



# **Työstökoneen geometrian kompensointi postprosessorilla**

Mikko Kähäri

Opinnäytetyö  
Elokuu 2017  
Konetekniikka  
Koneautomaatio

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Konetekniikka  
Koneautomaatio

KÄHÄRI, MIKKO:

Työstökoneen geometrian kompensointi postprosessorilla

Opinnäytetyö 45 sivua, joista liitteitä 3 sivua  
Elokuu 2017

---

Tämän opinnäytetyön tehtävänä on selvittää työstökoneen geometrian korjausta postprosessorilla. Tampereen teknillisen yliopiston George Fischer -merkkistä sorvia käytettiin työssäni testikoneena. Sorvista on rakennettu virtuaalityöstökone ja koneeseen sopiva postprosessori.

Työstökoneen geometriaa joudutaan korjaamaan usein niin sanotun kolarin vuoksi. Kolarit johtuvat usein koneen käyttäjän inhimillisestä erehdyksestä, joka voi olla esimerkiksi ohjelmointivirhe, terän mittauksessa tapahtunut virhe tai kappaleen nollapisteen virheelinen määrittäminen.

Tässä työssä keskitytään korjaamaan työstökoneen Z-akselin ja karan samansuuntaisuusvirhe. Kartiomaisuuden selvittämiseen sorvataan testikappale. Lieriömäisen testikappaleen sorvauksessa terä kulkee Z-akselilla eteenpäin ja X-akseli pysyy paikoillaan. Tällöin karan ja Z-akselin sanansuuntaisuusvirheestä tulee kappaleeseen kartiomaisuutta. Testikappaleesta mitataan kartiomaisuuden suuruus. Vaihtoehtoinen tapa olisi ollut käyttää apuna tuurnaa ja mittakelloa kartiomaisuuden selvittämiseksi.

Postprosessori jakaa Z-akselilla kuljetun matkan paloihin samalla periaatteella kuin differentiaalilaskennassa. Postprosessorissa kerrotaan kuljettu matka ja kartiomaisuuden suuruus millimetreissä. Jokaisessa Z-akselin kompensointipisteessä on oma kompensointiarvo. Tämä arvon suuruuden X-akseli toteuttaa lineaariliikkeenä. Kun kartiomaisuus on testikappaleessa siten, että kappale on suurempi työstökoneen karan puoleisessa päässä, X-akseli pienentää sorvaushalkaisijaa jokaisessa kompensointipisteessä.

Virtuaalityöstökoneen jatkotutkimusaiheeksi ehdotan työstökoneen johteessa olevien kääntymien, kiertymien ja nousemien mallinnusta virtuaalityöstökoneen. Tätä voidaan tarkastella esimerkiksi valmistettavan kappaleen aaltomaisuudesta. Kappaleen aaltomaisuus johtuu koneen johteen kääntymästä, kiertymästä ja nousemasta. Näitä voitaisiin kompensoida postprosessorilla virtuaalityöstökoneen työstöavaruudessa.

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering  
Machine Automation

KÄHÄRI, MIKKO

Geometric Compensation of a Machine Tool with a Post Processor

Bachelor's thesis 45 pages, appendices 3 pages  
August 2017

---

The purpose of this thesis was to find out how to repair geometry of a machine tool with a post processor. The George Fischer lathe at the Tampere University of Technology was, used as a test machine in this thesis. A virtual version of the machine tool and a suitable post processor were, built of that lathe.

The geometry of a machine tool must, often be repaired because of collision. Collisions are typically caused by a human mistake by the user of the machine, which is for example, a programming error, operator measurement error on the tool length, or incorrect definition of the zero point location of a given part under work.

This work focuses on correcting the parallelism error between the Z-axis and the spindle on the machine tool. First, we have to do a test part on the lathe and measure both sizes on the cone. When a cylindrical test piece is turning, the blade passes forward on the Z-axis and the X-axis remains in place. In this case, the spindle and Z-axis parallelism error make the test part conical in shape.

The post processor divides the Z-axis distance into parts. The post processor describes the distance and the size of the cone in millimeters. Each Z-axis compensation point has its own compensation value. The X-axis moves this value as a linear motion. When the cone is in the test piece so that the piece is larger on the spindle side on the machine tool, the X-axis decreases the lathing dimension at each compensation point.

---

Key words: geometric of machine tool, virtual machine tool, post processor

## SISÄLLYS

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | JOHDANTO .....  | 6  |
| 2 | TYÖSTÖKONEEN GEOMETRIA JA STABIILIUS .....            | 7  |
|   | 2.1 Työstökoneen geometria .....                      | 7  |
|   | 2.2 Matemaattisen mallin tarkkuus .....               | 11 |
|   | 2.3 Työstökoneen stabiilius .....                     | 12 |
|   | 2.3.1 Staattinen stabiilius .....                     | 13 |
|   | 2.3.2 Dynaaminen stabiilius .....                     | 16 |
|   | 2.3.3 Terminen stabiilius .....                       | 17 |
|   | 2.4 OLOSUHTEET .....                                  | 18 |
|   | 2.5 TYÖSTÖKONEEN TARKASTUS .....                      | 20 |
|   | 2.5.1 Geometrian mittaukset .....                     | 21 |
|   | 2.5.2 Paikoitustarkkuuden mittaukset .....            | 21 |
| 3 | SIMULOINTI .....                                      | 24 |
| 4 | CAM / POSTPROSESSORI .....                            | 25 |
|   | 4.1 Siemens CAM express .....                         | 27 |
|   | 4.2 Siemens post builder .....                        | 29 |
| 5 | VIRTUAALITYÖSTÖKONE .....                             | 35 |
|   | 5.1 Virtuaalisen työstökoneen rakentaminen .....      | 37 |
|   | 5.2 Konemalli Vericut .....                           | 39 |
| 6 | POHDINTA .....  | 41 |
|   | LÄHTEET .....   | 42 |
|   | LIITTEET .....  | 44 |
|   | Liite 1. C-runkoinen jyrsinkone. ....                 | 44 |
|   | Liite 2. VDI/DGQ 2441-standardi. ....                 | 45 |
|   | Liite 3. Työstökoneen valmistajan oma standardi. .... | 46 |

**LYHENTEET JA TERMIT**

|                 |   |
|-----------------|---|
| CAM             | Computer Aided Manufacturing; tietokoneavusteinen valmistus   |
| Post prosessori | Postprosessori muuttaa CAM-ohjelmiston tuottaman työstöradan G-koodiksi, jonka työstökone ymmärtää.                 |
| Simulaatio      | Ohjelmisto joka mallintaa tehdyn työstöradan, joko terän liikkeenä tai virtuaalityöstökoneen liikkeenä.             |
| Offline         | Offline; viitataan ohjelmointiin työstökoneen ohjauksen ulkopuolella (esimerkiksi CAM-ohjelmistolla tietokoneella). |
| APT-kieli       | Automatically Programmed Tools; tekstipohjainen ohjelmointikieli.   |
| CLDATA          | Cutter Location; binäärimuotoinen ohjelmointikieli.   |
| PLM             | Product Lifecycle Management; Tuotteen elinkaari.   |
| CL              | Cutter Location File; Työstökoneella suoritettava NC-koodi  |
| MBD             | Model Based Definition; Malliperustainen tuotemäärittely.   |
| $A_p$           | Lastuamissyvyys.  |
| F               | Syöttö per kierros/hammas.  |
| $\epsilon_x(X)$ | Kiertymä.   |
| $\epsilon_y(X)$ | Kääntymä.   |
| $\epsilon_z(X)$ | Nousema.  |

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, pystytäänkö postprosessorilla kompensoimaan työstökoneen geometrian virheitä. Työstökoneiden geometria muuttuu useita kertoja koneen elinkaaren aikana. Nämä muutokset johtuvat ympäristöstä. Muutosten aiheuttajia on useita: lämpötila, koneen perustus tai koneen stabiilius. Stabiilius pitää sisällään termisen, staattisen ja dynaamisen stabiiliuden.

Suurimmat muutokset työstökoneen geometriaan aiheutuvat niin sanotuista kolareista. Kolarit johtuvat koneen käyttäjän inhimillisistä virheistä. Kolarissa kaksi koneen elementtiä osuvat toisiinsa. Kolarissa suuret voimat kohdistuvat koneen rakenteisiin aiheuttaen johteen- ja karansiirtymää. Kolari aiheuttaa työkalun ja kiinnittimen rikkoutumisen. Valmistettava kappale on tällöin usein käyttökelvoton. Esimerkiksi sorveissa karalinja kääntyy ja näin ollen sorvin Z-akseli ei ole enää karan kanssa samansuuntainen. Lieriötä sorvatessa tämä virhe aiheuttaa kappaleeseen kartiomaisuutta, jolloin kappaleen halkaisija ei ole saman suuruinen kappaleen molemmissa päissä. Tämä geometriavirhe on helpposti korjattavissa sorveissa. Tällöin koneeseen tulee huoltoseisokki, jolloin kone on poissa käytöstä eikä suunniteltua tuotantoa pystytä tekemään rikkoutuneella koneella.

Tässä työssä lähestyn samansuuntaisuusvirheistä syntyvien ongelmien ratkaisemista postprosessorin avulla. Yksinkertaisesti asian voi ajatella, että postprosessori jakaa Z-akselilla kuljetun matkan paloihin. Näitä paloja voidaan kutsua kompensointipisteiksi. Jokaisessa Z-akselin pisteessä on oma kompensointiarvo, jonka X-akseli toteuttaa lineaarisena liikkeenä. Postprosessorin ansiosta koneen huolto voitaisiin siirtää esimerkiksi huoltoseisokkiin tai tuotannon hiljaisempaan hetkeen.

Tämän opinnäytetyön tuloksena saadaan postprosessori, jolla pystytään korjaamaan sorvin karan ja Z-akselin samansuuntaisuusvirhe. Postprosessoria rakennettaessa pitää aluksi tietää millainen geometrinen virhe koneessa on. Onko se siirtymä- vai kiertymävirhe? Tämä pystytään selvittämään valmistamalla niin sanottu NAS-kappale ja mittaamalla kappaleesta geometriset toleranssit. Toinen tapa on mitata koneen geometriaa joko laserinterferometrillä tai tuurnilla ja mittakellolla. Tämän jälkeen geometrinen virhe voidaan korjata postprosessorilla.

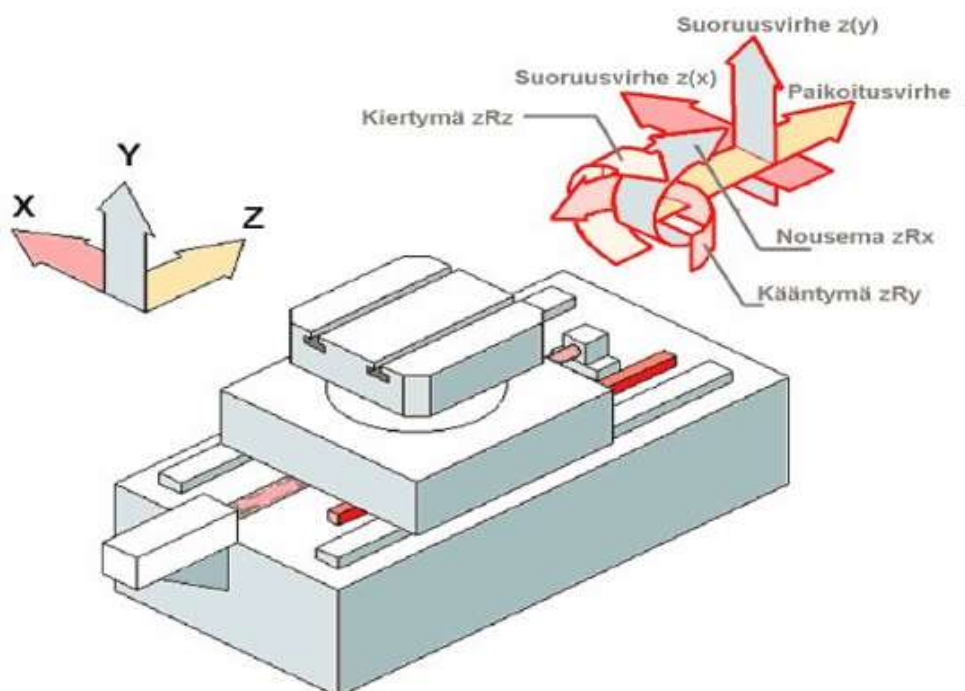
## 2 TYÖSTÖKONEEN GEOMETRIA JA STABIILIUUS

### 2.1 Työstökoneen geometria

Työstökoneen osien valmistustarkkuudesta ja kokoonpanon tarkkuudesta tulee koneen tarkkuus. Työstökoneen tarkkuutta mitataan osien vapausasteilla ja osien keskinäisillä asennoilla. Mitattavia suureita ovat paikoitusvirhe, suoruus, kiertymä, kohtisuoruus ja samansuuntaisuus. (Weck 1985, 256; VDI/DGQ 3441 1977, 21)

Työstökoneen kinematiikka määrittää elementtien suhteellisesta aseman muutoksesta toisiinsa nähden. Näin ollen koneen rakenne on jaettu erillisiksi liikkuviksi elementeiksi. Elementtien liikettä kuvataan suhteessa toisiinsa translaatio- ja rotaatiovirhefunktiolla. Elementtien volymetrinen poikkeama voidaan laskea liikepituudella avaruudessa missä hyvänsä pisteessä. (Schultschik 1977, 223-228; Hocken 1980, 1-34; Weck 1985, 256; Zhang, Ouyang, Lu 1987, 515-518.)

Työstökoneen yhden elementin geometrian virheet ilmaistaan kuudella muuttujalla. Muuttujia kutsutaan vapausasteiksi. Elementtien oletetaan olevan jäykkiä. Kuviossa 1 on esitetty pyöräpöydän kuusi vapausastetta. Niistä viisi on kiinnitetty ja jäljelle jäävä toiminnallinen vapausaste on kierto. (Andersson 1992, 31.)



KUVIO 1. Elementin kuusi vapausastetta (Andersson 1992)

Työstökoneen mallin oletetaan olevan jäykkärunkoinen. Elementtien asemat eivät vaikuta toisten elementtien poikkeamiin. Esimerkiksi perinteisen C-runkoisen jyrsinkoneen pöydän oma massa ei vaikuta x- tai y-akselilla koneen rungon geometriaan (Weck 1985, 256; ks. liite 1.) Varsinkin kun jyrsinkoneen pöytä on akseleiden ääriasennossa, pöydän oma massa taivuttaa koneen rungon geometriaa.

Jäykkärunko-oletuksen ansiosta elementin siirrokset voidaan kuvata matemaattisesti affiiniin siirroksena. Tässä matemaattisessa esityksessä elementin kaikkien pisteiden välinen etäisyys pysyy siirtymässä vakiona. Tällöin yhtälössä 1 esitetystä 4x4 matriisilla voidaan kuvata homogeenista koordinaattimuunnosta kolmeulotteisessa avaruudessa. 4x4 matriisilla on myös 3x3 alimatriisi. Alimatriisi sisältää tiedon elementin kiertymisestä koordinaattiakselien ympäri. (Tlusty 1971, 333-344.)

Kun johteelle asetetaan koordinaatisto, elementin liikettä voidaan kuvata referenssikoordinaatiston suhteen. Työstökoneen kaikilla akseleilla on pääliikesuunnan lisäksi poikkeama kuuden vapausasteen suhteen. Liikeakselin virheiden vuoksi elementin koordinaatiston asento ja asema poikkeaa ideaalitalanteesta. Elementin kiertyminen voidaan esittää taulukossa 1 esitetyllä tavalla. (Andersson, Tikka 1997, 276.)

