

Janne Uski

# Menetelmä ja laitteisto puristusliitoksen kokoonpanoon sarjatuotannossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

9.5.2015

## **Alkusanat**

Haluan kiittää kaikkia niitä henkilöitä, jotka ovat tukeneet minua tehdessäni tätä opin-  
näytetyötä. Erityiskiitokset haluan osoittaa työni ohjaajille diplomi-insinööri Jan Gunel-  
lille ja lehtori Markku Saarniolle. Ilman edellä mainittujen herrojen apua ja panosta työ  
olisi luultavasti jäänyt piirustuspöydälle. Haluan myös kiittää esimiestäni Kaj Schluppia  
sekä muuta Metson Neles Smart Products R&D -tiimiä.

Helsingissä keväällä 2015

Janne Uski

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Janne Uski Menetelmä ja laitteisto puristusliitoksen kokoonpanoon sarjatuotannossa  57 sivua + 10 liitettä 9.5.2015
Tutkinto	Insinööri
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaajat	Diplomi-insinööri Jan Gunell Lehtori Markku Saarnio
<p>Opinnäytetyö tehtiin Metso Oy:lle ja siinä tutkittiin suunnitellun akselin ja navan puristusliitoksen tekemiseen tarvittavia normaali- ja asennusvoimia. Tutkintamenetelminä käytettiin puristusliitoksen teoreettista laskutapaa, puristimella tehtyjä puristusliitoksia sekä elementtimenetelmällä tehtyjä elastisia ja plastisia puristusliitossimulointeja.</p> <p>Työn teoriaosuudessa käytiin läpi puristusliitoksen teoriaa, käytettävien terästen ominaisuuksia sekä työstökoneiden ja -prosessien kyvykkyyksien havainnointimenetelmiä. Teoriaosuudessa perehdyttiin myös elementtimenetelmän peruskäsitteisiin sekä esiteltiin yleisimmät puristintyyppit ja niiden käyttöominaisuuksia tulevaa kokoonpanolaitetta varten.</p> <p>Tuloksissa esiteltiin teoreettisesti lasketut puristusliitoksen suorittamiseen tarvittavat normaali- ja asennusvoimat kolmessa vaiheessa. Ensin puristusliitos, jossa on jätetty pinnankarheet huomioimatta. Toiseksi tilanne, jossa pinnankarheet on huomioitu. Viimeisenä tilanne, joka vastaa todellisia puristusliitoksen asennusvoimia eli kun pinnankarheet ja kitka on huomioituna laskuihin. Jokaista tilannetta havainnollistettiin eri työstökoneiden kyvykkyyksien <math>C_m</math>-indekseillä 1, 2 ja 3. Tuloksissa esiteltiin myös koneistetuilla aksleilla ja navoilla tehdyt puristusliitokset sekä niihin tarvittavat asennusvoimat. Koneistetuilla osilla tehtyjä puristusliitoksia vertailtiin elementtimenetelmällä laskettuihin elastisiin ja plastiin simulointeihin. Simuloinneissa aksleiden ja napojen mittoina oli käytetty todellisia ahdistuksia, jotka oli saatu koneistetuista osista mittaamalla.</p> <p>Työssä saadut tulokset analysoitiin ja niitä vertailtiin keskenään käyttäen hyödyksi teoriaosuudessa esiteltyjä menetelmiä. Loppupäätelminä esitellään puristusliitoksen tekemiseen tarvittavat asennusvoimat ja näiden tulosten perusteella ehdotetaan sopivaa puristinta kokoonpanon sarjatuotantoon tilattavaksi.</p>	
Avainsanat	Puristusliitos, elementtimenetelmä, puristin

Author Title	Janne Uski Method and Machine for the Assembly of a Press Fit in Mass Production
Number of Pages Date	57 pages + 10 appendices 9 May 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Energy and Environmental Engineering
Instructors	Jan Gunell, M.Sc. (Tech.) Markku Saarnio, Lecturer
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to research required assembly forces for a shaft-hub press fit. The following methods were used to find out the needed forces: theoretical calculation, press fit assembly using a press and also a finite element method for elastic and plastic simulations.</p> <p>The theoretical part focused on the press fit's basic theory, material behavior- and properties of steel and the capability of machines and processes. The theoretical part focused also on the basics of the finite element methods, and also the most commonly used press models and their operating characteristics were presented.</p> <p>As a result, the thesis describes the theoretically calculated normal and assembly forces in three different phases. Firstly, the press fit wherein the surface roughness has been ignored. Secondly, the situation in which the surface roughness was taken into account. The last situation, which corresponds to the actual mounting forces, i.e. when the surface roughness and friction were involved. Each situation was illustrated with various machine capability <math>C_m</math>-values 1, 2 and 3. The results also present the needed assembly forces for press fits using a press. These results are compared to elastic and plastic simulations calculated using the finite element method. In the simulation part, real interferences measured from machined parts were used.</p> <p>The results of this study were analyzed and compared utilizing the information presented in the theory part. In conclusion, the needed assembly forces for a press fit are presented, and on the basis of this data a suitable press model is suggested for a mass production.</p>	
Keywords	Press fit, finite element method, press

## Sisällysluettelo

### Lyhenteet & symbolit

1	Johdanto	1
2	Teoria	2
2.1	Tuotannon kokoonpanon perusteet	2
2.2	Puristus- ja kutistusliitos	2
2.2.1	Pinnankarheus ja sen vaikutus puristusliitoksissa	3
2.2.2	Pinnankarheuden mittaaminen ja analysointi	5
2.2.3	Kitkakertoimen huomioiminen puristusliitoksissa	6
2.2.4	Voiteluaineiden käyttö puristusliitoksissa	7
2.2.5	Puristusliitoksen teoreettinen laskeminen	8
2.3	Metallien ominaisuudet ja käyttäytyminen	11
2.3.1	Metallipintojen ominaisuudet	11
2.3.2	Metallikappaleen pintakerroksen rakenne	11
2.3.3	Elastinen ja plastinen muodonmuutos	12
2.4	Elementtimenetelmä	14
2.4.1	Elementtiverkko	15
2.4.2	Tangenttimoduulin määrittäminen plastisia simulointeja varten	15
2.5	Työstökoneiden kyvykkyys	16
2.6	Työstöprosessien kyvykkyys	17
2.7	Pienimmän neliösumman menetelmä	19
2.8	Puristimet	20
2.8.1	Manuaalipuristin	20
2.8.2	Polvinivellinen manuaalipuristin	21
2.8.3	Pneumaattinen puristin	22
2.8.4	Hydraulinen puristin	23
2.8.5	Hydropneumaattinen puristin	24
2.8.6	Servo-ohjattu puristin	25
2.8.7	Puristinten runkotyypit	26
2.8.8	Puristinten ohjaus ja monitorointi	27

3	Tulokset	28
3.1	Akseleiden ja napojen mitatut arvot	28
3.1.1	Akselien ja napojen liitospintojen halkaisijat	28
3.1.2	Liitospintojen pinnankarheusmittaukset	30
3.1.3	Työstökoneiden kyvykkyydet	31
3.2	Puristimella suoritettut puristusliitokset	32
3.3	Puristusliitoksen teoreettiset laskelmat	33
3.3.1	Teoreettisesti lasketut puristusliitokset, joissa pinnankarheudet jätetty huomioimatta	36
3.3.2	Teoreettisesti lasketut puristusliitokset, joissa on huomioitu pinnankarheudet	37
3.3.3	Teoreettisesti lasketut puristusliitokset, joissa huomioitu pinnankarheudet ja kitka	38
3.4	Puristusliitoksen simuloinnit käyttäen elementtimenetelmää	39
3.4.1	Puristusliitoksen elastiset ja plastiset simuloinnit	41
3.4.2	Puristimella mitatut arvot suhteessa mitattujen kappaleiden arvoilla laskettuihin teoreettisiin asennusvoimiin	42
3.4.3	Puristusliitoksen elastiset simuloinnit	43
3.4.4	Puristusliitoksen plastiset simuloinnit	44
3.4.5	Kitkakertoimien vertailu	45
4	Tulosten analysointi	46
4.1	Akselin ja navan mitattujen arvojen analysointi	46
4.2	Puristimella suoritettujen puristuskäyrien analysointi	47
4.3	Puristusliitoksen teoreettisten laskelmien analysointi	48
4.4	Puristusliitoksen simulointien analysointi	50
5	Yhteenveto ja päätelmät	54
	Lähteet	55

## Liitteet

- Liite 1. Navan nro 1 pinnankarheusmittaukset
- Liite 2. Navan nro 2 pinnankarheusmittaukset
- Liite 3. Navan nro 3 pinnankarheusmittaukset
- Liite 4. Akselin nro 1 pinnankarheusmittaukset
- Liite 5. Akselin nro 2 pinnankarheusmittaukset
- Liite 6. Akselin nro 3 pinnankarheusmittaukset
- Liite 7. Akselien ja napojen halkaisijoiden mittaustulokset
- Liite 8. Elastiset ja plastiset simulointitulokset
- Liite 9. Navan työkuva
- Liite 10. Akselin työkuva

## Lyhenteet

FEA	Toisinaan käytetty nimitys Finite Element Methodille (Finite Element Analysis).
FEM	Elementtimenetelmä (Finite Element Method). Laskentamenetelmä, jonka avulla voidaan simuloida mm. rakenteiden kestävyyskiä.
LSL	Alempi spesifikaatoraja
LTL	Alempi toleranssiraja
PNS	Pienimmän neliösumman menetelmä
PPM	Miljoonasosa (Parts Per Million)
RMS	Pinnankarheuden esitystapa, joka käyttää neliöllistä keskipoikkeamaa
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
USL	Ylempi spesifikaatoraja
UTL	Ylempi toleranssiraja

## Symbolit

$A_{oA}$	Navan sisähalkaisijan yläeromitta
$A_{uA}$	Navan sisähalkaisijan alaeromitta
$A_{oI}$	Akselin ulkohalkaisijan yläeromitta
$A_{uI}$	Akselin sisähalkaisijan yläeromitta
$C_m$	Työstökoneen kyvykkyys

$C_{mk}$	Työstökoneen kyvykkyysindeksi
$C_p$	Työstöprosessin kyvykkyys
$C_{pk}$	Työstöprosessin kyvykkyysindeksi
$D_{aA}$	Navan ulkohalkaisija
$D_{iA}$	Navan sisähalkaisija
$D_F$	Liitospinnan halkaisija
$D_{aI}$	Akselin ulkohalkaisija
$D_{iI}$	Akselin sisähalkaisija
$E$	Kimmomoduuli
$E_A$	Navan kimmokerroin
$E_I$	Akselin kimmokerroin
$F_N$	Normaalivoima
$F_\mu$	Kitkavoima
$F_{ax}$	Vaikuttava aksiaalivoima
$K$	Apusuure elastisen kutistusliitoksen laskennassa
$l_F$	Liitoksen pituus
$p$	Kutistuspaine, pintapaine
$P$	Sovite

$P_i$	Todellinen sovite
$P_o$	Minimiahdistus
$P_u$	Maksimiahdistus
$P_w$	Tehollinen ahdistus
$Q_a$	Navan halkaisijasuhde
$Q_I$	Akselin halkaisijasuhde
$R_{eLA}$	Navan alempi myötöraja
$R_{eLI}$	Akselin alempi myötöraja
$R_{zA}$	Navan profiilin syvyys
$R_{zI}$	Akselin profiilin syvyys
$S_{pA}$	Navan varmuusluku pysyvään muodonmuutokseen nähden
$S_{pI}$	Akselin varmuusluku pysyvään muodonmuutokseen nähden
$S_r$	Varmuusluku liukumiseen nähden
$T$	Vaikuttava vääntömomentti
$v_{ru}$	Tartuntakerroin tangentiaalisuunnassa liukumiseen nähden
$v_{rl}$	Tartuntakerroin aksiaalisuunnassa liukumiseen nähden
$\bar{x}$	Otoksen keskiarvo
$\mu$	Kitkakerroin

$\mu_A$	Navan suppeumaluku
$\mu_I$	Akselin suppeumaluku
$\xi_w$	Suhteellinen tehollinen ahdistus
$\sigma$	Jännitys
$\hat{\sigma}$	Perusjoukon keskihajonnan estimaatti
$\varepsilon$	Suhteellinen venymä

## 1 Johdanto

Tämä insinööriyö suoritettiin yhteistyössä Metropolia Ammattikorkeakoulun ja Metso Oyj:n kanssa. Työ suoritettiin pääsääntöisesti Metson toimitiloissa Vantaan tehtaalla.

Työn tavoitteena on valita menetelmä puristusliitoksen tekemistä varten ja määrittää valitulle laitteistolle speksit, jotta puristusliitoksia voidaan tehdä kokoonpanon sarjatuotantovaiheessa. Työssä käytetään kolmea eri menetelmää puristusliitoksen tarvittavien tietojen ja voimien ratkaisemiseksi. Nämä menetelmät ovat puristusliitoksen teoreettinen laskeminen, koneistetuilla osilla tehdyt puristusliitokset sekä elementtimenetelmällä tehdyt elastiset ja plastiset simuloinnit. Näillä tiedoilla pyritään varmistumaan puristusliitoksen suoritettavuudesta ja toimivuudesta. Työssä esitellään tarvittavat teoreettiset tiedot haluttujen lopputulosten ratkaisuiden perustana.

Metso Oy on suomalainen prosessiteollisuusalan pörssiyhtiö. Metso toimittaa prosessilaitteita ja palveluratkaisuja kaivos-, maarakennus- sekä öljy- ja kaasualoille. Metso toimittaa myös automaattioratkaisuja massa-, paperi- ja voimantuotantoon. Vuodesta 2014 lähtien Metson toiminta on jakautunut Kaivos ja maanrakennus - sekä Automaatio -raportointisegmentteihin. [1.]

## 2 Teoria

### 2.1 Tuotannon kokoonpanon perusteet

Osana tätä opinnäytetyötä on ottaa huomioon tuotteen sujuva kokoonpantavuus kokoonpanoaseman suhteen. Tuotantoon halutaan siis tarjota mahdollisimman helppokäyttöiset ja laadukkaat työkalut kappaleiden kokoonpantavuutta ajatellen.

Kokoonpanolla tarkoitetaan itse valmistettujen tai alihankintana valmistettujen osien sekä standardikomponenttien ja -tarvikkeiden liittämistä toisiinsa toimivaksi tuotteeksi tai osaksi sitä. Suuri osa kokoonpanosta suoritetaan edelleen manuaalisesti käsin, vaikka kokoonpanolinjojen automatisointi on myös jo hyvin yleistynyt.

Tuotteita kootaan pienistä, suurina erinä valmistettavista kulutustavaroista aina suuriin koneisiin asti. Kokoonpanotekniikka vaihtelee työstä ja valmistettavasta kokoonpanosta riippuen. Kokoonpanon osuus kokonaistyöajasta nousee usein jopa 20 – 40 %:iin. Kokoonpanoaikojat lasketaan usein ja niitä pyritään pienentämään, koska ne sitovat pääomaa varastoihin ja keskeneräiseen tuotantoon. Kokoonpanotyössä aikaa käytetään mm. tavaroiden siirtämiseen, kappaleiden käsittelemiseen, liittämiseen, sovittamiseen sekä tarkastamiseen. Itse kokoonpanoa ei aina voida syyttää kustannuksien kohoamisesta vaan yleensä syyt voivat periytyä aikaisemmista vaiheista, joissa ei ole otettu kokoonpanoa huomioon riittävän hyvin.

Tässä työssä on tarkoitus selvittää vaatimukset tulevalle kokoonpanolaitteelle. Kokoonpanolaitte tulee olemaan osa kokoonpanolinjaa. Kyseisellä kokoonpanopaikalla on tarkoitus suorittaa puristimella tehtäviä puristusliitoksia, jotka ovat osakokoonpanoja suuremmissa kokoonpantavassa laitteessa. [2, s. 111.]

### 2.2 Puristus- ja kutistusliitos

Kutistus- ja puristusliitos on lieriömäisistä liitospinnoista muodostuva kitkasulkeinen navan ja akselin välinen liitos. Navan liitospinnan halkaisija on hieman pienempi kuin akselin liitospinnan halkaisija. Liitettäessä syntyy akselin ja navan välille muodonmuutok-

sista aiheutuva jännitystilä. Liitoksessa vaikuttaa säteen suuntainen puristusjäännitys. Tämän pintapaineeksi nimetyn puristusjäännityksen vaikutuksesta voi kitkasulkeinen liitos välittää tangentiaali- tai aksiaalivoimia.

Puristusliitoksessa akseli puristetaan pituussuunnassa napaan. Kutistusliitos puolestaan tehdään napaa lämmittämällä tai akselia jäähdyttämällä. Liitoksien etuna on hyvä kestävyys vaihtokuormituksen alaisissa liitoksissa pienen lovivaikutuksen ansiosta. Toisena etuna on hyvä keskittäminen. Haittapuolena on, että liitoksen toteutus vaatii tarkkuutta pienten ahdistusten ja toleranssien vuoksi. Puristus- ja kutistusliitoksia mitoitettaessa voidaan käyttää SFS-5595 -standardia. [3, s. 104.]

### 2.2.1 Pinnankarheus ja sen vaikutus puristusliitoksissa

Pinnanlaadusta puhuttaessa tarkoitetaan yleensä pinnan geometrisia ominaisuuksia. Pinnan toimintaa tutkittaessa on otettava huomioon myös materiaalin fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet. Geometrian osalta pinnan toimintakelpoisuus riippuu useimmiten muotovirheiden ja pinnankarheuden yhteisvaikutuksesta.

Pinnat voidaan jaotella niihin kohdistuvien kuormitusten mukaisesti:

- Mekaanisesti kuormittamattomat tai vähän kuormitetut pinnat. Näitä ovat esimerkiksi kotelot, suojukset ja mittauspinnat.
- Jännityksen alaiset pinnat. Kun kosketuspintojen välinen suhteellinen liike on vähäistä. Jännityksen alaisiin pintoihin kuuluvat esimerkiksi jouset, ruuvit, puristus- ja liimaliitokset.
- Kitkavoimien kuormittamat pinnat, joiden kosketuspinnat liikkuvat toistensa suhteen. Näitä ovat esimerkiksi liukulaakerit, liikkuvat tiivistyspinnat ja hammaspyörät.

Koneenosien pinnat välittävät useasti osan toiminnan toisiin osiin ja täten ovat tärkeässä roolissa toiminnan kannalta. Pinnoilla tulee myös olla sellaiset ominaisuudet, että ne kestävät niihin kohdistuvaa rasitusta. [6, s. 8.]

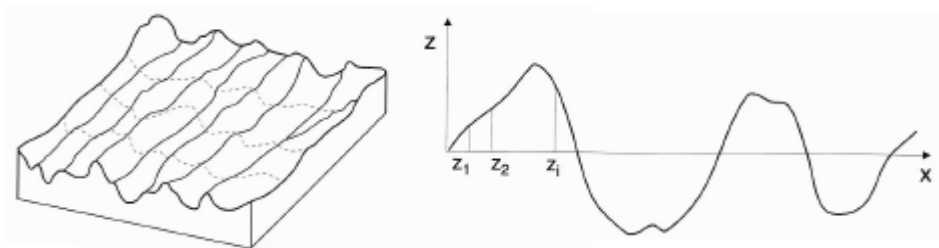
Työstetyille pinnoille on luonteenomaista aaltomainen ja karhea pinta, koska täysin tasaista sileää pintaa ei voida saavuttaa tavanomaisin valmistusmenetelmin. Tavallisesti pinnankarheuden suurena käytetään keskipoikkeamaa  $R_a$ , joka on keskiviivajärjestelmän pääsuure. Muita pinnankarheuksien esitystapoja ovat  $R_q$  eli RMS-arvo, joka käyttää neliöllistä keskipoikkeamaa. Joskus käytetään myös maksimiprofiilinsyvyyttä  $R_z$ . Esimerkiksi puristusliitoksia laskettaessa käytetään maksimiprofiilinsyvyyksien arvoja. Keskipoikkeaman  $R_a$  ja profiilinsyvyyksien  $R_z$  keskinäiset suhteet voidaan katsoa taulukosta 1. Keskipoikkeama  $R_a$  voidaan ratkaista yhtälöstä:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx \quad (1)$$

missä  $L$  on mittausjakson pituus ja  $Z(x)$  on pinnan muodon funktio  $Z$   $x$ :n suhteen eli profiiliin ja keskiviivan välinen pinta-ala. Keskipoikkeama voidaan laskea myös profiiliin ja keskiviivan välisten etäisyyksien keskiarvona:

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (2)$$

missä  $n$  on kaikkien mukaan laskettujen profiilipoikkeamien lukumäärä ja  $z_i$  on profiilinsyvyys määritellystä keskilinjasta (Kuva 1). Keskipoikkeama  $R_a$  ei kuitenkaan kuvaa pinnankarheutta kovin hyvin. Keskipoikkeaman arvo voi olla sama, vaikka varsinainen pinnan profiili olisi muodoiltaan hyvinkin erilainen. Tällöin pinnat poikkeavat keskenään toisistaan ajatellen esimerkiksi pintojen ominaisuuksia ilmaista käyttäytymistä liukupintoina. [4, s. 24; 7, s. 87 - 90.]



Kuva 1. Vasemmalla on havainnollistettu todellista pinnanmuotoa ja oikealla on havainnollistettu kyseisen pinnan todellista pinnankarheuden profiilia. Symbolit  $z_1$ ,  $z_2$  ja  $z_i$  määrittävät profiilinsyvyyden kyseisessä asemassa  $X$ -akselilla. [4, s. 24.]

Erilaiset pinnankarheuden profiilit käyttäytyvät eri lailla. Esimerkiksi puristussovitteissa terävähuippuiset pinnankarheuden profiilit kuluttavat huippunsa nopeasti. Tällöin tarvitaan puristusliitoksen suorittamiseen vähemmän voimaa, mutta liitoskaan ei ole niin kestävä kuin tasaisemmillä pinnoilla suoritetuissa puristusliitoksissa. [4, s. 24.]

Taulukossa 1 on määritelty puristusliitosta kahden pinnankarheuksien arvojen välinen yhteys. Pinnankarheuden mittatulokset ilmoitetaan yleensä keskipoikkeaman Ra avulla, mutta puristusliitoslaskuissa käytetään profiilisyvyyttä Rz.

Taulukko 1. Pinnankarheuden profiilisyvyyden Rz ja keskipoikkeaman Ra välinen yhteys [5, s. 404].

<b>Rz (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	0,160- 0,250	0,40- 0,63	1,0	1,6	2,5	4,0- 6,3	10	16- 25	40	63,0	100	163
<b>Ra (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50

Kun kahden eri kappaleen pinnat puristetaan toisiaan vasten, pinnankarheuden ulokkeet kantavat kuorman. Pienellä kuormalla materiaalien myötöraja ei ylity ja kappaleiden pintojen käyttäytyminen on elastista. Suuressa osassa tapauksista kuitenkin osa pinnankarheuden huipuista muokkautuu plastisesti ja osa elastisesti. Todellinen kosketuspinta-ala muodostuu näiden kosketusalojen summasta ja on pienempi tai yhtä suuri kuin näennäinen pinta-ala. [4, s. 26.]

