



Lieriöhammastusten valmistuksessa käytettävien terien hallintatyökalu

Eerik Rimpiläinen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2025

Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Tuotekehitys

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Tuotekehitys

RIMPILÄINEN, EERIK:

Lieriöhammastusten valmistuksessa käytettävien terien hallintatyökalu

Opinnäytetyö 43 sivua, joista liitteitä 4 sivua
Toukokuu 2025

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää yrityksen lieriöhammastusten valmistuksessa käytettävien terien hallintaa paremmin käyttäjien tarpeisiin soveltuvaksi. Tähän asti yrityksessä hammastusterien hallinta on tapahtunut Excel-tiedostossa, johon on listattuna lieriöhammastusten valmistuksessa käytetyt vierintäjyrsimet, vierintäpistoterät ja niiden parametrit. Uuden teränhallintatyökalun avulla on tavoitteena yksinkertaistaa terien hallintaa ja helpottaa oikean terän valintaa. Työkalusta on tarkoitus tehdä soveltuva niin myynti- ja suunnitteluosastolle kuin myös teräostajalle ja verstaalle hammastajan käyttöön. Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Ata Gears Oy, jonka palveluksessa opinnäytetyöntekijä on työskennellyt kevästä 2022 alkaen.

Teränhallintatyökalun perusideana on, että se hakee kaikki käyttäjän määrittämien hammastustietojen perusteella teoreettisesti kappaleen valmistukseen sopivat hammastusterät. Teoreettisesti sopivien terien avulla hallintatyökalu laskee jokaisen terän valmistaman hammasgeometrian ja esittää ne käyttäjälle. Näiden tietojen perusteella käyttäjä voi valita sopivimman terän hammastuksen valmistukseen. Työkalun avulla terävalinnasta saadaan poistettua väärän terän valitsemisen mahdollisuus ja näin ollen virheellisen hammasgeometrian valmistuksen riski pienenee.

Teränhallintatyökalu toteutettiin Excelissä käyttäen VBA-ohjelmointikieltä, jonka avulla ohjataan KISSsoft-laskentaohjelmaa. KISSsoftia käytetään työkalussa terien valmistaman hammasgeometrian laskentaan. Ohjelmoinnissa käytettiin apuna tekoälyä.

Asiasanat: vierintäjyrsintä, vierintäpisto, lieriöhammaspyörä

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Product Development

RIMPILÄINEN, EERIK:
Tool for Managing Cutters Used in the Production of Cylindrical Gears

Bachelor's thesis 43 pages, appendices 4 pages
May 2025

The objective of this thesis was to improve the tool library of a company to make it more suitable for the users. Up until this point, the tool management had been done using an Excel-sheet based library, where all the different hobbing cutters and pinion-type cutters were listed with their parameters. With the help of a cutter management tool the selection of cutters is made simpler and risk of choosing a wrong cutter for the job is reduced. The cutter management tool is meant to be used by the sales department, tool management department, engineering department and the machinists who are manufacturing the cylindrical gears. The client for this thesis was Ata Gears Oy where the author has been working since spring of 2022.

The basic idea of the cutter management tool is that it sorts the company's tool library based on user inputs on the gear to be manufactured and selects all cutter tools that are theoretically suitable for manufacturing that gear. Then using those selected cutters, the cutter management tool calculates for each cutter manufactured gear geometry and displays it to the user. With that information, the user can then select the cutter(s) most suitable for the job. With this management tool the risk of choosing a wrong cutter for the job is significantly reduced and thus a risk of manufacturing an incompatible tooth form is reduced.

The management tool was done in Excel using the in-built VBA coding language. All gear geometry calculations are done in KISSsoft which is controlled through Excel with VBA. Artificial intelligence was used in the coding process.

Key words: gear hobbing, gear shaping, cylindrical gear

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	TOIMEKSIANTAJA	9
	2.1 Ata Gears Oy	9
3	HAMMASGEOMETRIA.....	10
	3.1 Perusprofiili	10
	3.2 Lieriöhammaspyörä.....	12
	3.2.1 Peruskäsitteet.....	13
	3.2.2 Hampaan profiili ja ryntökulma	14
	3.2.3 Profillinsiirto	15
	3.3 Evolventtiuritus.....	17
4	LIERIÖHAMMASTUSTEN VALMISTUS.....	18
	4.1 Valmistusmenetelmistä yleisesti.....	18
	4.2 Vierintäjärsintä.....	19
	4.2.1 Vierintäjärsinterä.....	20
	4.3 Vierintäpisto	21
	4.3.1 Vierintäpistoterä.....	22
	4.4 Hammastusmenetelmien haasteita	24
	4.5 Hammasvahvuuden mittaaminen.....	26
5	TERIENHALLINTATYÖKALU	28
	5.1 Terätietokanta	28
	5.2 KISSsoft	28
	5.3 Kriteerit.....	29
	5.4 Toteutus	29
	5.4.1 Terien esisuodatus	31
	5.4.2 Hammasgeometrialaskenta ja sopivien terien määrittäminen.....	32
6	TULOKSET	34
7	POHDINTA	37
	LÄHTEET.....	39
	LIITTEET	40
	Liite 1. Excel-terätietokanta. 1 (2).....	40
	Liite 1. Excel-terätietokanta. 2 (2).....	41
	Liite 2. KISSsoft.	42
	Liite 3. Terienhallintatyökalu.	43

LYHENTEET JA TERMIT

ATA	Ata Gears Oy
b	hammasleveys
C_P	perushammastangon ja vastahammastangon hampaan välinen tyvivällys
CNC	Computer Numerical Control
COM	Component Object Model
d	lieriöhammaspyörän jakohalkaisija
d_a	lieriöhammaspyörän päähalkaisija
d_b	lieriöhammaspyörän perusympyrä
d_f	lieriöhammaspyörän tyvihalkaisija
d_{Ff}	lieriöhammaspyörän tyven muotohalkaisija
d_0	terän jakohalkaisija
D_M	mittakuulan halkaisija
DP	Diametral Pitch
e_P	perushammastangon hammasaukon leveys
h	lieriöhammaspyörän hampaan kokonaiskorkeus
h_a	lieriöhammaspyörän hampaan pääkorkeus
h_f	lieriöhammaspyörän hampaan tyvikorkeus
h_{Ff}	lieriöhammaspyörän hampaan evolventin tyvikorkeus
h_P	perushammastangon hampaan korkeus
h_{aP}	perushammastangon hampaan pääkorkeus
h_{fP}	perushammastangon hampaan tyvikorkeus
h_{FFP}	perushammastangon tyvikorkeuden suora osuus
h_{P0}	terän hampaan kokonaiskorkeus
h_{aP0}	terän hampaan pääkorkeus
h_{fP0}	terän hampaan tyvikorkeus
h_{WP}	perushammastangon hampaan ja vastahammastangon hampaan yhteinen korkeus
ISO	International Standard Organization
k	mittahammasluku
m	moduuli
m_n	normaalimoduuli

m_0	terämoduuli
M_{dK}	kuulamitta
p	jako
s	hampaan paksuus
s_P	perushammastangon hampaan paksuus
SFS	Suomen Standardit ry
VBA	Visual Basic for Application
W_k	hammasvälimitta
x	profiilinsiirtokerroin
x_0	terän profiilinsiirtokerroin
z	hammasluku
z_0	terän hammasluku
α	ryntökulma
α_P	perushammastangon ryntökulma
α_0	terän ryntökulma
β	vinouskulma
β_0	terän vinouskulma
ρ_f	lieriöhammaspyörän tyvipyöristyksen säde
ρ_{fP}	perushammastangon tyvipyöristyksen säde
ρ_{aP0}	terän harjapyöristyksen säde
ρ_{fP0}	terän tyvipyöristyksen säde

1 JOHDANTO

Yrityksen sisällä on jo pitkään ollut tarvetta lieriöhammaspyörien ja evolventtiuristusten valmistuksessa käytettävien hammastusterien hallinnan parantamiselle. Erilaisia hammastusteriä on todella paljon, yli 1000 kpl. Vaikka kaikki terät ovat listattuna Excel-tiedostoon, on niiden hallinta ja tehokas käyttö vaikeaa suuren määrän takia. Tätä varten tarvittiin työkalu, jonka avulla käyttäjä pystyy helposti ja nopeasti valitsemaan sopivan terän kulloinkin tekeillä olevaan työhön. Koska jokainen hammastusterä valmistaa hieman erilaista hammasgeometriaa, yksitellen kaikkien sopivien terien läpikäynti voi olla työlästä. Tähän haluttiin automatiikkaa, jonka avulla helpotetaan oikean terän valintaa ja samalla vähennetään mahdollisten virheiden ja laatuerojen mahdollisuutta. Väärän terän valinta aiheuttaa mahdollisuuden virheellisen hammasgeometrian valmistukseen. Lieriöhammastukset valmistetaan yleensä kappaleisiin viimeisimpien työvaiheiden aikana ja näin ollen jo melkein valmiin kappaleen romuttamista väärän hammastusterän valinnan takia halutaan välttää viimeiseen asti. Jo melkein valmiin kappaleen romuttaminen aiheuttaa kasvaneita valmistuskustannuksia yritykselle ja yleensä myös viivästyttää kappaleen toimitusta asiakkaalle.

Tässä opinnäytetyössä tehdään yrityksen lieriöhammastusten valmistukseen käytettävien terien hallintaan soveltuva työkalu, jolla terien validointi ja niiden valmistamat hammasgeometriat saadaan paremmin hallintaan. Suurin osa yrityksen valmistamista lieriöhammastuksista on erilaisia evolventtimuotoon perustuvia urituksia. Työkalun avulla terähallintaa helpotetaan, jotta myyntiosasto ja teräostaja pystyvät jo tarjousvaiheessa hammastuksen perustietojen avulla varmistamaan, että kappaleen valmistukseen löytyy oikeanlainen terä varastosta. Työkalusta tulee myös suunnitteluosastolle apuväline, jolla pystytään varmistamaan terän sopevuus hammastuksen valmistukseen, asiakkaan kappaleelle määrittämien geometristen vaatimusten mukaisesti. Työkalu tulee käyttöön myös verstaalle hammastajille ja koneistajille helpottamaan oikean terän valintaa. Kirjavan käyttäjäkunnan johdosta terienhallintatyökalusta tehtiin sellainen, että sen käyttämiseen ei vaadita syvällistä ymmärrystä hammaspyörägeometriasta ja eri valmistusmenetelmistä. Työkalua pystyy käyttämään kaikki, jotka ymmärtävät hammasgeometrian ja valmistuksen perusteet.

Jotta opinnäytetyön aiheena olevaa terienhallintatyökalua pystyy paremmin ymmärtämään, täytyy ensin omata peruskäsitys hammaspyörägeometriasta, siihen liittyvistä käsitteistä ja eri valmistusmenetelmistä. Tämän opinnäytetyön luvussa 3 käsitellään hammasgeometriaa ja siihen liittyvää terminologiaa ja luvussa 4 käsitellään hieman eri valmistusmenetelmä. Luvussa 4 on keskitytty erityisesti yrityksen käytössä oleviin ja tämän opinnäytetyön kannalta oleellisimpiin valmistusmenetelmiin. Lopuksi luvussa 5 käsitellään opinnäytetyön tuloksena syntynyttä terienhallintatyökalua, ja kerrotaan hieman sen ohjelmoinnista ja toimintaperiaatteesta.

2 TOIMEKSIANTAJA

2.1 Ata Gears Oy

Ata Gears on vuonna 1937 perustettu perheyritys, joka valmistaa hammaspyöriä ja muita voimansiirtokomponentteja. ATA on noin 150 työntekijän voimin erikoistunut erityisesti kaarevahampaisten kartiohammaspyörien valmistukseen ja optimointiin.

Vuonna 2024 ATA:n valmistamista hammaspyöristä 69 % meni erilaisiin meriteollisuuden kohteisiin ja loput 31 % meni muille teollisuuden aloille, esimerkiksi kaivosteollisuuteen ja raskaaseen teollisuuteen. Liikevaihtoa syntyi samana vuonna noin 40 miljoonaa euroa.



KUVA 1. Ata Gears logo (Ata Gears Oy n.d.).

Suurin osa, noin 70 % ATA:n valmistamista komponenteista menee vientiin ulkomaille, erityisesti Eurooppaan ja Aasiaan. Suurimmat yksittäiset vientimaat ulkomailta ovat Japani, Saksa, Kiina, Norja, Ruotsi ja USA.

ATA:n tehtaot sijaitsevat Tampereen Atalassa ja Hautalassa. Myös Pälkäneellä on toimipiste, jossa sijaitsee yrityksen materiaalivarasto.

3 HAMMASGEOMETRIA

3.1 Perusprofiili

Lieriöhammaspyörän hammasgeometrian peruskäsitteisiin kuuluu perusprofiili, jota käsitellään esimerkiksi Suomen Standardisoimisliiton vuonna 2012 julkaisemassa standardissa SFS-ISO 53. Hammasgeometrian perusprofiili kuvastaa hammastankoa, jota vastaa ulkopuolinen teoreettinen hammaspyörä, jonka hammasluku ja ulkohalkaisija ovat äärettömän suuret (SFS-ISO 53 2012, 4). Taulukossa 1 on esitetty SFS-ISO 53 perusprofiiliin liittyvät tunnuksat ja niiden yksiköt.

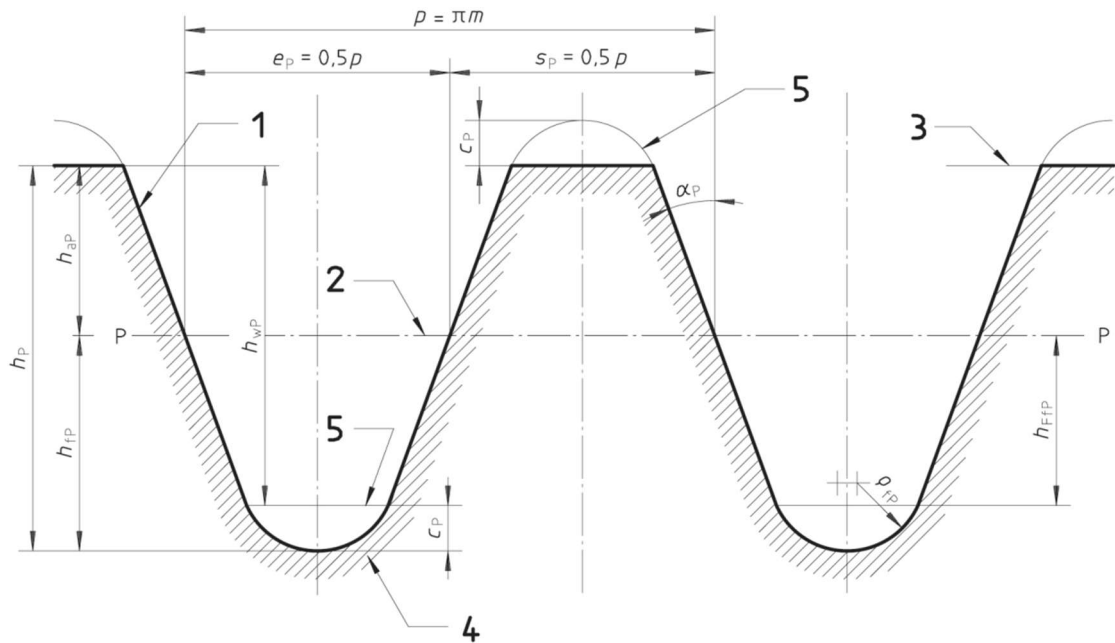
TAULUKKO 1. Tunnuksat ja yksiköt (SFS-ISO 53 2012, 5, muokattu).