TAULUKKO 1. X-akselin vapausasteet (Anderson.1992)

|  |
|--|
| $\delta_x(x)$ = pääliikesuunnan (x) paikoitusvirhe         |
| $\delta_y(x)$ = suoruuspoikkeama y-suunnassa (pystysuunta) |
| $\delta_z(x)$ = suoruuspoikkeama z-suunnassa (vaakasuunta) |
| $\delta_x(x)$ = kiertymä x-akselin ympäri                  |
| $\delta_y(x)$ = kiertymä y-akselin ympäri                  |
| $\delta_z(x)$ = kiertymä z-akselin ympäri                  |



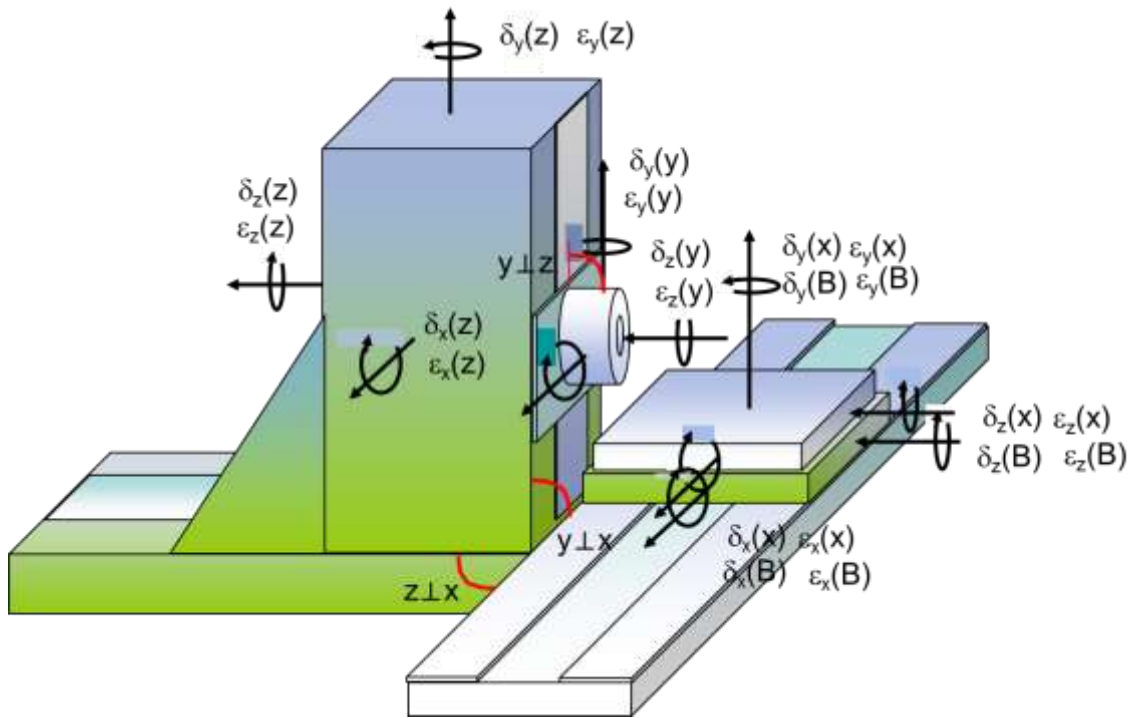
Kuviossa 2 esitetyn matriisin avulla voidaan määrittää elementin kaikki kolme kiertovapausastetta. Työkappaleen pinnalla olevan pisteen asema saadaan esitettyä matriisin 3x3 alimatriisin avulla kertomalla differentiaaliset kiertymät kiertokeskipisteen ja työkappaleen pinnalla olevan pisteen välimatkalla. Liikeakselin todellisten poikkeamien laske- miseksi on etäisyydet vähennettävä lausekkeesta ja suoraviivaisen liikkeen komponentit lisättävä lausekkeeseen. Laskentatapa sopii liikeakselille sekä rotaatioakselille. Matrii- sissa 3x3 T on siirtymä koordinaatistossa.  $\epsilon$  on kiertymä, kääntymä tai nousema riippuen siitä, mikä koordinaattiakselisuunta on kyseessä. (Andersson 1992, 36.)

$$|T|_{\epsilon(x)} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z(x) & \epsilon_y(x) & 0 \\ \epsilon_z(x) & 1 & -\epsilon_x(x) & 0 \\ -\epsilon_y(x) & \epsilon_x(x) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{kaava (1)}$$

4x4 matriisi (Andersson 1992)

Kahden elementin kohtisuorusvirheen poikkeaman suuruus on suoraan verrannollinen koordinaattiakseleilla kuljettuun matkaan. Kohtisuorusvirhe voidaan esittää 3x3 matrii- sin avulla. Matriisilla voidaan esittää myös yhdensuuntaisuusvirheiden aiheuttamat poik- keamat. Työkalan pituus vaikuttaa virheen suuruuteen. Poikkeamat voidaan laskea, kun dimensiot tunnetaan. (Andersson 1992, 39–40.)

Koneistuskeskus koostuu tavallisimmin elementeistä, joiden nimellinen orientaatio tois- tensa suhteen on kohtisuora. Koneistuskeskuksessa kukin elementti muodostaa matrii- siyhtälön, joka koostuu kolmesta kiertoasteesta ja kolmesta suoraviivaisesta vapausas- teesta. Elementtien matriisiyhtälöistä muodostuu 3x2x3 eli vapausasteita on yhteensä 18. Tähän on lisättävä 3 komponenttia, jotka tulevat elementtien välisistä kulma-assennoista. Tällöin kolmeakselisessa työstökeskuksessa on yhteensä 21 vapausastetta. Pyöräpöydästä tulee vielä 6 vapausastetta lisää ja kara-akselilla on yhdensuuntaisuus z-akseliin y- ja x- suunnassa. Kara-akselilla on myös kohtisuorus y-akselin z-suunnassa ja tällöin saadaan yhteensä 30 vapausastetta. (Andersson, Tikka 1997, 277; ks. kuvio 2.)



KUVIO 2. Koneistuskeskuksen vapausasteet (Andersson 1997)

Elementin kokonaispoikkeamien lauseke saadaan laskemalla yhteen kaikki sen poikkeamamatriisit. Työkappaleen ja työkalun väliset poikkeamat ovat erityisen tärkeitä tarkastelun kohteita. Poikkeamalausekkeitä yhdistettäessä on analysoitava koneen rakenne elementti elementiltä ja pohdittava, toimiiko tietty luistin työkalu- vai työkappale-elementtinä. 4-akselisessa vaakakaraisessa koneistuskeskuksessa poikkeamalausekkeiksi saadaan Andersonin (1992, 41) mukaan:

$$\{d\}_{\text{työkalu}} = \{d\}_y + \{d\}_z$$

$$\{d\}_{\text{kappale}} = \{d\}_x + \{d\}_b \quad \text{kaava (2)}$$

Parhaiten ratkaistavat vektorit ovat identtisiä. Tällöin työkappaleen  $\{d\}$  KAPPALE ja työkalun  $\{d\}$  TYÖKALU resultanttivektorit ovat samoja. Matriisit eivät ole todellisuudessa identtisiä, koska työkappaleen ja työkaluelementtien liikkeissä ja asennoissa on aina virheitä. Anderson (1992, 41) esittää tehollisen kokonaisvirheen  $\{d\}E$  seuraavasti:

$$\{d\}E = \{d\}KAPPALE - \{d\}TYÖKALU \quad \text{kaava (3)}$$

Sovellettaessa yhtälöä 3, työkalun kohtisuoruuspoikkeama ja kara-akselin yhdensuuntaisuus suhteessa z-liikkeeseen on katsottava työkalun kokonaispoikkeamaksi. Yksittäiset poikkeamalausekkeet kyseisessä tapauksessa ovat kaavan 4 mukaisia. (Schultschik 1977, 223-228; Donmez, Blomquist, Hocken, Liu, Barash 1986, 187-196; Kurtoglu 1990, 417-419)

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{xi} = & \delta_x(x)_i + \delta_x(B)_i - \delta_x(y)_i - \delta_x(z)_i - z \cdot x_{1z} + y \cdot x_{1y} - l_z \cdot S \mid z_x - y(x) \cdot \epsilon_z(x)_i \\ & + l_z(x) \cdot \epsilon_y(x)_i - l_y(B) \cdot \epsilon_z(B)_i + l_z(B) \cdot \epsilon_y(B)_i + l_y(y) \cdot \epsilon_z(y)_i - l_z(y) \cdot \epsilon_y(y)_i \\ & + l_y(z) \cdot \epsilon_z(z)_i - l_z(z) \cdot \epsilon_y(z)_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{yi} = & \delta_y(x)_i + \delta_y(B)_i - \delta_y(y)_i - \delta_y(z)_i + z \cdot z_{1y} + l_z \cdot S \mid z_y + l_x(x) \cdot \epsilon_z(x)_i \\ & - l_z(x) \cdot \epsilon_x(x)_i + l_x(B) \cdot \epsilon_z(B)_i - l_z(B) \cdot \epsilon_x(B)_i - l_x(y) \cdot \epsilon_z(y)_i + l_z(y) \cdot \epsilon_x(y)_i \\ & - l_x(z) \cdot \epsilon_z(z)_i + l_z(z) \cdot \epsilon_x(z)_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{zi} = & \delta_z(x)_i + \delta_z(B)_i - \delta_z(y)_i - \delta_z(z)_i - l_x(x) \cdot \epsilon_y(x)_i + l_y(x) \cdot \epsilon_x(x)_i - l_x(B) \cdot \epsilon_y(B)_i \\ & + l_y(B) \cdot \epsilon_x(B)_i + l_x(y) \cdot \epsilon_y(y)_i - l_y(y) \cdot \epsilon_x(y)_i + l_x(z) \cdot \epsilon_y(z)_i - l_y(z) \cdot \epsilon_x(z)_i \end{aligned} \quad \text{Kaava (4)}$$

(Andersson 1992, 42.)

Lasketut virhekomponentit ovat vektoreita todellisesta työkalun keskipisteestä työkappaleella olevaan tavoitepisteeseen koneen koordinaattiakseleiden suunnassa. Lauseke toteutuu ainoastaan kinemaattisesti identtisillä koneilla. Työstökoneiden, joiden työkappaleen tai työkalun asemoinnissa tarvittavat liikkeet ovat suoraviivaisia tai kiertoakseleita, koneeseen pystytään soveltamaan matriisien johtomenettelyä sekä yhtälöiden 2 ja 3 poikkeamalausekkeitä. (Andersson, Tikka 1997, 278–279.)

## 2.2 Matemaattisen mallin tarkkuus

Arvioinnissa käytettyjen vapausasteiden määrä ja mittausmenetelmä vaikuttavat geometrisen ja matemaattisen mallin tarkkuuteen. Olemassa olevat standardit ja työstökoneiden valmistajien tarkastusohjeet kertovat menettelytavan, joita ei voida hyväksyä haluttaessa mitata poikkeamat puhtaina muiden vapausasteiden vaikutuksista. Tietyissä mittauksissa pyritään välttämään tiettyjen vapausasteiden moninkertaisia vaikutuksia mittaustuloksiin. (Andersson, Tikka 1997, 279.)

Työstökoneen tarkastusstandardeissa suositellaan mittausten tekemistä työstöavaruuden keskellä. Näin vältetään äärimmäiset olot. Koneistuskeskusten paikoitustarkkuusmittauksissa tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi x-akselin tarkastuksessa mittaussuora kulkisi suunnilleen pöydän korkeudella ja keskellä pöytää. Tämä johtaa siihen, että paikoituspisteeseen tulee mukaan pöydän liikkeen kiertymäpoikkeaman epämääräinen funktio. (Andersson, Tikka 1997, 279.)

Mittausjärjestelyssä on pyrkimyksenä selvittää yksittäisten vapausasteiden poikkeamat niin puhtaina toisten vapausasteiden vaikutuksesta, kuin se on teknisesti mahdollista. Mittaukset tehdään mahdollisimman lähellä johteita, mittasauvoja ja muita referenssielementtejä. Aina kun mitaamme esimerkiksi suoruuksia ja paikoitustarkkuuksia, mukaan tulevat mitattavan elementin kiertymät, jotka vaikuttavat tuloksiin liikkeen aikana. (Andersson, Tikka 1997, 279.)

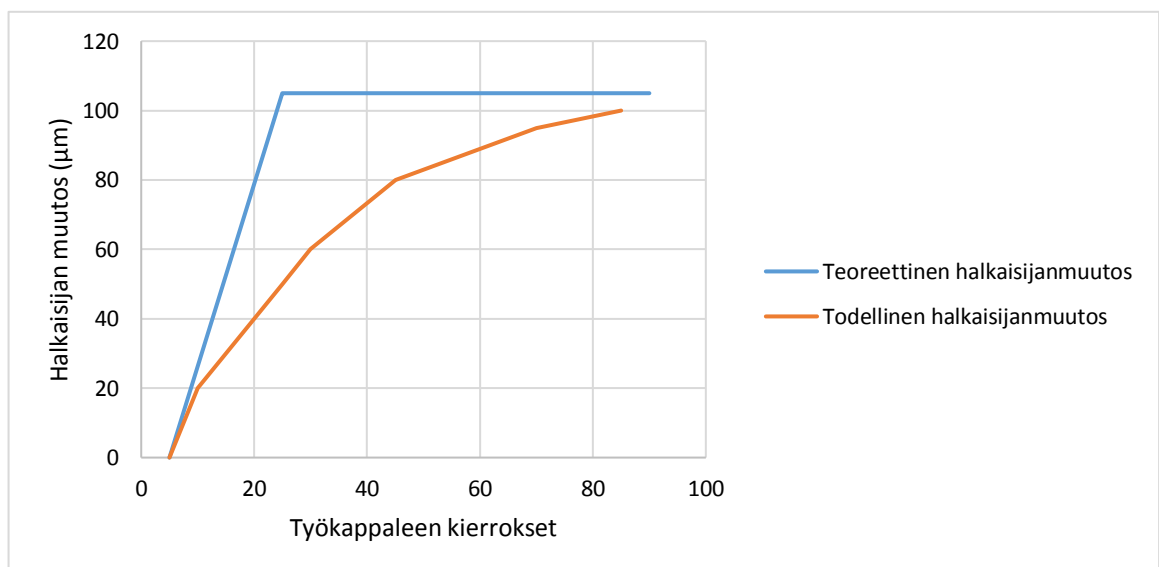
### **2.3 Työstökoneen stabiilius**

Työstökoneen stabiiliudella tarkoitetaan koneen vakautta eli kykyä pysyä samanlaisena voimien ja lämpötilojen muuttuessa. Stabiiliutta on kolmea erilaista: staattista, dynaamista ja termistä. Staattinen stabiilius perustuu siihen, kuinka muuttumattomana koneen komponentit pysyvät vuosien varrella. Dynaaminen stabiilius on esimerkiksi sitä, kuinka hyvin työstökoneen runko pystyy neutralisoimaan jrsinnästä aiheutuvan värähtelyn. Termien stabiilius liittyy esimerkiksi siihen, miten koneen runko käyttäytyy, kun lämpötila nousee työstökoneen työtilassa työstön aikana.

### 2.3.1 Staattinen stabiilius

Työstökoneen staattinen stabiilius eli jäykkyys vaikuttaa koneen todelliseen geometriaan. Staattinen stabiilius ilmaisee työstökoneen runkorakenteen joustoa kappaleen massan ja lastuamisvoimien vallitessa. Työstökoneen jäykkyyden tulisi olla mahdollisimman suuri. Työstövoimien kuormittaessa konetta, koneeseen syntyy jännitystila. Jännitystilasta muodostuu työstökoneen geometriaan muodonmuutos. Kuorman ollessa saman suuruinen, tulisi myös muodonmuutoksen pysyä aina samanlaisena. Tämä systemaattisuus vaikuttaa epäsuoraan kaikkiin työstön tuloksiin sekä sen taloudellisuuteen. Työstökoneen vähäinen jäykkyys rajoittaa suurinta saavutettavaa työstövoimaa ja siten myös maksimilastuvirtaa. Tämä on suoraan verrannollinen työstön taloudellisuuteen. Vähäinen jäykkyys aiheuttaa myös ongelmia kappaleiden mittatarkkuuteen. (Andersson, Tikka 1997, 279-280.)

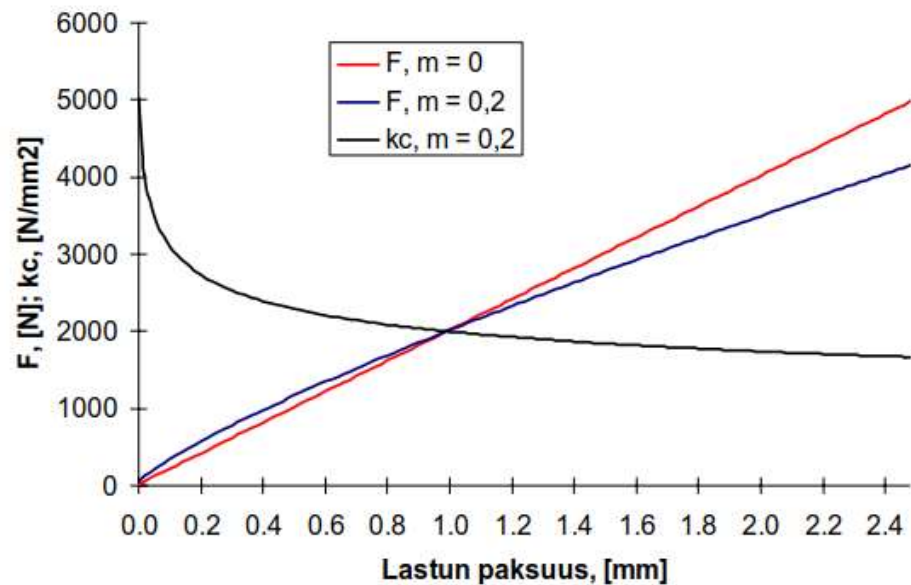
Työstökoneen staattiseen stabiliteettiin vaikuttaa kaksi komponenttia: 1) itse kone, sen materiaalit, rakenne ja liitokset sekä 2) koneen perustuksen ikä, materiaalit ja mitoitus. Perustuksellakin on siis dynaaminen ja staattinen stabiilius. Näistä kahdesta komponentista muodostuu koneen kokonaisuus. (Andersson, Tikka 1997, 280.) Konetta hankkiessa on hyvä muistaa, että hyvän koneen voi pilata huonolla perustuksella. Mutta hyvällä perustuksella ei saa huonosta koneesta hyvää.



KUVIO 3. Teoreettinen ja todellinen halkaisijanmuutos

Staattisen jäykkyyden merkitys korostuu, kun yritetään lastuta pienellä lastuamissyvyydellä. Tällöin todellinen halkaisijan pienentyminen ei koskaan vastaa asetettua syöttöä (ks. kuvio 3.) Tämä johtuu sorvisysteemin joustosta. Lastun paksuuden pienetessä ominaislastuamisvoima kasvaa, jolloin lastuamisen teorian mukaan lastun irrottaminen vaikeutuu (ks. kuvio 4).

