

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU

Konetekniikan koulutus

Joni Rento

SÄRMÄYKSEN TARKKUUDEN HALLINTA SUUNNITTELUSTA
VALMISTUKSEEN

Opinnäytetyö
Toukokuu 2021



Karelia
AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2021
Konetekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä(t)
Joni Rento

Nimeke
Särmäyksen tarkkuuden hallinta suunnittelusta valmistukseen

Toimeksiantaja
Karelia-amk

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää särmäyksen tarkkuutta suunnittelusta valmiiseen kappaleeseen. Kirjallisuudesta ja standardeista selvitettiin särmäyksen tarkkuuteen liittyvät asiat: kuten esim, levyn takaisin jousto taivuttamisessa ja levyn oikaistu pituus ennen särmäystä.

Teräsmateriaalit valittiin yhdessä toimeksiantajan kanssa, jonka jälkeen suunniteltiin koekappaleet kirjallisuudesta löytyviä ohjeita ja laskutapoja käyttäen Creo parametric -ohjelmalla. Suunnitellut kappaleet särmättiin, mitattiin ja verrattiin tuloksia suunniteltuihin mittoihin.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin selville mittaheittojen suuruudet ja eroavaisuudet materiaalien välillä ja päätelmät mistä ne johtuivat. Jatkokehityksenä selvisi tarve lisätestille eri laskuarvoilla sekä teräyhdistelmillä.

Kieli
suomi

Sivuja 33
Liitteet 5
Liitesivumäärä 17

Asiasanat
särmäys, Creo parametric, teräs, mittaus



THESIS
May 2021
Degree Programme in Mechanical Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author (s)
Joni Rento

Title
Accuracy Control of Press Brake Bending from Design to Manufacture

Commissioned by
Karelia UAS

The goal of this thesis was to find out the accuracy of press brake bending from design to a finished piece. Accuracy related information in bending was used from literature and standards, for example, back elasticity in bending and flat pattern length before bending.

Different steel materials were chosen for testing together with the client and parts were then designed with Creo parametric using instructions and calculation methods found in the literature. The designed parts were bent, measured and compared to the designed parts.

As a result of this thesis the differences in material measurements were obtained, and it could be seen how big they were and why did they happen. As further development, tests would be needed with different calculation parameters and tooling of the press brake.

Language

Finnish

Pages 33
Appendices 5
Pages of Appendices 17

Keywords

bending, Creo parametric, steel, measuring

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Leikkaaminen.....	5
2.1	Laserleikkaus.....	5
2.2	Kuitulaser.....	6
3	Taivuttaminen	6
3.1	Särmääminen	6
3.2	Särmäysvaiheet	7
3.3	Vapaataivutus	8
3.4	Pohjaaniskutaivutus.....	9
3.5	V-aukollisen alatyökalun leveyden valitseminen	9
3.6	Taivutussäde	11
3.7	Takaisinjousto.....	11
3.8	Oikaistu pituus	12
3.9	k-kerroin.....	15
4	Materiaalit	16
4.1	Särmättävät materiaalit	16
4.2	Ultralujat teräkset.....	16
5	Särmäys.....	17
5.1	Tarvittava voima	17
5.2	Tarvittavan voiman laskeminen	19
6	Oikaistun pituuden laskenta	19
6.1	Oikaistun pituuden laskenta Creolla	20
6.2	Creon k- ja y-kerroin	20
6.3	Käsin laskennan ja Creon vertailu	22
7	Mittaukset	27
8	Tulokset	28
9	Pohdinta.....	31
	Lähteet.....	32

Liitteet

Liite 1(2) SFS 5803 standardin toleranssit

Liite 2(4) Taivutettavat kappaleet polyworksissa

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää särmäyksen tarkkuutta käytännössä suunnittelusta valmiiseen kappaleeseen käyttäen kirjallisuudesta ja standardeista särmäyksen tarkkuuteen liittyviä asioita kuten takaisinjousto ja oikaistujen pituuksien laskeminen. Opinnäytetyön toimeksiantaja on Karelia-ammattikorkeakoulu.

Kappaleet leikataan laserleikkauskoneella ja taivutetaan särmäyskoneella. Suunnitellut kappaleet särmätään pitkittäin ja poikittain valssaussuuntaan nähdessä. Särmäyksessä toteutuneita tuloksia skannataan 3D-käsimittalaitteella ja verrataan käsin laskettuihin sekä Creo parametric -ohjelmalla suunniteltuihin pituuksiin.

2 Leikkaaminen

2.1 Laserleikkaus

Viime vuosikymmenien aikana laserleikkauksesta on kehittynyt tunnettu leikkausprosessi teollisuudessa, koska laserleikkauksessa pystytään leikkaamaan leikattavan muodon ollessa melkein vapaa. Laserleikkauksessa pystytään leikkaamaan erilaisia materiaaleja, kuten esimerkiksi metalli, puuta, vaneri, nahka. Laserleikkauksessa tehdyt tuotteet ovat myös laadukkaita eivätkä useimmiten vaadi ollenkaan hiomista ja prosessi on nopea.

(Matilainen, Parviainen, Havas, Hiitelä & Hultin 2011, 158.)

”Laserleikkaus voidaan suorittaa polttoleikkauksena, sulattavana leikkauksena, höyrystävänä leikkauksena tai näiden yhdistelmänä. Lasersädettä käytetään sulattamaan tai höyrystämään leikattava materiaali.” (Matilainen ym. 2011, 158.)

2.2 Kuitulaser

Särmättävät levy kappaleet tullaan leikkaamaan käyttäen kuitulaserkonetta kuva 1.



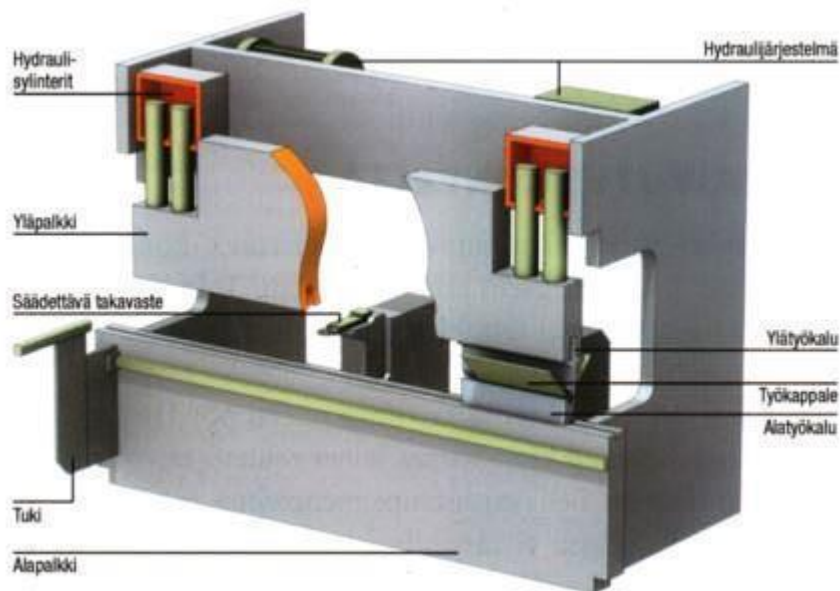
Kuva 1. Bysmart fiber kuitulaser (Bystronic 2021.)

