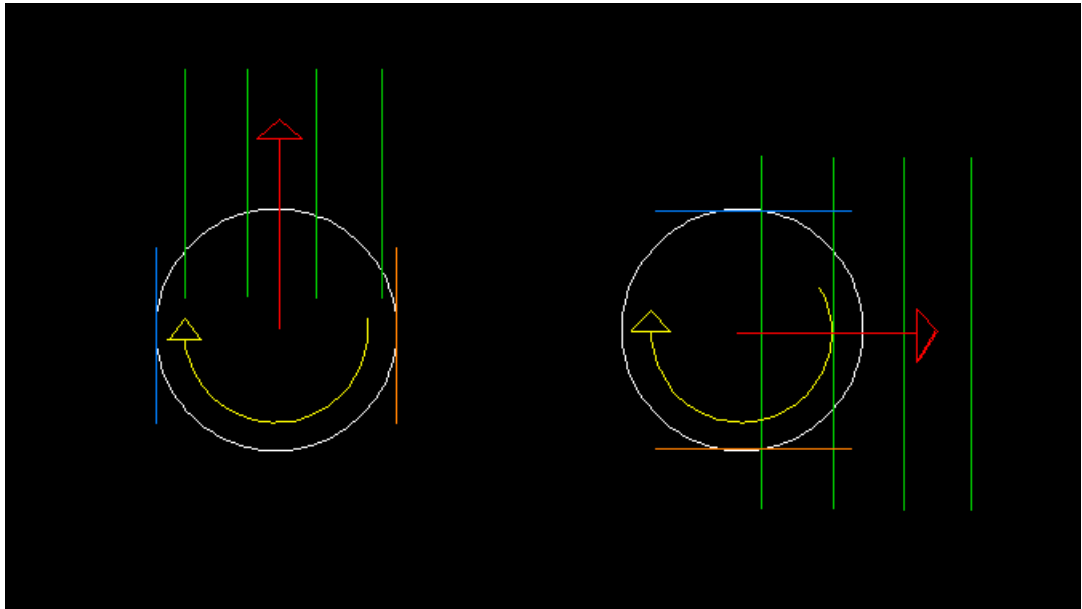
Kuva 31. Robotilla poikkisyin jrsittyjä uria männyyn.

7 TULOSTEN TARKASTELU JA TYÖSTÖARVOSUOSITUKSET

7.1 Tulosten tarkastelu NC -jyrsinkoneella tehdyille jyrsinnöille

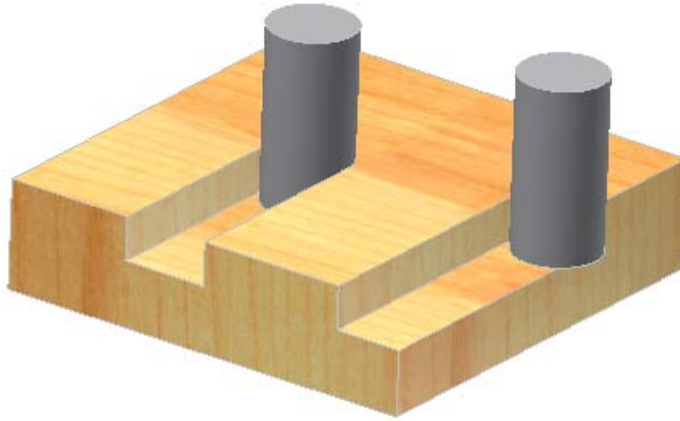
Kuva 32 selkeyttää työstösuuntia tulosten tarkastelun kannalta. Valkoinen ympyrä on jyrsin, keltainen kaari ilmoittaa jyrsimen pyörimissuunnan, punainen nuoli kertoo jyrsimen syöttösuunnan ja vihreät viivat kertovat puun syiden suunnan. Opinnäytetyössä käytettiin myötäsyrin jyrsintä nimeä, kun lastuaminen tapahtuu syiden suuntaisesti ja poikkisyin jyrsintää, kun työ tapahtuu kohtisuorassa syihin nähden. Myötäsyrin jyrsintää parempi nimi olisi ollut syynsuuntainen jyrsintä, tällöin ei olisi ollut mahdollisuutta sekoittaa sitä myötäpuolella tapahtuvaan jyrsintään. Kuvassa 32 myötäjyrsintä tapahtuu sinisen viivan puolella ja vastajyrsintä tapahtuu oranssin viivan puolella.

Tikun syntymiseen vaikuttaa syynsuuntaisena jyrsittäessä tapahtuuko lastuamien myötäjyrsintänä vai vastajyrsintänä. Myötäjyrsinnässä jyrsin painaa tikkoa vasten työstökappaletta, kun taas vastajyrsinnässä jyrsin nostaa tikkoa pystyyn. Poikkisyin jyrsittäessä ei vaikuta, niin selvästi onko kyseessä myötä- vai vastajyrsintä, sillä tikkuja syntyy uran molemmille puolille, kun lastuttaessa syyt katkeavat.



Kuva 32. Testeissä käytettyjä työstösuuntia. Vasemmalla syynsuuntainen ja oikealla poikkisyin.

Kaikki jyrsintätestit tehtiin urajyrsintänä. Toinen mahdollisuus olisi tehdä testi reunan jyrsintänä, jolloin olisi enemmän merkitystä onko käytössä myötä- vai vastajyrsintä. Kuvassa 33 on esitetty uran ja reunan jyrsintä.



Kuva 33. Vasemmalle uran ja oikealla reunan jyrsintää

7.1.1 Koivu

Koivua jyrsittäessä huomataan selkeämmin syöttönopeuden vaatimat muutokset, kun jyrsitään myötä- tai poikkisyin. Koivulla saaduilla tuloksilla palaminen ei ole iso ongelma, sillä palamista tapahtuessa myös muut mitatut arvot ovat huonoja eli palamisen aiheuttamien tummumien lisäksi näillä syöttöarvoilla on yleensä erittäin suurta nukkaantumista ja tikkuuntumista.

Koivulle parhaiden työstöarvojen valinta riippuu paljon työstön tarkoituksesta. Mikäli tarkoitus on ensin rouhia, ja sen jälkeen vielä samalla tai toisella jyrsimellä siistiä lopputulosta, niin ei nukkaantumisesta tarvitse välittää työstöarvoja määriteltäessä. Jos jyrsinnässä pyritään heti hyvään pinnanlaatuun ja lopputulokseen on nukkaantuminen otettava huomioon.

Tikkuuntuminen on ennen kaikkea ongelmana, kun tehdään urajyrsintöjä, missä terä uppoaa materiaaliin koko halkaisijaltaan. Siitä ei ole niin suurta haittaa, kun jyrsitään reunajyrsintöjä, jolloin ei jää jäljelle seinämiä, joiden yläreunoilla tikkuuntumista esiintyy lähinnä poikkijyrsin-

nässä. Tikkuuntuminen on hankala poistaa joutumatta hiomaan tai pyöristämään kappaleen kulmia. Myötäsyin jyrättäessä tikkuuntuminen on vähäisempää ja vain kevyesti kiinni jyrätyn uran laidoilla eli huomattavasti helpommin poistettavissa kappaletta vaurioittamatta.

Poikkisyin voidaan käyttää huomattavasti kovempia syöttönopeuksia, jolloin työstöaika lyhenee ja tuotanto aika lyhenee. Poikkisyin ongelmia aiheuttavat juuri umpijyrättäessä tikkuuntuminen. Nukkaantumista ilmenee poikkisyin jyrättäessä jonkin verran enemmän kuin myötäsyin jyrättäessä. Tämä pitää ottaa huomioon, jos halutaan jyrättäessä heti parasta mahdollista pinnanlaatua.

Parhaan laadun saavuttamiseksi ensimmäisellä jyrättäällä kannattaa käyttää ehdottomasti myötäsyin jyrättä. Myötäsyin jyrättäen parhaat syöttöarvot ovat huomattavasti vastasyin jyrättäen pienempiä, mutta työstön tuloksena syntyvä pinnanlaatu on oikeilla syöttöarvoilla erittäin hyvää.

Mikäli kriteerinä pidetään tehokasta lastunpoistoa eikä pinnanlaadulla ole niin suurta merkitystä, on poikkisyin jyrättä parempi vaihtoehto.

7.1.2 Mänty

Mäntyä työstettäessä ei ole läheskään yhtä selkeää muutosta hyvien syöttöarvojen välillä, kun jyrättäen myötä- tai poikkisyin. Samoin kuin koivulla palamisesta johtuva tummuminen ei muodostu ongelmaksi. Yleisesti tummumisen esiintyessä oli nukkaantuminen ja tikkuuntuminenkin erittäin runsasta.

Männylle parhaiden työstöarvojen löytyminen oli vaikeampaa kuin koivulle, sillä mäntyä jyrättäessä se käyttäytyi monilla syöttö ja karan pyörimisnopeuksilla suhteellisen samantyyppisesti. Männylle parhaat työstöarvot riippuvat työstön tarkoituksesta eli onko tarkoitus jyrättä suoraan valmista pintaa vai jälkikäteen vielä tehdä viimeistelyä samalla tai toisilla jyrättimillä.