### 2.2.2 Pinnankarheuden mittaaminen ja analysointi

Pinnankarheuden todentamiseksi käytetään yleensä kahta menetelmää. Ensimmäinen on käyttäen sähkökäyttöisiä mittauskärkikojeita, joista saadaan esimerkiksi keskipoikkeama Ra. Toinen tapa on verrata mallikappaleen ominaisuuksia mitattavan kappaleen ominaisuuksiin ja silmämääräisesti todeta paremmuus. Käytännön mittauksessa saatu pinnankarheuden arvo muodostuu laitteen todellisten toimintojen mittaustuloksista. Saadun mittaustuloksen ja todellisen pinnan erot johtuvat yleensä ideaalisen ja optimaalisen

mittaustavan menetelmävirheestä, mittauksessa tapahtuvasta laitevirheestä sekä valitusta mittaustavasta riippuvasta menetelmän poikkeamasta. [6, s. 42]

Pinnankarheuden mittalaitteet ovat yleensä sähkökäyttöisiä mittauskärkikojeita. Anturiin on kiinnitetty mittauskärki, jonka antama signaali integroidaan jonkin keskiviivan suhteen. Tämä kuitenkin vaihtelee eri laitteiden kesken. Tästä seuraa, että jos kaksi laitetta saadaan näyttämään samaa lukemaa tietyllä pinnalla, niin niiden lukemat saattavat olla aivan eri jollakin toisella menetelmällä valmistetulla pinnalla. Mittaustulokset saadaan numeroarvona ja lisäksi myös graafisena piirtokäyränä. [6, s. 42.]

Pinnankarheuden todentamiseen voidaan käyttää ns. vertailumenetelmää. Vertailumenetelmässä pinnankarheuden todentamiseen käytetään vertailupaloja, joiden pinnankarheus on tunnettu. Vertailu on sitä helpompaa, mitä paremmin tunnetaan vertailtavien pintojen valmistusmenetelmät ja niiden yksityiskohdat vastaavat toisiaan. Näin ollen jokaisella valmistusmenetelmällä on oma vertailupalasarjansa. [6, s. 42.]

### 2.2.3 Kitkakertoimen huomioiminen puristusliitoksissa

Toisiaan vasten liukuvien kappaleiden välissä vaikuttaa kitkavoima, joka pyrkii vastustamaan liikettä. Nopeuden ylläpitämiseksi tarvitaan ulkoinen voima, joka on suuruudeltaan yhtä suuri kuin kitkavoima, mutta vastakkaisuuntainen. Kitkakertoimella tarkoitetaan kitkavoiman ja normaalivoiman välistä suhdetta, joka esitetty kaavassa 3.

$$\mu = \frac{F_{\mu}}{F_N} \quad (3)$$

Kitka voidaan jakaa lepokitkaan ja liikekitkaan. Lepokitkalla tarkoitetaan kitkavoimaa, joka vaikuttaa liikkeelle lähdössä, ja liikekitka puolestaan liikkeen aikana vaikuttavaa kitkaa. Lepokitka on usein suurempi kuin liukukitka, jolloin liikkeelle lähtöön tarvitaan suurempi voima. Kitka voidaan erotella myös ulkoiseen ja sisäiseen kitkaan. Ulkoisella kitkalla tarkoitetaan pintakerrosten vuorovaikutuksesta johtuvaa kitkaa. Sisäinen kitka taas muodostuu, kun materiaalin sisällä tarvitaan voimia molekyylien siirtämistä varten. Voiman poistuttua osa energiasta ei palaudu hystereesin johdosta, vaan muuttuu lämmöksi tai muodonmuutokseksi. [4, s. 63.]

Tehtäessä puristusliitoksia pienillä osilla on puristusiskun oltava nopeudeltaan tasainen ja hallittu, jotta vältetään liikkeen nytkähtelemiseltä. Tällöin myös liitospintojen välissä vallitsee liikekitka. Nytkähtelevää liike-ilmiötä kutsutaan nimellä Stick – slip. Ilmiö esiintyy nimenomaan silloin, kun kappaleiden pinnat liukuvat toistensa yli ja kitkavoima kappaleiden välillä vaihtelee. Tyypillisesti staattinen kitkakerroin kahden pinnan välissä on suurempi kuin kineettinen kitkakerroin. Jos kohdistettu voima on tarpeeksi suuri voittamaan staattisen kitkan, niin tällöin kitkan vähentyminen kineettiseksi kitkaksi saattaa aiheuttaa äkillisen nopeuden muutoksen. [8.]

Nykyiset kitkateoriat perustuvat siihen, että todellinen kosketuspinta-ala on vain osa näennäisestä pinta-alasta ja kasvaa normaalivoiman kasvaessa. Adheesioon perustuva teoria toteuttaa myös kitkalait, koska kitkavoima on syntyneiden kosketuskohtien leikkautumiseen tarvittavan leikkausjännityksen ja todellisen kosketusalan tulo ja kosketusala taas on suoraan verrannollinen normaalivoimaan. Puristettaessa kaksi pintaa vastakkain syntyy pinnankarheuden ulokkeiden välille adhesiivisia liitoksia, joiden irti repeytymiseen tarvittava voima muodostaa osan kitkavoimasta. Toisen pinnan uloke voi myös työstää vastapintaan uran, mistä muodostuu kitkavoiman kyntötermi. [4, s. 64; 7, s. 19 – 20.]

Kitkan yleiset ominaisuudet ovat nykyään tiedossa hyvin. Kitkakertoimeen voidaan vaikuttaa mm. materiaaliparin valinnalla, erilaisilla pinnoitteilla tai käyttämällä voiteluaineita. Puristusliitoksissa kitka on olennainen osa liitosta, koska liitoksesta halutaan usein pysyvä. [4, s. 63.]

#### 2.2.4 Voiteluaineiden käyttö puristusliitoksissa

Voiteluaineiden perimmäinen tarkoitus on liikkuvien osien tai muiden kappaleiden kulumisen ja niiden välisen kitkan pienentäminen. Voiteluaineine voi olla joko nestemäisessä, kiinteässä tai kaasumaisessa muodossa. Voiteluaineet pyrkivät estämään kappaleiden kosketukset keskenään muodostamalla kappaleiden välille suojaavan kalvon tai toimimalla itse niiden välissä. Kitkan ja kulumisen kannalta on edullisinta, että liikkuvat osat on erotettu toisistaan kokonaan voiteluainekalvolla. Tällöin vallitsee nestevoitelutila. Ellei nestevoitelua voida järjestää, hankaavat pinnat toisiaan vasten ja ollaan kosketusvoitelutilanteessa. Tällöin kuorma välittyy osasta toiseen osittain voiteluaineen kautta, mutta myös pintojen välisen kosketuksen avulla. Käytettäessä voiteluaineita puristuslii-

toksessa aiheuttavat ne kappaleiden välille tiukemman soviteen luodessaan liitospinnoille suojaavan kalvon. Suuri osa voiteluaineista myös pursuaa ulos, kun akseli liikuu navan sisälle. Tässä työssä puristusliitoksessa ei ole käytetty voiteluaineita tai muita rasvoja eli liitospinnat ovat olleet oletettavasti kuivia. [4, s.129.]

### 2.2.5 Puristusliitoksen teoreettinen laskeminen

Kutistus- ja puristusliitosten laskentaperusteet ja muotoiluohjeita on esitetty standardissa SFS-5595. Kyseinen standardi sopeutuu lieriömäisille metallipinnoille ja erityisesti kun akseli ja napa ovat yhtä pitkät. Standardi sopeutuu myös likimääräisesti akselin ja navan ollessa eripituiset, kuten tässä työssä kokoonpantavissa osissa. Tällöin ei kuitenkaan oteta huomioon navan reunalle tulevaa painehuippua. Laskentateoria on mitoitettu toimimaan, kun kappaleet pysyvät elastisella alueella. Kyseessä on sellaisten umpiakselin ja navan puristusliitos, joiden alustava tehollinen ahdistus ja sovite tunnetaan ennalta. Tässä luvussa käytetyt merkinnät ovat pääosin yhtenäisiä standardin 5595 kanssa ja ne löytyvät selityksineen työn alusta symbolit -luettelosta. [3, s. 105.]

Todellinen sovite  $P_i$  saadaan ratkaistua todellisten navan sisähalkaisijan  $D_{iA}$  ja akselin ulkohalkaisijan  $D_{aI}$  perusteella [5, s. 403].

$$|P_i| = D_{iA} - D_{aI} \quad (4)$$

Akselin ja navan väliset sovitteet määrätään yleensä ylä- ja alaromittojen avulla. Minimija maksimiahdistukset saadaan tällöin kaavoista [5, s. 403]:

$$|P_o| = |A_{oA}| - |A_{uI}| \quad (5)$$

$$|P_u| = |A_{uA}| - |A_{oI}| \quad (6)$$

missä  $A_{oA}$  on navan sisähalkaisijan yläeromitta,  $A_{uI}$  on akselin ulkohalkaisijan alaromitta,  $A_{uA}$  on navan sisähalkaisijan alaromitta ja  $A_{oI}$  on akselin ulkohalkaisijan yläeromitta. Todellinen sovite  $P_i$  on tällöin minimi- ja maksimisovitteiden välillä [5, s. 403].

$$|P_o| \leq |P_i| \leq |P_u| \quad (7)$$

Puristusliitoksen puristuspaineen ja jännitysarvojen laskennassa käytetään halkaisijoiden suhteita apuarvoina, jotka saadaan yhtälöistä [5, s. 409]:

$$Q_A = \frac{D_F}{D_{aA}} \quad (8)$$

$$Q_I = \frac{D_{il}}{D_F} \quad (9)$$

joissa  $D_F$  on liitospinnan halkaisijan nimellismitta,  $D_{aA}$  on navan ulkohalkaisija ja  $D_{il}$  on akselin sisähalkaisija.

Kun akseli ja napa ovat materiaaleiltaan samat, niin ovat kimmokertoimet ja Poissonin vakiot myös samat ( $E_A = E_I = E$ ,  $Q_I = 0$  ja  $\mu_A = \mu_I = \mu$ ). Näiden tietojen perustella voidaan ratkaista apusuure  $K$  umpiakselille [5, s. 404].

$$K = \frac{E_A}{E_I} \left( \frac{1+Q_I^2}{1-Q_I^2} - \mu_I \right) + \frac{1+Q_A^2}{1-Q_A^2} + \mu_A \quad (10)$$

Puristusliitoksessa tapahtuvien pinnankarheushuippujen tasoittumisen vuoksi käytetään tehollista ahdistusta  $P_w$ . Tällöin sovite  $P$  saadaan ratkaistua kaavasta [5, s. 403; 3, s. 107]:

$$|P| = |P_w| + 0,8(R_{ZA} + R_{ZI}) \quad (11)$$

missä  $R_{ZI}$  on akselin profiilinsyvyys ja  $R_{ZA}$  on navan profiilinsyvyys. Profiilisyvyyksien  $R_z$  ja keskipoikkeamien  $R_a$  väliset suhteet voidaan katsoa taulukosta 1. Suhteellinen tehollinen ahdistus  $\xi_w$  saadaan laskettua kaavasta [3, s. 108]:

$$\xi_w = \frac{P_w}{D_F} \quad (12)$$

Suhteellista tehollista ahdistusta apuna käyttäen saadaan pintapaine kaavasta [5, s. 406]:

$$p = \frac{\xi_w E_A}{K} \quad (13)$$

Laskettaessa elastisella alueella pysyviä muodonmuutoksia käytetään kaavoja, joissa tunnetaan tehollinen ahdistus tai sovite sekä lasketaan pintapaine ja resultanttivoima umpiakselin ja navan välillä. Halutun varmuuden saavuttamiseksi navalle pysyvään muodonmuutokseen nähden, asetetaan ehto [5, s. 406; 3, s. 110]:

$$\xi_W \leq \frac{2}{\sqrt{3}S_{PA}} \frac{R_{eLA}}{E} \quad (14)$$

missä  $R_{eLA}$  on navan alempi myötöraja ja  $S_{PA}$  on varmuuskerroin navalle pysyvään muodonmuutokseen nähden. Umpiakselille haluttua varmuutta pysyvään muodonmuutokseen nähden asetetaan ehto [5, s. 406; s.3, s. 110]:

$$\xi_W \leq \frac{4}{\sqrt{3(1-Q_I^2)}S_{PI}} \frac{R_{eLI}}{E} \quad (15)$$

missä  $R_{eLI}$  on akselin ylempi myötöraja ja  $S_{PI}$  on haluttu varmuus umpiakselille pysyvään muodonmuutokseen nähden. Akselin ja navan välisiä jännityksiä ei voi suurentaa aivan rajattomasti toteutettaessa puristusliitoksia. Liian suuren pintapaineen seurauksena veyneet tai kokoon puristuneet kappaleet joutuvat plastisen muodonmuutoksen alueelle, jolloin liitoksesta ei välttämättä tule pitävä. Kappaleiden ollessa materiaaliltaan sitkeitä eivät pienet plastiset muodonmuutokset haittaa, mutta suuret deformaatiot saattavat olla haitallisia. [3, s. 108]. Puristusliitoksissa olennaisia suureita on yleensä puristusliitoksen välittämä vääntömomentti, joka saadaan kaavasta:

$$T = \frac{\pi}{2} D_F^2 l_F v_{ru} \frac{p}{S_r} \quad (16)$$

jossa  $v_{ru}$  on tartuntakerroin tangentialisuunnassa liukumiseen nähden ja  $S_r$  on varmuus liukumiseen nähden,  $T$  on vaikuttava vääntömomentti,  $p$  on pintapaine,  $D_F$  on liitospinnan halkaisija,  $l_F$  on liitoksen pituus. Puristusliitoksen välittämän aksiaalisuunnassa tapahtuvan voiman siirtokyky, voidaan laskea kaavasta:

$$F_{ax} = \pi D_F l_F v_{rl} \frac{p}{S_r} \quad (17)$$

jossa  $v_{rl}$  on tartuntakerroin aksiaalisuunnassa liukumiseen nähden ja  $F_{ax}$  on vaikuttava aksiaalivoima. [3, s. 105; 5, s. 402.]

## 2.3 Metallien ominaisuudet ja käyttäytyminen

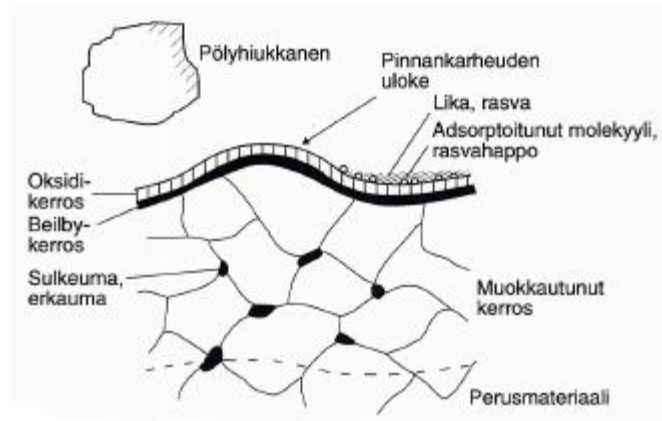
### 2.3.1 Metallipintojen ominaisuudet

Tribologialla tarkoitetaan toisiinsa nähden liikkeessä olevien pintojen vuorovaikutusta käsittelevää tiedettä ja tekniikkaa [4, s. 11]. Pintojen tribologiset ominaisuudet riippuvat materiaalin pintakerroksesta sekä materiaaliominaisuuksista syvemmillä pinnan alapuolella. Lisäksi pinnankarheudella on oma merkityksensä. Tarkastelu keskittyy metallipintoihin, koska metallit ovat olleet yleisimmin käytettyjä materiaaleja koneenrakennuksessa. [4, s. 23.]

### 2.3.2 Metallikappaleen pintakerroksen rakenne

Työstetyn metallikappaleen kiderakenteen päällä on voimakkaasti muokkautunut kerros, joka on syntynyt valmistusvaiheessa. Työstön yhteydessä osa pintakerroksesta sulaa ja leviää pinnalle, jolloin syntyy kova pienirakenteinen kerros. Sitä nimitetään Beilby-kerrokseksi. Muokkautuneen kerroksen pinnalla on vielä kemiallisten reaktioiden kautta syntynyt kerros. Ilmassa olevien metallien pinnalle syntyy hapen vaikutuksesta oksidikerros, jolla on merkittävä vaikutus metallien kitkaan ja kulumiseen. Oksidikerroksen päällä voi olla vielä pintaan kiinnittyneenä kaasumolekyylien tai rasvahappojen muodostama kerros. Näiden lisäksi pintaa voi peittää pöly, kulumistuote tai voiteluainekerros. [4, s. 23.]

Beilby-kerroksen paksuus on noin 10 nm ja sen alla olevan voimakkaasti muokkautuneen kerroksen paksuus suuruusluokaltaan 1 µm. Heikosti muokkautunut kerros ulottuu noin 0,1 mm:n syvyyteen. Oksidikerroksen paksuus on normaaliolosuhteissa 10 - 100 nm. Teräksellä kerros koostuu raudan eri oksideista, joiden happimäärä lisääntyy siirryttäessä pintaa päin. Kuvassa 2 on havainnollistettu tyypillisen metallikerroksen rakennetta. [4, s. 23.]



Kuva 2. Tyypillisen metallipinnan rakenne [4, s.23].

Normaaliolosuhteissa rasvahappo-, oksidi, ym. kerrokset pitävät liukupintojen välisen kitkan pienenä eikä kiinnileikkautumista pääse tapahtumaan ilman korkeaa pintapainetta tai lämpötilaa. Todella puhdas pinta, jossa ei ole minkäänlaisia kerrostumia, on mahdollista säilyttää vain absoluuttisessa tyhjiössä. Tällaisilla liukupinnoilla kitka muodostuu erittäin suureksi, ja pinnat hitsautuvat toisiinsa eli kiinnileikkautuvat. [4, s. 23.]

### 2.3.3 Elastinen ja plastinen muodonmuutos

Materiaalin pituutta kasvatettaessa ulkoisella voimalla materiaali venyy. Jos materiaali palaa alkuperäiseen muotoonsa, on muodonmuutos luonteeltaan elastista eli palautuvaa. Kun taas ylitetään metallille ominainen raja-arvo, on muodonmuutos pysyvää eli plastista.

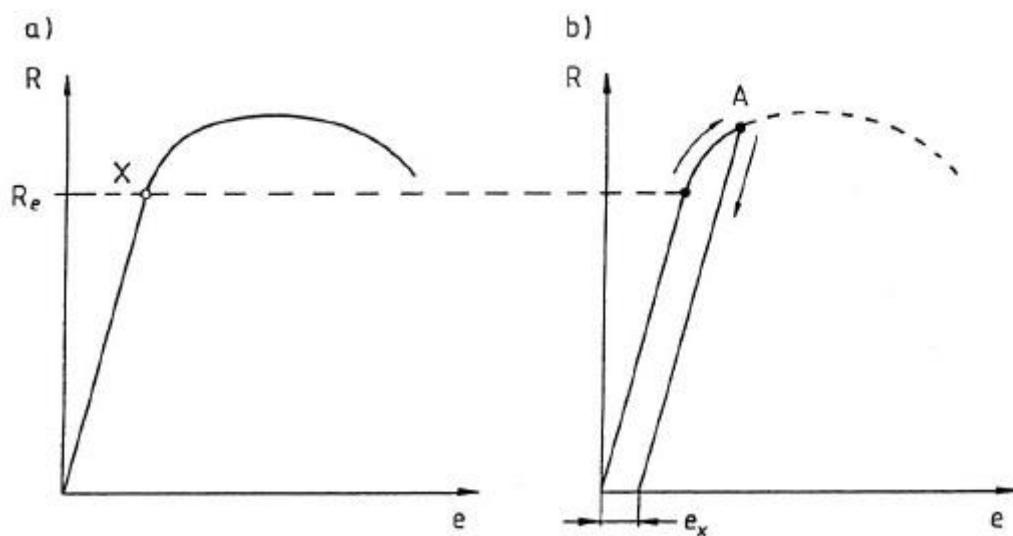
Materiaalien käyttäytymistä kuvataan usein jännitys – venymäkäyrällä. Jännitys – venymäkäyrästä voidaan määrittää mm. kimmomoduuli  $E$ , jonka avulla voidaan laskea jännitys  $\sigma$ :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (18)$$

missä  $\varepsilon$  kuvaa suhteellista venymää. Materiaalin seostuksella, muokkauksella, muovauksella ja lämpökäsittelyllä ei ole kovin suurta merkitystä kimmokertoimen arvolle jos metallin kiderakenne säilyy muuttumattomana. Materiaali on sitä jäykempää, mitä suu-

remppi sen kimmomoduuli on. Kimmomoduulin määrittäminen on helppoa. Plastisen muodonmuutoksen alkamiskohtana pidetään myötörajaa. Sen tarkka määrittäminen puolestaan on hankalampaa.

Plastisella muodonmuutoksella tarkoitetaan sitä, kun kappaleeseen kohdistuu ulkoinen voima, jonka vaikutuksesta syntyy palautumattomia muodonmuutoksia. Kappale siis ylittää oman materiaaliteknisistä ominaisuuksista ja kappaleen muodosta muodostuvan myötölujuuden. Myötölujuudella tarkoitetaan elastisen eli palautuvan muodonmuutoksen ja plastisen muodonmuutoksen rajan välistä aluetta. Huomattavaa on kuitenkin, että plastisesti muovautuneen kappaleen kokonaisvenymästä osa on elastista venymää ja se on määrältään aina suurin mahdollinen vallitsevissa olosuhteissa (Kuva 3).



Kuva 3. Jännitys-venymä-piirroksia. a) muodonmuutos on palautuva pisteeseen X saakka. b) Kun jännitys ylittää myötölujuuden  $R_e$ , jää kappaleeseen pysyvää muodonmuutosta ( $e_x$ ) kuormituksen poistuttua. e on venymä ja R jännitys [9, s. 64].

Metallit ovat hyviä materiaaleja haluttujen plastisten muodonmuutosten osalta. Niiden muokattavuus on suhteellisen helppoa ja plastisille materiaaleille voidaan tehdä suurikin muodonmuutoksia ilman, että kappale murtuu. [9, s. 63 – 65.]

## 2.4 Elementtimenetelmä

Elementtimenetelmä on laskentatekniikka, jolla voidaan laskea rakenteiden ja kaiken koosten esineiden mekaanisia kestävyyskärsiä ja muodonmuutoksia Toisin sanottuna elementtimenetelmä on osittaisdifferentiaaliyhtälöryhmän reuna-arvotehtävän likimääräinen ratkaisumenetelmä. Elementtimenetelmästä käytetään lyhennettä FEM, joka tulee englannin kielen sanoista Finite Element method. Joskus käytetään myös lyhennettä FEA, joka tulee sanoista Finite Element Analysis. Lujuuslaskentaan on aikojen kuluessa kehitetty monia numeerisia ratkaisumenetelmiä, mutta ehdottomasti käytetyin teollisessa suunnittelussa niistä on elementtimenetelmä. Sen menestys ja käyttö perustuu tietokoneisiin, jotka tekevät mahdolliseksi suurten numerolaskumäärien käsittelyn kohtuullisessa ajassa. [10.]