Teollisuudessa käytettävät kuitulaserit ovat yleensä pienempiä, kuin perinteiset laserleikkauskoneet. Kuitulaserit pystyvät kuitenkin hyödyntämään virranottoa paremmin ja näin saamaan monta kertaa enemmän tehoa. ”Kuitulaserleikkauslaitteisto soveltuu sekä ohuiden ja paksujen teräs-, jaloteräs- ja alumiinilevyjen että kirjometallilevyjen (kupari ja messinki) leikkaamiseen.” (Bystronic 2021.)

3 Taivuttaminen

3.1 Särmääminen

Särmääminen suoritetaan särmäyspuristimeksi kutsutulla koneella kuva 2.



Kuva 2. Särmäyspuristimen rakenne. (Matilainen ym. 2011, 240)

Särmäyspuristimissa taivutusleveys voi olla 1–10 metriä, mutta yleensä taivutusleveys on koneissa 2–4 metriä. Särmäyspuristimia pystytään myös yhdistämään, jolloin pystytään taivuttamaan kappaleita, jotka eivät olisi yhdellä koneella mahdollisia. Puristusvoimat ovat koneissa väliltä 100- 60 000 kilo Newtonia (kN). Tarvittava voima taivutuksessa perustuu särmättävästä materiaalista ja sen paksuudesta. (Matilainen ym. 2011, 240.)

3.2 Särmäysvaiheet

Särmäykseen levyn taipumiseen liittyy 3 eri taivutusvaihetta, jotka ovat seuraavanlaiset:

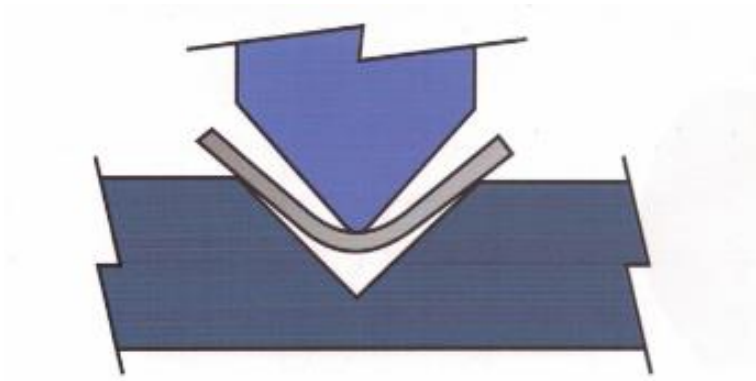
1. Taivutuksen ensimmäinen vaihe, jossa materiaaliin tapahtuu elastista muutosta eli niin sanottu elastinen taivutus. Tässä vaiheessa materiaalin myötörajaa ei ylitetä ja materiaaliin tapahtuva muutos on ainoastaan plastista. Taivutettavan voiman loppuessa tai poistettaessa levy palautuisi suoraksi.
2. Taivutuksen ensimmäisen vaiheen jälkeen on niin sanottu elastis- plasti- nen taivutus, jossa taivutussäde pienenee, materiaalin myötölujuus ylittyy, sekä levyn pinnalla, että pintakerroksissa muodostuu plastista muutosta.

Rasitusta lisättäessä ylittyy myös sisäosien myötölujuus, taivutussäde pienenee lisää ja materiaali alkaa muuttua plastisesti ulkoreunoilta kohti keskipistettä. Voiman poistettaessa elastisena säilyneet osiot pyrkivät palauttamaan materiaalin suoraksi. Materiaaliin jää joka tapauksessa venymä, koska osa materiaalista on jo muovautunut pysyvästi eli plastisesti.

3. Kokonaan plastinen taivutus. Materiaali taivutetaan säteelle, joka on saman paksuinen, kuin materiaali. Tässä tilanteessa materiaalin keskipisteeseen jääneiden elastisten kohtien määrä vähenee vielä enemmän ja tapahtuvaa muutosta materiaalin poikkileikkauksessa voidaan sanoa melkein kokonaan plastiseksi. (Matilainen ym. 2011, 239.)

3.3 Vapaataivutus

Vapaassa taivutuksessa materiaalia taivutetaan alatyökalun v-aukon kulmien ja ylätyökalun välissä. Särmäys lopetetaan ennen ylätyökalun osumista alatyökalun pohjaan jättäen työkalujen väliin ilmaraon. (Matilainen ym. 2011, 241) Kuva 3 vapaataivutuksen havainnollistaminen.

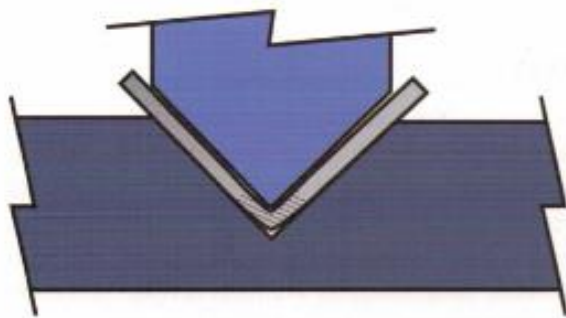


Kuva 3. Vapaataivutus (Matilainen ym. 2011, 241)

Vapaataivutuksessa taivutuskulmaa voidaan muokata muuttamalla yläterän iskunpituutta. Vapaassataivutuksessa terien kulmat ovat yleensä alle 90 astetta ja taivutuksen etuna on, että siinä ylätyökalu ei muuta levyssä tapahtuvaa muutosta taivutuksen aikana. Muutokset riippuvat ylä- ja alatyökalun etäisyydestä, käytettävästä materiaalista ja taivutettavan materiaalin paksuudesta. (Matilainen ym. 2011, 241.)

3.4 Pohjaaniskutaivutus

Pohjaaniskutaivutuksessa ylätyökalun painimen korkeus on ohjelmoitu siten, että terä painuu alatyökaluun kiinni ja välissä oleva materiaali muovautuu täsmällisesti terien muotojen mukaisesti. (Matilainen ym. 2011, 241) (kuva 4).