Tunnus	Kuvaus	Yksikkö
m	Moduuli	mm
p	Jako	mm
α_P	Perushammastangon ryntökulma	astetta
s_P	Perushammastangon hampaan paksuus	mm
e_P	Perushammastangon hammasaukon leveys	mm
h_P	Perushammastangon hampaan korkeus	mm
h_{aP}	Perushammastangon hampaan pääkorkeus	mm
h_{fP}	Perushammastangon hampaan tyvikorkeus	mm
h_{FFP}	Perushammastangon tyvikorkeuden suora osuus	mm
ρ_{fP}	Perushammastangon tyvipyörityksen säde	mm
h_{wP}	Perushammastangon hampaan ja vastahammastangon hampaan yhteinen korkeus	mm
c_P	Perushammastangon ja vastahammastangon hampaan välinen tyvivällys	mm

Kuvassa 2 on esitetty standardin SFS-ISO 53 mukainen perusprofiili. Perusprofiilin tunnuksista moduuli m on pituus, joka määrittää perusprofiilin suhteellisen koon ja siten siihen liittyvien hammaspyöräiden hampaiden (ja hammasaukkojen) koon. Moduuli saadaan kaavalla

$$m = \frac{p}{\pi} \quad (1)$$

missä p kuvastaa perusprofiilin hammastuksen jakoa. Hammastuksen jako on mitta jakosuoralla $P-P$ yhden hampaan ja hammasaukon yli. Jelaskan (2012) määrittämisen mukaan kaikki perusprofiilin lineaarimitat voidaan myös määrittää moduulin kerrannaisina ja näin ollen voidaan todeta, että moduuli vaikuttaa kaikkiin hammaspyörän mittoihin (Jelaska 2012, 36).



KUVA 2. Perusprofiili (SFS-ISO 53, 6).

Moduuli on yleisesti käytössä metrisessä mittajärjestelmässä, mutta sille on olemassa myös tuumainen vastine DP (engl. diametral pitch). Moduulilla ja DP :llä on kaavan 2 mukainen yhteys.

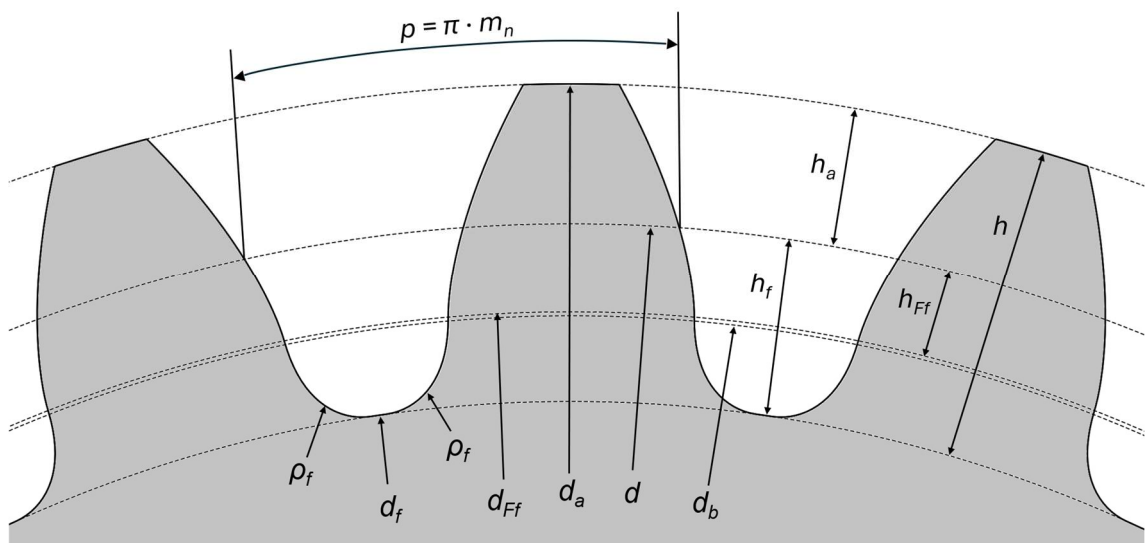
$$DP = \frac{25,4}{m} \quad (2)$$

Kuvassa 2 numerolla 1 on kuvattu hampaan kyljen profiilia, joka on suora välillä h_{ap} ja h_{fip} , eli hampaan harjalta tyvipyyristyksen ρ_{fip} alkuun. Numerolla 2 on kuvattu jakosuora $P-P$, josta käytetään hammaspyörrien yhteydessä nimitystä jakohalkaisija. Jelaskan (2012) mukaan jakosuora $P-P$ asettuu perusprofiililla siten, että hampaan paksuus s_p ja hammasaukon leveys e_p ovat yhtä suuret (Jelaska 2012, 36). Numerolla 3 on kuvattu pääviiva, joka kuvastaa hampaan harjaa ja josta käytetään hammaspyörrien yhteydessä nimitystä päähalkaisija. Numerolla 4 on kuvattu tyviviiva, joka kuvastaa hampaan tyveä ja josta käytetään hammaspyörrien yhteydessä nimitystä tyvihalkaisija. Numerolla 5 on kuvattu vastakkaisen

hammastuksen perusprofiili. Perusprofiilin hampaan korkeuden määrittäviä tunnuksia ovat hampaan pääkorkeus h_{aP} ja hampaan tyvikorkeus h_{fP} ja ne määrittävät yhdessä hampaan kokonaiskorkeuden h_P . Lisäksi hampaan tyvikorkeuden suora osuus h_{FFP} määrittää kohdan, jossa hampaan kylki ja tyvipyöritys ρ_{fP} kohtaavat. Kaikkien hampaan korkeuden määrittävien tunnusten alkupiste on jakosuoralla $P-P$. Ryntökulma α_P kuvastaa hampaan kyljen ja jakosuoran normaalin välistä kulmaa.

3.2 Lieriöhammaspyörä

Lieriöhammaspyörä on nimensä mukaisesti lieriö, johon on lisätty hampaat voimansiirtoa varten. Lieriöhammaspyörä voi olla ulkopuolinen, jolloin hampaan harjat osoittavat ulospäin tai sisäpuolinen, jolloin hampaan harjat osoittavat sisäänpäin. Suomen Standardisoimisliiton vuonna 2012 julkaisemassa standardissa SFS-ISO 21771 käsitellään lieriöhammastusten käsitteitä ja geometriaa. Standardin SFS-ISO 21771 mukainen lieriöhammastus perustuu määritettyyn perusprofiiliin, joka voi olla esimerkiksi standardin SFS-ISO 53 mukainen, tai jonkun muun standardin mukainen. Perusprofiiliin verrattuna lieriöhammastuksen hammasluku ei ole enää äärettömän suuri ja hampaan profiili ei ole suora, vaan esimerkiksi evolventin muotoinen. Kuvassa 3 on esitetty lieriöhammastuksen mitoituksen kannalta tärkeitä tunnuksia.



KUVA 3. Lieriöhammaspyörän tunnuksia.

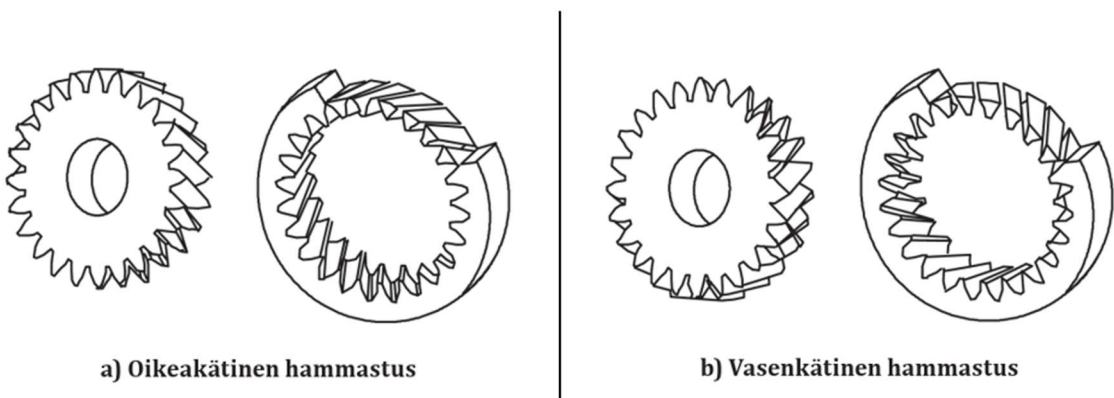
3.2.1 Peruskäsitteet

Lieriöhammaspyörän tunnuksista normaalimoduuli m_n kuvastaa samaa asiaa kuin perusprofiilin moduuli m , eli hammaspyörän suhteellista kokoa. Päähalkaisija d_a kuvastaa hampaiden harjan halkaisijaa ja se on ulkopuolisessa hammas-
tuksessa suurin halkaisijamitta ja sisäpuolisessa hammastuksessa pienin. Perus-
ympyrän d_b kohdalta alkaa seuraavassa luvussa 3.2.2 määritetty hampaan pro-
fiilin evolventti osuus. Tyvihalkaisija d_f kuvastaa hampaiden tyven halkaisijaa ja
se on ulkopuolisessa hammastuksessa pienin hammasgeometrian halkaisija-
mitta ja sisäpuolisissa hammastuksissa suurin. Tyvenmuotohalkaisija d_{ff} kuvas-
taa kohtaa, jossa hampaan profiilin evolventti kohtaa tyvipyörityksen säteen ρ_f .
Jakohalkaisija d on halkaisija, jolta saadaan määritettyä hammastuksen jako p .
Jakohalkaisija saadaan laskettua kaavalla

$$d = \frac{|z| * m_n}{\cos \beta} \quad (3)$$

missä z on hammasluku ja β on vinouskulma (SFS-ISO 21771 2012, 15).

Hampaan leveyttä kuvataan tunnuksella b ja sillä tarkoitetaan hampaan koko-
naispituutta hammaspyörän aksiaalisuunnassa. Lieriöhammaspyöriä voidaan
valmistaa sekä suora-, että vinoampaisina. Vinohampaisen hammaspyörän
etuna on se, että niissä on aina useampia hampaita hammaskosketuksessa yhtä
aikaa, tämä auttaa pienentämään melua ja parantamaan voimansiirtokykyä
(Björk ym. 2014, 342). Hammaspyörä on suorahampainen, jos sen vinouskulma
 $\beta = 0^\circ$ ja vinohampainen jos $\beta \neq 0^\circ$. Hammaspyörän ollessa vinohampainen on
tärkeää määrittää hammastuksen kätisyys, eli kumpaan suuntaan hammas on
vinoissa. Kuvassa 4 on esitetty kätisyyden nimeämiskäytäntö ulkopuolisille ja si-
säpuolisille hammastuksille.

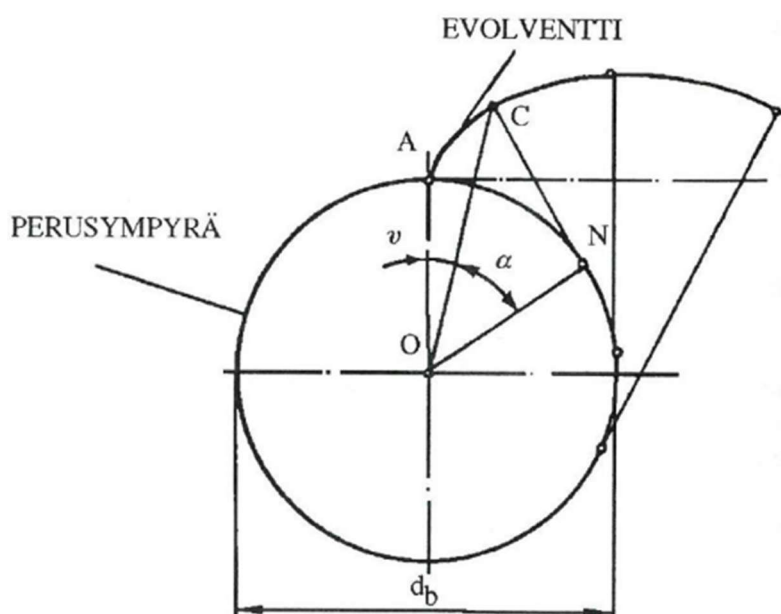


KUVA 4. Hampaan kätisyys (SFS-ISO 21771 2012, 21, muokattu).

Kätisyyden määrittämisen voi ymmärtää paremmin, jos kuvittelee itsensä hammaspyörän kuvitteellisen akselin päähän ja katsoo sieltä kohti hammaspyörää. Kuvitteellisen akselin päästä näkee kumpaan suuntaan hampaat kääntyvät ja tästä tulee määritelmä hammaspyörän kätisyydelle. Sisäpuolista hammaspyörää katsoessa täytyy muistaa tarkastella hampaita, eikä hammasaukkoja.

3.2.2 Hampaan profiili ja ryntökulma

Hammaspyörän hampaan kyljen muotoja on olemassa useita, mutta niistä tärkeimmät ovat evolventti ja sykloidi. Evolventtia pidetään yleisesti parhaimpana hammasmuotona valmistuksen helppouden ja laadunhallinnan kannalta, sillä pieni akselivirhe evolventtihammaspyörissä ei vaikuta välityssuhteeseen. (Björk ym. 2014, 332.)