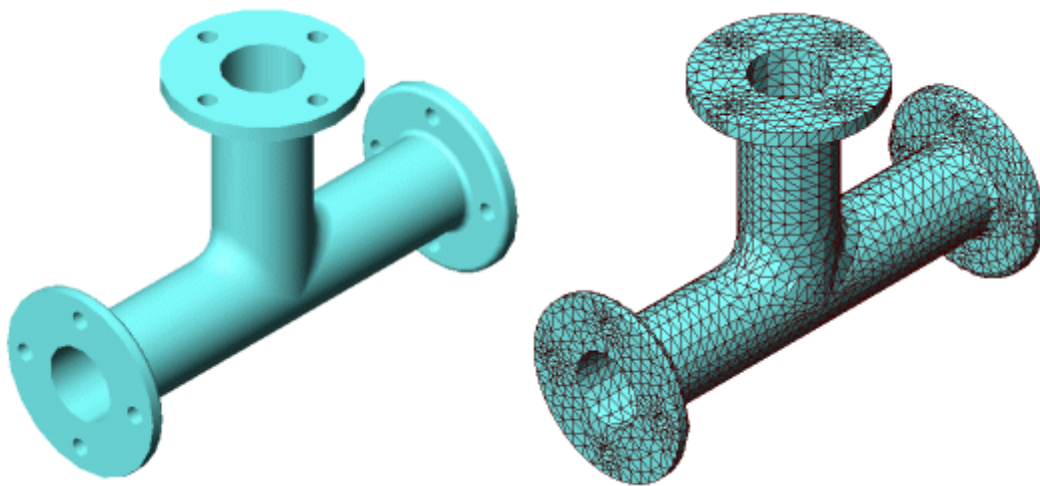
FEM käyttää simuloinnissa numeerista tekniikkaa, jolla se pyrkii löytämään likimääräisiä ratkaisuja raja-arvo-ongelmien osittaisiin differentiaaliyhtälöihin. Laskentamahdollisuuksia on nykyään laajennettu niin, että on mahdollista laskea lineaarisen lujuusopin alueelta niin geometrian kuin materiaalien epälineaarista käyttäytymistä. Elementtimenetelmää voidaan käyttää minkä tahansa osittaisdifferentiaaliyhtälöryhmän alku- ja reuna-arvotehtävän likimääräiseen ratkaisemiseen. Teknillisen mekaniikan piirissä elementtimenetelmä on levinnyt laajalle. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi lämmönsiirron, virtausopin, sähkötekniikan ja akustiikan ongelmien ratkaisemisessa. [10.]

Simuloitaessa elementtimenetelmää avuksi käyttäen saavutetaan merkittäviä etuja. Simuloitaessa saadaan tietoa kappaleiden kestävydestä, muodonmuutoksista ja siitä tarvitaanko johonkin lisää tai vähemmän materiaalia. Ilman simulointimenetelmän apua nämä testit jouduttaisiin suorittamaan kalliin tuotekehityksen eri vaiheiden läpi. Saavutettuja etuja simuloitaessa elementtimenetelmällä ovat mm. pienentyneet kustannukset kun käytetään tietokonetta kenttätestauksen sijasta ja voidaan optimoida kappaleen muotoilua simuloimalla eri vaihtoehtoja ennen viimeistä konseptia. [10.]

Simuloitaessa elastisella alueella tapahtuvia muodonmuutoksia voidaan käyttää lineaarista simulointia. Epälineaarista analyysiä käytetään kun on oletettavissa, että kappale ylittää myötörajan ja muodonmuutos on plastista.

### 2.4.1 Elementtiverkko

Lujuusopin perusdifferentiaaliyhtälöiden analyttinen ratkaiseminen onnistuu vain yksinkertaisen geometrian, kuormituksen ja tuennan omaavissa perustapauksissa. Elementtimenetelmää käytettäessä geometrisesti monimutkainen kappale jaetaan äärellisiin osiin, jotka ovat geometrialtaan yksinkertaisia. Näitä jako-osia sanotaan elementeiksi. Kolmiulotteisissa kappaleissa käytetään neli-, viisi- ja kuusitahokkaita, joiden reunapinnat voivat olla tasoja tai yksinkertaisia kaarevia pintoja (Kuva 4). [10.]

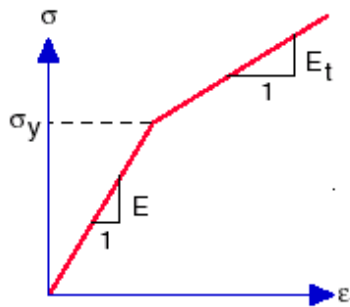


Kuva 4. Kuvassa on havainnollistettu luotua elementtiverkkoa 3D-mallinnetulle kappaleelle [11].

Kappaleiden jako-osina käytettävien elementtien koko voi vaihdella ihan tarkoituksen mukaan. Tutkittavalle alueelle voidaan määrittää tiukempi verkko, jolloin tulokset ovat tarkempia ja parempia. Elementtiverkko kuvaa usein todellista kappaletta vain likimääräisesti varsinkin pinta- ja solidirakenteilla, mikä aiheuttaa tuloksiin virhettä. Elementtiverkon elementit kiinnittyvät toisiinsa elementtien solmuilla. [10.]

### 2.4.2 Tangenttimoduulin määrittäminen plastisia simulointeja varten

Tangenttimoduulilla tarkoitetaan materiaalin jännitys – venymäkäyrän kulmakerrointa tarkastelupisteessä, joka on ylittänyt myötörajan (Kuva 5). Tangenttimoduuli täytyy siis määrittää tarkasti jokaiselle pisteelle erikseen. Suoritettaessa epälineaarisia simulointeja Solid Worksiin tarvitaan simulointiohjelmalle kuitenkin vain yksi arvo. Kyseisen arvon määrittäminen onkin hankalaa ja usein simuloinneissa käytetyt tangenttimoduulin arvot ovatkin vain keskimääräisiä arvauksia. [11; 12; 13; 14.]



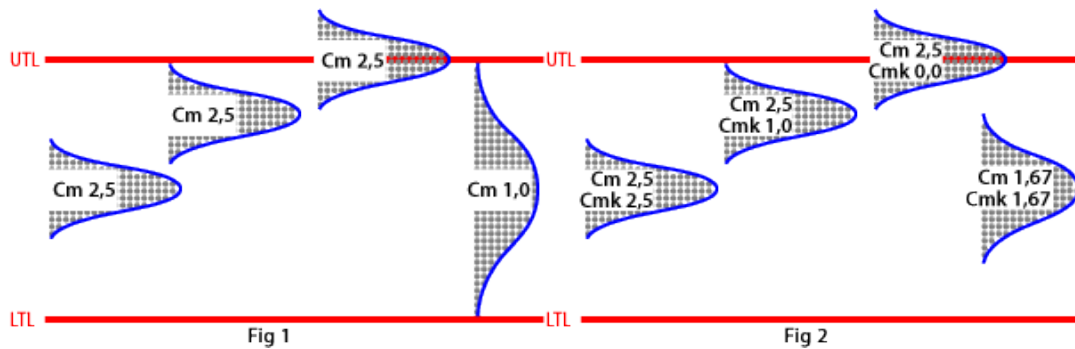
Kuva 5. Määritettäessä jännitys – venymäkäyrää ensimmäinen määritettävä piste on myötöraja  $\sigma_y$ . Tangenttimoduuli määritetään myötörajan jälkeen jokaiselle pisteelle erikseen [13].

Tangenttimoduuli on käytännöllinen kuvaamaan materiaalin käyttäytymistä, jota on kuormitettu elastisen muodonmuutosalueen yli. Materiaalin ollessa plastisesti muokkautunut ei jännitys - venymäkäyrä ole enää lineaarinen. Tangenttimoduuli määrittää käytännössä siis materiaalin pehmenemisen, joka yleensä tapahtuu kun materiaali alkaa myötää. Vaikka materiaali myötää, voi se silti kantaa suuriakin kuormia ennen murtumistaan. Siksi usein esimerkiksi massan kannalta kappaleet voidaan suunnitella kevyemmiksi kun osataan ottaa huomioon plastiset muodonmuutokset. [11; 12; 13; 14.]

## 2.5 Työstökoneiden kyvykkyys

Työstökoneiden kyvykkyyttä mitataan pääasiallisesti suureilla  $C_m$  ja  $C_{mk}$ . Symbolilla  $C_m$  mitataan työstökoneen kyvykkyyttä. Se määrittää normaalijakauman arvon, jolla työstökoneella päästään kappaleelle asetettujen toleranssien sisään. Mitä suurempi on  $C_m$  -arvo, sitä parempi kone. Huomioitavaa kuitenkin on, että vaikka normaalijakauma ei olisi ylemmän ja alemman toleranssirajojen välissä, olisi  $C_m$  -arvo silti sama. Se siis kuvaa vain toleranssivälin ja normaalijakauman suhdetta.

$C_{mk}$  -arvolla kuvataan myös työstökoneen kyvykkyyttä suhteessa toleranssirajoihin.  $C_{mk}$  -arvolla kuvataan työstökoneen kyvykkyyttä suhteessa toleranssien keskilinjaan. Suuri  $C_{mk}$  -arvo kertoo siitä, että kone on laadukas ja työstöjälki noudattaa pientä normaalijakaumaa.  $C_{mk}$ - ja  $C_m$  -arvojen ollessa samat on kone kykeneväinen valmistamaan tuotteita täysin toleranssirajojen keskilinjan mukaisesti (Kuva 6). [15; 16.]



Kuva 6. Kuvassa (Fig 1) on havainnollistettu kuinka  $C_m$  -arvolla ei ole merkitystä miten työstettyjen kappaleiden mittojen normaalijakauma asettuu toleranssirajojen väliin. Kuvassa (Fig 2) on esitetty  $C_m$ - ja  $C_{mk}$  -arvojen välistä yhteyttä, miten ne arvoista riippuen asetuvat toleranssirajojen välille [15].

Kun mitataan työstökoneen kyvykkyyttä  $C_m$ - ja  $C_{mk}$  -arvoilla on huomioitava, että prosessin on säilyttävä muuttumattomana. Työkalujen, materiaalien, työntekijän ja mittaustekniikoiden on säilyttävä samana koko työstöjakson ajan. Konetta ei myöskään sovi pysäyttää kesken kaiken. Mittausjakso on tällöin verrattain lyhyt ja mittausjaksoon kuuluvia komponentteja on työstösarjan verran, yleensä noin 20 - 50 kpl. (Kuva 6.)[15.]

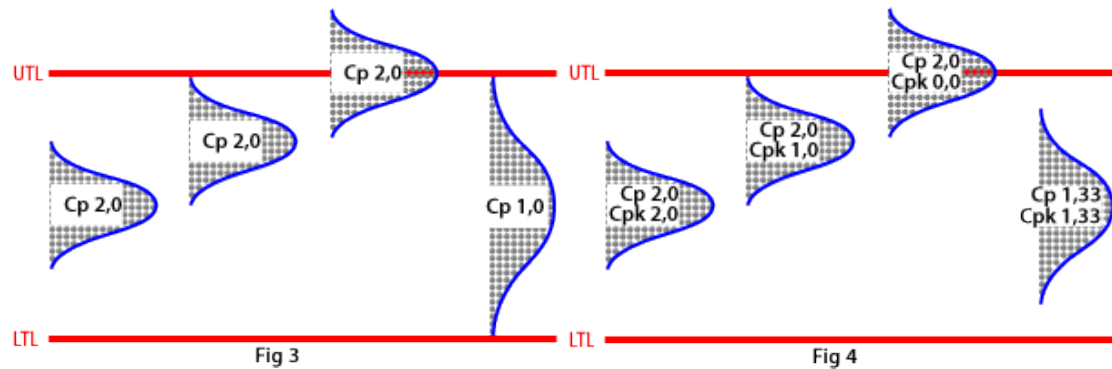
## 2.6 Työstöprosessien kyvykkyys

Edellä mainittujen työstökoneiden kyvykkyksiä voidaan mitata prosessien kyvykkyyksillä. Tällöin puhutaan  $C_p$ - ja  $C_{pk}$  -arvoista.  $C_p$  -arvoilla havainnollistetaan prosessin kyvykkyyttä.  $C_p$  -arvolla pyritään havainnollistamaan, kuinka usein prosessien normaalijakaumat osuvat toleranssirajojen sisälle. Korkea  $C_p$  -arvo tarkoittaa hyvää prosessia. Huomioitavaa on jälleen, että  $C_p$  -arvo ei ota kantaa normaalijakaumien sijaintiin toleranssirajojen välissä. Se kuvaa vain toleranssirajojen ja normaalijakauman suhdetta.  $C_{pk}$  -arvolla otetaan huomioon myös normaalijakauman sijainti toleranssivälissä. Normaali vaatimus on, että  $C_{pk}$ -arvo olisi vähintään 1,33.  $C_{pk}$  -arvo voidaan laskea kaavasta:

$$C_{pk} = \min \left[ \frac{USL - \bar{x}}{3\hat{\sigma}}, \frac{\bar{x} - LSL}{3\hat{\sigma}} \right] \quad (19)$$

missä USL on ylempi spesifikaatoraja, LSL on alempi spesifikaatoraja,  $\hat{\sigma}$  on perusjoukon keskihajonnan estimaatti ja  $\bar{x}$  on otoksen keskiarvo. Kun mitataan työstökoneen kyvykkyyttä  $C_m$ - ja  $C_{mk}$  -arvoilla on huomioitava, että prosessin on säilyttävä muuttumattomana. Työkalujen, materiaalien, työntekijän ja mittaustekniikoiden on säilyttävä samana

koko työstöjakson ajan. Konetta ei myöskään sovi pysäyttää kesken kaiken. Mittausjakso on tällöin verrattain lyhyt ja mittausjaksoon kuuluvia komponentteja on työstösarjan verran, yleensä noin 20 - 50 kpl. (Kuva 7.)[15; 16.]



Kuva 7. Kuvassa (Fig 3) on havainnollistettu kuinka  $C_p$  -arvoilla ei ole merkitystä, miten työstöprosessit asettuvat annettujen toleranssirajojen sisälle. Kuvassa (Fig 4) on esitetty  $C_p$  - ja  $C_{pk}$  -arvojen yhteys.  $C_{pk}$  -arvossa on summattu käytännössä työstöprosessit yhteen [15].

Prosessien kyvykkyyksiä  $C_p$  ja  $C_{pk}$  tulkittaessa tarkoitetaan käytännössä sitä, että eri työstökoneen kyvykkyydet on summattu yhteen. Tällöin mitattavien komponenttienkin määrä on luonnollisesti suurempi.

Normaalijakaumaksi kutsutaan kuvaajaa, jossa mitatut arvot on summattu yhteen ja ne ovat jakautuneet kellon muotoiseksi jakaumaksi. Suurin osa lukemista on jakautunut keskelle kumpua. Mitä kauemmaksi keskustaa mennään, niin sitä vähemmän mitattuja arvoja sieltä löytyy.

$C_{pk}$  -arvoista voidaan päätellä, kuinka monta kappaletta työstetyistä aihioista saadaan valmistettua toleranssirajojen sisälle. Tiettyjä  $C_{pk}$  -arvoja voidaan nimittää sigmoilla. Jokaiselle sigmalle on oma  $C_{pk}$  -arvonsa. (Taulukko 2.) [15; 16.]

Taulukko 2. Työstöprosessien kyvykkyysslukujen  $C_{pk}$  ja sigmojen väliset yhteydet.  $C_{pk}$  -arvolla voidaan määrittää saanto, jollekin koneistuserälle taulukon mukaan. Myös hylättyjen kappaleiden määrät on esitetty taulukossa [16].

Sigma	$C_{pk}$	Saanto (%)	Hylätty (PPM)
6	2,00	99,9999998	3,4
5	1,67	99,9999	233
4	1,33	99,99	6210
3	1,00	99,73	66 807
2	0,67	95,45	308 538
1	0,33	68,27	691 462

Huomioitavaa prosessissa on, että hylättyjen kappaleiden määrää voidaan vähentää jo pienillä  $C_{pk}$  -luvun parannuksilla prosessissa. Yleisesti on oletettu, että hyvällä työstökoneella  $C_{pk}$ -arvo olisi 1,33, jolloin se vastaisi sigmaa 4 ja saanto olisi 99,99 % [15].

## 2.7 Pienimmän neliösumman menetelmä

Pienimmän neliösumman menetelmä eli PNS-menetelmä on matemaattisen optimoinnin menetelmä, jolla pyritään löytämään paras sovite käytetylle aineistolle. Pienimmän neliösumman menetelmässä regressiokertoimien estimaattorit määrätään minimoimalla jäännöstermien neliön summa. PNS-menetelmällä saadaan laskettua havaintopisteiden vertikaalinen etäisyys regressiosuorasta. Mitä pienempi etäisyys PNS-menetelmällä saadaan, sitä paremmin regressiosuora mallintaa havaintopisteiden käyttäytymistä ja sitä parempi selitettävyyssaste mallilla on.

PNS-menetelmä on käytettävyytensä takia suosittu menetelmä, jota voidaan soveltaa useissa kohteissa. Lineaarisen mallin tapauksessa pienimmän neliösumman menetelmä tuottaa tehokkaimman harhattoman estimaattorin. Tässä työssä PNS-menetelmää käytetään puristusliitoksen kitkakertoimien määrittämiseen. [17.]



Manuaalipuristinten hyötyjä ovat mm. nopea käytettävyys ja helppo muunneltavuus sekä lisäksi ovat ne hinnaltaan halpoja. Puristusliikkeen korkeuden säätö on nopeaa ja vaivatonta. Kahva voidaan asettaa sopivaksi niin vasen- kuin oikeakätisellekin työntekijälle. Manuaalipuristin on käytännössä huoltovapaa. Se ei tarvitse välttämättä mitään voiteluainetta sylinteriinsä. Tosin voitelun käyttäminen lisää laitteen jo ennestään pitkää käyttöikää. [18; 19.]

### 2.8.2 Polvinivellinen manuaalipuristin

Polvinivellinen manuaalipuristin (Kuva 9) on käytännössä sama laite kuin normaali manuaalikäyttöinen puristin, mutta tässä kahva on kiinnitetty ylimääräiseen polven kaltaiseen niveleeseen. Tällä ratkaisulla pystytään saavuttamaan suurempi voima iskun lopussa kun polvinivel oikenee. Voimaa tuottavan kahvan voi myös kääntää ylösalaisin ja näin ollen voimantuotto tapahtuu nostamalla kahvaa ylöspäin. [18.]



Kuva 9. Pöydälle asennettava polvinivellinen manuaalipuristin, jossa voima tuotetaan kahvasta vetämällä ja lopussa saadan nivelen ansiosta tuotettua suurin puristusvoima [18].

### 2.8.3 Pneumaattinen puristin

Pneumaattinen puristin (Kuva 10) ottaa iskuunsa voiman paineilmasta. Puristinyksikkö on käytännössä samanlainen kuin manuaalinen puristin, mutta vetokahva puuttuu ja yläosaan on asennettu paineilmatoiminen sylinteri. Sylinterin sisällä on mäntiä, jotka on yhdistetty tangolla keskenään. Paineilmaa ohjataan työtä tekevän iskun aikana ylimmän männän yläpuolelle, jolloin sylinterin kyseinen tilavuus paineistuu. Tällöin tilavuus pyrkii laajentumaan jolloin mäntä liikkuu alaspäin ja saadaan aikaan haluttu hallittu liike. Puluiskussa yläkanavasta poistetaan paineet ja paineilmaa ohjataan puolestaan alimman männän alapuolelle [18; 19].



Kuva 10. Pneumaattisella sylinterillä varustettu pöytämallin puristin. Voimantuotto tapahtuu paineilman avulla [18].

Iskua voidaan säädellä asettamalla mekaanisia rajoittimia. Kyseisillä rajoittimilla voidaan määrittää iskunpituutta tai jokin tietty asema. Tarkan aseman mittauksen suorittamiseksi sylinterin sisään voidaan asentaa antureita, joista voidaan magneetilla mitata sylinterin asema [18].

#### 2.8.4 Hydraulinen puristin

Hydraulisessa puristimessa (Kuva 11) tehosiirto tapahtuu nesteen paineen ja virtauksen avulla. Hydraulisen puristin on yleisimpiä puristintyyppejä. Voimantuotto tapahtuu käsivoimin tai jonkin muun energialähteen avulla. Hydrauliikkaöljyn virtaus ohjataan venttiilien kautta sylintereihin, jotka liikuttavat sylinterin sisällä olevaa mäntää. Silloin hydraulinen energia muutetaan mekaaniseksi energiaksi. Hydraulipuristimien etuina pneumaattisiin on nesteen kokoonpuristumattomuus. Tällöin saadaan aikaan hyvin vähäiset joustot. Hydrauliset puristimet ovat hitaita liikkeitään verrattuna esimerkiksi servo-ohjattuihin puristimiin. [18; 19.]



Kuva 11. Havainnekuva H-runkoisesta hydrauliikkapuristimesta, jonka voimantuotto tapahtuu sähkömoottorin avulla.

### 2.8.5 Hydropneumaattinen puristin

Hydropneumaattinen puristin (Kuva 12) toimii siten, että se muuntaa sähköenergian hydrauliseksi energiaksi, joka puolestaan muutetaan mekaaniseksi energiaksi hydraulisylinterien avulla puristimen sisällä. Apuna käytetään siis myös pneumatiikkasysteemiä. Voima tuotetaan hydrauliskanesteen välityksellä ja painetta säätämällä voidaan ohjata puristinta sekä säädellä voimaa. [20.]



Kuva 12. Schmidtin hydropneumaattinen tyypin 365 puristin. Puristimen vieressä monitori, josta saadaan reaaliaikaisena mm. voima-asema-käyriä näkyville. Puristinta voidaan myös ohjata monitorin kautta [18].

Hydropneumaattinen puristin toimii siten, että nesteen paine ohjataan männän yläpuolelle, jolloin työliike ohjautuu alaspäin. Kun puristustapahtuma on suoritettu, ohjataan paine männän alapuolelle, jolloin puristin palautuu alkuasemaansa. Liikkeeltään hydraulikkaa käyttävät puristimet ovat hitaita verrattuna manuaalikäyttöisiin- tai servo-ohjattuihin puristimiin. Käytöstä löytyy myös pelkästään hydraulisella sylinterillä valmistettuja puristimia, joissa sylinteriä liikutetaan esimerkiksi pumppaamalla kahvan avulla painetta sylinteriin. [18; 19.]

### 2.8.6 Servo-ohjattu puristin

Servo-ohjattu puristin (Kuva 13) on ekologinen ja korkealaatuinen puristintyyppi. Sen voimanlähteenä käytetään sähköistä servomoottoria. Servo-ohjatussa puristimessa on moottorin yhteyteen asennettu pulssityyppinen anturi, joka mittaa akselin kulmaa ja pyörähdyskertoja. Kyseisellä ratkaisulla puristimen liikkeet ovat tarkkoja ja usein servo-ohjatun puristimen käyttötarkoitukset vaativatkin tarkkoja asennuksia aseman tai toleranssien suhteen. Servopuristinten parhaita puolia ovat myös sen nopeus, toistettavuus ja räätälöinti juuri sopivaa käyttökohdetta varten. [18.]



Kuva 13. Havainnekuva servo-ohjatusta puristinyksiköstä. Servomoottori sijaitsee yksikön kotelon sisällä. Ohjaus tapahtuu lisälaitteiden avulla. Servo-ohjattu yksikkö on asennettu kuvassa C-rungon päälle [18].