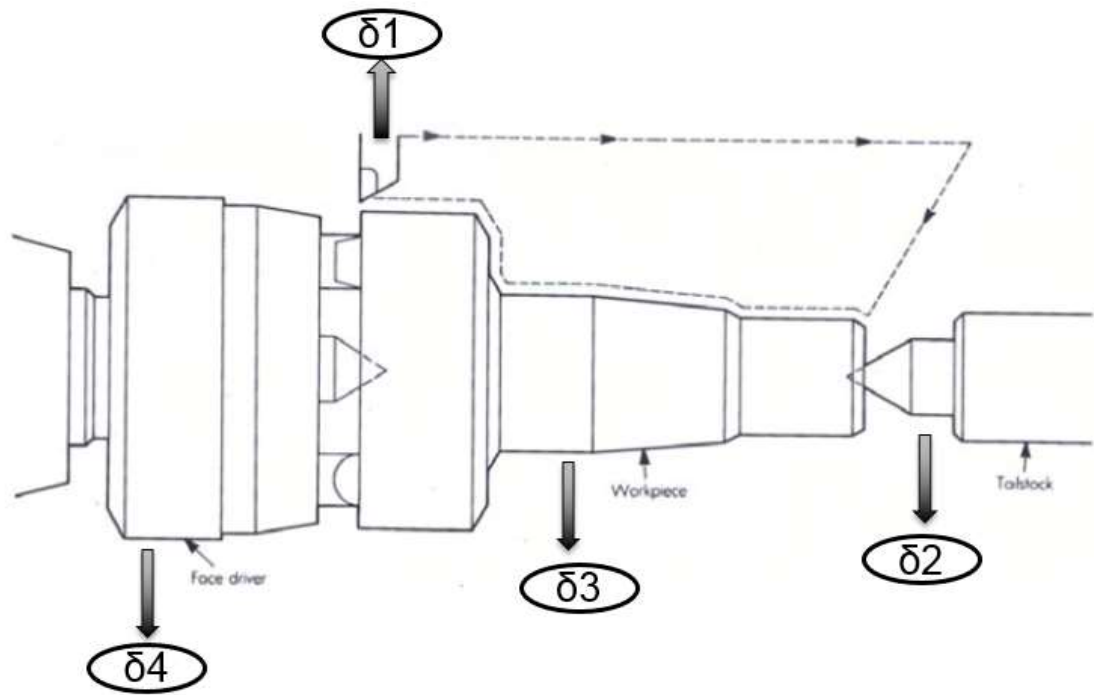
$$k_c = \text{ ominaislastuamisvoima [Nmm}^2] = k_{c-1.1} \cdot h^{-m}, \quad h = \text{lastunpaksuus}$$



$$k_{c-1.1} = 2000 \text{ Nmm}^2, \quad m = 0,2, \quad b = 1 \text{ mm}$$

KUVIO 4. Ominaislastuamisvoiman kasvu lastunpaksuuden funktiona

Kuviossa 5 esitetään systeemin jäykkyyteen vaikuttavat elementit. Systeemin jäykkyys määritellään  $1 \mu\text{m}$ :n suuruisena siirtymänä. Siirtymän suuruuteen vaikuttaa kuorman suuruus.



Kuvio 5. Työstösystemin joustoelementit (sorvaus) (Andersson 2003)

Kokonaisjäykkyys on Kienzle-Victorin mukaan:

$$K_{st} = F/\sigma$$

kaava 5

Tässä  $F$  on systeemin kuormitus, joka johtuu sorvin normaalivoimasta ja  $\sigma$  sen aiheuttama taipuma. Taipuma lasketaan Kienzle-Victorin mukaan käyttäen kuviomerkinöjä:

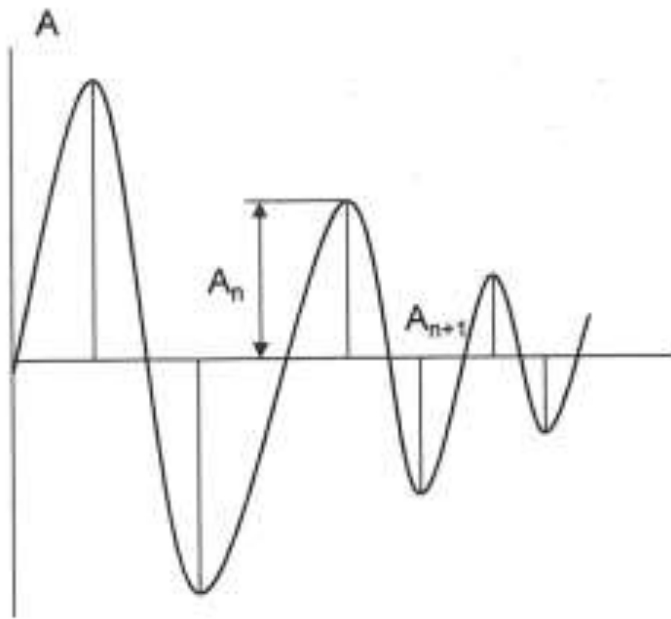
$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_6(\sigma_4 - \sigma_5)/2$$

kaava 6

### 2.3.2 Dynaaminen stabiilius

Työstökoneen rungon voi mieltää jäykkänä, mutta elastisena elementtinä. Elementti on altis värähtelylle. Työstösystemin sisä- tai ulkopuoliset lähteet aiheuttavat häiriöimpulsseja elementeille. Häiriöimpulssi voi olla lyhytvaikutteinen iskunomainen voima tai periodisesti muuttuva voima. Voima horjuttaa työstökoneen stabiilista tasapainoasemaa, jolloin työstökone alkaa elastisuutensa ansiosta värähdellä. Iskun omainen impulssi vaimenee rungossa ennen pitkää, mutta periodiset impulssit jatkuvat kunnes lakkaavat. Runko värähtelee häiriöimpulssin taajuudella ja amplitudilla, joka riippuu voiman suuruudesta, koneen massasta, staattisesta jäykkyydestä ja runkovaimennuksesta. (Andersson, Tikka 1997, 281-282.)

Työstökoneen rungon vaimennusominaisuudella on suuri merkitys koneen dynaamiseen jäykkyyteen. Kuviossa 6 on esitetty iskumainen, impulssin aiheuttaman värähtelyn vaimeneminen ajan funktiona. Systemin suhteellinen vaimennus on kuviossa 6 Anderssonin (1997, 282) mukaan:



KUVIO 6. Värähtelyn vaimeneminen (Andersson, Tikka, 282.)

$$D = \frac{\ln \frac{A_n}{A_{n+1}}}{2\pi}$$

kaava (7)

(Andersson, Tikka 1997, 282.)



Koneen suhteellisen vaimentuman  $D$  saadaan selville kaavalla 7. Koneen dynaaminen jäykkyys  $K_d$  määritellään häiriövoiman aiheuttaman maksimiresonanssiamplitudin mukaan, jolloin  $K_{st}$  on koneen staattinen jäykkyys.

$$K_d = \frac{F}{A_{\max}} = K_{st} * 2D \quad \text{kaava (8)}$$

(Andersson, Tikka 1997, 282.)

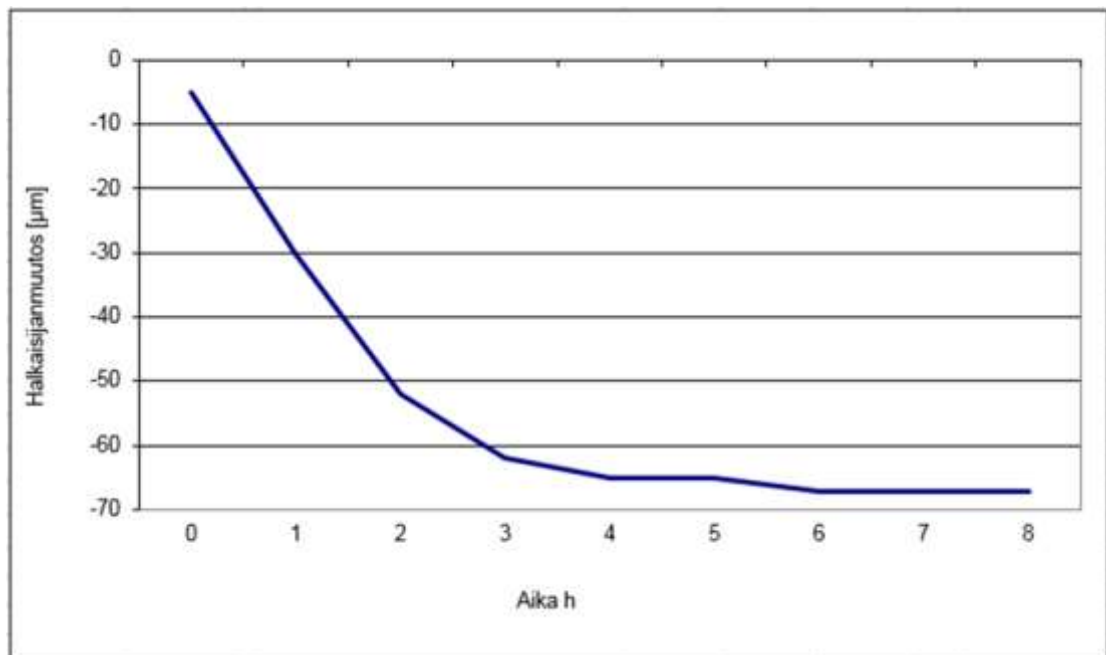
Rungon rakenteelliset ratkaisut vaikuttavat merkittävästi työstökoneen dynaamisiin ominaisuuksiin. Huomionarvoisia seikkoja ovat muun muassa rungon ominaisvärähtelytaajuuden saaminen mahdollisimman korkeaksi, rungon kotelointi ja värähtelylähteiden eristäminen. Työstökoneen rungon rakennemateriaali ja paino vaikuttavat suuresti värähtelyominaisuuksiin. Jos laitamme runkomateriaalit paremmuusjärjestykseen värähtelyjen näkökulmasta, niin järjestys on polybetoni, valurauta ja hitsattu rakenne.

### 2.3.3 Terminen stabiilius

Lastutessa työstökoneella kitka, servot ja muut tekijät aiheuttavat lämpötilan nousua. Tietyn ajan jälkeen lämpötilan funktio tasaantuu, koska ympäristöön johtuu yhtä paljon lämpöä kuin sitä syntyy. Tätä kulunutta aikaa pidetään termisen stabiiliuden mittana. Koska koneen komponentit elävät keskenään ja niiden geometriat muuttuvat lämpötilan muutosten aikana, työstökoneen lämpeneminen ja jäähtyminen työstön aikana näkyvät kapaleen mittatarkkuudessa.

Lämpötilan nousun perimmäinen syy on koneen pyörivien osien liukupintojen, laakeri-, ja voimansiirtokohtien kitkaan kuluvan energian muuttuminen lämmöksi. Työstökoneessa on siis monia lämpölähteitä. Lämpöä varastoituu myös leikkuunesteeseen ja hydraulikka öljyyn. Tällöin leikkuunesteen ja hydraulikka öljyn säiliöistä tulee myös lämpölähteitä. Esimerkiksi työstökeskuksen kara, jossa on öljyjäähdytys ja 14000 rpm, pidentyy noin 0,03 mm pyöritettäessä karaa 30 minuuttia täydellä pyörimisnopeudella.

Työstökoneen geometriaa mitattaessa on hyvä muistaa, että työstökoneella pitää ajaa lämmitysajoa ennen mittausta. Koneen pitää olla mahdollisimman samanlainen kuin arki- sessä käyttötilanteessa. Jos kone mitataan kylmänä, sen komponentit ovat keskenään eri asennossa ja eri etäisyydellä, kun raskaassa koneistuksessa. Tällöin esimerkiksi paikoi- tuskompensointipisteet asettuvat väärin. Kuviossa 7 on havainnollistettu koneen lämpe- nemisestä johtuva kappaleen halkaisijamuutos.



KUVIO 7. Työkappaleiden halkaisija muutos työstöajan funktiona

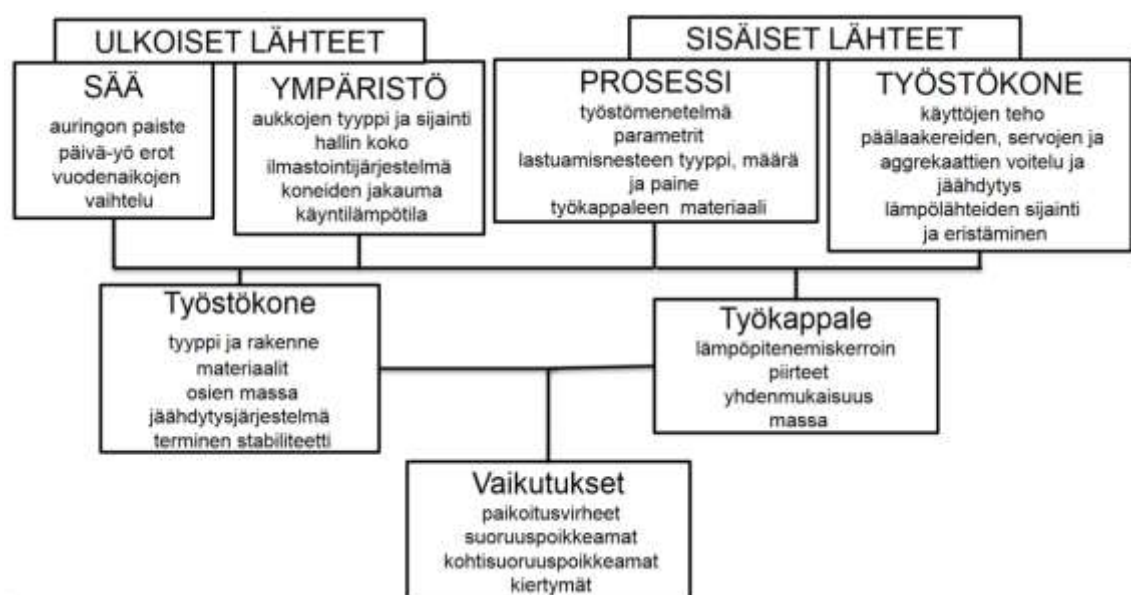
## 2.4 OLOSUHTEET

Koneistuksen tarkkuuteen vaikuttavat kahdenlaiset poikkeamat: 1) peruskoneesta riippu- vat systemaattiset poikkeamat ja 2) olosuhteista (ympäristöstä) johtuvat satunnaiset poi- keamat. Tehtäessä tarkkuuskoneistusta, juuri satunnaisten poikkeamien saaminen hallin- taan on mittava investointi. Ulkopuolisten lämpölähteiden vaikutusten vaimennus ja hal- linta ovat haastavaa. Lämpötilan vaikutus voidaan vielä jakaa kahteen tekijään: 1) työs- tökoneen sisäpuolelta aiheutuvaan lämmönmuutokseen ja 2) työstökoneen ulkopuolelta aiheutuvaan lämpötilanmuutokseen. Erään tutkimuksen mukaan jopa 60-70% työstöko- neiden tarkkuuteen vaikuttavista virheistä johtuu termisistä poikkeamista. (Venugopal 1986, 255-258.)

Tarkasteltaessa työstökoneeseen vaikuttavia ulkoisia lämpöä tuottavia tekijöitä, voidaan ne jakaa sähän ja koneen välittömästä ympäristöstä johtuviin. Suomessa vuodenaikojen vaihtelut ulkoilmassa saattavat olla  $-30...+30$ . Lämpötilan vaihtelu aiheuttaa melko suuria ongelmia. Hankalinta on talvikuukausina, kun aihioita tai valmiita kappaleita siirretään ulos tehdashalleista, jolloin joudutaan avaamaan hallin suuret ovet. Tällöin lämpö karkaa ulos hallista jo kylmä ulkoilma jäähdyttää hallia ja sen koneita. Haasteellisimpia ovat oven lähellä olevat suuret koneet, aarporat, pitkäsorvit ja pitkäjyrsinkoneet. Kylmä ilma jäähdyttää koneen alarunkoa ja koneen. Koneiden rungosta osa sijaitsee usein lattiapinnan alapuolella, jolloin kylmäilmavirtaus muuttaa koko ajan koneen alarungon geometriaa. (Andersson, Tikka 1997, 285.)

Kun yritämme pitää hallin lämpötilan stabiilina vuodenaikoihin nähden, oman ongelmansa aiheuttavat myös tuulettimet ja lämmittimet. Nämä olisi sijoitettava halliin niin, että ne eivät puhalla suoraan koneeseen ja täten aiheuta geometriavaihtelua koneen runkoon.