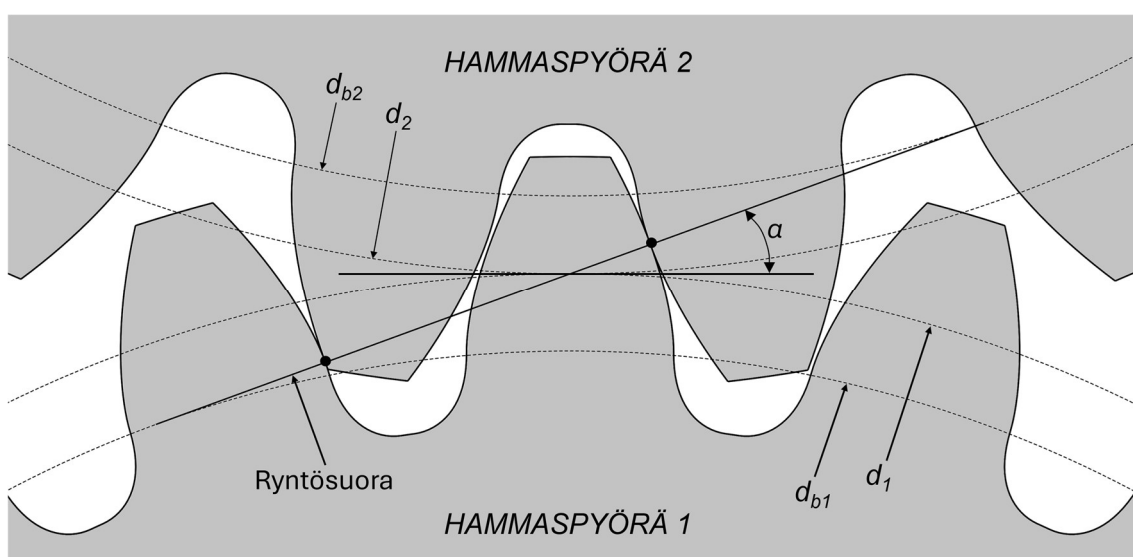


KUVA 5. Evolventin syntyperiaate (Björk ym. 2014, 332).

Evolventin muodostumista voidaan havainnollistaa parhaiten kuvan 5 osoittamalla tavalla. Perusympyrän kehän ympärille on kierretty lanka ja kun tätä lankaa aletaan kiertämään auki siten että se pysyy koko ajan kireänä, muodostaa langan pää evolventtimuodon (Björk ym. 2014, 332). Kaikista maailmalla valmistetuista

hammaspyöristä (kartiohammaspyörät mukaan lukien) noin 88 % on valmistettu evolventtimuotoon perustuen (Jelaska 2012, 30).

Lieriöhammaspyörän tunnuksista ryntökulma α kuvastaa kahden hammaskosketuksessa olevan lieriöhammaspyörän jakohalkaisijoiden yhteisen tangentin ja ryntösuoran välistä kulmaa. Ryntösuora kuvastaa suoraa, jonka varrella hammaskosketus tapahtuu ja vääntömomentti siirtyy hammaspyörältä toiselle. Ryntösuora sivuaa molempien hammaspyörien perusympyröitä. (Björk ym. 2014, 332.) Kuvassa 6 on esitetty lieriöhammaspyörän ryntökulma ja ryntösuora. Kuvassa ryntösuoralla olevat pisteet kuvastavat hammaspyörien välistä hammaskosketusta.



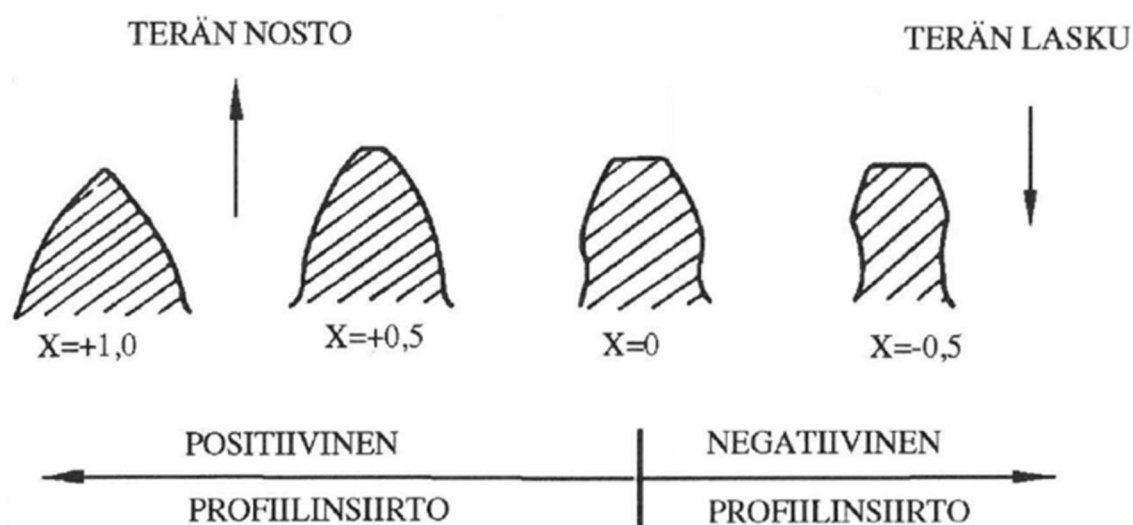
KUVA 6. Lieriöhammaspyörän ryntökulma.

Yleensä lieriöhammaspyörillä ryntökulma on 20 astetta (Björk ym. 2014, 332). Toinen yleinen ryntökulma on 30 astetta. Tällaisia 30 asteen ryntökulmia löytyy erityisesti erilaisista staattisista liitoksista, eli urituksista. Esimerkiksi standardin DIN 5480 mukaisen urituksen ryntökulma on 30 astetta. Luvussa 3.3 on kerrottu lisää urituksista ja niiden eroavaisuuksista lieriöhammaspyöriin.

3.2.3 Profilinsiirto

Jelaskan (2012) mukaan järkevän profilinsiirtokertoimen valinta on yksi hammaspyörägeometrialaskennan tärkeimmistä vaiheista (Jelaska 2012, 85).

Lähes kaikissa hammaspyörissä tarvitaan profiilinsiirtoa, sillä sen avulla pystytään vaikuttamaan esimerkiksi hammaspyöräparin akseliväliin ja hampaan tyvilujuuteen. Profiilinsiirto toteutetaan kuvan 7 osoittamalla tavalla, nostamalla hammastusterää joko kauemmaksi (positiivinen profiilinsiirto) työkappaleesta tai laskeamalla sitä lähemmäksi (negatiivinen profiilinsiirto) työkappaletta. Profiilinsiirtoa merkitään yleensä profiilinsiirtokerroimella x , joka on yksikötön suure. Jos halutaan ottaa yksiköt mukaan, täytyy profiilinsiirtokerroin x kertoa hammastuksen normaalimoduulilla m_n . Tällöin saadaan $x \cdot m_n$ ja tämä suure kertoo kuinka suuri hammastuksen jakohalkaisijan ja terän jakosuoran välinen etäisyys on. (Jelaska 2012, 49; Björk ym. 2014, 332.)



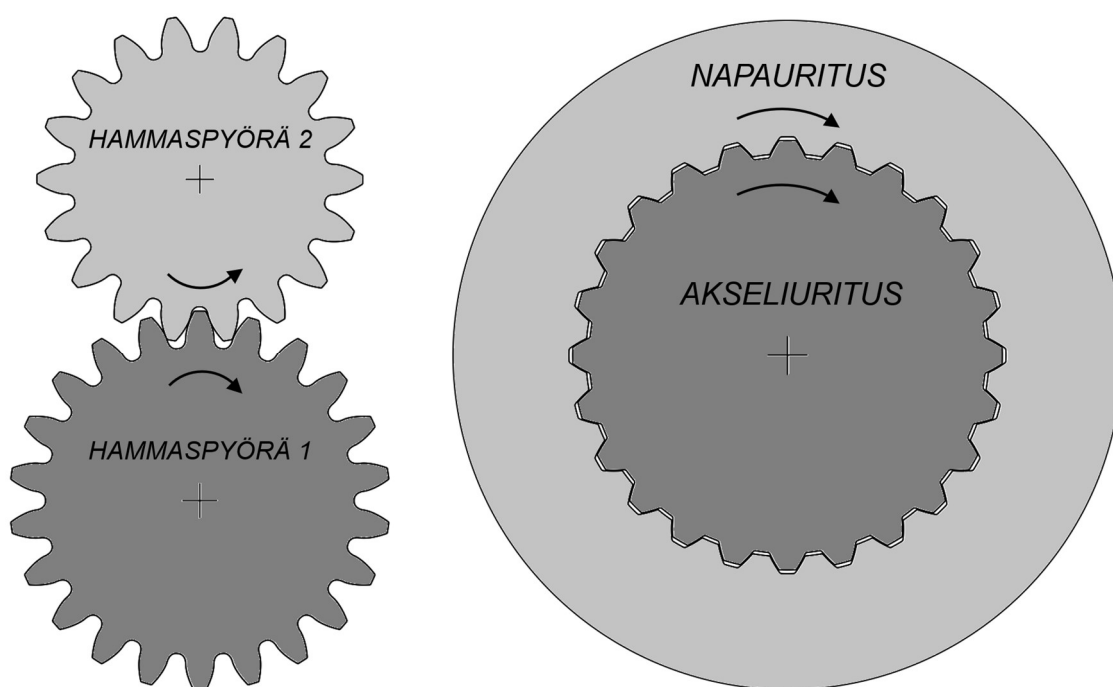
KUVA 7. Positiivinen ja negatiivinen profiilinsiirto (Björk ym. 2014, 335).

Positiivinen profiilinsiirto auttaa kasvattamaan hampaan tyvilujuutta, mutta jos positiivista profiilinsiirtoa on liikaa, saattaa se tehdä hampaan harjasta terävän. Terävä hampaan harja on ongelmallinen esimerkiksi lämpökäsittelyssä, sillä se karkeistuu helposti läpi ja tällöin siitä tulee hauras. Liiallinen negatiivinen profiilinsiirto puolestaan pienentää hampaan tyvilujuutta. Liian pieni tyvilujuus tekee hampaasta heikon, eikä se välttämättä kestä voimansiirrosta aiheutuvia kuormituksia. Profiilinsiirtokerroin täytyykin siis valita huolella, sillä se vaikuttaa suuresti hammaspyörän geometriaan ja sen kestävyys.

3.3 Evolventtiuritus

Tähän asti opinnäytetyössä on puhuttu vain evolventtimuotoon perustuvista lieriöhammaspyöristä, jotka ovat ns. dynaamisia liitoksia. Dynaamisessa liitoksessa rynnössä olevien hampaiden profiilit liukuvat toisiaan vasten siirtäen samalla vääntömomenttia hammaspyörältä toiselle. Dynaamisissa liitoksissa on tyypillistä, että korkeintaan vain muutama hammas on kosketuksessa yhtä aikaa ja vääntömomentti välittyy niiden kautta hammaspyörältä toiselle.

Staattinen liitos eli uritus (engl. spline) eroaa dynaamisesta liitoksesta siten, että siinä kaikki hampaat välittävät vääntömomenttia yhtäaikaaisesti ja hampaiden välillä ei ole liikettä samalla tavalla kuin dynaamisessa liitoksessa. Tästä johtuen, uritukset ovatkin usein parempia välittämään suurempia vääntömomenteja. Alla kuvassa 8 on vasemmalla esitetty dynaaminen liitos ja oikealla staattinen liitos.



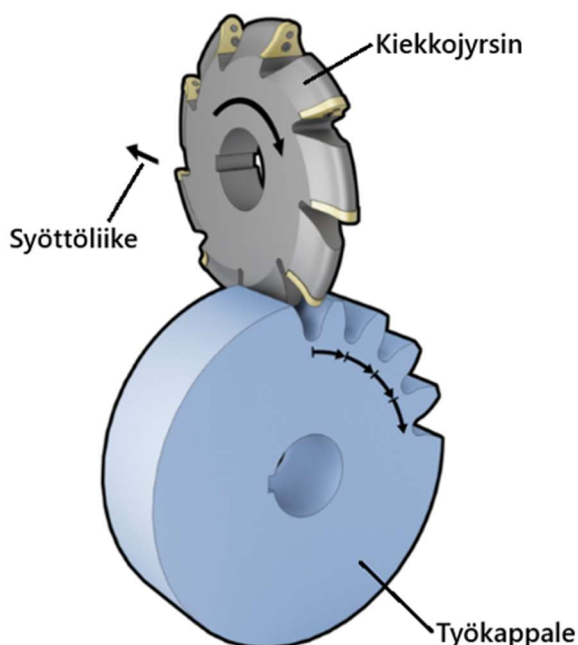
KUVA 8. Dynaaminen liitos vs. staattinen liitos.

Urituksen hampaan profiileja on olemassa useita erilaisia. Yleensä kuitenkin myös urituksissa käytetään evolventtimuotoon perustuvaa hampaan profiilia. Tällaisten evolventtiuritusten geometria perustuu lieriöhammaspyörän geometriaan. Urituksen hampaat ovat yleensä lyhyemmät verrattuna lieriöhammaspyörän hampaisiin. Sama hammasgeometria mahdollistaa samojen valmistusmenetelmien ja samanlaisten terien käytön kummissakin hammastustyypeissä.

4 LIERIÖHAMMASTUSTEN VALMISTUS

4.1 Valmistusmenetelmistä yleisesti

Perinteiset lieriöhammastusten valmistusmenetelmät voidaan jakaa kahteen kategoriaan: vierintään perustuviin menetelmiin ja terän muotoon perustuviin menetelmiin. Vierintään perustuvia menetelmiä ovat esimerkiksi vierintäjyrsintä ja vierintäpisto. Näissä menetelmissä hammastusterällä työstetään montaa työkappaleeseen muodostuvaa hammasta samanaikaisesti ja hammastusterän ja työkappaleen keskinäinen vierintäliike määrittää hampaan geometrian. Terän muotoon perustuvissa menetelmissä puolestaan hampaan geometria määrittyy täysin hammastusterän muodon mukaan. Kiekkojyrsintä (engl. disc cutting) on yksi terän muotoon perustuvista menetelmistä, siinä työkappaleen hampaat ajetaan hammasaukon muotoisella kiekkoterällä yksi kerrallaan. (Huda 2021, 158.) Kuvassa 9 on esitetty kiekkojyrsintä.



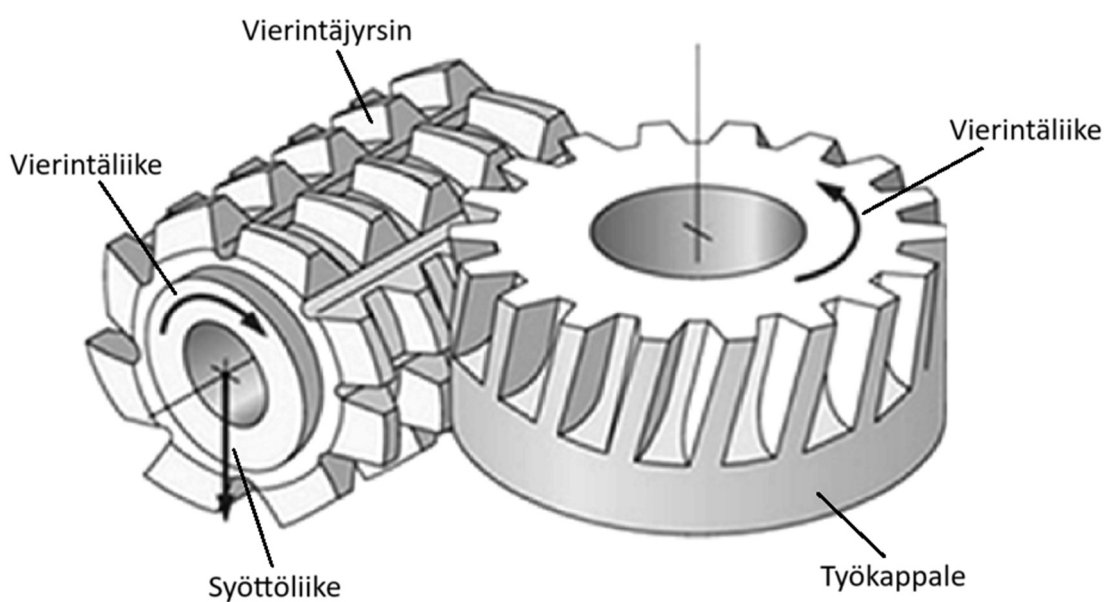
KUVA 9. Kiekkojyrsintä (Huda 2021, 158, muokattu).