### 2.8.7 Puristinten runkotyypit

Puristimen rungon on tarkoitus absorboida puristimesta aiheutuvia voimia. Tukevalla rungolla taataan tarkat ja toistettavat puristustapahtumat. Rungon tarkoituksena on myös tukea ja suojata puristimen eri toimintayksiköitä. Puristimissa käytetään useita erityyppisiä runkoja ja ne on nimetty muotojensa mukaan. Pöytätyypin malleissa rungot ovat yleensä C-runkoja ja H-runkoja. Halutut ominaisuudet määrittävät rungon tyypin ja koon. Suuremmat rungot ovat jäykempiä ja pystyvät omaksumaan suurempia voimia. Myös puristettavien kappaleiden koko ja työskentelytilan tarve saattavat vaikuttaa rungon koon valintaan. Rungon muodon valintaan vaikuttavat mm. kappaleen muoto sekä työskentelytilan tarve.

C-runko on nimensä mukaan muodoltaan C:n muotoinen. Alhaalla on työtaso, johon kiinnitetään alatyökalu tai asetetaan puristettava kappale. Ylhäällä rungon yläosaan on kiinnitetty puristinyksikkö, joka tekee varsinaisen työn. C-rungollista puristinta on helpompi käyttää edestäpäin, koska se on kolmelta sivulta avoin. Myös työskentelyvälin säätö käy nopeasti ja vaivattomasti. Haittapuolena on rungon haukottelu. Haukottelulla tarkoitetaan sitä, kuinka paljon runko joustaa puristustapahtuman aikana. Haukottelu alkaa heti kun puristimeen kohdistuvat voimat lähtevät kasvamaan. Tällöin puristimen aiheuttama voima pyrkii pääsemään johonkin suuntaan ja pyrkii työntämään ylä- ja alatyökalua erilleen. Voima kohdistuu tällöin puristimen runkoon. Rungot mitoitetaan kestävämpään puristimen aiheuttama voima, ja tarpeeksi jyvällällä runkoratkaisulla pystytään estämään haukottelu. Haukottelu aiheuttaa epätarkkuutta puristustapahtumaan sekä toistettavuuteen. Tämän vuoksi C-runkoisia puristimia käytetäänkin yleensä sovelluksissa, joissa voimat pysyvät verrattain pieninä.

H-runko puolestaan koostuu käytännössä kahdesta tai neljästä tolpastä, kuten hydraulikkakäyttöisessä puristimessa kuvassa 11. H-runkoisessa mallissa puristinyksikkö on asetettu rungon keskelle. H-rungolla päästään tarkempaan mittoihin, koska rakenne on jyvällämpi ja voimat jakautuvat tasaisesti jokaiselle tolपालle. Tällöin myös toistettavuus eri puristustapahtumien välillä paranee. H-runkoja käytetäänkin yleensä, kun voimatasot kasvavat suuriksi. [18; 19.]

### 2.8.8 Puristinten ohjaus ja monitorointi

Voimantarve ja puristusliikkeen pituus ovat tärkeitä parametrejä, kun tarkastellaan puristustapahtuman laatua. Monitoroinnilla voidaan tarkkailla näitä nimenomaisia parametrejä puristimen käytön aikana ja puristustapahtuman jälkeen. Tutkittavaksi voidaan ottaa erinäisiä kuvaajia, esimerkiksi voima/isku, voima/aika, voima/siirtymä ja siirtymä/aika. Puristinta voidaan ohjata erillisen tietokoneen avulla etänä tai puristimen viereen asennetun näyttöpaneelin avulla.

Joillakin valmistajilla on myös puristustapahtumaan sovelluksia, joilla voidaan tutkia puristustapahtuman onnistumista. Tietokoneelle voidaan asentaa tietynlaisia toleranssi-ikkunoita, joita voima/siirtymäkäyrän on saavutettava tai se ei saa ylittää. Näiden avulla prosessista saadaan laadukas ja pystytään havaitsemaan, jos jokin tuotantoprosessissa suoritetuista tapahtumista ei vastaa vaatimuksia. [18; 19.]

### 3 Tulokset

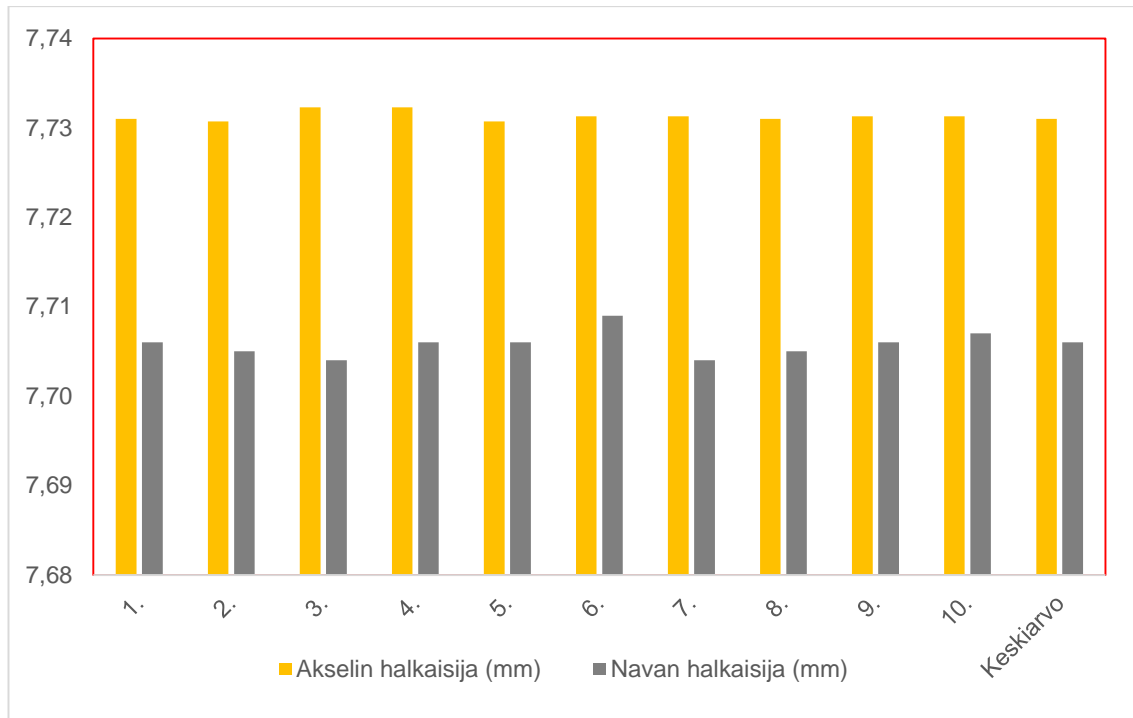
Tässä osiossa esitetään työn suorittaminen ja saadut tulokset. Osiossa on esitetty mitausten tulokset, puristimella tehdyt puristusliitokset, puristusliitoksen teoreettisesti lasketut arvot ja puristusliitoksen simulointitulokset.

#### 3.1 Akseleiden ja napojen mitatut arvot

Akseleita ja napoja oli koneistettuna kymmenen paria tutkimuksia varten. Kaikista kymmenestä parista akseleita ja napoja mitattiin liitospintojen halkaisijat. Pinnankarheusmitaukset suoritettiin vain kolmelle parille. Nämä kolme paria jätettiin liittämättä toisiinsa siltä varalta, että liitospintoja olisi haluttu tutkia vielä paremmin. Puristusliitokset suoritettiin siis myöhemmin vain seitsemälle parille.

##### 3.1.1 Akselien ja napojen liitospintojen halkaisijat

Akselin halkaisijat mitattiin kolmesta kohdasta ja näistä laskettiin keskiarvo. Mittauspisteet olivat tasaisesti jaoteltu akselin koko mitalle. Navan halkaisija mitattiin vain yhdestä kohdasta. Nominaalimitta akselin ja navan halkaisijoille on 7,7 mm. Numeroidut akselit ja navat toimivat liitospareina ja jokaiselle liitosparille laskettiin myös sovitteet. Sovitteet on laskettu vähentämällä akselin liitospinnan halkaisijasta navan liitospinnan halkaisija. Tarkemmat mittaustulokset akselien ja napojen halkaisijoille sekä niiden avulla lasketuille sovitteille löytyvät työn lopusta liitteestä 7. Akseleiden ja napojen väliset sovitteet on esitetty kuvassa 14. Sovitteiden perusteella on myös laskettu sovitteiden keskiarvo.



Kuva 14. Yksilöityjen akselien ja napojen väliset sovitteet sekä niiden avulla laskettu keskiarvo.

Mitatuista tuloksista määritettiin myös suurin ja pienin sovite kappaleiden välillä valitsemalla suurimmat ja pienimmän halkaisijoiden arvot. Sovitteet on esitelty taulukossa 3 ja mitatut tulokset on esitelty liitteessä 7. Näitä arvoja käytettiin teoreettisesti lasketuissa puristusliitoslaskuissa, joissa laskuarvojen pohjana toimivat nimenomaan todelliset arvot koneistetuista osista.

Taulukko 3. Mitattujen akselien suurimpien ja pienimpien liitospintojen halkaisijoiden avulla laskettiin suurin ja pienin sovite.

	Suurin sovite (mm)	Pienin sovite (mm)
<b>Akseli</b>	7,7323	7,7307
<b>Napa</b>	7,7040	7,7090
<b>Sovite</b>	0,0283	0,0217

### 3.1.2 Liitospintojen pinnankarheusmittaukset

Pinnankarheusmittaukset suoritettiin kolmelle akselille ja kolmelle navalle. Mittaukset suoritettiin Zeissin pinnankarheusmittarilla, jolla saatiin pinnankarheuden keskipoikkeamien Ra-arvot. Tulokset pinnankarheusmittauksista on esitelty taulukossa 4.

Taulukko 4. Akselin ja navan liitospintojen pinnankarheusmittaukset.

<b>Pari</b>	<b>Akseli (Ra)</b>	<b>Napa (Ra)</b>
1.	0,181	0,262
2.	0,173	0,289
3.	0,235	0,305
Keskiarvo	0,196	0,285
Keskiarvoa vastaavan profiilisyvyys Rz:n arvo ( $\mu\text{m}$ )	1,6	2,0

Pinnankarheusmittausten Ra -arvot muunnettiin taulukon 1 mukaisesti vastaamaan profiilisyvyksien Rz -arvoja. Profiilisyvyksien arvoja käytetään tämän työn puristusliitoslaskuissa. Pinnankarheusmittausten mittapöytäkirjat löytyvät työn liitteistä 1 - 6.

### 3.1.3 Työstökoneiden kyvykkyydet

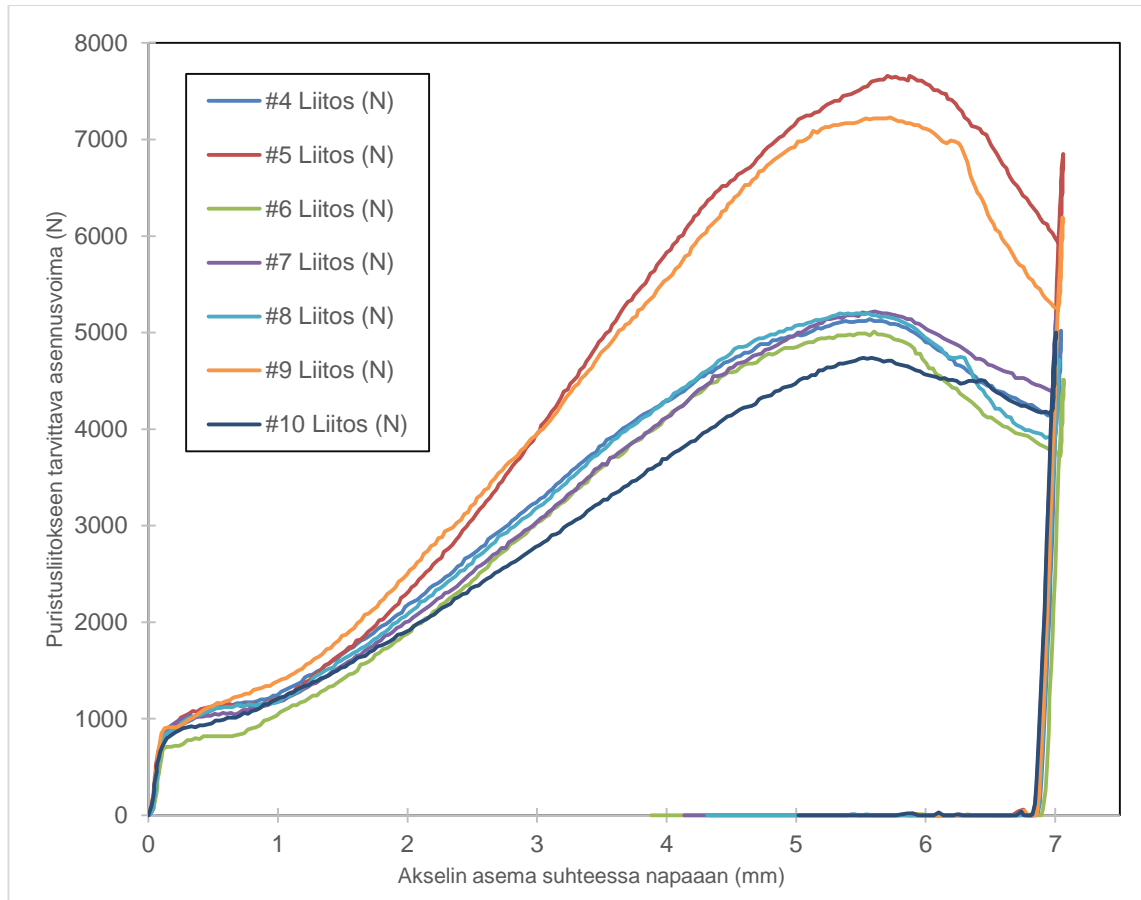
Työstökoneen kyvykkyyden  $C_{pk}$  -arvot on esitelty taulukossa 5 ja ne on laskettu käyttäen kaavaa 19. Arvoina on käytetty koneistettujen kappaleiden toleranssirajoja (taulukko 6) ja liitospintojen halkaisijoita (liite 7). Taulukossa 5 on myös havainnollistettu todellisen  $C_{pk}$  -arvon suhdetta vastaavaan sigman arvoon. Sigman arvon ja  $C_{pk}$  -arvon suhde on laskettu apuna käyttäen taulukkoa 2.

Taulukko 5. Todelliset  $C_{pk}$  -arvot, jotka on laskettu koneistettujen akseleiden ja napojen mittojen perusteella. Yleisesti riittävän pätevänä kyvykkyytenä on pidetty  $C_{pk}$  -arvoa 1,33, joka puolestaan vastaa sigman arvoa 4. Taulukossa on myös esitetty sigma-luku suhteutettuna todellisiin laskettuihin  $C_{pk}$  -arvoihin.

	<b>Akseli</b>	<b>Napa</b>
<b>Toleranssirajat (mm)</b>	7,723 – 7,738	7,70 – 7,72
<b>Todellinen <math>C_{pk}</math></b>	3,78	1,31
<b><math>C_{pk}</math> -arvoa vastaava sigman arvo</b>	11,3	3,9

### 3.2 Puristimella suoritettut puristusliitokset

Puristusliitokset suoritettiin seitsemälle akseli – napa -parille. Parit määriteltiin satunnaisesti ja jokaisesta osasta oli mitattu liitospintojen pinnankarheudet ja halkaisijat ennen puristusliitoksen suorittamista. Puristusliitoksissa käytettiin Schmidt-420 servokäyttöistä prässää. Mittausdata saatiin puristimelta helpommin käytettävään muotoon analysoitavaksi Microsoft Exceliin käyttäen Schmidin omaa PRC4000-ohjelmaa. (Kuva 15.)



Kuva 15. Seitsemälle liitosparille suoritettut puristusliitokset tarvittavan asennusvoiman ja liitoksen aseman funktiona.

Puristusliitosta varten oli jo valmiiksi suunniteltu työkalut puristimen molempiin päihin. Tällöin puristustapahtumasta saatiin laadukas. Työkalut helpottivat myös osien kohdistamista ja paikallaan pysymistä. Mittaustulokset ovat myös näin vertailukelpoisia keskenään.

### 3.3 Puristusliitoksen teoreettiset laskelmat

Laskettaessa teoriassa puristusliitokseen vaadittavia ja kohdistuvia voimia keskityttiin kolmeen eri tilanteeseen. Tilanteeseen, jossa puristusliitoksen kappaleiden liitospinnoille ei ole huomioitu pinnankarheuksia mukaan lainkaan, tilanteeseen, jossa pinnankarheet on huomioitu mukaan, sekä tilanteeseen, jossa pinnankarheuksien lisäksi mukaan huomioidaan vielä kitka, jolloin tilanne on lähimpänä todellista tilannetta.

Teoreettisissa laskuissa käytettiin työkuvan toleranssien ylä- ja alarajoja, joista saatiin määritettyä minimi- ja maksimiahdistukset. Työkuvat löytyvät työn liitteistä 9 ja 10. Minimihdistukset on esitelty taulukossa 6.

Taulukko 6. Akselin ja navan halkaisijoiden ylä- ja alaeromitat, joista on laskettu minimi- ja maksimiahdistukset

Symboli	Mitta (mm)	Selite
AoA	7,720	Navan sisähalkaisijan yläeromitta
AuA	7,700	Navan sisähalkaisijan alameromitta
Aol	7,738	Akselin ulkohalkaisijan yläeromitta
Aul	7,723	Akselin ulkohalkaisijan alameromitta
Po	0,003	Minimiahdistus
Pu	0,038	Maksimiahdistus

Taulukossa 7 on esitelty eri työstökoneiden kyvykkyyksille laskettuja minimi- ja maksimiahdistusten arvoja, joilla on laskettu kyseiselle  $C_m$ -luvulle ala- ja ylärajat, joiden sisälle saadaan  $C_{pk}$ -arvolla 1 koneistettua 99,73 % koneistetuista kappaleista.

Taulukko 7. Lasketut ahdistukset eri työstökoneiden kyvykkyyttä kuvaaville  $C_m$ -arvoille. Kyseisiä ahdistuksia on käytetty teoreettisten laskujen kuvaajissa havainnollistamaan työstötarkkuuden merkitystä.

	$C_m = 1$	$C_m = 2$	$C_m = 3$
<b>Minimiahdistus (mm)</b>	0,0030	0,0088	0,0147
<b>Maksimiahdistus (mm)</b>	0,0380	0,0322	0,0263

Laskettaessa puristusliitosta teoreettisesti tarvittiin akseleista ja navoista tiettyjä mittoja, jotka esiteltä taulukossa 8. Taulukossa 9 on puolestaan esiteltä käytetyn materiaalin AISI 303 aineominaisuuksia, joita käytetty teoreettisissa laskuissa.

Taulukko 8. Lukuarvoja esiteltynä, joita on käytetty puristusliitosta laskettaessa ja simuloitaessa.

Symboli	Mitta	Yksikkö	Selite
$D_F$	7,7	mm	Liitospinnan halkaisija
$l_F$	0,0 – 5,0	mm	Liitoksen pituus
$D_{aA}$	15,8	mm	Navan ulkohalkaisija
$D_{iA}$	7,7	mm	Navan sisähalkaisija
$D_{al} = D_F$	7,7	mm	Akselin ulkohalkaisija
$D_{il}$	0,0	mm	Akselin sisähalkaisija

Taulukko 9. Ruostumattoman teräksen AISI 303 aineominaisuuksia, joita on käytetty puristusliitoslaskuissa.

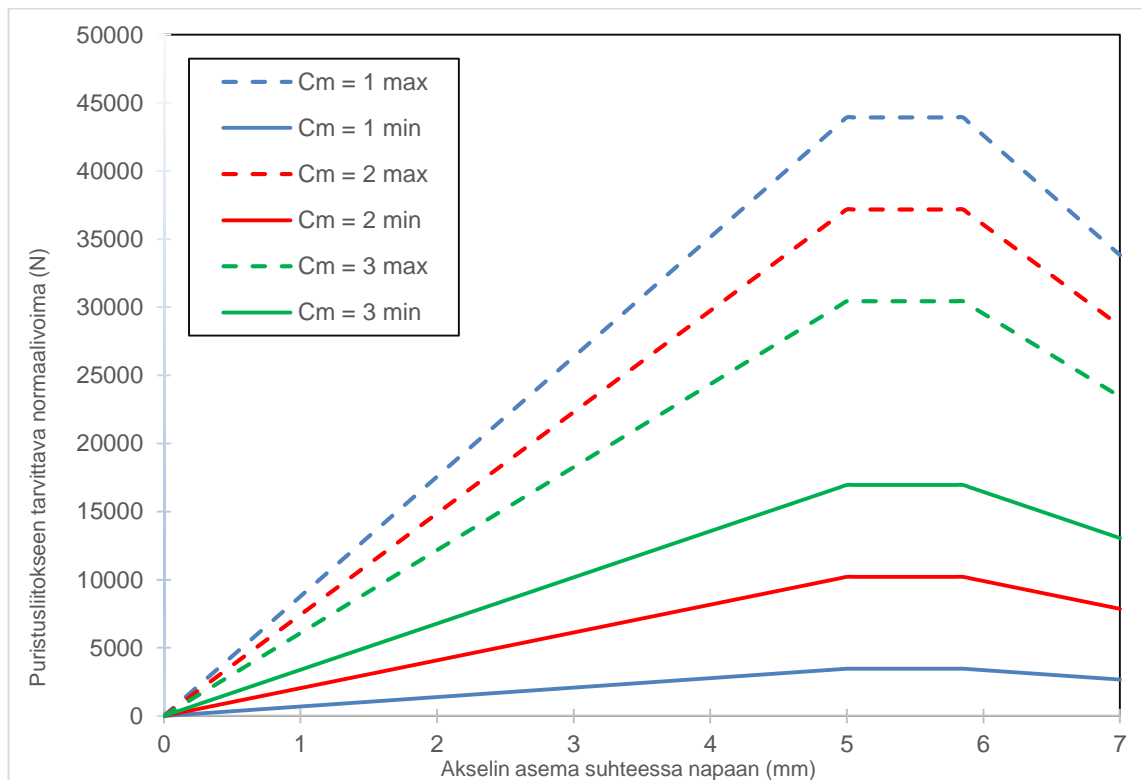
Symboli	Arvo	Yksikkö	Selite
$v_{rl}$	0,2		Tartuntakerroin aksiaalisuunnassa liukumiseen nähden
$R_{zi}$	0,0016	mm	Akselin profiilin syvyys
$R_{za}$	0,002	mm	Navan profiilin syvyys
$E = E_I = E_A$	193 000	MPa	Kimmokerroin
$\mu = \mu_I = \mu_A$	0,25		Poissonin vakio

Näillä tiedoilla pystyttiin laskemaan puristusliitokseen suorittamiseen tarvittavat voimat ja liitoksen kestävyudet. Puristusliitos laskettiin sen jokaisessa asemassa akselin liikkuessa 0,05 mm askelin. Akselin on tarkoitus työntyä napaan paikoilleen, kunnes osien olakkeet ovat asettuneet toisiaan vasten. Tällöin puristusliitoksella halutut ominaisuudet laitteen toiminnan kannalta voidaan saavuttaa.

### 3.3.1 Teoreettisesti lasketut puristusliitokset, joissa pinnankarheudet jätetty huomioimatta

Tässä tilanteessa pinnankarheudet jätettiin huomioimatta. Kaikki muut laskennalliset arvot säilyivät alkuperäisinä. Tilanteessa haluttiin nähdä, kuinka paljon pinnankarheudella ja sen laadulla on merkitystä puristusliitoksessa.