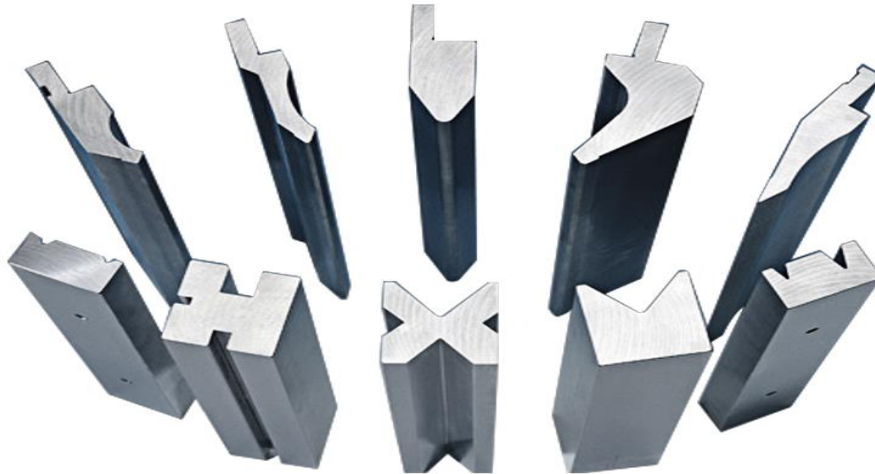


kuva 4. pohjaaniskutaivutus (Matilainen ym. 2011, 241)

Pohjaaniskutaivutuksen haitta on, että se vaatii 3–5 kertaa enemmän voimaa verrattuna vapaaseen taivutukseen. Pohjaaniskutaivutuksessa on hyvänä puolelana se, että levyyn voidaan tällä tavalla saada lopullinen muodonmuutos. Hyvin toteutuessaan pohjaaniskutaivutus pystyy poistamaan takaisinjouston melkein niin, että sitä ei tapahdu ollenkaan. Pohjaaniskutaivutusta käytetään yleensä, kun pyritään tarkkaan ja jämääkkään muodonmuutokseen suoraan ilman takaisinjouston mahdollisuutta. (Matilainen ym. 2011, 241.)

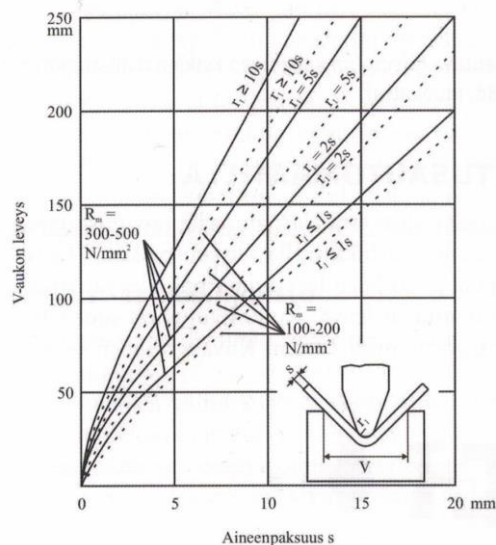
3.5 V-aukollisen alatyökalun leveyden valitseminen

Alatyökalun leveyttä mietittäessä pitäisi tietää materiaalin paksuus ja myötölujuus, sekä vaadittu sisäpuolinen taivutussäde, mutta teoriassa alatyökalun leveyden pystyy valitsemaan tietämällä pelkästään taivutettavan materiaalin ja levynpaksuuden. Kuvassa 5. on esitetty särmäyksessä käytettäviä eri ylä- ja alatyökaluja.



Kuva 5. Erilaisia särmäyspuristimen ylä- ja alatyökaluja. (harsle 2021)

Yleensä ajatellaan, että alaterän leveyden pitäisi olla 8 kertaa materiaalin pak-
suus. Kuvassa 6. on esitetty alaterän v-aukon leveys aineenpaksuuden ja mur-
tolujuuden mukaan. Suurta lujuutta vaativissa materiaaleissa on kuitenkin suosi-
tus, että alaterän leveys olisi suurempi kuin 8 kertaa esimerkiksi 10-12 kertaa
suurempi kuin materiaalinpaksuus. (Matilainen ym. 2011, 243.)



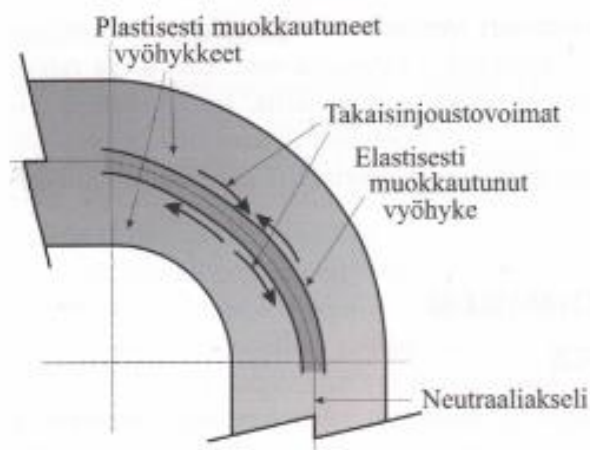
Kuva 6. V-aukon leveys aineenpaksuuden ja murtolujuuden mukaan. (Matilai-
nen ym. 2011, 243)

3.6 Taivutussäde

Pienin taivutussäde levytuotetta särmättäessä valitaan materiaalin, taivutustavan ja tuotteen vaatimien tai asiakkaan haluttujen vaatimuksien perusteella. Särmättäessä materiaalin venymä on suurimmillaan särmäyskohdan ulkokehällä, jossa on myös tämän takia todennäköisempää, että materiaali murtuu. Mitä pienempää taivutussädettä käytetään, sitä suuremmaksi materiaalin ulkopinnassa muodostuva venymä kasvaa ja sen takia särmäyksessä tulisi aina käyttää mielellään mahdollisimman suurta taivutussädettä. Myös valssaus-suunta vaikuttaa taivutussäteeseen ja pitkittäin valssausuuntaan nähden se on kriittisempää pienellä taivutussäteellä. Taivutussäteen tarkastamiseksi ei ole yleistä tapaa, jonka vuoksi vapaata taivutusta ei suositella silloin, kun tarkka säde on tärkeässä piirteessä taivutettavaa kappaletta tehtäessä. (Matilainen ym. 2011, 248.)

3.7 Takaisinjousto

Takaisinjoustossa plastisesti muuttuneiden puristus ja vetojännitysalueiden väliin muodostuva vyöhyke, johon muodostuu ainoastaan elastista muutosta. Elastiset vyöhykkeet pyrkivät palauttamaan materiaalin taivutuksen alkuperäiseen muotoonsa, kun taas plastiset vyöhykkeet pyrkivät juuri päinvastaiseen vastustaen lähtötilanteeseen palaamista. Kuvassa 7 on esitetty takaisinjousto ja sen eri vyöhykkeet.

