

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan osasto

Tuotantotekniikan opintosuunta

**DIPLOMITYÖ:**

**KALSIUM-KÄSITTELYN VAIKUTUS MATERIAALIN LASTUTTA-  
VUUTEEN VANNESAHAUKSESSA**

Diplomityön aihe on hyväksytty konetekniikan osaston osastoneuvoston kokouksessa 9.2.2005

Työn tarkastajat:           Professori Juha Varis ja DI Ari Anonen

Työn ohjaajat:             DI Ari Anonen ja Ins. Jari Nykänen

Lappeenrannassa 09.05.2005

Arto Tanskanen  
Korpraalinkuja 3 as 2  
53810 LAPPEENRANTA

## TIIVISTELMÄ

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Tekijä:</b> Arto Tanskanen  |                             |
| <b>Työn nimi:</b> Kalsium-käsittelyn vaikutus materiaalin lastuttavuuteen vannesaha-<br>uksessa  |                             |
| <b>Osasto:</b> Konetekniikan osasto  |                             |
| <b>Vuosi:</b> 2005   | <b>Paikka:</b> Lappeenranta |
| Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.<br>93 sivua, 49 kuvaa, 26 taulukkoa ja 6 liitettä<br>Tarkastajana professori Juha Varis.  |                             |
| <b>Hakusanat:</b> Vannesahaus, vannesahanterä, kalsium-käsittely<br><b>Keywords:</b> Bandsawing, bandsaw blade, calcium treatment  |                             |
| <p>Diplomityö käsittelee aiemmin Suomessa vähän tutkittua metallin vannesahausta. Työ keskittyy lähinnä tangon sahaukseen vaakatyypisellä vannesahalla. Työn teoriaosuudessa luodaan silmäys erityyppisiin vannesahoihin ja perehdytään tarkemmin terän teoriaan, mm. terän valmistukseen, terämateriaaleihin, geometriaan, erilaisiin hammasmuotoihin sekä haritukseen. Lisäksi käsitellään lastuamisparametreja ja lastuamisvoimia vannesahauksessa. Tarkasteltavana on myös vannesahauksen kustannusrakenne ja sen muodostuminen.</p> <p>Kokeellisessa osiossa tutkitaan teräksille suoritettavan lastuttavuutta parantavan kalsium-käsittelyn vaikutusta sahattavuuteen. Kalsium-käsittely parantaa sahattavuutta 15-80 % käytettävästä terämateriaalista ja tarkastelutavasta riippuen.</p> <p>Kokeellisessa osiossa suoritetaan myös terävertailu kolmen eri terän välillä. Terävertailulla pyritään löytämään kustannustehokkain, eli pienimmän kustannuksen katkaisua kohti tuottava terä vertailuun valittujen vaihtoehtojen joukosta. Kustannustehokkaimmaksi teräksi osoittautui Amadan Super HLG M42 Bi-metalliterä.</p> |                             |

## ABSTRACT

**Author:** Arto Tanskanen

**Name of the Thesis:** The influence of calcium treatment on material machinability in bandsawing

**Department:** Mechanical Engineering

**Year:** 2005

**Place:** Lappeenranta

Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology.

93 pages, 49 pictures, 26 tables and 6 appendices

Supervisor Professor Juha Varis.

**Keywords:** Bandsawing, calcium-treatment, bandsaw blade

This master's thesis handles metal bandsawing. The main topic is bar cutting with horizontal bandsaw. Furthermore the theory part of the thesis reports different types of horizontal bandsaws. A closer look is taken to a blade. Blade production, materials, geometry and settings are all under research. Cutting parameters and forces are also introduced and cost calculations are examined.

In the experimentation part of the thesis focus is put on calcium-treatment and its effects on sawability. Calcium treated steel has 15-80 % better machinability, depending on a blade material used and criterion of evaluation.

Another set of tests is made to find the most cost effective blade. There are three new, different types of blades in the test. Comparison between blades is done by using cost per cut-calculations. The most cost effective blade is Amada Super HLG M42.

## **ALKUSANAT**

Vihdoinkin, kuuden kuukauden työrupeama on nyt takana ja työn tulos on käsissäsi. Kääntele sivuja eteenpäin ja pääset tutustumaan vannesahauksen mielenkiintoiseen maailmaan.

Ennen Suomessa tutkimattoman aiheen käsittely diplomityössä oli erittäin mielenkiintoista. Tämän mahdollisuuden tarjoamisesta haluan kiittää Imatra Steelin kehitysosastoa ja sen henkilökuntaa. Erityiskiitokset haluan esittää työn ohjaajille Ari Anoselle ja Jari Nykäselle, unohtamatta työni tarkastajaa Professori Juha Varista. Turengin myyntikonttorin väestä haluan kiittää Hannu Pöntistä sekä erityisesti Jorma Kortosaloa jolta sain apua ja tärkeitä neuvoja työn aikana.

Myös suuret kiitokset ansaitsee yhteistyökumppanina toiminut Fiskars Consumer ja yrityksen laatuinsinööri Petri Savolainen.

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

KUVA- ja TAULUKKOLUETTELOT

LYHENTEET

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>JOHDANTO</b> .....   | <b>1</b>  |
|          | 1.1 TYÖN TAUSTA .....   | 1         |
|          | 1.2 TYÖN TAVOITTEET JA RAJAUS .....                               | 1         |
|          | 1.3 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS .....                                    | 2         |
|          | 1.4 TYÖN RAKENNE.....   | 2         |
| <b>2</b> | <b>IMATRA STEEL OY AB</b> .....                                   | <b>3</b>  |
|          | 2.1 YLEISESITTELY.....  | 3         |
|          | 2.2 TURENGIN TERÄSPALVELUKESKUS.....                              | 3         |
| <b>3</b> | <b>VANNESAHA TYYPIT</b> .....                                     | <b>4</b>  |
|          | 3.1 YKSITUKINEN VAAKAVANNESAHA .....                              | 4         |
|          | 3.2 KAKSITUKINEN VANNESAHA .....                                  | 5         |
|          | 3.3 VANNESAHOJEN TOIMINTA JA TÄRKEIMMÄT KOMPONENTIT .....         | 7         |
|          | 3.4 KOVAMETALLISAHAT .....  | 8         |
|          | 3.5 SAHOJEN AUTOMAATIOASTE .....                                  | 8         |
|          | 3.5.1 <i>Nc-ohjaus</i> .....                                      | 8         |
|          | 3.5.2 <i>Työstön- ja suoruudenvälvonta</i> .....                  | 9         |
|          | 3.5.3 <i>Kehittyneet lastaus- ja lajitteluyksiköt</i> .....       | 9         |
| <b>4</b> | <b>ERI TERÄMATERIAALIT JA TERIEN RAKENNE</b> .....                | <b>10</b> |
|          | 4.1 HIILITERÄSTERÄT .....   | 10        |
|          | 4.2 BI-METALLITERÄT .....   | 10        |
|          | 4.3 KOVAMETALLITERÄT .....  | 12        |
|          | 4.4 PINNOITTEET .....   | 14        |
|          | 4.5 TERIEN VALMISTUSTARKKUUDESTA.....                             | 14        |
| <b>5</b> | <b>TERÄGEOMETRIA</b> .....  | <b>16</b> |
|          | 5.1 HAMMASJAKO JA SEN MERKITYS .....                              | 17        |
|          | 5.1.1 <i>Tasainen jako</i> .....                                  | 17        |
|          | 5.1.2 <i>Vaihteleva jako</i> .....                                | 17        |
|          | 5.1.3 <i>Hammasjaon valinta</i> .....                             | 18        |
|          | 5.2 HAMPAANKORKEUS H .....  | 20        |
|          | 5.3 TERÄN KORKEUS B JA LEVEYS S.....                              | 21        |
|          | 5.4 RINTAKULMA, PÄÄSTÖKULMA, HAMMASKULMA JA NIIDEN MERKITYS ..... | 21        |
|          | 5.4.1 <i>0°-rintakulma</i> .....                                  | 21        |
|          | 5.4.2 <i>Positiivinen rintakulma</i> .....                        | 22        |
|          | 5.4.3 <i>Vaihteleva rintakulma</i> .....                          | 22        |
|          | 5.4.4 <i>Päästökulma</i> .....                                    | 22        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 5.5      | HAMMASMUODOT .....  | 22        |
| 5.5.1    | <i>Standard -hammas</i> .....   | 23        |
| 5.5.2    | <i>Hook-hammas</i> .....  | 23        |
| 5.5.3    | <i>Profiilihammastukset</i> .....   | 24        |
| 5.5.4    | <i>Yhdistelmämuodot</i> .....   | 25        |
| 5.6      | HARITUS.....  | 26        |
| 5.6.1    | <i>Bi-metalliterien yleisimmät haritustavat</i> .....                                     | 26        |
| 5.6.2    | <i>Kovametalliterien haritus</i> .....  | 28        |
| 5.6.3    | <i>Harituksen yhteys syntyvään pinnanlaatuun</i> .....                                    | 29        |
| 5.6.4    | <i>Haritus ja ghosting -ilmiö</i> .....   | 29        |
| 5.6.5    | <i>Yhteenvedo terägeometriasta</i> .....  | 30        |
| <b>6</b> | <b>LASTUNMUODOSTUS VANNESAHAUKSESSA SEKÄ VANNESAHAUKSEN<br/>LASTUAMISPARAMETRIT</b> ..... | <b>32</b> |
| 6.1      | TERÄN JÄNNITYSTASOT.....  | 32        |
| 6.2      | LASTUAMISPARAMETRIT, TUOTTAVUUS/LASTUAMISTEHO .....                                       | 33        |
| 6.3      | LASTUAMISNOPEUS .....   | 34        |
| 6.4      | SYÖTTÖ .....  | 35        |
| 6.5      | LASTUNPAKSUUS.....  | 37        |
| 6.6      | TERÄN KESTOIKÄ .....  | 39        |
| 6.7      | LASTUAMISNESTE VANNESAHAUKSESSA.....  | 40        |
| 6.8      | UUDEN TERÄN SISÄÄNAJO .....   | 41        |
| 6.8.1    | <i>Bi-metalliterän sisäänajo</i> .....  | 42        |
| 6.8.2    | <i>Kovametalliterän sisäänajo</i> .....   | 42        |
| <b>7</b> | <b>TERÄN KULUMISMEKANISMIT JA VAURIOMUODOT</b> .....                                      | <b>43</b> |
| 7.1      | VIISTEKULUMINEN .....   | 43        |
| 7.2      | VÄSYMINEN, VÄSYMISMURTUMA.....  | 44        |
| 7.3      | LOHKEAMINEN / KOVAMETALLIKÄRJEN IRTOAMINEN .....  | 47        |
| 7.4      | VÄRINÄ .....  | 48        |
| 7.5      | TERÄN JUUTTUMINEN.....  | 48        |
| 7.6      | VINO/KIERO SAHAUSPINTA .....  | 49        |
| <b>8</b> | <b>VANNESAHAUKSEN KUSTANNUKSET</b> .....  | <b>50</b> |
| 8.1      | PÄÄOMA - JA KÄYTTÖKUSTANNUKSET .....  | 50        |
| 8.2      | TERÄKUSTANNUKSET .....  | 51        |
| 8.3      | MATERIAALIHUKKAKUSTANNUKSET.....  | 52        |
| 8.4      | LAATUKUSTANNUKSET .....   | 52        |
| 8.5      | KOKONAISKUSTANNUKSET .....  | 53        |
| <b>9</b> | <b>SUORITETTAVAT KOKEET</b> .....   | <b>54</b> |
| 9.1      | SAHAUSKOKEIDEN SUORITTAMINEN.....   | 54        |
| 9.1.1    | <i>Kokeen esivalmistelut</i> .....  | 55        |
| 9.1.2    | <i>Kokeiden suoritus</i> .....  | 56        |
| 9.1.3    | <i>Kokeen jälkeiset toimenpiteet</i> .....  | 57        |
| 9.2      | KOESARJA 1, KALSIIUM -KÄSITTELYN VAIKUTUS SAHATTAVUUTEEN.....                             | 58        |
| 9.2.1    | <i>Kalsium -käsittely</i> .....   | 59        |
| 9.2.2    | <i>Koemateriaalit, kovametalliterätesti</i> .....   | 61        |
| 9.2.3    | <i>Koemateriaalit, Bi-metalliterätesti</i> .....  | 62        |
| 9.2.4    | <i>Kokeissa käytetyt terät</i> .....  | 64        |
| 9.2.5    | <i>Koelaitteistot</i> .....   | 65        |
| 9.2.6    | <i>Kokeen lastuamisarvot</i> .....  | 66        |
| 9.3      | KOESARJA 2, KUSTANNUSTEHOIKKAIMMAN TERÄN MÄÄRITTÄMINEN .....                              | 67        |
| 9.3.1    | <i>Koemateriaali</i> .....  | 67        |
| 9.3.2    | <i>Kokeen terät</i> .....   | 69        |
| 9.3.3    | <i>Koelaitteisto</i> .....  | 70        |
| 9.3.4    | <i>Kokeen lastuamisarvot</i> .....  | 70        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>10 KOESARJOJEN TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELUA.....</b>                                  | <b>72</b> |
| 10.1 KOESARJA 1, KALSIMUM -KÄSITTELYN VAIKUTUS SAHATTAVUUTEEN B-METALLITERILLÄ.            | 72        |
| 10.1.1 Kovametallikokeen tulokset ja niiden tarkastelua .....                              | 74        |
| 10.1.2 Kalsium-käsittelyn vaikutus.....  | 76        |
| 10.2 KOESARJA 2. TERÄVERTAILU .....  | 76        |
| 10.2.1 Kustannustehokkain terä .....   | 76        |
| 10.2.2 Tulosten tarkastelua .....  | 77        |
| <b>11 HAVAINTOJA JA AJATUKSIA TYÖN VARRELTA, SEKÄ JATKOTOIMENPIDE-<br/>EHDOTUKSIA.....</b> | <b>80</b> |
| 11.1 KUSTANNUS PER KATKAISU MENETELMÄSTÄ .....   | 80        |
| 11.2 KOVAMETALLITERÄN KÄYTTÄYTYMINEN BI-METALLITERILLE TARKOITETUISSA SAHOISSA.            | 81        |
| 11.2.1 Kovametalliterän kulumisesta .....  | 82        |
| 11.3 TERÄN POIKKIVÄSYMISESTÄ .....   | 83        |
| 11.4 JATKOTOIMENPITEET .....   | 85        |
| <b>YHTEENVETO.....</b>   | <b>89</b> |

LÄHTEET

LIITTEET

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELOT

### KUVALUETTELO

|   |    |
|---|----|
| <b>KUVA 1.</b> YKSITUKISEN SAHAN TOIMINTAPERIAATE.....                  | 4  |
| <b>KUVA 2.</b> AMADAN HF400-SARJAN SARANATYYPPINEN SAHA.....            | 5  |
| <b>KUVA 3.</b> KAKSITUKISEN SAHAN TOIMINTAPERIAATE.....                 | 6  |
| <b>KUVA 4.</b> BEHRINGERIN B430A KAKSITUKINEN VANNESAHA.....            | 6  |
| <b>KUVA 5.</b> SAHAN TÄRKEIMMÄT KOMPONENTIT.....                        | 7  |
| <b>KUVA 6.</b> BI-METALLITERÄN VALMISTUS /9/.....                       | 12 |
| <b>KUVA 7.</b> KOVAMETALLITERÄN VALMISTUS /9/.....                      | 13 |
| <b>KUVA 8.</b> PINNOITETTU SAHANTERÄ.....                               | 14 |
| <b>KUVA 9.</b> TERÄGEOMETRIAA /8/.....                                  | 16 |
| <b>KUVA 10.</b> TASAINEN JAKO, 3 TPL.....                               | 17 |
| <b>KUVA 11.</b> VAIHTELEVA JAKO.....                                    | 18 |
| <b>KUVA 12.</b> KOSKETUSPITUUKSIA ERILAISISSA SAHAUSTAPAUKSISSA/5/..... | 19 |
| <b>KUVA 13.</b> N-HAMMASTUS.....  | 23 |
| <b>KUVA 14.</b> HOOK-HAMMASTUS.....                                     | 24 |
| <b>KUVA 15.</b> PROTECTOR-HAMMASTUS.....                                | 25 |
| <b>KUVA 16.</b> PROFILE-HAMMASTUS.....                                  | 25 |
| <b>KUVA 17.</b> AMADAN EB II-HAMMASTUS.....                             | 26 |
| <b>KUVA 18.</b> RAKER SET –HARITUS.....                                 | 27 |
| <b>KUVA 19.</b> VARIABLE SET -HARITUS /8/.....                          | 28 |
| <b>KUVA 20.</b> WAVE SET -HARITUS /8/.....                              | 28 |
| <b>KUVA 21.</b> KOVAMETALLITERÄN HARITUS.....                           | 29 |
| <b>KUVA 22.</b> PINNANLAADUN MUODOSTUMINEN VANNESAHAUKSESSA.....        | 29 |
| <b>KUVA 23.</b> GHOSTING –ILMIÖ.....                                    | 30 |
| <b>KUVA 24.</b> LASTUAMISVOIMAT VANNESAHAUKSESSA.....                   | 32 |
| <b>KUVA 25.</b> TERÄN JÄNNITYSTASOT.....                                | 33 |



|  |    |
|--|----|
| <b>KUVA 26.</b> LASTUNMUODOSTUKSEN MUUTOS SYÖTÖN MUUTTUESSA /20/.....                    | 36 |
| <b>KUVA 27.</b> LASTUNPAKSUUS 2TPI HAMMASJAON JA RAKER-SET HARITUKSEN YHTEYDESSÄ. ....   | 38 |
| <b>KUVA 28.</b> LASTUNPAKSUUS ¾ TERÄLLÄ, VARIABLE SET-HARITUKSEN YHTEYDESSÄ /21/.....    | 39 |
| <b>KUVA 29.</b> BI-METALLITERÄN VIISTEKULUMISTA. ....                                    | 43 |
| <b>KUVA 30.</b> HARITUKSEN VAIKUTUS VIISTEKULUMISEEN /20/.....                           | 44 |
| <b>KUVA 31.</b> TERÄN VÄSYMISMURTUMA .....   | 45 |
| <b>KUVA 32.</b> KAHDEKSIKON MUOTOINEN VÄSYNYT TERÄ /25/ .....                            | 46 |
| <b>KUVA 33.</b> ALKANUT VÄSYMISMURTUMA.....  | 46 |
| <b>KUVA 34.</b> IRTI LOHJENNUT PIKATERÄSHAMMAS SIVUSTAPÄIN KUVATTUNA.....                | 47 |
| <b>KUVA 35.</b> KIINNIJUUTTUNEEN TERÄN VAURIOT .....                                     | 49 |
| <b>KUVA 36.</b> TERÄNKIREYSMITTARI. ....   | 55 |
| <b>KUVA 37.</b> VANNENOPEUSMITTARI. ....   | 56 |
| <b>KUVA 38.</b> TYÖKALUMIKROSKOOPPI JA TERÄPIDIN.....                                    | 58 |
| <b>KUVA 39.</b> KALSIMUMKÄSITTELYN VAIKUTUS SULKEUMARAKENTEeseen/32/.....                | 59 |
| <b>KUVA 40.</b> SULKEUMARAKENNE KALSIMUMKÄSITELLYSSÄ MOC 210 M -TERÄKSESSÄ.....          | 60 |
| <b>KUVA 41.</b> MATERIAALIEN KOVUUDET. ....  | 64 |
| <b>KUVA 42.</b> BI-METALLITERIEN VIISTEKULUMINEN SAHAUSKOKEEN LOPETUSHETKELLÄ. ....      | 73 |
| <b>KUVA 43.</b> KOVAMETALLITERIEN VIISTEKULUMINEN SAHAUSKOKEIDEN LOPETUSHETKELLÄ.....    | 75 |
| <b>KUVA 44.</b> NIPPUSAHAUKSEN ONGELMIA. ....  | 79 |
| <b>KUVA 45.</b> SAHAUSRAON LAAJENTUMATTOMUUDESTA JOHTUVAT RAAPAIJÄLJET KAPPALEESSA. .... | 82 |
| <b>KUVA 46.</b> KOVAMETALLITERÄN KULUMISMALLI.....                                       | 83 |
| <b>KUVA 47.</b> TERÄN LIITOSHITSIAUKSEN KOVUUSJAKAUMA.....                               | 84 |
| <b>KUVA 48.</b> LIITOSHITSIN AIHEUTTAMA HAMPaan JA HAMMASPOHJAN MUOTOVIRHE.....          | 84 |
| <b>KUVA 49.</b> HITSIN AIHEUTTAMA TERÄN ASENTOVIRHE.....                                 | 85 |

## TAULUKKOLUETTELO

|   |    |
|---|----|
| <i>TAULUKKO 1. PIKATERÄSTEN SEOSAINEITA /8/</i> .....                           | 11 |
| <i>TAULUKKO 2. TERÄN RUNKOMATERIAALIEN YLEISIÄ KOOSTUMUKSIA /8/</i> .....       | 11 |
| <i>TAULUKKO 3. TASAINEN JAKO, HAMMASJAKOSUOSITUKSIA /7/</i> .....               | 20 |
| <i>TAULUKKO 4. VAIHTELEVA JAKO, HAMMASJAKOSUOSITUKSIA /7/</i> .....             | 20 |
| <i>TAULUKKO 5. LASTUAMISARVOSUOSITUKSIA /5,7,9,13/</i> .....                    | 35 |
| <i>TAULUKKO 6. TERÄN KESTOIKIÄ</i> .....  | 40 |
| <i>TAULUKKO 7. TERÄNKIREYS SUOSITUKSET /23/</i> .....                           | 40 |
| <i>TAULUKKO 8. STANDARDIN 22768-1 ANTAMAT SUORUUSVAATIMUKSET</i> .....          | 57 |
| <i>TAULUKKO 9. MATERIAALIPARIEN SEOSAINEPITOISUUDET, PAINO-%</i> .....          | 61 |
| <i>TAULUKKO 10. FYSIKAALISTEN OMINAISUUKSIEN VERTAILUA</i> .....                | 62 |
| <i>TAULUKKO 11. BI-METALLITESTIN MATERIAALIPARIN SEOSAINEET</i> .....           | 63 |
| <i>TAULUKKO 12. MATERIAALIPARIN FYSIKAALISTEN OMINAISUUKSIEN VERTAILU</i> ..... | 64 |
| <i>TAULUKKO 13. BEHRINGER 220 HBP-SAHAN OMINAISUUDET</i> .....                  | 66 |
| <i>TAULUKKO 14. BEHRINGER 340 A- SAHAN OMINAISUUDET</i> .....                   | 66 |
| <i>TAULUKKO 15. KOESARJAN 1 LASTUAMISARVOT</i> .....                            | 66 |
| <i>TAULUKKO 16. IMATRA 5 SEOSAINEET</i> .....                                   | 68 |
| <i>TAULUKKO 17. MATERIAALIN FYSIKAALISET OMINAISUUDET</i> .....                 | 68 |
| <i>TAULUKKO 18. KOKEEN NIPPUJEN KOOT</i> .....                                  | 69 |
| <i>TAULUKKO 19. BEHRINGER 303 A –SAHAN OMINAISUUDET</i> .....                   | 70 |
| <i>TAULUKKO 20. TERÄNKESTOKOESARJAN LASTUAMISARVOT</i> .....                    | 70 |
| <i>TAULUKKO 21. BI-METALLIKOKEEN TULOKSET</i> .....                             | 72 |
| <i>TAULUKKO 22. KOVAMETALLIKOKEEN TULOKSET</i> .....                            | 74 |
| <i>TAULUKKO 23. KOESARJAN 2 TULOKSET</i> .....                                  | 76 |
| <i>TAULUKKO 24. KUSTANNUS PER KATKAISU- LASKELMAN TULOKSET</i> .....            | 77 |
| <i>TAULUKKO 25. TERÄN KULUMISMITTAUKSET</i> .....                               | 86 |
| <i>TAULUKKO 26. UUDET LASTUAMISARVOSUOSITUKSET</i> .....                        | 88 |

## LYHENTEET

|                    |                        |                                       |
|--------------------|------------------------|---------------------------------------|
| A                  | [cm <sup>2</sup> ]     | poikkipinnan ala                      |
| b                  | [mm]                   | terän korkeus                         |
| F <sub>c</sub>     | [N]                    | päälastuamisvoima                     |
| F <sub>f</sub>     | [N]                    | syöttövoima                           |
| f <sub>k</sub>     | [mm/min]               | keskimääräinen syöttö                 |
| F <sub>p</sub>     | [N]                    | passiivivoima                         |
| h                  | [mm]                   | hammaskorkeus                         |
| h <sub>i</sub>     | [mm]                   | teoreettinen lastunpaksuus            |
| h <sub>kpl</sub>   | [mm]                   | sahattavan kappaleen korkeus          |
| h <sub>1n</sub>    | [mm]                   | hammaskohtainen lastunpaksuus         |
| KTH                | [€/h]                  | konetuntihinta                        |
| lg t <sub>pi</sub> |                        | logaritminen hammasjakokerroin        |
| MKH                | [€/kg]                 | materiaalin kilohinta                 |
| MTHK               | [€/kpl]                | materiaalihukkakustannus per katkaisu |
| P <sub>s</sub>     | [cm <sup>2</sup> /min] | keskimääräinen tuottavuus             |
| P <sub>smax</sub>  | [cm <sup>2</sup> /min] | suurin mahdollinen tuottavuus         |
| s                  | [mm]                   | teränpaksuus                          |
| t                  | [mm]                   | hammasjako                            |
| t <sub>s</sub>     | [min]                  | profiilin katkaisuun käytetty aika    |
| TKK                | [€/kpl]                | teräkustannus per katkaisu            |
| TPI                |                        | teeth per inch, hammasta tuumaa kohti |

|          |         |                           |
|----------|---------|---------------------------|
| $V_c$    | [m/min] | lastuamisnopeus           |
| $w$      | [mm]    | harituksen kokonaisleveys |
| $\sigma$ | [Mpa]   | jännitys                  |
| $\alpha$ | [°]     | rintakulma                |
| $\beta$  | [°]     | päästökulma               |
| $\gamma$ | [°]     | hammaskulma               |

# 1 JOHDANTO

## ***1.1 Työn tausta***

Imatra Steelin tärkeitä osaamisalueita ovat teräksen valmistuksen lisäksi lastuaminen ja väsyminen. Osaamisen tasoa molemmilla osa-alueilla pyritään parantamaan ja kehittämään jatkuvasti. Viimeisen 15 vuoden aikana metallin vanne-sahausrintamalla on tapahtunut paljon. Sahakoneet ovat kehittyneet huomattavasti ja terätekniikkapuolella kovametalli terämateriaalina on tekemässä samaa läpimurtoa, jonka se teki sorvaustyökalujen ja porien kohdalla jo vuosikymmenet sitten. Sahaus on muuttamassa asemaansa välttämättömästä pahasta ennen varsinaisen lastuamistyön alkua tärkeäksi osaksi valmistusprosessia.

Imatra Steelin kehityskeskuksessa on havaittu myös sahauksen uusi tuleminen ja aihepiiriin liittyen osaamista halutaan lisätä. Lisäksi myötävaikuttamassa tämän työn teettämiseen on ollut Imatra Steelin Turengin myyntikonttorin halu kehittää siellä suuressa määrin toteutettavaa sahaustoimintaa.

## ***1.2 Työn tavoitteet ja raja us***

Työn tavoitteena oli luoda käsikirjamainen teos vanne-sahauksesta lähtien erilaisista sahatyypeistä, käsitellen erilaiset terämateriaalit ja terän geometriset ratkaisut, perehtyä lastuamisparametreihin ja lastunmuodostukseen sekä luoda katsaus kustannusrakenteen muodostumiseen vanne-sahauksessa.

Tutkimusosiossa keskitytään tarkastelemaan kalsium -käsittelyn vaikutusta terän kestoikään. Onko sahausessa saavutettavissa samanlainen, jopa 400% eroavaisuus teränkestoikässä kalsium-käsitellyn materiaalin eduksi kuten parhaimmillaan sorvauksessa.

Lisäksi suoritettiin terävertailu kolmen eri terätyypin välillä, joilla ajateltiin ole-

van uutuusarvoa Turengin myyntikonttorin tuotantoa silmällä pitäen. Testauksen yhteydessä saatiin arvokasta myös tietoa kovametalliterien toimivuudesta vanhemmissa (pikateräs) Bi-metalliterille tarkoitetuissa sahoissa sekä kustannusrakenteen muodostumisesta sahauksessa.

### **1.3 Tutkimuksen toteutus**

Teoriaosuuden osalta tutkimus suoritettiin mm. tekemällä kirjallisuus ja tietokanta hakuja sekä haastattelemalla terien ja sahakoneiden maahantuojia.

Tutkimusosuus suoritettiin Imatra Steelin kehityskeskukseen laboratoriossa, Turengin myyntikonttorissa sekä yhteistyönä Fiskars Consumerin kanssa heidän sahoillaan. Tutkimusosuudessa jouduttiin rajautumaan sangen pieneen koematriisiin johtuen terän pitkästä kestoiästä.

### **1.4 Työn rakenne**

Työ sisältää teorialuvut 3-8 joissa käsitellään vannesahoja, eri terämateriaaleja ja terän valmistusta, terägeometriaa, lastunmuodostusta ja lastuamisparametrejä, terän kulumismekanismeja sekä vannesahauksen kustannuksia.

Teorialukujen pohjalta suunnitellut ja suoritettut kokeet sekä niiden tulokset löytyvät luvuista 9-10 ja luvussa 11 on analysoitu saatuja tuloksia sekä esitetty jatko-toimenpiteet kokeiden perusteella.

## **2 IMATRA STEEL OY AB**

### ***2.1 Yleisesittely***

Imatra Steel on Wärtsilä-konserniin kuuluva romusta erikoisteräksiä valmistava terästehdas. Vuotuinen toimitusmäärä on n. 240 tuhatta tonnia ja tehtaan henkilöstömäärä on n. 670. Imatra Steelin liikevaihto oli vuonna 2003 n. 120 miljoonaa euroa. Tehtaan päämarkkina-alueet ovat kotimaa, Skandinavia sekä Keski-Eurooppa /1/.

Imatra Steelin valmistusohjelmaan kuuluu noin 300 erilaista teräslajia, joista suurin osa on erikoissovellutuksia asiakkaille. Valmistusohjelmassa on pyörö-, neliö-, ja lattatankoa sekä kierretankoa rajoitetusti. Pyörötankojen toimitushalkaisija-alue on 25-200 mm. Toimitettavien neliö- ja lattaprofiilien leveysmitat vaihtelevat välillä 40-260 mm paksuusmitta-alueen ollessa 7-60 mm. Toimitettavien profiilien pituus vaihtelee välillä 3,5 – 10 metriä /1/.

### ***2.2 Turengin teräspalvelukeskus***

Turengin teräspalvelukeskus on pääasiassa kotimaan markkinoille Imatran teräksiä toimittava jatkojalostuslaitos. Turengin teräspalvelukeskuksessa työskentelee n. 20 henkeä. Vuotuinen toimitettu tonnimäärä on n. 90 tuhatta tonnia, josta suurin osa määrämittaan katkaistuna.

Turengin jatkojalostustoimintaan kuuluu aihoiden määrämittaan katkaisu sekä asiakkaan halutessa tangonpäiden oikaisusorvaus ja keskiöporausten teko. Katkaisua varten Turengissa on viisi erilaista vannesahaa ja päiden oikaisu ja keskiöinti tapahtuu päiden oikaisukoneella.