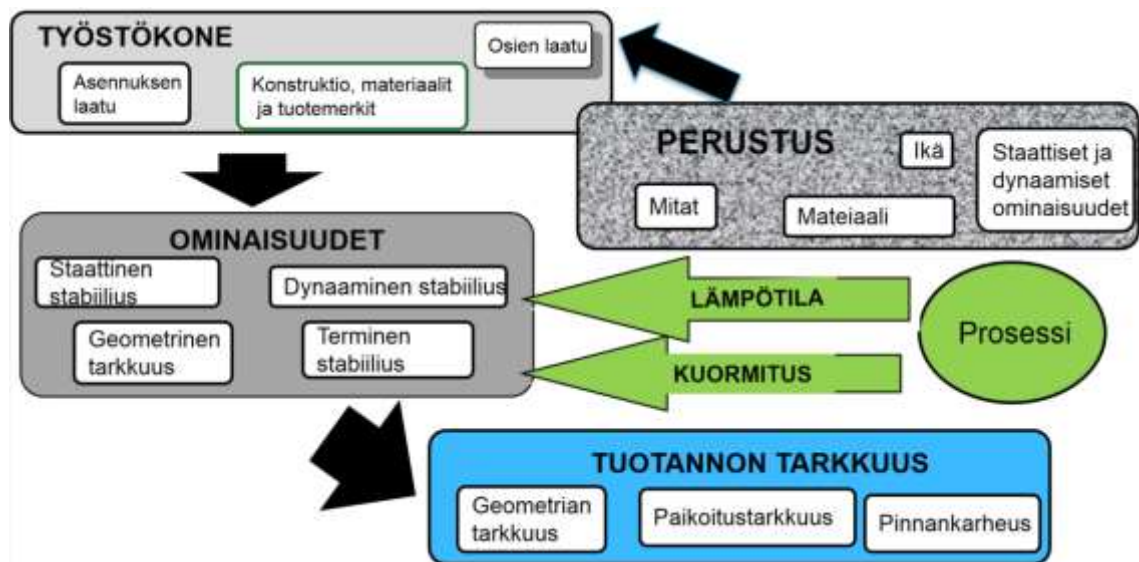
Auringon säteily on myös yksi työstökoneen geometriaa muuttava lämpötilanvaihtelukomponentti. Auringonpaisteen lämpöjakauma ei jakaudu koskaan tasaisesti koko työstökoneeseen. Työstökoneen rungon geometria deformatuu epäsymmetrisesti ja moniakselisesti. Vuorokausivaihtelu tuo vielä lisää epäsäännöllisyyttä auringon tuomaan lämpövaihteluun.



KUVIO 8. Sisäiset ja ulkoiset lämpölähteet (Andersson 1992)

Kuviossa 8 on esitetty eri lämpölähteiden aiheuttajat. Lopuksi voimme mitata nämä poikkeamat valmiista kappaleista. Epähomogeeninen lämpötila työstökoneen rakenteissa aiheuttaa osiin vääntymiä. Tästä seuraa koneen geometrian muutos, kun sen osien tasomaisuus, kohtisuoruus, yhdensuuntaisuus, suoruuspoikkeamat muuttuvat. Erityisen vahingollisia koneen tarkkuudelle ovat lämpöpuhaltimen tai tuulettimien aiheuttamat toispuoliset lämpötilanmuutokset. (Andersson, Tikka 1997, 286.)

Nämä edellä mainitut asiat vaikuttavat työstökoneen geometriaan. On hyvä muistaa, että työstökoneen tarkkuuteen vaikuttaa perustuksen ominaisuudet, työstökoneen laatu ja sen asennuksen laatu. Tuotannon tarkkuuskin vaikuttaa valmistettävien kappaleiden tarkkuuteen. Pinnankarheudella on suuri merkitys kappaleiden tarkkuuteen. Kuviossa xx on esitetty työstökoneen kokonaistarkkuuteen vaikuttavat tekijät.



KUVIO 9 Työstökoneen kokonaistarkkuuteen vaikuttavat tekijät (Andersson 1992).

## 2.5 TYÖSTÖKONEEN TARKASTUS

Työstökoneille tehtävät tarkastusmittaukset kertovat koneen geometrinen suureiden poikkeamista tavoitearvosta. Nämä mittaukset tehdään kuormittamattomina ja ne ovat kulma- tai pituudenmittauksia. Jos poikkeamia esiintyy jonkin vapausasteen arvossa, vastaavat poikkeamat löytyvät myös työkappaleesta. Tarkastusmittauksia on kahden tyyppisiä, geometrian ja paikoitustarkkuuden mittauksia.

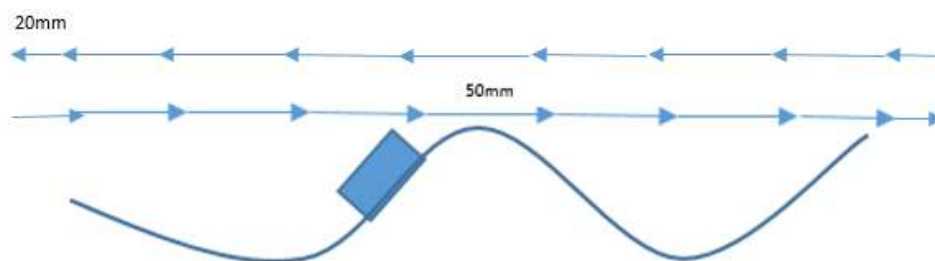
### 2.5.1 Geometrian mittaukset

Geometristen mittauksien avulla selvitetään olennaisesti koneen työstötarkkuuteen vaikuttavien elinten muotovirheet ja niiden keskinäiset sijainnit ja asennot, toisin sanoen työstökoneen asennuksen tarkkuus. Tarkastuksessa käytetään joko työstökoneen valmistajan laatimaa tarkastusohjetta tai työstökonekohtaista ISO-, DIN tai JIN- standardia. Keskeisimpiä mittauksia ovat:

- Vaaitus
- Heitot
- Johteiden ja liikkeiden suoruus
- Kohtisuoruudet
- Yhdensuuntaisuudet
- Kiertymät

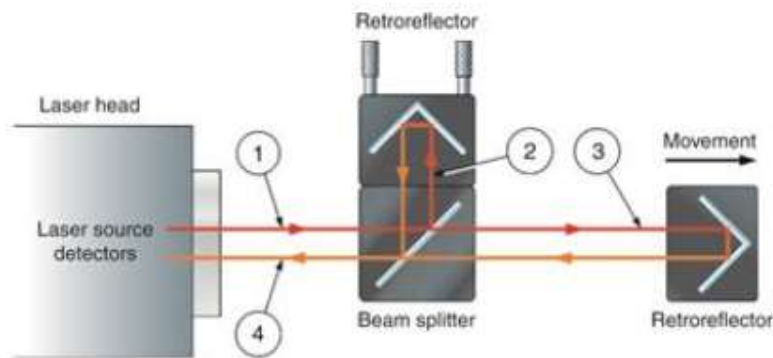
### 2.5.2 Paikoitustarkkuuden mittaukset

Geometrian lisäksi työstökoneille tehdään paikoitustarkkuuden mittaus. Tässä mittauksessa tarkastetaan koneen lineaari- ja pyörähdysakselien asteikkojen tarkkuus. Toisin sanoen selvitetään koneen kyky paikoittaa numeerisesti ohjatut liikkuvat elementtinsä työalueella olevaan asemaan. Mittaus tehdään esimerkiksi 50 mm välein molempiin suuntiin koko akselin liikematkalla. Liikeakselin molempiin päihin jätetään noin 10-30 mm käännösmatka, jolla saadaan työstökoneen käännösvirhe näkyviin mittauksessa. Kuviossa 12 on esitetty käännösvirhe, joka on sinisen ja punaisen viivan etäisyys toisistaan. Kuvioissa 10 ja 11 paikoitustarkkuuden mittaukseen liittyvät havainnointi.



KUVIO 10 Paikoitustarkkuuden mittausaskeleet

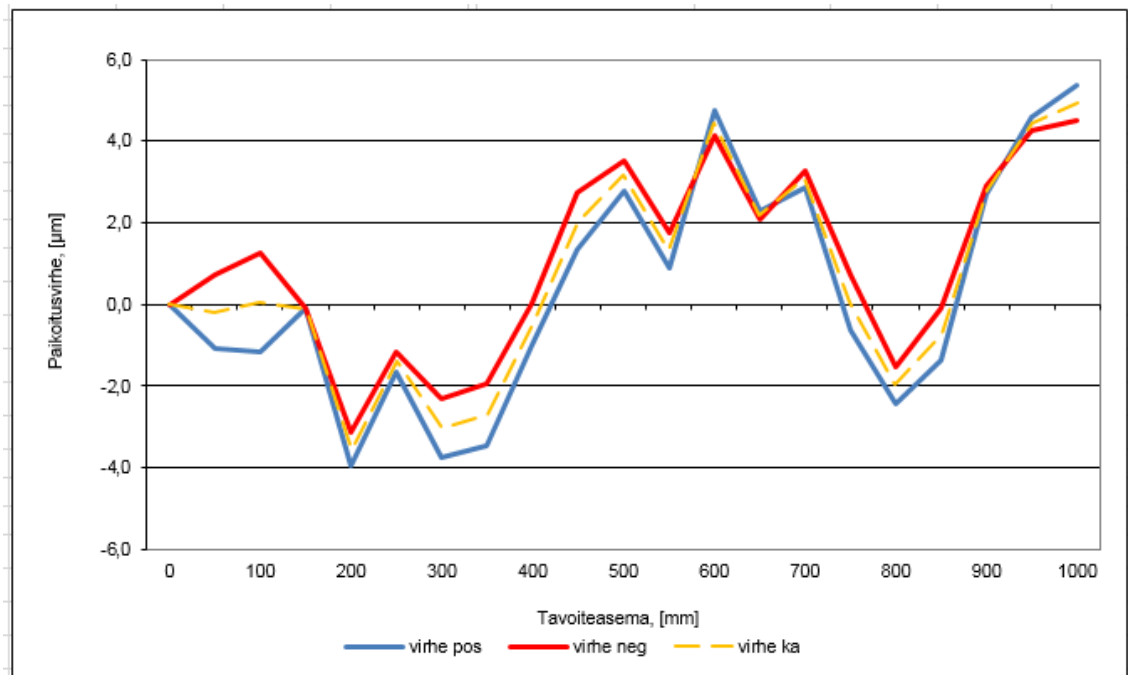
Paikoitusta mitattaessa suositeltava akselin nopeus on pikaliike. Kuhunkin tavoitepisteeseen tulee ohjelmoida viive, jonka pituus riippuu työstökoneen stabiiliudesta. Tavanomaisen viiveen pituus on 3-7 sekuntia. Tehtäessä tilastollinen tarkastus, edestakainen mittaus tehdään 5 kertaa peräkkäin. Mittaus tehdään laserinterferometrillä. Laserinterferometriä periaate selviää kuvista 10. Kuvio esittää pystykaraisen työstökeskuksen X-akselin paikoitustarkkuuden mittausta.



KUVIO 11 Paikoitustarkkuusmittaus laserinterferometrillä (Renishaw)

Työstökoneissa ohjauksissa on kahdentyyppisiä taulukoita paikoituskompensointipisteille. Vanhemmissa koneissa on vain yksisuuntainen kompensointi per akseli. Tämä tarkoittaa sitä, että kussakin pisteessä on plus ja miinus suuntaliikkeen virheen keskiarvo. Uusissa työstökoneissa pystytään laittamaan akselikohtaisesti plus ja miinus liikesuuntiin omat kompensointiarvot.

Kuviossa 12 on esitetty paikoitustarkkuuden mittaus 1000 mm matkalle. Sininen viiva kuvaa akselin plus liikkeen suuntaa. Punainen viiva kuvaa miinus liikesuuntaa ja keltainen viiva on niiden keskiarvo.



KUVIO 12. Paikoitustarkkuuden mittaustulos

Mittaukset tehdään ja tulokset verrataan työstökoneen tyypin standardiin tai koneen valmistajan tarkastusohjeisiin. Liite 2 on esimerkki vaakakaraisen työstökeskuksen VDI/DGQ 3441-standarsin mukaisesta paikoitustarkkuudesta ja geometrian mittauksesta. Paikoitustarkkuuden osalta ei ole olemassa kansainvälistä konetyyppikohtaista normistoa kuten on geometrian mittauksessa. Tulosten käsittelyä koskevia normeja ovat julkaisseet ISO, saksalainen VDI, japanilainen JIS ja amerikkalainen ANSI.

Työstökoneetta ostettaessa on hyvä sopia heti työstökoneen vastaanottotarkastuksesta ostajan puolelta. Tällöin myyjän kanssa tulee selvittää, mitä tarkastuksessa mitataan ja kuka mittauksen suorittaa. On suotavaa, että kolmas ulkopuolinen osapuoli tekee vastaanotto-tarkastuksen. Tällöin selvitetään myös, mistä paikoitustarkkuudessa on kysymys ja mitä eri suureet ja termit tarkoittavat. Toisin sanoen katsotaan, minkä standardin mukaan kone mitataan.

### 3 SIMULOINTI

Tietotekniikan kehittyminen 1990-luvulla edesauttoi simulointiohjelmien kehitystä. Simuloinnin käyttö aikoi yleistyä, kun ohjelmistoista tuli käyttäjäystävällisempiä. (Andersson & Olsson 1998, 935-941.) Simulointi käsitteenä voidaan luokitella monella eri tavalla. Robinsonin (1994) mukaan simuloinnilla tarkoitetaan todellisuutta jäljittelevää konemallia. Konemallilla simuloidaan tuotantokappaleiden valmistusta. Simuloinnilla voidaan suunnitella esimerkiksi konepajan tuotannonohjausta, kuormitusta ja valmistettavien tuotteiden menetelmäsuunnittelua. Simulointi on päätöksiä tukeva työkalu. (Robinson 1994, 246.)

Virtuaaliset vuorovaikutteiset työkalut kuten CAD, CAE ja CAM ovat nykyaikaisia ohjelmistoja, joilla tuotetaan kokonaisvaltaista tuotekehitystä, valmistusta ja kierrätystä. Ohjelmistot yhdistetään PLM-alustoille. PLM-alustojen käyttö tuo kilpailuetua uusien tuotteiden kehittämiseen. (Gomes, Castiblanco, Osorio 2016, 2.)

Tässä opinnäytetyössä käsitellään tietokoneella tehtävää työstökonesimulointia. Simulointi tapahtuu työstökonemallin avulla. Mallissa on kaksi liikeakselia. X-akseli antaa kappaleen halkaisijan ja Z-akseli antaa kappaleen pituuden. Käytössä oleva työstökone-malli on sorvi.

CNC-työstökone koostuu tietokoneesta sekä tehoelektroniikan osista, kuten moottorivahvistimista, virtapiireistä, servoista ja toimilaitteista. Tietokonesäätöyksikkö saa ISO-standardin NC-ohjelmat, jotka kuvaavat työstöradan geometriaa, työkalunumeroita sekä syöttö- ja leikkuunopeutta kussakin työstöradan segmentissä. (Pritschow, Berkemer, Burger, Croon, Korajda, Röck 2003, 219-246.)



## 4 CAM / POSTPROSESSORI

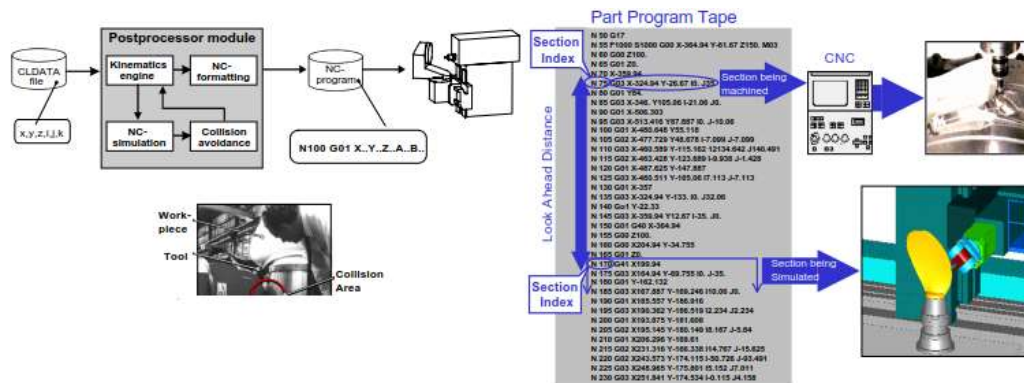
Tietokoneet tulivat vahvasti mukaan valmistusprosessin suunnitteluun 1970-1980-luvun taitteessa. CAM-ohjelmistot alkoivat kehittyä 1990-luvulla tietokoneiden kehittymisen myötä. Ohjelmistot kehittyvät nopeaa vauhtia CAM-ohjelmistojen käytön yleistymisen johdosta 2000-luvulla.

Valmistavassa teollisuudessa termi CAM määritellään automaattiseksi valmistusjärjestelmäksi, joka on tietokoneohjattu. Käytännössä CAM tarkoittaa CAD-mallin muuttamista NC-koodiksi. NC-koodi ohjaa CNC-työstökoneita. CAD-malli sisältää kappaleen geometria- ja MBD-tiedon, valmistuksessa käytettävien työkalujen tiedot, työstökoneen ominaisuudet sekä työstettävän materiaalin lastuamisparametrit. CAM-ohjelma voi olla itsenäinen työkalu tai sitten se on yhdistetty CAD-ohjelmaan, jolloin puhutaan CAD/CAM-ohjelmistoista.

CAM-ohjelmistosta saadaan suurin hyöty valmistuksessa silloin, kun sitä käytetään 5-akselisessa koneistuksessa. Suunnittelussakin saavutetaan hyötyä, kun yritys pystyy ottamaan huomioon kappaleiden valmistusprosessin jo suunnitteluvaiheessa. Valmistusprosessin tarkasti huomioiva suunnittelu laskee tyypillisesti suunnittelu- ja valmistuskustannuksia, kun vältetään ylimääräiseltä työltä. Valmistusprosessin vähäinen huomioiminen suunnittelussa voi aiheuttaa epäselvyyksiä tuotantoketjussa.