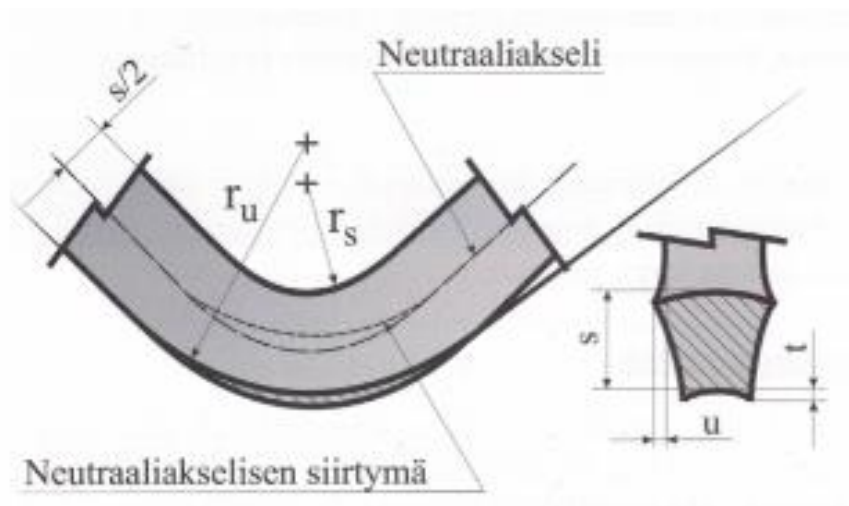


Kuva 7. Takaisinjousto (Matilainen ym. 2011, 246)

Takaisinjousto on vaikuttavia tekijöitä on liuta, mutta suurimmat niistä ovat taivutussäde, taivutettavan levyn materiaali ja sen myötö- ja murtolujuus, v-aukon leveys ja painimen säde. Takaisinjousto kasvaa myötölujuuden kasvaessa. Särmentäessä takaisinjousto pystytään myös vähentämään lämmittämällä materiaalia, sillä materiaalia lämmittäessä materiaalin ominainen myötölujuus laskee ja samalla takaisinjousto vähenee. (Matilainen ym. 2011, 245.)

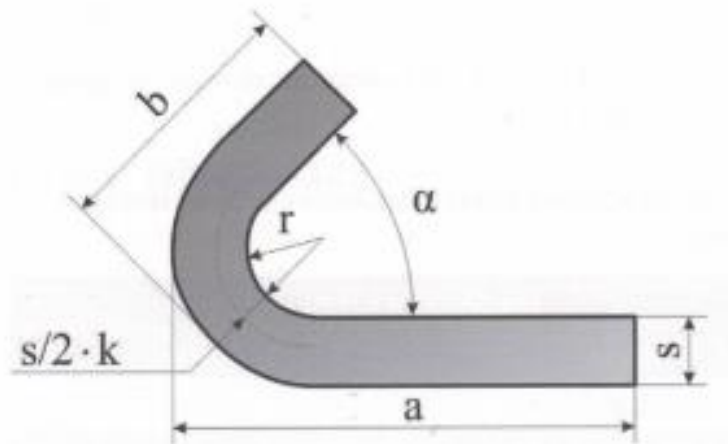
3.8 Oikaistu pituus

Neutraaliakseli tarkoittaa särmättävän materiaalin keskiosassa taivutuskohdan sisä- ja ulkopinnan välistä jännityksetöntä kohtaa, jossa vetojännitys muuttuu puristusjännitykseksi (kuva 8). Neutraaliakseli ei sijaitse aina välttämättä särmättävän materiaalin keskellä vaan siirtyy sisäreunalle särmättäessä.



kuva 8. Neutraaliakselin siirtymä (Matilainen ym. 2011, 250)

Särmättäessä pienen säteen käyttäminen aiheuttaa taivutuskohdan sisäpintaan puristusta ja se painuu kasaan vähemmän kuin ulkopinta venyy, joten neutraaliakseli siirtyy sisäänpäin ja uloimmat kerrokset ohenevat venymän takia. Oikaistupituus on hyvä tietää, sillä neutraaliakselin siirtyessä sisemmäs materiaali pitenee särmättäessä. Kuvassa 9 on esitetty oikaistun pituuden arvot.



kuva 9. Oikaistun pituuden arvot (Matilainen ym. 2011, 250)

Jossa α = taivutuskulma
 a = alemman laipan pituus
 b = ylemmän laipan pituus
 s = materiaalin paksuus
 r = taivutussäde.

Särmäyksessä materiaali venyy ja tämä tarkoittaa, että oikaistu pituus on lyhyempi kuin taivutettujen laippojen yhteenlaskettu pituus. (Matilainen ym. 2011, 250.) Standardi SFS 5998 mahdollistaa särmäyksessä suoritetuille taivutuksille oikaistun pituuden v -tekijän arvojen laskemisen taivutuskulmien perusteella. Kaavojen k -kerroin määräytyy taivutussäteen ja materiaalinpaksuuden suhteen (r/s) .

Arvio taivutettavan levyn oikaistulle pituudelle voidaan laskea käyttämällä kaavaa 1.

$$L = a + b - v \quad (1)$$

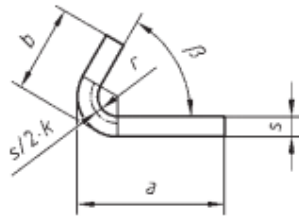
Jossa,

a = ensimmäisen laipan mitta
 b = toisen laipan mitta
 v = korjaava tekijä

Tekijä v voidaan määrittää seuraavilla kaavoilla.

Kaava kun halutaan selvittää korjaava tekijä v ja avautumiskulma on $0^\circ < \beta \leq 90^\circ$

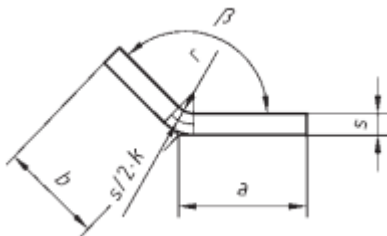
$$\text{Korjaava tekijä } v = \pi \left(\frac{180^\circ - \beta}{180^\circ} \right) \cdot \left(r + \frac{s}{2} \cdot k \right) - 2(r + s) \quad (2)$$



kuva 10. Havainnollistus kun avautumiskulma on $0^\circ < \beta \leq 90^\circ$ (SFS 5998, 7)

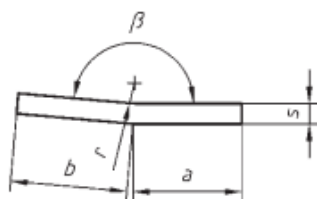
Kaava kun halutaan selvittää korjaava tekijä v ja avautumiskulma on $90^\circ < \beta \leq 165^\circ$

$$\text{Korjaava tekijä } v = \pi \cdot \left(\frac{180^\circ - \beta}{180^\circ} \right) \cdot \left(r \cdot \frac{s}{2} \cdot k \right) - 2(r + s) \cdot \tan \frac{180 - \beta}{2} \quad (3)$$



kuva 11. Havainnollistus kun avautumiskulma on $90^\circ < \beta \leq 165^\circ$ (SFS 5998, 2015, 7)

Kun avautumiskulma on $165^\circ < \beta \leq 185^\circ$ korjaava tekijä $v=0$. Tässä tapauksessa tekijän v arvot ovat niin pieniä, että tarkkuus on käytännön sovellutuksissa riittävä.



kuva 12. Havainnollistus kun avautumiskulma on $165^\circ < \beta \leq 185^\circ$ (SFS 5998, 2015, 7)

Kaavoissa:

a = ensimmäinen laippa

b = toinen laippa

β = avautumiskulma

r = taivutussäde

s = levynpaksuus

k = k-kerroin

3.9 k-kerroin

Työkappaleiden leikkauspituuksien määrittämiseen käytetään k-kerrointa.