Parhaat pinnanlaadut syntyvät yleisesti jyrättäessä myötäsyin, mutta oikeilla lastuamisarvoilla poikkisyinkin jyrättä pinta on erittäin siistiä. Poikkisyin uran pohjan laidalla on useilla arvoilla erittäin lievää nukkaa havaittavissa.

Tikkuuntuminen muodostuu ongelmaksi vain poikkisyin jyrittäessä, sillä myötäsyin tikkuuntuminen on ohutta ja helposti sormin poistettavissa. Poikkisyin tikkuuntumisen poistaminen ei onnistu ilman kappaleen laidan pyöristämistä. Tikkuuntuminen on ongelma lähinnä, kun jyrityään urajyrsintöjä.

Mäntyä jyrittäessä on työstötehokkuuden kannalta hyvä käyttää suurempaa karan pyörimisnopeutta, sillä silloin voi käyttää myös isompia syöttöarvoja. Näin saadaan työstöaika lyhenemään. Testien perusteella paras pinnanlaatu syntyy kuitenkin karan pyöriessä 7500 r/min, mutta tällöin joudutaan käyttämään yli 1000 mm/min pienempää syöttönopeutta.

Työstösyvyydellä ei ole merkittävää vaikutusta syöttöarvoihin. 10 mm:iin ja 8 mm:iin työstettäessä syöttöarvot ovat vain vähän suurempia, mutta ero ei ole merkittävä.

Männyllä hyvissä syöttöarvoissa ei ole selkeää eroa myötä- ja poikkisyin jyrittäessä. Koivulla tämä ero on helposti havaittavissa. Männyllä parhaat syöttöarvot nousevat korkeimmiksi mentäessä isompiin karan pyörimisnopeuksiin.

7.2 Lastuamisarvosuositukset koivulle NC -jyrsinkonetestien perusteella

Kun rouhinnassa halutaan laadukasta pintaa, on ehdottomasti valittava myötäsyin jyrintä, koska silloin ei esiinny tikkuuntumista ja pinnanlaatu on yleisesti ottaen siistimpää kuin poikkisyin jyrittäessä. Rouhinnassa, jossa nukkaantuminen ei tuota ongelmia vaan jyrinnän jälkeen tehdään esimerkiksi viimeistely jyrintöjä, kannattaa edelleen käyttää myötäsyin jyrintää, mutta syöttönopeutta voidaan nostaa merkittävästi.

Tehtäessä reunajyrsintöjä, kun tikkuuntuminen ei ole ongelma, kannattaa työstösuunta vaihtaa poikkisyin. Tällöin pystytään nostamaan huomattavasti syöttöarvoja ja tehostamaan jyrinnän nopeutta. On tilanteita, joissa halutaan suhteellisen hyvä pinnanlaatu, mutta pääpaino on nopeassa lastunpoistossa. Tällöin voidaan nopeus nostaa poikkisyin jyrinnöissä, jopa yli 2000 mm/min. Taulukoissa 6 ja 7 on esitetty eri jyrintätavoille suosituslastuamisarvoja koivun jyrintään.

Taulukko 6. Syöttöarvosuositukset koivulle NUMO 5.0 NC -jyrsintätjestien perusteella, halkaisijaltaan 10 mm:n jyrsimellä.

| Koivu | Jyrsinterän halkaisija 10mm | | |
|---|--|--|---|
| | Suositeltavat työstöarvot | | |
| Työhön parhaiten soveltuva jyrsintätapa | Jyrsintäsuunta (Myötäsyin vai poikkisyin) | Karan pyörimisnopeus (r/min) | Syöttönopeus |
| Halutaan ensimmäisellä jyrsinnällä hyvä pinnanlaatu. | Valitaan myötäsyin jyrsintä. | 15000 r/min lastuamissyvyydellä ei ole merkitystä. | 5 mm lastuamissyvyydelle 600 mm/min. |
| | | | 10 mm lastuamissyvyydelle 300 mm/min. |
| Jyrsintä viimeistellään toisella jyrsinnällä, jolloin nukkaantumisen ei ole ongelma. | Valitaan myötäsyin jyrsintä. | 15000 r/min lastuamissyvyydellä ei ole merkitystä. | 1000–1200 mm/min lastuamissyvyydestä riippumatta. |
| Esimerkiksi tehtäessä avojyrsintää, jolloin tikkuuntumisesta ei muodostu ongelmaa. Halutaan kuitenkin hyvä pinnanlaatu. | Valitaan poikkisyin jyrsintä. | 10000 r/min lastuamissyvyydellä ei ole merkitystä. | 1600 mm/min lastuamissyvyydestä riippumatta. |
| Pinnanlaadulla ei väliä, vaan lastunpoisto tehokkuudella. | Valitaan poikkisyin jyrsintä. | 15000 r/min lastuamissyvyydellä ei ole merkitystä. | 2000 mm/min lastuamissyvyydestä riippumatta. |

Taulukko 7. Syöttöarvosuositukset koivulle Numo 5.0 NC -jyrsintätjestien perusteella, halkaisijaltaan 8 mm:n jyrsimellä.

| | | | |
|---|--|--|---|
| Koivu | Jyrsinterän halkaisija 8mm | | |
| | Suositeltavat työstöarvot | | |
| Työhön parhaiten soveltuva jyrsintätapa | Jyrsintäsuunta (Myötäsyin vai poikkisyin) | Karan pyörimisnopeus (r/min) | Syöttönopeus |
| Halutaan ensimmäisellä jyrsinnällä hyvä pinnanlaatu. | Valitaan myötäsyin jyrsintä. | Lastuamissyvyys 4 mm 7500 r/min. | Lastuamissyvyys 4 mm 800 mm/min. |
| | | Lastuamissyvyys 8 mm 10000 r/min. | Lastuamissyvyys 8 mm 600 mm/min. |
| Jyrsintä viimeistellään toisella jyrsinnällä, jolloin nukkaantuminen ei ole ongelma. | Valitaan myötäsyin jyrsintä. | 15000 r/min lastuamissyvyydestä riippumatta. | 1400 mm/min lastuamissuunnasta riippumatta. |
| Esimerkiksi tehtäessä avojyrsintää, jolloin tikkuuntumisesta ei muodostu ongelmaa. Halutaan kuitenkin hyvä pinnanlaatu. | Valitaan poikkisyin jyrsintä. | 7500 r/min lastuamissyvyydestä riippumatta. | 1600-1800 mm/min lastuamissyvyydestä riippumatta. |

7.3 Lastuamisarvosuositukset männylle NC -jyrsinkonetestien perusteella

Männyllä kannattaa ehdottomasti käyttää myötäsyin jyrsintää, kun halutaan saada hyvälaatuista pintaa rouhittaessa. Myötäsyin jyrsitty pinta on tasalaatuisempaa kuin poikkisyin jyrsitty ja tikkuuntuminen on huomattavasti vähäisempää.

Mikäli nukkaantuminen ei ole jyrsittäessä huonontava kriteeri eli esimerkiksi rouhinnan jälkeen tehdään vielä viimeistelyjyrsintöjä, niin syöttöarvoja voidaan nostaa suuremmiksi. Reunajyrsinnöissä, joissa tikkuuntuminen ei ole vaikuttava kriteeri, voidaan kierrosluku nostaa vieläkin korkeammaksi ja syöttönopeus 2000 mm/min. Taulukoissa 8 ja 9 on esitetty suosituslastuamisarvoja männyn jyrsintään.

Taulukko 8. Syöttöarvosuositukset männylle Numo 5.0 NC -jyrsintätjestien perusteella, halkaisijaltaan 10 mm:n jyrsimellä.

| | | | |
|--|--|---|---|
| Mänty | Jyrsinterän halkaisija 10mm | | |
| | Suositeltavat työstöarvot | | |
| Työhön parhaiten soveltuva jyrsintätapa | Jyrsintäsuunta (Myötäsyin vai poikkisyin) | Karan pyörimisnopeus (r/min) | Syöttönopeus |
| Halutaan ensimmäisellä jyrsinnällä hyvä pinnanlaatu. | Valitaan myötäsyin jyrsintä. | Lastuamissyvyys 5mm 10000r/min. | 1200mm/min |
| | | Lastuamissyvyys 10mm 7500r/min. | 800mm/min |
| Jyrsintä viimeistellään toisella jyrsinnällä, jolloin nukkaantumisen ei ole ongelma. | Valitaan myötäsyin jyrsintä. | 15000r/min lastuamissyvyydestä riippumatta. | 2400mm/min lastuamissyvyydestä riippumatta. |
| Esimerkiksi tehtäessä avojyrsintää, jolloin tikkuuntumisesta ei muodostu ongelmaa. Halutaan kuitenkin hyvä pinnanlaatu | Valitaan poikkisyin jyrsintä | 15000r/min lastuamissyvyydestä riippumatta. | 2000mm/min lastuamissyvyydestä riippumatta. |