Kuvassa 16 on esitetty puristusliitokseen tarvittava normaalivoima akselin ja navan keskinäisen aseman funktiona. Puristusliitoksessa akselin liike suhteessa napaan on 7 mm, jonka jälkeen on saavutettu haluttu asema. Tilanteessa havainnollistettiin myös työstölaadun merkitystä. Akselit ja navat on oletetusti työstetty käyttäen  $C_{pk}$ -arvoa 1. Todelliset  $C_{pk}$ -arvot löytyvät taulukosta 5. Työstökoneen  $C_m$ -indeksillä havainnollistetaan koneen tarkkuutta ja näin ollen hyvällä koneella saadaan tasaisempia puristusliitoksia keskenään verrattuna. Käytetyt arvot  $C_m$ -käyrien minimi- ja maksimiarjoiksi löytyvät taulukosta 7.

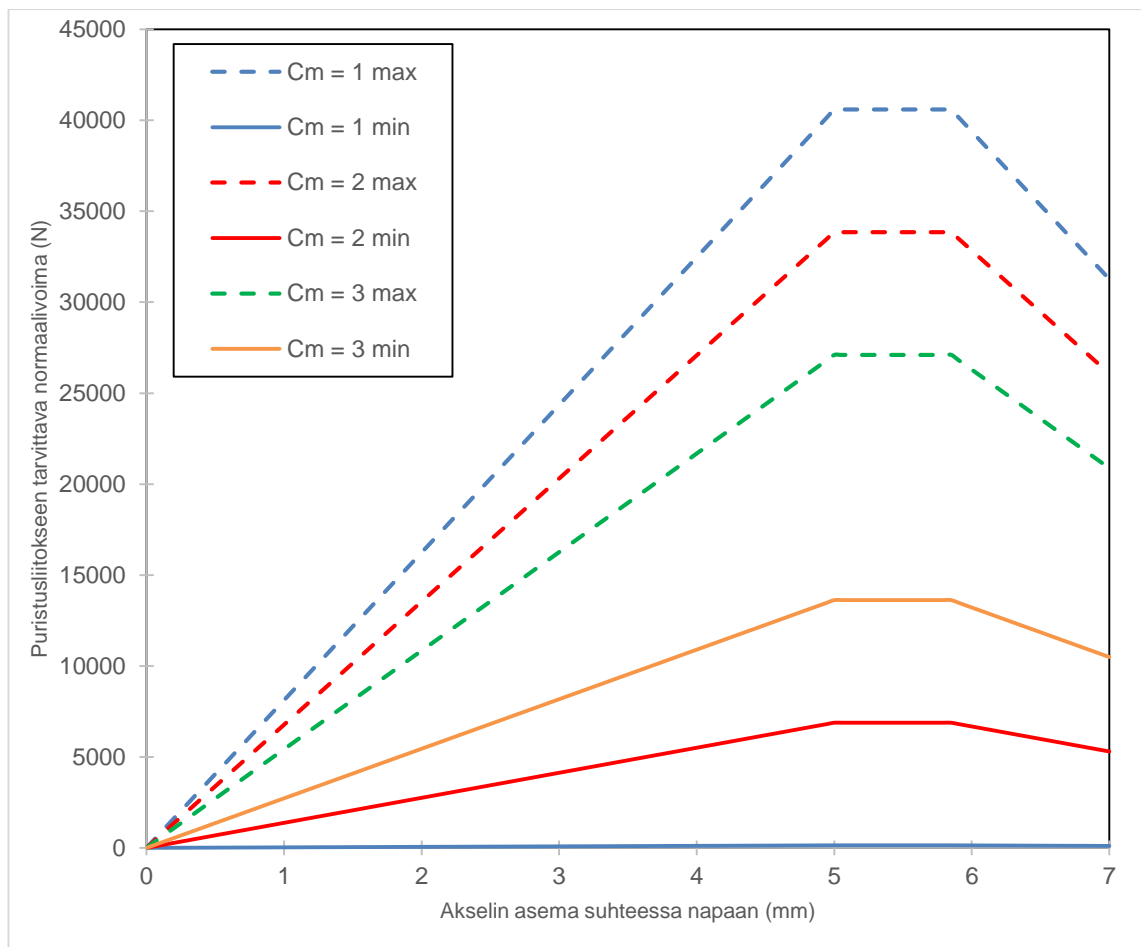


Kuva 16. Teoreettisesti lasketut puristusliitoksen normaalivoimantarpeet, joissa pinnankarheudet on jätetty huomioimatta. Havainnollistettu työstökoneiden eri  $C_m$ -arvoilla, jolloin 99,73 % työstetyistä kappaleista on toleransseiltaan minimi- ja maksimirajojen sisällä.

### 3.3.2 Teoreettisesti lasketut puristusliitokset, joissa on huomioitu pinnankarheudet

Tässä tilanteessa otettiin pinnankarheudet mukaan laskuihin. Pinnankarheuksien arvoina käytettiin työstettyjen akselien ja napojen keskiarvollisia pinnankarheuksia, jotka on esitelty taulukossa 4. Puristusliitoksen kokonaispituus on 7,0 mm.

Tässäkin tilanteessa varioitiin puristusliitokseen tarvittavia normaalivoimia työstökoneiden kyvykkyyksien mukaan. Jokaisella  $C_m$ -arvolla 99,73 % koneistetuista kappaleista on kyseisen arvon minimi- ja maksimirajojen sisällä. Käytetyt arvot  $C_m$ -käyrien minimi- ja maksimiahdistuksille löytyvät taulukosta 7.

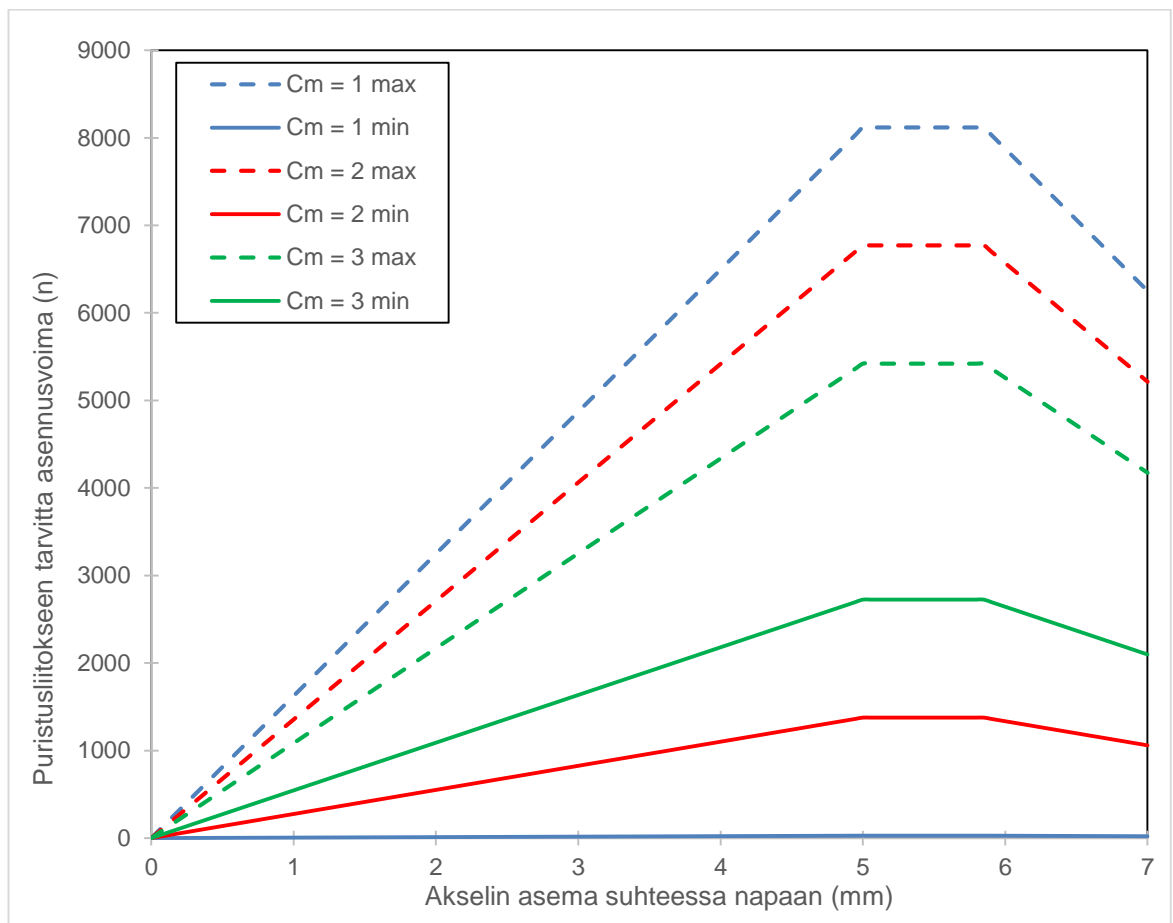


Kuva 17. Teoreettisesti lasketut puristusliitokset, joissa on huomioitu myös pinnankarheuksien vaikutukset. Normaalivoimantarpeet on havainnollistettu akselin ja navan aseman funktiona. Tarvittavat puristusvoimat on havainnollistettu kolmella eri työstökoneen kyvykkyydellä  $C_m$ -arvojen ollessa 1, 2 ja 3.

### 3.3.3 Teoreettisesti lasketut puristusliitokset, joissa huomioitu pinnankarheudet ja kitka

Tämä tilanne esittää parhaiten todellista tilannetta puristusliitoksessa. Kyseisessä tilanteessa on huomioitu pinnankarheudet sekä kitkavoimat, joita todellisessakin puristustahtumassa esiintyy. Pinnankarheuksien arvoina käytettiin todellisia mitattujen pinnankarheuksien keskiarvoja, jotka on esitelty taulukossa 4. Kitkavoimana käytettiin kerrointa 0,20.

Tilanne on havainnollistettu kolmella työstökoneen kyvykkyyksillä  $C_m$ -arvojen ollessa 1, 2 ja 3. Jokaisen  $C_m$ -arvon minimi- ja maksimirajojen väliin pystytään työstämään kyseisellä indeksillä 99,73 % kappaleista annettujen toleranssirajojen sisälle. Käytetyt arvot  $C_m$ -käyrien minimi- ja maksimiahdistuksille löytyvät taulukosta 7.



Kuva 18. Kyseinen tilanne vastaa parhaiten todellista puristusliitosta, kun on otettu huomioon pinnankarheudet ja kitka. Kuvaajassa on esiteltyä teoreettiset puristusliitoslaskut kolmella eri työstökoneen kyvykkyyttä kuvaavalla  $C_m$ -arvolla. Jokaisen  $C_m$ -arvon minimi- ja maksimirajojen väliin kykenee kyseisellä kyvykkyydellä varustettu työstökone valmistamaan toleranssien sisälle 99,73 % kappaleista.

### 3.4 Puristusliitoksen simuloinnit käyttäen elementtimenetelmää

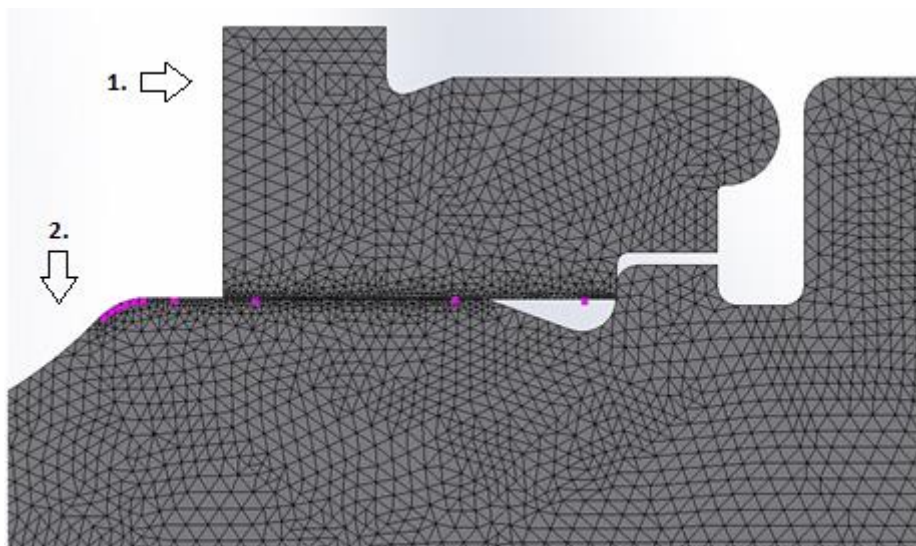
Puristusliitosta simuloitaessa käytettiin SolidWorksin simulointiohjelmaa. Kappaleista luotiin useita eri versioita vastaamaan laskettuja sovitteita. Mallinnetuista kappaleista luotiin 2D-versiot helpottamaan ja nopeuttamaan simuloiteja.

Materiaalina simuloinneissa käytettiin ruostumatonta terästä AISI 303:a. Kyseistä materiaalia käytettiin myös kappaleiden todelliseen valmistukseen. SolidWorks:n materiaalitietokannasta materiaalia ei löytynyt, joten tiedot syötettiin ohjelmaan käsin. Arvot löytyvät taulukosta 10.

Taulukko 10. Solid Works-simuloinneissa käytetyn materiaalin AISI 303 tiedot.

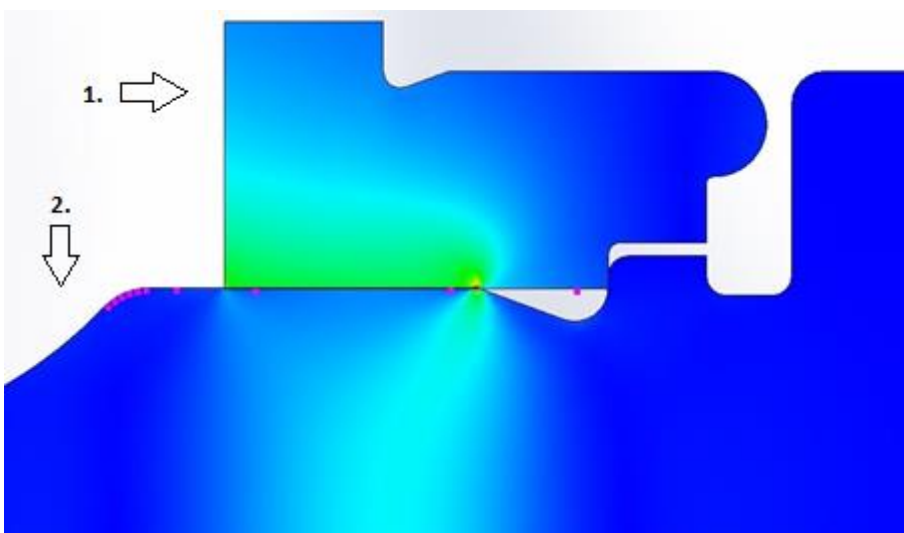
<b>Materiaali: AISI 303</b>	<b>Arvo</b>	<b>Yksikkö</b>
Kimmomoduuli	193 000 000 000	N/m <sup>2</sup>
Poissonin vakio	0,25	N/A
Murtoraja	620 000 000	N/m <sup>2</sup>
Myötöraja	240 000 000	N/m <sup>2</sup>
Tangenttimoduuli	20	GPa

Simulointien suorittamiseksi kappaleiden ympärille tehtiin elementtiverkko. Verkossa käytettiin mahdollisimman tiukkaa verkontiheyttä. Kriittisille kohdille eli puristusliitoksen liitospinnoille käytettiin vielä tiukempaa verkkoa mahdollisimman laadukkaiden ja tarkkojen arvojen aikaansaamiseksi. Verkontiheyttä on havainnollistettu kuvassa 19.



Kuva 19. Poikkileikkauskuva puristusliitoksessa käytetystä verkontiheydestä elastisissa ja plastisissa simuloinneissa. Akselin keskilinja kulkee kuvan alareunan kohdalta. Osa 1 on napa ja osa 2 on akseli.

Kuvassa 20 on havainnollistettu taulukon 6 tiukimmalla ahdistuksella suoritettun elastisen simuloinnin sisäisten jännitysten jakautuminen. Elastiset ja plastiset simuloinnit suoritettiin kaksiulotteisina, jolloin sisäiset jännitysnäkymät saatiin suoraan näkyviin. Samoin myös elementtiverkon asettaminen ja tiheyden havainnointi helpottuivat.

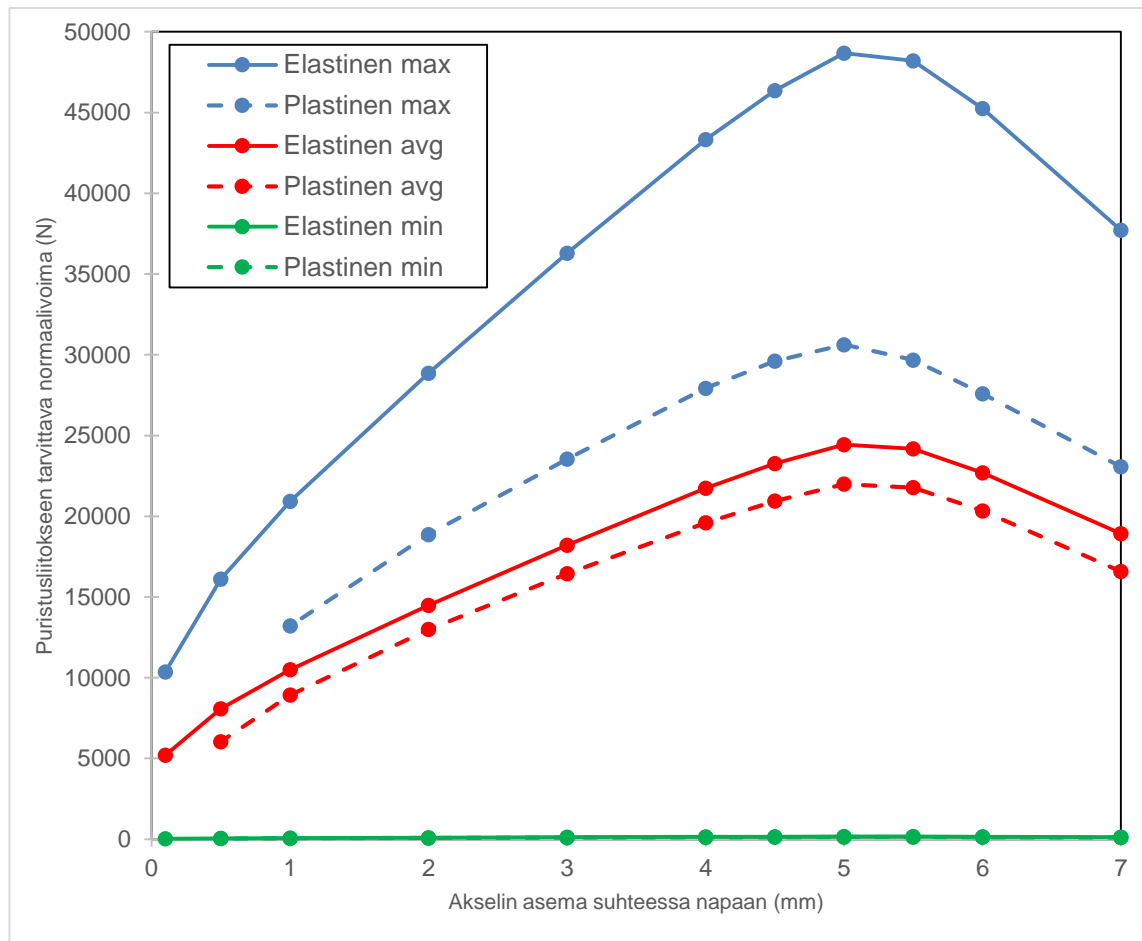


Kuva 20. Poikkileikkauskuva, jossa on esitetty jännitysten kohdistuminen puristusliitoksessa, kun akseli on asennettu paikoilleen. Tilanteessa on käytetty kuvan 21 verkontiheyttä. Osa 1 on napa ja osa 2 on akseli. Akselin keskilinja kulkee kuvan 20 alalaidassa.

### 3.4.1 Puristusliitoksen elastiset ja plastiset simuloinnit

Puristusliitokselle suoritettiin elastiset ja plastiset simuloinnit. Simuloinnit suoritettiin käyttäen kolmea eri sovitetta. Sovitteet on määritelty työkuvan minimi (min), keskiarvo (avg) ja maksimi (max) arvoista ja ne ovat samat kuin teoreettisesti lasketuissa puristusliitoslaskuissa. Sovitteiden mitat on esitetty tuloksien taulukossa 6. Puristusliitokset simuloitiin siten, että akselia siirrettiin navan suhteen aina millimetri kerrallaan. Puristusliitoksen huippuvoimien- ja alun kohdalla tarkasteluväliä tihennettiin 0,5 mm.

Kuvassa 21 on esitetty elastisten ja plastisten simulointien tulokset. Puristusliitoksen suorittamiseen tarvittavat voimat on esitetty akselin ja navan aseman suhteen funktiona. Tarkemmat elastisten ja plastisten simulointien numeeriset tulokset on esitelty työn lopussa liitteessä 8.

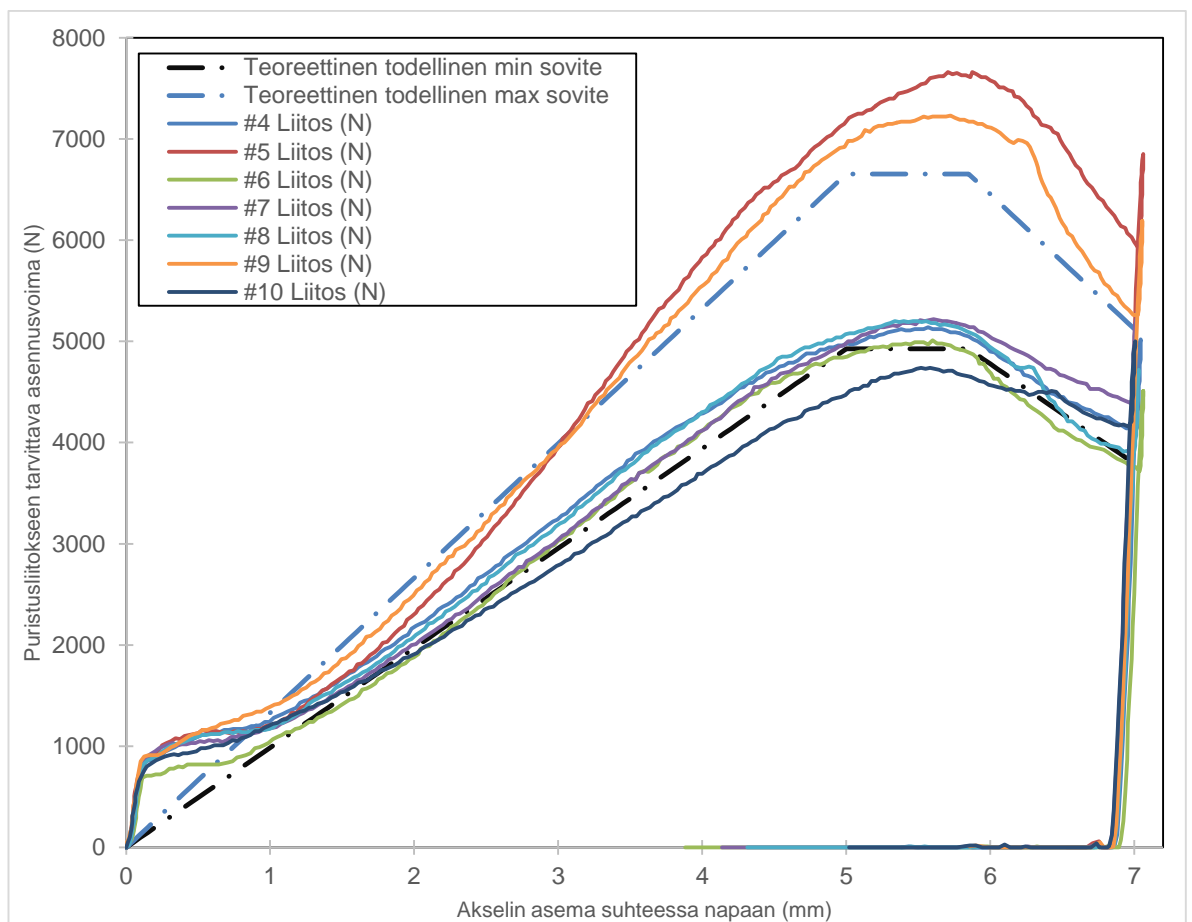


Kuva 21. Kolmella eri sovitteella vertailtuna elastiset- ja plastiset simuloinnit. Puristusliitokset suoritettiin 1,0 mm välein ja puristusliitoksen huippuvoimien kohdalla 0,5mm välein.