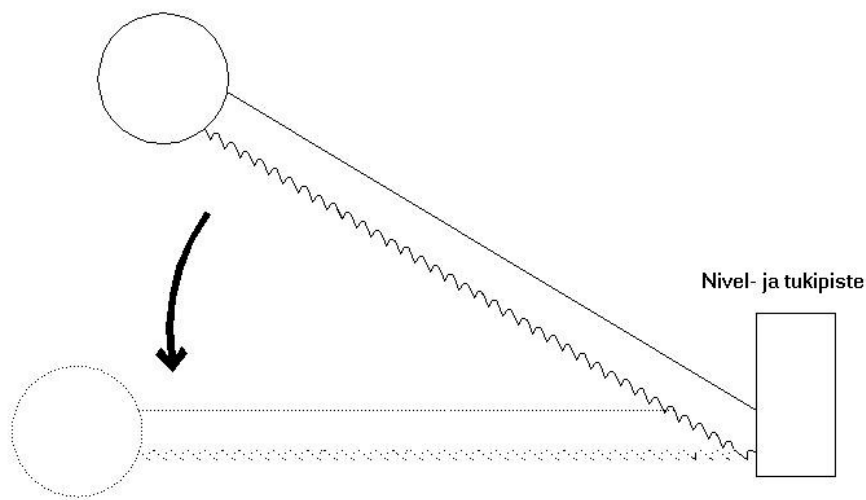
### 3 VANNESAHATYYPIT

Seuraavassa kappaleessa on esitelty erilaiset vaakavannesahatyypit. Luvussa käsitellään ainoastaan vaakavannesahoja, koska tangon tuotantokatkaisuun tarkoitettut vannesahat ovat muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta vaakavannesahoja. Luvussa käsitellään myös vannesahan tärkeimpiä komponentteja ja niiden toimintaa sekä sahojen tämänhetkistä automaatioastetta.

Vannesahat voidaan toimintatapansa mukaan jakaa sekä pysty- että vaakavannesahoihin. Vaakasahat voidaan vielä runkorakenteensa mukaan jakaa yksi- ja kaksitukisiin sahatyyppeihin. Lisäksi vaakasahoista on erilaisia kulma- ja palkkisahaukseen tehtyjä muunnelmia.

#### 3.1 Yksitukinen vaakavannesaha

Yksitukinen vannesaha eli ns. ”sarana”-saha on tuettu vain yhdestä pisteestä ja sahasa terän syöttöliike tapahtuu kiertyen tämän tukipisteen ympäri. Alla oleva kuva 1 selkeyttää sahan toimintaperiaatetta.



**Kuva 1.** Yksitukisen sahan toimintaperiaate.



Yksitukinen saha ei periaatteessa tee tasapaksua lastua, vaan lastu paksunee kuljettaessa kohti tukipistettä.

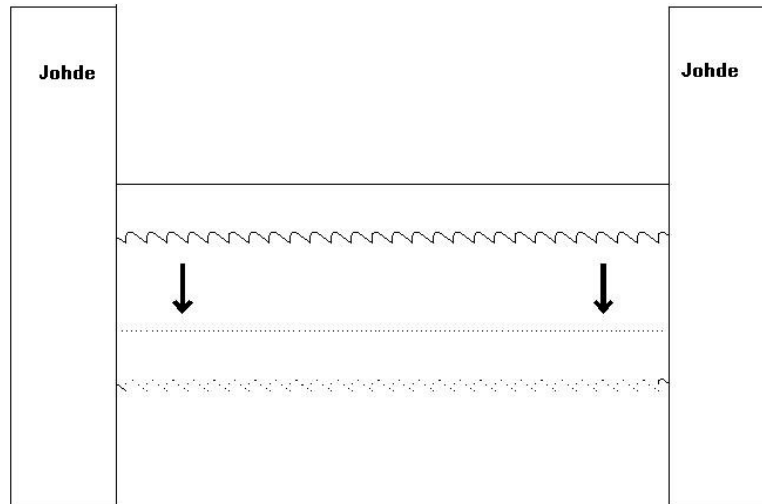
Yksitukisten vannesahojen kokoluokka vaihtelee ihan pienistä, metrin teräkehällä olevista sahatyypeistä aina lähes kymmenmetrisellä terällä varustettuihin todella suuriin tuotantosahoihin. Yksitukinen sahatyyppi soveltuu niin umpiaineiden kuin erilaisten profiilien sahaukseen. Alla olevassa kuvassa 2 on Amadan HF400-sarjan saranatyyppinen saha /2,3/.



**Kuva 2.** Amadan HF400-sarjan saranatyyppinen saha.

### **3.2 Kaksitukinen vannesaha**

Kaksitukisessa vannesahassa teräkelkka on kahdella johteella eli tuettu molemmilta puolin sahattavaa kappaletta, ja syöttöliike tapahtuu suoraviivaisesti alaspäin. Kaksitukinen saha muodostaa siis täysin tasapaksua lastua koko sahauksen ajan. Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu kaksitukisen sahan toimintaperiaatetta. Kaksitukisen vannesahan terä voi olla kallistettu 3-4 astetta parantamaan nippusahausominaisuuksia.



**Kuva 3.** Kaksitukisen sahan toimintaperiaate.

Kaksitukisia vaakavannesahoja on myöskin hyvin erikokoisia lähtien aina pienistä parin metrin teräkehällä varustetuista sahoista aina lähes kymmenmetrisen terän omaaviin jättimäisiin tuotantosahoihin. Kuvassa 4 on behringerin kaksitukinen tuotantosaha B430 A / 4 /.



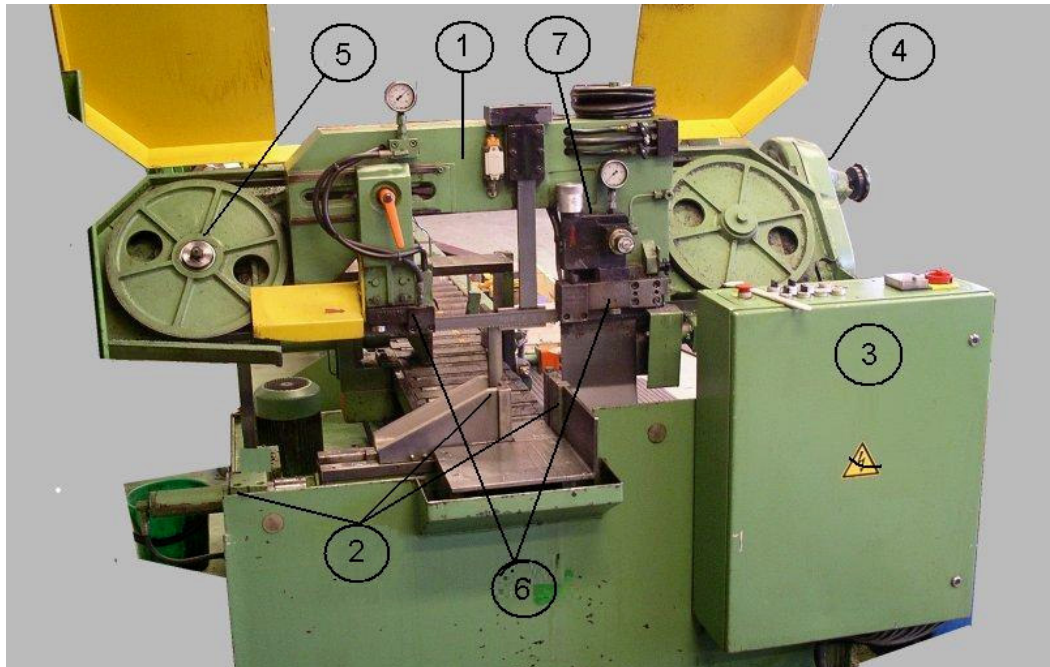
**Kuva 4.** Behringerin B430A kaksitukinen vannesaha.

### 3.3 Vannesahojen toiminta ja tärkeimmät komponentit

Vannesaha koostuu seuraavista komponenteista:

- 1. Runko
- 2. Kappaleen kiinnitysleuat sekä sylinterit
- 3. Ohjauslogiikka
- 4. Vaihteisto
- 5. Vannepyörät
- 6. Teräohjaimet ja -rullat
- 7. Hydraulikkapaineen säätöventtiilit

Alla olevassa kuvassa on esitelty komponenttien sijainti sahasa.



**Kuva 5.** Sahan tärkeimmät komponentit.

Vannesahassa yhtenäiseksi vanteeksi hitsattu terä kiertää tiukalle kiristettynä terä-

pyörien ympäri. Terä taivutetaan pystysuuntaan ohjainrullien ja teräohjainten avulla. Ohjainrullat tekevät esikäännön hydraulisten teräohjaimien väliin ja teräohjaimet suoristavat terän molemmin puolin sahaustapahtumaa. Teräohjaimet ovat kovametallia ja niitä painetaan vasten terää hydraulilla.

Terää syötetään tiukasti leukojen välissä kiinni olevaan sahattavaan kappaleeseen joko hydraulisesti tai painovoimaisesti taikka molempia tapoja yhdistäen. Hydraulisessa syötössä terää sekä painetaan hydraulilla yläpuolelta että jarrutetaan alapuolelta. Näin saadaan tarvittaessa aivan tasainen syöttöliike. Terää voidaan syöttää ”painovoimaisestikin” säätämällä alapuolen vastustava paine pieneksi.

Painovoimaisessa syöttöliikkeessä terä painuu kappaleeseen sahan teräpään omalla massalla ja sitä jarrutetaan tarvittaessa hydraulilla /3/.

### **3.4 Kovametallisahat**

Tällä hetkellä markkinoille on tullut uutuutena kovametalliterillä sahaukseen tarkoitettuja sahoja. Kovametallisaha poikkeaa vain muutamilta ominaisuuksiltaan Bi-metalliterille tarkoitettusta sahasta, joista tärkeimpinä mainittakoon hidas sahattavaan kappaleeseen sisään- ja ulossyöttö sekä sahausraon laajennus terän noustessa ylös sahauksen jälkeen. Myös lastuamisnestettä ruiskutetaan kovametallisahoissa yleensä todella runsaasti verrattuna perinteisiin Bi-metallisahaukseen tarkoitettuihin sahoihin /3, 5/.

### **3.5 Sahojen automaatioaste**

Vannesahat ovat kehittyneet kovasti viimeaikoina. Markkinoille on tullut mm. kehittynyt nc- ohjaus, joka lisää merkittävästi sahauksen tehokkuutta. Seuraavissa kappaleissa on esitelty kehityksen mukanaan tuomia tärkeimpiä uudistuksia.

#### **3.5.1 Nc-ohjaus**

Nykyaikaiset nc -ohjaukset sisältävät valmiit sahausohjelmat. Käyttäjän tarvitsee

vain asettaa ohjaimen kappaleen muoto-, materiaali- ja mittatiedot ja saha sahaa siihen ohjelmoituilla parametreilla optimaalisimmin kappaleen poikki. Lisäksi ohjelmistot sisältävät automaattisen uuden terän sisäänajo-ohjelman katkaistavan materiaalin ja käytössä olevan terämateriaalin mukaan. Nc -ohjauksen myötä myös sahausparametrien seuranta on helppoa suoraan koneen näytöltä. Nc-ohjatun syöttöliikkeen- ja lastuamisnopeuden säädön ansiosta sahausparametrit ovat todellakin sitä, mihin ne on asetettu /5, 6/.

### 3.5.2 Työstön- ja suoruudenvälvonta

Uusissa sahatyypeissä on sekä työstövoiman- että sahaussuoruuden valvonta. Koneeseen voidaan asettaa rajat, joita suoruus- ja työstövoimat eivät saa ylittää tai sahaus keskeytyy. Suoruuden valvonnassa käytetään yleisesti induktiivisia antureita ja syöttövoimaa taas valvotaan kontrolloimalla syöttöpainetta sekä moottoritehoa /3/.

### 3.5.3 Kehittyneet lastaus- ja lajitteluyksiköt

Kehittynyt nc- ohjaus on mahdollistanut pitkien sahausohjelmien teon ja tämä on muodostanut tarpeen niin sahauksen jälkeiselle lajittelulle, kuin automaattiselle syöttöyksikölle, joka syöttää sahalle tankoja tarpeen mukaan. Sahaushalkaisijan ja muodon vaihtelu ilman valvontaa mahdollistuu tangonpään automaattisen haun ja oikaisusahauksen myötä. Tehokkuutta parantaa vielä lisää automaattinen sahauksen aloituskorkeuden säätö kappaleen halkaisijan mukaan /6/.

## **4 Eri terämateriaalit ja terien rakenne**

Terästen sahauksessa käytettävät terät ovat yleisesti hiili- pikateräs- tai kovametalliteriä. Lisäksi erilaisissa vannesahauksen erikoissovellutuksissa käytetään timmi- sekä karbidi-pinnoitettuja teriä. Tässä tarkastelussa keskitytään vain kolmeen ensimmäisenä mainittuun työn rajauksesta johtuen.

### **4.1 Hiiliterästerät**

Hiiliterästerät ovat nimensä mukaisesti tehty kevyesti seostetuista hiiletysteräkistä. Sekä terän runko että hampaat ovat samaa materiaalia, mutta hampaat ovat kärkekkäisiä. Näin terään on saatu kovuutta mikä mahdollistaa terän leikkaavuuden terärungon jäädessä kuitenkin väsymiskestäväksi. Hiiliterästerien karkaistujen hampaiden kovuus on välillä 800-900 HV ja päästölämpötila, jossa terän pehmeneminen alkaa, on n. 200 °C /7/.

Hiiliterästerät ovat tarkoitettu pehmeiden terästen sekä pehmeiden ei-rautametallien, muovin ja puun sahaukseen. Matala terän päästölämpötila sallii vain matalia lastuamisnopeuksia ja kevyitä syöttöjä. Pienet sarjat ja vaihteleva tuotanto sopivat hiiliterästerille, eli kysymyksessä on helppoon sahaukseen tarkoitettu yleisterämateriaali /7/.

### **4.2 Bi-Metalliterät**

Bi-metalliterä koostuu jousiteräksisestä rungosta ja pikateräksestä tehdystä hampaasta. Jousiteräksinen runko antaa terälle hyvät väsymiskestävyysominaisuudet ja kova pikateräshammas taas takaa pitkän käyttöiän. Bi-metalliterissä käytetään ainakin neljää erityyppistä pikateräslaatua. Käytetyt laadut ovat Matrix 2, M42, M51 sekä M71. Bi-metalliterien kovuus on yleensä välillä 900-1000 HV ja terämateriaalin pehmenemislämpötila on n. 600 °C. Bi-metalliterillä on siis huomattavasti korkeampi päästölämpötila kuin hiiliterästerillä ja tästä johtuu niiden huo-

mattavasti korkeampi suorituskyky niin sahaus- kuin syöttönopeuksien suhteen verrattuna hiiliteräksiin. Taulukossa 1 on esitelty edellä mainittujen pikateräslaatujen tyypillisiä koostumuksia käytettäessä niitä vannesahanteriin ja taulukossa 2 on tyypillisiä terärunkomateriaalien koostumuksia. /7, 8/

*Taulukko 1. Pikaterästen seosaineita /8/.*

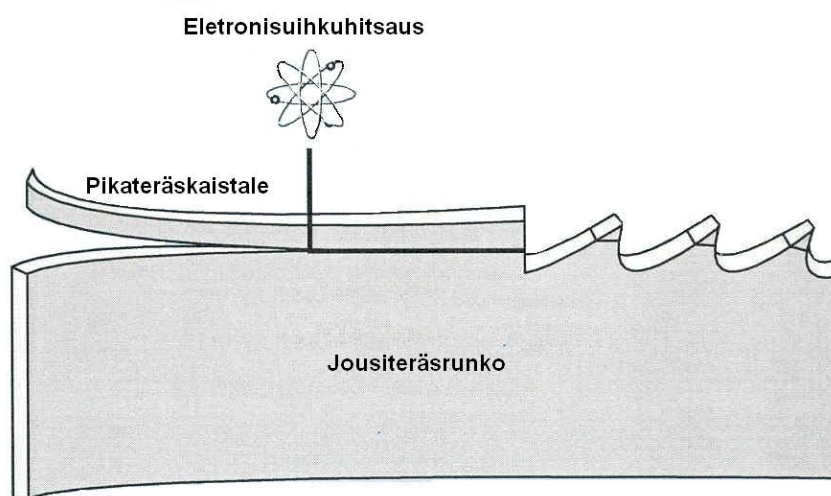
| DIN          | S-6-5-2                   | S2-10-1-8    | S10-4-3-10   | S1-5-1-8    |
|--------------|---------------------------|--------------|--------------|-------------|
| AISI/SAE     | M2                        | M42          | M51          |             |
| Mainosnimi   |                           |              |              | Matrix2     |
| Seosaine     | kem. Seosaineet-[paino-%] |              |              |             |
| <b>C</b>     | 0.80-0.90                 | 1.00-1.1     | 1.2-1.35     | 0.7-0.75    |
| <b>Si</b>    | 0.15-0.4                  | 0.15-0.40    | < 0.45       | 0.15 - 0.30 |
| <b>Mn</b>    | 0.20-0.45                 | 0.20-0.45    | < 0.40       | 0.15 - 0.35 |
| <b>P max</b> | 0.030                     | 0.030        | 0.025        | 0.030       |
| <b>S max</b> | 0.030                     | 0.030        | 0.025        | 0.030       |
| <b>Co</b>    | -                         | 7.75 - 8.75  | 9.50 - 10.50 | 7.75 - 8.25 |
| <b>Cr</b>    | 3.75-4.5                  | 3.50 - 4.25  | 3.80 - 4.50  | 3.80 - 4.40 |
| <b>Mo</b>    | 4.50-5.50                 | 9.00 - 10.00 | 3.20 - 3.90  | 4.75 - 5.25 |
| <b>V</b>     | 1.6-2.2                   | 1.00 - 1.50  | 3.00 - 3.50  | 0.80 - 1.10 |
| <b>W</b>     | 5.5-6.75                  | 1.25 - 2.00  | 9.00 - 10.00 | 0.80 - 1.20 |

*Taulukko 2. Terän runkomateriaalien yleisiä koostumuksia /8/.*

| DIN           | 51CrV4                    | X32CrMoV4-1 | 46CrV4      |             |
|---------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|
| AISI/SAE      | 6150                      |             |             | 6135        |
| Seosaine      | kem. Seosaineet-[paino-%] |             |             |             |
| <b>C</b>      | 0,47 - 0,55               | 0,29 - 0,33 | 0,42 - 0,55 | 0,32 - 0,38 |
| <b>Si</b>     | 0,20 - 0,40               | 0,20 - 0,35 | 0,10 - 0,30 | 0,20 - 0,35 |
| <b>Mn</b>     | 0,70 - 1,10               | 0,90 - 1,10 | 0,60 - 0,90 | 0,60 - 0,90 |
| <b>P max.</b> | 0,02                      | 0,02        | 0,03        | 0,02        |
| <b>S max.</b> | 0,02                      | 0,01        | 0,03        | 0,02        |
| <b>Cr</b>     | 0,90 - 1,20               | 3,80 - 4,00 | 0,90 - 1,20 | 0,80 - 1,10 |
| <b>Ni</b>     | -                         | 0,60 - 0,80 | 0,40 - 0,70 | -           |
| <b>Mo</b>     | -                         | 1,00 - 1,20 | 0,90 - 1,10 | -           |
| <b>V</b>      | 0,10 - 0,25               | 0,30 - 0,40 | 0,08 - 0,15 | 0,15-0,25   |

Bi-metalliterän valmistus tapahtuu alla olevan kuvan 6 mukaisesti. Ensimmäisessä vaiheessa jousiteräksiseen runkoon hitsataan elektronisuihku- tai laserhitsauksella kaistale pikaterästä. Tämän jälkeen hitsisauma tarkastetaan ja poistetaan hitsausvirheelliset kohdat. Seuraavaksi terä hiotaan tarkkaan paksuuteen, jyrskittää/hiotaan hammasmuoto, lämpökäsitellään ja lopuksi taivutetaan terään sopiva haritus. Tämän jälkeen vuorossa on terän katkaisu sopivan pituiseksi ja liitoshit-

saus vanteeksi.



**Kuva 6.** Bi-metalliterän valmistus /9/.

Bi-metalliterien käyttöalue on paljon laajempi kuin hiiliterästerien johtuen suuremmasta hammaskovuudesta sekä korkeammasta päästölämpötilasta. Lisäksi Bi-metalliteriä on saatavana lukuisia erilaisia hammastus- ja haritusvaihtoehtoja verrattuna hiiliterästeriin mikä laajentaa entisestään Bi-metalliterien käyttömahdollisuuksia. Tällä hetkellä erilaiset Bi-metalliterät ovatkin ylivoimaisesti käytetyimpiä terästen sahauksessa. Käyttökohteet vaihtelevat helpoista koneteräksistä aina vaativiin jopa 50 HRC: n kovuisiin karkaistuihin hiiletysteräksiin /8,9,10/.

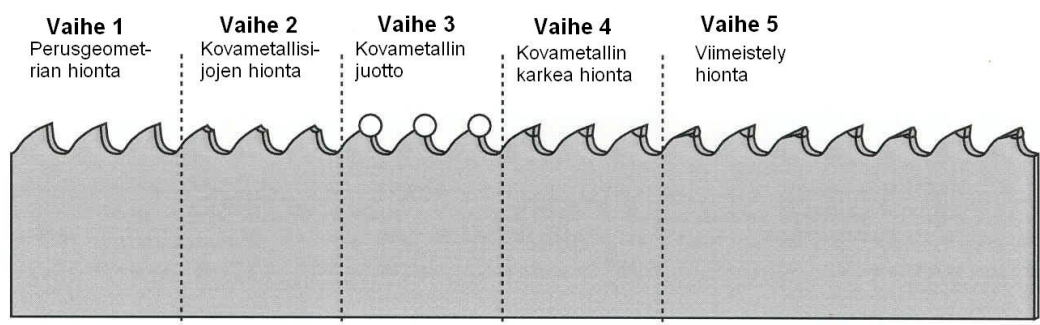
#### **4.3 Kovametalliterät**

Kovametalliterä on myöskin kaksiosainen Bi-metalliterän tapaan. Kovametalliterässä kärjet on vain hitsauksen sijasta kiinnitetty juottamalla. Kovametalliterissä käytetään yleensä kovametallilaatuja M30 sekä K20 ja käytettyjen kovametallilaatujen kovuus vaihtelee välillä 1500-1600 HV. Pehmenemis- eli päästölämpötila on n. 800 °C, mikä laajentaa edelleen terän käyttöaluetta huomattavasti verrattuna Bi-metalliteriin. Yleisesti M30 kovametallilaatu on käytetty austeniittisten eli ruostumattomien terästen koneistuksessa ja laatua K20 taas käytetään valu-



rautojen koneistukseen. Kyseessä on siis kovametalleiksi melko pehmeät, kuluttavaan työstöön tarkoitetut terämateriaalit /3/.

Terän valmistus alkaa jousiteräksestä tehtyyn runkoon koneistamalla aikaan saatavien teräpalasijojen valmistuksella, jonka jälkeen vuorossa on teräpalojen paikoilleen juottaminen. Juottamista seuraa palojen muotoon hionta sekä viimeistelyhionta, jossa terään hiotaan mm. Bi- metalliterien haritusta vastaavat kevennykset. Tämän jälkeen terä voidaan vielä pinnoittaa valmistajasta riippuen esimerkiksi titaaninitridillä. Tämän jälkeen terä onkin valmis liitoshitsattavaksi vanteeksi sekä sisäänajoa vaille valmis käytettäväksi. Kuvassa 7 on kaavio terän valmistuksesta.



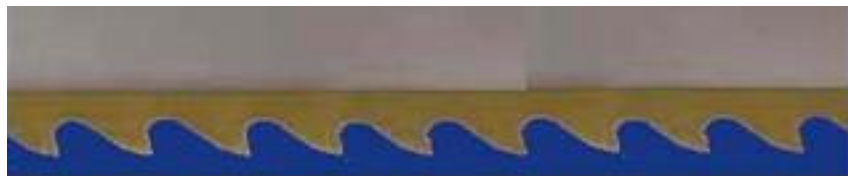
**Kuva 7.** Kovametalliterän valmistus /9/.

Kovametalliteriä käytetään tällä hetkellä n. 5-10 % kaikesta tapahtuvasta sahauksesta Suomessa. Pääasialliset käyttökohteet ovat kovien, hankalien materiaalien sahauksessa sekä työstökarkenevien materiaalien, kuten ruostumattoman teräksen sahauksessa. Kovametallilla on mahdollista sahata jopa 62 HRC kovia karkaisuja teräksiä. Lisäksi jo mainittu suurempi terämateriaalin päästölämpötila mahdollistaa jopa 150-160 m/min lastuamisnopeudet ns. koneterästen sahauksen yhteydessä. Kovametalliterien käyttöä rajoittaa tällä hetkellä niiden suhteellisen paljon korkeampi hinta verrattuna Bi-metalliteriin, kovemmat vaatimukset sekä sahan moottoriteholle että tukevuudelle ja yksinkertaisesti käyttöön liittyvän tietämyksen puute. Muutama osaamaton osaamattomuudesta johtuva kallis

terärikkö kovametallin käytön yhteydessä kääntää huomion nopeasti takaisin Bi-metalliteriin /11/.

#### **4.4 Pinnoitteet.**

Sekä Bi-, että kovametalliteriä on saatavana tällä hetkellä pinnoitettuina ainakin kahdelta terävalmistajalla. Pinnoitteena käytetään titaaninitridiä ja terästä vain hammasosa on pinnoitettu. Pinnoitteen kovuus on n. 2300 HV ja paksuus n. 0,5 µm. Kuvassa 8 on esimerkki pinnoitetusta vannesahan terästä. Laboratoriotestauksissa on todettu pinnoitteiden, jotka peittävät koko terän, lisäävän terän väsymiskestävyttä huomattavasti, jopa n.  $10^6$  sykliä /5, 12/.



**Kuva 8.** Pinnoitettu sahanterä.

#### **4.5 Terien valmistustarkkuudesta**

Kuten edellä mainittiin on kovametalliterän hammastus aina valmistettu hiomalla, mutta Bi-metalliterän hammastus voi olla jyrsimä tai hiottu. Hiomalla valmistetut Bi-metalliterät ovat vasta löytämässä tietään markkinoille.

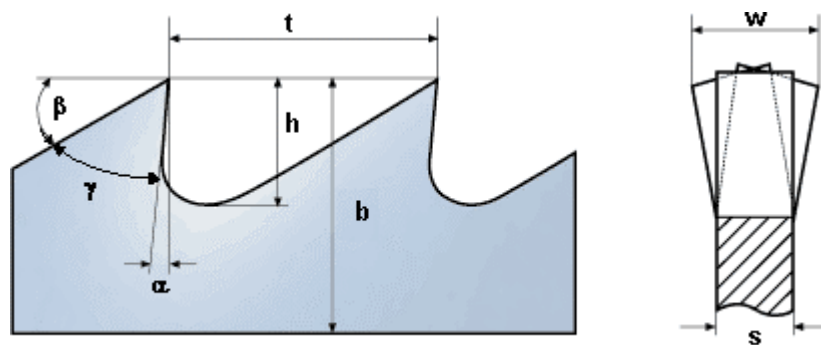
Hiomalla valmistetun terän hampaan korkeus on toleranssialueella  $\pm 0,06$  mm, kun taas jyrsimällä valmistetun hampaan tarkkuus on luokkaa  $\pm 0,1$  mm. Tämän vuoksi kuluminen on tasaisempaa hiomalla valmistetussa terässä ja teränkestoikä voi olla jopa 50 % parempi kuin vastaavassa jyrsimällä valmistetussa terässä.

Hiomalla valmistetun hampaan rintapinta on luonnollisesti sileämpi kuin jyrsimällä valmistetussa. Sahauksessa kehittyvästä lämmöstä 75 % muodostuu lastunmuodostuksesta ja muovautumisesta, 20 % kitkasta ja 5 % työkappaleen pin-

nan ja hampaan välisestä muovausvastuksesta. Sileämpi hampaan rintapinta aiheuttaa vähemmän kitkaa ja pienentää muovausvastusta. Seurauksena on vähemmän lämpöä, joka jatkaa myös terän kestoikää tai on kompensoitavissa korkeammilla käytettävillä lastuamisnopeuksilla /30,31/.

## 5 TERÄGEOMETRIA

Alla olevissa kappaleissa paneudutaan vannesahanterän perusgeometriaan ja sen vaikutukseen tarkasteltaessa terän eri ominaisuuksia. Tarkasteltavana on mm. hammasjako, haritus, rinta-, hammas- ja päästökulma, hampaan muotoilu sekä terän korkeus. Vannesahan terään liittyvä perusgeometria on esitelty selityksineen alla olevassa kuvassa 9.



**Kuva 9.** Terägeometriaa /8/

missä:

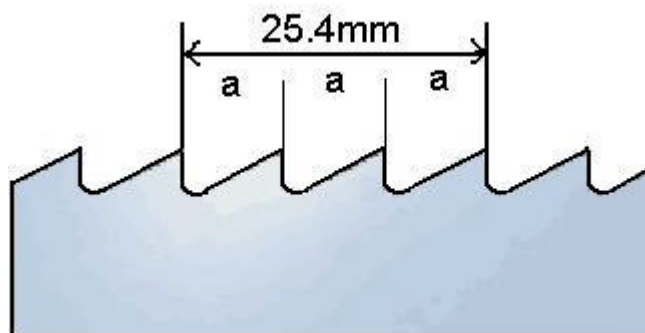
|          |                             |
|----------|-----------------------------|
| $\alpha$ | = rintakulma                |
| $\beta$  | = päästökulma               |
| $\gamma$ | = hammaskulma               |
| b        | = terän korkeus             |
| h        | = hammaskorkeus             |
| t        | = hammasjako                |
| s        | = teränpaksuus              |
| w        | = harituksen kokonaisleveys |

## 5.1 Hammasjako ja sen merkitys

Vannesahan terien yhteydessä puhutaan hammasjaosta, jolla tarkoitetaan lukua montako hammasta terässä on pituusyksikköä kohti. Yleensä ilmoitetaan hampaiden lukumäärä tuumaa kohti. Esimerkiksi merkintä 3TPI tarkoittaa että terässä on kolme hammasta tuumaa kohti. Hammasjako voi olla tasainen tai vaihteleva, riippuen sovelluksesta johon terää käytetään /13/.

### 5.1.1 Tasainen jako

Tasaisessa hammasjaossa hampaiden väli ja hampaiden välinen lastutilavuus ovat yhtä suuria. Tällöin jokaiseen hampaaseen kohdistuu yhtä suuri paine ja terän kuluminen on tasaista. Kuvassa 10 on esimerkki tasaisesta hammasjaosta. Tasaisella hammasjaolla olevia teriä on saatavana eri jaoilla alkaen 1:stä aina 32:een asti /13/.

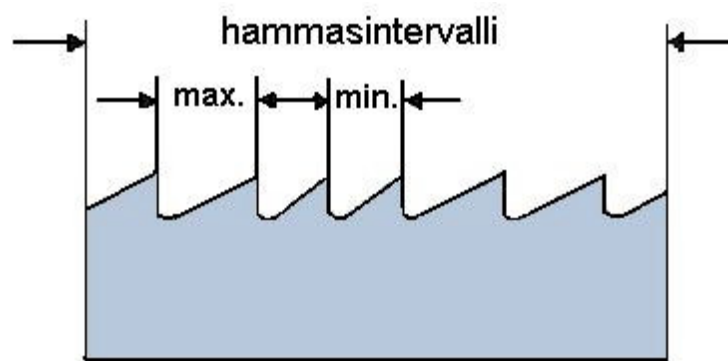


**Kuva 10.** Tasainen jako, 3 TPI.

### 5.1.2 Vaihteleva jako.

Vaihtelevalla hammasjaolla varustetuissa terissä hampaiden määrä tuumaa kohti ei ole vakio vaan vaihtelee jollakin tietyllä välillä. Tällaista vaihteluväliä nimitetään hammastusintervalliksi ja teristä ilmoitetaan hampaiden minimi- ja maksimimäärä hammastusintervallilla pituusyksikköä kohden. Esimerkiksi merkintä 4/6 TPI tarkoittaa hammastusintervallilla olevan 4-6 hammasta tuumaa kohden.