Yksinkertaisesti ajateltuna postprosessori on tietynlainen kääntäjä. CAM-ohjelmiston tuottama työstöoperaation CL-tiedosto, joka sisältää esimerkiksi työstöradat, työkalut ja työstönopeudet, käännetään kääntäjällä työstökoneella suoritettavaksi NC-koodiksi (G-koodiksi). (Yeung, Ho, Altintas, Erkorkmaz 2004,)

CAM-ohjelmistot tuottavat yhtä tai useamman tyyppistä NC-kieltä. NC-kielen muoto on ohjaustyyppistä riippuvaa ISO-koodia. NC-kieleen lisätään työstökonekohtaisia variantteja, jotka määräytyvät koneen optioiden mukaan. CAM-ohjelmiston tiedostot ovat joko CLDATA:ksi kutsutussa binäärimuodossa tai APT-kielen pohjalta räätälöidyssä ASCII-muodossa. ASCII-muodossa olevia tiedostoja voi lukea millä tahansa tekstieditorilla, mutta binääridataa ei voi lukea tietämättä datan rakennetta. Postprosessorin tehtävänä on lukea tätä tiedostoformaattia ja kääntää se CNC-koneelle sopivaksi G-koodiksi, jolla työstö tehdään.



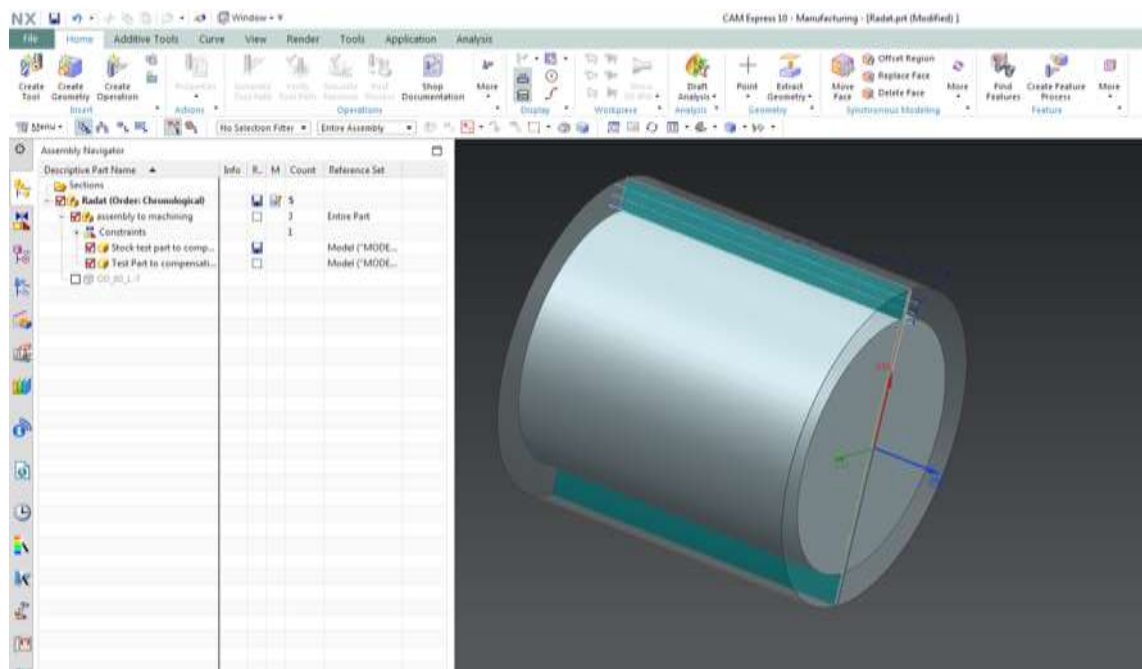
KUVIO 13. NC-simuloinnin yhdistyminen CNC-ohjaukseen (Yeung, C.Ho, Altintas, Y., Erkorkmaz, K.,)

CAM-ohjelmistot sisältävät postprosessoreita, jotka eivät ole välttämättä optimaalisia käytössä oleviin työstökoneisiin. Työstökonekohtainen postprossori voidaan hankkia kolmella tavalla. Ensimmäinen tapa on ostaa postprossori CAM-ohjelmistojen toimittajilta. Tällöin ohjelmiston valmistaja räätälöi postprossorin asiakkaansa työstökoneisiin toimiviksi. Toinen tapa on, että postprossorin tekee kolmas osapuoli, täysin ulkopuolinen yritys, joka voi olla CAM-ohjelmiston yhteistyökumppani tai ohjelmistojen tekemiseen erikoistunut yritys. Onkin siis tärkeää selvittää ohjelmistoa ostaessa se, mistä laadukkaat ja toimivat postprossorit ovat hankittavissa juuri omille käytössä oleville NC-koneille. Tämän lisäksi pitää miettiä, miten on jatkossa mahdollista saada postprossoreille päivityksiä ja teknistä tukea. Kolmas tapa on tehdä postprossori itse.

Kappaleen mallitiedostoa ei aina pystytä siirtämään natiivi-muodossa CAM- ja CAD-ohjelmistojen välillä. Tällöin joudutaan käyttämään jotakin yleistä tiedonsiirtoformaattia, jota CAM-ohjelmisto tukee. Tällaisia tiedonsiirtoformaatteja ovat esimerkiksi STEP tai STL. Olisi helpompaa käyttää natiivia tiedostoformaattia, jotta pystyisimme hyödyntämään MBD-tietoa 3D-malleissa. Tällöin voitaisiin jättää 2D-piirustukset kokonaan pois. 2D-piirustuksen pois jättäminen toisi myös kustannussäästöjä suunnitteluun. (Laaksonen, Nieminen, Pulkkinen, Rapinoja, Simons, Uski, Salminen, Vainionpää 2016, 10-15.)

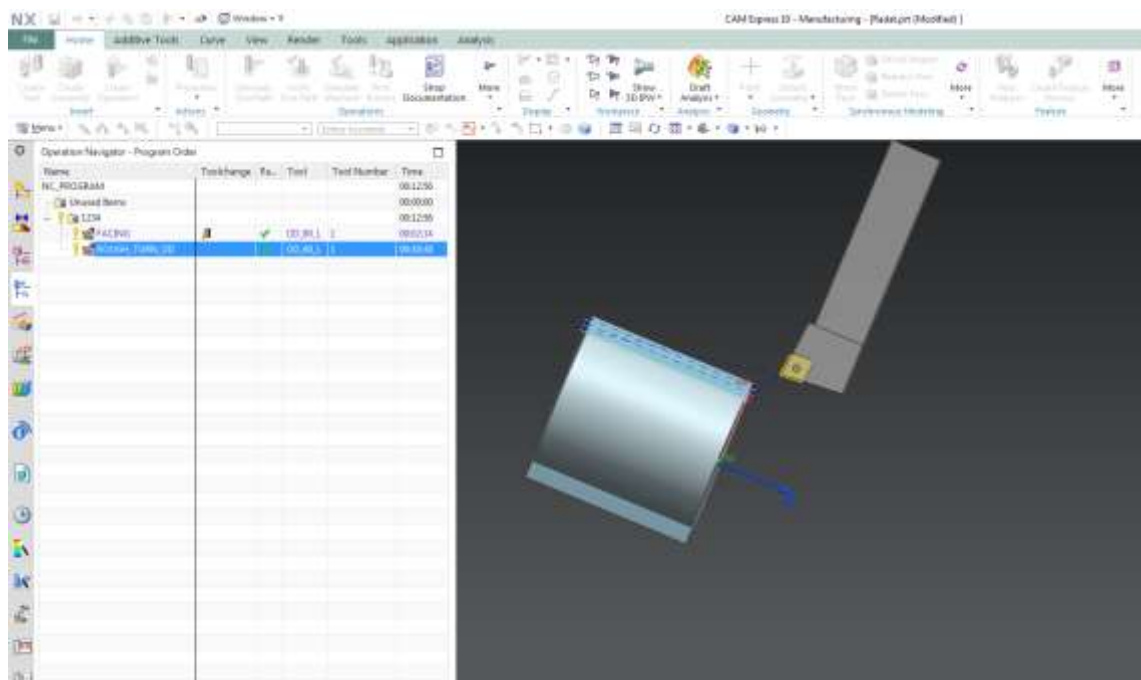
## 4.1 Siemens CAM express

Sorvaustyöstöradan luomiseen Siemensin CAM-ohjelmistolla tarvitaan kappaleen 3D-malli. Kappaleen 3D-mallia luodessa on hyvä muistaa kaksi valmistuksen kannalta tärkeä asia. Ensinnäkin, kappale suunnitellaan oikeaan koordinaatistoon. Sorvattava kappale tehdään XZ-koordinaatistoon, mikä johtuu sorvin koordinaatistosta. Sorvin X-akseli on kappaleen halkaisija ja Z-akseli on kappaleen pituus. Koordinaatistossa +Z on kappaleen otsapinnasta pois päin ja +X on kappaleen sisältä ulospäin. Koordinaatisto origo sijaitsee kappaleen otsapinnassa keskellä pyörähdyssymmetriaa. Toisekseen, on hyvä tarkastaa, millaisia standardiaihioita on saatavilla. Sorvauksessa käytetään aihiona useasti pyörätereistä. Aihioistakin tehdään 3D-malli ja sen koordinaatisto on samoin kuin valmistettavassa kappaleessakin. Tässä vaiheessa päätetään myös tärkeä valmistukseen vaikuttavia asia: aihion pituus. Aihion pituus on usein 2 mm pitempi kuin kappale, jotta kappaleen otsapinta saadaan sorvattua puhtaaksi. Kun kappaleesta ja aihioista on tehty 3D-mallit, tehdään näille kokoonpano. Kokoonpanossa valmistettava kappale on aihion sisällä niin, että molemmissa päissä on 1mm työvara. Kuviossa 14 selviää kokoonpanon kappaleet ja origon paikka.

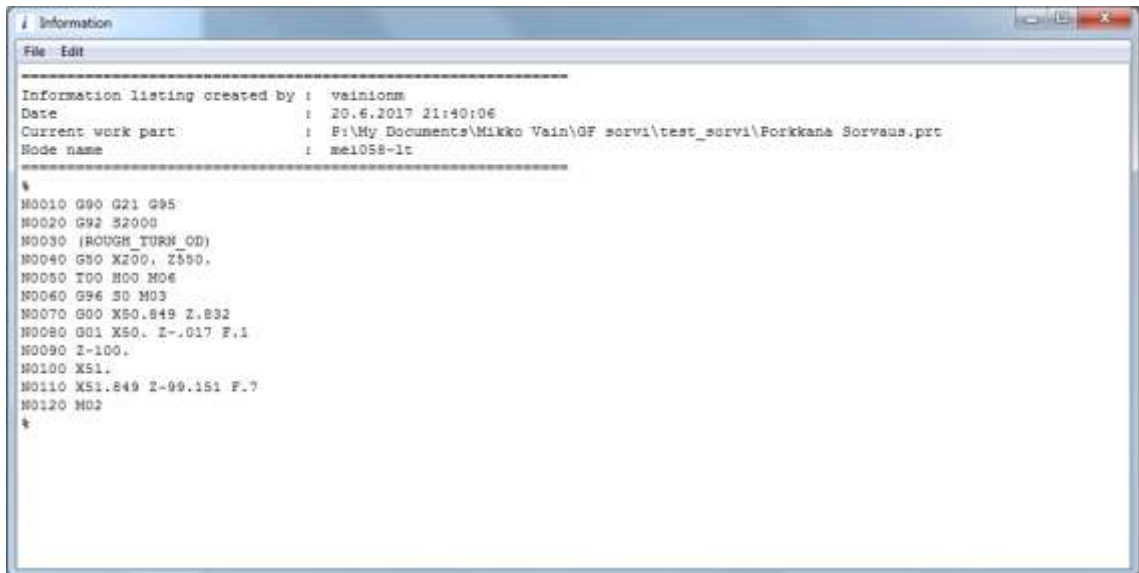


KUVIO 14. Koordinaatiston origo.

Valmistettavan kappaleen ja aihion kokoonpanoa hyödynnetään CAM-ohjelmistossa. Aluksi määritellään se, kumpi 3D-malleista on aihio, ja kumpi varsinainen valmistettava kappale. Kun työstöstrategia on valittu (esimerkiksi pituussorvaus), osoitetaan 3D-malleista valmistettavan kappaleen pinta. Tämä pinta määrittää X-akselin ja Z-akselin materiaalin poiston. Aihion ja kappaleen tiedon avulla pystytään automaattisesti määrittämään poistettavan materiaalin määrä. Työstörataan määritellään  $A_p$ . Määrityksen jälkeen CAM jakaa aihio- ja kappaletiedon perusteella tarvittavan määrän lastuja. Työstörataan määritellään liikeradat terän kappaleeseen lähestymiselle ja terän kappaleesta poistumiseen. Näillä määritellyillä liikeradoilla vältetään terän kolareilta kappaleeseen tai aihioon. Työkalun määrittäminen alkaa teräpalkan muodon valinnalla. Teräpalaan valitaan sopivan kokoinen terävarsi. Sen tulee olla samankokoinen kuin käytettävässä työstökoneessa. Työkalulle määritellään lastuamisnopeus ja syöttö per kierros. Kuviossa 15 on esitetty työstöradan simulointi ja työkalua. Jos työstöradan simuloinnissa ei tule kolareita, on työstörata valmis postprosessoitavaksi. Kuviossa 16 on postprosessoitu työstörata CNC-koneelle sopivaksi NC-koodiksi käännettynä.



KUVIO 15. Työstöradan simulointi ja siihen sopiva työkalu



```

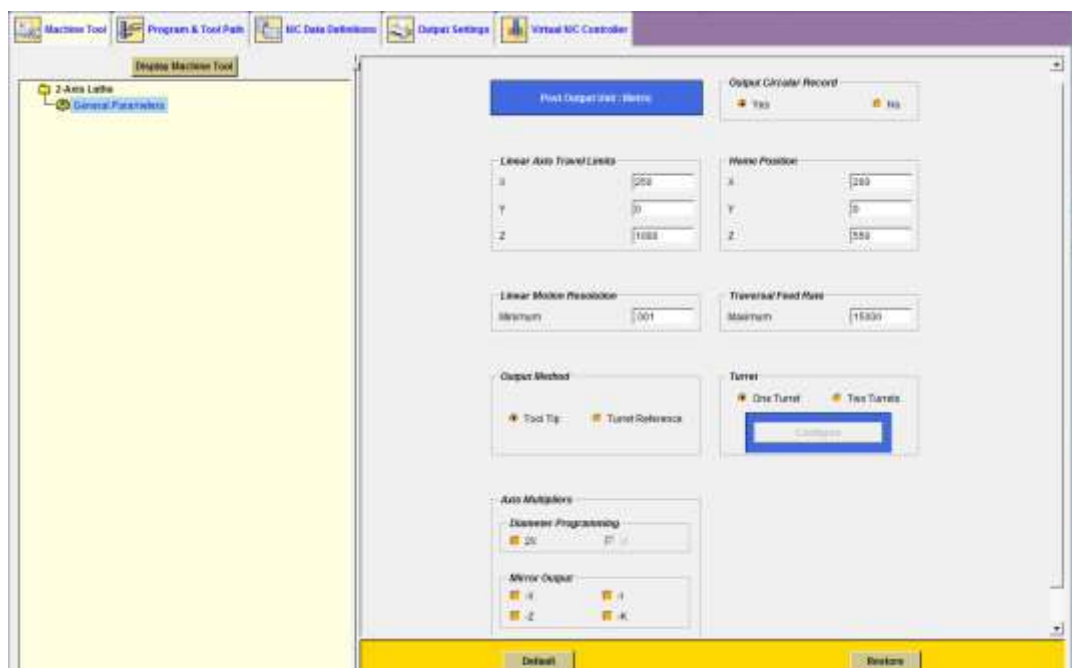
Information listing created by : vainionm
Date : 20.6.2017 21:40:06
Current work part : F:\My Documents\Mikko Vain\OF sorvi\test_sorvi\Forkkana Sorvaus.prt
Node name : mel058-1t
-----
%
N0010 G90 G21 G95
N0020 G92 S2000
N0030 (ROUGH TURN OD)
N0040 G90 X200, Z550.
N0050 T00 M00 M06
N0060 G96 S0 M03
N0070 G00 X50.849 Z.832
N0080 G01 X50. Z-.017 F.1
N0090 Z-100.
N0100 X51.
N0110 X51.849 Z-99.151 F.7
N0120 M02
%

```

KUVIO 16. NC-koodi ilman geometrista korjainta

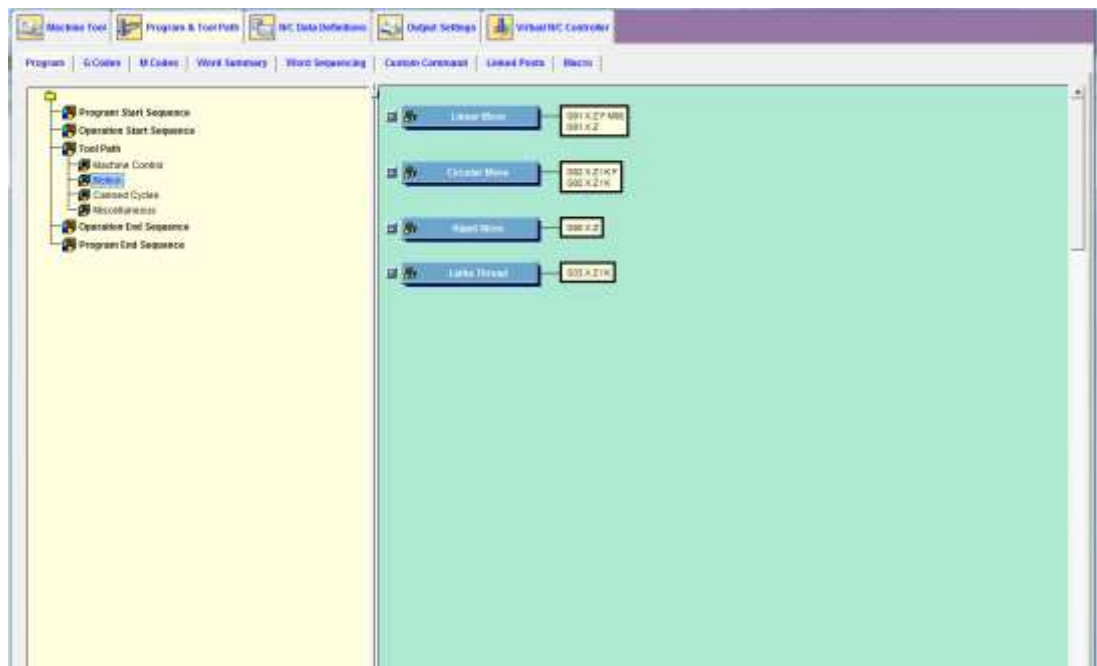
## 4.2 Siemens post builder

Siemens CAM express postprocessorin kieli perustuu avoimeen lähdekoodikieleen (tool command language). Postprocessorin ohjelmointi on graafista ohjelmointia. Postprocessorin rakentamiseen Post builder:ssä on selkeä välilehtirakenne. Ensimmäisellä välilehdellä määritellään työstökoneen parametrit, kuten esimerkiksi koneen akselit X ja Z. Postprocessoriin määritellään myös työstökoneen akseleiden pituudet, pikaliikkeen nopeus, akselin resoluutio ja työkalun vaihtometodi (ks. kuvio 17).