Kerroin k ilmoittaa neutraaliakselin $s/2$ paikan poikkeaman.

Jos $r: s > 5$, niin $k = 1$.

Jos $r: s \leq 5$, niin:

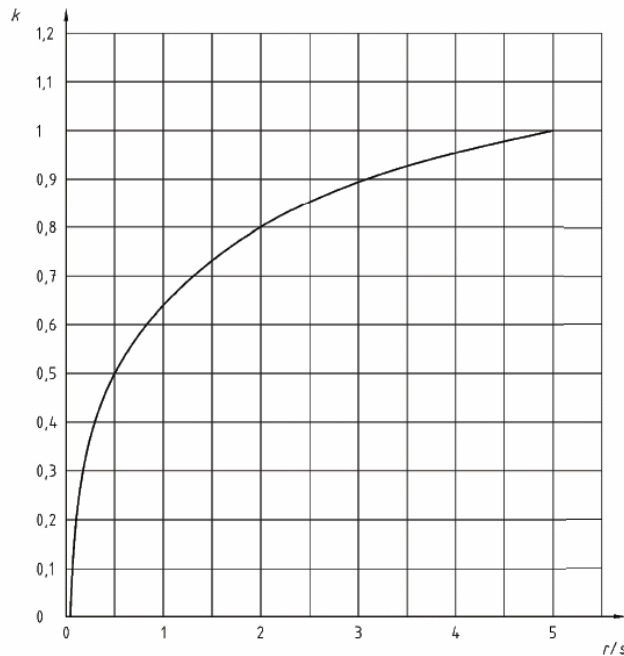
k -kerroin voidaan laskea kaavalla 4.

$$k = 0,65 + 0,5 \cdot \log_{10} \frac{r}{s} \quad (4)$$

jossa, r = sisäsäde

s = materiaalin paksuus

Kerroin k voidaan myös valita kuvan 13 graafisesta esityksestä, joka vastaa kaavaa. Kun $r: s > 5$, kuvan 9 kaava ei ole enää voimassa, ja silloin on käytettävä arvoa $k=1$. (SFS 5998, 8)



kuva 13. Kertoimen k graafinen esitys. (SFS 5998, 2015, 8)

4 Materiaalit

4.1 Särmättävät materiaalit

Materiaalit, joita tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin käytännössä, olivat 6 mm paksuinen S355MC ja Strenx 700MC plus. Särmättäviä kappaleita suunniteltiin neljä erilaista, jotka olivat kaikki 250 mm levyisiä. Kappaleita särmättiin neljä Strenx 700MC plus-materiaalista ja vertailuksi kaksi kappaletta jokaista S355MC-materiaalista. Kappaleista puolet on särmätty poikittain ja toiset puolet pitkittäin valssaussuuntaan nähden molemmissa materiaaleissa.

4.2 Ultralujat teräkset

Teräksistä puhuttaessa ultralujat rakenne- ja kulutusteräksiksi lasketaan sellaiset, joiden myötölujuus on yli 550 N/mm² ja murtolujuus yli 700 N/mm². Nämä teräkset ovat lujuudeltaan 1,5-2,5 kertaa suurempia kuin tavalliset rakennete-

räket. Etuna ultralujissa teräksissä on, että niiden avulla pystytään keventämään rakenteita, joka vähentää kustannuksia ja mahdollistaa suuremman suorituskyvyn käytön. Yleisimpiä kohteita, missä ultralujia teräksiä käytetään ovat nostureiden puomit ja niiden runkorakenteet, kuorma-autot ja niihin liittyvät laavat, pankot ja turvakehikon osat. (Lumen verkkolehti, 2016.)

5 Särmäys

5.1 Tarvittava voima

Särmäykseen tullaan käyttämään Ermakin särmäyskoneita. Kyseisen koneen pitäisi pystyä 100 tonnin puristusvoimaan ja jonka pitäisi olla riittävä materiaalien särmäykseen. Kuvassa 14. Ermakin särmäyskone.



Kuva 14. Särmäyksissä käytettävä Ermakin särmäyskone (kuva: Joni Rento.)

Kaikkiin särmäykseen tullaan käyttämään 1 mm säteen yläterää ja 50 mm v-aukon levyistä alaterää. Särättävän materiaalin paksuus on 6mm. Kuvassa 15. on suosituksia pienimmille sisäsäteille taivuttaessa eri materiaaleja.