Vaihtelevalla jaolla olevia teriä on saatavana 0,55/0,75 TPI:stä aina 10/14 TPI:n asti terävalmistajasta riippuen. Kuvassa 11 on esimerkki vaihtelevajakoisesta terästä. Vaihtelevajakoisen terän hampaiden välinen etäisyys on siis erisuuri, jonka seurauksena hammaskohtainen lastunpaksuus on myöskin vaihteleva. Tämä aiheuttaa lastuamisvoimiin ja hammaskohtaiseen syöttöön vaihtelua, mikä taas pienentää värinätaipumusta sekä työstökarkenevuutta siihen taipuvaisilla materiaaleilla.



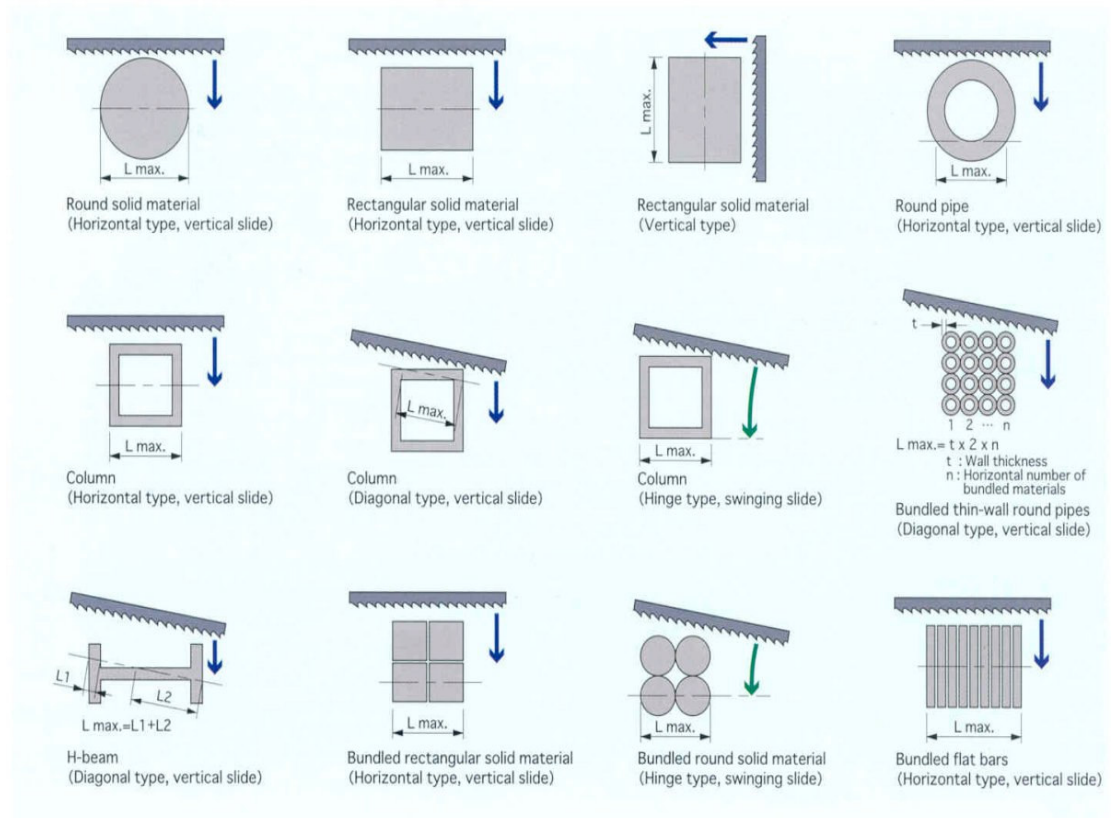
**Kuva 11.** Vaihteleva jako

### 5.1.3 Hammasjaon valinta.

Hammasjaon oikea valinta on tärkeää sahauksen onnistumisen kannalta. Liian tiheän hammasjaon valinta aiheuttaa sen, että terässä oleva lastutila ei ole riittävä, vaan terä kuormittuu ylisuuresta lastumäärästä ja monesti katkeaa tai murtuu nopeasti hampaan juuresta. Ylisuuri hammastus taas aiheuttaa epätasaisen sahausjäljen ja sahaus on tehottomampaa. Lisäksi vain muutamia hampaita on kerrallaan kosketuksessa sahattavaan kappaleeseen ja hammaskohtaiset voimat kasvavat suuriksi. Tämä johtaa monesti hampaan lohkeamiseen.

Hammasjako täytyy valita sahattavan kappaleen halkaisijan tai pikemminkin kosketuspituuden perusteella. Kosketuspituudella tarkoitetaan sitä suurinta pituutta, jonka terä on yhtäjaksoisesti sahattavassa kappaleessa ilman, että lastut pääsevät poistumaan. Kuva 12 selventää kosketuspituuden merkitystä ja taulukoissa 3 ja 4

on erään terävalmistajan hammasjakosuosituksia eri kosketuspituuksille. Pehmeille materiaaleille, kuten erilaiset alumiinit sekä muovit, suositellaan käytettäväksi ainakin yhtä askelta harvempaa hammastusta kuin kosketuspituus osoittaa /13/.



**Kuva 12.** Kosketuspituuksia erilaisissa sahaustapauksissa/5/.

*Taulukko 3. Tasainen jako, hammasjakosuosituksia /7/.*

| Suositteltu TPI | Kosketuspituus |
|-----------------|----------------|
| 32 TPI          | <3 mm          |
| 24 TPI          | < 6 mm         |
| 18 TPI          | < 10 mm        |
| 14 TPI          | <15 mm         |
| 10 TPI          | 15 - 30 mm     |
| 8 TPI           | 30 - 50 mm     |
| 6 TPI           | 50 - 80 mm     |
| 4 TPI           | 80 - 120 mm    |
| 3 TPI           | 120 - 200 mm   |
| 2 TPI           | 200 - 400 mm   |
| 1,25 TPI        | 300 - 800 mm   |
| 0,75 TPI        | 700 - 3000 mm  |

*Taulukko 4. Vaihteleva jako, hammasjakosuosituksia /7/.*

| Suositteltu TPI | Kosketuspituus |
|-----------------|----------------|
| 10-14 TPI       | < 30 mm        |
| 8-12 TPI        | 20 - 50 mm     |
| 6-10 TPI        | 25 - 60 mm     |
| 5-8 TPI         | 35 - 80 mm     |
| 4-6 TPI         | 50 - 100 mm    |
| 4-5 TPI         | 70 - 120 mm    |
| 3-4 TPI         | 80 - 150 mm    |
| 2-3 TPI         | 120 - 350 mm   |
| 1,4-2 TPI       | 250 - 600 mm   |
| 0,75-1,25 TPI   | 500 - 1200 mm  |
| 0,55-0,75 TPI   | 1000 - 3000 mm |

## **5.2 Hampaankorkeus $h$**

Hammaskorkeus  $h$  määräytyy suurimmaksi osaksi hammasjaon perusteella. Mitä harvempi jako, sitä suurempi on myöskin hammaskorkeus, jotta saavutetaan riittävän suuri lastutila hampaiden väliin. Hammaskorkeus voi olla koko terässä vakio, tai vaihdella kuten hammasjakokin. Vaihteleva hammaskorkeus muuttaa hammaskohtaista lastunpaksuutta, lastuamisvoimia eri hampaiden välillä ja pienentää terän värinätaipumusta. Vaihtelevalla hammaskorkeudella varustettuja teriä käytetään yleisesti vaikeiden, työstökarkenevien materiaalien sahaukseen.



### **5.3 Terän korkeus $b$ ja leveys $s$**

Teränkorkeuden merkitys korostuu sahattaessa suuria kappaleita. Mitä korkeampi terä, sitä tukevampi on sahaustapahtuma. Vaakavannesahauksen yhteydessä saha määrää käytettävän vannekorkeuden. Vaakavannesahoissa vannekorkeus on saha kohtainen, ei siis helposti muutettavissa oleva. Yleensä korkeutta ei tarvitse muuttaa, sillä sahan tukevuus ja käytössä oleva vannekorkeus on optimoitu jo sahavalmistajan toimesta.

Terän korkeus voi vaihdella. Eräs terävalmistaja on tuonut markkinoille terän, jonka selän korkeus vaihtelee siniaallon muotoisesti. Tällä on samanlainen merkitys kuin vaihtelevalla hampaankorkeudella. Eli se vähentää värinää ja saa aikaan aggressiivisemmän tunkeuman materiaaliin. Vaihtelevalla korkeudella varustetut terät ovatkin tarkoitettu vaikeiden, työstökarkenevien materiaalien sahaukseen /15/.

### **5.4 Rintakulma, päästökulma, hammaskulma ja niiden merkitys**

Terän rintakulma on valittava sahattavan materiaalin mukaan. Lastunmuodostus ja terän tunkeutumiskyky ovat suoraan riippuvaisia rintakulmasta. Mitä suurempi on rintakulma, sitä aggressiivisemmin terä pyrkii pureutumaan materiaaliin, hammaskohtainen syöttövoima pienenee ja myöskin lastutilavuus terän hampaiden välillä on suurempi. Toisaalta hammaskulma pienenee rintakulman kasvaessa ja hammas on herkempi murtumaan.

#### **5.4.1 0°-rintakulma**

0°-rintakulmaa käytetään pehmeiden terästen sahaukseen tarkoitetuissa perusterissä, joilla tarvitaan vahvaa hammasgeometriaa vastustamaan hampaan murtumista sekä erilaisten ohutseinäisten profiilien sahausessa, jossa hampaan tukevuudella on suuri merkitys. 0°-asteen rintakulmalla varustetut terät eivät sovellu työstökarkeneville materiaaleille /16/.

#### 5.4.2 Positiivinen rintakulma

Positiivisella rintakulmalla varustettuja teriä käytetään hankalampien, tunkeutumiskykyä vaativimpien materiaalien sahaukseen, kuten ruostumattomat, karkaistut ja työkaluteräksset. Rintakulma terissä vaihtelee yleensä välillä 5-15° ja poikkeustapauksissa se voi olla vieläkin suurempi. Rintakulman kasvattaminen lisää terän lastutilavuutta sekä pienentää hammaskohtaista lastuamisvoimaa /16/.

#### 5.4.3 Vaihteleva rintakulma

Lisäksi on olemassa teriä joissa on vaihteleva rintakulma. Vaihtelevalla rintakulmalla saadaan muutettua hammaskohtaisia lastuamisvoimia ja vähennettyä värinätaipumusta. Lisäksi vaihtelevat lastuamisvoimat parantavat terän tunkeutumiskykyä mm. työstökarkeneviin materiaaleihin. Vaihteleva rintakulma myös lisää terän käyttöaluetta sekä parantaa toimivuutta laajentamalla käytettäviä lastuamisparametrejä.

#### 5.4.4 Päästökulma

Päästökulmalla on terässä tärkeä merkitys. Mikäli kulma on liian pieni syntyy hankausta päästöpinnan puolella materiaaliin. Terä alkaa lämmetä ja kuluu nopeasti loppuun. Jos taas päästökulma on suuri, saavutetaan suuri lastutilavuus hampaiden välillä mutta hammaskulma jää pieneksi ja hammas hoikaksi. Tämä voi aiheuttaa hampaan murtumisen suurien lastuamisvoimien yhteydessä /17/.

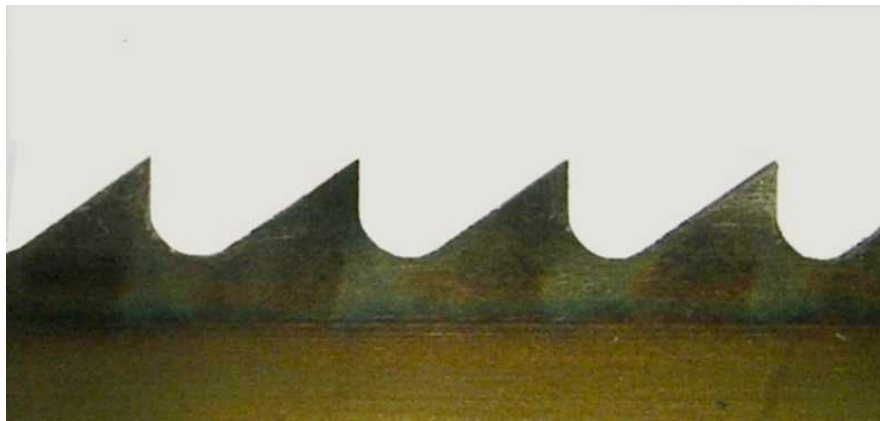
### **5.5 Hammasmuodot**

Hampaan muotoilu on terään liittyvä tärkeä parametri. Hampaan muodot eivät ole standardisoitu vaan jokaisella terävalmistajalla on omat nimityksensä monesti lähes identtisille hammasmuodoille. Terävalmistajilla on myös omia patentoituja hammasmuotoja, jotka usein on tarkoitettu erityissovelluksiin. Hampaan muotoilulla pystytään vaikuttamaan hampaan kestävyYTEEN, lastutilan suuruuteen, kappaleeseen puretuvuuteen sekä lastuamisvoimiin. Alla olevissa kappaleissa on

esitelty Bi-metalliterien yleisimmät erilaiset hammasmuodot.

### 5.5.1 Standard -hammas

Kuvassa 13 on ns. Standard- tai N- tyyppin hammas, joka on lähes jokaisen terävalmistajan terävalikoimassa. Sen tunnuspiirteitä ovat 0-asteen rintakulma ja hampaan kärjestä alkava koko hampaan mittainen tasainen päästö sekä pyöreä lastutila hampaiden välissä. N-tyyppisesti hammastettu terä on tarkoitettu pehmeiden, lyhytlastuisten materiaalien kuten kone- ja automaattiteräkset yms. sahaukseen. Hammastus on tukeva ja sopii myös profiilien sahaukseen sekä muotojen leikkaukseen pystyvannesahauksessa /7, 18/.



**Kuva 13.** N-Hammastus.

### 5.5.2 Hook-hammas

Hook-hammas on myös erittäin yleinen jokaiselta terävalmistajalta löytyvä hammasprofiili. Hook-hampaassa on yleensä 10-16 asteen päästökulma ja hampaiden välinen lastutila on ikään kuin koukkumainen, mistä hampaan nimityskin todennäköisesti tulee. Hampaassa on suora päästöpinta, kuten N-hammastuksessakin, mutta poikkeuksiakin on. Käytetystä rintakulmasta riippuen Hook-hammastus soveltuu laajalle materiaalikirjolle. Yleisesti sitä käytetään pitkälastuisten hankalasti työstettävien materiaalien sahauksessa sekä suurilla poikkileikkauksilla, joihin suuremman rintakulman tuomasta aggressiivisemmasta puretuvuudesta

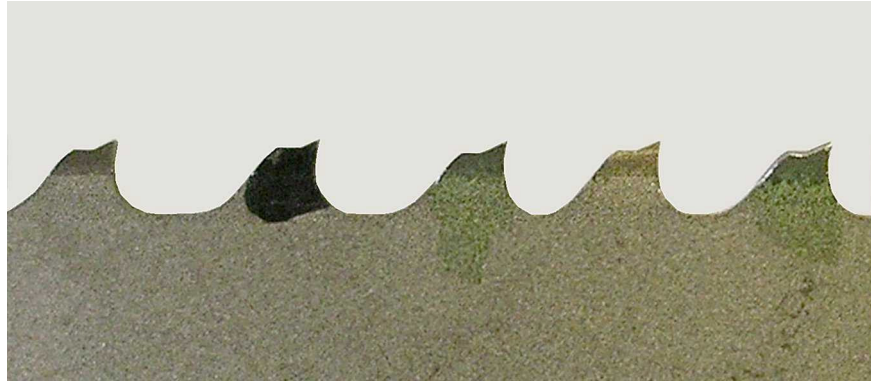
kappaleeseen. Kuvassa 14 on Hook –hammastus, johon on tehty pieni kevennys päästöpinnaan. Eroina N-hampaaseen on lastutilan koko sekä hampaan poikkipinta-ala / 5, 7, 13/.



**Kuva 14.** Hook-hammastus.

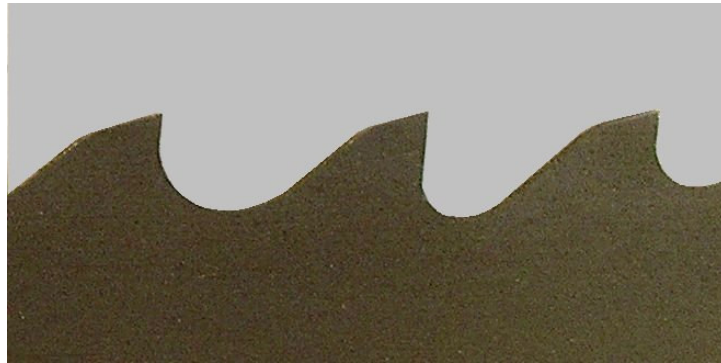
### 5.5.3 Profiilihammastukset

Erilaisia profiileja, kuten putkia ja palkkeja sahattaessa vaaditaan hampaalta erityisesti tukevuutta hammasrikkoa vastaan. Profiilien sahausta varten onkin monella valmistajalla omat patentoidut hammasmuodot, joista parhaimman valinta voi osoittautua hankalaksi. Yleensä profiilihammastusten yhteydessä käytetään pehmeintä ja samalla sitkeintä terämateriaalia Matrix 2. Kuvassa 15 on AMADA:n kehittämä Protector–hammas jossa on erityisellä muotoilulla saatu tukevuutta hampaaseen ja kuitenkin suuri päästökulma lämmön kehittymisen estämiseksi.



**Kuva 15.** Protector-hammastus.

Kuvassa 16 on taas Wikuksen profiilisahausta varten kehittämä Profile-hammas. Positiivinen rintakulma ja erittäin tukeva hammasmuoto soveltuvat erittäin hyvin ohutseinäisille putkille sekä erilaisille profiileille. Päästökulma on pieni, mikä voi aiheuttaa lämpenemistä suuremmilla aineenpaksuuksilla /5/.



**Kuva 16.** Profile-hammastus.

#### 5.5.4 Yhdistelmämuodot

Bi-metalliterissä esiintyy myös erilaisten hammastusten yhdistelmiä. Samassa terässä voi olla kahta erilaista hammastusta kuten Kuvassa 17 on esitetty. Yhdistelemällä erilaisia hammasmuotoja pyritään yhdistämään useiden hammasmuotojen hyviä puolia. Eli alla olevassa kuvassa etummaisets pienemmät Hook-hampaat leikkaavat kevyesti ja takana tulevat Profile-muotoillut hampaat vastustavat murtumista ja ottavat vastaan esimerkiksi epäpuhtauksista ja jännityksistä tulevia

shokkimaisia iskuja /5/.



**Kuva 17.** Amadan EB II-hammastus.

### **5.6 Haritus**

Vannesahanterän hampaat on taivutettu erilaisissa sarjoissa joko oikealle tai vasemmalle, ja väliin voi jäädä taivuttamattomiakin hampaita. Tätä kutsutaan haritukseksi. Harituksen tehtävänä on luoda riittävä tila terälle kulkea juuttumatta työkappaleeseen. Lisäksi harituksen aikaansaama tila on oltava riittävä jotta lastut pääsevät hyvin kulkeutumaan pois sahausraosta sekä lastuamisneste pääsee voitelemaan sahaustapahtumaa.

Erilaisilla haritusmalleilla voidaan vaikuttaa sahauksen pinnanlaatuun, terän juuttumistaipumukseen sekä hukkaan menevän materiaalin määrään. Esimerkiksi sahattaessa profiileja ( I-palkki), joissa voi olla sisäisiä jännityksiä, on tärkeää että sahausrako on riittävän suuri, jottei jännitysten lauetessa ja kappaleen mahdollisesti vääntyessä sahauksen aikana tapahdu terän juuttumista. Vääränlainen haritus ei välttämättä ilmene terän juuttumisena, vaan seurauksena voi olla vain kitkasta johtuvaa lämpöä ja terän nopea loppuun kuluminen /19/.

#### **5.6.1 Bi-metalliterien yleisimmät haritustavat**

Terien haritustavoista on lähes yhtenevät merkintätavat jokaisella terävalmista-

jalla. Alla on esitelty yleisimmät Bi-metalliterän haritusmallit.

### 5.6.1.1 Raker set -haritus

Raker set -haritus on yleisimmin metallin sahauksessa käytetty haritusmuoto. Tässä haritusmallissa on yksi harittamaton hammas, yksi vasemmalle haritettu, yksi oikealle haritettu, ja jälleen harittamaton hammas. Tätä haritusmallia käytetään tasaisella hammasjaolla varustetuissa yleisterissä, ja se soveltuu erittäin hyvin kaikentyyppisille teräksille ja materiaalipaksuuksille, jotka ylittävät 5 mm. Kuvassa on 18 raker set -haritusmalli /5,7,9,13/.



**Kuva 18.** Raker set –haritus.

### 5.6.1.2 Variable set -haritus

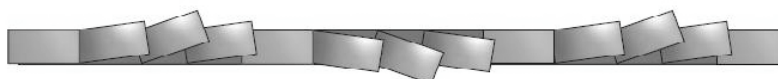
Variable set -haritus tapaa käytetään yleisesti vaihtelevalla hammasjaolla varustetuissa terissä. Variable set -haritustavassa on yksi harittamaton hammas ja tämän jälkeen loppu hammasintervalli on vuoroin haritettu vasemmalle ja oikealle. Variable set -haritusmallissa voi ensimmäinen vuoroin haritettu hammaspari olla vähemmän taivutettu kuin toinen pari. Tämä haritustapa vähentää värinäitaisuutta sekä tekee sahaustapahtumasta hiljaisemmän. Yleisesti tätä haritusta käytetään ruostumattoman teräksen ja muiden vaikeiden materiaalien sahaukseen tarkoitetuissa terissä. Kuvassa 19 on Variable set –haritus /5,7,8/.



**Kuva 19.** Variable set -haritus /8/.

### 5.6.1.3 Wave set- haritus

Wave set -haritustavassa on ensin harittamaton hammas, sitten kolme erisuuresti haritettua hammasta oikealle, harittamaton hammas ja kolme erisuuresti vasemmalle haritettua hammasta. Tämä haritusmalli soveltuu erityisesti ohuille aineen vahvuuksille, ja sen yhteydessä käytetyt hammasjaot ovat erittäin pieniä. Ohuet putket ja profiilit sekä ohutlevyt ovat wave set -harituksen ominta käyttöaluetta. Kuvassa 20 on wave set-haritus /7/.



**Kuva 20.** Wave set -haritus /8/.

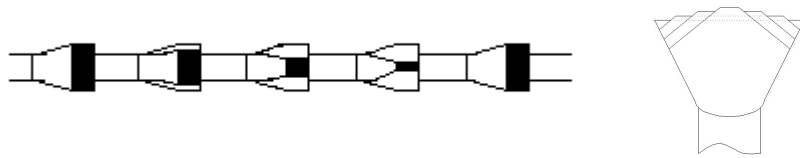
### 5.6.1.4 Muut Bi-metalliterien haritukset

Bi-metalliteriin on saatavana vielä lukuisia muitakin harituksia. Lähes jokaiselta terävalmistajalta löytyy omat patentoidut haritustyylit, ja teriä jopa haritetaan asiakkaan toiveiden mukaisesti.

## 5.6.2 Kovametalliterien haritus.

Kovametalliteriä on sekä haritettuja että harittamattomia. Harittamattomissa terissä ei ole samalla tavoin taivutettuja hampaita kuten hiiliteräs- ja Bi-metalliterissä. Kovametalliterässä terärunkoon juotettu teräpala on leveämpi kuin itse terä, jolloin haritusta ei välttämättä tarvita. Kovametalliterien yhteydessä puhutaan muotoon hiotusta hampaasta, joka vastaa Bi-metalliterän haritusta ja keventää yhteen teräpalaan kohdistuvaa rasitusta sekä jakaa lastun useampaan osaan. Yleisesti, ohuimmaksi hiottu hammas on korkein, joka helpottaa tunkeumaa kovaan työkalupaleeseen. Kuva 21 havainnollistaa hammashionnan merkitystä/7/.



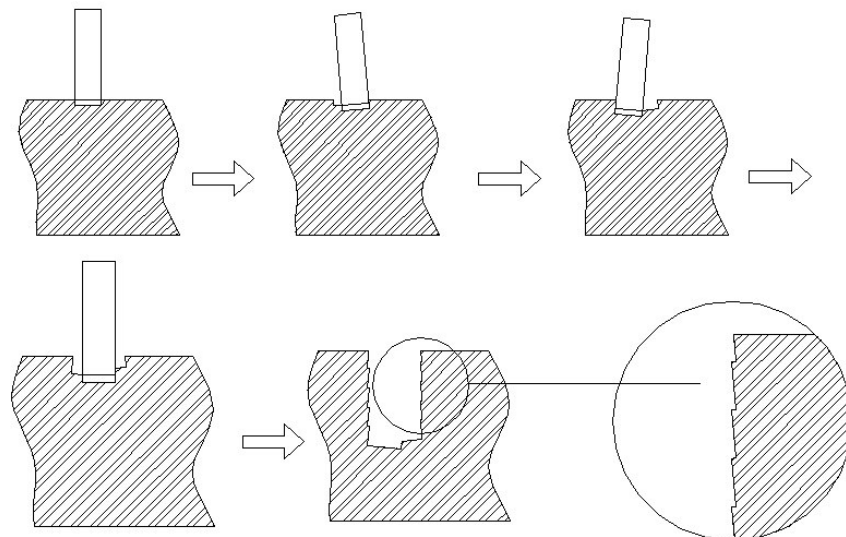


**Kuva 21.** Kovametalliterän haritus .

Haritetuissa kovametalliterissä käytetään poikkeuksetta raker-set haritusta. Monesti haritetuissa terissä voi olla yksi muotoon hiottu hammas joka keventää hie-  
man hampaisiin kohdistuvaa rasitusta.

### 5.6.3 Harituksen yhteys syntyvään pinnanlaatuun.

Haritus vaikuttaa syntyvään pinnanlaatuun. Kuvasarja 22 kuvaa pinnanlaadun syntymistä raker set -haritetulla terällä. Periaatteessa pinnan profiili on kolmion-  
mallinen, ennen kuin terän reunaan hioutuu pieni pyöristys.

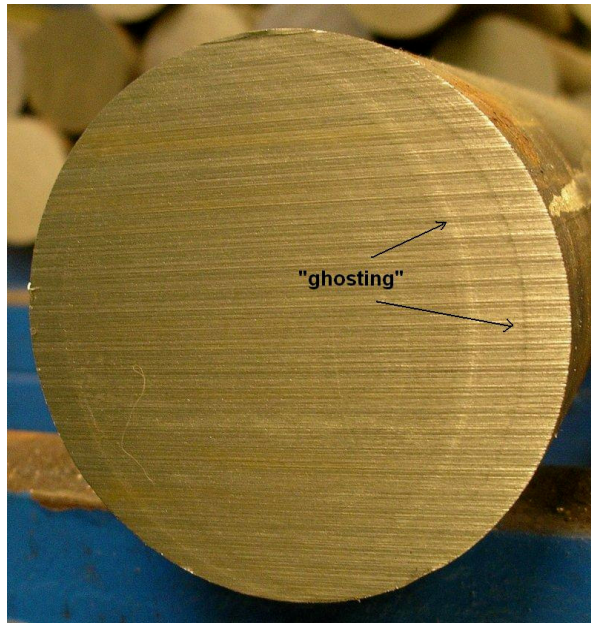


**Kuva 22.** Pinnanlaadun muodostuminen vannesahauksessa.

### 5.6.4 Haritus ja ghosting -ilmiö

Ghosting -ilmiö on harituksen aikaansaama pinnanlaadun heikkenemä, jota esiin-

tyy etenkin pyöreillä profiileilla. Sahattuun pintaan on ikään kuin piirtynyt sahattavan profiilin muoto. Kuvassa 23 on esimerkki ghosting –ilmiöstä.



**Kuva 23.** Ghosting –ilmiö.

Ghosting –ilmiö syntyy sahauksen alussa. Haritetun hampaan tunkeutuessa materiaaliin terä taipuu passiivivoiman (passiivivoima on terää sivusuunnassa kappaleesta irti painava voima) vaikutuksesta hieman. Toiseen suuntaan haritetun hampaan tullessa mukaan sahaukseen, terä taipuu taas toiseen suuntaan ja edellä menevä hammas leikkaa enemmän sivusuunnassa piirtäen haamukuvion sahauspintaan. Ilmiö esiintyy luonnollisesti voimakkaimmin tangon reunoilla. Harittamattomilla kovametalliterillä ghosting -ilmiötä ei esiinny /19/.

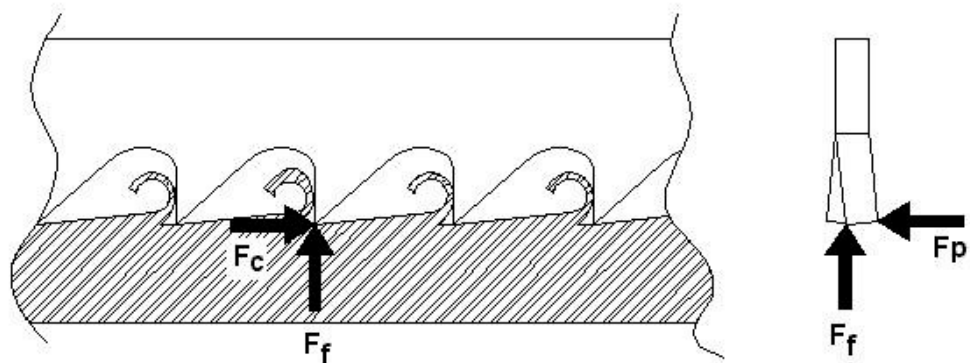
### 5.6.5 Yhteenveto terägeometriasta

Edellisistä luvuista käy ilmi että pelkkään terägeometriaan liittyy hyvin monia parametreja. Samasta terästä voi löytyä vaihteleva hammasjako, -hampaan korkeus, -haritus, -rintakulma sekä mahdollisesti vielä erilainen hammasmuoto peräkkäisissä hampaissa. Näistä seikoista johtuen terävalinta ei ole aivan yksinkertainen asia. Yhdellä materiaalilla toimiva terä ei välttämättä toimi ollenkaan samankal-

taisella rinnakkaismaterialilla. Erittäin hankalien materiaalien yhteydessä jopa eri toimitusten välillä on ollut suurta hajontaa sahattavuudessa.

## 6 Lastunmuodostus vannesahauksessa sekä vannesaha- uksen lastuamisparametrit.

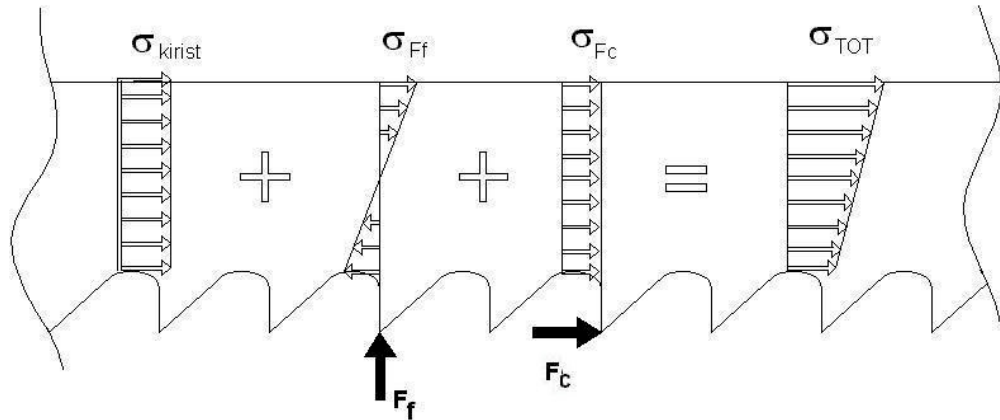
Vannesahaus on siis monileikkuisella terällä tapahtuvaa lastuamista. Kuvassa 24 on havainnollistettu lastunmuodostusta, kuvassa olevat nuolet kuvaavat lastuamisvoimia vannesahauksessa. Lastuamisvoima on kolmedimensionaalinen voimakokonaisuus, jossa passiivivoima  $F_p$  vaikuttaa kuvan mukaisesti vain harittettuihin hampaisiin. Harittamattomien hampaiden tai terien tapauksessa voidaan tapahtumaa verrata yhden hampaan osalta pistosorvaukseen, tai höyläykseen. Päälastuamisvoima  $F_c$  ja syöttövoima  $F_f$  ovat suurimmat voimat, joita sahauksessa esiintyy ja ne kasvavat lähes suoraviivaisesti suhteessa lastunpaksuuteen [20,21,22].