Taulukko 9. Syöttöarvosuositukset männylle Numo 5.0 NC -jyrsintätiestien perusteella, halkaisijaltaan 8 mm:n jyrsimellä.

| | | | |
|---|--|---|---|
| Mänty | Jyrsinterän halkaisija 8mm | | |
| | Suositeltavat työstöarvot | | |
| Työhön parhaiten soveltuva jyrsintätapa | Jyrsintäsuunta (Myötäsyin vai poikkisyin) | Karan pyörimisnopeus (r/min) | Syöttönopeus |
| Halutaan ensimmäisellä jyrsinnällä hyvä pinnanlaatu. | Valitaan myötäsyin jyrsintä. | Lastuamissyvyys 4mm 15000r/min. | 800mm/min |
| | | Lastuamissyvyys 10mm 7500r/min. | 1000mm/min |
| Jyrsintä viimeistellään toisella jyrsinnällä, jolloin nukkaantumisen ei ole ongelma. | Valitaan myötäsyin jyrsintä. | 15000r/min lastuamissyvyydestä riippumatta. | 1800mm/min lastuamissyvyydestä riippumatta. |
| Esimerkiksi tehtäessä avojyrsintää, jolloin tikkuuntumisesta ei muodostu ongelmaa. Halutaan kuitenkin hyvä pinnanlaatu. | Valitaan poikkisyin jyrsintä. | 7500r/min lastuamissyvyydestä riippumatta. | 800mm/min lastuamissyvyydestä riippumatta. |

7.4 ABB 140 IRB -jyrsintätestien tulostarkastelu

7.4.1 Koivu

Koivua jyrsittäessä esiin tulivat ABB 140 IRB -robotin ja Mannesmann Demag ES 170 ZG -jyrsinkaran puutteet puun jyrsinnässä. Koivu on materiaalina niin kovaa, ettei se sovellu hyvin kyseisellä robotilla jyrsimiseen ja jyrsinkaran maksimi pyörimisnopeus osoittautui liian pieneksi. Jyrsittäessä robotin värinät ja taipumat huononsivat pinnanlaatua. Poikkisyin jyrsityn uran pohjalla oli yli 1 mm:n syvyisiä jyrsinterän muotoisia syvennyksiä huonontamassa pinnanlaatua. Nämä syvennykset johtuvat taipumisesta. Taipuminen voi johtua akselien taipumisesta tai jyrsinkaran ja työkalulaipan kiinnityksen väljyydestä, joka sallii pientä liikkumista.

Koivua ABB 140 IRB -robotilla jyrsittäessä täytyy ottaa erityisesti huomioon, ettei lastuamissyvyys ole liian suuri. Kyseinen robotti keskeyttää jyrsinnän herkästi, jos akselisiin kohdistuvat voimat kasvavat liian suuriksi. Kun jyrsittiin koivua 10 mm:n lastuamissyvyyteen, niin robotti lopetti kesken jyrsimisen, koska viidennelle akselille kohdistui liian suuret rasitukset. Koivun jyrsintätestien perusteella robotin ominaisuudet eivät ole hyviä kovan puumateriaalin jyrsintään. Tukevarakenteiseen NC -jyrsinkoneeseen verrattuna tulokset ovat huonoja. Jyrsinkaralla täytyy olla suurempi pyörimisnopeus, muuten koivun jyrsintää ei kannata tehdä kyseisellä robotilla.

Mikäli koivua on pakko jyrsiä, niin suositeltavaa on käyttää mahdollisimman matalaa lastuamissyvyyttä ja myötäsyin jyrsintää. Syöttönopeudeksi on suositeltavaa valita noin 600 mm/min.

7.4.2 Mänty

Männyn jyrsintätestien tuloksista nähdään heti, että materiaalina mänty soveltuu paljon paremmin ABB 140 IRB-robotilla jyrsittäväksi. Robotin värinästä ja taipumisesta johtuvat pinnanlaatu virheitä ei ole lainkaan poikkisyin jyrsittäessä. Myötäsyin jyrsittäessä pohjalla on lieviä jyrsinterän tekemiä jälkiä havaittavissa, jotka johtuvat akselien taipumisesta. Taipumi-

sesta seuraa jrsinkaran asennon muuttuminen ja terän toinen laita työstää silloin toista alempana. Pienikin muutos jrsinkaran asennossa näkyy heti pinnanlaadussa.

Mäntyä jrsittäessä huomataan jo selkeitä eroja syöttöarvojen välillä. Koivulle oli vaikeaa antaa lastuamisarvosuosituksia, mutta männylle oikean lastuamisarvon määrittäminen on helpompaa. Lastuamissyvyyden vaikutus on suurempi lastuttaessa myötäsyin, mutta poikkisyin tulokset ovat samankaltaisia lastuamissyvyydestä riippumatta.

Mäntyä jrsittäessä on suositeltavaa käyttää poikkisyin jrsintää, silloin pinnanlaatu on tasaisempaa kuin myötäsyin jrsinnässä. Syöttönopeudeksi on suositeltavaa valita noin 1200 mm/min, mutta 1800 mm/min arvolla tulos on hyvä. Männyllä ei tarvitse ottaa huomioon lastuamissyvyyttä, vaan samat syöttöarvot käyvät 5 mm:n ja 10 mm:n lastuamissyvyyksiin.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Testeissä voitiin havaita, että puulle on erittäin vaikea antaa täysin oikeita lastuamisarvoja. Tämä johtuu puun materiaaliominaisuuksista, jotka voivat vaihdella samassakin kappaleessa. Esimerkiksi pienet kosteuserot tai oksaisuus muuttavat paljon lastuamisarvoasuosituksia, joilla saadaan hyvää pinnanlaatua.

NUMO 5.0 NC -jyrsinkoneella suoritettujen testien perusteella koivulle on huomattavasti helpompi määrittää hyviä lastuamisarvoja kuin männylle. Koivua jyrsittäessä oli helpompi havaita erot pinnalaaduissa. Tämä johtuu koivun puumateriaalin kovuudesta. ABB 140 IRB -robotilla lastuamisarvoja oli helpompi määrittää männylle. Kyseisellä robotilla ei voinut koivulle määrittää kunnolla lastuamisarvoja, koska robotin ja jyrsinkaran ominaisuudet eivät riittäneen kunnolla koivun jyrsintää. Kaikilla testatuilla syöttöarvoilla robotti teki huonoa pinnanlaatua. NC -jyrsinkoneella parhaat tulokset saatiin koivulle 300 - 600 mm/min syöttöarvoilla, mutta robotilla kyseiset syöttöarvot eivät toimineet odotetulla tavalla. Koivun työstämiseen robotilla tarvitaan isompi ja tehokkaampi robotti ja jyrsinkara.

Robotin ominaisuudet puun jyrsintään tulivat testeissä hyvin esille, koska robotti käyttäytyi niin eritavalla koivua ja mäntyä jyrsittäessä. Koivun tuloksista nähtiin heti, että robotti ei sovellu hyvin kovien puumateriaalien jyrsintää. Mäntyä jyrsittäessä robotin hyvät ominaisuudet tulivat paremmin esiin ja testitulokset olivat osittain parempia kuin NC -jyrsinkoneella.

NUMO 5.0 NC -jyrsinkoneella tehtyjen testien perusteella saatiin suosituslastuamisarvoja erilaisille jyrsinnöille, kuten rouhinnalle. Näistä saa suosituslastuamisarvoista on hyötyä myös robotin lastuamisarvojen määrittämisessä. Testien perusteella robotilla joudutaan käyttämään pienempiä syöttönopeuksia kuin NC -jyrsinkoneella hyvän pinnanlaadun aikaan saamiseksi.

Äänenvoimakkuudella ei voitu testitulosten perusteella todeta olevan yhteyttä pinnanlaatuun, kuten metalleilla on todettu.. Männyllä kaikilla lastuamisarvoilla lastuamisääni oli hyvin samankaltainen, mutta koivua jyrsittäessä äänenvoimakkuus heitelti paljon eri lastuamisarvoilla. Testeissä käytetty äänenmittausmenetelmä ei ollut paras mahdollinen. Desibelimittari olisi kannattanut kiinnittää jyrsinkaraan, mutta se ei ollut mahdollista. Tällöin mittaustulokset olisivat aina tapahtuneet samasta kohtaa.

Robotti soveltuu erinomaisesti männyn kaltaisten pehmeiden puiden jysintään. Robotin ominaisuudet kovemilla materiaaleilla eivät riitä hyvän pinnanlaadun aikaansaamiseksi rouhinnalla, mutta tarpeeksi pienellä lastuamissyvyydellä robotilla voidaan jysä myöskin kovempaa materiaali.

9 YHTEENVETO

Insinööriyön tarkoitus oli määrittää robotisoidulle puun jyrinnälle lastuamisarvoja ja menetelmiä lastuamisarvojen määrittämiseen. Työstä saatiin suositusarvoja, joilla voidaan helpottaa lastuamisarvojen valintaa. Työn tekeminen vaati kokemusta ABB 140 IRB -robotin, NUMO 5.0 NC -jyrinkoneen ja tarvittavien tietokoneohjelmien käytöstä. Työtä ei olisi ehtinyt tehdä, jos ei olisi ollut aikaisempaa kokemusta kyseisistä laitteista ja tietokoneohjelmista.