Terän muotoon perustuvia menetelmiä ovat myös nykyaikaisilla CNC-sorveilla ja -työstökeskuksilla valmistetut lieriöhammastukset, joissa käytetään siihen soveltuvia jyrsintappeja. Jyrsintapilla valmistetun hammastuksen etuna voidaan pitää

valmistettavuuden helppoutta, sillä niillä voidaan valmistaa lähes millainen hammasgeometria tahansa. Seuraavissa luvuissa 4.2 ja 4.3 esitellään ATA:ssa yleisesti käytössä olevat ja tämän opinnäytetyön kannalta oleelliset vierintään perustuvat menetelmät ja niissä käytetyt hammastusterät.

4.2 Vierintäjyrsintä

Vierintäjyrsintä (engl. gear hobbing) on yksi yleisimmistä perinteisistä lieriöhammastusten valmistusmenetelmistä. Vierintäjyrsintä on hyvin tarkka hammastusmenetelmä, sillä jokainen työkappaleeseen valmistuva hammas on useamman vierintäjyrsinterän hampaan työstön tulos, ja näin ollen pienet virheet jyrsinterässä eivät kumuloidu yhdelle valmistuvalle hampaalle vaan jakautuvat tasaisesti ympäri valmistuvaa hammastusta (Norton 2020, 747). Vierintäjyrsintä soveltuu ulkopuolisten hammastusten valmistukseen, jotka voivat olla joko suora- tai vinohampaisia. Kuvassa 10 on esitetty vierintäjyrsinnän työkierto.



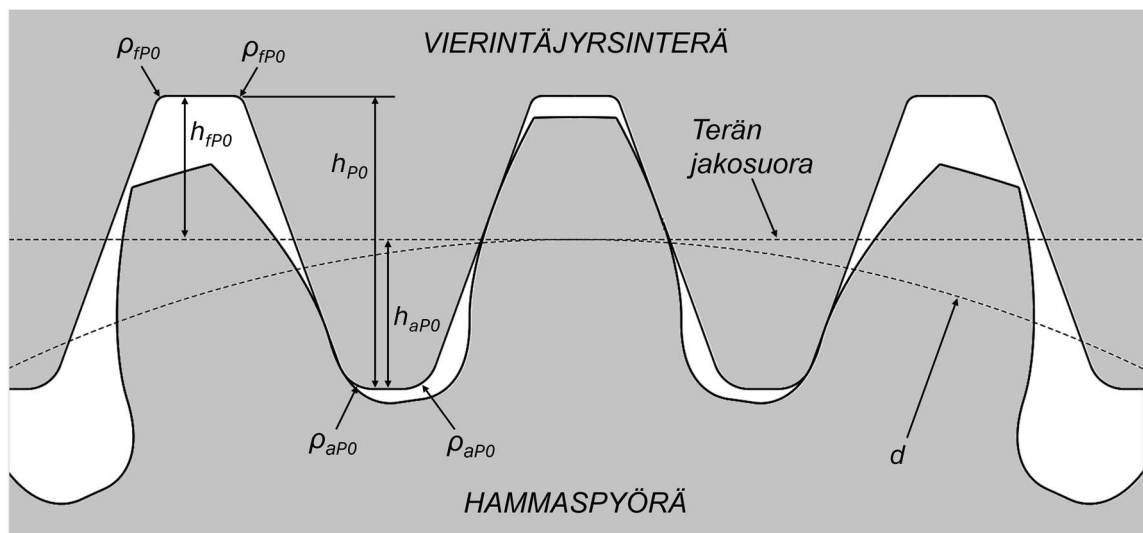
KUVA 10. Vierintäjyrsinnän työkierto (Hameed ym. 2023, 3, muokattu).

Vierintäjyrsinnässä terä ja työkappale pyörivät keskenään synkronoidusti. Terän pyörähtäessä yhden täyden kierroksen työkappale pyörähtää hammastuksen jaon verran (Jelaska 2012, 41). Työstön aikana terää myös syötetään työkappaleen keskiakselin suuntaisesti halutun hammasleveyden saavuttamiseksi. Perinteisesti vierintäjyrsintää on tehty ainoastaan siihen tarkoitetuilla koneilla. Nykyään

kuitenkin vierintäjyrsintä onnistuu myös moderneilla CNC-ohjatuilla sorveilla ja työstökeskuksilla.

4.2.1 Vierintäjyrsinterä

Vierintäjyrsinterä (engl. hobbing cutter) muistuttaa ulkoisesti kierreruuvia, jonka kierteet on katkaistu ja kierteestä muodostuneet hampaat teroitettu (Jelaska 2012, 40). Vierintäjyrsinterän hampaan kylki on suora, kuten perusprofiilissa. Tästä huolimatta työkappaleeseen valmistuu evolventin muotoiset hampaat terän ja työkappaleen synkronoidun vierintäliikkeen ansiosta. Valmistuksen kannalta on tärkeää, että vierintäjyrsinterällä on sama moduuli m_0 ja ryntökulma α_0 valmistettavan hammastuksen kanssa. Kuvassa 11 on esitetty vierintäjyrsinterän geometrian tunnuksia ja niiden vaikutuksesta työkappaleeseen muodostuva hammastus. Kuvasta pystytään myös hyvin havainnoimaan aiemmin luvussa 3.2.3 määritetyn profiilinsiirron vaikutus hammastukseen. Tässä tapauksessa hammastuksessa ei ole profiilinsiirtoa, sillä terän jakosuoran ja työkappaleeseen valmistuvan hammastuksen jakohalkaisijan välinen etäisyys on 0.



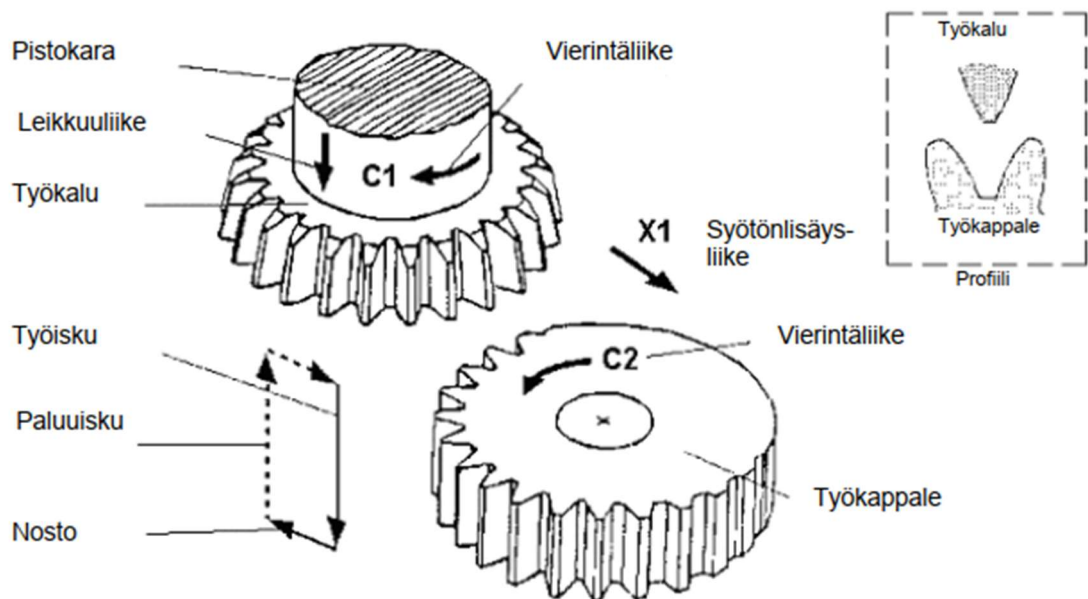
KUVA 11. Vierintäjyrsinterän geometria.

Jyrsinterän geometrian tunnuksat ovat samoja kuin aiemmin määritetyn perusprofiilin (Kuva 2) ja ne on erotettu toisistaan terän tunnusten perään lisätyn 0:n avulla. Vaikka tunnuksat ovatkin samat, ovat niiden arvot erilaiset. Esimerkiksi

terän pääkorkeuskerroin h_{aP0} on tyvivälyksen verran isompi verrattuna perusprofiilin pääkorkeuskertoimeen h_{aP} . Terän pääkorkeuskerroin täytyy valita siten, että valmistuvaan hammastukseen tulee riittävä tyvikorkeuskerroin h_f . Tämä johtuu siitä, että terä valmistaa myös hammastuksen tyvihalkaisijan ja tyvipyöristykset. Terän tyvikorkeuskertoimen h_{fP0} täytyy puolestaan olla isompi kuin valmistettavan hammastuksen pääkorkeuskerroin h_a , jotta terä ei osu hammastuksen päähalkaisijalle. Tietyissä tilanteissa voidaan haluta, että vierintäjärsinterä valmistaa myös hammastuksen päähalkaisijan (engl. topping tool). Tällöin terän tyvikorkeuskerroin h_{fP0} määrittää hammastuksen pääkorkeuskertoimen h_a . Hampaalle valmistuvat tyvipyöristykset muodostuvat vierintäjärsinterän harjapyöristyksien ρ_{aP0} koon, ja terän ja työkappaleen keskinäisen vierintäliikkeen tuloksena.

4.3 Vierintäpisto

Jelaskan (2012) mukaan vierintäpistoksi (engl. gear shaping) kutsutaan menetelmää, jossa käytetään ulkonäöllisesti ja geometrisesti evolventtihammaspyörää muistuttavaa hammastusterää työkappaleen hampaiden valmistukseen (Jelaska 2012, 74). Kuvassa 12 on esitettyä vierintäpiston työkierto.



KUVA 12. Vierintäpiston työkierto (LIEBHERR 2003, 9).

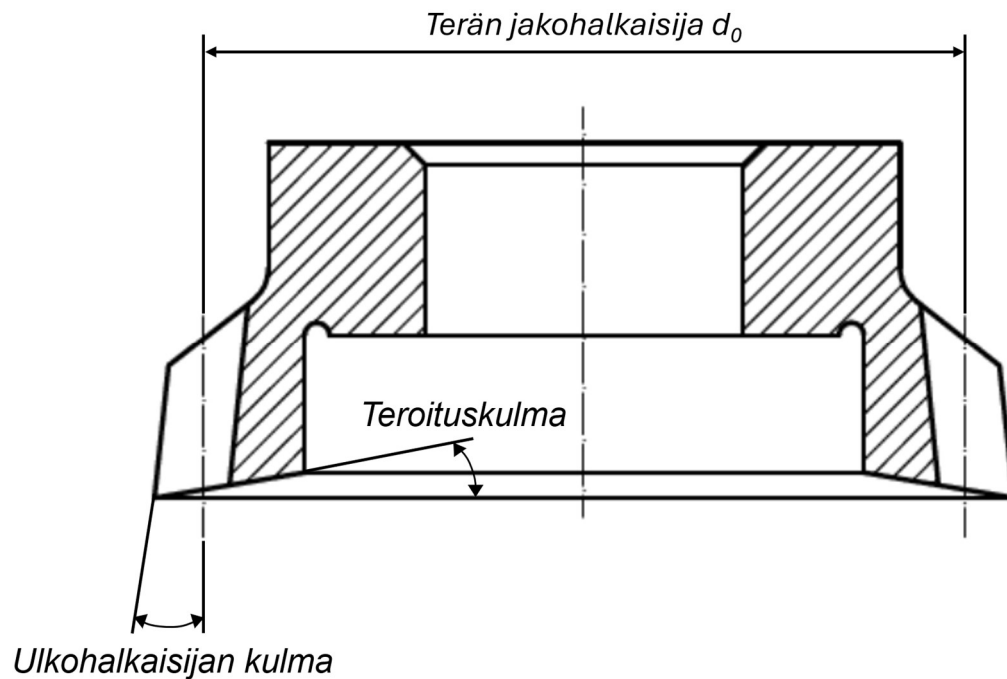
Vierintäpistossa terä tekee edestakaista ylös-alas liikettä samalla kun terä ja työkappale pyörivät keskenään synkronoidusti samalla tavalla kuin kaksi välykse-
töntä hammaspyörää pyörisivät keskenään. Leikkuuliikkeen aikana terä poistaa työkappaleeseen muodostuvasta hammasaukosta materiaalia. Ennen kun terä palautuu takaisin yläasentoon, tapahtuu terän nosto, jonka tarkoituksena on es-
tää terän leikkaavan särmän laahaaminen työkappaleen pinnalla paluuliikkeen
aikana. Terää nostetaan hieman irti työkappaleesta ja paluuliikkeellä terä palau-
tuu takaisin yläasentoon, jonka jälkeen leikkuuliike alkaa uudestaan. Työstön ai-
kana terää myös syötetään pikkuhiljaa syvemmälle työkappaleeseen, kunnes ha-
luttu hammasgeometria ja hammasvahvuus on saavutettu. Vierintäpiston työ-
kierto on monimutkainen, sillä siinä tapahtuu monta liikettä yhtäaikaaisesti.

Vierintäpistolla pystytään valmistamaan tarkkoja hammastuksia tietyin edellytyk-
sin. Terän täytyy olla hyvässä kunnossa ja etenkin teroitus tulee olla suoritettuna
oikein, sillä pienikin virhe terän hampaan profiilissa näkyy suoraan valmistetta-
vassa hammastuksessa epätarkkuutena (Norton 2020, 747). Lisäksi terän ja työ-
kappaleen samankeskisyys täytyy määrittää huolellisesti, jotta työkappale ja sii-
hen valmistettava hammastus olisivat mahdollisimman tarkasti saman keskeisiä.
Vierintäpistoterän muodon ja terän liikkeen ansiosta vierintäpistolla voidaan val-
mistaa ulkopuolisten hammastusten lisäksi myös sisäpuolisia hammastuksia, toi-
sin kuin vierintäjyrsinnällä. Sisä- ja ulkopuolisia hammastuksia voidaan tehdä
suora- ja vinohampaisina.