**Kuva 24.** Lastuamisvoimat vannesahauksessa.

### 6.1 Terän jännitystasot

Edellä mainitut lastuamisvoimat muodostavat yhdessä terän peruskireyden kanssa terän kokonaisjännityksen. Kuvaan 25 on piirretty kunkin voiman terään aiheuttama väsymisen kannalta olennainen jännitys. Syöttövoima  $F_f$  aiheuttaa terään sekä veto- että puristusjännityksen. Päälastuamisvoima  $F_c$  aiheuttaa terään kiristyksen kaltaista vetojännitystä sekä leikkausjännityksen, jota kuvaan ei ole piirretty.



**Kuva 25.** Terän jännitystasot

Väsymisen kannalta merkitystä on terän kiristyksen aiheuttamalla perusjännityksellä ja päälastuamisvoiman siihen aiheuttamalla muutoksilla sekä syöttövoiman  $F_f$  aiheuttamalla vetojännityksellä terän selkäosassa. Päälastuamisvoiman  $F_c$  aiheuttama leikkausjännitys on merkityksetön väsymisen kannalta. /28/

Terään kohdistuva kokonaislastuamisvoima on pyörötankoa sahattaessa luonnollisesti suurimmillaan tangon keskikohdassa. Tästä johtuen mm. terän katkeaminen tapahtuu useimmiten tangon sahauksen keskivaiheilla ja vinoon sahaus on yleensä voimakkainta myös tangon keskikohdalla.

## 6.2 Lastuamisparametrit, tuottavuus/lastuamisteho

Vannesahauksen lastuamisparametreihin kiinni pääsemiseksi kannattaa asiaa lähestyä tuottavuuden kannalta. Vannesahauksen tuottavuutta arvioidaan sahatuilla neliösenttimetreillä minuuttia kohti sorvauksesta tutun lastutilavuuden sijaan. Tuottavuus määritellään yksinkertaisesti yhtälöllä:

$$P_s = \frac{A}{t_s}, \quad (1)$$

missä  $P_s$  = Keskimääräinen tuottavuus ( $\text{cm}^2/\text{min}$ )

$A = \text{sahattavan tangon/profiilin poikkipinta-ala (cm}^2\text{)}$

$t_s = \text{katkaisuun käytetty aika (min)}$

Yllä oleva yhtälö antaa siis keskiarvon, kuinka paljon materiaalia katkaistaan pinta-alalla mitattuna aikayksikössä.

Se kuinka suuriin tuottavuuslukuihin voidaan vannesahauksessa lastuttavuuden kannalta päästä, on seuraavien tekijöiden summa:

- Lastuamisnopeus (m/min)
- Syöttö (mm/min)
- Terän hammasjako ja hampaan muoto
- Lastuttavan profiilin muoto ja koko ja
- Terän kestoikä.

### **6.3 Lastuamisnopeus**

Lastuamisnopeudella vannesahauksessa tarkoitetaan terän nopeutta lastuavan särmän kärjessä. Yksikkönä käytetään m/min ja lastuamisnopeuden arvot voivat vaihdella erittäin hankalasti lastuttavien materiaalien 10 m/min:sta aina koneteräksille suositeltuun 160 m/min asti. Taulukkoon 5 on koottu muutaman terävalmistajan suosituksia lastuamisarvoista eri materiaaliryhmille.

*Taulukko 5. Lastuamisarvosuosituksia./5,7,9,13/*

| Materialiryhmä             | DIN               | USA         | Lastumisnopeus (m/min) |             |
|----------------------------|-------------------|-------------|------------------------|-------------|
|                            |                   |             | Bi-metalli             | Kovametalli |
| Rakente-<br>teräkset       | St 37/42          | A 570       | 60-100                 | 100-130     |
|                            | St 52/60          | A 572       | 50-90                  | 90-120      |
|                            | C10/C15           |             |                        |             |
| Nuorutus-<br>teräkset      | 42CrMo4           | 4140        | 50-70                  | 70-90       |
|                            | 34CrNiMo6         | 4340        | 50-70                  | 70-90       |
| Hiiletys-<br>teräkset      | 16MnCr5           | 5115        | 55-75                  | 80-100      |
|                            | 20CrMo5           |             | 55-75                  | 80-100      |
| Koneteräkset               | 9S20              | 1212        | 80-130                 | 100-160     |
| Ruostumattomat<br>teräkset | X5CrNi18 10       | 304         | 30-50                  | 70-80       |
|                            | X6CrNiMoTi17 12 1 | 316Ti       | 30-50                  | 65-75       |
| Superseokset               | NiCr19NbMo        | inconel 718 | 10-20                  | 20-30       |
|                            | NiMo30            | Hastelloy B | 15-25                  | 20-35       |

#### 6.4 Syöttö

Vannesahauksen yhteydessä syötöstä käytetään usein samaa yksikköä kuin tuottavuudesta (cm<sup>2</sup>/min) ja terävalmistajat antavatkin terille suositellut tuottavuuden arvot, joita pitäisi pyrkiä noudattamaan. Käytännössä valmistajan antamasta tuottavuuden arvosta on laskettava joko mm/min syöttö tai katkaisuun kuluva aika, jotta päästään käytännön työssä tarvittaviin arvoihin. Katkaisuun kuluva aika voidaan laskea yhtälöstä 1 ja syöttö (m/min) saadaan yhtälöstä 2 :

$$f_k = \frac{h_{kpl} \cdot Ps}{A} \quad (2)$$

missä,  $f_k$  = keskimääräinen syöttö (mm/min)

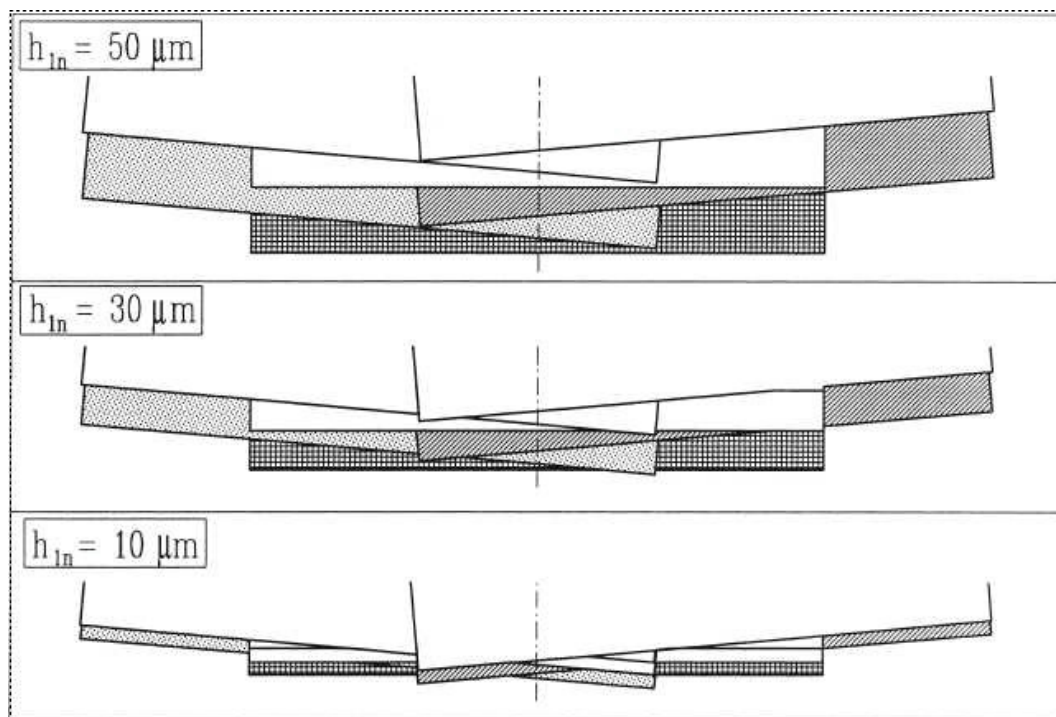
$h_{kpl}$  = kappaleen korkeus (mm)

$A$  = sahattavan kappaleen pinta-ala (cm<sup>2</sup>)

$Ps$  = Sahauksen tuottavuus (cm<sup>2</sup>)

Syöttö vaikuttaa myös lastunmuodostukseen. Pienellä syötöllä sahattaessa hampaan rintapinnasta vain osa lastuaa, syöttöä suurennettaessa koko hampaan särmä

alkaa lastuta. Kuvasarja 26 havainnollistaa syötön vaikutusta lastunmuodostukseen /5,7,20/.



**Kuva 26.** Lastunmuodostuksen muutos syötön muuttuessa /20/.

Jos käytössä ei ole valmistajan terälle antamaa syöttöä, voidaan sitä arvioida seuraavan Wikuksen kehittämän hammasjakoon perustuvan kaavan avulla:

$$P_{s_{\max}} = V_c (1,54 - 1,13 \times \lg t_{pi}), \quad (3)$$

missä,  $P_{s_{\max}}$  = suurin mahdollinen tuottavuus ( $\text{cm}^2/\text{min}$ )

$V_c$  = lastuamisnopeus (m/min)

$\lg t_{pi}$  = Logaritminen hammasjakokerroin

Sijoittamalla edelliseen yhtälöön valittu lastuamisnopeus ja käytössä oleva hammasjako, saadaan ohjeellinen tuottavuus, joka ko. hammasjaon ja lastuamisnopeuden yhdistelmällä voidaan saavuttaa. Yhtälö ei ota mitään kantaa hampaan muotoiluun, jolla voidaan lastutilavuutta terässä suurentaa ja tuottavuutta paran-



taa. Lisäksi yhtälön antama tulos on suoraviivainen eli sitä suurempi maksimaalinen tuottavuus, mitä harvempi hammastus. Tässäkin suhteessa yhtälö on virheelinen, sillä sahattaessa yli 300 mm kosketuspituuden omaavia kappaleita, on lastuamisnopeutta alettava pienentää huonon lastuamisnestesuihkun kohdistuksen, pidemmän hampaan kosketusajan ja tästä johtuvan lisääntyneen lämmön takia. Yhtälöllä saadaan kuitenkin hyvä suuntaviiva, mitä tuottavuus voi olla /7/.

Edelliset yhtälöt keskittyvät keskimääräiseen tuottavuuteen, eli keskiarvoon, joka katkaisussa saadaan minuuttia kohti. Edellä kuvattu tilanne sopii hyvin esimerkiksi neliöprofiilille, jossa sahauspituus on vakio. Mutta esimerkiksi tangon sahauksessa profiilin muoto vaikuttaa siten että vakiosyötöllä (mm/min) tuottavuus kasvaa kokoajan sahauksen edetessä kohti tangon keskustaa. Tämä aiheuttaa mm. sen, että esimerkiksi 150 mm neliötangon katkaisuaika on 3 minuuttia, mutta Ø 150 mm pyörötangon katkaisuaika on vain 2 minuuttia 20 sekuntia samalla 75 cm<sup>2</sup> keskimääräisellä tuottavuudella. Lastunpaksuus on siis suurempi pyörötangon tapauksessa käytettäessä keskimääräistä tuottavuutta syötön mittarina. Tästä johtuen tulisi käyttää mm/min -arvoja syöttöjen yhteydessä, sillä terä ei kestä rikoontumatta suuria lastunpaksuuksia, oli profiilinmuoto mikä tahansa.

### **6.5 Lastunpaksuus**

Lastunpaksuus vannesahauksessa on yllättävän monimutkainen asia. Yleisesti, vaihtelevalla hammasjaolla varustettu terä lastuaa ainakin neljää eri paksuista lastua. Lastuamisnopeudesta sekä syötöstä voidaan johtaa nimellinen hammaskohtainen lastunpaksuus  $h_i$ , joka ei huomioi harituksen vaikutusta:

$$h_i = \frac{f_k \cdot e_t}{1000 \cdot V_c}, \quad (4)$$

missä  $e_t$  = hampaiden välinen etäisyys (mm)

$V_c =$  lastuamismnopeus(m/min)

$f_k =$  keskimääräinen syöttö (mm/min)

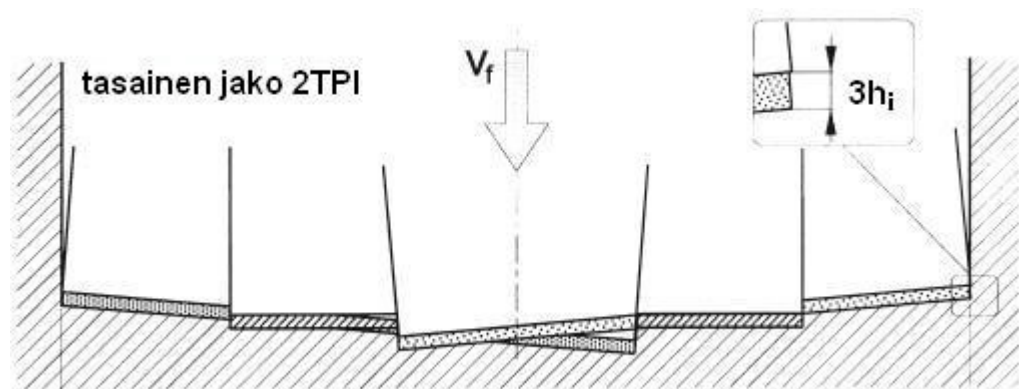
Yhtälöllä saatava lastunpaksuus on siis paksuus, joka on harittamattomassa tasaisella hammasjaoilla varustetussa terässä, jossa hampaankorkeus on vakio.

Hammaskohtainen harituksen huomioiva lastunpaksuus  $h_{1n}$ , (mm) saadaan lisäämällä edelliseen yhtälöön 4 termi  $n_z+1$  :

$$h_{1n} = \frac{(n_z + 1) \cdot f_k \cdot e_t}{1000 \cdot V_c} \quad (5)$$

missä,  $n_z =$  Kahden samalla tavoin haritetun hampaan välissä olevien hampaiden lkm.

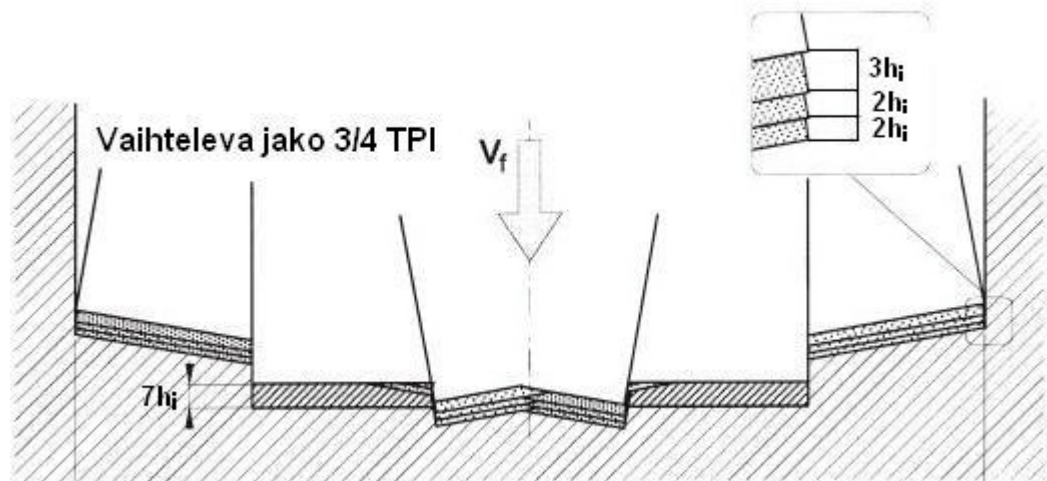
Alla oleva kuva 27 havainnollistaa lastunpaksuuden muodostumista tapauksessa, jossa hammasjako on tasainen 2TPI ja haritus tyyliä neutraali-vasen-oikea-neutraali. Kyseisen harituksen tapauksessa todellinen hammaskohtainen lastunpaksuus on kolminkertainen nimelliseen/teoreettiseen lastunpaksuuteen nähden ja kaikki lastut ovat tasapaksuja.



**Kuva 27.** Lastunpaksuus 2TPI hammasjaon ja raker-set harituksen yhteydessä.

Kuva 28 taas kuvastaa lastunmuodostusta tapauksessa jossa jako on  $\frac{3}{4}$  TPI ja haritus neutraali-vasen-oikea-vasen- oikea-vasen-oikea-neutraali. Nyt las-

lastunpaksuus on jo hieman hankalampi käsite, sillä terässä muodostuu kolme eri paksuutta, jotka vielä hieman vaihtelevat johtuen vaihtelevasta hammasjaosta /21/



**Kuva 28.** Lastunpaksuus  $\frac{3}{4}$  terällä, variable set-harituksen yhteydessä /21/.

## 6.6 Terän kestoikä

Terän kestoikää arvioidaan yleisesti pinta-alayksikköä ( $m^2$ ) käyttäen. Yksikään terävalmistajista ei anna omien lastuamisarvosuositustensa pohjalta terän kestoikää. Kokemusperäiset havainnot teränkestoikästä suuntautuvat siten että Bi-metalliterillä teränkestoikä ja tuottavuus on parhaimmillaan hammasjaon ollessa  $\frac{2}{3}$  ja sahattavan umpiaineen halkaisija välillä 200-300 mm. 200-300mm halkaisijan edullisuus johtuu todennäköisesti seikasta, että ko. halkaisijoilla voidaan saavuttaa paljon neliöitä vähillä kappaleeseen sisään syöttö / ulostulo kerroilla, jotka ovat rasitteena taas sahattaessa pienempiä halkaisijoita. Suuremmilla halkaisijoilla taas terä lämpenee paljon kappaleessa, johtuen huonommasta lastuamismateriaalin kulkeutumisesta sahauskohtaan, ja pidemmästä yksittäisen hampaan lastuamisajasta. Tämän seurauksena on syöttöä vähennettävä ja tuottavuus vähenee /3/.

Myös terän pituus vaikuttaa kestoikään. Mitä pitempi terä, sitä suurempi on kestoikä johtuen suuremmasta määrästä hampaita sekä vähemmästä väsytyssykkien määrästä sahattua pinta-alaa kohden. Taulukkoon 6 on poimittu muutamia terän

kestoikiä, joita varmuudella on saavutettu.

**Taulukko 6.** Terän kestoikiä

| Materiaali | Terätyyppi  | Syöttö<br>(cm <sup>2</sup> /min) | Kestoikä<br>m <sup>2</sup> |
|------------|-------------|----------------------------------|----------------------------|
| S355       | bi-metalli  | 60                               | 27                         |
| 25CrMo4    | bi-metalli  | 55                               | 40                         |
| AISI 316   | bi-metalli  | 6,5                              | 3,8                        |
| AISI 316   | kovametalli | 26                               | 8-11                       |
| AISI4150   | bi-metalli  | 8                                | 5-7,5                      |

Kestoikätaulukosta havaitaan, että terän kestoiät ovat hyvin paljon vaatimattomampia sahattaessa ruostumattomia teräslaatuja.

Terän kireydellä on myös tärkeä osuus terän kestoikään. Terän ollessa liian kireällä siihen kohdistuu normaalia suurempia jännitystasoja, ja tällöin poikkiväsyminen on nopeampaa. Taulukossa 7 on erään terävalmistajan suosituskireydet eri terän korkeuksille.

**Taulukko 7.** Teränkireys suositukset /23/

| Terän korkeus | Kireys suositus Mpa |
|---------------|---------------------|
| 5-20mm        | 100-140             |
| 20-25mm       | 140-210             |
| 25mm ja yli   | 210-260             |

### **6.7 Lastuamisneste vanne sahauksessa**

Lastuamisnestettä käytetään vannesahauksessa lähes aina sekä Bi- että kovametallisahauksessa. Sahauksessa lastuamisnesteen tehtävät ovat:

- Jäähdyttää
- Voidella sekä sahaustapahtumaa että teräohjaimia ja
- Huuhdella lastut pois terästä.

Bi-metalliterien yhteydessä käytetään sekä emulsiopohjaisia nesteitä että lastuamisöljyjä. Öljyjen käyttö on rajoittunut tapauksiin joissa sahataan erittäin han-

kalia materiaaleja ja joissa työstökarkenevuus ja materiaalin muut ominaisuudet vaativat runsasta voitelua. Emulsioita taas käytetään yleisesti. Suositellut emulsioiden vahvuudet vaihtelevat materiaali- ja teränvalmistajakohtaisesti välillä 3-25 %. Suurimpia vahvuuksia suositellaan jälleen työstökarkeneville erikoismateriaaleille /5,7, 24/.

Nestesuihkut tulee suunnata siten, että nestettä valuu runsaasti terää pitkin molemmilla puolilla sahattavaa kappaletta. Yleensä Bi-metalliterille tarkoitetuissa sahoissa nesteen suihkutusta tulee teräohjaimia pitkin

Kovametalliterien kanssa käytetään yleensä samoja emulsiota kuin Bi-metallinkin, mutta seoksien tulee olla runsaampia. Suositukset ovat 10 % ylöspäin riippuen terävalmistajasta. Samoin kuin Bi-metallinkin kanssa tulee nestettä tulla runsaasti terää pitkin ja suositus on, että terälle lisätään ylimääräinen nestehuuhtelu ainakin ensimmäisen käyttökerran yhteydessä, jotta jäähditys on varmasti riittävä ensikoitelun yhteydessä /24/.

Kovametalliterien kanssa nesteen kunnosta tulee huolehtia tarkasti. Ajettaessa kovilla lastuamisnopeuksilla nesteeseen kerääntyy nopeasti epäpuhtauksia, jotka pilaavat nesteen, ja aiheuttavat ennen aikaista teränkulumista. Kovametallisahauksen yhteydessä nesteen kuntoa tulee tarkkailla jatkuvasti ja vaihdot suorittaa säännöllisesti /24/.

### **6.8 Uuden terän sisäänajo**

Uusi terä täytyy lähes poikkeuksetta ajaa sisään. Vain muutamia kovametalliteriä toimitetaan valmiiksi sisään ajettuina. Uuden terän sisäänajon tarkoituksena on saada leikkaavaan särmään pieni pyöritys sekä poistaa mahdollinen mikrojäyste terän leikkaavasta särmästä. Sisäänajon on todettu parantavan terän kulumisenkestoa merkittävästi. Tiedossa on tapauksia, joissa liian vähäisen sisäänajon seurauksena uusi terä on alkanut sahata vinoon lähes välittömästi. Mitä kovempi terämateriaali tai pehmeämpi sahattava materiaali, sitä suurempi sahattu pinta-ala

sisäänajoon tarvitaan. Terävävalmistajien suositukset sahatuista pinta-aloista vaihtelevat välillä 0.03-0.5m<sup>2</sup> /3,5,7,15/.

#### 6.8.1 Bi-metalliterän sisäänajo

Sisäänajon suorittamiseen valmistajat antavat erilaisia ohjeita sahattavan pinta-alan osalta mutta suoritustapa on useimmissa tapauksissa yhtenevä. Sisäänajossa käytetään samaa lastuamisnopeutta kuin varsinaisessa sahausksessa, mutta syöttönä käytetään alussa n. 30-50 % varsinaisesta sahausyötöstä. Pienellä syötöllä sahataan n. 10 min jonka jälkeen syöttöä lisätään vähitellen kohti varsinaista leikkuusyöttöä, niin että saavutetaan vaadittu sisäänajopinta-ala. Sisäänajossa voi toisinaan esiintyä värinää, mitä voi pyrkiä ehkäisemään pienentämällä hieman lastuamisnopeutta. Sisäänajon alussa voidaan myös käyttää pienempää nopeutta kuin varsinainen lastuamisnopeus, mutta tämä ei ole välttämätöntä /5,7/.

#### 6.8.2 Kovametalliterän sisäänajo

Kovametalliterän sisäänajo poikkeaa Bi-metalliterän sisäänajosta sekä käytettävän lastuamisnopeuden että sahattavan materiaalmäärän osalta. Käytettäväksi suositellaan n. 2/3 varsinaisesta lastuamisnopeudesta ja n. 50 % syötöstä. Näin sahataan vähintään 20 minuuttia, ja sitten vähän kerrallaan nostetaan nopeus ja syöttö halutulle tasolle, aina nopeutta ensin nostaen /24/.

## 7 TERÄN KULUMISMEKANISMIT JA VAURIOMUODOT

Seuraavissa kappaleissa on esitelty vannesahauksen teränkulumismekanismit. Kappaleessa on käsitelty myös muita terän vauriomuotoja ja niiden aiheuttajia, sekä metallin vannesahaukseen yleisesti liittyviä ongelmia kuten värinää ja terän juuttumista työkappaleeseen.

### 7.1 Viistekuluminen

Viistekuluminen on tavallisin ja luonnollinen niin kovametalli- kuin Bi-metalliteränkin kulumismuoto. Viistekuluminen tapahtuu vähän kerrassaan terän käyttötuntien lisääntyessä ja aiheuttaa lopulta sen, että terä ei enää pure, tai se alkaa sahata vinoon. Viistekuluminen on yleensä suurempaa hampaan toisella laidalla, johtuen harituksesta, eli kovemalla vastuksella oleva teränpuoli kuluu enemmän. Alla olevassa kuvassa 29 on esimerkki viistekulumisesta. Kuvassa oleva terä on ns. loppuun ajettu Hook-tyyppinen Bi-metalliterä, jossa viistekulumisen maksimiarvo oli 0,4mm. Seuraavassa kuvassa (kuva 30) on taas harituksen vaikutus viistekulumiseen eri puolille haritetuissa hampaissa.



**Kuva 29.** Bi-metalliterän viistekulumista.



**Kuva 30.** Harituksen vaikutus viistekulumiseen /20/.

Viistekulumisen ollessa nopeaa syy löytyy usein virheellisistä lastuamisarvoista, huonosta vanteen sisäänajosta, väärästä nesteen konsentraatiosta tai suuntauksesta.

Virheellisillä lastuamisarvoilla tarkoitetaan nopean viistekulumisen yhteydessä liian suurta lastuamisnopeutta tai liian pientä syöttöä. Liian suuri lastuamisnopeus synnyttää paljon lämpöä samoin kuin liian pieni syöttö. Liian pienen syötön yhteydessä terä ei lastua kunnolla, vaan ikään kuin hioen ja tyssäten kappaleen pintaa synnyttäen paljon ylimääräistä lämpöä. Liian pienen syötön käyttö on yleistä työstökarkenevien materiaalien kuten ruostumattomien terästen yhteydessä. Merkkejä liiallisesta lämmöstä ovat savuaminen, terän, lastujen sekä kappaleen värjäytyminen sinertäväksi /25/.

Virheellinen sisäänajo aiheuttaa myös terän nopean kulumisen. Jos teräsärmät ovat kuluneet paljon enemmän harituksen puoleiselta sivulta, tai teräsärmästä näyttää lohjenneen irti pieniä paloja pian terän vaihdon jälkeen, voi ennenaikaisen kulumisen syy olla virheellisessä sisäänajossa /25/.

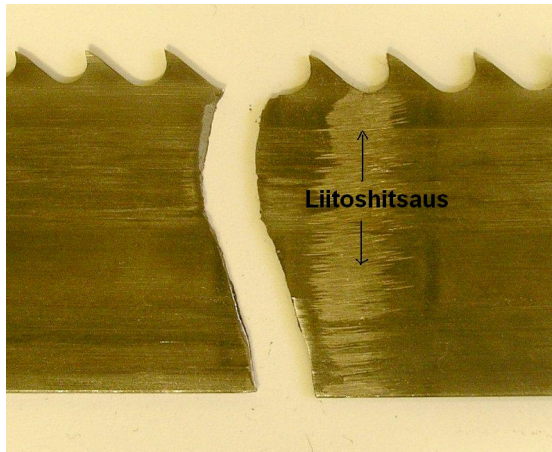
Väärä nestesuihkun suuntaus tai konsentraatio aiheuttaa myös terän voimakasta lämpenemistä, joka taas aiheuttaa edellä mainitun nopean viistekulumisen.

## **7.2 Väsyminen, väsymismurtuma**

Väsyminen on tavanomainen terän kulumismuoto sahattaessa pehmeitä, seostamattomia teräksiä. Väsymisessä terän hampaat jäävät vielä teräviksi ja terä on lastunut loppuun asti hyvin mutta terärunko yksinkertaisesti väsyi poikki.

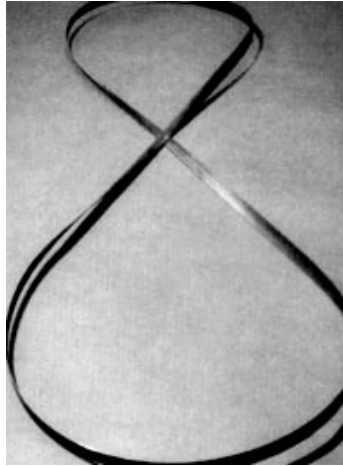


Yleensä väsymismurtuma alkaa hammasvälin pohjasta tai terän selkäosasta ja etenee melko suoraviivaisesti poikki terän. Väsymismurtuman syntymiseen vaikuttaa olennaisesti terän kireys, oikea teränkorkeus sekä oikein säädetyt teräohjaimet sekä tietenkin lastuamisarvot. Kuvassa 31 on tyypillinen terän väsymismurtuma, joka on alkanut hitsin muutosvyöhykkeeltä terän selkäosasta /25,26/.



**Kuva 31.** Terän väsymismurtuma

Liiallinen terän kireys aiheuttaa terään voimakkaan taivutusrasituksen, jonka seurauksena on terän nopea väsyminen ja katkeaminen. Liian korkean tai paksun terän valitseminen suhteessa sahan vetopyöriin aiheuttaa myös samanlaisen, liiallisen taivutusrasituksen. Eräs merkki liiallisesta teränkireydestä on sahasta irrotetun terän kiertyminen 8-muotoon normaalin o-muodon sijasta. Tällöin sahassa on usein myös kuluneet teräpyörät, jotka aiheuttavat terän venymisen selkäpuolelta ja kiertymisen kahdeksikon muotoon. Kuvassa 32 on esimerkki liiallisen teränkireyden seurauksena 8-muotoon pyrkivästä terästä /25/.



**Kuva 32.** Kahdeksikon muotoinen väsynyt terä /25/

Väärin säädetyt tai kuluneet teränohjaimet voivat aiheuttaa terään myös taivutusjännityksen, joka johtaa terän väsymiseen. Väärin säädetyistä tai kuluneista teränohjaimista selkeimpiä merkkejä ovat terän runkoon tulevat jatkuvat koko terän pituiset kulumisjäljet. Väärin säädetty terän ylätuenta tai liian suuri syöttö aiheuttavat terän selkäosan kasaan painumista, sekä mahdollisesti puutteellisen jäähtymisen kanssa selkäosan työstökarkenemistä. Karennut terä on entistä alttiimpi väsymismurtumalle. Kuvan 33 kaltaiset säröt terän selkäosassa kertovat suurista syöttöarvoista ja alkaneesta väsymismurtumasta. Säröt on helppo havaita silmällä terästä ja niistä kertoo myös ”klikkaava” ääni sahauksen aikana /25,26,27/.