Työssä etsittiin oikeita lastuamisarvoja puun jyrintään, tekemällä jyrintätestejä NUMO 5.0 NC -jyrinkoneella ja ABB 140 IRB -robotilla. Tutkimustuloksena saatiin, että lastuamisarvot puuntyöstössä määräytyvät suurimmalta osin työstökoneen tai robotin jäykkyyden, karan tehon, lastuamissyvyyden, jyrintäsuunnan ja syöttönopeuden mukaisesti. Tyypilliset arvot robotilla esimerkiksi mäntyä jyrittäessä 10 mm:n jyrinterällä 5 mm:n lastuamissyvyyteen voisivat olla: karan pyörimisnopeus 15000 r/min ja syöttönopeus 600 mm/min. Robotilla syöttönopeutta haettiin arvoista 300 – 1800 mm/min.

Robotilla jyrittäessä huomattiin koivua jyrittäessä voimakasta portaittaisuutta urajyrinnässä uranpohjalla sekä aaltomaisuutta uran laidoilla. Ilmiön muodostumismekanismia pitäisi tutkia enemmän, vaikka sen voi olettaa olevan yhteydessä robotin käsivarren jäykkyyteen. Syynä voivat olla myös resonanssitajuudet tai ns. stick-slip -ilmiö

Työ oli mielenkiintoinen suorittaa ja antoi kokemusta tutkimusprojektin suorittamisesta. Aikataulullisesti työn suorittaminen oli haastavaa. Ensimmäiset jyrintätestetit tehtiin NC -jyrinkoneella helmikuun puolivälissä ja viimeiset huhtikuun alussa ABB 140 IRB -robotilla.

Menetelmien kehittämiseksi lastuamisarvojen määrittämiseen tarvittaisiin paljon enemmän jyrintä testejä. Mahdollisia kohteita lisätutkimuksille olisi äänitestien jatkaminen kokeilemalla eri mittausmenetelmiä sekä terän kulumisen määrittäminen puun lastuavassa työstössä.

LÄHTEET

1. Kivimaa, E. Leikkuuvoima puun työstössä. Helsinki 1952. VTT, puuteknillinen laboratorio, Laboratoriotiedotus 32 s.
2. Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M., Sihvonen, P., Valmistustekniikka, Helsinki 2005, 163 s.
3. Maaranen, K., Koneistustekniikat, Porvoo 2004.
4. Kovan nuorrutusteräksen lastuttavuus, Väisänen, T., Nummi, T., Espoo 1999, luettu 15.2.2008 [www.dokumentti] www.tkk.fi/Units/Production/Publications/tkk-kpt-5-99.PDF
5. Jyrsintä, Kuusisto, M., 1999, luettu 3.2.2008 [www.dokumentti] <http://personnel.turkuai.fi/users/mikak/materialit/koneistus/koneistus/Koneistus%2001%20KONPS98c.pdf>
6. Laboratorioselostus, OAMK, luettu 16.2.2008 [www.dokumentti] <http://www.student.oamk.fi/~t4paju00/labraselkkari/selkkari>
7. Sekalaista tietoa työstöstä, luettu 13.2.2008 [www.dokumentti] <http://www.netikka.net/saulij/cnc/Tyosto.html>
8. Terähuolto, luettu 25.2.2008 [www.dokumentti] <http://www.edu.fi/oppimateriaalit/puuteollisuus/teratekniikka/terahuolto/etusivu.html>
9. Hemmilä, P., Usenius, A., Welling, I., Ollila, T., Rautio, S., Ympäristöystävällinen puun työstö, VTT, Espoo 2001, 13 s.
10. Kärkkäinen, M., Puutieteen perusteet, Hämeenlinna 2003, 47 s.
11. Kuva männyn halkileikkaus, <http://www.uiah.fi/virtu/materiaalit/puuteknologia/photos/puulajit/01manty-600x600.jpg>
12. Tietoa männystä, sivun yllä pito Pro Puu Ry, Puuaineksen ominaisuudet taulukko, mänty, Blomster, P., [www.dokumentti] <http://www.puuproffa.fi/arkisto/manty.php>
13. Tietoa koivusta, sivun yllä pito Pro Puu Ry, luettu 15.2.2008 [www.dokumentti] <http://www.puuproffa.fi/arkisto/koivu.php>

14. Tietoa koivusta, sivun yllä pito Pro Puu Ry, Puuaineksen ominaisuudet taulukko, koivu, Blomster, P., [www.dokumentti]

<http://www.puuproffa.fi/arkisto/koivu.php>

15. Kuva männyn halkileikkaus

<http://www.uiah.fi/virtu/materiaalit/puuteknologia/photos/puulajit/05koivu-600x600.jpg>

16. Tietoa metalleista ja puusta, Harju, P., 1. Painos 2004, Luettu 10.3.2008

[www.dokumentti] http://www.penantieta-opus.fi/files/talotekniikan_perusteet1.pdf

17. ABB 140 IRB -robotin ominaisuuksia, luettu 1.2.2008 [www.dokumentti]

<http://www.abb.fi/product/seitp327/ed7a29a182bf7bccc12572e6002d0fb0.aspx?productLanguage=fi&country=FI>

18. Kuva ABB 140 IRB -robotin liikeradoista,

<http://www.abb.fi/product/seitp327/ed7a29a182bf7bccc12572e6002d0fb0.aspx?productLanguage=fi&country=FI&tabKey=2>

19. Mannesmann Demag ES 170 ZG –jyrsinkaran ominaisuuksia, luettu 2.2.2008

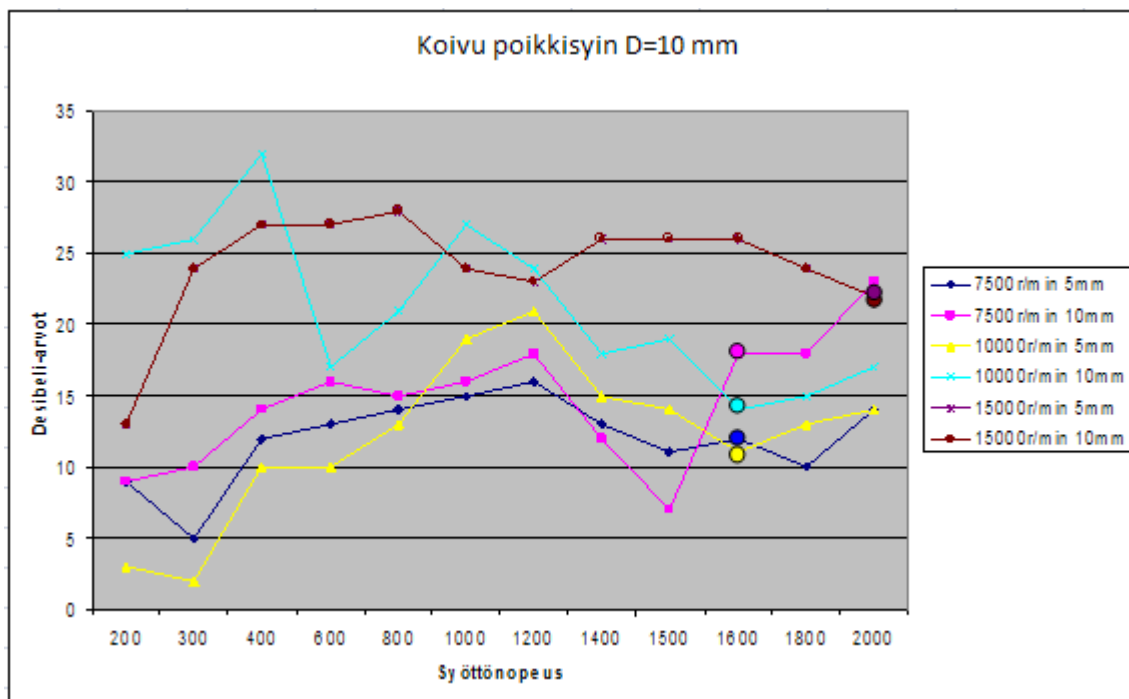
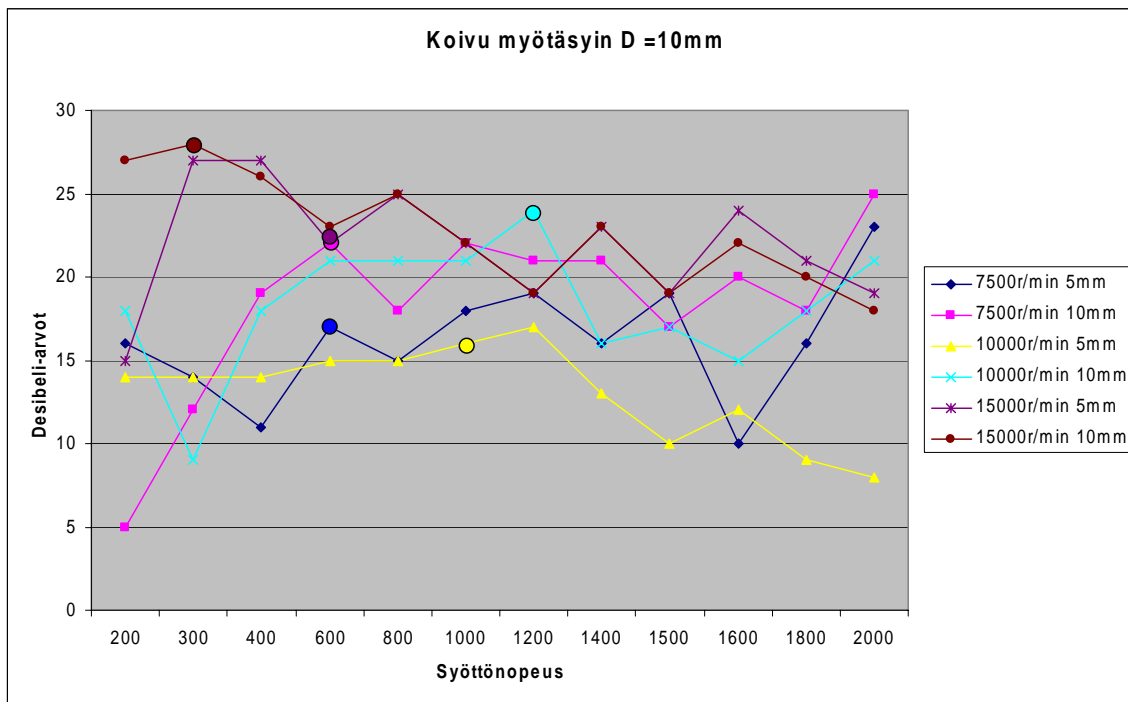
[www.dokumentti]