KUVIO 17. Työstökoneen parametrivalikko

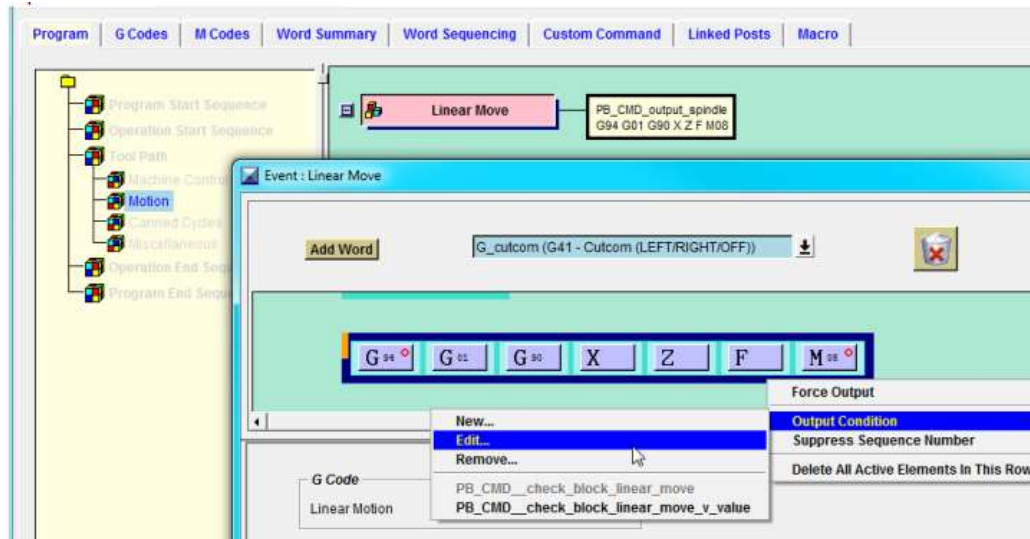
Toisella välilehdellä määritellään NC-ohjelman ja työstöratojen rutiinimääritykset eli se, millaista G-koodia postprosessorilla kirjoitetaan. Välilehdellä määritellään NC-ohjelman alkuun kirjoitettavat G- ja M-koodit. Näillä edellä mainituilla koodeilla saadaan aikaiseksi NC-koodiin lähestymisliikkeet, poistumisliikkeet sekä työstöradan loppuun kirjoitettavat käskyt, kuten teränvaihtopiste. Esimerkiksi CAM:ssä tehtävään lähestymisliikkeeseen on neljä mahdollista vaihtoehtoa riippuen siitä, mikä optio valitaan. Vaihtoehtoina ovat suoraviivainen syöttöliikekäsky G01, suoraviivainen pikaliikekäsky G00, ympyränkaariliike G02 tai G03. Normaaliliikekäskyyn tulee näiden lisäksi vielä yksi optio: kierteensorvaus liikekäsky G33 (ks. kuvio 18).



KUVIO 18. Liikekäskyt

Ohjelma- ja työstöratavälilehdellä on alavälilehtiä, joilla määritellään G- ja M-koodeja työstökoneeseen. Näillä välilehdillä voidaan rakentaa myös aliohjelmaa liikekäskyille. Aliohjelmaa kutsutaan, kun CAM:ssä on tehty tietynlainen poistumisliike kappaleesta. Aliohjelma kirjoittaa NC-ohjelmaan kyseisen liikkeen G-koodina. Sillä kirjoitetaan CAM:ssä määritetyt karan pyörimisnopeudet ja pyörimissuunnat. Aliohjelmalla voidaan toteuttaa koko työkaluvaihtorutiini. Yksi aliohjelma sisältää tällöin teränvaihtopisteen paikan, käskyn ottaa seuraava työkalu valmiiksi työkaluketjulle ja vaihtaa karalla oleva työkalu tähän.

Rakensin geometrisen kompensointialiohjelman lineaariliikevälilehdelle (ks. kuvio 19). Liikekäskyssä tarkistetaan liikkeen pituus ja tarvittaessa aliohjelma jakaa matkan osiin. Kutsun näitä paloja kompensointipisteiksi. Kuviossa 20 on esitetty aliohjelmaohjelmointia. Tätä ohjelmaa kutsutaan erillisellä käskyllä, jossa määritellään kompensointiarvon suuruus suhteessa Z-akseliin arvoon. Kuviossa 21 on esitetty kutsukäsky.



KUVIO 19. Kompensoinnin rakentaminen lineaariliikekäskyllä

```
set v3 [expr abs($mom_pos(2)) - abs($mom_prev_pos(2))]
if { $v3 > 10.0 } {

  for { set i 0 } { $i < 10 } { incr i } {
    set v4 [expr $mom_pos(2) / 10]
    set v4 [expr $v4 * $i]

    PB_CMD__check_block_linear_move_v_value
    set v5 [expr $v2 + $mom_pos(0)]

    MOM_do_template linear_move_1
  }
}
```

Kuvio 20. pituuden ja pilkonnän aliohjelma

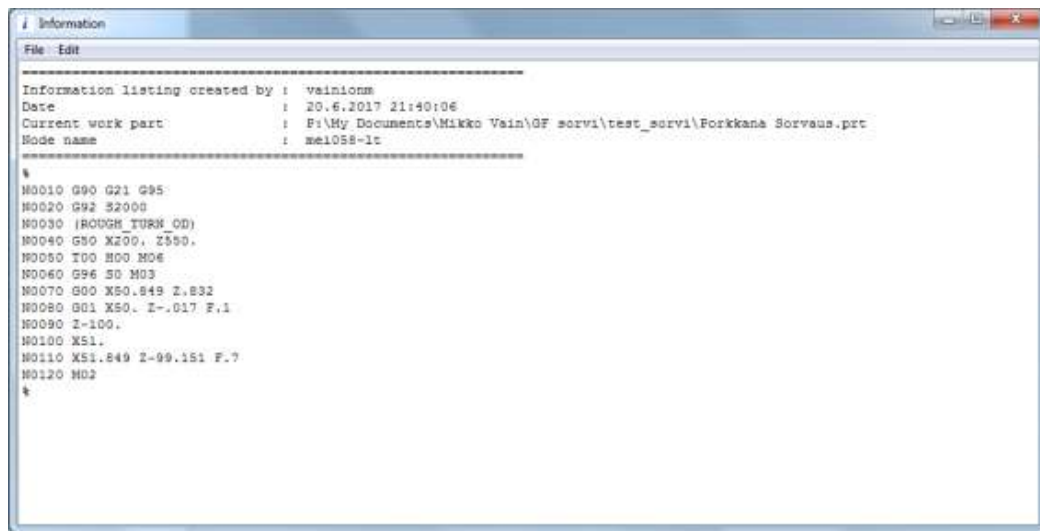
```
global mom_pos v1 v2 v4
global mom_csys_origin

set v1 [expr $mom_csys_origin(2) - abs($v4)]

if { $v1 <= 150.0 } {
  set v2 [expr 0.01 * $v4]
} elseif { $v1 <= 130.0 } {
  set v2 [expr 0.01 * $v4]
} elseif { $v1 <= 110.0 } {
  set v2 [expr 0.01 * $v4]
} elseif { $v1 <= 90.0 } {
```

KUVIO 21. kutsukäsky

Kun halutaan käyttää geometrista kompensointia G-koodin käännössä, tulee postprosessorissa ottaa käyttöön kompensoiva lineaariliikekäskey. Kun työstökone on korjattu, tulee vanha suoraviivainen lineaariliikekäskey ottaa käyttöön postprosessorissa. Näiden kahden liikekäskeyn eroavaisuus on X-akselin liikkeen kirjoittaminen G-koodissa. Kuviossa 22 on esitetty G-koodi ilman geometristä kompensointia, ja kuviossa 23 on esitetty G-koodi geometrisellä kompensoinnilla.

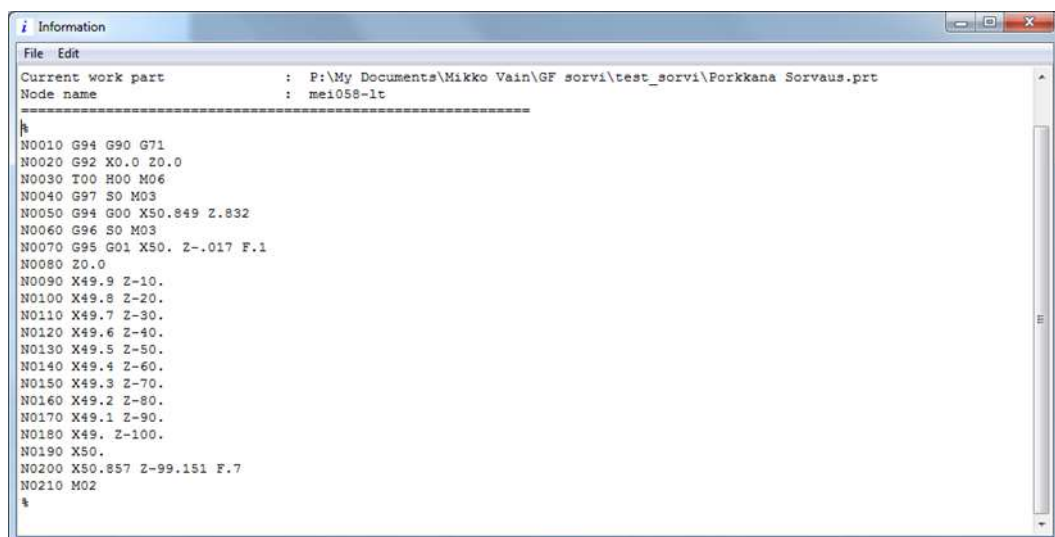


```

Information
File Edit
-----
Information listing created by : vainionm
Date : 20.6.2017 21:40:06
Current work part : F:\My Documents\Mikko Vain\GF sorvi\test_sorvi\Forkkana Sorvaus.prt
Node name : mei058-1t
-----
%
N0010 G90 G21 G95
N0020 G92 S2000
N0030 (ROUGH TURN OD)
N0040 G90 X200. Z50.
N0050 T00 H00 M06
N0060 G96 S0 M03
N0070 G00 X50.849 Z.832
N0080 G01 X50. Z-.017 F.1
N0090 Z-100.
N0100 X51.
N0110 X51.849 Z-99.151 F.7
N0120 M02
%

```

KUVIO 22. Kulmavirheen korjaava postprosessori



```

Information
File Edit
-----
Current work part : F:\My Documents\Mikko Vain\GF sorvi\test_sorvi\Forkkana Sorvaus.prt
Node name : mei058-1t
-----
%
N0010 G94 G90 G71
N0020 G92 X0.0 Z0.0
N0030 T00 H00 M06
N0040 G97 S0 M03
N0050 G94 G00 X50.849 Z.832
N0060 G96 S0 M03
N0070 G95 G01 X50. Z-.017 F.1
N0080 Z0.0
N0090 X49.9 Z-10.
N0100 X49.8 Z-20.
N0110 X49.7 Z-30.
N0120 X49.6 Z-40.
N0130 X49.5 Z-50.
N0140 X49.4 Z-60.
N0150 X49.3 Z-70.
N0160 X49.2 Z-80.
N0170 X49.1 Z-90.
N0180 X49. Z-100.
N0190 X50.
N0200 X50.857 Z-99.151 F.7
N0210 M02
%

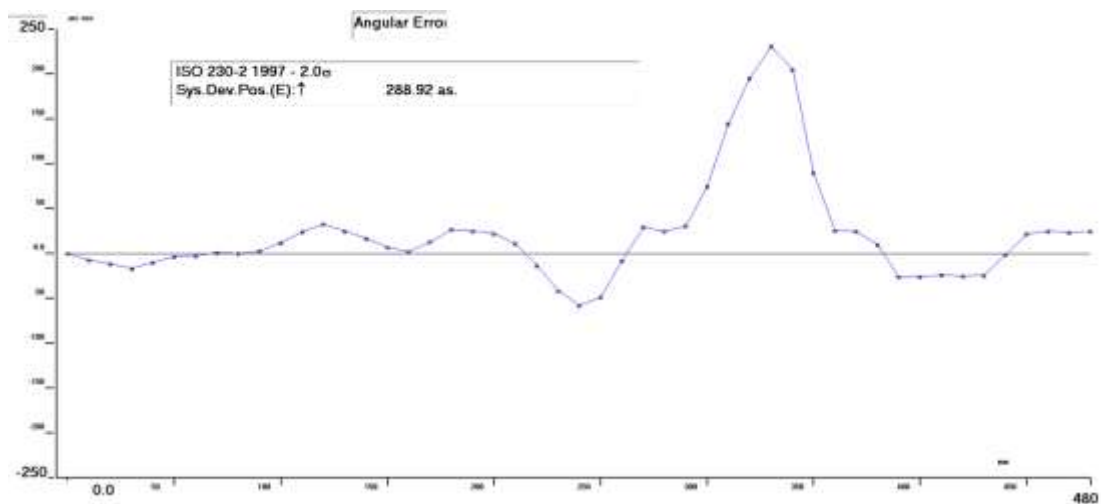
```

KUVIO 23. Kulmavirheen korjaava postprosessori



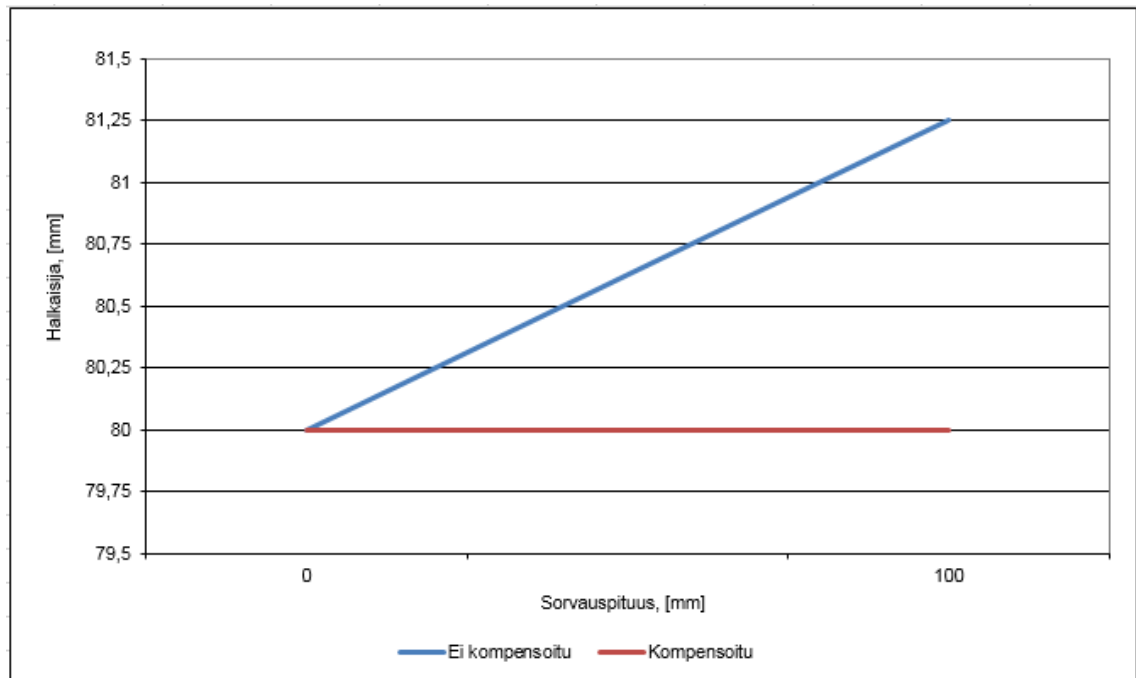
Yksinkertaisesti asian voi ajatella niin, että postprosessori jakaa Z-akselilla kuljetun matkan paloihin. Kun sorvattava pituus on esimerkiksi 100 millimetrinen, voidaan postprosessorissa määrittellä kompensointipisteitten määräksi 10 kappaletta tälle matkalle. Postprosessorissa kerrotaan myös kartiomaisuuden suuruus millimetreissä. Jokaisessa Z-akselin pisteessä on oma kompensointiarvo, jonka X-akseli toteuttaa. Kun kartiomaisuus on testikappaleessa työstökoneen karan puoleisessa päässä halkaisijaltaan suurempi, X-akseli pienentää sorvaushalkaisijaa jokaisessa kompensointipisteessä karaa lähestyttäessä.