### 3.4.2 Puristimella mitatut arvot suhteessa mitattujen kappaleiden arvoilla laskettuihin teoreettisiin asennusvoimiin

Tässä osiossa vertailtiin puristimella saatuja voima – asemakäyriä teoreettisesti laskettuihin käyriin, joiden perustana käytettiin mitattuja arvoja jo koneistetuista kappaleista. Teoreettisesti lasketuissa käyrissä käytettiin soviteina mitattujen kappaleiden suurinta ja pienintä sovitetta, jotka löytyvät taulukosta 3. Pinnankarheuksien arvoina käytettiin arvoja, jotka löytyvät taulukosta 4. Teoreettisesti lasketut asennusvoimat ja tehdyt puristusliitokset on esitelty kuvassa 22.

Teoreettisesti lasketuille käyrille sovitettiin myös kitkakerroin käyttäen PNS-menetelmää. Kitkakertoimen arvoksi saatiin 0,23. PNS-menetelmää käytettäessä huomioitiin puristimella mitatuista käyristä kaikki seitsemän. Teoreettisesti laskettujen käyrien perustana käytettiin puristusliitoksen laskuja, jotka esitelty teoriaosiossa.

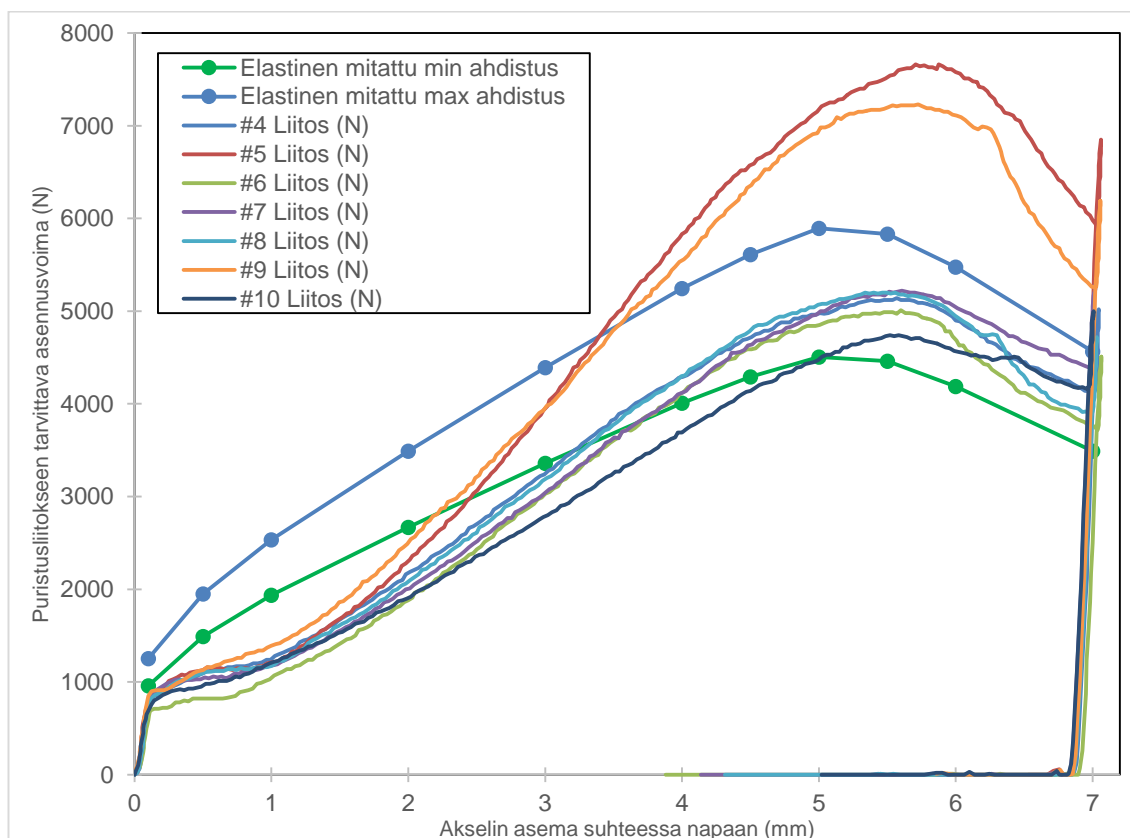


Kuva 22. Puristimella tehdyt puristusliitokset, joita on vertailtu teoreettisesti laskettujen soviteiden maksimi ja minimi arvoihin. Soviteiden mitat saatu koneistetuista kappaleista ja näin ollen käyrät ovat kaikki keskenään vertailukelpoisia.

### 3.4.3 Puristusliitoksen elastiset simuloinnit

Tässä osiossa vertailtiin elastisia simulointituloksia ja puristimella suoritettuja puristusliitosten käyriä. Elastisten simulointien mittojen perustana käytettiin työstetyistä akseleista ja halkaisijoista mitattuja arvoja, joista saadut sovitteet on esitelty taulukossa 3. Mitatuista arvoista otettiin maksimi ja minimi arvot ja niiden avulla laskettiin sovitteet. Tulokset on esitelty kuvassa 23.

3D-mallinnusohjelma ei tunnista pinnankarheuksia ja ei täten osaa huomioida niitä simuloinneissa. Elastisissa simuloinneissa on käytetty tehollista ahdistusta, jossa kappaleiden mitoista on poistettu pinnankarheuden vaikutus, jolloin tilanne vastaa todellisuutta. Elastisissa simuloinneissa kitkaa ei huomioida automaattisesti, joten simulointikäyrät on sovitettu PNS-menetelmällä todellisiin puristusliitostekäyriin. Kitkakertoimena käytettiin arvoa 0,15. Sovitteina maksimi ja minimi käyrille käytettiin taulukon 3 todellisia sovitteita.

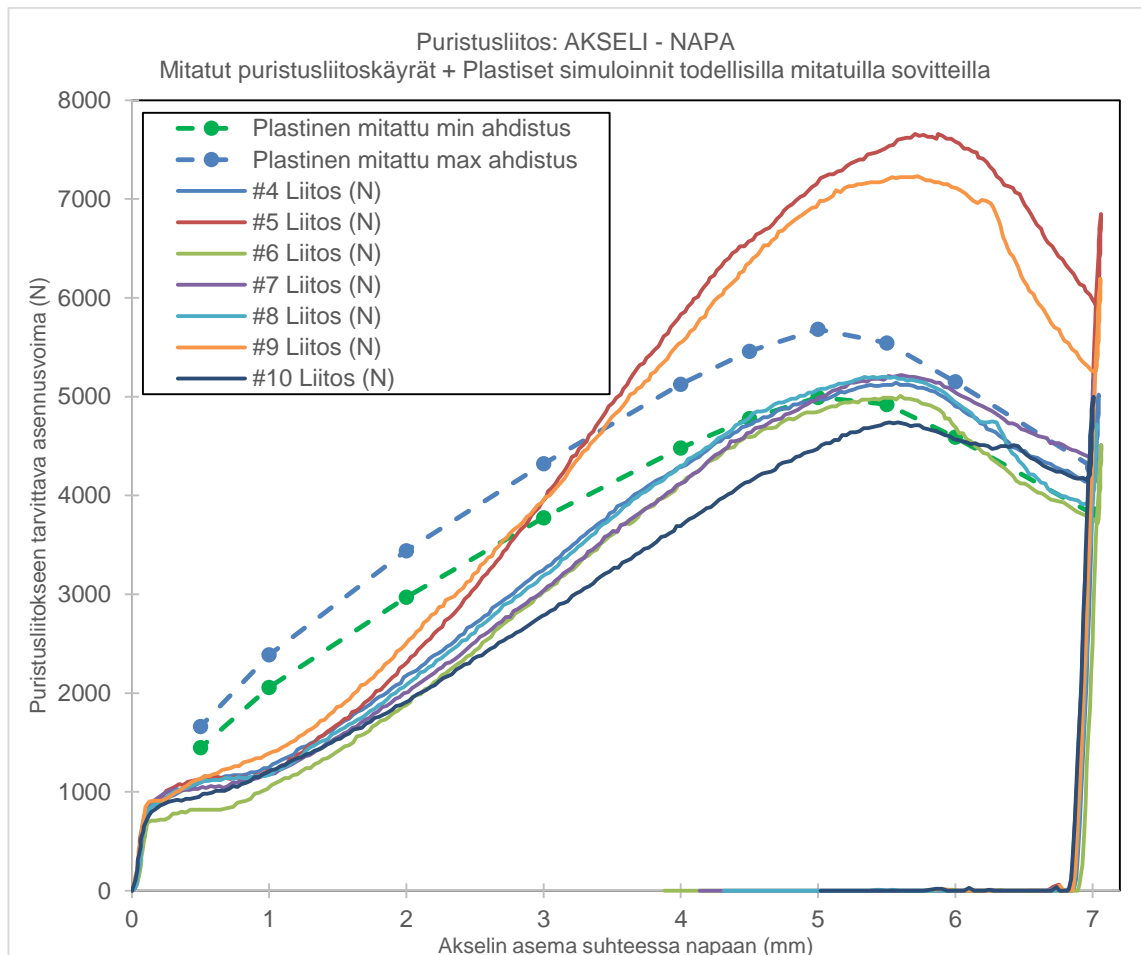


Kuva 23. Puristimella tehdyt puristusliitokset, joita on verrattu elastisiin simulointeihin todellisilla mitatuilla sovitteilla. Elastiset simuloinnit on sovitettu puristimella suoritettuihin puristusliitoksiin määrittämällä kitkakertoimen PNS-menetelmällä. Kitkakertoimeksi määrytyi 0,15.

### 3.4.4 Puristusliitoksen plastiset simuloinnit

Plastiset simuloinnit suoritettiin myös SolidWorksin simulointityökalulla. Plastisia simulointituloksia on vertailtu puristimella tehtyihin puristusliitoksiin. Plastisissa simuloinneissa tilanne on sama kuin elastisissa simuloinneissa eli on käytetty tehollista ahdistusta, jossa pinnankarheuksien aiheuttama virhe on poistettu.

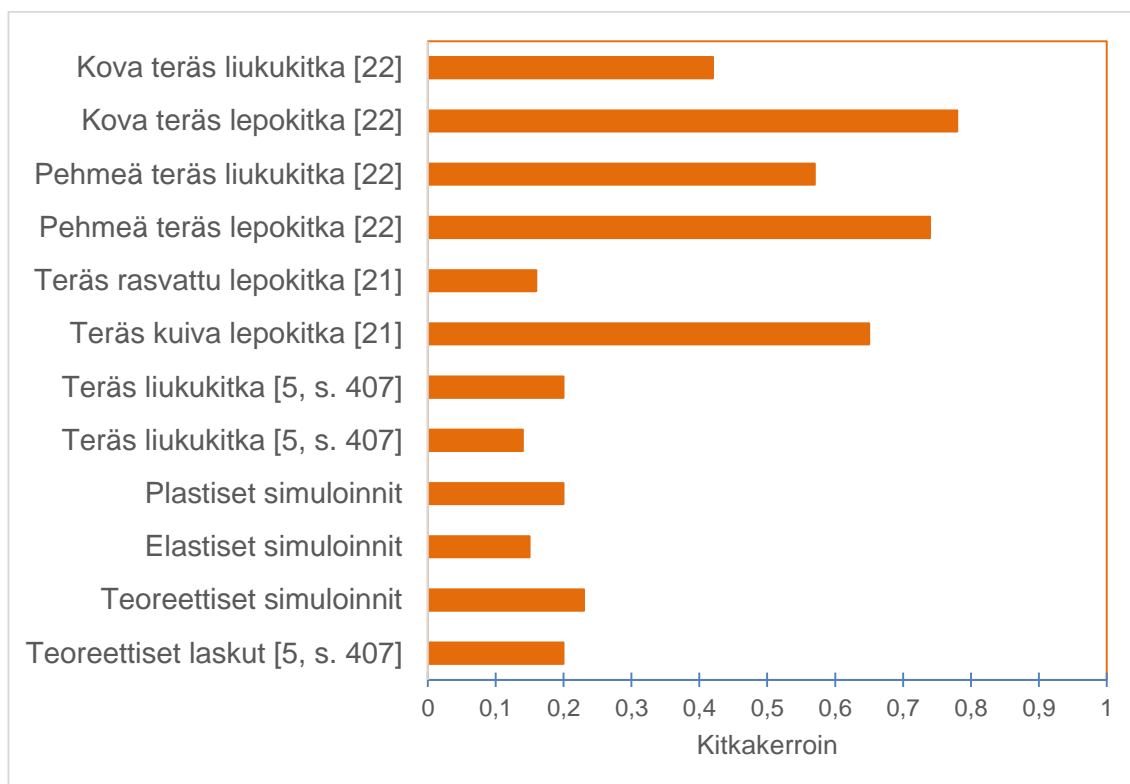
Plastisissa simuloinneissa kitkaa ei huomioida automaattisesti, joten simulointikäyrät on sovitettu PNS-menetelmällä puristimella suoritettuihin puristusliitoksiin. Kitkan arvoksi saatiin 0,2. Sovitteina maksimi ja minimi käyrille käytettiin taulukon 3 todellisia sovitteita. (Kuva 24.)



Kuva 24. Puristimella tehdyt puristusliitokset, joita on vertailtu plastisiin simulointeihin. Plastisissa simuloinneissa on käytetty sovitteita, joista poistettu pinnankarheuksien vaikutus, jolloin tilanteet vastaavat toisiaan. Plastisten simulointien käyrät on sovitettu puristimella suoritettuihin puristusliitoksiin käyttäen PNS-menetelmää. PNS-menetelmällä kitkakertoimen arvoksi saatiin 0,20.

### 3.4.5 Kitkakertoimien vertailu

Tässä kappaleessa on esitelty tämän työn teoriaosuudessa, simuloinneissa sekä kirjallisuudessa käytettyjä ja esiintyviä kitkakertoimia teräs-teräsmateriaalipareille. Kitkakertoimet on määritelty liitospareille, joissa on vastakkain kaksi materiaaliiltaan samaa metallia. Kirjallisuudessa on esitetty kitkakertoimien arvoja, jotka on määritelty eri materiaaliparien ja sen mukaan, onko kyseessä lepo- vai liikekitka. Simuloinneissa ja teoreettisesti lasketuissa puristusliitoslaskuissa käytettiin pienimmän neliösumman menetelmää kitkakertoimen määrittämiseksi. PNS-menetelmässä kitkakerroin sovitettiin puristimella tehtyjen puristusliitosten mukaan. Loput kitkakertoimien arvot on saatu kirjallisuudesta. (kuva 25.)



Kuva 25. Teoreettisissa laskuissa, simuloinneissa ja kirjallisuudessa käytettyjä ja esiintyviä kitkakertoimen arvoja esitettynä yhdessä kuvaajassa. Elastisten, plastisten ja teoreettisten simulointien kitkakertoimet on määritetty käyttäen PNS- menetelmää. Muut kitkakertoimien arvot on saatu kirjallisuudesta [3, s. 107; 5, s. 407; 21; 22].

Kitkakertoimien arvoina on käytetty teräs-teräsmateriaaliparien arvoja, kun liitospinnat ovat kuivat eikä materiaalien välillä ole käytetty voiteluaineita. Voiteluaineiden käyttö tai rasvaisilla liitospinnoilla kitkakertoimien arvot olisivat olleet noin 0,10 - 0,30.

## 4 Tulosten analysointi

Tässä osiossa käydään läpi työn tulokset siinä järjestyksessä kun ne on esitelty edellisessä luvussa. Tulosten analysoinnissa viitataan työn teoriaan ja vertaillaan eri menetelmillä saatuja tuloksia keskenään.

### 4.1 Akselin ja navan mitattujen arvojen analysointi

Akseleille ja navoille saatiin työkuvista mitat ja toleranssit (liitteet 9 & 10). Toleranssialueiden perusteella pystyttiin laskemaan sovitteet (taulukko 3). Koneistetuista akseleista ja navoista mitattiin pinnankarheudet (taulukko 4) ja liitospintojen halkaisijat (liite 7).

Halkaisijoita mitattaessa akseleiden ulkohalkaisijalle oli määritelty yläeromitta 7,738 mm ja ulkohalkaisijan alaeromitta oli 7,723 mm. Kaikki mitatut kappaleet olivat halkaisijoiltaan näiden rajojen sisällä, joten käytetty työstökone täytti tältä osalta vaatimuksensa. Keskiarvoltaan akseleiden halkaisijat olivat 7,731 mm. Napojen sisähalkaisijoiden yläeromitta oli 7,72 mm ja sisähalkaisijan alaeromitta oli 7,70 mm. Myös kaikkien napojen sisähalkaisijoiden mitat osuivat toleranssien väliin keskiarvolla 7,706 mm.

Akselien ja napojen halkaisijoiden mitat huomioiden, jokaisen puristusliitoksen välille tulee sovite, joka tuottaa puristusta. Puristusliitokset suoritettiin vain numeroiduille pareille 4-10. Ensimmäiset kolme paria käytettiin pinnankarheusmittauksiin. Pinnankarheuksia mitattaessa huomattiin pinnankarheuksien olevan asetettua arvoa parempia. Liitospintojen pinnankarheuksiksi oli alun perin asetettu Ra arvoksi 3,2. Mitattaessa akseleiden keskiarvollinen pinnankarheus Ra -arvo oli 0,189 ja napojen keskiarvollinen pinnankarheus Ra -arvo oli 0,285. Kaavaan 11 perustuen pinnankarheuksien merkitys puristusliitoksissa on merkittävä näin pienillä osilla. Parempi pinnankarheus takaa kestävämmän liitoksen. Kyseisellä pinnankarheudella valmistetut pinnankarheudet ovat riittävät. Työstökoneilla valmistetut kappaleet joudutaan viimeistelemään hiomalla, jotta päästään annettuihin toleransseihin. Tämän johdosta pinnankarheudet olivat parempia kuin työkuviin merkatut arvot.

## 4.2 Puristimella suoritettujen puristuskäyrien analysointi

Puristimella suoritettiin puristusliitokset seitsemälle akseli – napa -parille. Tulkittaessa puristimesta saatuja voima/asemakäyriä voidaan huomata niiden noudattelevan teoreettisesti laskettujen puristusliitosten kanssa samaa käyrän muotoa. Aluksi tulee tasaisesti nouseva käyrä, jonka jälkeen voimantarve tasoittuu ja viimein laskee.

Huomioitavaa näissä puristuskäyrissä on muutama asia verrattuna teoreettisesti laskettuihin käyriin. Ensinnäkin puristustapahtuman alussa tulee verrattain iso hyppäys nolasta noin 1 kN:iin asti. Tämä pykälä syntyy, kun puristustapahtuma alkaa ja akseli alkaa työntyä paikoilleen. Akselin alkuosassa on myös yhden millimetrin säteinen pyöritys. Toiseksi lopussa käyrät kääntyvät erittäin jyrkkään nousuun. Tässä kohtaa akseli on saavuttanut lopullisen asemansa ja kappaleiden olakkeet ovat halutusti vasten toisiaan. Puristin myös mittasi palautumisvoiman kun puristaminen lopetettiin. Tällä pystyttiin havaitsemaan, kuinka paljon akseli palaa takaisinpäin.

Puristusliitoksia tehtäessä asetettiin puristusliitokselle tiettyjä toleranssirajoja, jotka liitoksen piti saavuttaa tai mitä se ei saanut ylittää. Esimerkiksi puristustapahtuman lopussa, kun voima rupesi nousemaan jyrkästi, asetettiin reaaliajassa piirtyvälle käyrälle kulmakertoimen arvo, jota se ei saanut ylittää. Kun tämä asetettu kulmakerroin ylitettiin, tapahtuma keskeytyi ja ylätyökalu palasi takaisin paikoilleen. Kulmakerroin käyrälle nousee, kun puristusvoiman tarve kasvaa. Kulmakertoimen arvon nousu tapahtuu kyseisessä puristusliitoksessa silloin, kun kappaleiden olakkeet osuvat toisiaan vasten ja puristusta jatketaan vielä. Riittävän suuren kulmakertoimen arvon saavutettuaan puristustapahtuma keskeytyi ja voitiin varmistua siitä, ettei puristettaisi akselia liian pitkälle, jolloin puristusliitoksella saadut halutut ominaisuudet jäisivät saavuttamatta.

Käyristä kaksi seitsemästä on huomattavasti korkeammalla asteella kuin muut. Oletettavaa olisi, että näissä kahdessa olisi sovite ollut tiukempi kuin muissa. Tutkittaessa mitattuja halkaisijoita näin ei kuitenkaan ollut. Molemmat karanneista käyristä olivat hyvin lähellä mitattuja sovitteiden keskiarvoja. Puristusliitoksia varten oli myös suunniteltu työkalut. Navalle oli suunniteltu ns. kuppi johon se asetettiin ja sen päälle tuli akseli lepäämään puristusliitoksen alkuvaiheeseen. Yhtenä osasyynä voi olla, että puristustapahtumassa akseli tai napa on ollut hieman vinossa aksiaalisesti ja tällöin oltaisi tarvittu hieman enemmän voimaan puristusliitokseen.

Huomattavia seikkoja oli myös se, että puristustapahtuman olisi hyvä olla jatkuva. Liikkeen säilyessä kappaleiden välillä vallitsee liikekitka. Liikekitka on pienempi kuin liikkeellelähtökitka ts. lepokitka. Lepokitka tulee voimaan, jos liike on lakannut ja tarvitsee lähtea uudestaan liikkeelle. Tällöin puristustapahtumassa akseli työntyy paikoilleen napaan hie-man töksähdellen ja aiheuttaen pieniä voimantarvehuippuja. Jatkuvalla liikkeellä puris-tustapahtuma on hallitumpi ja siitä on helpompi seurata milloin on saavutettu haluttu asema.