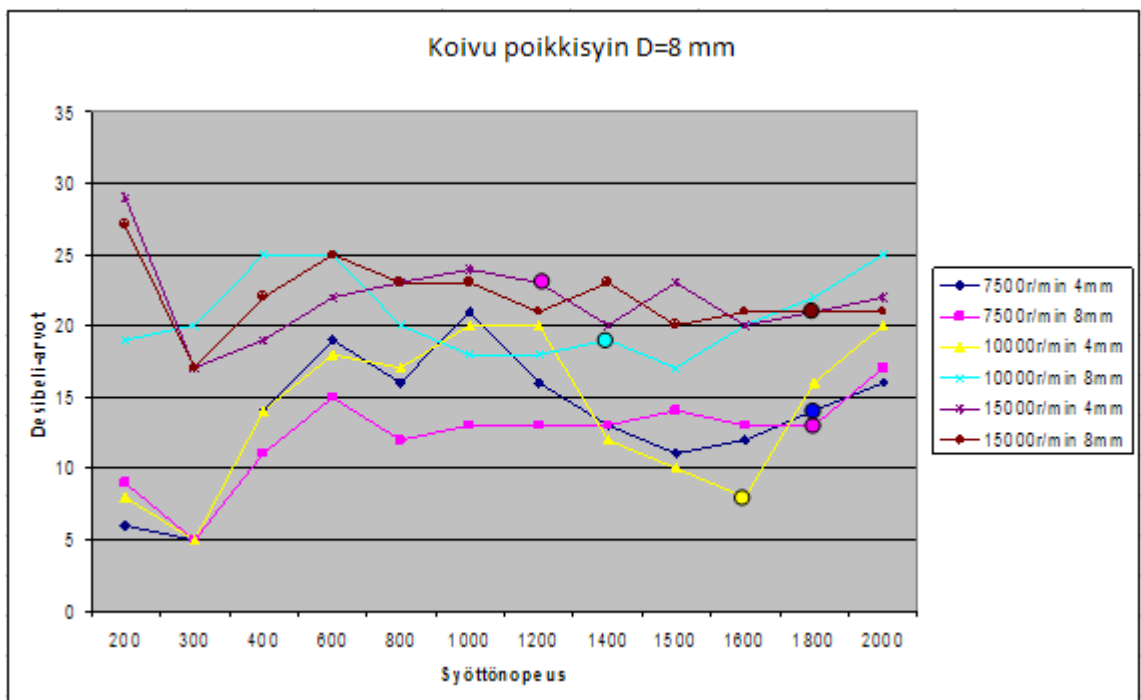
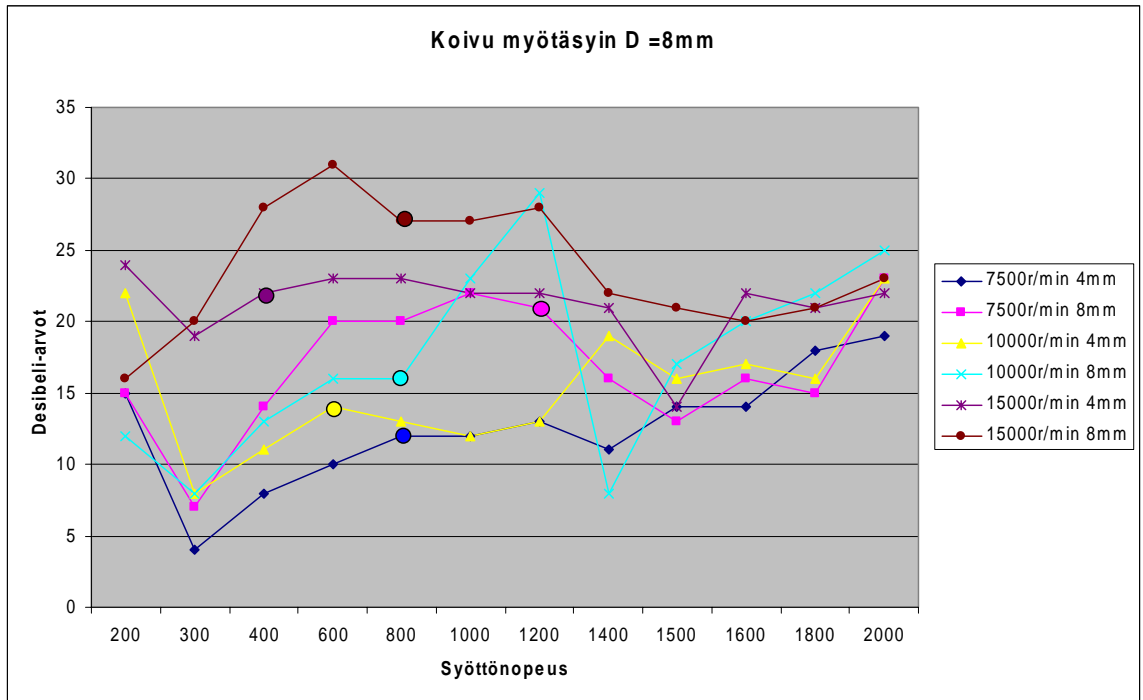
http://www.mannesmann-demag.com/prime/PrimeBase/demag/demag/artikel.htdx?langid=1&wgrid=5&agrid=3&afmid=28&artid=2083&demag_info=0

LIITEIDEN LUETTELO

1. KOIVUN ÄÄNENVOIMAKKUUSMITTAUSTEN TULOKSIEN KAA-
VIOKUVAT
2. MITTAUSPÖYTÄKIRJAT NC -JYRSINKONETESTEISTÄ

KOIVUN ÄÄNENVOIMAKKUUSMITTAUSTEN TULOKSIEN KAAVIOKUVAT





MITTAUSPÖYTÄKIRJAT NC -JYRSINKONETESTEISTÄ

Lyhenteiden selitykset:

SN = syöttönopeus, PI = pinnanlaatu, TI = tikkuuntuminen, PA = palaminen, M = Myötäsyin jyrä, P = poikkisyin jyrä, Mt/Pt = Karan äänivoimakkuus ilman jyrä, Mj/Pj = Jyrästä syntyvän äänivoimakkuus.