4.3.1 Vierintäpistoterä

Vierintäpistossa käytettävät hammastusterät (engl. pinion-type cutter) muistutta-
vat ulkonäöltään ja geometrialtaan ulkopuolista lieriöhammaspyörää. Terän ham-
paan kylki on evolventin muotoinen ja sillä täytyy olla sama moduuli, ryntökulma
ja vinouskulma, kuin valmistettavalla hammastuksella. Pistoterän geometrian
tunnukset ovat samoja kuin aiemmin määritetyn lieriöhammaspyörän (Kuva 3) ja
ne on erotettu toisistaan terän tunnusten perään lisätyn 0:n avulla. Terän tunnu-
sien arvot poikkeavat lieriöhammaspyörän tunnuksien arvoista samalla logiikalla,
kun luvussa 4.2.1 esitetyn vierintäjyrsinterän tunnukset poikkeavat perusprofii-
listä.

Vierintäpistoterän hampaiden etupinta ja ulkohalkaisija ovat asetettuna kulmaan, jotta sillä pystytään poistamaan materiaalia työkappaleesta. Näitä kulmia on kuvassa 13 nimitetty teroituskulmana ja ulkohalkaisijan kulmana.



KUVA 13. Leikkaus vierintäpistoterästä (Jelaska 2012, 40, muokattu).

Vierintäpistoterän valmistama geometria riippuu suuriltaosin sen hammasluvusta z_0 ja profiilinsiirtokerroimesta x_0 . Joka kerta kun vierintäpistoterää teroitetaan sen ulkohalkaisija ja hammasvahvuus jakohalkaisijalla pienenevät, mikä johtaa pienentyneeseen profiilinsiirtoon. Profiilinsiirtokerroin voi teroituksen takia mennä myös negatiiviseksi (Jelaska 2012, 74).

Jelaskan (2012) mukaan uusien pistoterien profiilinsiirtokerroin vaihtelee $x_0 = 0$ ja $x_0 = 1$ välillä. Pistoterillä missä on pienempi hammasluku, profiilinsiirtokerroin on uutena yleensä lähellä arvoa 0 ja vastaavasti suuremmilla hammasluvuilla profiilinsiirtokerroin uutena on lähempänä arvoa 1. (Jelaska 2012, 74.)

Sisäpuolisia hammastuksia valmistettaessa terän ja hammastuksen kokojen suhde täytyy olla sellainen, että vierintäpistoterällä mahdollista valmistamaan kyseinen hammastus. Tästä johtuen terän hammasluvun ja teroituksessa muuttuvan profiilinsiirtokerroimen takia vierintäpistoterän soveltuvuus tietyn hammastuksen valmistukseen täytyy yleensä tarkistaa tapauskohtaisesti.

4.4 Hammastusmenetelmien haasteita

Tässä luvussa käsitellään erilaisia vierintään perustuvien valmistusmenetelmien haasteita, jotka täytyy ottaa hammastuksen suunnittelussa, valmistuksessa ja terän valinnassa huomioon. Näitä haasteita käsitellään vain pintapuolisesti, eikä niiden takana olevaan laskentaan ole tässä paneuduttu tarkemmin.

Tyvileikkuu (engl. tooth root undercutting) on tilanne, jossa hammastusterän harjapyöritys ρ_{aP0} leikkaa vierintäliikkeen aikana valmistuvan hampaan evolventtia lähellä hampaan tyvihalkaisijaa (Jelaska 2012, 78–79). Tyvileikkuuta ei yleensä pidetä toivottavana, sillä se vähentää hammasvahvuutta hampaan tyvellä ja näin ollen hampaan kuormankestokykyä. Aiemmin luvussa 3.2.3 mainitulla hammaspyörän profiilinsiirrolla on suuri vaikutus tyvileikkuuseen. Positiivisella profiilinsiirrolla voidaan vähentää tyvileikkuuta.

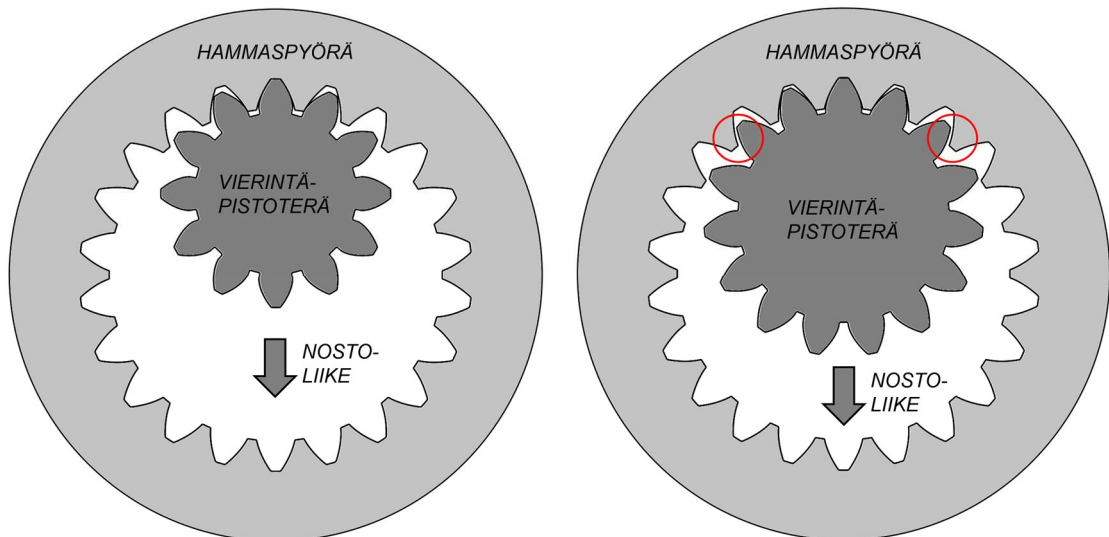
Harjaleikkuu (engl. overcutting the tooth addendum) on tilanne, jossa hammastusterän tyvipyöritys ρ_{fP0} leikkaa vierintäliikkeen aikana valmistuvan hampaan evolventtia lähellä hampaan harjaa vähentäen näin tehollista hampaan kyljen pinta-alaa (Jelaska 2012, 79). Harjaleikkuuta tapahtuu yleensä silloin kun hammastusterässä on suhteellisen iso tyvipyöritys ja hammastusterän tyvi menee lähelle valmistuvan hammaspyörän päähalkaisijaa työstön aikana. Tietyissä tilanteissa harjaleikkuu voi olla suotavaa, esimerkiksi jos hampaan harjalle oltaisiin muutenkin tekemässä harjaviisteet tai harjapyöritykset.

Terävä hampaan tyvi (engl. null fillet) on mahdollinen erityisesti sisäpuolisia hammastuksia valmistettaessa tilanteessa, jossa vierintäpistoterän hampaiden harjat ovat terävät, eli harjapyöritys $\rho_{aP0} = 0$ ja pistoterän hammasluku z_0 ja profiilinsiirtokerroin x_0 ovat lähellä valmistettavan hammastuksen hammaslukua z ja profiilinsiirtokerrointa x . Mitä lähempänä vierintäpistoterän ja valmistettavan hammastuksen hammasluvut ja profiilinsiirtokertoimet ovat, sitä pienempi on terän ja kappaleen välinen vierintäliike ja syntyvä tyvipyöritys. Jos kuitenkin $\rho_{aP0} \neq 0$, voidaan todeta, että hampaan tyvelle muodostuu aina vähintään terän harjapyörityksen suuruinen tyvipyöritys. (Jelaska 2012, 82–83.)

Kuvitteellisessa tilanteessa, jossa $z_0 = z$, $x_0 = x$ ja $\rho_{aP0} = 0$ valmistettavan hammastuksen tyvi valmistuu täysin teräväksi. Oikeasti tällaista tilannetta ei kuitenkaan pääse syntymään jo pelkästään työstön mahdottomuuden takia.

Terävä hampaan tyvi tai tyvi, jossa on vain hyvin pieni pyöristys ei ole missään normaalissa tapauksessa toivottu tilanne, sillä sinne kohdistuu kuormitustilanteessa todella suuria pistekuormituksia, mitkä aiheuttavat suurella todennäköisyydellä hampaan hajoamisen.

Radiaali interferenssi (engl. radial interference) on mahdollinen sisäpuolisia hammastuksia valmistettaessa eteen tuleva haaste tilanteessa, jossa vierintäpistoterää ollaan nostamassa hammasaukosta irti kohti hammaspyörän keskiakselia ja terä osuu valmiille hampaalle leikaten siitä osan pois (Jelaska 2012, 80). Tämä ilmiö on summa monesta eri asiasta, mutta yleisimmin sitä ilmenee silloin kun vierintäpistoterän profiilinsiirtokerroin x_0 ja hammasluku z_0 ovat liian suuria valmistettavan hammaspyörän kokoon nähden. Tätä radiaali interferenssiä on esitetty kuvassa 14.



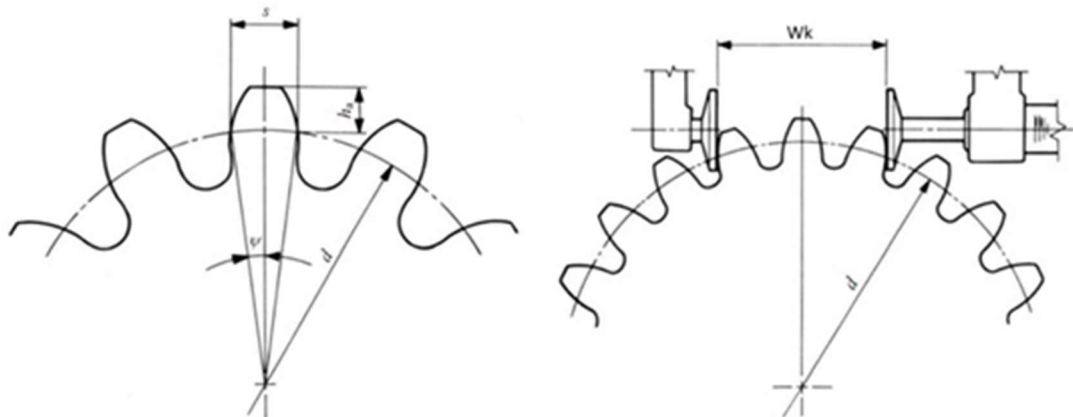
KUVA 14. Radiaali interferenssi.

Kuvassa 13 on vasemmalla puolella esitettyä tilannetta, jossa terä voidaan nostaa normaalisti irti työkappaleesta ilman, että se leikkaa valmiita hampaita. Kuvassa oikealla puolella on puolestaan esitettyä tilannetta, jossa terää ei voida nostaa pois

työkappaleesta, sillä se leikkaisi osan valmiista hammastuksesta. Kuvaan on korostettu punaisella värillä kohdat, joissa terä leikkaisi valmiita hampaita nostoliikkeen aikana.

4.5 Hammasvahvuuden mittaaminen

Hammasvahvuuden mittaaminen on tärkeä osa lieriöhammastusten valmistusprosessia. Lieriöhammaspyöräparin akseliväli on usein toleroitu hyvin tarkasti, mikä johtaa siihen, että muidenkin hammaspyörän mittojen täytyy asettua tiukoihin toleransseihin. Tällöin myös hammaspyörän hampaan vahvuus täytyy toleroida tarkasti, jotta hammaspyöräpari sopii yhteen eikä asennuksessa tule ongelmia. Kuvassa 15 on esitetty hampaan paksuuden mittaaminen yhdeltä hampaalta (vas.) ja hammasvälimittana (oik.). Hammasvahvuutta kuvataan usein tunnuksella s , tämä on mitta yhden hampaan paksuudesta ja se mitataan hammaspyörän jakohalkaisijalta. Hampaan paksuus voidaan mitata 3D-mittakoneella tai käyttäen erillistä hampaan paksuuden mittauslaitetta.

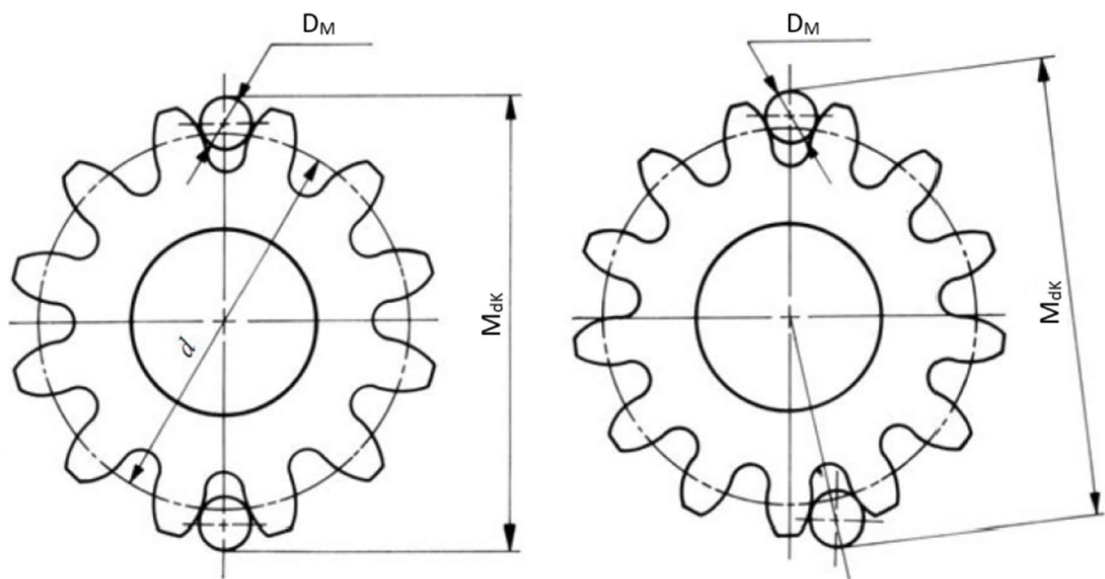


KUVA 15. Hammasvahvuus ja hammasvälimitta (KHK STOCK GEARS n.d., muokattu).

Yksittäisen hampaan paksuuden mittaaminen ilman erikoismittavälineitä on usein haastavaa ja sen takia on olemassa muitakin tapoja mitata hammaspyörän hampaan vahvuus. Yksi yleinen tapa on hammasvälimitta W_k , joka on esitetty kuvassa 15 oikealla. Hammasvälimitta kuvastaa kahden hampaan kylkeä tangeeraavan suoran välistä mitta k hampaan yli. Hammasvälimittaa mitataan yleensä

käyttäen lautaskärjillä varustettua mikrometriä. Mitatessa on tärkeää, että mikrometrin lautaskärjet osuvat hampaan profiilin evolventin osuudelle oikean mittaus tuloksen saavuttamiseksi.

Toinen yleinen tapa on kuulamitta M_{dk} , joka on esitetty kuvassa 16. Kuulamitta on ulkopuolisissa hammastuksissa suurin kahden toisistaan mahdollisimman kaukana olevaan hammasaukkoon asetetun kuulan yli oleva mitta ja sisäpuolisissa hammastuksissa pienin kahden toisistaan mahdollisimman kaukana olevaan hammasaukkoon asetetun kuulan välinen sisämitta (SFS-ISO 21771:2012).