### 4.3 Puristusliitoksen teoreettisten laskelmien analysointi

Kaikissa kolmessa eri tilanteessa puristusliitosta teoreettisesti laskettaessa on puristus-liitoksia havainnollistettu kolmella eri työstökoneen kyvykkyydellä. Kyvykkyyksinä käytet-tiin  $C_m$ -arvoja 1, 2 ja 3. Oletettua oli, että prosessin  $C_{pk}$ -arvo oli yksi, jolloin jokainen puristusliitoksen  $C_m$ -käyristä tarkoitti sitä, että koneistettavista kappaleista 99,73 % pys-tytään koneistamaan toleranssirajojen sisälle. Todelliset  $C_{pk}$ -arvot löytyvät taulukosta 5, johon ne on laskettu kaavaa 19 käyttäen. Akseleita koneistettaessa  $C_{pk}$ -arvo 3,78 ja napoja koneistettaessa  $C_{pk}$ -arvo 1,31. Riittävän hyvä yleistarkkuus koneille on  $C_{pk}$ -arvo 1,33, joten akselin tapauksessa kone on noin kolme kertaa niin kyvykäs kuin olisi tar-vetta. Tämä johtuu osille koneistuksen jälkeen suoritetusta hionnasta, jolla osat saatiin tarkempaan mittaan eli todellinen kyvykkyys jää arvailujen varaan jälkikäsitteilyn myötä. Navoille työstökoneen kyvykkyys on riittävä. Työstökoneen kyvykkyysluvuilla kuvattiin koneistuksen merkitystä prosessissa. Työstökoneille on määritelty eri kyvykkyydet kuinka tarkasti ne pystyvät työstämään kappaleita annettujen toleranssien sisään.  $C_{pk}$ -arvolla yksi laskettaessa työstökone pystyy työstämään 99,73 % kappaleista toleranssi-rajojen sisälle.  $C_m$ -arvon ollessa kolme on kone siis näistä kolmesta tarkin ja 99,73 % kappaleista on käyrien " $C_m$  3 max" ja " $C_m$  3 min" rajojen sisällä.  $C_m$ -arvon ollessa kaksi on 99,73 % työstetyistä kappaleista on käyrien " $C_m$  2 max" ja " $C_m$  2 min" rajojen sisällä. Sama tilanne on myös käyrillä " $C_m$  1 max" ja " $C_m$  1 min". Eli laadukkaimmat akselit ja navat saavutetaan kun työstökoneen  $C_m$ -arvo on mahdollisimman korkea. Tällöin puris-tusliitoksista saadaan mahdollisimman toistettavia ja laadukkaita.

Ensimmäisenä tarkastelun kohteena on teoreettisesti laskettu puristusliitos, josta on jä-tetty pinnankarheudet huomioimatta kokonaan. Tällöin tilanne vastaa sitä, että pinnan-karheuden arvona käytetään arvoa nolla. Nolla pinnankarheus tarkoittaa käytännössä sitä, että pinta olisi täysin tasainen ja sileä. Huomioitavaa on myös, että navan todellinen

muoto ei ole täysin sylinterimäinen vaan kappaleen ulko- ja yläpuolella on kappaleen tulevaa käyttökohdetta ajatellen tarpeellisia tukevia ja auttavia muotoja. Näitä muotoja ei ole huomioitu teoreettisesti laskettaessa puristusliitosta, vaan napa on oletettu sylinterimäiseksi. Laskuteoria sopii myös hieman pidemmille akseleille kuin mitä napa on. Kyseisessä puristusliitoksessa on nimenomaan näin, että akseli on 0,85 mm pidempi kuin napa.

Tutkittaessa teoreettisesti laskettujen käyrien muotoa voidaan ne selittää seuraavasti: Jokainen käyrä nousee aluksi eri kulmakertoimella. Sen jälkeen tasoittuu kulkemaan X-akselin suuntaisesti kun puristusliitosta on suoritettu noin viisi milliiä. Viimeisenä laskee hieman ennen lopullista asemaansa. Alun nousu johtuu siitä, että akseli liikkuu navan sisään ja puristusliitoksen pituus kasvaa puristustapahtuman edetessä. Käyrän kulma-kerroin määräytyy kappaleiden välillä vallitsevan sovitteen mukaan. Tämän jälkeen tulee tasainen alue, joka johtuu siitä kun akselin liitospinnan pituus on 5 mm ja navan sylinterimäisen pinnan pituus on hivenen pidempi kuin akselin liitospinta. Liitoksen pituus säilyy siis samana hetken aikaa ja näin ollen lisävoimaakaan ei teoreettisesti tarvita. Tämän jälkeen akselissa on kevennys ennen olaketta, jolloin voiman tarve laskee ennen kun akseli on saavuttanut lopullisen asemansa. Kevennyksen johdosta liitospinnan pituus alkaa laskea, voimantarve alkaa siis laskea myös. Noin 2 millimetrin kevennyksen jälkeen akseli saavuttaa lopullisen asemansa seuraavassa olakkeessa. Akselin ja navan olakkeiden osuessa vastakkain voimantarve kasvaa huomattavasti. Tätä ei kuitenkaan teoreettisesti ole laskettu vaan kyseinen tilanne huomioitiin puristimella tehdyissä puristusliitoksissa. Puristusliitoksia laskettaessa käytettiin 0,05 mm:n nousua akselin ja navan välisen liitospituuden kasvattamisessa, jolloin saatiin riittävän tarkat tulokset.

Puristusliitoksia laskettaessa pinnankarheuksien vaikutus huomioiden liitokseen käytetään kaavaa 11. Tehollista ahdistusta  $P_w$  käytetään liittämässä tapahtuvien pinnankarheushuippujen tasoittumisen vuoksi. Kaavassa akselin ja navan profiilinsyvyyksien arvot lisätään toisiinsa ja kerrotaan kertoimella 0,8. Nämä arvot vähennetään sovitteen arvosta, jolloin saadaan tehollinen sovite. Tästä voidaan päätellä, että mitä pienempiä ovat akseleiden ja napojen pinnankarheudet, sitä lähempänä tehollinen sovite on todellisen sovitteen kanssa. Jätettäessä pinnankarheudet kokonaan huomioimatta ovat tehollisen sovitteen ja todellisen sovitteen arvot samat.

Toisessa vaiheessa laskettiin puristusliitoksen voimantarpeet huomioiden pinnankarheudet. Akselien keskiarvollinen pinnankarheus  $R_a$  oli 0,196 ja napojen keskiarvollinen

pinnankarheus  $R_a$  oli 0,285. Pinnankarheuksien mukaantulon myötä voimantarpeet laskevat noin 3 – 5 kN. Tämä on huomattavan suuri vähennys näinkin pienillä pinnankarheuksilla. Tämä selittyy sillä, että kun pinnankarheudet ovat mukana niin liitospintana toimivat käytännössä pinnankarheuksista aiheutuvat työstöjälkien vuorenhuiput. Jos pinnankarheudet olisivat olleet luokkaa  $R_a$  3,2 kuten työkuivissa oli määritelty, niin liitoksesta ei olisi tullut kestävä. Kyseisillä pinnankarheuksilla vain pinnankarheuden muotojen huiput olisivat tasaantuneet eikä liitos olisi jaksanut kantaa sille vaadittavaa kuormaa. Voimantarpeet puristusliitokseen olisivat myös olleet huomattavasti pienemmät. Huonolla työstökoneella valmistetuilla kappaleilla osien välille ei olisi välttämättä tullut edes puristusta ja tällöin osat eivät olisi pysyneet yhdessä.

Lopuksi mukaan otettiin vielä kitkavoima. Huomioitaessa kitka ja pinnankarheudet puristusliitos laskuihin on tilanne lähimpänä todellista tilannetta. Kirjallisuudesta löytyi useita eri arvoja kitkakertoimelle. Kitkakertoimen arvo riippuu hyvin monesta tekijästä. Liitoksen voitelu, materiaaliparit, liitospintojen puhtaudesta ja lämpötila ovat esimerkiksi tekijöitä, jotka vaikuttavat kitkavoiman suuruuteen. Kuvassa 18 käytettiin kitkakertoimen arvoa 0,20, joka vastaa kuivaa ja puhdasta teräs – teräs liitosparia [5, s. 407].

Käytettäessä tiukinta sovitetta ja liitospituuden ollessa suurimmillaan saadaan arvioitua suurin tarvittava voima puristusliitoksen suorittamiseksi. Suurin teoreettisesti laskettu voima on noin 8 kN. Suuremmilla kitkakertoimilla voimat ovat myös luonnollisesti paljon suurempia. Tämä on syytä ottaa huomioon valittaessa tuotantokäyttöön valittavaa puristinta, ettei vahingossa tule valittua voimantarpeiltaan alimitoitettua puristinta.

#### 4.4 Puristusliitoksen simulointien analysointi

Puristusliitos simuloitiin elastisella ja plastisella alueella. Näissä simuloinneissa navan muoto on ollut samanlainen kuin sen todellinen tuleva muoto toisin kuin teoreettisen laskun osuuksissa, joissa napa oli oletettu sylinterimäiseksi. Myös akselina on käytetty sen todellista muotoa simuloitaessa. Akselin muut muodot vaikuttavat kuitenkin hyvin vähän puristusliitoksen alueella vaikuttaviin voimiin.

Ensiksi määriteltiin kappaleille materiaali. Materiaali oli jo valittu etukäteen ja sille piti löytää ohjelmaan syötettävien ominaisuuksien tiedot. Normaalit materiaalitiedot löytyivät

helposti, mutta tangenttimoduulin valitseminen oli haastavampaa. Tangenttimoduulin arvoa etsittiin useasta paikasta ja arvoja vertailtiin keskenään. Tangenttimoduulin arvoksi valittiin lopulta kohtuullisen korkea arvo 20 GPa, jotta saadaan tarpeeksi hyvä varmuus normaalivoimien varmistamiseksi.

Aluksi simulointeja suoritettiin kolmiulotteisina. Kolmiulotteisuus simuloitaessa oli kuitenkin verrattain hidasta varsinkin plastisissa simuloinneissa ja näin päätettiin siirtyä kaksiulotteisiin simulointeihin. Pyörähdysymmetrisistä kappaleista sai helposti kaksiulotteisia ja tulokset olivatkin verrattain samoissa arvoissa kolmiulotteisten kanssa. Kuvassa 19 on havainnollistettu simuloinneissa käytettyä verkontiheyttä kaksiulotteisessa kuvassa. Verkontiheyttä tiukennettiin puristusliitoksen alueelta, jotta saataisiin mahdollisimman hyvät ja luotettavat tulokset. Suuremmalla verkontiheydellä saavutetaan tarkemmat tulokset.

Aluksi vertailtiin puristusliitoksen elastisia ja plastisia simulointeja, joiden simulointitulokset esiteltä kuvassa 21. Simuloinneissa käytettiin taulukon 7 toleranssirajoista saatavia pienimpiä-, keskiarvollisia- ja suurimpia sovitteita. Tutkittaessa elastisia ja plastisia simulointeja suurimmalla sovitteella voidaan huomata kuinka mittauspisteiden väli on paljon suurempi kuin esimerkiksi keskiarvollisilla sovitteilla simuloitaessa. Tämä voidaan selittää sillä, että suurilla sovitteilla simuloitaessa elastisen puristusliitoksen on ainakin osittain ylittänyt materiaalille ominaisen myötörajan. Keskiarvollisella sovitteilla simuloitaessa elastisen ja plastisen simuloinnin käyrät kulkevat kutakuinkin rinnakkain mittapisteiden ollessa lähes vierekkäin. Tästä voidaan päätellä, että kyseisillä sovitteilla on osittain ylittetty materiaalin myötöraja, mutta suuria plastisia muodonmuutoksia ei vielä ole tapahtunut. Jos sovitteita olisi löysennetty tästä hieman niin elastiset- ja plastiset simulointipisteet olisivat olleet jo hyvinkin lähellä toisiaan. Pienimmillä sovitteilla simulointipisteiden välille piirretyt käyrät kulkevat lähes päällekkäin.

Puristimella tehtyjä puristusliitoksia ja teoreettisesti laskettuja puristusliitostäyriä vertailtiin sen jälkeen keskenään (kuva 22). Teoreettisesti laskettujen puristusliitostäyrien perustana käytettiin mitattuja arvoja jo työstetyistä kappaleista. Näistä mitoista laskettiin suurin- ja pienin sovite, joita apuna käyttäen saatiin laskettua teoreettiset puristusliitostäyrät kyseisille sovitteille. Käyriä laskettaessa käytettiin myös mitattuja pinnankarheuden arvoja, jotka löytyvät taulukosta 4. Teoreettisesti lasketuille käyrille laskettiin myös kitkakerroin PNS-menetelmällä. Kitkakerroin sovitettiin PNS-menetelmää käyttäen puristimella suoritettujen kaikkien seitsemän puristusliitoksen keskiarvoon. Kitkakertoimen arvoksi laskettiin 0,23. Tällä kyseisellä arvolla teoreettiset käyrät saatiin sovitettua hyvin

puristimella tehtyjen puristusliitosten arvojen kanssa. Tässä osiossa ei siis simuloitu mitään. Käyriä tulkittaessa voidaan huomata, että teoreettiset laskut, mitatut pinnankarheet ja -sovitteet, halkaisijat sekä arvioitu kitkakerroin vastaavat hyvin todellisuutta.

Näitä kyseisiä mitattuja arvoja käytettiin myös elastisten- ja plastisten arvojen simulointiin. Simuloinnissa mittoina käytettiin todellisia ahdistuksia. Tämä tarkoitti sitä, että kappaleiden mitoista oli poistettu pinnankarheuksien vaikutus. Ahdistukset laskettiin minimi- ja maksimisovitteille. Akselin halkaisija säilytettiin samana, mutta navan sisähalkaisijaa muutettiin vastaamaan laskettuja sovitteita. Suoritettujen simulointien jälkeen elastisia- ja plastisia käyriä verrattiin koneistetuilla kappaleilla suoritettuihin puristusliitoksiin. Näille simuloinneille sovitettiin myös PNS-menetelmällä kitkakerroin. Elastisille simuloinneille käytettiin kitkakertoimen arvoa 0,15 ja plastisille simuloinneille kitkakertoimen arvoksi laskettiin 0,20. Nämä kitkakertoimien arvot vastaavat myös hyvin lähelle kirjallisuudessa esiintyneitä matalampia kitkakertoimien arvoja silloin, kun liitosparit on valmistettu samasta metallista ja liitospinnat ovat voideltu tai rasvaiset. [3, s.107; 5, s.407;19; 20.]

Jokainen elastisien simulointien voimantarpeiden tuloksista kerrottiin lasketulla kitkakertoimella. Tämän jälkeen puristimella suoritettut puristusliitokset ja elastiset simuloinnit olivat vertailukelpoisia. Vertailtaessa tuloksia voidaan huomata, että elastisten simulointien käyrät asettuvat kulkemaan siten, että puristusliitosten suurin rypäs on elastisesti simuloitujen minimi- ja maksimisovitteiden välissä. Alussa simulointikäyrät lähtevät hieman korkeammilla voimantarpeilla ja näin ollen niiden kulmakerroinkin on hieman pienempi. Erot tasoittuvat tasaisella alueella, jossa puristusliitoksen pituus säilyy samana. Tämän jälkeen alkavassa laskusuudessa kulkevat simulointikäyrät suoritettujen puristusliitostenkäyrien ylä- ja alapuolella. Kaksi puristusliitostenkäyrää on karannut alueen ulkopuolelle. Kyseisissä puristusliitoksissa suuremmat asennusvoimat eivät kuitenkaan johdu kappaleiden välillä vallitsevan sovitteen suuruudesta vaan luultavasti osat eivät ole asettuneet tarpeeksi keskeisesti linjaan toistensa kanssa ja puristustapahtumassa akseli on painunut navan sisään hieman vinossa. Tällöin on tietenkin tarvittu hieman enemmän voimaa liitoksen suorittamiseksi, mutta sitä onko siellä tapahtunut plastisia muodonmuutoksia vai ei on hyvin vaikea sanoa. Pienet plastiset muodonmuutokset eivät ole haitallisia.

Plastisissa simuloinneissa arvot olivat samat kuin elastisissa, mutta nyt käytettiin simulointitekniikkana epälineaarista analyysiä. Tangenttimoduulin arvona käytettiin 20 GPa. Plastisen simuloinnin käyrät noudattavat hyvin pitkälti samaa rataa kuin elastisella simu-

loinnilla saadut käyrät. Erona on, että minimi- ja maksimisovitteen käyrien väli on kapeampi kuin elastisissa simuloinneissa. Kitkakertoimeksi laskettiin PNS-menetelmällä 0,20, jolloin puristimella suoritettujen puristusliitosten viiden käyrän nippu saatiin asettumaan plastisten simulointikäyrien väliin. Plastisissa simuloinneissa puristusliitoksen alkupään normaalivoiman määrittäminen ei onnistunut. Puristusliitoksen alussa on akselissa pyöritys ja navan reuna on terävä, jotka aiheuttavat liitospinnoille viivakuorman. Tällöin luultavasti luotu elementtiverkko menee liian sekaisin vain yhteen pisteeseen kohdistuneesta voimasta ja tällöin simulointi keskeytyy. Näin ollen ensimmäiset simulointitulokset ovatkin vasta, kun puristusliitosta on suoritettu 0,50 mm.

## 5 Yhteenveto ja päätelmät

Työn keskeisimpiä tavoitteita oli määrittää puristusliitoksen kantokyky ja sen kokoonpanemiseen tarvittavat asennusvoimat, jotta saadaan tarvittavat tiedot kokoonpanoon tilattavaa puristinta varten.

Puristusliitoksen suorittamiseen tarvittavat asennusvoimat saatiin laskettua kaikilla kolmella menetelmällä ja tulokset olivat suhteellisen yhdenpitäviä keskenään. Näin ollen voidaan varmistua siitä, että kyseisillä mitoilla ja valmistusmenetelmillä voidaan valmistaa akseleita ja napoja sarjatuotantoon. Akselin ja navan välinen puristusliitos on myös tarpeeksi kestävä. Puristusliitokseen tarvittava asennusvoiman maksimisuuruus on keskimäärin noin 4 – 8 kN. Yhtenä suurimpana havaintona kyseiselle puristusliitokselle oli pinnakarheuksien vaikutukset. Työkuvien alkuperäisillä pinnankarheuksilla puristusliitoksista ei olisi tullut kestäviä. Tarkkojen toleranssien vuoksi kappaleille tehty hionta paransi pinnanlaatuja ja teki puristusliitoksista kestäviä sekä paransi niiden kantokykyä.

Kokoonpanoon tilattavassa puristimessa on syytä ottaa huomioon puristimen voimantuotossa pieni varmuuskerroin ja puristimen mahdolliset vaihtoehtoiset käyttötarkoitukset. Puristimen olisi hyvä siis pystyä puristamaan vähintään 30 kN:n voimalla. Puristimessa olisi myös suotavaa olla mukana monitorointi, jolla pystytään tarkkailemaan voiman suhdetta asemaan. Tällöin pystytään varmistumaan akselin tarkasta asemasta navan suhteen. Puristintyyppiä sopisi servo-ohjattu puristin, jossa työkalujen väliin on helppo pääsy. Servo-ohjattua puristinta on helppo käyttää pienin ja tarkoin askelin.

## Lähteet

- [1] Metson kotisivut – Metso in brief [Online] [Viitattu 20,9,2015]  
<http://www.metso.com/company/about-us/metso-in-brief/>
- [2] Lapinleimu I, Kauppinen V. ja Torvinen S. 1997. *Kone- ja metallituoteteollisuuden tuotantojärjestelmät*. Porvoo: WSOY, 1997.
- [3] Blom S, Lahtinen P, Nuutio E, Pekkola E, Pyy S, Rautiainen H, Sampo A, Seppänen P. ja Suosara E. 1999. *Koneenelimet ja mekanismit*. Helsinki: Edita, 2006.
- [4] Kivioja S, Kivivuori S. ja Salonen P, 1997. *Tribologia – Kitka, kuluminen ja voitelu*. Helsinki: Hakapaino Oy, 2010.
- [5] Airila M, Ekman K, Hautala P, Kivioja S, Kleimola M, Martikka H, Miettinen J, Niemi E, Ranta A, Rinkinen J, Salonen P, Verho A, Vilenius M. ja Välimaa V. 1997. *Koneenosien Suunnittelu*. Porvoo: WS Bookwell Oy, 2003.
- [6] Suomen Metalliteollisuuden Keskusliitto. 1987. *Tekninen Tiedotus 8/87, Toleranssien ja pinnankarheuksien valinta*. Metalliteollisuuden Kustannus Oy, 1987.
- [7] Stolarski T.A. 1990. *Tribology in machine design*. Butterworth – Heinemann, 2000.
- [8] Awrejcewicz J. ja Olejnik P. 2007. *Occurance of stick-slip phenomenon*. Verkkodokumentti. <<http://www.ptmts.org.pl/awr-olej-1-07.pdf>> Luettu, 20.3.2015.
- [9] Koivisto K, Laitinen E, Niinimäki M, Tiainen T, Tiilikka P. ja Tuomikoski J. 2008. *Konetekniikan materiaalioppi*. Helsinki: Edita Prima Oy. 2010.
- [10] *Elementtimenetelmän perusteet*. Verkkodokumentti. <<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/material/attachments/vanhaamk/digma/5h5F5G0jJ/FES01.pdf>>

- [11] Dessault Systems - Solid Works. *Solid Mesh*. Verkkodokumentti. <[http://help.solidworks.com/2014/English/SolidWorks/cworks/c\\_Solid\\_Meh.htm](http://help.solidworks.com/2014/English/SolidWorks/cworks/c_Solid_Meh.htm)>. Luettu, 24.2.2015.
- [12] Tangent modulus. Verkkodokumentti. <[http://en.wikipedia.org/wiki/Tangent\\_modulus](http://en.wikipedia.org/wiki/Tangent_modulus)>. Luettu, 24.2.2015.
- [13] Dessault Systems - Solid Works. *Plasticity von mises model*. Verkkodokumentti. <[http://help.solidworks.com/2013/English/SolidWorks/cworks/c\\_Plasticity\\_von\\_Mises\\_Model.htm](http://help.solidworks.com/2013/English/SolidWorks/cworks/c_Plasticity_von_Mises_Model.htm)> Luettu, 24.2.2015
- [14] George K. Burgess. 1924. Tangent modulus and the strenght of steel colums in tests.. Verkkodokumentti. <<http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/nbstechnologic/nbstechnologicpaperT263.pdf>>. Luettu, 24.2.2015.
- [15] Statistival Process Control (SPC). Online. <<http://www.statisticalprocesscontrol.info/glossary.html>>. Luettu, 12.3.2015.
- [16] Process capability index. Online. <[http://en.wikipedia.org/wiki/Process\\_capability\\_index](http://en.wikipedia.org/wiki/Process_capability_index)> Luettu, 12.3.2015.
- [17] Aalto-yliopisto – Tilastolliset menetelmät: Lineaarinen regressioanalyysi. Online. <<http://math.aalto.fi/opetus/sovtodb/oppikirja/Regranal.pdf>>. Luettu, 20.3.2015.
- [18] SCHMIDT - *Compleetete indexed Catalog*. Verkkodokumentti. <[http://www.schmidttechnology.de/en/maschinen/download/SCHMIDT-Presses\\_en.pdf](http://www.schmidttechnology.de/en/maschinen/download/SCHMIDT-Presses_en.pdf)>. Luettu, 15.1.2015.
- [19] Springler Sciende & Business media. 1998. *Metal Forming handbook*. Schuler GmbH. Verkkodokumentti. <<http://staff.uny.ac.id/sites/default/files/pendidikan/aan-ardian-mpd/3c-handbook-metal-forming.pdf>>. Luettu, 30.1.2015.
- [20] Hydraulic press. Online. <[http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic\\_press](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_press)>. Luettu. 15.1.2015.