| Mänty: 7500 r/min, lastuamissyvyys 5 mm, Jyrä 10 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 300 | 5 | 5 | 6 | 5 | 1 | 5 | 1 | 3 | 97 | 100 | 90 | 96 | 3 | 6 |
| 400 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 4 | 1 | 2 | 88 | 99 | 86 | 97 | 11 | 11 |
| 600 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 86 | 99 | 82 | 103 | 13 | 23 |
| 800 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 86 | 99 | 82 | 104 | 13 | 24 |
| 1000 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 83 | 100 | 81 | 105 | 17 | 24 |
| 1200 | 2 | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 83 | 101 | 82 | 106 | 18 | 24 |
| 1600 | 3 | 3 | 4 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 92 | 99 | 85 | 103 | 8 | 18 |
| 2000 | 4 | 4 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 83 | 102 | 79 | 104 | 19 | 25 |
| 2400 | 5 | 4 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 84 | 102 | 82 | 106 | 18 | 24 |

| Mänty: 7500 r/min, lastuamissyvyys 10 mm, Jyrä 10 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 300 | 5 | 6 | 6 | 6 | 4 | 6 | 1 | 3 | 97 | 100 | 90 | 99 | 3 | 9 |
| 400 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 1 | 2 | 88 | 99 | 86 | 98 | 11 | 12 |
| 600 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 4 | 1 | 1 | 86 | 99 | 82 | 100 | 13 | 18 |
| 800 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 4 | 1 | 1 | 86 | 100 | 82 | 103 | 14 | 21 |
| 1000 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 83 | 102 | 81 | 105 | 19 | 24 |
| 1200 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 83 | 103 | 82 | 106 | 20 | 24 |
| 1600 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 | 1 | 92 | 103 | 85 | 108 | 11 | 23 |
| 2000 | 2 | 5 | 2 | 5 | 1 | 2 | 1 | 1 | 83 | 103 | 80 | 105 | 20 | 25 |
| 2400 | 2 | 6 | 2 | 6 | 1 | 2 | 1 | 1 | 84 | 105 | 82 | 105 | 21 | 23 |

| Mänty: 10000 r/min, lastuamissyvyys 5 mm, Jyrä 10 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 300 | 5 | 5 | 6 | 5 | 1 | 6 | 1 | 1 | 92 | 99 | 97 | 102 | 8 | 5 |
| 400 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 5 | 1 | 1 | 87 | 95 | 88 | 102 | 8 | 14 |
| 600 | 4 | 4 | 4 | 3 | 1 | 4 | 1 | 1 | 81 | 95 | 86 | 103 | 14 | 17 |
| 800 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 4 | 1 | 1 | 84 | 98 | 90 | 102 | 14 | 12 |
| 1000 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 83 | 100 | 82 | 101 | 17 | 19 |
| 1200 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 82 | 102 | 83 | 101 | 20 | 18 |
| 1600 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 87 | 100 | 92 | 98 | 13 | 6 |
| 2000 | 3 | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 80 | 100 | 81 | 98 | 20 | 17 |
| 2400 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 83 | 103 | 81 | 100 | 20 | 19 |

| Mänty: 10000 r/min, lastuamissyvyys 10 mm, Jyrsin 10 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 300 | 5 | 6 | 6 | 5 | 5 | 6 | 1 | 4 | 92 | 103 | 97 | 104 | 13 | 7 |
| 400 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 3 | 87 | 100 | 88 | 103 | 13 | 15 |
| 600 | 4 | 4 | 2 | 2 | 4 | 4 | 1 | 2 | 81 | 100 | 86 | 106 | 19 | 20 |
| 800 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 84 | 103 | 90 | 105 | 19 | 15 |
| 1000 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 83 | 104 | 82 | 105 | 21 | 23 |
| 1200 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 82 | 105 | 83 | 105 | 23 | 22 |
| 1600 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 87 | 104 | 92 | 103 | 17 | 9 |
| 2000 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 88 | 106 | 81 | 103 | 18 | 22 |
| 2400 | 4 | 4 | 5 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 83 | 103 | 81 | 104 | 20 | 23 |

| Mänty: 15000 r/min, lastuamissyvyys 5 mm, Jyrsin 10 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 300 | 5 | 6 | 6 | 6 | 1 | 6 | 1 | 5 | 94 | 98 | 97 | 99 | 4 | 2 |
| 400 | 4 | 6 | 5 | 5 | 1 | 6 | 1 | 4 | 87 | 99 | 89 | 108 | 12 | 19 |
| 600 | 4 | 5 | 5 | 5 | 1 | 5 | 1 | 3 | 83 | 102 | 88 | 103 | 19 | 15 |
| 800 | 3 | 5 | 4 | 4 | 1 | 5 | 1 | 2 | 85 | 106 | 89 | 104 | 21 | 15 |
| 1000 | 3 | 4 | 4 | 4 | 1 | 5 | 1 | 1 | 83 | 107 | 86 | 105 | 24 | 19 |
| 1200 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 4 | 1 | 1 | 85 | 106 | 88 | 105 | 21 | 17 |
| 1600 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 86 | 105 | 88 | 108 | 19 | 20 |
| 2000 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 87 | 105 | 89 | 106 | 18 | 17 |
| 2400 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 89 | 105 | 89 | 106 | 16 | 17 |

| Mänty: 15000 r/min, lastuamissyvyys 10 mm, Jyrsin 10 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 300 | 5 | 6 | 6 | 5 | 4 | 6 | 1 | 6 | 94 | 109 | 97 | 112 | 15 | 15 |
| 400 | 5 | 6 | 5 | 5 | 4 | 6 | 1 | 5 | 87 | 107 | 89 | 107 | 20 | 18 |
| 600 | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 1 | 4 | 83 | 107 | 88 | 107 | 24 | 19 |
| 800 | 4 | 4 | 5 | 2 | 3 | 5 | 1 | 2 | 85 | 106 | 89 | 106 | 21 | 17 |
| 1000 | 4 | 4 | 5 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 83 | 105 | 86 | 105 | 22 | 19 |
| 1200 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 85 | 107 | 88 | 107 | 22 | 19 |
| 1600 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 86 | 104 | 88 | 105 | 18 | 17 |
| 2000 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 87 | 104 | 89 | 105 | 17 | 16 |
| 2400 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 89 | 104 | 89 | 106 | 15 | 17 |

| Mänty: 7500 r/min, lastuamissyvyys 4 mm, Jyrsin 8 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|----|----|----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 300 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 1 | 93 | 97 | 98 | 98 | 4 | 0 |
| 400 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 1 | 1 | 86 | 96 | 90 | 99 | 10 | 9 |
| 600 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 83 | 95 | 85 | 93 | 12 | 8 |
| 800 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 82 | 96 | 87 | 96 | 14 | 9 |
| 1000 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 82 | 96 | 85 | 95 | 14 | 10 |
| 1200 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 83 | 97 | 83 | 95 | 13 | 12 |
| 1600 | 4 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 85 | 97 | 82 | 96 | 12 | 14 |
| 2000 | 4 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 81 | 97 | 82 | 96 | 16 | 14 |
| 2400 | 5 | 2 | 5 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 82 | 97 | 82 | 97 | 15 | 15 |

| Mänty: 7500 r/min, lastuamissyvyys 8 mm, Jyrsin 8 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 300 | 4 | 5 | 4 | 3 | 3 | 5 | 1 | 1 | 93 | 102 | 98 | 100 | 9 | 2 |
| 400 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 86 | 99 | 90 | 99 | 13 | 9 |
| 600 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 83 | 101 | 85 | 98 | 18 | 13 |
| 800 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 82 | 103 | 87 | 98 | 21 | 11 |
| 1000 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 82 | 104 | 85 | 100 | 22 | 15 |
| 1200 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 83 | 106 | 83 | 102 | 23 | 19 |
| 1600 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 85 | 102 | 92 | 100 | 17 | 18 |
| 2000 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 81 | 103 | 82 | 100 | 22 | 18 |
| 2400 | 3 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 82 | 107 | 82 | 103 | 25 | 21 |

| Mänty: 10000 r/min, lastuamissyvyys 4 mm, Jyrsin 8 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 300 | 4 | 5 | 5 | 5 | 1 | 5 | 1 | 1 | 92 | 100 | 96 | 102 | 8 | 6 |
| 400 | 4 | 5 | 5 | 5 | 2 | 5 | 1 | 1 | 86 | 99 | 90 | 101 | 13 | 11 |
| 600 | 3 | 4 | 3 | 3 | 1 | 4 | 1 | 1 | 79 | 96 | 85 | 100 | 17 | 15 |
| 800 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 82 | 98 | 91 | 99 | 26 | 8 |
| 1000 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 82 | 99 | 84 | 99 | 27 | 15 |
| 1200 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 81 | 101 | 83 | 99 | 20 | 16 |
| 1600 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 86 | 97 | 88 | 98 | 11 | 10 |
| 2000 | 2 | 4 | 2 | 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 80 | 102 | 83 | 98 | 22 | 15 |
| 2400 | 2 | 4 | 2 | 5 | 1 | 2 | 1 | 1 | 81 | 102 | 84 | 98 | 21 | 14 |

| Mänty: 10000 r/min, lastuamissyvyys 8 mm, Jyrsin 8 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 300 | 3 | 4 | 4 | 4 | 1 | 5 | 1 | 1 | 92 | 100 | 96 | 102 | 18 | 6 |
| 400 | 3 | 4 | 4 | 3 | 1 | 4 | 1 | 1 | 86 | 98 | 90 | 101 | 12 | 11 |
| 600 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 79 | 100 | 85 | 102 | 21 | 17 |
| 800 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 82 | 104 | 91 | 101 | 24 | 10 |
| 1000 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 82 | 108 | 84 | 102 | 26 | 18 |
| 1200 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 81 | 110 | 83 | 102 | 29 | 29 |
| 1600 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 86 | 105 | 88 | 103 | 19 | 15 |
| 2000 | 3 | 4 | 3 | 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 80 | 110 | 83 | 103 | 30 | 20 |
| 2400 | 3 | 4 | 3 | 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 106 | 112 | 84 | 106 | 6 | 22 |