KUVA 16. Kuulamitta parillisella ja parittomalla hammasluvulla (KHK STOCK GEARS, n.d., muokattu).

Mittaamisessa käytetään joko kuulia tai lieriötappeja ja niiden ulkohalkaisija D_M täytyy olla sopiva hammasaukkoon nähden siten, että se osuu hampaan profiilin evolventin osuudelle, eikä osu hammasaukon pohjaan hammaspyörän tyvihalkaisijalle. Ulkopuolista kuulamittaa voidaan mitata normaalilla mikrometrillä ja sisäpuolista kuulamittaa voidaan mitata reikämittakellolla.

5 TERIENHALLINTATYÖKALU

5.1 Terätietokanta

ATA:n lieriöhammastuksien valmistuksessa käytettyjen terien tietokanta löytyy Excel-tiedostosta (Liite 1). Tietokantaan terät on listattu välilehdille terätyyppien mukaan. Välilehdillä on tiedot sekä metrisistä, että tuumakokoisista vierintäpisteristä ja vierintäjyrsinteristä. Tietokantaan hammastusteristä on kirjattu kaikki perustiedot mitoista, geometriasta, standardeista ja terän kunnosta. Terätietokannasta löytyy erilaisia hammastusteriä yli 1000 kpl.

Opinnäytetyön alussa mietittiin mahdollisuutta terätietokannan siirtämiselle parempaan muotoon, sillä varsinkin isommilla datamäärillä Excel ei ole järkevin mahdollinen paikka terätietokannalle. Yhtenä vaihtoehtona pidettiin terätietokannan siirtämistä KISSsoftiin, tällöin terät olisivat olleet helpommin saatavilla terienhallintatyökalua varten. Tästä kumminkin luovuttiin, sillä tietojen siirto olisi vaatinut paljon työtä ja tämän opinnäytetyön puitteissa siihen ei haluttu ryhtyä. Työn aikana kävi myös selväksi, että KISSsoftia on mahdollista ohjata Excelin kautta käyttäen KISSsoftiin sisäänrakennettua COM-käyttöliittymää. Tällä tavalla terätietoja voidaan syöttää Excelistä ohjelmallisesti suoraan KISSsoftiin, eikä itse terätietokannalle tarvitse näin ollen tehdä muutoksia.

5.2 KISSsoft

KISSsoft (Liite 2) on modulaarinen laskentaohjelma erilaisten koneenosien, kuten hammaspyörien, akseleiden, laakereiden ja muiden voimansiirtokomponenttien suunnitteluun, optimointiin ja valmistukseen. Sen avulla pystytään mallintamaan yksittäisestä komponentista aina kokonaiseen vaihteistoon asti. KISSsoft tarjoaa erilaisia analyysejä ja visuaalisia esityksiä, jotka helpottavat suunnitteluprosessia merkittävästi. (KISSsoft n.d.)

ATA:ssa KISSsoftia käytetään pääasiassa hammaspyörien ja uritusten lujuus- ja geometrialaskentaan. KISSsoft tuntee kaikki yleisimmät hammasgeometriastandardit, mikä auttaa myös hammastuksen valmistuksen suunnittelussa. Tämän opinnäytetyön tuloksena syntyneessä terienhallintatyökalussa käytetään myös KISSsoftia hammasgeometrioiden laskentaan ja validointiin.

5.3 Kriteerit

Projektin alussa terienhallintatyökalulle asetettiin tietyt kriteerit, joiden tulisi täytyä, jotta työkalu soveltuisi vierintäpisto- ja vierintäjäysinterien ja niiden valmistamien hammasgeometrioiden hallinnointiin. Työkalun tulisi olla:

- **Helppokäyttöinen**, jotta henkilö, joka ei omaa syvällistä ymmärrystä lieriöhammaspyörägeometriasta ja eri standardeista pystyy käyttämään työkalua ongelmitta.
- **Yksinkertainen**, jotta työkalun käyttöön ei tarvitse erillistä koulutusta ja sen käyttäminen onnistuu helposti ja luontevasti.
- **Luotettava**, jotta työkalun antamiin tuloksiin voidaan luottaa ja niiden perusteella voidaan tehdä oikeita terävalintoja.

Näiden kriteerien perusteella lähdettiin toteuttamaan terienhallintatyökalua ja sen ohjelmointia. Terienhallintatyökalun on tarkoitus auttaa myyntiosastoa varmistamaan jo kappaleen tarjousvaiheessa mahdollisen lieriöhammastuksen valmistukseen soveltuvan terän löytyminen, teräostajalle terien hankintaan ja ylläpitoon, suunnitteluosastolle lieriöhammastuksen valmistuksen suunnitteluun ja vers- taalle koneistajalle hammastuksen valmistamisen kannalta parhaan terän valitsemiseen.

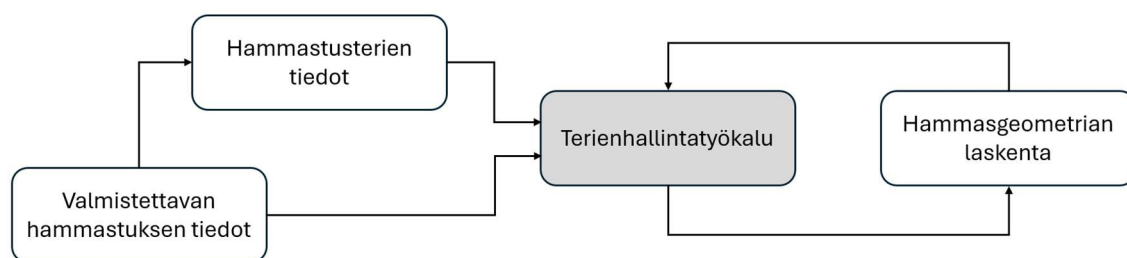
5.4 Toteutus

Terienhallintatyökalun ohjelmoinnissa käytettiin apuna ATA:n omaa tekoälyohjelmaa, joka hyödyntää opinnäytetyön tekohetkellä OpenAI:n kehittämää GPT-4 tekoälymallia. Tekoälyä käytettiin ohjelmoinnissa apuna koodin rakentamiseen,

vianetsintään ja korjaamiseen. Kaikki tekoälyn tuottama koodi on tarkastettu ja ymmärretty opinnäytetyön tekijän toimesta.

Terienhallintatyökalun ohjelmointi suoritettiin Exceliin sisäänrakennetussa VBA-ohjelmointiympäristössä. VBA eli Visual Basic on Microsoftin kehittämä ohjelmointikieli, joka soveltuu erityisen hyvin Microsoftin Office tuoteperheen ohjelmien ohjaukseen. VBA:lla pystytään ohjaamaan Office ympäristössä lähes kaikkea mitä normaalisti ohjattaisiin käyttäen hiirtä ja näppäimistöä ja tästä syystä se onkin loistava työkalu toistuvien tehtävien automatisointiin. (Microsoft n.d.)

Terienhallintatyökalun hammasgeometrialaskennassa käytetään KISSsoft-laskentaohjelmaa, jota ohjataan Excelin kautta hyödyntäen KISSsoftin COM-käyttöliittymän ominaisuuksia. Terienhallintatyökaluun syötettyjä arvoja pystytään viemään suoraan KISSsoftiin ja niiden arvojen perusteella lasketut tulokset voidaan tuoda takaisin terienhallintatyökaluun käyttäjän nähtäville. Kuvassa 17 on esitetty terienhallintatyökalun toimintaperiaate.



KUVA 17. Terienhallintatyökalun toimintaperiaate.

Terienhallintatyökalun toimintaperiaatteena on, että käyttäjä syöttää valmistettavan hammastuksen perustiedot kuten esimerkiksi moduulin, hammasluvun, rynnökulman, profiilinsiirtokertoimen, päähalkaisijan, hammasvahvuuden ja niin edelleen. Näiden tietojen perusteella yrityksen Excel-terätietokannasta haetaan kaikki teoreettisesti sopivat hammastusterät ja niiden tiedot. Kun valmistettavan hammastuksen tiedot ja terien tiedot on hankittu, terienhallintatyökalu laskee jokaisen teoreettisesti sopivan hammastusterän valmistaman hammasgeometrian KISSsoftin avulla ja määrittää käyttäjän määrittämällä ehdoilla valmistuksen kannalta sopivimmat terät. Valmistuksen kannalta sopivimmat terät näytetään käyttäjälle listana siten, että siitä pystyy nopealla silmäyksellä katsomaan sopivat terät ja niiden tiedot. Jos sopivia teriä ei löydy, näytetään sekin selkeästi käyttäjälle

siten, että jokaisen terän kohdalla on selitys miksi kyseinen terä ei sovellu kyseisen hammastuksen valmistukseen. Näin ollen käyttäjän on helppo ja nopea tarkastaa terät, eikä mitään jää arvailujen varaan.

5.4.1 Terien esisuodatus

Terien esisuodatuksen ideana on hakea ATA:n Excel-terätietokannasta kaikki teoreettisesti sopivat hammastusterät käyttäjän määrittämän hammastuksen valmistukseen. Terävalinnan kannalta kaksi tärkeintä parametriä ovat moduuli ja ryntökulma. Hammastuksella ja hammastusta valmistavalla terällä nämä täytyy olla samat. Toinen tärkeä tieto on hammastuksen hammasluku ja tieto onko hammas sisä- vai ulkopuolinen. Sisäpuolisia hammastuksia pystytään valmistamaan ainoastaan vierintäpistomenetelmällä ja vierintäpistoterillä, joiden hammasluku on pienempi kuin hammastuksen hammasluku. Todellisuudessa tämä ei vielä riitä, sillä terän käyttökelpoisuus riippuu suuriltaosin terän ja valmistettavan hammastuksen kokojen suhteesta. Vierintäpistoterä ei saa olla liian suuri, suhteessa valmistettavaan hammastukseen. Ulkopuolisia hammastuksia tehdään pääasiassa vierintäjäyrsimällä, mutta niitä voidaan tehdä myös tarvittaessa vierintäpistolla. Ulkopuolisen hammastuksen hammasluvulla (ja terän suuruudella) ei ole valmistuksen kannalta merkitystä samalla tavalla kuin sisäpuolisessa hammastuksessa. Ainoa vierintäjäyrsinterän kokoa rajoittava tekijä voi olla joku valmistettavan hammastuksen viereinen piirre, mikä rajoittaa vierintäjäyrsinterän ulkohalkaisijan kokoa. Näiden kriteerien perusteella terienhallintatyökalun tulisi näyttää kaikki hammastuksen valmistukseen potentiaalisesti sopivat terät.

ATA:ssa ei opinnäytetyön tekohetkellä ole käytössä yhtään vinohampaisten hammastusten valmistukseen tarkoitettuja vierintäpistoteriä ja tämän takia terän vinouskulmaa β_0 ei oteta huomioon terien esisuodatuksessa. Jos yrityksessä olisi tällaisia teriä ja vinohampaisia sisäpuolisia hammastuksia valmistettaisiin, täytyisi vinouskulma ottaa myös huomioon terien esisuodatuksessa, sillä vierintäpistoterällä täytyy olla sama vinouskulma valmistettavan hammastuksen kanssa.

5.4.2 Hammasgeometrialaskenta ja sopivien terien määrittäminen

Kun terien esisuodatus on tehty ja kaikki hammastuksen valmistukseen teoreettisesti sopivat terät on saatu määritettyä, täytyy jokaiselle terälle laskea oma hammasgeometrialaskelma. Tämä laskelma kertoo millaisen hammasgeometrian kyseinen terä valmistaa ja tämän laskelman perusteella pystytään päättämään, onko valmistunut hammasgeometria halutunlainen ja soveltuva asiakkaan käyttökohteeseen.

Tässä työssä haluttiin keskittyä erityisesti hammaspyörään valmistuvan tyvihalkaisijan d_f ja tyvenmuotohalkaisijan d_{Ff} tarkastamiseen. ATA:ssa usein valmistetaan lieriöhammaspyöriä yksittäiskappaleina ilman tarkkoja tietoja vastahammaspyörästä. Tällöin on tärkeää varmistaa, että ATA:n valmistaman hammaspyörän hammasaukon pohjalle jää riittävästi tilaa, jotta vastahammaspyörän hampaan harja ei osu sinne.

Toinen tärkeä tieto sopivien terien määrittämisessä on erilaisten luvussa 3.4 määritettyjen hammastusmenetelmien haasteiden löytäminen. Terä ei tietenkään sovellu hammastuksen valmistukseen, jos tällaisia haasteita ilmenee. Nämä valmistuksen haasteet otetaan KISSsoftissa huomioon ja niistä aiheutuvat virheilmoitukset tuodaan terienhallintatyökaluun käyttäjän nähtäville. Näin pystytään varmistamaan, että sellaista terää ei valita, jonka valmistamassa geometriassa on tällaisia virheilmoituksia.

Kun jokaisen terän valmistama hammasgeometria on laskettu ja KISSsoft virheilmoitukset tarkastettu, terät värjätään osoittamaan niiden käyttökelpoisuutta. Terienhallintatyökalu haluttiin pitää yksinkertaisena ja näin ollen päädyttiin kolmeen eri väriin. Terä saa värin:

- **Punainen**, jos terä ei sovellu kyseisen hammastuksen valmistukseen. Tällaisia tilanteita voi olla esimerkiksi, jos terä leikkaa hammastuksen päähalkaisijaa, terän nosto irti hammastuksesta ei ole mahdollista, terän valmistama tyvihalkaisija ei ole halutunlainen tai terän tiedoissa on jotain puutteita.

- **Oranssi**, jos terä on ns. ”epävarma” ja vaatii syvällisempää tarkastelua. Esim. terä menee läheltä hammastuksen päähalkaisijaa tai terä valmistaa teräväharjaisen hampaan.
- **Vihreä**, jos terä soveltuu hammastuksen valmistukseen käyttäjän määrittämien kriteerien mukaisesti.

Näiden värikoodien avulla Terienhallintatyökalun käyttäjän on helppo tarkastaa yhdellä silmäyksellä soveltuvat terät. Värikoodit varmistavat sen, että käyttäjä, joka ei omaa syvällistä ymmärrystä lieriöhammaspyörägeometriasta pystyy käyttämään työkalua eikä hänen tarvitse osata tulkita terän valmistaman geometrian arvoja. Terävalinnan kannalta riittää, kun katsoo vain terän värin. Teränhallintatyökalun tarkoituksena on siis esittää käyttäjälle yhdellä silmäyksellä kaikki tietyn hammastuksen valmistukseen soveltuvat terät ja tällä tavoin vähentää turhaa manuaalista työtä yksittäisten terien tarkastamisessa ja virheen mahdollisuutta terän valinnassa.