Kuviossa 24 on esitetty kolarin jälkeinen tilanne koneen Z-akselilla. Mittaus on tehty laserinterferometrillä kulmamittausoptiikalla. Kuviossa 24 havainnollistetaan työstökoneen johteen nousemavirhe.



KUVIO 24. geometrian virhe työstökoneen johteessa

Esimerkiksi sorvattaessa kappaletta, jonka halkaisija on 80 mm ja sorvauksen tapahtuessa kuvion 24 maksiminousemavirheen kohdalla, halkaisija on 81.25 maksimivirheen kohdalla. Kappaleeseen tulevan virheen pystyy myös laskemaan, kun 1 sekuntikulma on 0.005 mm ja virheen suuruus on 250 sekuntikulmaa. Kertomalla sekuntikulman millimetrimillä, maksimivirheeksi tulee 1,25 mm. Tämä virhe korjataan postprosessorissa. Kappaleesta tulee tasapaksu koko sorvauspituudelta (ks. kuvio 25).



Kuvio 25. kappaleen halkaisija muutos kompensoituna ja ei kompensoituna

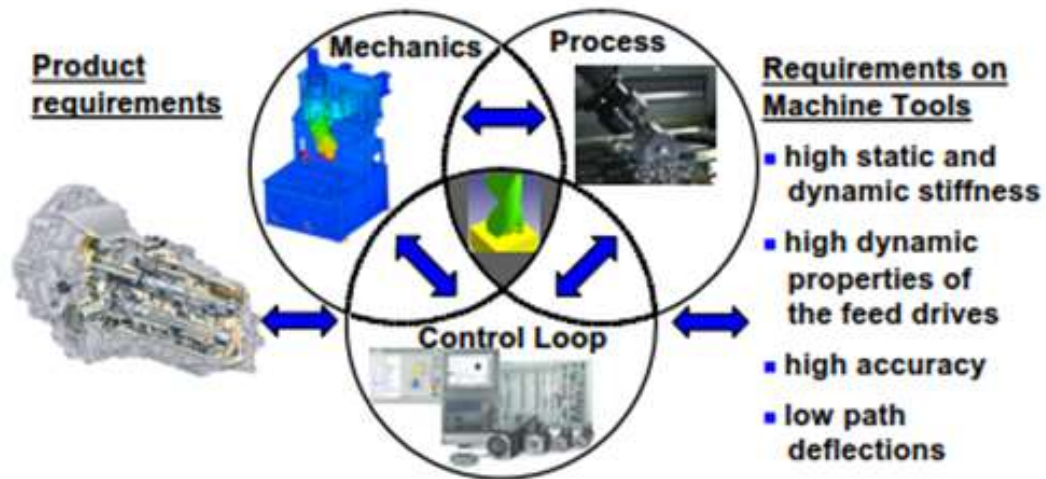
Kolmannella välilehdellä määritellään postprosessorin rakentamisessa työstökoneen M-kooditoiminnot. Esimerkiksi M8 tarkoittaa ”leikkuuneste päälle” ja M9 ”leikkuuneste pois päältä”. Näillä välilehdillä määritellään työstökoneen M-koodit työstökoneelle, jolle postprosessoria rakennetaan.

## 5 VIRTUAALITYÖSTÖKONE

Virtuaalityöstökone on yksi osa virtuaalista valmistussuunnittelua. CAM-järjestelmät kuvaavat vain työkalun materiaaliin leikkaamaa työstörataa. Virtuaalityöstökoneella pystytään simuloimaan muutakin kuin pelkkää terää. CNC-työstökoneen simulointi käsittää virtuaalityöstökonekoneen mallin, koneen kinematiikan sekä syöttöservojen dynamiikan. Kun leikkaava terä on suorittanut virtuaalikoneessa työstöratansa, simulointi päivittää työkappaleeseen työstöradan muodot. Virtuaalinen työstökone tekee myös servojen liikkeitä ja apulaitteiden toiminnot, kuten työkalujen ja palettien vaihdon. Lyhyesti sanottuna virtuaalityöstökone tekee geometrisesti virheettömät työstökoneen liikkeet ja CNC-toiminnot työkappaletta valmistettaessa. (Pritschow, Altintas, Javone, Koren, Mitsubishi, Takata, Van Brussel, Weck, Yamazaki 2001, 446-463.)

Kun NC-ohjelma on tehty CAD/CAM-ohjelmistolla, virtuaalinen CNC-tekniikka mahdollistaa työkappaleen geometrisen päivytyksen. Työkalu leikkaa materiaalin kussakin NC-lauseessa. (Pritschow, Altintas, Javone, Koren, Mitsubishi, Takata, Van Brussel, Weck, Yamazaki 2001, 446-463.) Virtuaalityöstökone mahdollistaa myös kiinnitinsuunnittelussa kappaleiden määrän ja sijainnin optimoinnin koneistusavaruudessa. Virtuaalityöstökoneella voidaan simuloida koko työstöprosessi sekä siihen liittyvät toiminnot ja aputoiminnot. Simuloinnissa nähdään, jos työstössä tulee kolari esimerkiksi osuttaessa pikaliikkeellä kappaleeseen tai kiinnittimiin. Jos syöttöliikkeellä osutaan koneen rakenteisiin tai kappaleen kiinnittimeen, tapahtuu myös kolari. Virtuaalikone kertoo lisäksi työstöavaruuden ylitykset, työkalujen vaihdot sekä koneistukseen kuluvan ajan. Selvästi erottuva etu virtuaalityöstökoneen ja CAM:in välillä on virtuaalityöstökoneen kyky tarkastaa koko työstöprosessi ja näin ollen säästää kone kalliilta kolarilta.

Nykyaikaiset työstökoneet ovat hyvin monimutkaisia mekatronisia järjestelmiä. Työstökoneen kyky ja tehokkuus määrittyvät pääasiallisesti sen kinematiikan ja rakenteellisen dynamiikan, tietokoneen, numeerisen ohjausjärjestelmän ja koneistusprosessin perusteella (ks. kuvio 26). Jotta voidaan varmistua valmistettavan protokappaleen laadusta, on tärkeää, että jokainen suunnittelu- ja valmistusvaihe on arvioitu virtuaalisella työstökoneella. (Altintas, Brecher, Weck, Witt 2005, 1.)



KUVIO 26. Työstökoneen mekatroninen järjestelmä. (Alintas, Brecher, Weck, Witt.)

On hyvä opettaa virtuaalitekniikan ominaisuudet perusteellisesti myös työstökoneen käyttäjälle. Virtuaalitekniikan koulutus antaa työstökoneen käyttäjälle laajemman käsityksen koneistusprosessista sekä realistisemmän kokemuksen työstöprosessista "todellisin aistein". (Kadir, Xu, Hammerle 2010, 12.)

Virtuaalisen työstökoneen mallin rakentaminen vaatii todellisen koneen geometrisen ja kinemaattisen mallin. Työstökoneen osat mallinnetaan ja osista tehdään kokoonpano. Työstökoneen osien tarkka kuvaus ei ole välttämätöntä, koska joitakin koneen osia voidaan yksinkertaistaa. Yksinkertaisen komponentin muotoa, esimerkiksi työstökoneen karaa, voi edustaa sylinteri. (Suh, Seo, Lee, Choi, Jeong, Kim 2003, 516-522.) Konemallin osien tulisi kuitenkin sijaita konemallissa oikeassa paikassa ja olla likimääräisesti oikean kokoisia. Tällöin sekä työstökoneen liikkeet, että kolarit työstöavaruudessa pystytään esittämään simuloinnissa riittävällä tarkkuudella. (Comez, Castiblano, Osorio 2016, 4.)

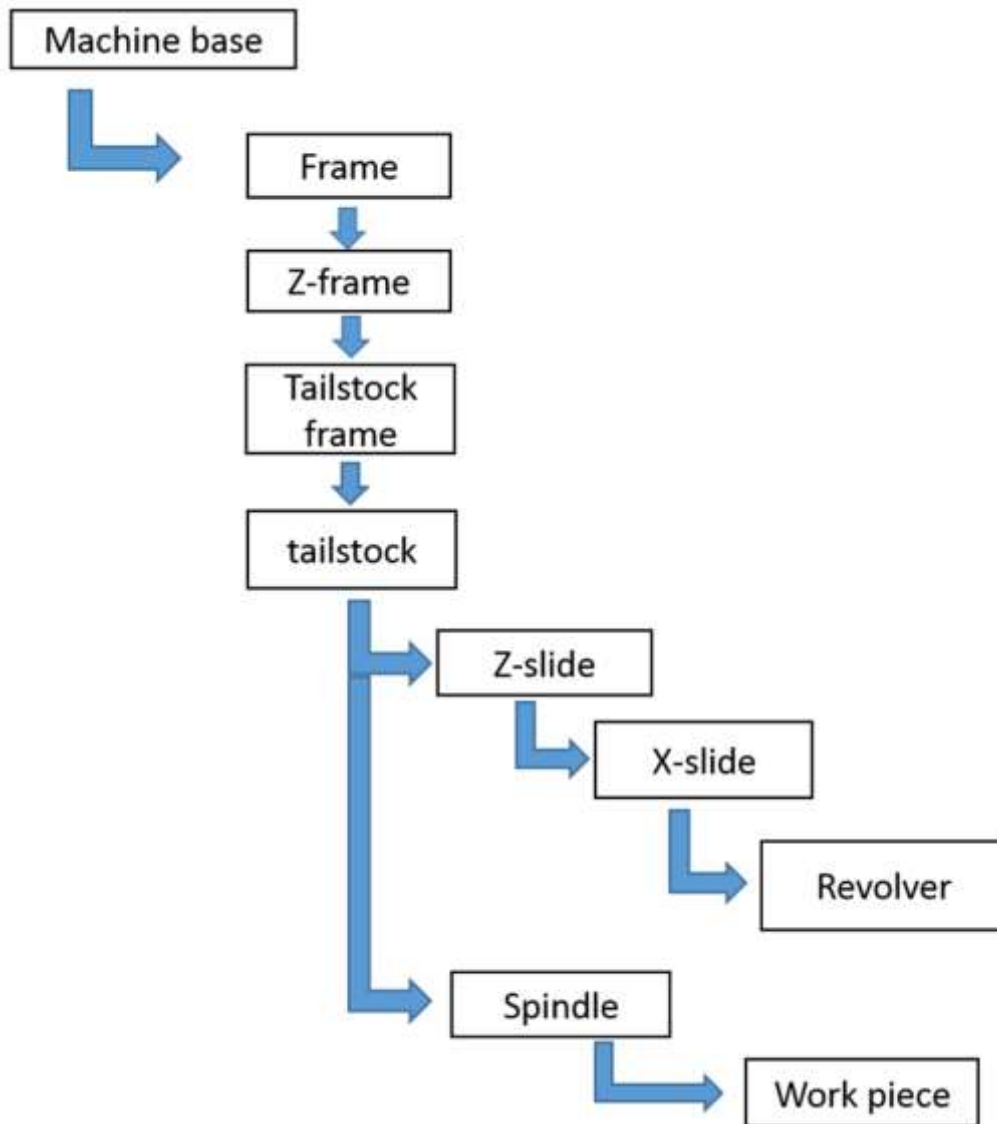
Vielä yksi syy virtuaalityöstökoneen käyttämiseen on sen kyky tarkastaa NC-koodi. Garcia ja kumppanit (2014) tutkivat parametrisen koodin käyttöä virtuaalityöstökoneessa. Tutkimuksessa tarkasteltiin kahden erilaisen ohjelmointitavan vaikutuksia valmistettavaan kappaleen geometriaan. Toinen ohjelmointitavoista oli parametrinen ohjelmointitapa ja toinen oli perinteinen CAM:istä käännetty lause lauseelta tehty G-koodi. (Garcia, Arroyo, Nieto 2014, 1-6.) Parametriohjelmoinnissa saadaan myös kaikki työstökoneen ohjauksen ominaisuudet tehokkaaseen käyttöön virtuaalityöstökoneessa. Jos verrataan parametriohjelmointia perinteiseen lause lauseelta ohjelmointiin, jota postprosessorit tuottavat, on parametrinen ohjelmointi helpommin luettavaa. Rivimäärä on vähäisempi ja ohjelmassa ilmenevät virheet ovat helpommin paikallistettavissa ja korjattavissa.

## 5.1 Virtuaalisen työstökoneen rakentaminen

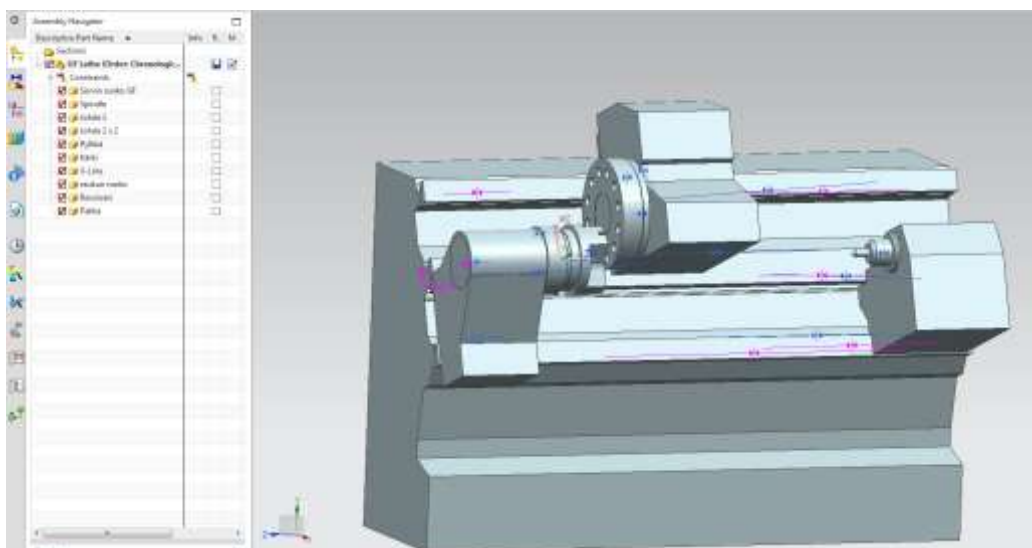
Virtuaalisen työstökoneen rakentamista varten täytyy tunnistaa kolmen askeleen lähestymistapa: **Ensiksi** tiedostetaan työstökoneesta oleelliset komponentit, jotka vaikuttavat simulointiin. 2-akselisen CNC-sorvin rakentamiseen tarvitaan viisi perustavanlaatuaista tietoa: (1) koneen työalueen koko (suurin pyörimään mahtuva kappale), (2) kunkin akselin liikematka, (3) karankeskiön maksimietäisyys revolverin pintaan (X,Y), (4) revolverin työkalukapasiteetti ja (5) keskiökärjen iskunpituus. Kaikki työstökoneen 3D-mallit täytyy sijoittaa samaan kansioon. Tämä kansio sisältää postprosessorin ja työstökoneen ohjauksen tiedoston. Näin työstökone on identifioitu tiettyyn postprosessoriin ja tiettyyn ohjaukseen. Taulukossa 2 on esitetty virtuaalityöstökoneeseen tarvittavat komponentit. **Toiseksi** työstökoneen komponenttien CAD-malleista tehdään kokoonpano, jossa identifioidaan koneen osien tehtävät sekä akselien suunnat ja funktiot. Tässä kohdassa kinemaattinen ketju määrittää työstökoneen komponentit (runko, X-akseli Z-akseli), työkappaleen pitimen (pakka), työkalun pitimen (revolveri) ja keskiökärjen. Kuviossa 27 on esitetty työstökoneen kinemaattinen ketju. **Kolmas askel** on tehdä postprosessori, jossa on geometrian kompensointi.

TAULUKKO 2. Virtuaalikoneen komponentit

|   |                 |  |             |             |              |                                      |
|---|-----------------|--|-------------|-------------|--------------|--------------------------------------|
| 1 | GF runko        |  | GF Z-akseli | GF X-akseli | GF revolveri | 2 lineaariakselia ja 1 pyöriväakseli |
| 2 | GF karan runko  |  | GF kara     |             |              | 1 pyöriväakseli                      |
| 3 | GF kärjen runko |  | GF kärki    |             |              | 1 lineaariakselia                    |



KUVIO 27. Virtuaalityöstökoneen kinemaattinen ketju.