| Mänty: 15000 r/min, lastuamissyvyys 4 mm, Jyrsin 8 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 300 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 1 | 3 | 96 | 97 | 94 | 99 | 1 | 5 |
| 400 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 1 | 2 | 88 | 96 | 87 | 98 | 8 | 11 |
| 600 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 4 | 1 | 1 | 88 | 98 | 83 | 98 | 10 | 15 |
| 800 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 87 | 101 | 84 | 100 | 14 | 16 |
| 1000 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 85 | 102 | 85 | 101 | 17 | 16 |
| 1200 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 85 | 102 | 84 | 103 | 17 | 19 |
| 1600 | 3 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 92 | 102 | 89 | 97 | 10 | 8 |
| 2000 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 93 | 101 | 85 | 98 | 8 | 13 |
| 2400 | 4 | 3 | 4 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 90 | 101 | 84 | 100 | 11 | 16 |

| Mänty: 15000 r/min, lastuamissyvyys 8 mm, Jyrsin 8 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 300 | 4 | 5 | 5 | 5 | 1 | 5 | 1 | 3 | 96 | 100 | 94 | 99 | 4 | 5 |
| 400 | 3 | 5 | 4 | 5 | 2 | 5 | 1 | 2 | 88 | 101 | 87 | 98 | 13 | 11 |
| 600 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 4 | 1 | 1 | 88 | 101 | 83 | 98 | 13 | 15 |
| 800 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 1 | 1 | 87 | 102 | 84 | 100 | 15 | 16 |
| 1000 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 85 | 103 | 85 | 101 | 18 | 16 |
| 1200 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 85 | 104 | 84 | 103 | 19 | 19 |
| 1600 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 92 | 106 | 89 | 97 | 14 | 8 |
| 2000 | 3 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 93 | 107 | 85 | 98 | 14 | 13 |
| 2400 | 3 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 90 | 109 | 84 | 100 | 19 | 16 |

| Koivu: 7500 r/min, lastuamissyvyys 5 mm, Jyrsin 10 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 200 | 3 | 6 | 3 | 4 | 1 | 6 | 1 | 5 | 82 | 98 | 91 | 100 | 16 | 9 |
| 300 | 2 | 5 | 2 | 3 | 2 | 6 | 1 | 3 | 93 | 97 | 96 | 101 | 14 | 5 |
| 400 | 2 | 5 | 2 | 3 | 2 | 6 | 1 | 2 | 85 | 96 | 89 | 101 | 11 | 12 |
| 600 | 1 | 4 | 1 | 3 | 2 | 5 | 1 | 1 | 79 | 96 | 86 | 99 | 17 | 13 |
| 800 | 2 | 4 | 2 | 2 | 1 | 5 | 1 | 1 | 82 | 97 | 86 | 100 | 15 | 14 |
| 1000 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 5 | 1 | 1 | 80 | 98 | 86 | 101 | 18 | 15 |
| 1200 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 1 | 1 | 80 | 99 | 86 | 102 | 19 | 16 |
| 1400 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 86 | 102 | 85 | 98 | 16 | 13 |
| 1500 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 82 | 101 | 89 | 100 | 19 | 11 |
| 1600 | 3 | 1 | 4 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 91 | 101 | 89 | 101 | 10 | 12 |
| 1800 | 3 | 2 | 4 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 86 | 102 | 88 | 98 | 16 | 10 |
| 2000 | 3 | 2 | 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 79 | 102 | 85 | 99 | 23 | 14 |

| Koivu: 7500 r/min, lastuamissyvyys 10 mm, Jyrsin 10 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|-----|----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 200 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 6 | 3 | 5 | 83 | 88 | 98 | 89 | 5 | 9 |
| 300 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 6 | 1 | 4 | 93 | 101 | 105 | 95 | 8 | 10 |
| 400 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 6 | 1 | 2 | 84 | 100 | 103 | 89 | 16 | 14 |
| 600 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 5 | 1 | 1 | 80 | 100 | 102 | 86 | 20 | 16 |
| 800 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 5 | 1 | 1 | 83 | 99 | 101 | 86 | 16 | 15 |
| 1000 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 4 | 1 | 1 | 79 | 97 | 101 | 85 | 20 | 16 |
| 1200 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 4 | 1 | 1 | 81 | 100 | 102 | 84 | 21 | 18 |
| 1400 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 81 | 102 | 102 | 90 | 21 | 12 |
| 1500 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 84 | 101 | 101 | 94 | 17 | 7 |
| 1600 | 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 82 | 102 | 102 | 84 | 20 | 18 |
| 1800 | 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 84 | 102 | 102 | 84 | 18 | 18 |
| 2000 | 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 78 | 103 | 103 | 80 | 25 | 23 |

| Koivu: 10000 r/min, lastuamissyvyys 5 mm, Jyrsin 10 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 200 | 4 | 5 | 6 | 4 | 3 | 6 | 2 | 5 | 86 | 100 | 87 | 95 | 14 | 3 |
| 300 | 3 | 5 | 5 | 2 | 1 | 6 | 2 | 3 | 97 | 101 | 97 | 99 | 14 | 2 |
| 400 | 4 | 3 | 5 | 1 | 3 | 5 | 1 | 2 | 85 | 99 | 86 | 96 | 14 | 10 |
| 600 | 3 | 3 | 4 | 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | 83 | 98 | 84 | 94 | 15 | 10 |
| 800 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 4 | 1 | 1 | 83 | 98 | 83 | 96 | 15 | 13 |
| 1000 | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 | 4 | 1 | 1 | 82 | 98 | 80 | 99 | 16 | 19 |
| 1200 | 1 | 3 | 1 | 4 | 2 | 3 | 1 | 1 | 81 | 98 | 81 | 102 | 17 | 21 |
| 1400 | 2 | 3 | 2 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 86 | 99 | 87 | 102 | 13 | 15 |
| 1500 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 82 | 92 | 88 | 102 | 10 | 14 |
| 1600 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 82 | 94 | 91 | 102 | 12 | 11 |
| 1800 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 81 | 90 | 90 | 103 | 9 | 13 |
| 2000 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 80 | 88 | 88 | 102 | 8 | 14 |

| Koivu: 10000 r/min, lastuamissyvyys 10 mm, Jyrsin 10 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 200 | 4 | 5 | 5 | 2 | 3 | 6 | 1 | 5 | 86 | 104 | 87 | 112 | 18 | 25 |
| 300 | 3 | 4 | 4 | 2 | 3 | 6 | 1 | 3 | 97 | 106 | 97 | 123 | 9 | 26 |
| 400 | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 | 5 | 1 | 1 | 85 | 103 | 86 | 118 | 18 | 32 |
| 600 | 3 | 3 | 3 | 1 | 2 | 5 | 1 | 1 | 83 | 103 | 84 | 103 | 21 | 17 |
| 800 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 4 | 1 | 1 | 83 | 104 | 83 | 104 | 21 | 21 |
| 1000 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 4 | 1 | 1 | 82 | 103 | 80 | 107 | 21 | 27 |
| 1200 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 81 | 105 | 81 | 105 | 24 | 24 |
| 1400 | 3 | 2 | 5 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 87 | 103 | 87 | 105 | 16 | 18 |
| 1500 | 3 | 2 | 6 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 88 | 105 | 88 | 107 | 17 | 19 |
| 1600 | 3 | 1 | 6 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 90 | 105 | 91 | 105 | 15 | 14 |
| 1800 | 3 | 1 | 6 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 87 | 105 | 90 | 105 | 18 | 15 |
| 2000 | 3 | 1 | 6 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 85 | 106 | 88 | 105 | 21 | 17 |

| Koivu: 15000 r/min, lastuamissyvyys 5 mm, Jyrsin 10 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 200 | 6 | 6 | 6 | 2 | 1 | 6 | 5 | 6 | 95 | 110 | 95 | 106 | 15 | 11 |
| 300 | 3 | 4 | 4 | 2 | 1 | 6 | 1 | 4 | 86 | 113 | 86 | 109 | 27 | 25 |
| 400 | 2 | 4 | 2 | 2 | 1 | 5 | 1 | 3 | 84 | 111 | 84 | 111 | 27 | 27 |
| 600 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 86 | 108 | 86 | 112 | 22 | 26 |
| 800 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 83 | 108 | 83 | 109 | 25 | 26 |
| 1000 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 86 | 108 | 86 | 111 | 22 | 25 |
| 1200 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 88 | 107 | 88 | 110 | 19 | 22 |
| 1400 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 87 | 110 | 87 | 111 | 23 | 24 |
| 1500 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 88 | 109 | 88 | 113 | 19 | 25 |
| 1600 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 85 | 109 | 85 | 112 | 24 | 27 |
| 1800 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 86 | 107 | 86 | 111 | 21 | 25 |
| 2000 | 4 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 87 | 106 | 87 | 105 | 19 | 18 |