6 TULOKSET

Tämän opinnäytetyön tuloksena yrityksen käyttöön syntyi käyttökelpoinen terienhallintatyökalu (Liite 3). Työkalu toteuttaa kaikki projektin alussa sille määritetyt vaatimukset ja sen avulla käyttäjä pystyy nopeasti ja helposti tarkastamaan hammastuksen valmistettavuuden terien osalta. Kuvassa 18 on esitetty terienhallintatyökalun käyttöliittymä johon käyttäjä voi syöttää valmistettavan hammastuksen tiedot. Käyttäjän syöttämien tietojen perusteella terienhallintatyökalulla pystytään esisuodattamaan kaikki teoreettisesti valmistukseen sopivat terät ja määrittämään esisuodatetuista teristä sopivat terät hammastuksen valmistukseen. Lisäksi käyttöliittymässä on nappi, jolla voidaan laskea standardin mukainen hammastuksen tyvihalkaisija, jos se ei ole käyttäjällä tiedossa.

Hammastuksen tiedot			
Standardi	DIN 5480 kytki ohj.		
Ulkop. vai sisäp. hammas?	SISÄPUOLINEN		
Normaalimoduuli	mn	3,00	
Diametral pitch	DP		
Hammasluku	z	28	
Ryöntökulma	alpha	30,0	
Prof.siirtokerroin	x*	-0,4500	
Hammasleveys	b	90,0	
Päähalkaisija	da	84,000	
Tyvihalkaisija	df	92,000	90,600 max/min
Tyvenmuotohalk.	dFf	91,000	90,300 max/min
Tyvipyöritys	pf		max/min
Vier.jyrs. ulkohalk.	da0_max		

Terien esisuodatus

Laske standardin mukainen tyvihalkaisija

Kuulamitta		Hammasvälimitta	
MdK_max		Wk_max	50,498
MdK_min		Wk_min	50,266
DM		k	6

Hammasvahvuus		Hammasvah. tol.	
sc_max		Asn_max	
sc_min		Asn_min	

KUVA 18. Käyttäjän syöttämät hammastuksen tiedot.

Terienhallintatyökalun käyttöliittymä haluttiin pitää mahdollisimman yksinkertaisena, jotta kynnyks sen käyttämiselle olisi mahdollisimman pieni. Terienhallintatyökaluun pystytään syöttämään vain ne tiedot, jotka ovat välttämättömiä terien suodatuksen ja hammasgeometrialaskennan kannalta.

Alla kuvassa 19 on esitetty näkymä, joka aukeaa, kun tarvittavat hammastuksen tiedot on täytetty, terien esisuodatus suoritettu ja hammasgeometrialaskelmat laskettu. Näkymässä jokaisella rivillä on yhden terän tiedot ja kyseisen terän tiedoilla lasketun valmistuvan hammasgeometrian arvot. Lasketun hammasgeometrian arvoista näkyvillä on päähalkaisija, tyvihalkaisija, tyven muotohalkaisija ja tyvipyöristyksen säde. Kaikista arvoista on näkyvillä niiden maksimi ja minimi, mitkä riippuvat käyttäjän syöttämisestä hammasvahuuden toleransseista.

Kommentit	Päähalkaisija		Tyvihalkaisija		Tyvenmuotohalk.		Pienin tyvipyöristys		yksiö nro	DP	moduuli m.0	ryntäkulm. pääkort.		tyvifor.	kok. kork. h. PO*	geometrii. harjajäyr. harjajäiste standardi rho. aPO* h. k	terävä harja?	tyvävarat. lines?	topping/ semi-top	
	da_max	da_min	df_max	df_min	dff_max	dff_min	pf_min.a	pf_min.i				alpha 0	h. aPO*							
	82,1835	81,7195	90,5938	90,2286	89,6113	89,2769			199	0,46567	3	30	0,65	0,776	1,426	DIN 5480	0,4	x		
Topping/semitoppingterät	82,5629	82,0989	91,8806	91,6802	91,5679	91,3322			264	0,46567	3	30	0,65	0,65					x	x
	82,4939	82,0299	91,0833	90,6751	91,0133	90,5835			340	0,46567	3	30	0,65	0,68	1,45					
	81,822	81,358	91,1513	90,7429	90,8954	90,4661			200	0,46567	3	30	0,65	0,918	1,558	DIN 5480 0,1				x
	82,0724	81,6084	90,5499	90,4028	90,4247	90,3952			80	0,46567	3	30	0,65	0,8334	1,4894	DIN 5480	0,2	x		
	81,642	80,578	91,0026	90,6	90,602	90,1873			87	0,46567	3	30	0,65	1,025	1,675	DIN 5480 0,16				x
	82,0775	81,6135	90,9658	90,5846	90,3712	90,9614			1	0,46567	3	30	0,65	0,85	1,5	DIN 5480	0,3	x		
	81,6575	81,2035	91,1885	90,7726	90,915	90,4966			201	0,46567	3	30	0,65	0,948	1,598	DIN 5480 0,1				x
	82,1327	81,6687	91,1999	90,7813	90,7807	90,3308			563	0,46567	3	30	0,65	0,87	1,52	DIN 5480 0,16				x
Terän hPO ei tiedossa, laskentaa ei suoritettu!									817	0,46567	3	30	0,65							x
	82,0844	81,6204	91,1932	90,7761	90,9167	90,469			190	0,46567	3	30	0,65	0,879	1,529	DIN 5480 0,1				x
	83,2295	82,7655	90,5459	90,1596	90,543	90,1437			85	0,46567	3	30	0,57	0,666	1,236	DIN 5480				x
Terä osuu hammastuksen harjalle! (0,475mm / 0,247mm)	84,9584	84,4944	91,1932	90,7761	90,779	90,3314			570	0,46567	3	30	0,65	0,92	1,57	DIN 5480 0,16				x
	81,6513	81,1873	91,1977	90,7796	90,7799	90,3311			564	0,46567	3	30	0,65	0,95	1,60	DIN 5480 0,16				x
Terän hPO ei tiedossa, laskentaa ei suoritettu!									819	0,46567	3	30	0,65							x
	82,3024	81,8384	90,8632	90,5007	90,4573	90,0937			18	0,46567	3	30	0,65	0,8	1,45	DIN 5480	0,2	x		
	82,2599	81,7959	91,1954	90,7779	90,779	90,3314			596	0,46567	3	30	0,65	0,85	1,50	DIN 5480 0,16				x
Tyvävarallinen terät	82,0767	81,6127	91,1999	90,7813	90,9168	90,4676			188	0,46567	3	30	0,65	0,881	1,531	DIN 5480 0,1				x
	81,8127	81,3487	91,1999	90,7813	90,7807	90,3308			565	0,46567	3	30	0,65	0,92	1,58	DIN 5480 0,16				x
Tooth thickness, 0,5100 mm	79,8102	79,3462	90,0241	90,2331	90,6214	90,2208			12	0,46567	3	30	0,59	1,23	1,82	DIN 5480				x
	81,6054	81,1414	91,2043	90,7846	90,7822	90,3299			571	0,46567	3	30	0,65	0,96	1,61	DIN 5480 0,16				x
	81,8054	81,3414	91,2043	90,7846	90,7822	90,3299			607	0,46567	3	30	0,65	0,93	1,58	DIN 5480 0,16				x
	80,1186	79,6546	90,5866	90,1935	90,5843	90,1886			11	0,46567	3	30	0,58	1,1818	1,7618	DIN 5480				x
	82,1907	81,7267	91,0321	90,6362	91,0251	90,6205			77	0,46567	3	30	0,65	0,84	1,49	DIN 5480				x
	83,2865	82,8225	90,0225	90,2145	90,508	90,1721			15	0,46567	3	30	0,569	0,67	1,236	DIN 5480				x
	81,9828	81,5188	90,8711	90,4834	90,35	89,9672			818	0,46567	3	30	0,65	0,85	1,5				0,2	x
	81,5544	81,0904	90,5157	90,1034	90,43	89,9966			147	0,46567	3	30	0,653	0,953	1,596	DIN 5480				x
	82,1287	81,6647	91,0454	90,6388	90,7004	90,336			17	0,46567	3	30	0,65	0,85	1,5	DIN 5480 0,1				x
	82,1691	81,7051	90,9572	90,5686	90,1499	89,7699			83	0,46567	3	30	0,65	0,833	1,493	DIN 5480	0,4	x		
Radial feed of the pinion type cutter not possible in the manufacturing	81,0867	80,6227	90,3915	90,0049	90,136	89,6572			34	0,46567	3	30	0,65	0,942	1,592	DIN 5480	0,4	x		
	82,5536	82,0896	90,9192	90,5318	90,1932	89,727			35	0,46567	3	30	0,65	0,881	1,4134	DIN 5480	0,4	x		
	80,1047	79,6407	90,9085	90,524	90,7792	90,3985			31	0,46567	3	30	0,65	1,17	1,82	DIN 5480 0,05				x
	83,2956	82,8316	90,6196	90,2154	90,6944	90,1865			145	0,46567	3	30	0,57	0,665	1,235	DIN 5480				x
	82,9199	82,4559	91,035	90,6294	90,5886	90,1678			536	0,46567	3	30	0,65	0,72	1,37	DIN 5480	0,2	x		
	82,1287	81,6647	91,0454	90,6388	90,4029	89,9816			2	0,46567	3	30	0,65	0,85	1,5	DIN 5480	0,3	x		
	81,5354	81,0714	91,0533	90,6458	90,216	89,7946			159	0,46567	3	30	0,65	0,85	1,6	DIN 5480	0,4	x		
Roll touches the root circle. Wrong dimensions if the roll is not flattened!	81,0871	80,6231	90,2381	89,8487	90,2317	89,8445			590	0,46567	3	30	0,55	0,99	1,54					x
	82,9676	82,5036	91,0323	90,627	90,1828	89,766			532	0,46567	3	30	0,65	0,71	1,36	DIN 5480 0,34				x
Terän hPO ei tiedossa, laskentaa ei suoritettu!									816	0,46567	3	30	0,65							x
	82,9419	82,4779	91,035	90,6294	90,6231	90,202			84	0,46567	3	30	0,65	0,713	1,363	DIN 5480 0,38				x
	81,5763	81,1123	90,9572	90,5686	90,1499	89,7699			7	0,46567	3	30	0,65	0,9318	1,5818	DIN 5480	0,4	x		
Terän x0 ei tiedossa, laskentaa ei suoritettu!									600	0,46567	3	30	0,65	0,71	1,36	DIN 5480	0,3	x		
	81,3863	80,9223	90,6793	90,3098	90,6009	90,2513			87	0,46567	3	30	0,65	0,922	1,572	DIN 5480				x

KUVA 19. Terienhallintatyökalun esimerkki tulos.

Kuvassa vasemmalla näkyy kommentit ja valmistuvan hammasgeometrian arvot. Niiden värit määrittävät käyttäjän syöttämien tietojen ja ohjelman sisäisen logiikan mukaisesti kuvastamaan arvojen sopivuutta valmistettavaan hammastukseen nähden. Kuvassa oikealla näkyy hammastusterät, joiden rivit ovat värjätty aiemmin määritettyjen ehtojen mukaisesti. Terän rivin väriä katsomalla käyttäjä pystyy tulkitsemaan terän käyttökelpoisuutta hammastuksen valmistukseen.

Kokonaisuudessaan terienhallintatyökalu soveltuu hyvin terien valmistamien hammasgeometrioiden validointiin. Se on erityisen hyödyllinen silloin kun valmistukseen potentiaalisesti sopivia teriä on paljon. Työkalun avulla terien tarkastukseen menee aikaa muutama minuutti. Aiemmin saman tuloksen saamiseksi jokainen terä on pitänyt käydä yksitellen läpi, ja tämä on ollut todella työlästä ja

aikaa vievää. Todellisuudessa näin ei ole kumminkaan toimittu, vaan terä on yleensä valittu käyttäen ”parasta arvausta”. Usein tämä on riittävä, mutta joskus saattaa tulla tilanne vastaan, jolloin valitaankin väärä terä ja kappale joudutaan romuttamaan sen takia. Uusi terienhallintatyökalu helpottaa ja nopeuttaa prosessia todella paljon ja jatkossa terien hallinta tulee olemaan paremmalla tasolla yrityksen sisällä.

7 POHDINTA

Opinnäytetyön päätavoitteet saavutettiin hyvin ja terienhallintatyökalu saatiin valmiiksi. Ajan puutteen ja muutaman ylimääräisen haasteen ilmetessä työkalun lopullista käyttöönottoa ei keretty suorittamaan loppuun opinnäytetyön aikana. Terienhallintatyökalua kerrettiin testaamaan pienellä porukalla ja näissä testeissä se toimi hyvin. Koko käyttäjäkunnalle järjestettävää käyttöönottoa ennen täytyy kuitenkin vielä ratkaista muutama haaste KISSsoftiin liittyen. Kaikilla tämän työkalun tulevilla käyttäjillä ei ole KISSsoftia asennettuna tietokoneella, eikä sitä mielellään halutakaan asentaa kaikille. Kuitenkin terienhallintatyökalun käyttäminen edellyttää pääsyä KISSsoftiin jollain tavalla. Ideana on mahdollisesti muodostaa KISSsoftin käyttö etätyöpöydän kautta, jolloin KISSsoftia ei tarvitsisi olla ladattuna käyttäjän koneelle vaan sitä voisi käyttää etätietokoneelta.

Tulevaisuudessa terienhallintatyökalua tullaan kehittämään vielä eteenpäin. Kun terienhallintatyökalu saadaan käyttöön koko yrityksessä, tulee siihen varmasti vielä muutoksia ja parannuksia käyttäjäpalautteen perusteella. Terienhallintatyökalun ohjelmointi on toteutettu siten, että muutosten tekeminen olisi mahdollisimman helppoa. Yksi mahdollinen kehityskohde tulevaisuudessa tulee olemaan terien tyvipyöristysten mittaaminen ja lisääminen terätietokantaan. Tämän avulla pystyttäisiin havainnoimaan mahdollinen harjaleikkaus, mikä tapahtuu silloin kun terän tyvipyöristys leikkaa valmista hammasprofiilia lähellä hampaan harjaa. Tällä hetkellä tätä ei huomioida terienhallintatyökalussa, koska terien tyvipyöristyksiä ei ole merkattu terätietokantaan.

Terienhallintatyökalun toimivuutta ja luotettavuutta heikentää yksi epäkohta, joka liittyy yrityksen terätietokantaan. Tällä hetkellä joissakin ATA:n Excel-terätietokantaan syötetyissä terien parametreissa on epävarmuutta niiden oikeellisuudesta. Terien mitat on yleensä mitattu käsimitavälineillä mikä aiheuttaa epätarkkuutta mittaustuloksiin. Joitakin terän mittoja on myös hyvin hankala mitata perinteisillä välineillä ja joskus terätietokantaan on syötetty vain paras arvio kyseisestä mitasta. Terienhallintatyökalun luotettavuuden kannalta tämä on tietenkin iso riski, jos terätietokantaan syötetyt terien tiedot eivät välttämättä vastaakaan todellisuutta. Tämä asia tiedostettiin jo projektin alussa ja silloin päätettiin, että ei

sotketa terätietokannassa olevien terien mittojen validointia tähän projektiin. Terien mittojen validointi ja päivittäminen tulee olemaan oma projektinsa tulevaisuudessa.