**Kuva 33.** Alkanut väsymismurtuma

### **7.3 Lohkeaminen / kovametallikärjen irtoaminen**

Toisinaan terästä lohkeaa yksi tai useampia peräkkäisiä hampaita/kovametallikärkeä pois. Jo yhden hampaan poislohkeaminen saa aikaan nopean terän loppuun kulumisen. Terän lohkeamiseen johtaa useimmiten hankala kappaleeseen sisään/ulos -meno, liian tiheä tai harva hammasjako, vääränlainen hammasgeometria tai väärät lastuamisarvot. Kuvassa 34 on esimerkki Hook-hammasistetusta Bi-metalliterän lohkeamistapauksesta, jossa useista peräkkäisistä hampaista on lohjennut hankalan kappaleesta ulostulon seurauksena pikateräskärki irti /5/.



**Kuva 34** .Irti lohjennut pikateräshammas sivustapäin kuvattuna.

Liian tiheä hammasjako aiheuttaa sen, että lastut eivät mahdu lastutilaan. Tämä johtaa lastujen kiinnihitsautumiseen terään ja lastuamisvoimien kasvamiseen, jonka seurauksena hampaat joko lohkeavat irti tai kuluvat nopeasti loppuun. Terä voi myös katketa lastutilan ylitäytöksen seurauksena /5,7, 26, 27/.

Liian suuri syöttö saa myös aikaan lastutilavuuden täyttymisen ja mahdollisen hampaan lohkeamisen. Lastuharjan huono toiminta sekä nesteen väärä suuntaus voivat myöskin aiheuttaa lastutilavuuden täyttymistä ja hampaiden lohkeamista.

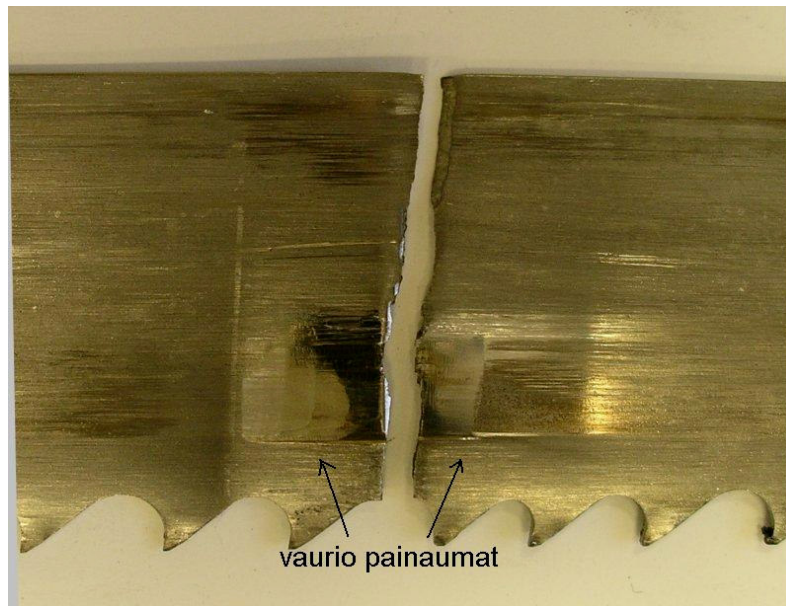
Liian harva hammasjako sahattavan poikkileikkauksen kokoon nähden yhdistettynä kovaan syöttöön aiheuttavat lastuamisvoimien kasvua ja kovia hammaspaineita erityisesti silloin kun vain muutama hammas lastuaa samaan aikaan kappaletta. Tämä johtaa usein hampaan lohkeamiseen ja terän tuhoutumiseen.

#### **7.4 Värinä**

Vannesahauksessa esiintyy myös aika ajoin värinää. Värinä on korkeataajuuksista ääntä, joka on helppo tunnistaa. Värinä voi olla jatkuvaa tai hujuvaa. Värinä johtaa myös vannesahauksessa nopeaan terärikkoon. Värinää esiintyy yleisemmin työstökarkenevilla materiaaleilla kuten ruostumattomilla teräksillä. Värinän aiheuttajina ovat useimmiten virheelliset lastuamisarvot, koneen riittämätön tukevuus, vääränlainen terägeometria, riittämätön terän kireys sekä huono kappaleen kiinnitys /5,25,26,27/.

#### **7.5 Terän juuttuminen**

Joskus käy niin, että terä juuttuu työkappaleeseen ja tämän seurauksena terästä lohkeaa hampaita irti tai terä katkeaa. Tämä vauriomuoto on yleinen sahattaessa erittäin isoja kappaleita. Kiinnitysleukojen puristusvoima voi olla riittämätön ja kappaleet pääsevät liikkumaan puristimissa katkaisun loppuvaiheessa, jolloin sahausura voi painua kiinni ja seurauksena on terärikko. Toisinaan myös tangon sisäiset jännitykset esim. tangon päissä aiheuttavat sen, että sahausura painautuu kiinni sahauksen aikana ja terä vaurioituu. Terän juuttumisesta jää terään yleensä painaumia tai merkkejä lähelle katkeamispintaa kuten kuvan 35 terässä.



**Kuva 35.** Kiinni juuttuneen terän vauriot

### **7.6 Vinoa/kiero sahauspinta**

Vinoa sahauspinta johtuu terän taivutusjäykkyyden loppumisesta kesken. Terä ei kestä kiertymättä siihen kohdistuvaa taivutusjännitystä, vaan ikään kuin nurjahtaa.

Vinoon sahauspintaan on yleisimmin syynä kulunut terä. Tämä johtaa syöttövoiman kohoamiseen ja terän taipumiseen. Sama ilmiö saadaan aikaiseksi myös liian tiheällä hammastuksella. Myös liian suuri syöttö, löysällä oleva terä tai liian kauas toisistaan säädetyt teräohjaimet voivat aiheuttaa saman ongelman. Kokemus on osoittanut myös, että kuluneet teräohjaimet, lastut teräohjaimissa sekä väljät ohjainrullat voivat myös johtaa vinoon leikkauspintaan /5,27/.

## 8 VANNESAHAUKSEN KUSTANNUKSET

Vannesahauksen kustannukset koostuvat neljästä kustannustekijästä; pääoma-, käyttö-, terä-, materiaali-, ja laatukustannuksista. Huomion kiinnittäminen vain terän hintaan ei ole kokonaistaloudellisesti järkevää vaan kustannuksia on tarkasteltava kustannus per katkaisu -näkökulmasta edullisimman terävaihtoehdon löytämiseksi. Seuraavissa luvuissa on tutkittu kustannusten muodostumista vannesahauksessa.

### 8.1 Pääoma - ja käyttökustannukset

Koneen pääoma- ja käyttökustannusten kustannus per katkaisu -osuuden selvittämiseksi kokonaiskustannuksista on ensin määritettävä konetuntihinta, joka koostuu seuraavista tekijöistä:

- Koneen pääomakulut
- Koneen käyttökulut, joihin kuuluu työntekijän palkka-, sähkö- ja lastuamiskustannukset
- Koneen huoltokulut ja
- Kiinteät kulut, joihin kuuluu rakennuksen pääomakulut, lämmitys yms.

Näiden tietojen pohjalta lasketaan seuraavan kaavan mukaan konetuntihinta, jota käytetään koko kustannuslaskennan pohjana:

$$KTH = \frac{PÄÄOMAK. + KÄYTTÖK. + HUOLTOK. + KIINTEÄT K.}{VUOSITTAISET KÄYTTÖTUNNIT}, (6)$$

missä

KTH= konetuntihinta

Seuraavaksi määritetään yhden kappaleen katkaisuun kuluva kokonaisaika, joka lasketaan seuraavasti:

$$KOKONAISAIKA = VARSINAINEN SAHAUSAIKA + SIVUAJAT, \quad (7)$$

missä varsinainen sahausaika tarkoittaa kappaleen katkaisuun kuluva-aikaa ja sivuaika tarkoittaa terän pikaliikkeisiin ja kappaleen/nipun siirtoon kuluva-aikaa. Nyt voidaan määrittää lopullinen konekustannus per katkaisu, KJKK, seuraavasti:

$$KJKK = KTH * KOKONAISAIKA \quad (8)$$

## 8.2 Teräkustannukset

Katkaisukohtainen teräkustannus muodostuu seuraavien tekijöiden summana:

- Terän hinta
- Teränvaihtokustannus

Jossa teränvaihtokustannus muodostuu:

$$\begin{aligned} \text{TERÄNVAIHTOKUSTANNUS} = \\ \text{TERÄNVAIHTOAIKA} * KTH + \text{TERÄNVAIHTOTYÖN HINTA} \end{aligned} \quad (9)$$

Nyt teräkustannus per katkaisu, TKK, saadaan seuraavan yhtälön mukaisesti /24/:

$$TKK = \frac{\text{TERÄN HINTA} + \text{TERÄNVAIHTOKUSTANNUS}}{\text{SAHATTUJEN KAPPALEIDEN LKM}} \quad (10)$$

### **8.3 Materiaalihukkakustannukset**

Materiaalihukkakustannusten laskeminen voi helposti ajatellen tuntua turhalta, vannesahan terien ollessa hyvin kapeita. Mutta esimerkiksi tapauksessa, jossa sahataan 20 mm pitkiä kappaleita tangosta, edustaa materiaalihukkakustannus jo yli 10 % koko materiaalikustannuksista käytettäessä 3 mm levyistä kovametalliterää. Kysymyksessä ei siis ole merkityksetön tekijä, vaan tekijä, joka todellakin tulee ottaa huomioon etenkin kalliita raaka-aineita sahattaessa. Materiaalihukkakustannus per katkaisu määritetään seuraavasti /24/:

$$MTHK = W * A * MKH \quad , \quad (11)$$

missä

MTHK =materiaalihukkakustannus per katkaisu

W =terän harituksen kokonaisleveys

A =yhden katkaisun pinta-ala

MKH =materiaalin kilohinta

### **8.4 Laatumukustannukset**

Vannesahauksen laatumukustannukset ovat hankalammin määritettävissä kuten laatumukustannukset yleensäkin. Seuraavat tekijät on kuitenkin otettava huomioon sovelluskohtaisesti vertailtaessa esimerkiksi Bi- ja kovametalliterää:

- Pinnanlaatu
- Sahauspituus, -suoruus ja toleranssit
- Jälkityön tarve

Kovametalliterillä saavutetaan yleisesti parempi pinnanlaatu kuin Bi-metalliterillä,



ja myöskin sahauspituuden ja –suoruuden suhteen kovametalliterät ovat usein tarkempia. Jos kovametalliterän käytöllä pystytään poistamaan esimerkiksi oikaisusorvauksen tarve, on syntyvät säästöt merkittäviä, ja näin ollen Bi-metalliterä kärsii paljon suuremmista laatukustannuksista kuin kovametalli.

Myös terän luotettavuus on otettava huomioon ainakin kalliita ja suuria aihioita sahattaessa. Terän laatukustannukset nousevat erittäin suuriksi, jos esimerkiksi suuri ja samalla kallis inconel-aihio sahataan vinoksi. Näin ollen teränvaihto jokaisen sahattavan kappaleen välillä on lähes perusteltua. Laatukustannuksia on siis tarkasteltava siitä näkökulmasta, jota pidetään sahauksen onnistumisen kannalta olennaisimpana./15/

### **8.5 Kokonaiskustannukset**

Sahaustapahtuman kokonaiskustannukset per katkaisu saadaan laskemalla edelliset tekijät yhteen, eli:

$$SAHAUKSENKOKONAISKUSTANNUS = KJKK + TKK + MTHK + LAATUK \quad (12)$$

Sahauksen kokonaiskustannus katkaisua kohden on erittäin hyvä mittari arvioitaessa erilaisten terien todellista kustannusta katkaisua kohden. Monesti huomataan, että pelkkä terän hinta ei ole määräävä tekijä edullisinta terävaihtoehtoa etsittäessä, etenkin jos laatukustannuksissa pystytään säästämään.

## 9 SUORITETTAVAT KOKEET

Diplomityössä suoritettiin kaksi eri koesarjaa, joista ensimmäisen päämääränä oli selvittää kalsium -käsittelyn vaikutus sahattaessa kalsiumkäsiteltyä ja -käsittelemätöntä terästä niin Bi- kuin kovametalliterälläkin. Tavoite oli selvittää antaako teräkselle suoritettava kalsium-käsittely paremman lähtökohdan sahattavuudelle käytettäessä Imatran Steelin eniten toimittamia materiaalityyppejä eli kone- ja nuorrutusteräksiä.

Toisen koesarjan tarkoituksena oli selvittää hieman uudenlaisten terien soveltuvuus Turengin teräspalvelukeskuksen tuotantoon. Tavoitteena oli löytää kustannustehokkain terä. Terien välistä paremmuutta tarkasteltiin kustannusten näkökulmasta käyttäen luvussa kahdeksan esiintyvää kustannus per katkaisu menetelmää.

Kokeiden terävalinnoissa oli mukana myös kovametalliteriä ja kokeiden yhteydessä saatiin kallisarvoista tietoa niiden toimivuudesta vanhemmissa, pääasiassa Bi-metalliterille tarkoitetuissa sahatyypeissä sekä pystyttiin kartoittamaan niiden käyttöön liittyviä etuja sekä mahdollisia ongelmia.

### **9.1 Sahauskokeiden suorittaminen**

Sahauskokeiden suorittamisessa noudatettiin mahdollisuuksien mukaan seuraavaa kaavaa:

- Esivalmistelut
- Kokeen suoritus ja
- Kokeen jälkeiset toimenpiteet.

Seuraavissa kappaleissa on esitelty, mitä toimia mihinkin vaiheeseen sisällytettiin ja kuinka ne suoritettiin.

### 9.1.1 Kokeen esivalmistelut

Jokaista koetta varten suoritettiin esivalmistelut, joihin sisällytettiin seuraavat asiat, jotka raportoitiin koepöytäkirjaan:

- Uuden terän vaihto ja teränkireyden tarkistus
- Teräohjainten ja ohjainrullien kunnan tarkastus sekä tarvittaessa vaihto
- Lastuharjan kunnan tarkistus ja tarvittaessa vaihto
- Lastuamismesteen pitoisuuden tarkistus ja tarvittaessa nesteen vaihto ja
- Lastuamisnopeuden kalibrointi.

Teränkireyden tarkistus suoritettiin kuvan 36 manuaalisella kireysmittarilla, joka mittaa terässä olevaa venymää. Nopeuden kalibrointi taas suoritettiin kuvan 37 teränopeuden mittaukseen tarkoitetulla mittalaitteella.



**Kuva 36.** Teränkireysmittari.



**Kuva 37.** Vannenoisuusmittari.

### 9.1.2 Kokeiden suoritus

Jokainen koe suoritettiin saman kaavan mukaisesti eli terän kestoikää mitattiin sahaten kokeeseen valituilla lastuamisarvoilla kappaleita niin kauan, kunnes jokin kulumiskriteeri täyttyi ja terä oli käytännössä käyttökelvoton.

Kriteerinä käyttökelvottomuudelle pidettiin terän katkeamista sekä vinoon sahausta. Terän katkeamisen yhteydessä tulkinta oli helppoa, sahaus loppui katkeamiseen ja tulkintaepäselvyyksiä ei ollut.

Vinoon sahauksen rajana pidettiin joko sahassa olevaa suoruuden valvontaa tai standardin SFS-EN 22768-1 antamia suoruustoleransseja. Taulukkoon 8 on koottu standardin suoruudelle antamat ohjearvot. Vinoon sahauksen alkaessa puhdistettiin teräohjaimet. Mikäli puhdistus auttoi ja vinoon sahaus loppui, jatkettiin sahausta /29/.

*Taulukko 8. Standardin 22768-1 antamat suoruusvaatimukset.*

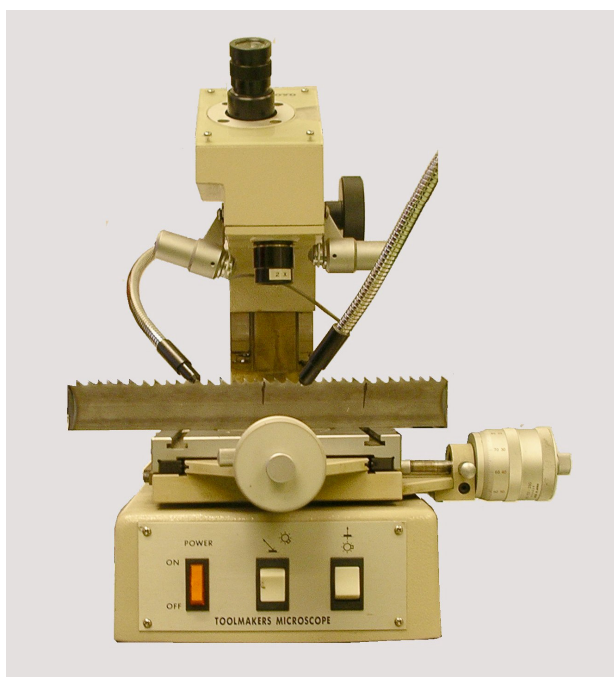
| Suoruustoleranssi  | Mitta-alue mm |
|--------------------|---------------|
| $\pm 0^{\circ}30'$ | 10-50         |
| $\pm 0^{\circ}20'$ | 50-120        |
| $\pm 0^{\circ}10'$ | 120-400       |

### 9.1.3 Kokeen jälkeiset toimenpiteet

Kokeen jälkeen suoritettiin mahdollisuuksien rajoissa seuraavat toimet:

- Terän kireyden tarkastus, ellei terä ole katkennut
- Lastuamisnopeuden tarkastus koko katkaisun ajalta, ellei terä ole katkennut
- Terän kulumisen mittaus
- Lastuamisnesteem emulsiopitoisuuden mittaus ja
- Koepöytäkirjan täyttö ja tarkastus.

Terän kulumisen mittaus suoritettiin kuvan 38 työkalumikroskoopilla, johon rakennettiin kiinnitysalusta terän osien kiinnitystä varten. Mittaus suoritettiin leikkaamalla n. 20 cm pitkä pala irti neljästä eri kohdasta terää tasaisin välein ja mittaamalla 10 hampaan viistekulumisen kustakin palasta. Mittauksessa suljettiin hammasjaon ja harituksen vaikutukset pois mittaamalla identtinen osa kustakin palasta.



**Kuva 38.** Työkalumikroskooppi ja teräpidin.

Aiempaa tietoa siitä, kuinka terien välistä paremmuutta tulisi vertailla ei ollut käytettävissä. Terien kulumismittauksesta ja sen suorittamisesta ei myöskään löytynyt minkäänlaista esitietoa, joten kokeiden osalta päätettiin soveltaa sorvauksesta käytettyä keskimääräistä viistekulumista. Keskimääräinen viistekuluminen on viistekulumisen keskiarvo mittaussektorilla ja mittaussektori oli testin tapauksessa koko hampaan leveys.

### **9.2 Koesarja 1, kalsium -käsittelyn vaikutus sahattavuuteen**

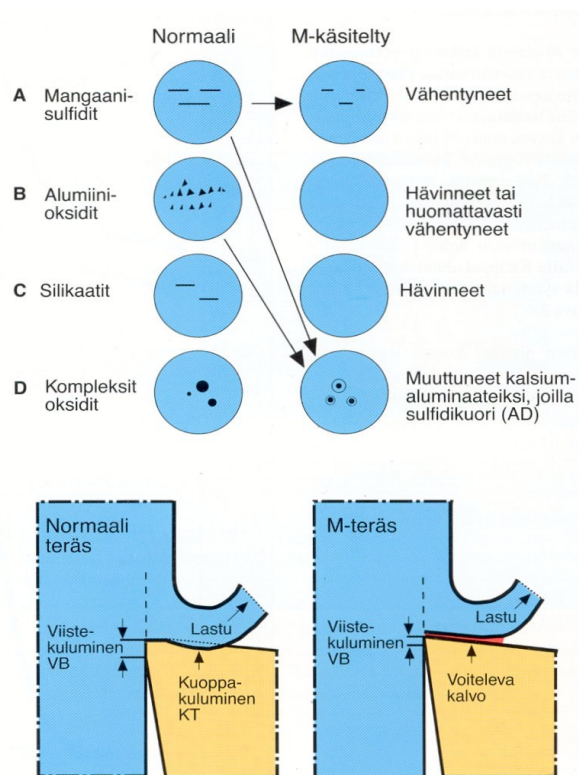
Koesarjassa yksi tutkittiin kalsium-käsittelyn vaikutusta sahattavuuteen käytettäessä sekä pikateräs- että kovametalliterää. Kummallakin terätyypillä sahattiin sekä kalsium -käsiteltyä, että -käsittelemätöntä materiaalia ja teränkestoa verrattiin toisiinsa.

Kovametalliterällä suoritettu koesarja oli tuotantoon kytkemätön ja täysin kokeellinen, joten käytetyt lastuamisarvot valittiin suuriksi mahdollisimman nopeiden tulosten saamiseksi.

Bi-metalliterätestissä taas oli toisen materiaalin osalta kysymyksessä tuotantosahaus, joten lastuamisarvot täytyi valita siten, että sahaus onnistuu luotettavasti ilman vinoon sahausta myös miehittämättömänä.

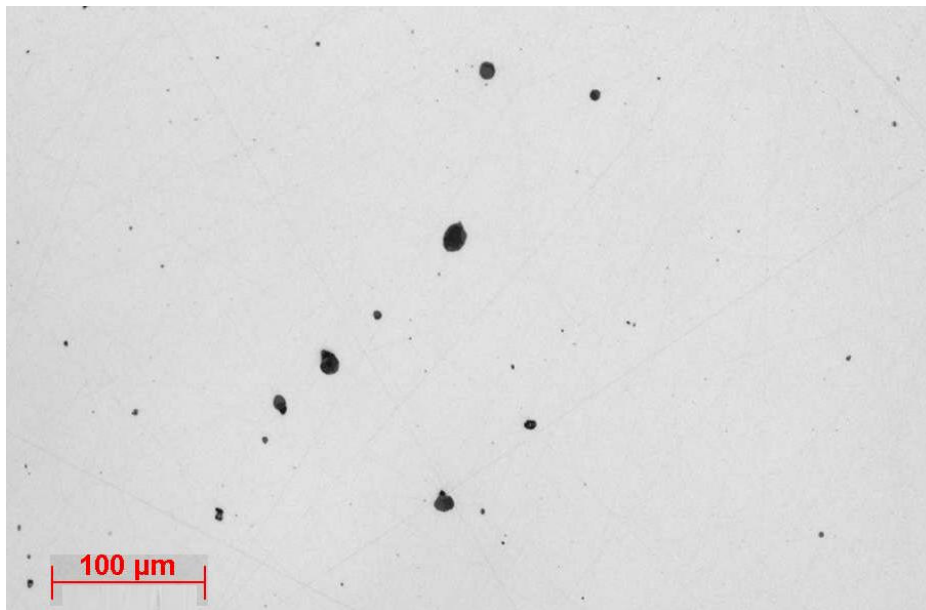
### 9.2.1 Kalsium -käsittely

Kalsium-käsittelyllä pyritään teräksen mahdollisimman hyvään lastuttavuuteen mitään muuta ominaisuutta huonontamatta. Kalsium-käsittelyyn kuuluu kaikkien teräksen valmistukseen liittyvien vaiheiden tarkka hallinta. Jokaisessa teräksen valmistusvaiheessa prosessia pyritään ohjaamaan lastuttavuuden kannalta edullisimpaan lopputulokseen. Tärkeitä osatekijöitä kalsium -käsittelyssä ovat sulametalurgiset käsittelyt joilla voidaan vaikuttaa teräksen koostumukseen ja sulkeumarakenteeseen. Merkittävässä roolissa ovat myös teräkselle suoritettavat lämpökäsittelyt. Kuva 39 kertoo kalsium-käsittelyn aikaansaamista eroavaisuuksista teräksen sulkeumarakenteessa/32/.



**Kuva 39.** Kalsium -käsittelyn vaikutus sulkeumarakenteeseen/32/.

Kalsium-käsittelyssä kuvassa esiintyvät kovat sulkeumatyyppit B, C ja D muunnetaan pehmeämmiksi kalsiumia sisältäviksi oksideiksi, jotka ovat sulfidikuoren ympäröimiä. Nämä ovat pehmeitä ja kuluttavat lastuavaa terää huomattavasti vähemmän kuin käsittelemättömät sulkeumatyyppit. Suurilla lastuamisnopeuksilla kyseiset kalsium-oksidit muodostavat voitelevan kalvon leikkaavan terän pintapinnalle, joka pidentää työkalun kestoikää. Kuvassa 40 on sulkeumarakenne kalsiumkäsittelystä koemateriaalista Moc 210 M.



**Kuva 40.** Sulkeumarakenne kalsiumkäsittelystä Moc 210 M -teräksessä.

Rikin lastuttavuutta parantava vaikutus on myös otettu huomioon Imatra Steelin kalsium-terästen valmistusprosessissa, ja rikkitasot ovat kalsium-teräksissä lastuttavuuden kannalta optimaalisimmillaan /32/.

Kalsium -käsittelyn on aiemmin sorvaus- ja porauskokeilla todettu lisäävän terän kestoikää seuraavasti hieman materiaalista riippuen pikaterästyökaluilla n. 20-30 % ja kovametallilla optimitapauksissa jopa 400 %. Kalsium-käsittelyn edut tulevat kuitenkin parhaiten esille käytettäessä paljon suurempia lastuamisnopeuksia kuin vannesahauksen yhteydessä käytetään.

Kalsiumkäsittelyn onnistumisen laadun tutkimiseen käytetään erilaisia menetelmiä. Eräs keino on sorvauskokeet ja materiaalin V15-lastuamisnopeuden



määrittäminen. Toinen mahdollisuus on tutkia materiaalin kuonapuhautta ja siinä olevien kalsiumsulkeumien määrää. Diplomityön tapauksessa kalsiumkäsittelyn tasoa tutkittiin tarkastelemalla kuonapuhautta Stahl-Eisen Prüfblattinguonanalukumenetelmän sekä standardin SFS-ENV 10247 mukaisesti.

## 9.2.2 Koemateriaalit, kovametalliterätesti

Kovametalliterällä tehdyssä testissä koemateriaalipareina käytettiin seuraavia Imatran Steelin teräksiä:

- Imatra 520 M, laji 1623, sulatus 449000
- S355JR, laji 2729, sulatus 375100

Materiaaliparista Imatra 520 M on kalsium-käsitelty, hyvin lastuttava koneteräs. Materiaali S355JR on lastuttavuusominaisuuksiltaan normaali rakenneteräs. Taulukossa 9 on materiaaliparin seosainepitoisuudet. Molemmat materiaalit ovat mikrorakenteeltaan ferriittis-perliittisiä ja raekoot vastaavat toisiaan. Liitteessä 1 on molempien materiaalien mikrorakenteet.

**Taulukko 9.** *Materiaaliparien seosainepitoisuudet, paino-%.*

| Materiaali | Imatra 520 M | S355JR |
|------------|--------------|--------|
| <b>C</b>   | 0,148        | 0,15   |
| <b>Si</b>  | 0,343        | 0,292  |
| <b>Mn</b>  | 1,320        | 1,202  |
| <b>P</b>   | 0,010        | 0,007  |
| <b>S</b>   | 0,036        | 0,028  |
| <b>Cr</b>  | 0,196        | 0,211  |
| <b>Ni</b>  | 0,139        | 0,164  |
| <b>Mo</b>  | 0,029        | 0,032  |
| <b>V</b>   | 0,057        | 0,04   |
| <b>Ti</b>  | 0,0023       | 0,0028 |
| <b>Cu</b>  | 0,199        | 0,226  |
| <b>Als</b> | 0,018        | 0,021  |
| <b>Al</b>  | 0,021        | 0,022  |
| <b>Sn</b>  | 0,009        | 0,008  |
| <b>B</b>   | 0,011        | 0,011  |
| <b>Ca</b>  | 0,0004       | 0,0003 |
| <b>N</b>   | 0,004        | 0,0011 |
| <b>H</b>   | 0,014        | 0,0101 |

Seosainetaululukosta nähdään että lastuamisen kannalta kriittiset C, Si, ja S ovat lähes samalla tasolla, joten tulokset ovat niiltä osin vertailukelpoisia. Seosainepitoisuudet edustavat materiaaleille ominaista tasoa.

Taulukossa 10 on vertailtu materiaalien fysikaalisia ominaisuuksia. Materiaalien murto- ja myötölujuudet poikkeavat aavistuksen toisistaan, samoin kovuus, kalsiumkäsittämättömän S355JR-materiaalin eduksi. Myös materiaalien halkaisija on erilainen, joka voi vaikuttaa lopputuloksiin. Stahl-Eisen Prüfblattin kuonalukuraportin (SEP Ko 3 ja Ko 4) arvot edustavat normaalia molempien materiaalien tapauksessa ja ne on tehty testin koekappaleista. Materiaalin Imatra 520 M standardin SFS-ENV 10247 -mukainen kuonanluku raportti löytyy liitteestä 2 ja myös sen tulokset ovat materiaalille ominaisella tasolla. Materiaalin kalsium-käsittelyn voidaan siis katsoa onnistuneen normaalisti.

**Taulukko 10.** Fysikaalisten ominaisuuksien vertailua.

| Materiaali         | Imatra 520 M        | S355JR             |
|--------------------|---------------------|--------------------|
| Halkaisija         | 120 mm              | 90 mm              |
| Poikkipinta-ala    | 113 cm <sup>2</sup> | 64 cm <sup>2</sup> |
| Lämpökäsittelytila | -                   | -                  |
| Kovuus HB          | 185                 | 170                |
| Myötöraja Mpa      | 465                 | 440                |
| Murtoraja Mpa      | 600                 | 560                |
| SEP 3/4            | 53,3/23,3           | 8,3/3,3            |

### 9.2.3 Koemateriaalit, Bi-metalliterätesti

Bi-metalliterällä tehdyssä testissä vertailtavina materiaaleina olivat:

- MoC 210 M, laji 6016, sulatus 546770
- 25CrMo4, laji 6034, sulatus 549560

Materiaaleista Moc 210 M:lle on suoritettu lastuttavuutta parantava kalsiumkäsittely ja se luokitellaan hyvin lastuttavaksi nuorrutusteräkseksi. 25CrMo4 on lastuamisominaisuuksia lukuun ottamatta täysin vastaava nuorrutusteräs. Taulukossa 11 on materiaaliparin seosainepitoisuudet. Molemmat materiaalit ovat bainiittis-

martensiittisiä ja mikrorakennekuvat on esitetty liitteellä 3.