| Koivu: 15000 r/min, lastuamissyvyys 5 mm, Jyrsin 10 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 200 | 3 | 5 | 4 | 3 | 1 | 6 | 3 | 5 | 95 | 112 | 95 | 108 | 27 | 13 |
| 300 | 1 | 5 | 1 | 2 | 1 | 6 | 1 | 3 | 86 | 114 | 86 | 110 | 28 | 24 |
| 400 | 2 | 4 | 2 | 2 | 1 | 5 | 1 | 2 | 84 | 110 | 84 | 111 | 26 | 27 |
| 600 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 86 | 109 | 86 | 113 | 23 | 27 |
| 800 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 83 | 108 | 83 | 111 | 25 | 28 |
| 1000 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 4 | 1 | 1 | 86 | 108 | 86 | 110 | 22 | 24 |
| 1200 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 88 | 107 | 88 | 111 | 19 | 23 |
| 1400 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 87 | 110 | 87 | 113 | 23 | 26 |
| 1500 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 88 | 109 | 88 | 114 | 19 | 26 |
| 1600 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 85 | 107 | 85 | 111 | 22 | 26 |
| 1800 | 4 | 2 | 5 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 86 | 106 | 86 | 110 | 20 | 24 |
| 2000 | 4 | 1 | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 87 | 105 | 87 | 109 | 18 | 22 |

| Koivu: 7500 r/min, lastuamissyvyys 4 mm, Jyrsin 8 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 200 | 3 | 5 | 3 | 3 | 1 | 5 | 1 | 3 | 83 | 98 | 89 | 95 | 15 | 6 |
| 300 | 2 | 4 | 2 | 2 | 1 | 5 | 1 | 2 | 95 | 99 | 93 | 98 | 4 | 5 |
| 400 | 2 | 4 | 2 | 2 | 1 | 4 | 1 | 1 | 89 | 97 | 84 | 98 | 8 | 14 |
| 600 | 2 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 86 | 96 | 78 | 97 | 10 | 19 |
| 800 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 4 | 1 | 1 | 86 | 98 | 83 | 99 | 12 | 16 |
| 1000 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 86 | 98 | 77 | 98 | 12 | 21 |
| 1200 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 86 | 99 | 82 | 98 | 13 | 16 |
| 1400 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 88 | 99 | 87 | 100 | 11 | 13 |
| 1500 | 3 | 3 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 86 | 100 | 88 | 99 | 14 | 11 |
| 1600 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 86 | 100 | 88 | 100 | 14 | 12 |
| 1800 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 82 | 100 | 86 | 98 | 18 | 14 |
| 2000 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 80 | 99 | 82 | 98 | 19 | 16 |

| Koivu: 7500 r/min, lastuamissyvyys 8 mm, Jyrsin 8 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 200 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 6 | 1 | 4 | 82 | 97 | 90 | 99 | 15 | 9 |
| 300 | 3 | 4 | 3 | 1 | 2 | 5 | 1 | 3 | 92 | 99 | 96 | 101 | 7 | 5 |
| 400 | 3 | 4 | 2 | 1 | 3 | 5 | 1 | 2 | 84 | 98 | 88 | 99 | 14 | 11 |
| 600 | 2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 4 | 1 | 1 | 80 | 100 | 83 | 98 | 20 | 15 |
| 800 | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 81 | 101 | 86 | 98 | 20 | 12 |
| 1000 | 2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 79 | 101 | 86 | 99 | 22 | 13 |
| 1200 | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 80 | 101 | 87 | 100 | 21 | 13 |
| 1400 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 86 | 102 | 87 | 100 | 16 | 13 |
| 1500 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 89 | 102 | 87 | 101 | 13 | 14 |
| 1600 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 85 | 101 | 87 | 100 | 16 | 13 |
| 1800 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 87 | 102 | 88 | 101 | 15 | 13 |
| 2000 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 79 | 102 | 84 | 101 | 23 | 17 |

| Koivu: 10000 r/min, lastuamissyvyys 4 mm, Jyrsin 8 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 200 | 5 | 6 | 6 | 3 | 4 | 6 | 1 | 5 | 81 | 103 | 91 | 99 | 22 | 8 |
| 300 | 4 | 5 | 3 | 3 | 3 | 5 | 1 | 3 | 95 | 103 | 93 | 98 | 8 | 5 |
| 400 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 1 | 2 | 89 | 100 | 83 | 97 | 11 | 14 |
| 600 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 4 | 1 | 1 | 85 | 99 | 79 | 97 | 14 | 18 |
| 800 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 84 | 97 | 79 | 95 | 13 | 17 |
| 1000 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 85 | 97 | 77 | 97 | 12 | 20 |
| 1200 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 85 | 98 | 78 | 98 | 13 | 20 |
| 1400 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 83 | 102 | 89 | 101 | 19 | 12 |
| 1500 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 85 | 101 | 90 | 100 | 16 | 10 |
| 1600 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 85 | 102 | 92 | 100 | 17 | 8 |
| 1800 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 86 | 102 | 84 | 100 | 16 | 16 |
| 2000 | 3 | 3 | 4 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 79 | 102 | 80 | 100 | 23 | 20 |

| Koivu: 10000 r/min, lastuamissyvyys 8 mm, Jyrsin 8 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|-----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 200 | 4 | 4 | 5 | 1 | 4 | 5 | 1 | 4 | 84 | 96 | 95 | 114 | 12 | 19 |
| 300 | 3 | 4 | 3 | 1 | 3 | 4 | 1 | 3 | 95 | 103 | 96 | 116 | 8 | 20 |
| 400 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 4 | 1 | 2 | 89 | 102 | 102 | 113 | 13 | 25 |
| 600 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 86 | 102 | 86 | 109 | 16 | 25 |
| 800 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 87 | 103 | 87 | 107 | 16 | 20 |
| 1000 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 78 | 101 | 88 | 106 | 23 | 18 |
| 1200 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 71 | 102 | 89 | 107 | 29 | 18 |
| 1400 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 95 | 103 | 90 | 109 | 8 | 19 |
| 1500 | 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 89 | 102 | 92 | 109 | 17 | 17 |
| 1600 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 87 | 103 | 90 | 110 | 20 | 20 |
| 1800 | 3 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 85 | 102 | 88 | 110 | 22 | 22 |
| 2000 | 3 | 2 | 5 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 84 | 102 | 87 | 112 | 25 | 25 |

| Koivu: 15000 r/min, lastuamissyvyys 4 mm, Jyrsin 8 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 200 | 4 | 5 | 4 | 2 | 3 | 6 | 1 | 4 | 90 | 114 | 84 | 113 | 24 | 29 |
| 300 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 5 | 1 | 4 | 95 | 114 | 92 | 109 | 19 | 17 |
| 400 | 1 | 4 | 1 | 2 | 2 | 5 | 1 | 3 | 88 | 110 | 85 | 104 | 22 | 19 |
| 600 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 | 5 | 1 | 2 | 85 | 108 | 82 | 104 | 23 | 22 |
| 800 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 | 4 | 1 | 1 | 84 | 107 | 83 | 106 | 23 | 23 |
| 1000 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 85 | 107 | 82 | 106 | 22 | 24 |
| 1200 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 84 | 106 | 81 | 104 | 22 | 23 |
| 1400 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 84 | 105 | 83 | 103 | 21 | 20 |
| 1500 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 91 | 105 | 80 | 103 | 14 | 23 |
| 1600 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 84 | 106 | 84 | 104 | 22 | 20 |
| 1800 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 85 | 106 | 83 | 104 | 21 | 21 |
| 2000 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 85 | 107 | 83 | 105 | 22 | 22 |

| Koivu: 15000 r/min, lastuamissyvyys 8 mm, Jyrsin 8 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------|-----|----|-----|------|----|
| SN | PI | | NU | | TI | | PA | | ÄÄNET | | | | EROT | |
| | M | P | M | P | M | P | M | P | Mt | Mj | Pt | Pj | M | P |
| 200 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 5 | 1 | 4 | 90 | 114 | 85 | 112 | 16 | 27 |
| 300 | 4 | 4 | 4 | 2 | 3 | 4 | 1 | 3 | 94 | 114 | 93 | 110 | 20 | 17 |
| 400 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 4 | 1 | 2 | 84 | 112 | 85 | 107 | 28 | 22 |
| 600 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 82 | 113 | 82 | 107 | 31 | 25 |
| 800 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 84 | 111 | 83 | 106 | 27 | 23 |
| 1000 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 83 | 110 | 82 | 105 | 27 | 23 |
| 1200 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 83 | 111 | 83 | 104 | 28 | 21 |
| 1400 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 86 | 108 | 81 | 104 | 22 | 23 |
| 1500 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 87 | 108 | 83 | 103 | 21 | 20 |
| 1600 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 89 | 109 | 83 | 104 | 20 | 21 |
| 1800 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 88 | 109 | 84 | 105 | 21 | 21 |
| 2000 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 87 | 110 | 84 | 105 | 23 | 21 |