Opinnäytetyön tekijällä ei ollut ennen tätä projektia juurikaan kokemusta ohjelmoinnista, ainoastaan yksi kurssi C++ ohjelmointikielellä. Tästä syystä tekoälyn hyödyntäminen koodauksessa oli yksi suurimmista projektin mahdollistavista tekijöistä. Viimevuosina tekoäly on ottanut valtavia harppauksia eteenpäin ja nykypäivänä sen avulla lähes kuka tahansa pystyy tuottamaan toimivaa koodia. Tienkään pelkästään tekoälyn varaan ohjelmointia ei voi jättää, ohjelmoijan täytyy myös itse ymmärtää mitä koodissa tapahtuu ja kuinka se toimii. Jokainen tekoälyn tuottama koodirivi täytyy käydä läpi ja tarkastaa mahdollisten virheiden varalta. Tämä vaatii ohjelmoijalta perustason käsitystä koodauksesta ja eri koodirakenteista.

LÄHTEET

Ata Gears Oy. n.d. Verkkosivu. Viitattu 24.4.2025. <https://atagears.fi/>

Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., Martikka, H., Miettinen, J., Ranta, A., Rinkinen, J., Salonen, P. 2014. Koneenosien suunnittelu. (6. painos). Sanoma Pro Oy.

Hameed, S., Junejo, F., Amin, I., Qureshi, A., Tanoli, I. 2023. An Intelligent Deep Learning Technique for Predicting Hobbing Tool Wear Based on Gear Hobbing Using Real-Time Monitoring Data. Energies (Basel).

Huda, Z. 2021. Machining Processes and Machines - Fundamentals, Analysis & Calculations. (1st ed.). CRC Press.

Jelaska, D. T. 2012. Gears and Gear Drives, John Wiley & Sons, Incorporated.

KHK STOCK GEARS. n.d. Tooth Thickness. Verkkosivu. Viitattu 25.3.2025. https://khkgears.net/new/gear_knowledge/gear_technical_reference/tooth-thickness.html

KISSsoft. n.d. Verkkosivu. Viitattu 21.3.2025. <https://www.kisssoft.com/en/products/product-overview/kisssoft-elements>

LIEBHERR. 2003. Koulutusmateriaali. Ata Gears Oy.

Microsoft. n.d. Getting started with VBA in Office. Verkkosivu. Viitattu 21.3.2025 <https://learn.microsoft.com/en-us/office/vba/library-reference/concepts/getting-started-with-vba-in-office>

Norton, R. L. 2020. Machine Design - An Integrated Approach. (6th ed.). Pearson Education.

SFS-ISO 53. 2012. Lieriöhammaspyörät yleiseen ja raskaaseen käyttöön. Perusprofiili. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Viitattu 28.4.2025. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/ISO/ID2/5/406377.html.stx>

SFS-ISO 21771. 2012. Hammaspyörät. Lieriöhammaspyörät ja -hammaspyöräparit. Käsitteet ja geometria. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Viitattu 28.4.2025. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/ISO/ID2/2/990189.html.stx>

Liite 1. Excel-terätietokanta.

AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AS	AT	AU	AV
2	tyyppi	terän	kiinnitys				terän							
3	d_ao_enti	iskuri	reikä tai MK	Valmistaja	Toimittaja	Q	standardi		Kunto	Stajanti	Lainassa	Huollossa		Muut havainnot
4	varsi	MK 2	MK 2	Tay Tool				5010018	hyvä	43				Terän merkinnät Tay tool works LTD West Bromwich 1 MOD 30° P.A. Steeth D+H 0486 to cut 10 INT. Terä todella pieni
5	varsi	20,69	MK 2	Lorenz				5010019	tydyttävä	43				LORENZ 500 512565 306-325 m1,25 a30° z16 haP0 0,65mm DIN 5480
6	varsi	13,32	MK 2	Lorenz				5010020	hyvä	43				LORENZ 500 512551 021-040 m1,25 a30° z10 haP0 0,65 DIN 5480
7	varsi	13,32	MK 2	Lorenz				5010020	hyvä	43				LORENZ 512551 021-040 m1,25 30° z10 DIN 5480 (osaista merkintöjä ei saa selvää)
8	kuppi	77,7	31,75	Sampuntensili	PTK			5010154	hyvä	43				A1700907.10 N.1 FWEG023653 N.M.1.5 P.A.20° N.T. 50 BP II DIN 3972 S390 SU
9	kuppi	62,67	31,75					5009752	hyvä					MOD 1.5 420° Z40 HKW1.25M FERTIGER
10	kiekko	62,54	31,75					5009753	hyvä					MOD 1.5 420° Z40 HKW 1,25M FERTIGER G N°3880/1
11	kiekko	75,71	31,75	Gleason				5010048	hyvä	43				Gleason Isoform TL# SM37-150-3-PM 2597800-000-02 M4PM 1,5 MODULE 37°30' NPA 50 TEETH WD 0,09679 B DI/
12	kuppi		20					PUUTTUU	hyvä					m=1,5875 a=45° z=24
13	kuppi		20					PUUTTUU	hyvä					Erikoisterä/Atalan Lorenz
14	kuppi		20					PUUTTUU	hyvä					Erikoisterä/Atalan Lorenz
15	kuppi		20					PUUTTUU	hyvä					Erikoisterä/Atalan Lorenz
16	varsi	30,35	MK 4	Lorenz				5010096	hyvä	43				LORENZ 530 981678 001 m1,5875 a45° z18 haP0 0,67mm Mercedes Benz Sporttechn DP 16
17	varsi	30,35	MK 4	Lorenz				5010096	hyvä	43				LORENZ 530 981678 001 m1,5875 e45° z18 haP0 0,67mm Mercedes Benz Sporttechn DP 16
18	kuppi	161,5	44,45	Lorenz				5009760	Hyvä					LORENZ 680 42287A 001-003 002 PzO 2302.472 mml.75 an20° z87 hap0 1,13mm E HUOM: Power skiving työkalu
19	kuppi	161,6	44,45	Lorenz				5009758	Hyvä					LORENZ 680 42287A 001-003 001 PzO 2302.472 mml.75 an20° z87 hap0 1,13mm E HUOM: Power skiving työkalu
20	kuppi	161,31	44,45	Lorenz				5009759	Hyvä					LORENZ 680 42287A 001-003 003 PzO 2302.472 mml.75 an20° z87 hap0 1,13mm E HUOM: Power skiving työkalu
21	kuppi	78,67	31,75					5009751	hyvä					m1,75 z43 20°
22	varsi	20,12	MK 4					5010055	hyvä	43				Z=12 m=1,75 a=30° z0.12.81 T-1766 DIN 5482
23	kiekko	107,07	31,75	Sampuntensili				5010149	hyvä	43				A1700907.20 N.1 FWEG023656 N.M.1.75 P.A.20° N.T. 60 Bp II DIN 3972 S390 SU
24	kiekko	76,8	31,75	MICO				5009750	tydyttävä					MICO HEROS HS.55K 41. 2.82 mod.2 30° Z.38 DIN5480 hk.v. 0,65m 1
25	kuppi	126,75	44,45	MICO				5009741	Hyvä					MICO MADE IN BELGIUM M2-20°-Z62 DIN3972 BP11 10530.2 2
26	kuppi	80,18	31,75					5009748	tydyttävä					M2/Z38 hk.v 1.25.m
27	varsi	19	MK 3	Tay Tool				5010088	hyvä	43				TAY TOOL WORKSLTD West Bromwich 2 MOD 30° P.A. 8 TEETH DIN 5480 made in england
28	kuppi	126,8	44,45					5009744	hyvä					M2/Z64 7888/2 6.
29	kuppi	126,5	44,45	MICO				5009740	hyvä					MICO MADE IN BELGIUM M2-20°-Z62 DIN3972 BP11 10530.1 3
30	varsi	25,39	MK 4	Lorenz				5010038	hyvä	43				LORENZ 520 646651 001 m2 a30° z12 haP0 0,44mm DIN 5482 A 45°*41
31	kiekko	102	44,45	Torino				5010068	hyvä	43				Della Ferrara TORINO Mod. 2 a20° z 50 No 6687/1 HSS EMO5Co5 Add. 1,25 M DIN 3972/II
32	kiekko	101,16	31,75					PUUTTUU	hyvä					TEHO-T M2-30°-T50 DINS482 PM60 00610.1
33	kiekko	101,08	31,75					PUUTTUU	hyvä					TEHO-T M2-30°-T50 DINS482 PM60 00610.3
34	kiekko	101,16	31,75					PUUTTUU	hyvä					TEHO-T M2-30°-T50 DINS482 PM60 00610.2
35	varsi	21,43	180,23	Liebherr Lorenz				5009378	hyvä					LIEBHERR LORENZ 500 W52008102 854 mm2 an30° z10 haP0 0.65mm DINS480
36	kiekko	102,1	44,45	Torino				5010068	hyvä	43				Della Ferrara TORINO Mod. 2 a20° z 50 No 6687/1 HSS EMO5Co5 Add. 1,25 M DIN 3972/II
37	varsi	18,4	MK 3	Tay Tool				5010142	hyvä	445				TAY TOOL WORKS LTD West Bromwich 2 MOD. 30° P.A. 8 TEETH DIN 5480 Y8579 Made in England
38	varsi	30,37	MK 3	Sandvik Corona				5010011	hyvä	43				Sandvik corona 2 MOD 20° P.A. 14 teeth D+H 1771 x689

Liite 2. KISSsoft.

KISSsoft - License number 1554 - Single gear - Hammarzuti1

File Project View Calculation Report Graphics Script Extras Help

Release 2023-S14 KISSsoft

Basic data Manufacturing

Geometry

Normal module m_n 3.0000 mm z -22
 Normal pressure angle α_n 20.0000 b 0.0000 mm
 Gear 1 Profile shift coefficient x -0.1187
 Helix angle at reference circle β 0.0000 A 6
 Quality (ISO 1328-2013) 6

Materials

Gear 1 Case hardening steel ISO/AGMA 7-6, case hardened, ISO 6336-5 (figure 9/10 (PK)), Core hardness >=229RC, Jernmy 1.2mm vRC28

Reference profile

Machining step

Pre- and final machining

Final machining (without pre-machining)

Tool type

Apert

Factors with diameters

Om Input

Tea #57

Number of teeth 12.0000
 Profile shift coefficient 0.2000
 Addendum coefficient 0.6500
 Tip diameter 41.1000 mm
 Tip form 0.0010
 Tip radius coefficient 0.9220
 Dedendum coefficient 0.316680 mm
 Root diameter 0.0010
 Root radius coefficient 0.0000
 Probance height coefficient 0.0000 mm
 Tip form diameter 0.0000 mm
 Probance angle 0.0000
 Root form height coefficient 0.0000
 Root form diameter 0.0000 mm
 Profile angle of the chamfer flank 0.0000
 Topping tool
 Addendum coefficient Reference profile Gear $\gamma_{1,0}$ 0.4900
 Tip diameter of gear 64.0000 mm
 Tip alteration of gear 0.0000 mm

Table

Results (base calculation)

Theoretical tip diameter (mm)	64.000
Tip diameter (mm)	64.000
Root diameter (mm)	70.614
Number of teeth spanned	4
Base tangent length (no backlash) (mm)	32.003
Base tangent length with allowance (mm)	32.004
Effective diameter of ballion (mm)	5.250
Diametral measurement over two balls (no backlash) (mm)	59.042
Diametral measurement over two balls (mm)	59.071
Diametral measurement over two balls (mm)	59.118

Results (special calculation)

Theoretical tip diameter (mm)	64.000
Tip diameter (mm)	64.000
Root diameter (mm)	70.614
Number of teeth spanned	4
Base tangent length (no backlash) (mm)	32.003
Base tangent length with allowance (mm)	32.004
Effective diameter of ballion (mm)	5.250
Diametral measurement over two balls (no backlash) (mm)	59.042
Diametral measurement over two balls (mm)	59.071
Diametral measurement over two balls (mm)	59.118

Geometry 2D Manufacturing

Advances

Tooth thickness tolerance

Om Input	Upper	Lower
Tooth thickness allowance A_{ts}	-0.0152	-0.0401 mm
Base tangent length A_{bt}	-0.0131	-0.0347 mm
Normal backlash b	0.0131	0.0347 mm
Crossferal backlash h	0.0152	0.0401 mm
Tip diameter allowance A_{td}	0.0300	0.0600 mm
Root diameter allowance A_{rd}	0.0731	0.0277 mm

Measurement data

Number of teeth spanned k	4
Diameter of ballion D_{bl}	5.2500 mm
Diameter	Mean value
Tooth thickness	Mean value

2D - 2D, contact analysis and measurement grid data: Tolerance field for the tooth form calculation

Results (base calculation)

Theoretical tip diameter (mm)	64.000
Tip diameter (mm)	64.000
Root diameter (mm)	70.614
Number of teeth spanned	4
Base tangent length (no backlash) (mm)	32.003
Base tangent length with allowance (mm)	32.004
Effective diameter of ballion (mm)	5.250
Diametral measurement over two balls (no backlash) (mm)	59.042
Diametral measurement over two balls (mm)	59.071
Diametral measurement over two balls (mm)	59.118

Results (special calculation)

Theoretical tip diameter (mm)	64.000
Tip diameter (mm)	64.000
Root diameter (mm)	70.614
Number of teeth spanned	4
Base tangent length (no backlash) (mm)	32.003
Base tangent length with allowance (mm)	32.004
Effective diameter of ballion (mm)	5.250
Diametral measurement over two balls (no backlash) (mm)	59.042
Diametral measurement over two balls (mm)	59.071
Diametral measurement over two balls (mm)	59.118

System modules

- KISSdesign
- Base modules
- Cylindrical gears
 - Single gear
 - Cylindrical gear pair
 - Pinion with neck
 - Planetary gear
 - Three gear train
 - Four gear train
- Other gears
 - Bevel and hypoid gears
 - Face gears
 - Worms with enveloping
 - Crossed helical gears
 - Revered gears
 - Non circular gears
- Shfts and Bearings
 - Shaft calculation
 - Rolling bearing ISO 281, I...
 - Rolling bearing ISO/TS 16...
 - Hydrodynamic film L...
 - Hydrodynamic film L...
- Connections
 - Bolts and pins
 - Bolts
 - Snap ring
 - HEH
- Shaft-Hub-Connections
 - Key
 - Straight-sided spline

Modules Projects

Table

- > Gear pair
- > Planetary gear
- > Worms with enveloping, worm wheels
- > Shfts
- > Bevel and hypoid gears
- > Shaft-Hub-Connections
- > Connections
- > Springs
- > Bolts

Conte... See... Samp... Tutor... Results (base calculation) Results (special calculation) Messages Script output Information Graphics list

CONSISTENT