*Taulukko 11. Bi-metallitestin materiaaliparin seosaineet.*

| <b>Materiaali</b> | <b>Moc 210 M</b> | <b>25CrMo4</b> |
|-------------------|------------------|----------------|
| <b>C</b>          | 0,251            | 0,272          |
| <b>Si</b>         | 0,293            | 0,268          |
| <b>Mn</b>         | 0,725            | 0,783          |
| <b>P</b>          | 0,011            | 0,01           |
| <b>S</b>          | 0,032            | 0,029          |
| <b>Cr</b>         | 1,001            | 1,127          |
| <b>Ni</b>         | 0,177            | 0,162          |
| <b>Mo</b>         | 0,228            | 0,224          |
| <b>V</b>          | 0,003            | 0,005          |
| <b>Ti</b>         | 0,002            | 0,0036         |
| <b>Cu</b>         | 0,181            | 0,163          |
| <b>Als</b>        | 0,009            | 0,018          |
| <b>Al</b>         | 0,011            | 0,02           |
| <b>Sn</b>         | 0,010            | 0,01           |
| <b>B</b>          | 0,011            | 0,01           |
| <b>Ca</b>         | 0,0002           | 0,0002         |
| <b>N</b>          | 0,005            | 0,0011         |
| <b>H</b>          | 0,010            | 0,0119         |

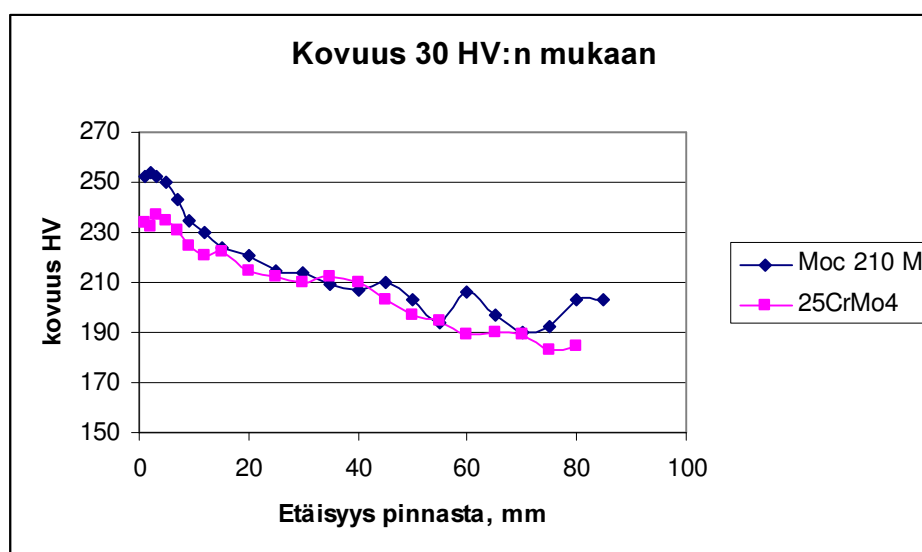
Materiaalipari on hyvin vertailukelpoinen lastuamisen kannalta tärkeiden seosainepitoisuuksien (C, Si, S, ) ollessa lähellä toisiaan. Analyysit edustavat molemmille materiaaleille tyypillistä otantaa.

Materiaaliparin fysikaalisten ominaisuuksien vertailu on taulukossa 12. Ominaisuudet ovat lähellä toisiaan ja poikkeavat lähinnä halkaisijan osalta. Stahl-Eisen Prüfblattin -kuonalukuraportin (SEP ¾) arvot edustavat normaalia molempien materiaalien osalta ja analyysit tehtiin koekappaleista. Materiaalin Moc 210 M standardin SFS-ENV 10247 -mukainen kuonanluku raportti on esitetty liitteellä 4, ja myös nyt kalsium-käsittelyn tason voidaan tulkita edustavan normaalia.

*Taulukko 12. Materiaaliparin fysikaalisten ominaisuuksien vertailu.*

| Materiaali         | Moc 210 M          | 25CrMo4             |
|--------------------|--------------------|---------------------|
| Halkaisija         | 170 mm             | 160 mm              |
| Poikkipinta-ala    | 227cm <sup>2</sup> | 201 cm <sup>2</sup> |
| Lämpökäsittelytila | nuorrutettu        | nuorrutettu         |
| Kovuus HB          | 210                | 200                 |
| 0,2-Raja           | 540                | 534                 |
| Murtoraja Mpa      | 680                | 668                 |
| SEP 3/4            | 43,3/23,3          | 8,3/3,3             |

Sahauskokeiden yhteydessä otetuista näytteistä havaittiin, että jostakin syystä materiaali Moc 210 M oli lujittunut pinnasta n. 20 HV kovemmaksi kuin vertailumateriaali. Alla olevassa kovuusmittauskuvaajassa (kuva 41) on esitetty molempien materiaalien kovuusjakaumat. Kuvaajan kovuudet on mitattu 1 mm:n välein ulkoreunalta kohti keskustaa.



**Kuva 41.** Materiaalien kovuudet.

#### 9.2.4 Kokeissa käytetyt terät

Kokeessa käytettiin kovametalliterää Behringer HM-W ja Bi-metalliterää Wikus Marathon M42.

Behringer HM-W –kovametalliterä on harittamaton, sahauksen tehostamiseen,

sekä koville ja kuluttaville materiaaleille tarkoitettu kovametalliterä, joka valmistajan mukaan käy myös vanhempiin sahoihin. Terässä on positiivinen rintakulma, vaihteleva hammasjako ja lastu on jaettu seitsemään eri osaan hammashionnan avulla. Hammashionnan malli on vastaava kuin kappaleessa 7.6.2 - kovametalliterien haritukset.

Wikus marathon M42 -Bi-metalliterä on raker set -haritettu yleissahaukseen laajalle materiaalikirjolle tarkoitettu terä. Hook -hammasmuoto ja positiivinen rintakulma sekä vaihteleva hammasjako antavat terälle hyvät sahausominaisuudet ja pitkän kestoiän.

#### 9.2.5 Koelaitteistot

Kokeiden suorituksessa käytettiin kahta eri sahaa. Kovametalliteräkokeeseen käytettiin Imatra Steelin tutkimuskeskuksessa olevaa Behringer 220 Hbp -sahaa. Bi-metallikokeessa käytettiin Turengin teräspalvelukeskuksessa käytössä olevaa Behringer 340 A -sahaa. Taulukoissa 13 ja 14 on esitetty sahojen ominaisuuksia. Molemmat sahatyypit on tarkoitettu Bi-metalliterillä sahaukseen.

*Taulukko 13. Behringer 220 Hbp-sahan ominaisuudet.*

| SAHA                  | Behringer 220 Hpb                         |
|-----------------------|---|
| Tyyppi                | 2-tukinen vaakasaha                       |
| Terän mitat           | 3720 x 34 x 1,1 mm                        |
| Teho                  | 3 kW                                      |
| lastuamisnopeusalue   | 20-140 m/min                              |
| Kappaleen maks. mitat | Ø 220 mm                                  |
|                       | 260 x 220 mm                              |
| Syöttö                | Hydraulinen, 0-300 mm/min, käsisäätö      |
| Vannepyörän koko      | 395 mm                                    |
| Vanteen kiristys      | Mekaanis-hydraulinen                      |
| Muut:                 | Tangon syöttölaitteisto ja kappalelaskuri |

*Taulukko 14. Behringer 340 A- sahan ominaisuudet.*

| SAHA                  | Behringer 340 A  |
|-----------------------|--|
| Tyyppi                | 2-tukinen vaakasaha  |
| Terän mitat           | 4860 x 34 x 1,1 mm   |
| Teho                  | 4 kW   |
| lastuamisnopeusalue   | 17-110 m/min   |
| Kappaleen maks. mitat | Ø 340 mm   |
|                       | 600 x 340 mm   |
| Syöttö                | Hydraulinen, 0-300 mm/min, käsisäätö                       |
| Vannepyörän koko      | 550 mm   |
| Vanteen kiristys      | Hydraulinen  |
| Muut:                 | Tangon syöttölaitteisto, kappalelaskuri, suoruden valvonta |

#### 9.2.6 Kokeen lastuamisarvot

Kokeen lastuamisarvoina käytettiin taulukkoon 15 koottuja lastuamisarvoja. Arvot valittiin valmistajan suositustaulukoista valiten ne suositusten ylärajoilta kokeen suoritusajan minimoimiseksi.

*Taulukko 15. Koesarjan 1 lastuamisarvot.*

| Koetyyppi       | Materiaali   | Tangon halkaisija | Lastuamis nopeus m/min | Syöttö mm/min | Tuottavuus cm <sup>2</sup> /min | Tangon katkaisu aika |
|-----------------|--------------|-------------------|------------------------|---------------|---------------------------------|----------------------|
| Kovametalli koe | Imatra 520 M | 120               | 110                    | 120           | 113                             | 1 min                |
|                 | S355JR       | 90                | 110                    | 120           | 85                              | 45 s                 |
| Bi- metallikoe  | Moc 210 M    | 170               | 65                     | 55            | 75                              | 3 min 7 s            |
|                 | 25CrMo4      | 160               | 65                     | 55            | 69                              | 2 min 54 s           |

Kokeen lastuamisarvot olivat ongelmattomat ja erittäin toimivat, joten niitä voi hyvin käyttää ko. materiaalien sahauskassa.

### 9.3 Koesarja 2, kustannus tehokkaimman terän määrittäminen

Koesarjassa kaksi valittiin kahdelta terätoimittajalta uuden tyyppisiä teriä kokeiltavaksi, joiden tulisi soveltua Turengin tuotantoon. Näistä teristä kokeessa valittiin kustannus per katkaisu -periaatetta soveltaen kokonaistaloudellisin ratkaisu, jota mahdollisesti jatkossa sovelletaan tuotantoon Turengissa. Samalla saatiin arvokasta tietoa kovametalliterän soveltumisesta nippusahaukseen.

Koe suoritettiin yhteistyössä Imatra Steelin asiakkaan Fiskars Consumerin kanssa. Sahaus suoritettiin Fiskarsin toimesta heidän sahoillaan tuotannon ohessa eli koe-terillä tehtiin tuotantosahausta. Tähän järjestelyyn päädyttiin kokeiden vaatiman pitkän ajan takia.

Imatra Steelillä ei ollut resursseja järjestää terävertailu-koesarjaa pelkkinä koesahausina. Myöskään Turengin tuotannosta ei löytynyt niin suuria sarjoja lukuun ottamatta koesarjassa yksi käytettyä MOC 210 M sahausta, että kokeet olisi ollut mahdollista suorittaa tuotannon ohessa.

#### 9.3.1 Koemateriaali

Kokeessa käytettiin Imatra Steelin materiaalia Imatra 5, joka on kalsiumkäsittelemätön nuorutusteräs. Materiaali oli kokeessa valssaustilainen ja taulukoon 16 on koottu materiaalin seosainepitoisuudet. Seuraavassa taulukossa on materiaalin mekaaniset ominaisuudet ko. tilassa. Imatra 5 on tavallinen nuorru-

tusteräs, johon ei ole lisätty mitään lastuttavuutta parantavia seosaineita. Kohtalaisen korkea hiilipitoisuus aiheuttaa hyvän lastunmurron ja materiaalin pitäisi olla ongelmitta lastuttavissa. Mikrorakenteeltaan Imatra 5 on ferriittis- perliittinen ja materiaalin mikrorakenne kuva on esitetty liitteellä 5 .

*Taulukko 16. Imatra 5 seosaineet.*

| Materiaali | IMATRA 5 |
|------------|----------|
| C          | 0,470    |
| Si         | 0,209    |
| Mn         | 0,701    |
| P          | 0,012    |
| S          | 0,018    |
| Cr         | 0,167    |
| Ni         | 0,154    |
| Mo         | 0,026    |
| V          | 0,002    |
| Ti         | 0,0026   |
| Cu         | 0,206    |
| Als        | 0,019    |
| Al         | 0,019    |
| Sn         | 0,011    |
| B          | 0,000    |
| Ca         | 0,001    |
| N          | 0,009    |
| H          | 2,031    |

*Taulukko 17. Materiaalin fysikaaliset ominaisuudet.*

| Materiaali         | Imatra 5     |
|--------------------|--------------|
| Halkaisija         | 23-55mm      |
| Lämpökäsittelytila | valssaustila |
| Kovuus HB          | 210          |
| Myötöraja Mpa      |              |
| Murtoraja Mpa      | 680          |

Kokeessa käytetty materiaali oli halkaisijaltaan välillä 39-55 mm, ja sahaus tapahtui ns. nippusahauksena. Taulukossa 18 on kokeessa olleiden nippujen koot ja poikkipinta-alat. Valitettavasti koetta ei ollut mahdollista toteuttaa niin, että terillä olisi sahattua vain yhtä ja ainoaa halkaisijaa. Nipussa olevat tangot oli hitsattu toisesta päästä toisiinsa kiinni pyörimättömyyden varmistamiseksi sahauksen aikana.



*Taulukko 18. Kokeen nippujen koot.*

| Mat Ø mm | Nippu | Pinta-ala cm <sup>2</sup> |
|----------|-------|---------------------------|
| 39       | 2 x 5 | 120                       |
| 45       | 2 x 5 | 127                       |
| 55       | 2 x 3 | 142                       |

### 9.3.2 Kokeen terät

Kokeeseen valittiin kolme terää, jotka poikkeavat käytössä olevista teristä ja joilla ajateltiin olevan uutuusarvoa sekä Turengin että Fiskars Consumerin sahaustoiminnan kehittämässä. Valitut terät on esitelty alla olevissa kappaleissa, jokainen terä oli varustettu 2/3 hammastuksella.

#### 9.3.2.1 Amada Super HLG M42

Amada Super HLG -terä on kehitetty erityisesti nuorrutusterästen sahaukseen. Kobolttiseosteinen M42-pikateräslaatu antaa hyvän kulumisen kestävyuden. Hook-hammastettu terä on varustettu vaihtuvalla hampaankorkeudella ja suurella positiivisella rintakulmalla, joka takaa hyvän lastunmuodostuksen ja mahdollistaa suurien syöttöjen käytön. Terä on variable set -haritettu.

#### 9.3.2.2 Wikus Marathon M51

Wikus Marathon M51 on Wikuksen yleissahaukseen tarkoitettusta M42 Marathon-terästä kehitetty kovemmalla kärkimateriaalilla varustettu terä. Terässä on vaihteleva rintakulma sekä raker set -haritus Pääasiallinen käyttökohde ruostumattomat teräkset umpiakseleina. Terä otettiin kuitenkin kokeiluun mukaan, koska monesti terän loppumisen syynä on hampaiden kulumisen eikä terän poikkiväsyminen, joten kovempien Bi-metallilaatujen käyttö on kokeilemisen arvoista.

#### 9.3.2.3 Wikus Futura

Wikus Futura –kovametalliterä on harittamaton, sahauksen tehostamiseen

sekä myöskin koville ja kuluttaville materiaaleille tarkoitettu kovametalliterä, joka valmistajan mukaan käy myös vanhempiin sahoihin. Terässä on positiivinen rintakulma, vaihteleva hammasjako sekä lastu on jaettu seitsemään osaan hammashionnan avulla.

### 9.3.3 Koelaitteisto

Kokeessa käytettiin vuosimallia 2004 olevaa Behringer 303 A CNC - tyyppistä sahaa, jonka tekniset tiedot ja tärkeimmät ominaisuudet on esitetty taulukossa 19. Saha on tarkoitettu Bi-metalliterillä sahaukseen.

*Taulukko 19. Behringer 303 A –sahan ominaisuudet.*

| SAHA                  | Behringer 303 A  |
|-----------------------|--|
| Tyyppi                | 2-tukinen vaakasaha  |
| Terän mitat           | 4640 x 41 x 1,3  |
| Teho                  | 5,4 kW   |
| lastuamisnopeusalue   | 17-140 m/min   |
| Kappaleen maks. mitat | Ø 300 mm   |
|                       | 300 x 300 mm   |
| Syöttö                | Hydraulinen, 0-300 mm/min, käsisäätö   |
| Vannepyörän koko      | 570 mm   |
| Vanteen kiristys      | Hydraulinen  |
| Muut:                 | Tangon syöttölaitteisto ja kappalelaskuri, vinoonsahauksen valvonta, nc-ohjattu lastuamisnopeuden säätö. Sahausaikojen valvonta, monen peräkkäisen työn ohjelmointi, nippusahauslaite. |

### 9.3.4 Kokeen lastuamisarvot

Kokeessa käytettiin taulukossa 20 olevia lastuamisarvoja. Kokeen lastuamisarvoille suuntaviivat saatiin terävalmistajien taulukoista sekä teräedustajilta koeteräyhäntöjen yhteydessä. Varsinaiset kokeen arvot säädettiin sopiviksi kokeen aloitusvaiheessa, koska ennalta kaavaillut suositusarvot osoittautuivat toimimattomiksi ja tuloksena oli värinää joka vaiheessa sahausta.

*Taulukko 20. Teränkestokoesarjan lastuamisarvot.*

| Koeterä                        | Lastuamis-<br>nopeus m/min | Syöttö<br>mm/min | Tuottavuus<br>cm <sup>2</sup> /min | Nipun katkaisuaika      |
|--------------------------------|----------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------|
| <b>Wikus marathon<br/>M51</b>  | 60                         | 50               | 70-75                              | 1 min 36 s - 2 min 12 s |
| <b>Amada Super<br/>HLG M42</b> | 60                         | 50               | 70-75                              | 1 min 36 s - 2 min 12 s |
| <b>Wikus Futura</b>            | 80                         | 70               | 90-110                             | 1min 6 s - 1 min 36 s   |

Valitut arvot ovat suositusten yläpuolella käytettävien syöttöjen ja jopa nopeuksien osalta, riippuen hieman suosituksia antavasta terävalmistajasta. Arvot olivat toimivat ja niitä voi käyttää hyvin Imatra 5 -materiaalin sahaukseen.

## 10 KOESARJOJEN TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELUA

Alla oleviin kappaleisiin on koottu suoritettujen kokeiden tulokset ja pyritty tarkastelemaan niitä sahatun pinta-alan, viistekulumisen että kustannusten näkökulmasta

### 10.1 Koesarja 1, kalsium -käsittelyn vaikutus sahattavuuteen Bi-metalliterillä

Alla olevassa taulukossa on esitelty kokeen tulokset. Taulukosta ilmenee sahatut kappalemäärät, terällä saadut neliöt , viistekuluminen sekä väsytyssyklarit. Väsyttäviä syklejä ajateltiin olevan kolme terän yhtä kierrosta kohti.

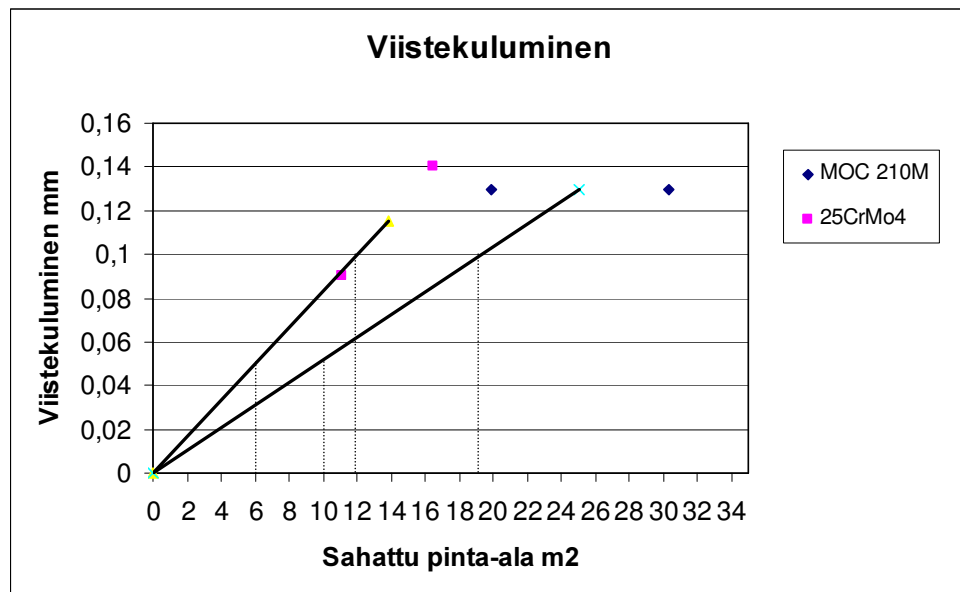
*Taulukko 21. Bi-metallikokeen tulokset.*

| Koetyyppi      | Terä nro | Materiaali | Katkaisujen lkm | Sahattu pinta-ala m <sup>2</sup> | Kulumis kriteeri | viistekulumuma mm | Väsytyssyklimäärä |
|----------------|----------|------------|-----------------|----------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Bi- metallikoe | 1        | Moc 210 M  | 867             | 19,9                             | Terä poikki      | 0,13              | 108000            |
|                | 2        | Moc 210 M  | 1340            | 30,3                             | Tylsä, ei sahaa  | 0,13              | 165000            |
|                | 1        | 25CrMo4    | 825             | 16,5                             | Terä poikki      | 0,14              | 96000             |
|                | 2        | 25CrMo4    | 550             | 11,1                             | Terä poikki      | 0,09              | 65000             |

Bi-metallikokeessa saavutettiin suuria sahattuja neliömääriä, yhteensä lähes 80 m<sup>2</sup> sahattua pinta-alaa. Tarkasteltaessa sahattujen neliöiden keskiarvoja kalsiumkäsitelty teräs MoC210 M osoittautui n. 80 % prosenttia paremmaksi verrattuna 25CrMo4 lajiin. Tulos vaikuttaa jopa liian suurelta, eroon vaikuttaa merkittävästi myös terien suuri laatuvariaatio ja terän poikkiväsymysasteen sisältämä hajonta. Imatra Steelillä aiemmin pikaterästyökaluilla suoritettujen lastuamiskokeiden pohjalta odotettiin korkeintaan 30 % parannusta kestoikään, joten tämän pohjatiedon perusteella tulos vaikuttaa [JNy1] jopa liian optimistiselta.

Terille suoritettujen viistekulumistarkastelujen myötä kestoikäero hieman pienenee. Terän poikkiväsymysaste on suurena niin suurta hajontaa sisältävä parametri, että kulumismittaus on luotettavampi keino materiaalien välisen eron löytämiseen. Kolme kokeen neljästä terästä katkesi väsymällä. Terä jolla saatiin eniten sahattua

pinta-alaa, jäi katkeamatta. Mutta vastoin odotuksia, eniten sahannut terä oli kulunut vain saman verran kuin toinenkin kalsium -käsiteltyä terästä sahannut terä. Vähiten taas oli luonnollisesti kulunut terä, jolla saatiin vähiten pinta-alaa. Alla olevassa kuvaajassa on tarkasteltu saatua neliömäärää viistekulumisen funktiona. Pisteet ovat lopetushetken viistekulumisen arvoja ja suorat mallintavat tilannetta, jossa viistekuluminen lähtee nolasta ja päättyy saatujen viistekulumistulosten ja sahattujen neliömetrien keskiarvoihin. Tarkasteltaessa suorien arvoja pisteissä viistekuluminen 0,05 ja 0,10 saadaan tulokseksi n. 50% parempi kestoikä kalsium -käsiteltyjen terästen hyväksi. Kulumista tarkasteltiin ko. pisteissä oletuksella että kuluminen on lineaarista arvoon 0,1 mm asti ja kasvaa nopeasti vasta tämän jälkeen. Kulumistulokset ovat mielenkiintoiset myös siinä valossa, että materiaali Moc 210 M pinta oli hieman lujittunut, mutta se ei näy terän viistekulumistuloksissa.



**Kuva 42.** Bi-metalliterien viistekuluminen sahauskokeen lopetushetkellä.

Terien viistekulumista tarkasteltaessa huomataan, että kalsium-käsittelemätöntä terästä sahattaessa terät ovat suhteessa kuluneet hieman enemmän, vaikka sahattut neliömäärät ovat pienempiä kuin kalsium-käsiteltyjen laatuojen. Tämä osoittaa kiistatta sen, että kalsium -käsitteltyt materiaalit ovat parempia sahattavuudeltaan

kuin käsittelemättömät käytettäessä Bi-metalliteriä. Luotettavien johtopäätösten tekoon tarvittaisiin suurempi sahauskoemäärä.

#### 10.1.1 Kovametallikokeen tulokset ja niiden tarkastelua.

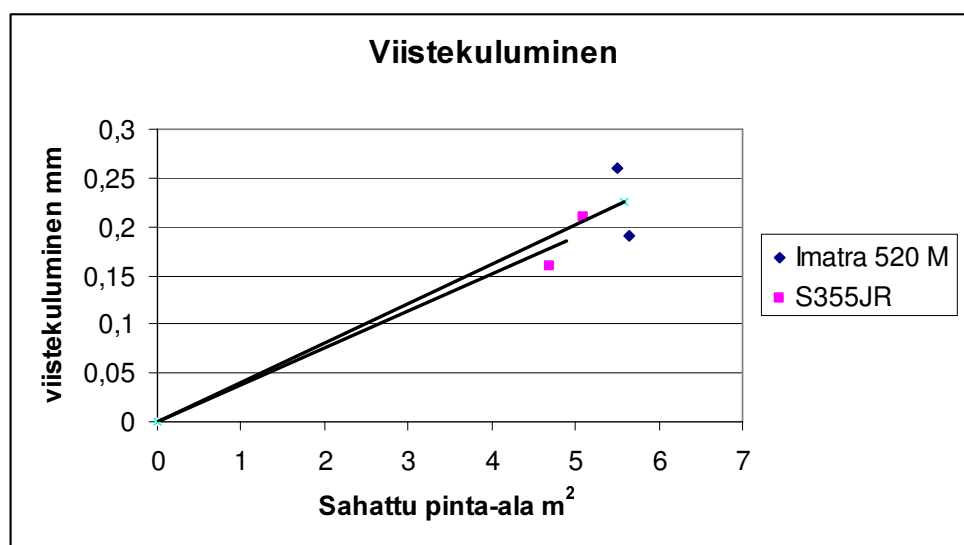
Taulukossa 22 on kovametalliterillä suoritetun kokeen tulokset. Taulukossa on terillä sahatut kappalemäärät, sahatut pinta-alat sekä terän kestävät väsytyssyklimäärät.

*Taulukko 22. Kovametallikokeen tulokset.*

| Koetyyppi      | Terä nro | Materiaali   | Katkaisujen lkm | Sahattu pinta-ala m <sup>2</sup> | Kulumis kriteeri | viistekulumia mm | Väsytyssyklimäärä |
|----------------|----------|--------------|-----------------|----------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Kovametallikoe | 1        | Imatra 520 M | 480             | 5,5                              | Vinon sahaus     | 0,26             | 43000             |
|                | 2        | Imatra 520 M | 500             | 5,65                             | Vinon sahaus     | 0,19             | 44000             |
|                | 1        | S355JR       | 740             | 4,7                              | Vinon sahaus     | 0,16             | 49000             |
|                | 2        | S355JR       | 800             | 5,1                              | Vinon sahaus     | 0,21             | 53000             |

Kovametallikokeessa sahattiin siis neljä terää, ja yhteensä 21 m<sup>2</sup> sahattua pinta-alaa. Kulumiskriteeriksi tuli jokaisen terän tapauksessa vinon sahaus. Kovametalliterien tapauksessa kalsium -käsitelty teräs osoittautui n. 15 % paremmaksi kuin käsittelemätön laatu tarkasteltaessa terän kestoikää sahattujen neliöiden näkökulmasta. Vaikka ero onkin prosentuaalisesti merkittävä, ei sen pohjalta voida tehdä johtopäätöksiä kalsium-käsiteltyjen terästen puolesta tai vastaan, sillä sahatut neliömäärät jäivät hyvin pieniksi, jolloin terähajonnan osuus on helpostikin vähintään tuota luokkaa.

Tarkasteltaessa kulumista viistekulumisen näkökulmasta on tulos vielä tasaisempi ja materiaalien välillä ei ole juurikaan eroa. Kuvassa 43 on viistekulumisen arvot molemmilta materiaaleilta merkitty pisteillä ja suorat mallintavat tilannetta nolasta viistekulumisen ja sahattujen pinta-alojen keskiarvoihin.



**Kuva 43.** Kovametalliterien viistekuluminen sahauskokeiden lopetushetkellä

Kovametallikokeessa sahatut neliömäärät ovat paljon pienemmät kuin Bi-metalliterien yhteydessä tehdyn testin. Kokeen lopetuskriteeriksi tuli jokaisen terän kohdalla vinoon sahaus. Todennäköisesti ilmiö johtui terän pysähtymisestä ennen ylösnousua ja sahausraon laajennuksen puutteesta, sillä terän noustessa ylös se raapi tangon päätä, ja tämä todennäköisesti tylsytti terän toispuoleisesti aiheuttaen vinoon sahauksen. Toisena syynä vähäisiin saavutettuihin neliömääriin ja vinoon sahaukseen voidaan pitää suuria lastuamisarvoja. Voi myös olla, että jäähdytys oli riittämätön suhteessa käytettyyn lastuamisnopeuteen, ja se aiheutti terän nopean kulumisen. Myös terän pituudella on olennainen merkitys. Kovametallikokeessa käytetyn terän pituus oli yli metrin lyhyempi kuin Bi-metallikokeessa käytetyn terän, joten tämäkin osittain selittää eron sahattujen pinta-alojen määrässä eri kokeiden välillä.

Kovametalliteriä käytettäessä ero kalsium -käsittelyn ja -käsittelemättömän teräksen välillä on siis sahattuja pinta-aloja katsottaessa n. 15 % kalsium -käsittelyn materiaalin hyväksi ja viistekulumista tarkasteltaessa lähes marginaalinen. Koe-matriisi on jälleen liian pieni luotettavien johtopäätösten tekoon.

## 10.1.2 Kalsium-käsittelyn vaikutus

Molemmissa kokeissa kalsium- käsitellyt teräkset osoittautuivat siis paremmiksi tarkasteltaessa asiaa sahatun pinta-alan näkökulmasta, mutta tulosten luotettavuus on heikko vähäisestä koemäärästä sekä etenkin Bi-metalliteräkokeen kärsimästä suuresta hajonnasta johtuen. Kalsium-käsittelyn edut tulevat yleensä [JNy2]selvemmin esille käytettäessä suurempia lastuamisnopeuksia. Tästä johtuen olisi tulosten pitänyt olla päinvastaiset eli Bi-metalliterillä eroa ei olisi pitänyt juurikaan syntyä kun taas kovametalliterillä eron olisi pitänyt olla nykyistä paljon näkyvämpi.

## 10.2 Koesarja 2. Terävertailu

Alla olevassa taulukossa 23 on koottuna terävertailukokeen tulokset. Sarakkeista löytyy mm. kullakin terällä sahatut kappalemäärät ja sahattujen akselien halkaisijat sekä lopullinen neliömäärä, joka terällä saatiin sahattua.

*Taulukko 23. Koesarjan 2 tulokset.*

| Koeterä      | Terä nro | Katkaisujen lkm |      |      | Sahattu pinta-<br>pinta-ala m <sup>2</sup> | Kulumis kriteeri  | viistekulu<br>ma mm |
|--------------|----------|-----------------|------|------|--|-------------------|---------------------|
|              |          | 39mm            | 45mm | 55mm |  |                   |                     |
| Wikus        | 1        | 2520            |      |      | 3,0  | Poikki            | 0,18                |
| Marathon M51 | 2        | 685             | 4608 |      | 8,1  | Tylsä. Ei pure    | 0,31                |
| Amada Super  | 1        | 660             | 4112 |      | 7,3  | Poikki            | 0,17                |
| HLG          | 2        | 6840            |      |      | 8,2  | Tylsä,ei hampaita | -                   |
| Wikus Futura | 1        |                 |      | 3030 | 7,2  | poikki            | 0,23/0,38*          |
|              | 2        | 2940            |      | 1016 | 5,9  | poikki            | -                   |

\*Viistekulumisen maksimin keskiarvo

### 10.2.1 Kustannustehokkain terä

Terien keskinäistä paremmuutta arvioitiin luvussa 8 esitettyä kustannus per katkaisu-periaatetta käyttäen. Kahdella terällä saaduista sahatuista neliöistä laskettiin keskiarvo ja saatua keskiarvoa hyväksi käyttäen laskettiin, kuinka monta katkaisua olisi saatu, jos olisi sahattu ainoastaan Ø45 mm akselia. Kustannustehokkaimmaksi osoittautui Amadan Super HLG terä. Taulukossa 24 on laskennan tu-



lokset tarkemmin esitetettynä.