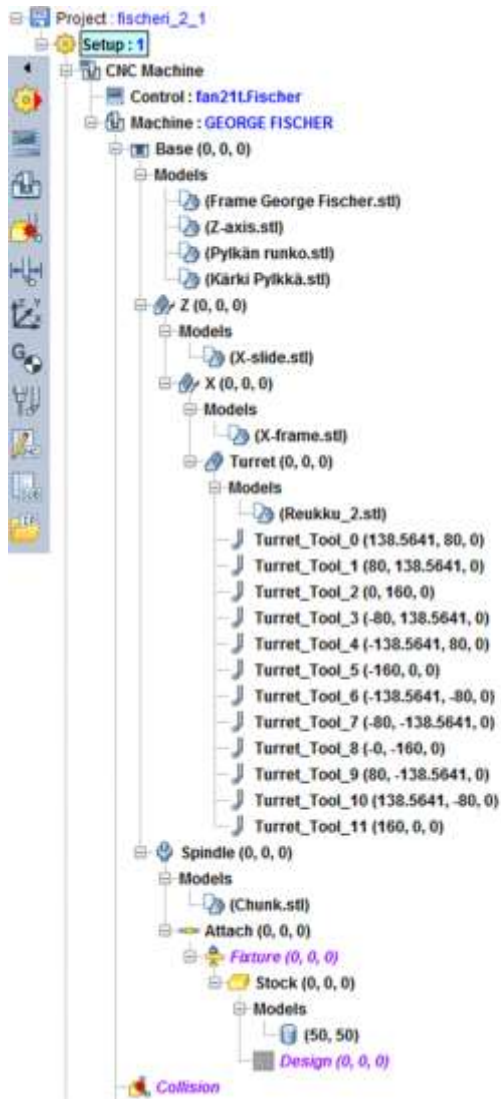
KUVIO 28.. Virtuaalisen työstökoneen kokoonpano NX10.

## 5.2 Konemalli Vericut

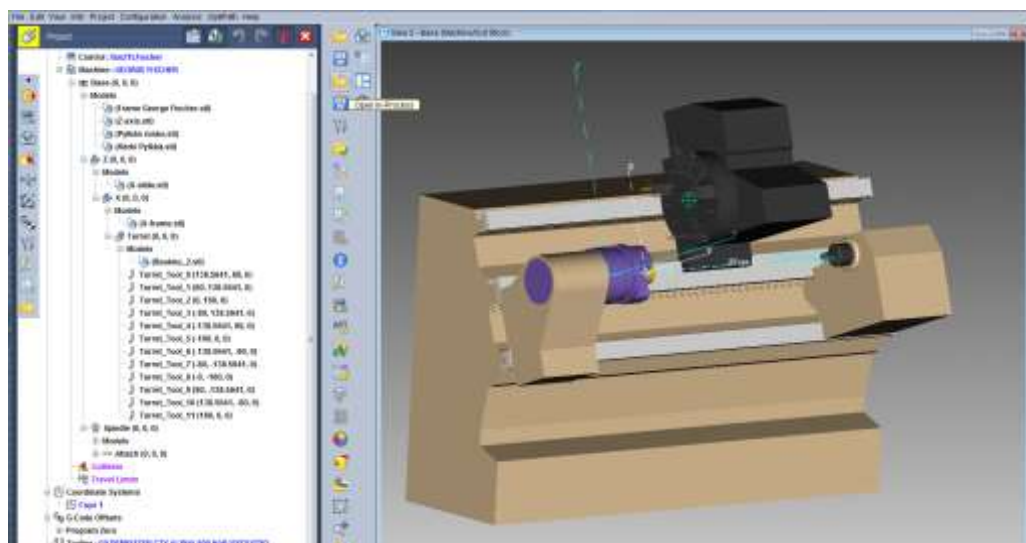
Virtuaalityöstökone tarvitsee 3D-mallin. Malli täytyy jaotella Siemens NX:ssä sopiviksi alikokoonpanoiksi, joista tehdään työstökoneen pääkokoonpano. Kuviossa 28 on työstökoneen NX-kokoonpano. Vericut:ssa virtuaalikonemallin rakentaminen alkaa työstökoneen ohjauksen valinnalla. Seuraavaksi valitaan konetyyppi ja koneen akselien määrä. Ensimmäisenä Vericut:in tuodaan rungon 3D-malli. Runkoon on kokoonpantu valmiiksi keskiökärjen runko-osa ja karanrunko-osa Siemens NX:ssä. Karanrunkoon kiinnitetään kara ja pakan 3D-malli. Vericut:ssa karalla on tietty oletusominaisuus, joka on pyöriminen oman keskiakselinsa ympäri.

X-akselin liukupintaosat kiinnitetään seuraavaksi runkoon. X-akselin osilla on Vericut:ssa oletusliikkeenä lineaariliike. Lineaariliikkeelle kerrotaan vektorin suunta. Liukupintoihin liitetään revolveri. Kuviossa 29 on esitetty Vericut-ohjelmiston puurakenne. Puussa näkyy ”kiinnitin”. Tähän kohtaan voidaan tuoda pakan leukojen 3D-mallit. Aina ei voida käyttää samoja leukoja, vaan eri työvaiheissa käytetään erilaisia leukoja. Tällöin saadaan simuloitua terän törmäykset myös leukoihin. Työkappaleen ahiomallinnuksessa on helpompi käyttää Vericut:n omaa ominaisuutta, josta löytyvät sylinteri-, kuusiokulma-, suorakaide- ja neliöaihiot. Aihioille annetaan parametrit, kuten esimerkiksi sylinterin pituus ja halkaisija. Runkoon mallinnetut johteet toimivat Z-akselin liukupintoina X-akselille. X-akselin komponentin päällä on revolveri. Revolveria rakennettaessa ohjelmistolle pitää kertoa, montako työkalupaikkaa revolverissa on, ja mikä on paikkojen välinen asteikulma sekä työkalupaikan etäisyys revolverin pyörintäkeskiöstä.

Virtuaalikoneen koordinaatiston nollapiste sijaitsee pakan takana. Samassa paikassa, jossa se sijaitsee myös ”oikeassa” työstökoneessa. Koordinaatistoa kääntämällä virtuaalityöstökoneessa saadaan aikaiseksi karan ja Z-akselin samansuuntaisuusvirhe. Tätä virhettä korjaa postprosessori ja näin pystyn simuloinnilla todistamaan, että postprosessorini toimii. Koordinaatiston ollessa vinossa Z-akseliin nähden, postprosessorilla saa lieriömäisen kappaleen. Kun koordinaatisto käännetään suoraan, postprosessori saa kartiomaisen kappaleen. Kuviossa 30. on valmis virtuaalikonemalli Vericut:ssa.



KUVIO 29. Virtuaalikoneen komponenttien kinemaattinen ketju



KUVIO 30. Virtualityöstökone Vericut.



## 6 POHDINTA

Tavoitteena opinnäytetyössäni oli korjata postprosessorilla karan samansuuntaisuusvirheen Z-akseliin. Kompensoinnin rakentaminen postprosessorin suoraviivaisiin liikkeisiin onnistui helposti, mutta esimerkiksi ympyränkaariliikkeisiin tätä ominaisuutta ei mielestäni kannattanut rakentaa. Tuotannossa on usein pieniä 0.1-5 mm kokoisia ympyränkaaria, jotka ovat yleistoleranssin mukaisia piirustuksissa. Tällöin koneen suuntavirheen suuruus on hyvin pieni ympyränkaariliikkeessä ja täten myös postprosessorilta vaadittava kompensointi on hyvin pieni.

Tätä työtä voi vielä jatkaa, jos halutaan tutkia konetta tarkemmin. Tällöin voidaan tarkastella esimerkiksi valmistettavan kappaleen aaltomaisuutta. Aaltomaisuus johtuu koneen johteen kääntymästä, kiertymästä ja nousemasta. Näitä voitaisiin kompensoida virtuaalityöstökoneen tietyssä kohdassa. Jos työstökoneessa on 500 mm pitkä Z-akseli ja kolari on tapahtunut 330 mm kohdalla, kolari kohtaan tulee nousemavirhe (ks. kuvio 23). Tämän virheen voi korjata paikallisesti postprosessorilla ja rakentaa virtuaalityöstökoneessa samalaisen virheen oikeaan kohtaan johteessa. VeriCut-ohjelmassa simulointiin täytyy rakentaa Z-akselin vektori siten, että siinä on pisteitä esimerkiksi 10mm välimatkoin. Näitä pisteitä seuraavat koneen revolveri ja X-akselin liukuosat. Normaalisti Vericut:ssa johteen vektorisuunta kerrotaan kahdella pisteellä. Kaksi pistettä muodostaa ideaalisuora.

Ehdotan jatkotutkimusaiheeksi työstökoneen johteessa olevien kääntymien, kiertymien ja nousemien mallinnusta virtuaalityöstökoneessa. Postprosessorin rakentamisen kanssa saattaa kuitenkin tulla haasteita, sillä postprosessorissa pitäisi kertoa aina missä kohdassa työstökoneen avaruutta koneistetaan. Postprosessorin pitäisi siis tietää koko työstökoneen geometria jokaisessa koneen avaruuspisteessä. Tällöin voimme puhua virtuaalityöstökoneen tilakompensoinnista. Virtuaalityöstökoneen geometrian tulisi vastata täysin ”oikean” työstökoneen geometriaa. Postprosessoriin tulisi saada ohjelmoitua koneen avaruuspaikkatieto ja sille geometrinen kompensointitieto.

## LÄHTEET

Altintas, Y., Brecher, C., Weck, M., Witt, S. 2005. Virtual machine tool. Department of mechanical engineering CIRP Ann-Manuf Techn

Andersson, M, Olsson, G. 1998. A Simulation Based decision support approach for operational capacity planning in a customer order driven assembly line. In proceeding of the winter simulation conference.

Andersson, P. 1992. Methodology for evaluating the production accuracy of machine tools. Tampere: Tampereen Pikakopio Oy.

Andersson, P., Tikka, H. 1997. Mittaus- ja laatutekniikat. 1. Painos. Porvoo: WSOY – Kirjapainoyksikkö.

Donmez, M., Blomquist, D., Hocken, R., Lui, C. Barash, M. 1986. A General methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation. Precision Engineering.

Garcia, J., Arroyo, J., Nieto, C. 2014. Simulation and verification of parametric numerical control programs using a virtual machine tool. Prod. Eng. Res. Devel.

Gomes C. Castiblanco, L. Osorio, J. 2016. Building a virtual machine tool in a standard PLM platform. International journal on interactive design and manufacturing (IJIDeM)

Hocken, R. 1980. Machine tool accuracy. Technology of machine tools, Vol. 5. Lawrence Livermore laboratory, university of California

Ihalainen. E, Aaltonen. K, Aromäki. M, Sihvonen.P. 1991. Valmistustekniikka 11. Painos. Helsinki: Hakapaino Oy

Kadir, A., Xu, X., Hammerle, E. 2010. Virtual machine tools and virtual machining—a technological review. Robot Cim Int Manuf.

Laaksonen, T., Nieminen, J., Pulkkinen, A., Rapinoja, J-P., Simons, J., Uski, P., Salmi, H., Vainionpää, M. 2016. Malliperustaisen tuotemäärittelyn (MBD) mahdollisuudet. METSTA ry, teknologiateollisuus ry ja SMACC.

Pritschow, G., Berkemer, J., Bürger, T., Croon, N., Korajda, B., Röck, S. 2003. Die simulierte Werkzeugmaschine, Tagungsband Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart.

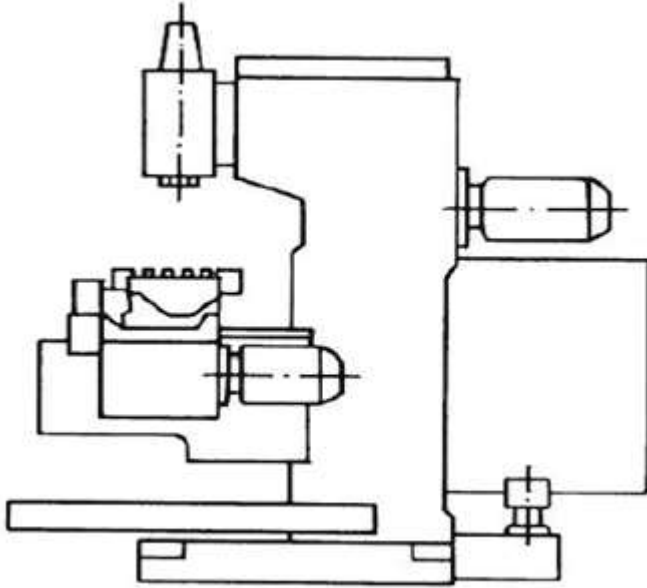
Pritschow, G., Altintas, Y., Javone, F., Koren, Y., Mitsuishi, M., Takata, S., Van Brussel, H., Weck, M., K. Yamazaki. 2001. Open Controller Architecture—past, present and future, Annals of the CIRP, 50/2.

Renishaw 2017. apply innovation. Luettu 23.8.2017.  
<http://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>

- Robinson, S. 1994. *Successful Simulation – A Practical Approach to Simulation Projects*. McGraw-Hill.
- Schultschik, R. 1977. The components of volumetric accuracy. *Annals of the CIRP* vol. 25.
- Suh, S., Seo, Y., Lee, S., Choi, T., Jeong, G., Kim, D. 2003. Modelling and implementation of internet-based virtual machine tools. *Int J Adv Manuf Technol* 21.
- Thusty, J. 1971. Techniques for testing accuracy of NC-machine tools. *Proceeding of the 12th MTDR conference Birmingham*.
- VDI/DGQ 3441. 1977. *Statische prüfung der arbeits - und positionsgenauigkeit von werkzeugmaschinen*. Grundlagen, beuth verlag. Berlin
- Vergopal, R. 1986. Thermal effects on the accuracy of numerically controlled machine tools. *Annals of the CIRP* vol.35.
- Yeung, C.Ho, Altintas, Y., Erkorkmaz, K. 2004. Virtual CNC System, Part I: Architecture and Auto tuning of CNC Systems, *Trans. ASME, J. Machine Tool Manuf. Eng. Manufacturing Science and Engineering*.
- Yeung, C.Ho, Erkorkmaz, K., Altintas, Y. 2004. Virtual CNC System, Part II: Virtual Part Machining and auto correction of contouring errors, *Trans. ASME, J. Manufacturing Science and Engineering*.
- Zhang, G., Ouyang, R., Lu, B. 1987. A displacement method for machine tool calibration. *Annals of the CIRP* vol. 37.
- Weck, M. 1985. *Werkzeugmaschinen, Bd 4 – Messtechnische untersuchung und Beurteilung*. VDI-verlag. düsseldorf.

**LIITTEET**

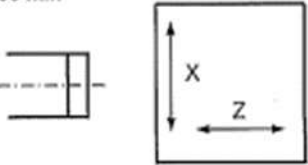
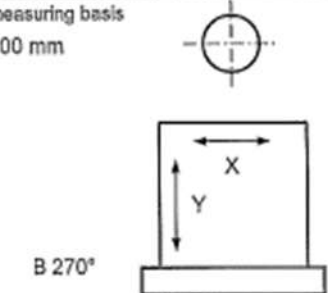
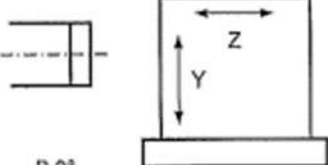
Liite 1. C-runkoinen jyrsinkone. (Ihalainen, Aaltonen, Aromäki, Sihvonen 1991, 167.)



## Liite 2. VDI/DGQ 2441-standardi.

|  |  |              |           |
|--|--|--------------|-----------|
| <b>Guide systems</b>                   | X-, Y-, Z-axis<br>Linear guides, preloaded, centrally lubricated                     |              |           |
|  | <b>Size</b>  |              | <b>55</b> |
|  | Guide elements (X-axis)  | No.          | 4         |
|  | Guide elements (Y-axis)  | No.          | 4         |
|  | Guide elements (Z-axis)  | No.          | 6         |
| <b>Measuring systems</b>               | X-, Y-, Z-axis<br>Linear measuring system (glass scale), absolute, with overpressure |              |           |
|  | Resolution   | mm           | 0.001     |
|  | B-axis (NC rotary table)<br>Angular-position measuring system (RCN), absolute        |              |           |
|  | Resolution   | degree       | 0.001     |
| <b>Axis drive</b>                      | X-, Y-, Z-axis<br>Precision ball screws, preloaded, centrally lubricated             |              |           |
|  | Diameter x pitch   |              | 63 x 30   |
|  | Maintenance-free, digitally controlled three-phase servomotors                       |              |           |
| <b>Feed forces</b>                     | X-, Y-, Z-axis – duty cycle 100 %  | N            | 17 000    |
| <b>Accuracies acc. to VDI/DGQ 3441</b> | X-, Y-, Z-axis   |              |           |
|  | Positional uncertainty P   | mm           | 0.007     |
|  | Positional deviation Pa  | mm           | 0.005     |
|  | B-axis   |              |           |
|  | Positional uncertainty P   | angular sec. | 5         |
|  | Positional deviation Pa  | angular sec. | 3         |

Liite 3. Työstökoneen valmistajan oma standardi.

| no. | picture  | measuring object                               | set value<br>$\mu\text{m}$ | actual value<br>$\mu\text{m}$ |
|-----|--|--|----------------------------|-------------------------------|
| 1   | measuring basis<br>600 mm<br>         | Wxz<br>rectangularity of moving axes<br>x to z | 20 / 600                   |                               |
| 2   | measuring basis<br>600 mm<br> B 270° | Wxy<br>rectangularity of moving axes<br>x to y | 20 / 600                   |                               |
| 3   | measuring basis<br>600 mm<br> B 0°  | Wyz<br>rectangularity of moving axes<br>y to z | 20 / 600                   |                               |