Teräslaji	Särmä valesaus- suuntaan nähtään	Pienin sallittu sisäpuolinen taivutussäde nimellispaksuuksilla mm															
		≤ 2,5	> 2,5 ≤ 3	> 3 ≤ 4	> 4 ≤ 5	> 5 ≤ 6	> 6 ≤ 7	> 7 ≤ 8	> 8 ≤ 10	> 10 ≤ 12	> 12 ≤ 14	> 14 ≤ 16	> 16 ≤ 18	> 18 ≤ 20			
S235JRG2C	poikittain	2,5	3,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0	25,0	28,0	36,0	40,0			
	pitkittäin	2,5	3,0	6,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0	25,0	28,0	32,0	40,0	45,0			
S275JRC	poikittain	3,0	4,0	5,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0	25,0	28,0	32,0	40,0	45,0			
	pitkittäin	3,0	4,0	6,0	10,0	12,0	16,0	20,0	25,0	32,0	36,0	40,0	45,0	50,0			
S355J2G3C	poikittain	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0	25,0	32,0	36,0	45,0	50,0			
	pitkittäin	4,0	5,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0	25,0	32,0	36,0	40,0	50,0	63,0			
RAEX PERUSTERÄS RAEX MONITERÄS	kaikissa suunnissa	2,5 4,0	3,0 5,0	5,0 6,0	6,0 8,0	8,0 10,0	10,0 12,0	12,0 16,0	16,0 20,0	20,0 24,0	25,0 28,0	28,0 32,0	36,0 40,0	40,0 45,0			
RAEX 235NL RAEX 235NL ARCTIC	kaikissa suunnissa	—	—	—	7,5	9,0	10,5	12,0	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0			
RAEX 275NL RAEX 275NL ARCTIC	kaikissa suunnissa	—	—	—	7,5	9,0	10,5	12,0	15,0	24,0	28,0	32,0	36,0	40,0			
RAEX 355N RAEX 355NL RAEX 355NL ARCTIC	kaikissa suunnissa	—	—	—	7,5	9,0	10,5	12,0	15,0	24,0	28,0	32,0	36,0	40,0			
RAEX 420N RAEX 420NL	kaikissa suunnissa	—	—	—	7,5	9,0	10,5	12,0	15,0	24,0	28,0	32,0	36,0	40,0			
RAEX OPTIM Nauhatuotteet																	
RAEX 315 MC OPTIM	kaikissa suunnissa	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	3,0	3,5	4,5	5,0	6,0	6,5	—	—			
RAEX 355 MC OPTIM	kaikissa suunnissa	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	—	—			
RAEX 420 MC OPTIM	kaikissa suunnissa	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	5,5	6,5	8,0	9,5	11,0	—	—	—			
RAEX 480 MC OPTIM	kaikissa suunnissa	1,2	1,5	2,5	3,5	4,5	6,5	7,5	9,5	11,0	—	—	—	—			
RAEX 500 MC OPTIM	kaikissa suunnissa	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	7,0	8,0	10,5	12,0	—	—	—	—			
RAEX 550 MC OPTIM	kaikissa suunnissa	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	8,5	9,5	—	—	—	—	—	—			
RAEX 600 MC OPTIM	kaikissa suunnissa	2,5	3,0	6,0	7,5	9,0	12,5	14,5	—	—	—	—	—	—			
RAEX 650 MC OPTIM	kaikissa suunnissa	3,7	4,5	6,0	7,5	9,0	12,5	14,5	—	—	—	—	—	—			
RAEX 700 MC OPTIM	kaikissa suunnissa	—	4,5	7,0	9,0	11,0	—	—	—	—	—	—	—	—			
RAEX OPTIM Kvarttuotteet																	
RAEX 355 MC OPTIM	kaikissa suunnissa	—	—	—	4,0	5,0	5,5	6,5	8,0	12,0	9,5	11,5	13,0	14,5	16,0		
RAEX 420 MC OPTIM	kaikissa suunnissa	—	—	—	—	—	—	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0			

Tunnuskeilä C merkityt terästen ja RAEX-terästen särmättävyys laetaan taulukon mukaan. Ilman C merkintää olevien rakenneterästen pienimpiä taivutussäteitä käytetään yhtä levyn paksuusluokkaa suuremmasta sarakkeesta valittua arvoa.

ESIMERKKI TAIVUTUSSÄTEEN MUUTTUMISESTA SAMAN MYÖTÖLUJUUSLUOKAN TERÄKSILLÄ

Taivutussäde mm

Taivutussäde 8 mm levyillä

kuva 15. Suositukset pienimmille sisätaivutussäteille eri materiaaleille (Pertti Lepola, Risto Ylikangas, 2016, 305)

Särmäyksessä sisäsäde tulee olemaan vähän pienempi, kuin suositeltu minimi sisäsäde, koska muita terävaihtoehtoja ei ollut.

Jotta tarvittavasta voimasta voidaan tehdä arvio, on otettava huomioon taivutus-
pituus, levyn paksuus, alaterän leveys, materiaalin murtolujuus, mutta myös
vaihtuva momenttivarssi. Vaikka tarvittava voima olisikin laskettu jo ennalta las-
kettu silti yleensä suositellaan koetaivutuksia, koska yleensä laskuissa on, joi-
tain epävarmuuksia. Tarvittava voiman lasku tehdään vain Strenx 700MC plus -
materiaalille, koska tiedossa on, että S355MC pystytään kyseisellä Ermakin ko-
neella taivuttamaan. Kuvassa 16. on Strenx-materiaalin mekaaniset ominaisuu-
det, jota tarvittavan voiman laskukaavaan tarvitaan.

Mekaaniset ominaisuudet

Paksuus (mm)	Myötölujuus R_{eH} 1)2) (min MPa)	Murtolujuus R_m (MPa)	Venymä A_5 (vähintään %)	Pienin sisäpuolinen taivutussäde, taivutuskulma 90° ³⁾
3 - 10	700	750 - 950	13	1.0 x t
10.01 - 12	700	750 - 950	13	1.5 x t

Kuva 16. Strenx 700MC plus-materiaalin mekaaniset ominaisuudet. (ssab, 2016)

5.2 Tarvittavan voiman laskeminen

Tarvittavan voiman laskentakaavana on käytetty ssab organisaation sivuilta löytyvää kaavaa (kuva 17).

$$P = \frac{b \cdot t^2 \cdot R_m}{(W - R_d - R_p) \cdot 9\,800}$$

Kuva 17. Tarvittavan voiman laskukaava. (ssab, 2015)

Jossa,

- b = taivutuspituus
- t = levynpaksuus
- R_m = murtolujuus,
- W = alateränleveys
- R_d = alaterän kulmansäde
- R_p = yläterän säde.

$$P = \frac{250 \times 6^2 \times 950}{(50 - 4 \times 1) \times 9800} = 18.97 \text{ Tonnia}$$

6 Oikaistun pituuden laskenta

6.1 Oikaistun pituuden laskenta Creolla

Oikaistu pituus tullaan laskemaan käsin ja myös Creo parametric suunnitteluohjelmalla ja sitä tullaan vertailemaan käsin laskettuun tulokseen ja särmätyn käytännössä saatuun mittaustulokseen. Laskukaava, jota käytetään taivutetun pituuden määrittämiseen, on esitetty kuvassa 18. Laskut ovat tärkeitä, jotta tarkka levityskuva voidaan tehdä valmistusta varten.

$$L = (\pi/2 \times R + Y \text{ factor} \times T) \Theta/90$$

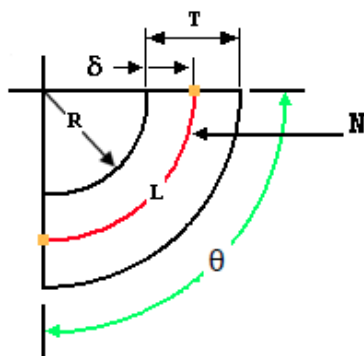
kuva 18. Oikaistun pituuden laskemisen kaava. (PTC university)

Jossa,

- L = oikaistu pituus,
- R = sisäsäde
- Y = y-kerroin
- T = materiaalin paksuus
- Θ = taivutuskulma asteina