**Taulukko 24.** Kustannus per katkaisu- laskelman tulokset.

| Terä                                      | Amada<br>Super HLG | Wikus<br>Marathon | Wikus<br>FUTURA |
|---|--------------------|-------------------|-----------------|
| Kustannus / katkaisu<br>45mm vert. akseli | <b>0,0560 €</b>    | <b>0,0633 €</b>   | <b>0,0760 €</b> |
| Teräkustannus                             | 0,0132             | 0,0199            | 0,0430          |
| konekustannus                             | 0,0435             | 0,0435            | 0,0330          |
| Teräkustannuksen<br>prosentuaalinen osuus | <b>23 %</b>        | <b>31 %</b>       | <b>56 %</b>     |

Kustannus per katkaisu laskennassa konetunnin hinnaksi muodostui vain n. 10 euroa. Pieni konetunnin hinta johtui siitä, että yksi mies käytti neljää sahaa, jolloin palkkakulut jaettiin neljällä konetuntihintaa määrättäessä. Lisäksi laskelmissa ei otettu huomioon rakennuksen kiinteitä kuluja niiden suuruuden arvottamisen vaikeuden vuoksi ja toimihenkilökulut on myös unohdettu tästä laskelmasta. Mutta jo näinkin pienellä konetuntihinnan arvolla huomataan, että varsinainen terän hinta muodostaa perinteisellä Bi-metalliterällä sahattaessa ainoastaan 20-30 % luokkaa olevan kustannuksen, ja todelliset sahauskustannukset muodostuvat työntekijän- ja koneen kustannuksista. Liitteessä 6 olevasta kustannuslaskelmapohjasta nähdään tarkemmin, mitä tekijöitä kustannuslaskelmassa on otettu huomioon.

Kovametalliterällä teräkustannus on n. 50% katkaisun hinnasta. Tämä aiheuttaa sen, että katkaisun hinta on voimakkaasti riippuvainen sahatuista neliömääristä. Jos testissä olisi sahattu kymmenen kappaletta kutakin terää nyt sahatun kahden sijaan ja laskettu katkaisun hinta sahattujen neliöiden perusteella, olisi kovametalliterällä saatu katkaisun hinta ollut todennäköisesti suurempi kuin nyt, koska kovametalliterä on hauraana vielä arempi vahingoille kuin bi-metalliterä. Ja etenkin, kun testissä ollut nippusahaus on vahinkoalttiimpi kuin yhden umpitangon sahaus.

## 10.2.2 Tulosten tarkastelua

Terillä sahatut neliömäärät ovat suhteellisen vaatimattomia verrattuna esimerkiksi kalsium -käsittelyn vaikutusta tutkittaessa saavutettuihin sahattuihin neliömääriin. Syynä tähän on nippusahauksen luonne, sekä mahdollisesti liian kireällä ollut terä. Testissä sahattiin kaikkiaan yhdeksän terää, joista kuusi katkesi. Murtuneissa terissä ei ollut merkkejä juuttumisesta yhtä terää lukuun ottamatta, ja terien murtopinnoissa näkyi selviä väsymisen merkkejä. Mitattu kireyskin oli 280 MPa, joka on aivan suositusarvojen ylärajoilla. Joten terän kireyttä alentamalla saadaan todennäköisesti hieman lisää sahattua pinta-alaa.

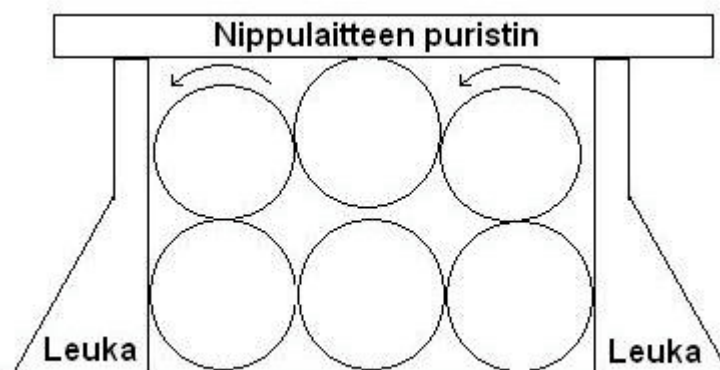
Valitettavasti kaikista teristä ei viistekulumista pystytty arvioimaan, sillä yksi testin terä ( Wikus Futura nro 2) oli hävinnyt kokeen suorituksen jälkeen, ja toinen terä oli sahattu aivan hampaattomaksi (Amada nro 2), joten siitäkin oli mahdoton mitata kulumista.

Nippusahauksessa terän nopeampaa kulumista lisää lastujen uudelleen kulkeutuminen sahaustapahtumaan. Sahauksen alkuvaiheessa lastut putoavat nipussa olevien tankojen väliin, ja sahauksen edetessä ajautuvat uudelleen terän ja sahattavan kappaleen väliin. Tämä lisää varmasti kitkaa ja lämpöä sahaustapahtumassa ja on yksi syy terän nopeampaan kulumiseen.

Lastuamisnesteeseen pääsemättömyys sahauskohtaan on myös eräs tekijä, joka heikentää teränkestoa nippusahauksessa. Samoin kuin lastutkin, suurin osa lastuamisnesteestä irtaantuu terästä siinä vaiheessa, kun terä tulee ulos ensimmäisestä tangosta, ja neste putoaa tankojen väliin, samoin kuten lastutkin. Näin ollen nipun toisessa laidassa oleva tanko sahautuu lähes kuivana, ja paljon lämpimämpänä kuin nipun toisessa laidassa oleva tanko.

Kappaleiden huonompi kiinnitettävyyden on varmasti myös syy terän nopeampaan kulumiseen. Testissä esiintyi värinää lähes koko sahauksen ajan, jonka aiheuttajaksi ei löydetty muuta syytä kuin materiaalipaksuuden vaihtelu ja tankojen vinouden aiheuttamat kiinnitysvaikeudet. Kuva 44 esittää karrikoidusti, miten tankojen vinous ja halkaisijavaihtelut vaikeuttavat kiinnitystä. Kun nipussa on yksi-

kin tanko ilman kunnollista kiinnipuristusta, se pääsee kiertymään, etenkin nipun sauhauksen ollessa alkuvaiheessa, kun tangot ovat pisimmillään. Vaikka tangot on hitsattu toisesta päästä toisiinsa kiinni, se ei estä pitkien ja hoikkien kappaleiden kiertymistä. Kiertyminen lisää värinää ja pahimmallaan aiheuttaa terän juuttumista ja hampaiden irtilohkeamista terästä.



**Kuva 44.** Nippusauhauksen ongelmia.

## **11 Havainnot ja ajatuksia työn varrelta, sekä jatkotoimenpide-ehdotuksia**

Seuraaviin luvuissa on käsitelty työn aikana kirjoittajalle tulleita havainnot ja analysoitu työssä käytettyjä tutkimusmenetelmiä.

### ***11.1 Kustannus per katkaisu -menetelmästä.***

Kustannus per katkaisu -menetelmä soveltuu kohtalaisesti arviointiin, kun sahataan samaa materiaalia ja lähes samaa halkaisijaa, mutta tulokset eivät ole kuitenkaan aivan täysin vertailukelpoisia, sillä halkaisijan pienentyessä pienenee myös terällä sahattua saatavien neliöiden määrä. Kuitenkin menetelmä antaa erittäin hyvän kuvan kustannusrakenteen muodostumisesta sahauksessa ja tarkastelu osoittaa, että teräkustannus etenkin Bi-metalliteriä käytettäessä on pieni muihin kustannuksiin nähden.

Idealisimmillaan kustannus per katkaisu -menetelmä on, jos sahataan samaa materiaalia ja samaa halkaisijaa kokoajan. Tällöin voidaan tehdä kattavia useita toistoja sisältäviä teräseurantoja sekä vertailla eri lastuamisparametrien vaikutusta teränkestoon ja kustannus per katkaisun muodostumiseen. Valitettavasti tähän ei ollut mahdollisuutta diplomityön puitteissa, eikä ole Suomen tuotantotason volyymeillä monessakaan yrityksessä johtuen pienistä ja vaihtelevista tuotantosarjoista sekä pitkistä vannesahauksen teränkestoajista.

Myös materiaalilla on vaikutusta menetelmän antamiin tuloksiin. Valitettavasti diplomityön tapauksessa kaikki sahattavat materiaalit olivat helppoja ns. perusteräksiä, joiden sahaus onnistuu ongelmitta lähes kaikilla terätyypeillä. Jos testissä olisi ollut mukana eksoottisempia materiaaleja kuten esimerkiksi ruostumattomia tai haponkestäviä teräksiä, olisi erot terien välillä voineet olla huomattavasti suurempia, teränkestot lyhyempiä ja hyöty terävertailun suorittamisesta suurempi.

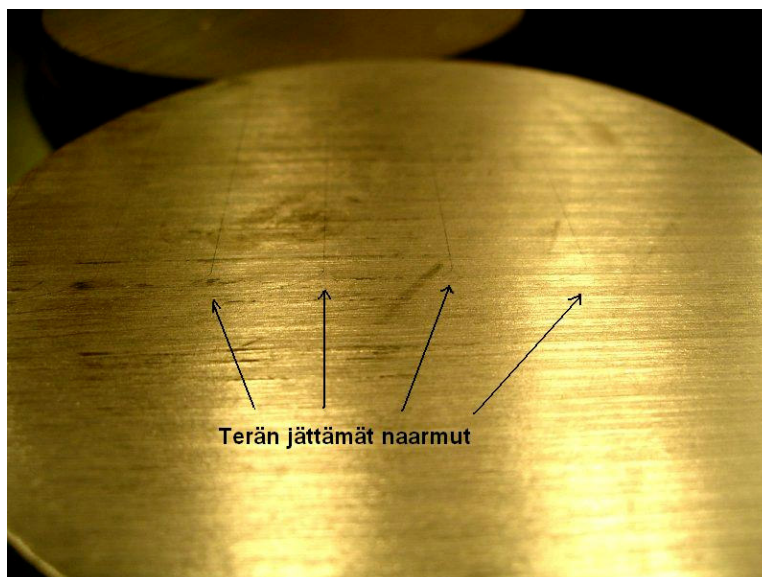
## **11.2 Kovametalliterän käyttäytyminen Bi-metalliterille tarkoitetuissa sahoissa.**

Diplomityön aikana sahattiin kuudella kovametalliterällä. Vastoin ennakkokäsityksiä terät toimivat vanhoissa sahoissa kohtalaisesti yltäen lähes samoihin sahattuihin pinta-aloihin kuin Bi-metalliterätkin mutta n. 30-40 % nopeammin. Yhtään tapausta, jossa terästä olisi lähtenyt hampaat yllättäen, ei tapahtunut. Ongelmat, jotka liittyvät kovametallin käyttöön ovat lähinnä sahausraon laajennuksen puuttuminen sekä lastuamisnesteen riittämättömyys. Testien aikana kävi myös ilmi, että kovametalliterän kulumistapa on hieman erilainen kuin Bi-metalliterällä.

Kovametalliterillä saavutetut sahatut pinta-alat olivat siis samaa luokkaa kuin Bi-metalliterilläkin. Monet terävalmistajat kuitenkin markkinoivat teriään siten, että niillä saavutetaan suurempi kestoikä ja enemmän sahattuja neliömetrejä kuin Bi-metalliterillä, ja vielä suuremmilla lastuamisarvoilla. Kokeen tapauksessa näin ei kuitenkaan käynyt. Teriä tarkasteltaessa huomattiin, että ne olivat yksinkertaisesti kuluneet loppuun. Terissä ei näkynyt merkkejä epänormaalista kulumisesta kuten vaurioita yms. muutamaa puuttuvaa hammasta lukuun ottamatta. Syy nopeaan kulumiseen voi olla hitaamman kappaleeseen sisään syötön puuttuminen käynteistä sahoista. Tämä voi aiheuttaa hampaiden irtoamista ja nopeampaa kulumista. Toinen syy voi olla riittämätön jäähdytys. Kaikissa tapauksissa sahoista otettiin kaikki lastuamisnestekapasiteetti käyttöön, mutta siltikään nestettä ei sahaustapahtumaan tule kovin runsaasti. Tämä yhdistettynä suhteellisen suuriin lastuamisnopeuksiin voi aiheuttaa sen, että lämpötilat nousevat korkeiksi ja teränkestoikä lyhenee. Kuten aiemmin teoriaosassa todettiin, ovat vannesahan terissä käytetyt kovametallilaadut pehmeitä ja periaatteessa nopeasti kuluvia, enimmäkseen ruostumattomien materiaalien sahaukseen tarkoitettuja.

Sahausraon laajennuksen puuttuminen ilmenee kuvan 45 osoittamalla tavalla. Akselin sahauduttua poikki, koesahan terä pysähtyi, ja automatiikka nostaa terän ylös rakoa pitkin. Tällöin, kun sahausrakoa ei laajenneta, terä raapii kappaletta, tai saattaa pahimmillaan juuttua kappaleiden väliin ja tuloksena on kuvan 45 kaltaiset

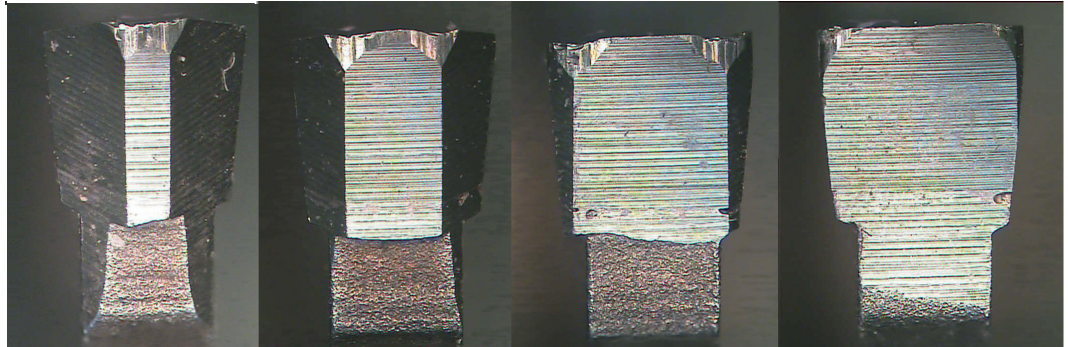
naarmut. Ilmiö lyhentää varmasti terän käyttöikää. Vastaavaa ongelmaa ei esiintynyt nippusahauksessa, sillä nippusahaustestissä käytetyssä sahasa terä pyöri vielä ylösnousuvaiheessa.



**Kuva 45.** Sahausraon laajentumattomuudesta johtuvat raapaisujäljet kappaleessa.

### 11.2.1 Kovametalliterän kulumisesta

Harittamattoman kovametalliterän kulumisen havaittiin olevan hieman erilaista verrattuna haritettuun terään. Terässä on eri korkuisia hampaita ja kapein hammas on korkein. Eli lienee luonnollista, että kapein ja korkein hammas kuluu eniten, ja taas levein ja matalin vähinten, oikeastaan pelkästään teräsärmän nurkista. Kuva 46 havainnollistaa hammashionnan merkitystä ja yhteyttä hampaan viistekulumiseen.

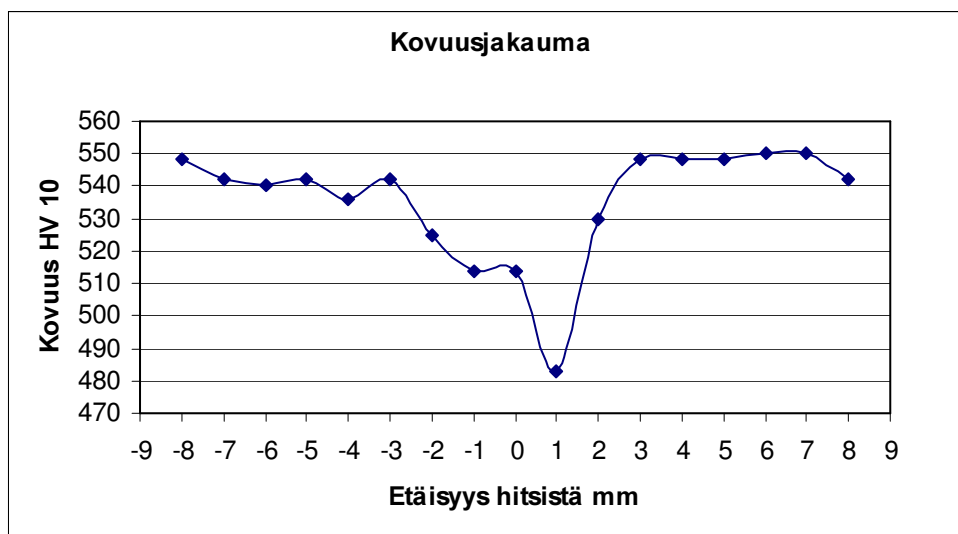


**Kuva 46.** Kovametalliterän kulumismalli.

### **11.3 Terän poikkiväsymisestä**

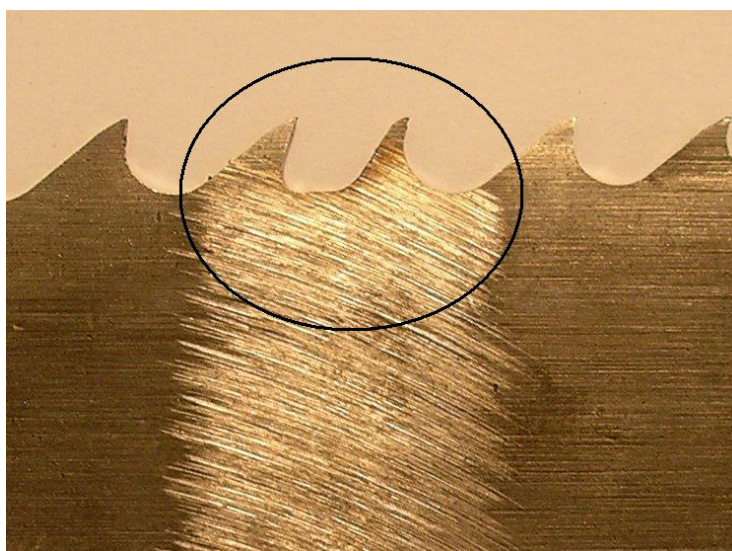
Diplomityön aikana katkesi 9 terää kaikkiaan 17 sahatusta terästä, joten kysymyksessä on yleisin vauriomuoto pehmeitä teräksiä sahattaessa. Terän poikkiväsyminen alkoi jokaisessa tapauksessa terän selkäosasta. Muutaman terän tapauksessa teristä löytyi useita säröjä jotka olisivat johtaneet pian terän katkeamiseen. Koska murtuma alkaa aina terän selkäosasta voidaan päätellä, että pääasiassa syöttövoima aiheuttaa terän väsymisen, ja terän kestoikä on suhteessa syöttövoimaan.

Kuusi kappaletta yhdeksästä väsymismurtumasta lähti hitsin läheisyydestä. Tästä voidaan päätellä, että liitoshitsaus ei useinkaan onnistu täydellisesti, vaan hitsiin jää muutosvyöhykkeitä tai epäjatkuvuuskohtia, joista väsyminen alkaa. Kuvassa 47 oleva kuvaaja esittää mitattua kovuutta terän hitsin yli 1 mm välein. kuvaajasta havaitaan, että hitsi on itsessään n. 60-70 HV pehmeämpää kuin terän runkomateriaali. Tämä aiheuttaa n. 10 % laskun materiaalin murtolujuudessa ja on osatekijä väsymismurtuman alkaessa hitsin läheisyydestä.



**Kuva 47.** Terän liitoshitsauksen kovuusjakauma.

Toinen havaittu seikka on, että monesti liitoshitsauksessa on terään tullut hampaan ja hammaspohjan muotovirheitä, jollainen näkyy kuvassa 48. Hitsin läheisyydessä oleva hammas on selvästi ohuempi kuin muut.

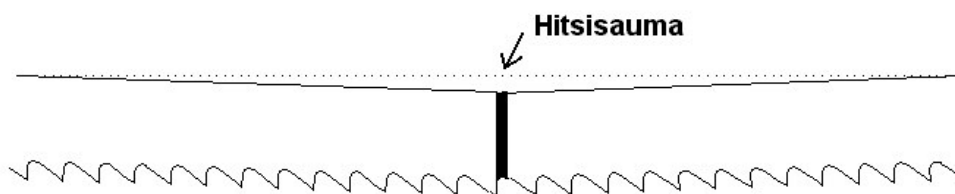


**Kuva 48.** Liitoshitsin aiheuttama hampaan ja hammaspohjan muotovirhe.

Lisäksi hitsauksessa tapahtuu todennäköisesti ”asentovirheitä”, joita karrikoidusti mallintaa kuva 49. Tämä voidaan päätellä siitä, että terä on joko kulunut enem-



män liitoshitsauksen läheisyydestä, tai ei ole juurikaan kulunut hitsin kohdalta.



**Kuva 49.** Hitsin aiheuttama terän asentovirhe

Diplomityön aikana havaittiin, että terän poikkiväsymisellä ja käytetyillä lastuamisarvoilla on yhteys toisiinsa. Mitä suurempia lastuamisnopeuksia käytetään, sitä nopeampaa on poikkiväsyminen. Yleisesti ottaen väsytystaajudella ei ole merkitystä kestoikään eli väsymiseen johtavien syklien määrään. Vannesahauksen tapauksessa taas suuremman lastuamisnopeuden käyttäminen johtaa luonnollisesti nopeampaan terän tylsymiseen. Tämä puolestaan edesauttaa syöttö- ja lastuamisvoimien kasvua, kasvaneet voimat taas nopeuttavat terän poikkiväsymistä. Tästä seikasta johtuen terä ei kestä samaa syklimäärää lastuttaessa kovemmilla nopeuksilla, vaan väsyi poikki nopeammin. Näin ollen terien kestävä väsytyssyklimäärää ei voida pitää vakiona vaan se on riippuvainen käytetyistä lastuamisarvoista.

Samasta seikasta johtuen olisi erittäin tärkeää, että vertailtavien materiaalien halkaisija olisi täsmälleen sama. Kokeissa vertailtavien materiaalien halkaisijat eivät olleet samat. Tästä johtuen on tangon puolivälissä suurempaa tankoa sahattaessa ollut suuremmat lastuamisvoimat ja tämä on voinut aiheuttaa nopeamman terän poikkiväsymisen. Toisin sanoen ero kalsium-käsittelyä tutkivassa kokeessa olisi voinut olla suurempi kalsium-käsittelyn teräksen hyväksi, mikäli halkaisijat olisivat olleet täsmälleen samat.

#### **11.4 Jatkoimenpiteet**

Terätutkimuksen kannalta tärkein kehityksen kohden on järkevän teränkulumismallin luominen. Diplomityössä käytetty ns. terän loppuun sahaus ei ole riittävän luotettava tapa arvioida terän kulumista, ja on epäluotettavuuden lisäksi erittäin aikaa vievä tapa. Terän loppuun sahauksen ennustettavuus on myöskin erittäin hankalaa, ja onkin lähes mahdotonta etukäteen arvioida terän kestoikää. Diplomityön sahauskokeiden suorittamiseen käytettiin aikaa yli 400 tuntia, vaikka työn aikana sahattiin ainoastaan 17 terää.

Viistekuluman mittauksella ei myöskään päästä haluttuihin tuloksiin. Mittaus on hankala suorittaa kesken sahauskokeen. Terä joudutaan irrottamaan ja viistekuluman mittaus neljä-kahdeksan metriä pitkistä terästä on vaikeaa. Lisäksi etenkin kovametalliterän tapauksessa terä vaurioituu helposti sitä irroteltaessa ja kiinniteltäessä. Lisäksi Bi-metalliterän sekä haritettujen kovametalliterien tapauksessa terä on hampaan viistekuluma on toislaitaista, kuten kuva 29 sitä havainnollistaa. Tämä vaikeuttaa kuluman keskiarvon mittausta. Myös terän epätasainen kuluminen vaikeuttaa mittausten luotettavaa tulkintaa. Terässä on kuluneempia alueita ja tällaisen kuluneemman alueen osuminen mittausjaksolle voi aiheuttomasti nostaa terän mitatun kulumistason oikeaa tasoa ylemmäs. Taulukossa 25 on yhden terän neljä kulumismittausjaksoa, joista havaitaan että terän kulumisessa todellakin on hajontaa.

**Taulukko 25.** Terän kulumismittaukset.

| VIISTEKULUMINEN, mm |                |                |                |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1.mittausjakso      | 2.mittausjakso | 3.mittausjakso | 4.mittausjakso |
| 0,06                | 0,08           | 0,11           | 0,16           |
| 0,1                 | 0,09           | 0,13           | 0,16           |
| 0,1                 | 0,09           | 0,15           | 0,16           |
| 0,12                | 0,08           | 0,14           | 0,08           |
| 0,14                | 0,15           | 0,4            | 0,14           |
| 0,09                | 0,11           | 0,12           | 0,12           |
| 0,07                | 0,15           | 0,16           | 0,13           |
| 0,35                | 0,07           | 0,21           | 0,15           |
| 0,06                | 0,13           | 0,21           | 0,09           |
| 0,07                | 0,12           | 0,35           | 0,14           |
| <b>*0,116</b>       | <b>*0,107</b>  | <b>*0,198</b>  | <b>*0,133</b>  |

\*keskiarvo

Teränkulumismalli voisi olla sidottu esimerkiksi lastuamisvoiman nousuun. Las-

tuamisvoiman noustessa tietyn prosentin alkuperäisestä lopetettaisiin sahaus. Toinen vaihtoehto voisi olla esimerkiksi akustisen emission käyttäminen. Akustinen emissio voisi olla järkevä vaihtoehto, koska sahauksessa käytetään lastuamisnestettä, ja monesti terään tulee erilaisia ääniä, kuten värinää, sen tylsyessä. Mallin luominen olisi jo itsessään riittävän laaja aihe esimerkiksi toiselle diplomityölle.

Terän teorian tutkiminen toi esille mm. yhtenäisyyden puutteen eri terävalmistajien välillä. Terien toimittajien välillä vallitsee kauppanimikkeiden viidakko, vaikka myytävät tuotteet ovat kuitenkin lähes identtisiä. Toivottavasti tulevaisuudessa saadaan jonkinlainen yhteinen nimikkeistö eri terävalmistajien tuotteiden välille.

Turengin myyntikonttorilla tulisi jatkaa terän kestoikä seurantaan Moc210 M-materiaalin osalta. Sarja esiintyy lähes kuukausittain, joten lisää dataa tutkimukseen olisi saatavilla. Lisäksi sarjan yhteydessä on hyvä kokeilla esim. uutuusteriä nykyisten kestoikä tietojen pohjalta

Jatkotoimenpiteenä Turengin teräspalvelukeskukselle<sup>[JNy3]</sup> esitetään myöskin terävertailukokeessa käytetyn Wikus Futura-kovametalliterän laajamittaisempaa koe-käyttöä ja käyttöönottoa etenkin suurempien sarjojen yhteydessä. Kuten aiemmin todettiin, kovametalliterät toimivat vanhemmissa sahatyypeissäkin lähes ongelmitta, ja katkaisunopeutta voidaan nostaa n. 40 % Bi-metalliteriin nähden.

Turengissa käytössä olevia sahausarvoja voidaan nostaa n. 10 % ylöspäin jokaista materiaalityypistä kohden taulukon 26 mukaisesti. Materiaalia Moc 210 M sahattiin 25 % suuremmalla katkaisunopeudella kuin käytössä olevat arvot suosittivat, ja ongelmia ei esiintynyt teränkestoikässä kuin sahauksessa muutenkaan.

*Taulukko 26. Uudet lastuamisarvosuositukset*

| MATERIAALI                               | MR* | LASTUAMISNO-<br>PEUS | UUSI SUOSITUS |
|--|-----|----------------------|---------------|
| HYDAX                                    | 3   | 80 m/min             | 85 m/min      |
| IMATRA 520                               | 4   | 70 m/min             | 80 m/min      |
| MOCN 206<br>MOC212<br>MOCN 212           | 6   | 55 m/min             | 65 m/min      |
| MOC 410 yli 100mm<br>MOC 210<br>MOC 216  | 8   | 45 m/min             | 55 m/min      |
| MOC 410 alle 100mm<br>MOCN 315<br>IMACRO | 10  | 38 m/min             | 45 m/min      |

\*Materiaaliryhmä

Lisäksi esitetään sahojen kunnonvalvontaa. Yhdellä terällä saatavia neliömääriä tulisi seurata sahakohtaisesti vähintään neljännesvuosittain kyseisen kuukausittain toistuvan Moc 210 M erän yhteydessä, ja mikäli keskimääräiset sahalla saavutettavat neliömäärät alkavat pudota, on suoritettava korjaavat huoltotoimenpiteet.

## YHTEENVETO

Vannesahausta ei ole ennen tätä työtä Suomessa juurikaan tutkittu, ja kirjallista materiaalia ei ollut saatavilla. Näin ollen diplomityön teoriaosuudesta muodostui käsikirjamainen teos jossa käsitellään tuotantovannesahoja ja niiden rakennetta hieman pintapuolisemmin ja tarkemmin syvennytetään terän teoriaan. Terää käsittelevässä osuudessa tehdään katsaus lähes kaikkiin vannesahauksen lastuamisteknisiin parametreihin lähtien terämateriaaleista ja päättyen sahauksen kustannusten tarkasteluun kustannus per katkaisu -menetelmällä. Lastuamisen teoria on vannesahauksen osalta perin monimutkaista ja siihen liittyy useita eri tekijöitä jotka tekevät tarkastelusta haastavaa.

Kokeellisessa osuudessa tutkittiin kalsium -käsittelyn vaikutusta materiaalin sahattavuuteen sahattaessa sekä kova- että Bi-metalliterillä. Kokeissa mitattiin teränkestoja sahaamalla terällä niin kauan kuin mahdollista. Kovametalliterillä todettiin teränkeston lisääntyvän käytettäessä kalsium -käsiteltyä terästä n. 15 % tarkasteltaessa pelkästään teränkestoja. Mutta mitattaessa terän viistekulumista oli tulokset vielä tasaisemmat, ja eroa kalsium -käsittelyn ja -käsittelemättömän teräksen välillä ei juurikaan ollut.

Bi-metalliterillä taas vastaava eroavaisuus oli 80 % kalsium -käsittelyn teräksen hyväksi tarkasteltaessa teränkestoikkää. Viistekulumista tarkasteltaessa oli eroa n. 50 % kalsium -käsittelyn laadun hyväksi.

Molempia koesarjoja varjosti kohtalaisen suuri hajonta terien välillä ja suoritettujen kokeiden vähyys. Mutta kokeiden vaatiman pitkän ajan takia oli suuremman koematriisin suorittaminen mahdotonta.

Kokeellisen osion toisena osuutena suoritettiin terävertailu kolmen eri terätyypin välillä. Vertailtavat terät olivat: Amada Super HLG M42, Wikus Marathon M51 sekä kovametalliterä Wikus Futura. Vertailussa sahattiin kaksi terää kutakin terä-

tyyppiä ja saatujen kestoikä tietojen pohjalta laskettiin kullekin terälle kustannus per katkaisu-tiedot. Teräkustannuksen todettiin kyseisissä tapauksessa olevan 20-50 % sahauksen kokonaiskustannuksista terätyypistä riippuen. Kustannustehokkaimmaksi teräksi osoittautui Amadan Super HLG 42. Kovametalliterä Wikus Futura osoittautui n. 35 % tehokkaammaksi kuin koestetut pikaterästerät. Myös terien välistä vertailua ja sen luotettavuutta häiritsee koematriisin pienuus.

Tärkeimpänä jatkotoimenpiteenä tehtyjen tutkimusten jälkeen on luotettavan terän kulumismallin luominen. Kulumismalli voisi perustua joko akustiseen emissioon tai lastuamisvoiman nousuun. Toisena toimenpiteenä on kovametalliterien laajamittaisempi koekäyttö. Kovametalliterät osoittautuivat lastuamisteholtaan n 40 % paremmiksi kuin Bi-metalliterät, joten laajamittaisempi koekäyttö on suositeltavaa. Lisäksi lastuamisarvoja voidaan nostaa n. 10 % käytettäessä nykyisiä Bi-metalliteriä.