- [21] Friction and Coefficients of Friction. Online. <[http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html)>. Luettu. 28.4.2015
- [22] Coefficient of Friction. Online. <<http://www.engineershandbook.com/Tables/frictioncoefficients.htm>>. Luettu, 28.4.2015

## Navan nro 1 pinnankarheusmittaukset

Pinnankarheusmittarilla mitatun navan numero 1 sisäpinnan mittausdata.

### Holkki no.1

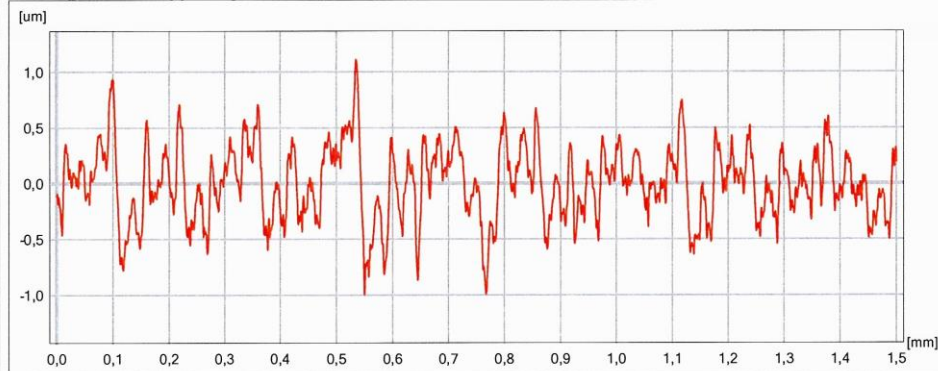
#### Property

Title	Untitled	Created Date/Time	4.3.2015 14:34:57	Revision No.	1
Subtitle		Revised Date/Time	4.3.2015 14:35:08	Date/Time start	4.3.2015 14:34:57
Created By	hkimitahe	Revised By	hkimitahe	Date/Time end	4.3.2015 14:35:08

#### Evaluation Condition

Profile=R_ISO - Section=[1]	Smplg Length(e):	0,25mm	Ls	0,0025mm	Pre-Travel:	0,4mm	Compensation:	Off
Standard	ISO1997	No of Smplg(nle):	6	Kind of Filter:	Gaussian	Post-Travel:	0,125mm	
Kind of Profile:	R_ISO	Lc	0,25mm	Evtn Length(m):	1,5mm	Smooth Connection	Off	

Profile=R\_ISO - Section=[1] X Mag: x100 Z Mag: x20000 <SurfAnalysis\_1>



#### Parameter Summary Sheet

Parameter	Profile=R_ISO - Section=[1] Average Value
Ra6 (um)	0,262 0,262

## Navan nro 2 pinnankarheusmittaukset

Pinnankarheusmittarilla mitatun navan numero 2 sisäpinnan mittausdata

### Holkki no.2

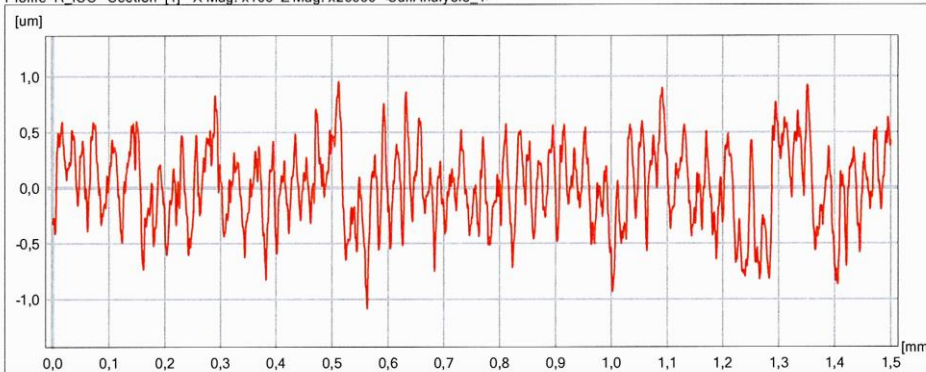
#### Property

Title	Untitled	Created Date/Time	4.3.2015 14:32:33	Revision No.	1
Subtitle		Revised Date/Time	4.3.2015 14:32:45	Date/Time start	4.3.2015 14:32:34
Created By	hkimitahe	Revised By	hkimitahe	Date/Time end	4.3.2015 14:32:45

#### Evaluation Condition

Profile=R_ISO - Section=[1]	Smplg Length(e):	0,25mm	Ls	0,0025mm	Pre-Travel:	0,4mm	Compensation:	Off
Standard	ISO1997	No of Smplg(nle):	6	Kind of Filter:	Gaussian	Post-Travel:	0,125mm	
Kind of Profile:	R_ISO	Lc	0,25mm	Evltn Length(m):	1,5mm	Smooth Connection	Off	

Profile=R\_ISO - Section=[1] X Mag: x100 Z Mag: x20000 <SurfAnalysis\_1>



#### Parameter Summary Sheet

Parameter	Profile=R_ISO - Section=[1]	Average Value
Ra6 (um)		0,289

## Navan nro 3 pinnankarheusmittaukset

Pinnankarheusmittarilla mitatun navan numero 3 sisäpinnan mittausdata.

### Holkki no.3

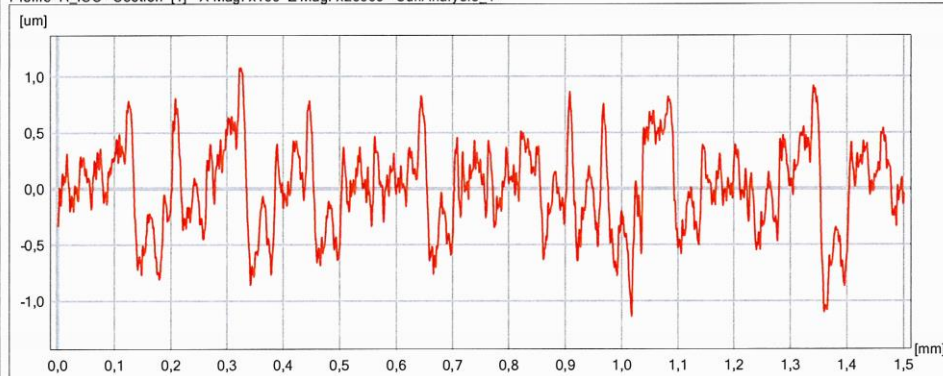
#### Property

Title	Untitled	Created Date/Time	4.3.2015 14:22:54	Revision No.	1
Subtitle		Revised Date/Time	4.3.2015 14:23:05	Date/Time start	4.3.2015 14:22:54
Created By	hkimitahe	Revised By	hkimitahe	Date/Time end	4.3.2015 14:23:05

#### Evaluation Condition

Profile=R_ISO - Section=[1]	Smplg Length(l):	0,25mm	Ls	0,0025mm	Pre-Travel:	0,4mm	Compensation:	Off
Standard	ISO1997	No of Smplg(nle):	6	Kind of Filter:	Gaussian	Post-Travel:	0,125mm	
Kind of Profile:	R_ISO	Lc	0,25mm	Evltm Length(lm):	1,5mm	Smooth Connection	Off	

Profile=R\_ISO - Section=[1] X Mag: x100 Z Mag: x20000 <SurfAnalysis\_1>



#### Parameter Summary Sheet

Parameter	Profile=R_ISO - Section=[1]	Average Value
Ra6 (um)		0,305

## Akselin nro 1 pinnankarheusmittaukset

Pinnankarheusmittarilla mitatun akselin numero 1 sisäpinnan mittausdata

### Tappi no.1

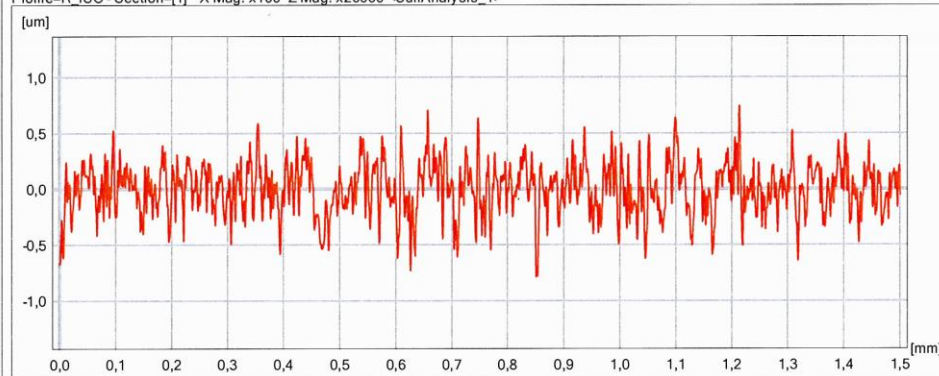
#### Property

Title	Untitled	Created Date/Time	4.3.2015 14:38:45	Revision No.	1
Subtitle		Revised Date/Time	4.3.2015 14:38:57	Date/Time start	4.3.2015 14:38:45
Created By	hkimitahe	Revised By	hkimitahe	Date/Time end	4.3.2015 14:38:57

#### Evaluation Condition

Profile=R_ISO - Section=[1]	Smplg Length(l):	0,25mm	Ls	0,0025mm	Pre-Travel:	0,4mm	Compensation:	Off
Standard	ISO1997	No of Smplg(n):	6	Kind of Filter:	Gaussian	Post-Travel:	0,125mm	
Kind of Profile:	R_ISO	Lc	0,25mm	Evltg Length(lm):	1,5mm	Smooth Connection	Off	

Profile=R\_ISO - Section=[1] X Mag: x100 Z Mag: x20000 <SurfAnalysis\_1>



#### Parameter Summary Sheet

Parameter	Profile=R_ISO - Section=[1]	Average Value
Ra6 (um)		0,181

## Akselin nro 2 pinnankarheusmittaukset

Pinnankarheusmittarilla mitatun akselin numero 2 sisäpinnan mittausdata

### Tappi no.2

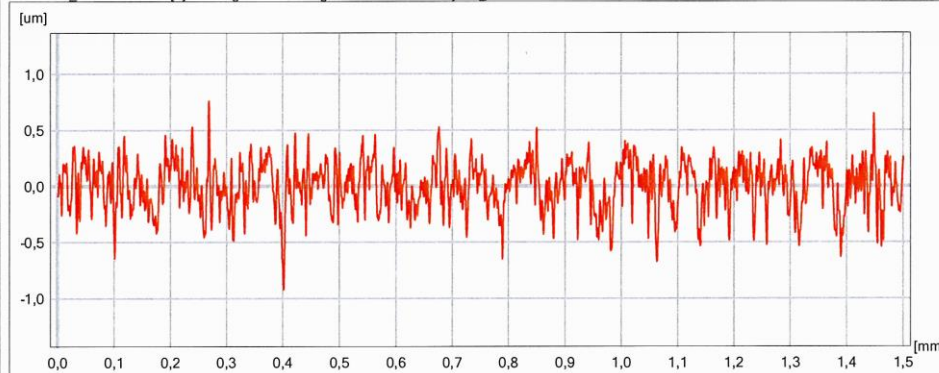
#### Property

Title	Untitled	Created Date/Time	4.3.2015 14:40:39	Revision No.	1
Subtitle		Revised Date/Time	4.3.2015 14:40:50	Date/Time start	4.3.2015 14:40:39
Created By	hkimitahe	Revised By	hkimitahe	Date/Time end	4.3.2015 14:40:50

#### Evaluation Condition

Profile=R_ISO - Section=[1]	Smplg Length(l):	0,25mm	Ls	0,0025mm	Pre-Travel:	0,4mm	Compensation:	Off
Standard	ISO1997	No of Smplg(nle):	6	Kind of Filter:	Gaussian	Post-Travel:	0,125mm	
Kind of Profile:	R_ISO	Lc	0,25mm	Evltm Length(lm):	1,5mm	Smooth Connection	Off	

Profile=R\_ISO - Section=[1] X Mag: x100 Z Mag: x20000 <SurfAnalysis\_1>

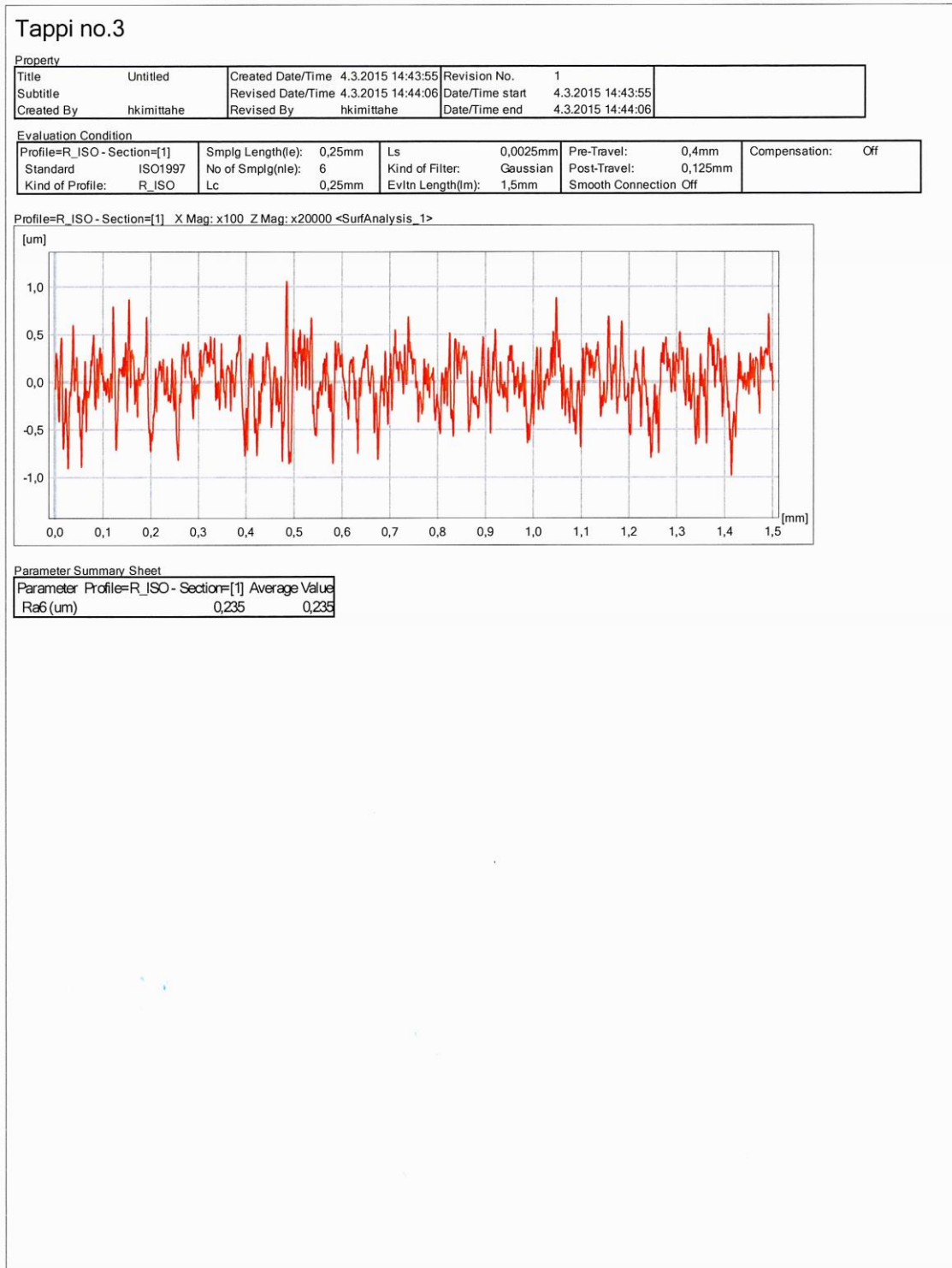


#### Parameter Summary Sheet

Parameter	Profile=R_ISO - Section=[1]	Average Value
Ra6 (um)	0,173	0,173

## Akselin nro 3 pinnankarheusmittaukset

Pinnankarheusmittarilla mitatun akselin numero 3 sisäpinnan mittausdata



## Akselien ja napojen halkaisijoiden mittaustulokset

Alla on esitetty kolmesta eri pisteestä mitattujen akselien halkaisijat sekä mitattujen napojen halkaisijat. Näiden mittojen avulla on laskettu keskiarvot ja sovitteet.

	Akselin mittauspiste 1 (mm)	Akselin mittauspiste 2 (mm)	Akselin mittauspiste 3 (mm)	Akselin halkaisijoiden keskiarvo (mm)	Navan halkaisija (mm)	Sovitteiden itseisarvo (mm)
1.	7,730	7,731	7,732	7,731	7,706	0,0250
2.	7,730	7,731	7,731	7,7307	7,705	0,0257
3.	7,732	7,732	7,733	7,7323	7,704	0,0283
4.	7,732	7,732	7,733	7,7323	7,706	0,0263
5.	7,730	7,731	7,731	7,7307	7,706	0,0247
6.	7,731	7,731	7,732	7,7313	7,709	0,0223
7.	7,731	7,731	7,732	7,7313	7,704	0,0273
8.	7,730	7,731	7,732	7,731	7,705	0,0260
9.	7,731	7,731	7,732	7,7313	7,706	0,0253
10.	7,731	7,731	7,732	7,7313	7,707	0,0243
<b>Keskiarvo</b>	-	-	-	7,731	7,706	0,0255

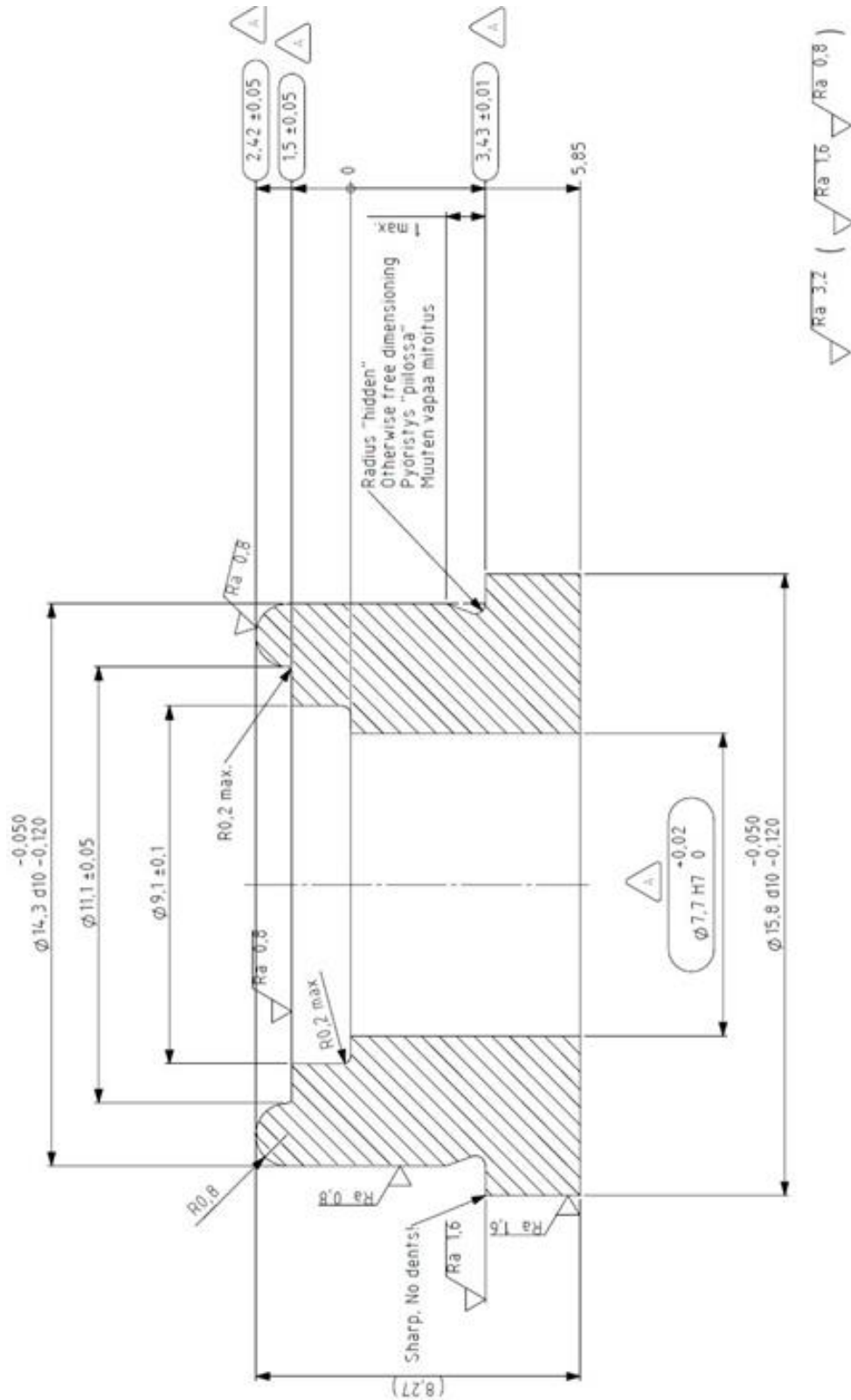
## Elastiset ja plastiset simulointitulokset

Alla on esitetty elastisten- ja plastisten simulointituloksien numeeriset arvot.

Työkuvien sovitteilla simuloitunut		Koneistettujen osien mitoilla suoritettut simuloinnit	
Elastinen max (N)	Plastinen max (N)	Elastinen mitattu max (N)	Plastinen mitattu max (N)
37 728	23 066	30 437	21 434
45 244	27 595	36 501	25 752
48 200	29 675	38 886	27 719
48 689	30 629	39 280	28 405
46 358	29 610	37 400	27 301
43 325	27 929	34 953	25 627
36 295	23 537	29 281	21 607
28 853	18 868	23 277	17 205
20 927	13 215	16 883	11 936
16 115	0	13 001	8 301
10 364	0	8 361	0
Elastinen avg (N)	Plastinen avg (N)	Elastinen mitattu min (N)	Plastinen mitattu min (N)
18 928	16 583	23 276	19 077
22 699	20 336	27 912	22 947
24 182	21 776	29 736	24 607
24 428	21 997	30 038	24 967
23 258	20 942	28 600	23 885
21 737	19 591	26 729	22 402
18 210	16 440	22 392	18 871
14 476	12 991	17 800	14 847
10 499	8 934	12 911	10 286
8 085	6 047	9 942	7 237
5 200	0	6 394	0
Elastinen min (N)	Plastinen min (N)		
129	107		
155	128		
165	136		
166	138		
158	131		
148	122		
124	102		
99	81		
72	58		
55	44		
35	0		

## Navan työkuva

Navan työkuva, jossa on esitelty valmistukseen tarvittavat mitat.



## Akselin työkuva

Akselin työkuva, jossa on esitelty vain puristusliitokseen tarvittava liitospinta.