6.2 Creon k- ja y-kerroin

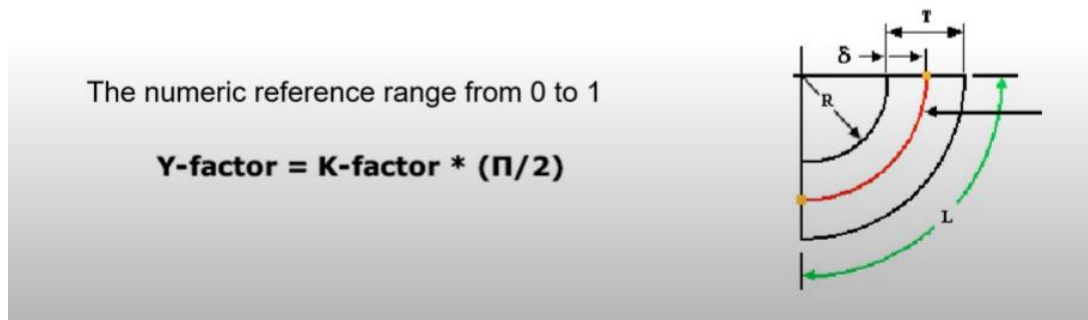
K-kerroin on suhde taivutuksen sisäsäteeseen, neutraaliakselin ja taivutettavan levyn paksuuden välillä esitetty kuvassa 19. Kuvasta näkee, että k-kertoimessa β on etäisyys sisätaivutussäteeseen ja neutraaliakselin välillä. Näin ollen k-kertoimen arvon ollessa nolla tarkoittaisi, että neutraaliakseli on sisimmällä reunalla taivutuksessa ja arvon ollessa yksi se tarkoittaisi, että neutraaliakseli on uloimmalla pinnalla taivutuksessa.



Kuva 19. K-kerroin (PTC university)

Jossa, R = säde
 β = matka taivutuksen neutraaliakselin ja sisäsäteen välillä
 T = levyn paksuus
 L = taivutuksen matka

Y-kerroin taas on numeerinen arvo, joka on määritetty levyn materiaalin taivutuslinjan mukaan nähden materiaalin paksuuteen. Kuvassa 20. esitetty y-kertoimen kaava.



Kuva 20. Y-kertoimen kaava (PTC university)

Jossa, R = säde
 β = matka taivutuksen neutraaliakselin ja sisäsäteen välillä
 T = levyn paksuus
 L = taivutuksen matka

Kuvassa 21. on esitetty k- ja y-kertoimien arvot, joita Creo parametric käyttää vakio arvoina eri materiaaleille.

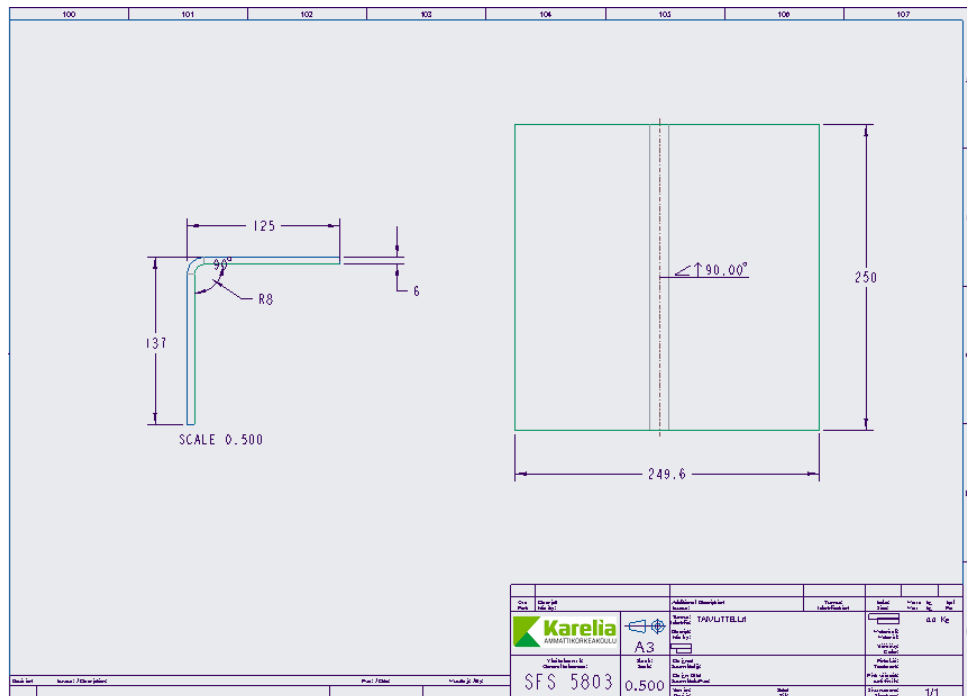
Material	Y-factor	K-factor
soft brass, copper	0.55	0.35
hard brass, copper, soft steel, aluminum	0.64	0.41
hard copper, bronze, cold rolled steel, spring steel	0.71	0.45

Kuva 21. k- ja y-arvoja erimateriaaleille. (ptc.com)

Molemmat arvot kasvavat, mitä kovempi taivutettava materiaali on kyseessä. Näin ollen kovemmillä materiaaleilla on suurempi oikaistupituus kuin pehmeäm-
millä materiaaleilla.

6.3 Käsin laskennan ja Creon vertailu

Tässä osiossa esitellään käsin laskennan ja Creo parametric -ohjelman eroavaisuudet edellisissä kappaleissa esitettyjen kaavojen avulla. Käsin laskennan ja Creon laskennassa on eroavaisuuksia, ja Creo käyttää vakiokertoimenaan las-
kuissa kerrointa y ja sillä arvoa 0.50. Kuvassa 22. on piirustus Creo paramet-
ricissa suunnitellusta kappaleesta. Kaikissa mitoituksissa pätee toleranssi stan-
dardin SFS 5803 m-luokka.



kuva 22. Taivutettavan kappaleen piirustus Creo parametricissa.

Oikaistun pituuden määrittämiseksi käytetään aiemmin mainittuja kaavoja 1, 2, 3 ja 4.