## LÄHTEET

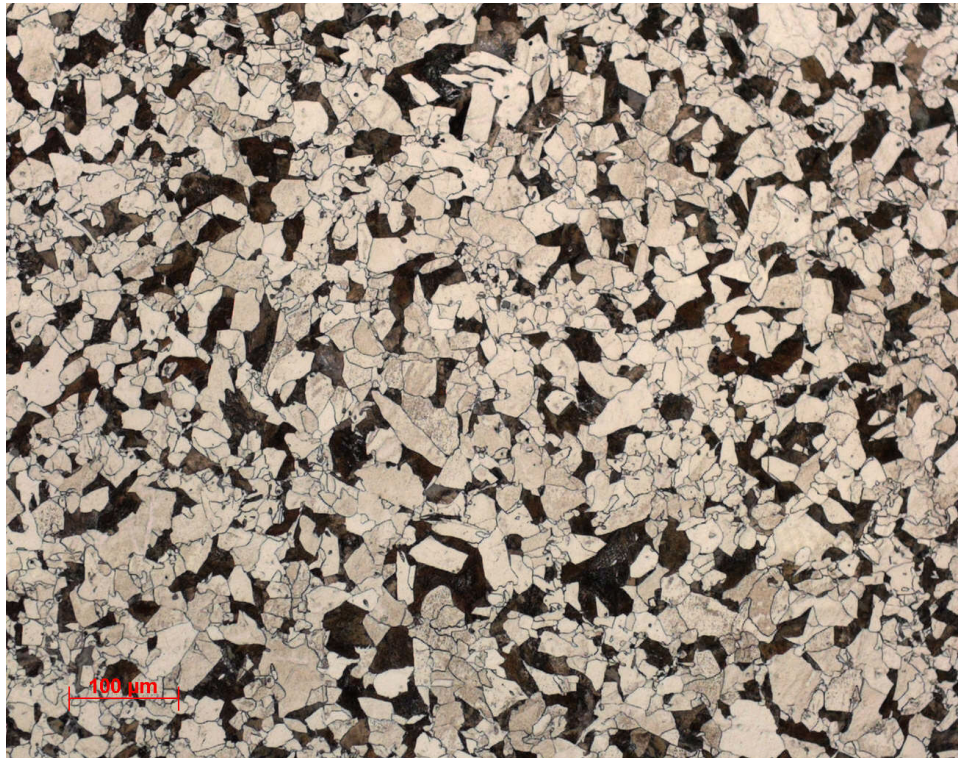
1. <<http://www.imatrasteel.com/default.asp?cid=5&lang=fi>> Viitattu 10.12.2004 Last modified 1.12.2003
2. <<http://www.amadabandsaw.com/>> viitattu 13.1.2005 Last modified 2004
3. Haastattelu: Amadan kone- ja teräedustaja Ari Ritanummi 1.10.2004 Salo
4. <<http://www.behringsaws.com/>> viitattu 14.1.05 Last modified
5. **Amadan sahaustekniikka kansio.**
6. Klein Art 1998: **Automation increases sawings bite.** *Forming & fabricating Vol.5 No. 9/1998*
7. Teräesite: **Wikus 2004: Precision band saw blades, catalogue 2004 62s.**
8. < <http://www.eberle-saws.com/english/>> Viitattu 12.10.2004
9. Teräesite: **Westlings bandsågblad katalog 2003**
10. Whalen John, 1997: **Grinding your teeth.** *Cutting tool engineering magazine 3/1997*
11. Kauppinen Veijo 2001; **Vannesahaus myötätulessa** *Metallitekniikka 4/2001 s 49-51*
12. Dugdale D. S, Sarwar M. 1996: **Fatigue Strenght of bandsaws**

**with hard coatings.** *Journal of material processing technology* 56 s.  
729 – 732

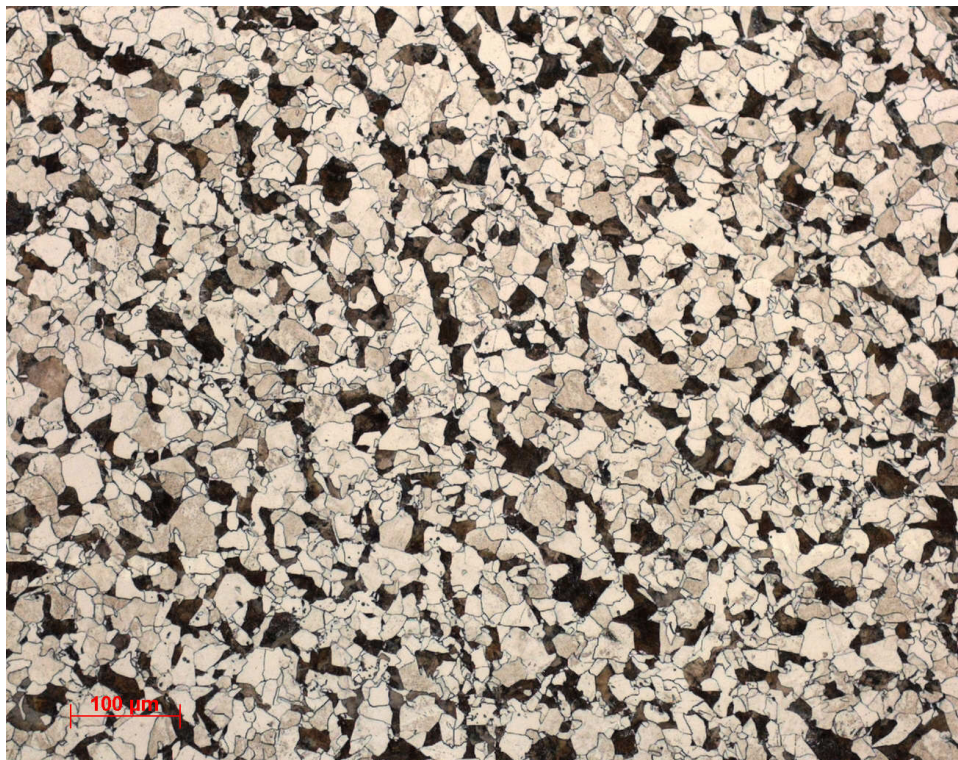
13. Bahco 2003: **Metallin sahaus, vannesahan terät**
14. Darosa Mario 1998; **Choosing bandsaw blades.** *Tooling & production* 12/1998 s. 87-88
15. Hogan Brian J. 1999: **Cutting the tough stuff.** *Manufacturing engineering* 2 / 1999. s 62-68
16. Rozzi, Robert 2001: **Choosing the right blade for your job**  
*Manufacturing engineering Vol 126 2/2001 s. 56-60*
17. Paajanen T 1988: **Vannesahaus** (käsittele puuta oikein sarja) 2. painos, Helsinki, Metlas 1989 164 s.
18. Röntgen 2002: Teräsite
19. Rooke Ann 1995: **Saving saw bucks.** *Cutting tool engineering* 3/1995
20. Andersson C, Andersson M T, Stålh J.-E 2001: **Bandsawing. Part I: cutting force model including effects of positional errors, tool dynamics and wear.** *International journal of machine tools & manufacture* 41 s 227-236
21. Andersson C, Stålh J.-E, H. Hellberg 2001: **Bandsawing. Part II: detecting positional errors, tool dynamics and wear by cutting force measurement wear.** *International journal of machine tools & manufacture* 41 s 237-253
22. Andersson C, 2001: **Bandsawing. Part III: Stress analysis of saw**



- tooth microgeometry.** *International journal of machine tools & manufacture* 41 s 255-263
23. Käyttöohje: Bahcon teränkireysmittari 2004
24. Venner, Allison 1999: **Bandsaw blade tip off** *American machinist* Vol 143. 12/1999 s 68-72
25. Rooke Ann 2000: **Vital Signs** *Cutting tool engineering magazine* august /2000
26. Tielli Frank. 2003: **The sights and sounds of failure.** *Welding design & fabrication* september/2003 s 16-18
27. <[www.savingassosiation.com/PUBS.HTML](http://www.savingassosiation.com/PUBS.HTML)> **Bandsaw trouble shooting chart** Viitattu 20.10.2004
28. Haastattelu: *Stressfield oy, laskentainsinööri DI Veli Pellikka* 18.1.2005
29. *SFS-EN 22768-1 Yleistoleranssit. Osa 1: Ilman toleranssimerkintää olevien pituus- ja kulmamittojen toleranssit.* 1993
30. Harris, Doug 2001: **Better bandsawing technology** *Manufacturing engineering* Vol 126 no 2/2001
31. Hellburg Håkan 2001: **Proper bandsaw selection improves quality and boosts productivity** *Tooling & production* Vol 67. no 8/2001 s 58-61
32. Imatra Steel 2004: **Koneteräkset -esite** 23s.



**Imatra 520 mikrorakennekuva, 200 -kertainen suurennos.**



**S355 JR mikrorakennekuva, 200 -kertainen suurennos**

Materiaalin Imatra 520 M standardin SFS-ENV 10247 –mukainen kuonanlukura-  
portti

IMATRA STEEL

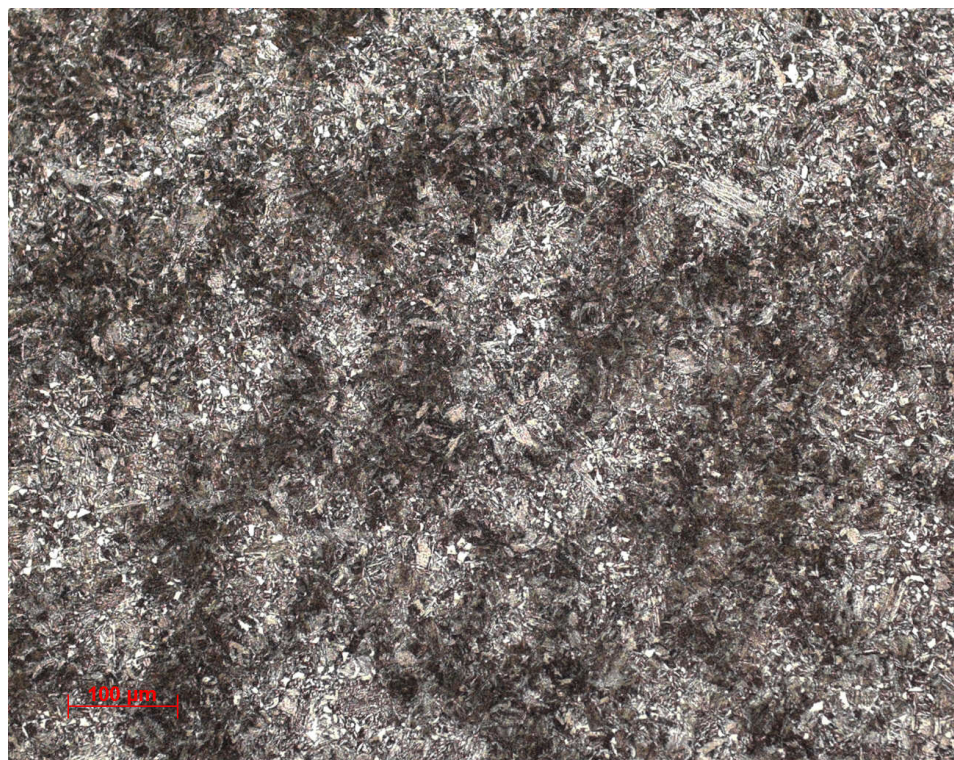
Kuonat / keskimääräinen kenttä pituuden mukaan  
ENV 10247

KUONANLUKULOMAKE Kn, KL, Kr EG-kuonat/kokojakauma

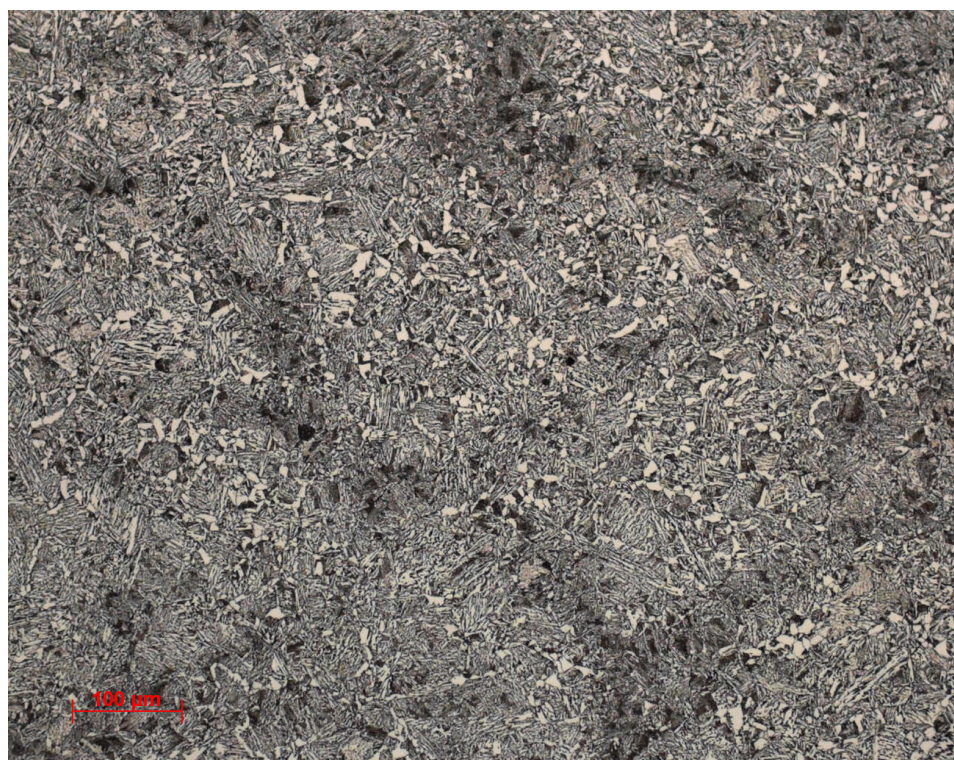
Lukija: SK Pvm: 15.2.05 Koko ø, mm: 120 Laji: Imatra 520M Luettu pinta-ala, mm<sup>2</sup>: 300  
, mm: \_\_\_\_\_ Sulatus: 44000 Kenttä 0,50 mm<sup>2</sup>  
Tilaaaja / työnumero: At-1305 Näyte: \_\_\_\_\_ H=710 µm (100x)

| Rivi<br>q | koko<br>µm | EG-sulkeumien määrä kokoluokittain<br>n, kpl |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    | Yhteensä<br>kpl |
|-----------|------------|--|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|-----------------|
| 1         | 3...5,5    | 23   | 48 | 43 | 42 | 45 | 43 | 44 | 32 | 84  | 34 | 42 | 43 | 43 | 43 | 45 | 4               |
|           |            | 32   | 34 | 32 | 32 | 34 | 45 | 34 | 24 | 43  | 24 | 34 | 32 | 34 | 35 | 63 | 3               |
|           |            | 61   | 56 | 42 | 53 | 23 | 34 | 53 | 42 | 33  | 43 | 23 | 22 | 53 | 64 | 32 | 2               |
|           |            | 45   | 44 | 56 | 44 | 22 | 22 | 25 | 42 | 24  | 42 | 42 | 34 | 46 | 36 | 44 |                 |
|           |            | 32   | 64 | 34 | 34 | 42 | 27 | 42 | 35 | 27  | 23 | 24 | 43 | 42 | 53 | 35 |                 |
|           |            | 26   | 43 | 35 | 25 | 33 | 44 | 42 | 53 | 112 | 43 | 33 | 42 | 53 | 42 | 22 |                 |
|           |            | 34   | 35 | 42 | 33 | 53 | 32 | 33 | 34 | 64  | 34 | 42 | 34 | 43 | 34 | 43 |                 |
|           |            | 63   | 54 | 42 | 34 | 34 | 24 | 23 | 43 | 45  | 33 | 43 | 35 | 26 | 43 |    |                 |
|           |            | 24   | 34 | 25 | 42 | 22 | 43 | 24 | 44 | 34  | 24 | 34 | 43 | 44 | 44 | 43 |                 |
|           |            | 46   | 43 | 44 | 42 | 22 | 43 | 24 | 43 | 34  | 23 | 24 | 34 | 43 | 44 | 65 |                 |
|           |            | 52   | 43 | 43 | 34 | 24 | 34 | 43 | 34 | 34  | 42 | 22 | 35 | 54 | 23 | 65 |                 |
|           |            | 34   | 66 | 32 | 33 | 44 | 42 | 33 | 42 | 24  | 42 | 43 | 26 | 43 | 64 | 34 |                 |
|           |            | 45   | 45 | 42 | 42 | 33 | 34 | 25 | 53 | 63  | 54 | 42 | 64 | 36 | 43 | 45 |                 |
|           |            | 53   | 53 | 53 | 52 | 24 | 25 | 44 | 44 | 75  | 32 | 54 | 33 | 64 | 35 | 84 |                 |
|           |            | 44   | 44 | 64 | 43 | 25 | 23 | 56 | 64 | 34  | 34 | 42 | 46 | 75 | 46 | 43 |                 |
|           |            | 36   | 34 | 35 | 35 | 33 | 43 | 47 | 22 | 45  | 44 | 23 | 74 | 43 | 52 | 53 |                 |
| 1681      |            |  |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |                 |
| 2         | ...11      | 31   | 32 | 23 | 51 | 21 | 12 | 12 | 41 | 52  | 41 | 32 | 21 | 21 | 32 | 12 |                 |
|           |            | 12   | 22 | 11 | 11 | 12 | 22 | 21 | 31 | 41  | 13 | 23 | 11 | 14 | 21 | 11 |                 |
|           |            | 43   | 11 | 11 | 32 | 32 | 11 | 11 | 13 | 21  | 21 | 42 | 23 | 41 | 32 | 21 |                 |
|           |            | 31   | 41 | 32 | 23 | 11 | 11 | 34 | 12 | 42  | 32 | 21 | 14 | 23 | 43 | 13 |                 |
|           |            | 42   | 33 | 21 | 31 | 21 | 41 | 33 | 21 | 51  | 11 | 12 | 32 | 12 | 22 | 3  |                 |
|           |            | 21   | 33 | 23 | 31 | 24 | 33 | 22 | 14 | 51  | 11 | 31 | 11 | 11 | 22 | 1  |                 |
|           |            | 34   | 22 | 42 | 32 | 43 | 12 | 12 | 11 | 43  | 43 | 11 | 43 | 11 | 43 | 4  |                 |
|           |            | 13   | 43 | 31 | 21 | 11 | 21 | 21 | 31 | 31  | 21 | 43 | 21 | 31 | 11 | 2  |                 |
| 517       |            |  |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |                 |
| 3         | ...22      | 23   | 12 | 12 | 21 | 1  |    |    |    |     |    |    |    |    | 12 | 12 |                 |
|           |            | 12   | 21 | 21 | 12 | 1  |    |    |    |     |    |    |    |    | 13 | 11 |                 |
|           |            | 12   | 11 | 11 | 21 | 2  |    |    |    |     |    |    |    |    | 21 | 11 |                 |
|           |            | 1  | 11 | 23 | 13 |    |    |    |    |     |    |    |    |    | 31 | 22 |                 |
|           |            | 21   | 21 | 21 | 11 |    |    |    |    |     |    |    |    |    | 43 | 31 |                 |
| 63        |            |  |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |                 |
| 4         | ...44      | 11   | 11 |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    | 12 |    |                 |
|           |            | 21   | 12 |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    | 21 |    |                 |
| 10        |            |  |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |                 |
| 5         | ...88      |  |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |                 |
| 6         | ...176     |  |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |                 |

HUOM:



**25 CrMo4 mikrorakennekuva, 200 -kertainen suurennos.**



**Moc 210 M mikrorakennekuva, 200 -kertainen suurennos.**

Materiaalin Moc 210 M standardin SFS-ENV 10247 –mukainen kuonanlukura-  
portti

IMATRA STEEL

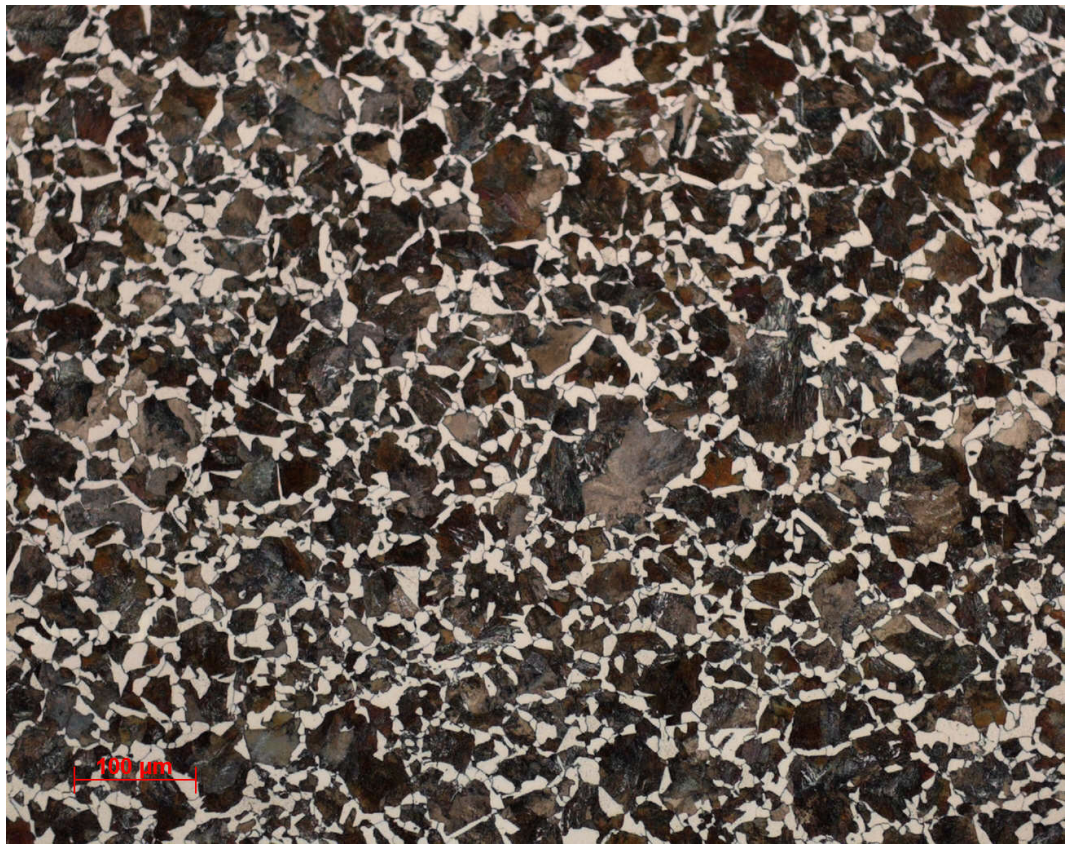
Kuonat / keskimääräinen kenttä pituuden mukaan  
ENV 10247

KUONANLUKULOMAKE Kn, KL, Kr EG-kuonat/kokojakauma

Lukija: JK Pvm: \_\_\_\_\_ Koko ø, mm: 170 Laji: Moc 210 M Luettu pinta-ala, mm<sup>2</sup>: 300  
Tilaaaja / työnnumero: A+1305 , mm: \_\_\_\_\_ Sulatus: 546770 Kenttä 0,50 mm<sup>2</sup>  
Näyte: \_\_\_\_\_ H=710 µm (100x)

| Rivi | q   | koko<br>µm | EG-sulkeumien määrä kokoluokittain<br>n, kpl |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Yhteensä<br>kpl |      |    |    |     |
|------|-----|------------|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------------|------|----|----|-----|
| 1    | 3   | 5,5        | 43   | 42 | 46 | 43 | 54 | 45 | 45 | 45 | 43 | 45 | 43 | 45 | 46 | 43              | 1995 |    |    |     |
|      |     |            | 52   | 34 | 54 | 58 | 46 | 83 | 68 | 88 | 86 | 89 | 65 | 63 | 34 | 84              |      | 56 |    |     |
|      |     |            | 34   | 43 | 33 | 63 | 33 | 58 | 75 | 76 | 57 | 74 | 83 | 32 | 52 | 33              |      | 43 |    |     |
|      |     |            | 33   | 54 | 45 | 42 | 45 | 64 | 46 | 45 | 64 | 64 | 42 | 44 | 35 | 45              |      | 64 |    |     |
|      |     |            | 43   | 43 | 52 | 36 | 34 | 45 | 54 | 63 | 48 | 46 | 34 | 65 | 43 | 36              |      | 76 |    |     |
|      |     |            | 45   | 32 | 43 | 24 | 64 | 54 | 85 | 54 | 36 | 57 | 53 | 48 | 56 | 43              |      | 85 |    |     |
|      |     |            | 64   | 24 | 45 | 43 | 56 | 47 | 57 | 65 | 45 | 48 | 46 | 54 | 43 | 65              |      | 43 |    |     |
|      |     |            | 32   | 34 | 32 | 56 | 48 | 34 | 47 | 78 | 64 | 45 | 84 | 67 | 54 | 86              |      | 54 |    |     |
|      |     |            | 23   | 43 | 54 | 34 | 48 | 45 | 46 | 84 | 76 | 64 | 56 | 48 | 32 | 74              |      | 75 |    |     |
|      |     |            | 42   | 34 | 43 | 67 | 34 | 87 | 64 | 53 | 54 | 56 | 43 | 54 | 47 | 63              |      | 83 |    |     |
|      |     |            | 34   | 25 | 25 | 73 | 45 | 46 | 46 | 76 | 44 | 45 | 62 | 63 | 64 | 42              |      | 97 |    |     |
|      |     |            | 45   | 23 | 43 | 45 | 63 | 54 | 64 | 84 | 85 | 68 | 73 | 48 | 83 | 55              |      | 46 |    |     |
|      |     |            | 23   | 54 | 56 | 32 | 75 | 65 | 64 | 48 | 74 | 84 | 45 | 56 | 53 | 84              |      | 85 |    |     |
|      |     |            | 52   | 42 | 42 | 44 | 41 | 53 | 48 | 43 | 43 | 45 | 34 | 84 | 86 | 76              |      | 63 |    |     |
|      |     |            | 34   | 22 | 32 | 54 | 52 | 36 | 45 | 67 | 33 | 56 | 21 | 84 | 86 | 76              |      | 63 |    |     |
|      |     |            | 2  | 11 | 31 | 1  | 21 | 21 | 21 | 11 | 61 | 21 | 13 | 12 | 12 | 12              |      | 12 | 12 | 480 |
|      |     |            |  |    | 23 | 41 | 12 | 32 | 13 | 21 | 21 | 13 | 31 | 21 | 11 | 11              |      | 21 | 41 |     |
| 21   | 22  | 31         |  |    | 11 | 41 | 13 | 32 | 34 | 12 | 11 | 32 | 13 | 13 | 43 | 13              |      |    |    |     |
| 31   | 12  | 41         |  |    | 13 | 13 | 31 | 31 | 23 | 31 | 43 | 21 | 21 | 31 | 33 | 32              |      |    |    |     |
| 42   | 31  | 14         |  |    | 41 | 14 | 13 | 22 | 12 | 21 | 21 | 12 | 13 | 12 | 21 | 21              |      |    |    |     |
| 14   | 42  | 14         |  |    | 21 | 31 | 13 | 21 | 41 | 12 | 32 | 11 | 42 | 23 | 24 | 13              |      |    |    |     |
| 3    | 22  | 21         | 21   | 12 | 12 | 12 | 1  |    |    |    |    |    |    | 21 | 41 | 92              |      |    |    |     |
|      |     | 31         | 11   | 21 | 21 | 13 | 1  |    |    |    |    |    |    | 32 | 12 |                 |      |    |    |     |
|      |     | 12         | 21   | 12 | 13 | 12 | 1  |    |    |    |    |    |    | 11 | 31 |                 |      |    |    |     |
|      |     | 21         | 34   | 31 | 21 | 41 | 1  |    |    |    |    |    |    | 21 | 21 |                 |      |    |    |     |
| 4    | 44  | 12         | 13   | 13 | 2  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 22              |      |    |    |     |
|      |     | 11         | 21   | 21 | 1  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |                 |      |    |    |     |
| 5    | 88  | 11         |  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 2               |      |    |    |     |
| 6    | 176 |            |  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |                 |      |    |    |     |

HUOM: keskustassa luotia ulkopuolella sulfitin seassa  
luokaisuuutta!



**Imatra 5 mikrorakennekuva, 200 -kertainen suurennos.**

**KONEKUSTANNUKSET**

**TERÄKUSTANNUKSET**

**PÄÄOMAKULUT**

**TERÄNVAIHTOTYÖ**

|                      |              |
|----------------------|--------------|
| KONEEN hankintahinta | 100000       |
| Poistoaika (vuosia)  | 10           |
| Korko %              | 0,1          |
| vuosierä             | 16 274,54 €  |
| <b>Euroa / tunti</b> | <b>3,912</b> |

|                             |               |
|-----------------------------|---------------|
| vaihtoaika min              | 15            |
| sisäänoaika                 | 30            |
| <b>Teräsvaihtokustannus</b> | <b>13,217</b> |

**TYÖVOIMAKULUT**

**TERÄTIEDOT**

|                           |          |
|---------------------------|----------|
| Työntekijän tuntihinta    | 20       |
| Työntekijän sahojen määrä | 2,5      |
| <b>Euroa / tunti</b>      | <b>8</b> |

**Terä**

|                                      |                    |                |              |
|--------------------------------------|--------------------|----------------|--------------|
| Syöttö mm/min                        | Wikus marathon M42 | wikus marathon | Wikus FUTURA |
| Sivuaika (sahan pikaliikje) sekuntia | 55                 | 40             | 75           |
| Terällä saatut sahatut nelit         | 12                 | 12             | 12           |
| Terän hinta euroa                    | 20                 | 40             | 20           |
| Nipun katkaisu aika s                | 50                 | 50             | 170          |
| Yhden kappaleen katkaisuaika         | 197,5              | 267,0          | 148          |
| Terällä saatu kappalemäärä           | 197,5              | 267,0          | 148          |
|                                      | 881,6              | 1763,2         | 881,5815573  |

**HUOLTO+ LASTUAMISNESTE+SÄHKÖ**

Lastuamisnesteen kulutus litraa/kilikko emulsion hinta euroa/litra

Lastuamisneesteptoisuus %

**Lastuamisnestekulut tunnia kohden**

huollot euroa / vuosi

**Huollotkulut tunnia kohden**

sahan teho kW

Sähkö hinta Euroa / kwh

**Sähkökulut tunnia kohden**

**Kulut yhteensä Euroa / tunti**

|       |
|-------|
| 50    |
| 3,5   |
| 5     |
| 0,109 |
| 1500  |
| 0,361 |
| 6     |
| 0,08  |
| 0,240 |
| 0,710 |

**Materiaalitiedot**

|                        |     |
|------------------------|-----|
| Ventailutanko halk: Mm | 170 |
| Tankoja nipussa        | 1   |
| wierekkain             | 1   |
| paallekkain            | 1   |

**KINTEÄT KUSTANNUKSET**

Rakennuksen kulut Euroa/tunti

Muut kinteät kulut Euroa/tunti

|   |
|---|
| 4 |
| 1 |

**Muut tiedot**

työpäivää / vuosi

vuorojen määrä

|     |
|-----|
| 260 |
| 2   |

**KONETUNTINHINTA YHTEENSÄ**

|        |
|--------|
| 17 622 |
|--------|

**TULOKSET**

teräkustannus/katkaisu

työaikkakustannus / katkaisu

**Kustannus / katkaisu YHT**

|               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| 0,0717        | 0,036         | 0,2078        |
| 0,9665        | 1,3070        | 0,7245        |
| <b>1,0383</b> | <b>1,3428</b> | <b>0,9323</b> |

josta teräkustannuksen osuus %

|   |   |    |
|---|---|----|
| 7 | 3 | 22 |
|---|---|----|

**LASKENTAA: Kuinka kauan kestää**

2500 kpl erän katkaisu

|                       |       |       |       |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| Aika tuntia           | 137,1 | 185,4 | 102,8 |
| Kustannus erä / euroa | 2596  | 3357  | 2331  |

Kustannuslaskelmissa huomioon otetut seikat

Sivu: 72

[JNy1]hyvinkin

Sivu: 76

[JNy2]Edut tulevat yleensä esille...

Sivu: 87

[JNy3]teräspalvelukeskukselle?