Lasketaan k-kerroin kaavalla (4)

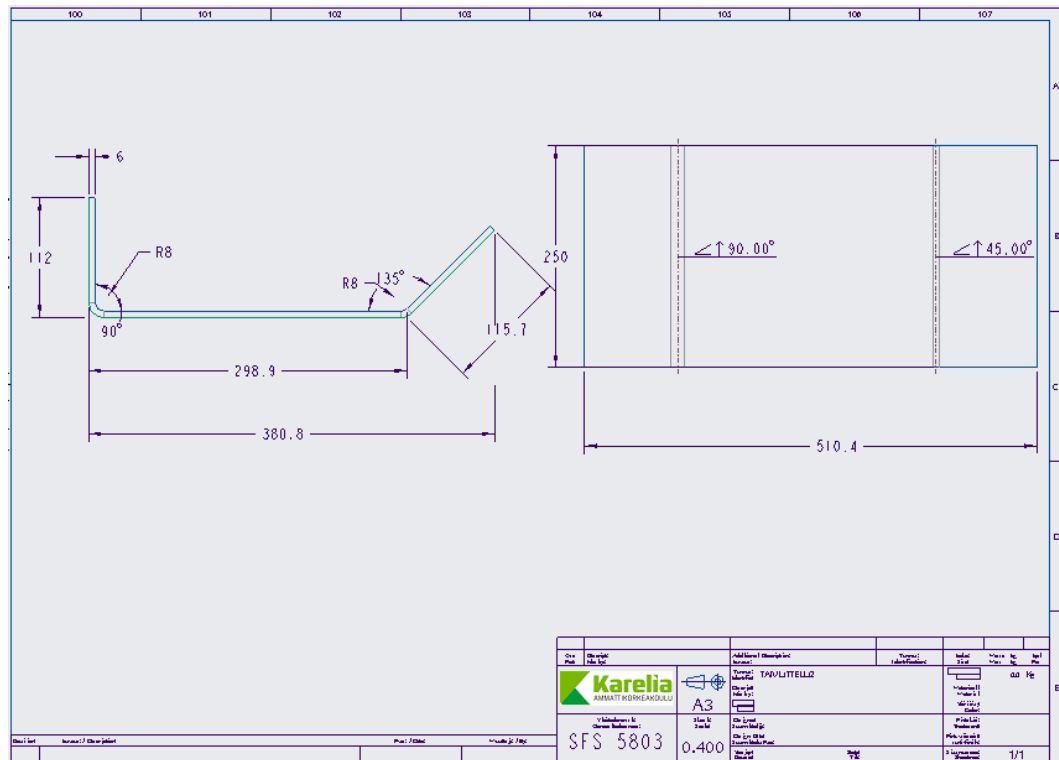
$$0,65 + 0,5 \cdot \log_{10} \frac{8}{6} = 0.71$$

Lasketaan korjaava tekijä v kaavalla (2)

$$v1 = \pi \cdot \left(\frac{180-90}{180} \right) \cdot \left(8 + \frac{6}{2} \times 0.71 \right) - 2 \cdot (8 + 6) = -12.09$$

Sijoitetaan pituudet ja korjaavan tekijä v arvo oikaistun pituuden kaavaan (1)

$$L = 137 + 125 - 12.09 \approx 250 \text{ mm}$$



kuva 23. Taivutettava kappale 2 piirustus Creo parametricissa.

Lasketaan korjaava tekijä v1 kaavalla (2)

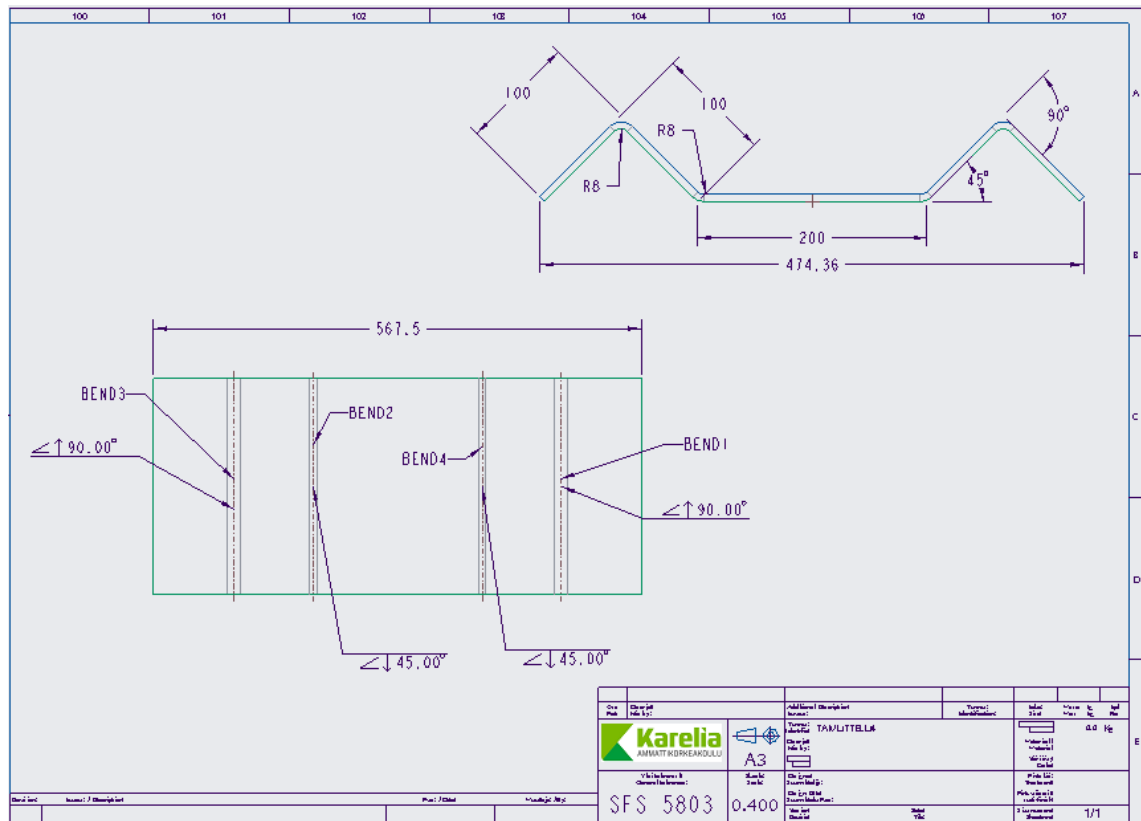
$$v = \pi \cdot \left(\frac{180-90}{180} \right) \cdot \left(8 + \frac{6}{2} \cdot 0.71 \right) - 2 \cdot (8+6) = -12.09$$

Lasketaan korjaava tekijä v2 kaavalla (3)

$$v_2 = \pi \left(\frac{180-135}{180} \right) \cdot \left(8 + \frac{6}{2} \cdot 0.71 \right) - 2 \cdot (8 + 6) \cdot \tan \frac{180-135}{2} = -3.64$$

Lasketaan oikaistupituus kaavalla (1)

$$112+298.9+115.7-12.09-3.64 \approx 511 \text{ mm}$$



Kuva 25. Taivutettava kappale 4 piirustus Creo parametricissa.

Lasketaan korjaava tekijä v1 kaavalla (2)

$$v1 = \pi \cdot \left(\frac{180-90}{180} \right) \cdot \left(8 + \frac{6}{2} \cdot 0.71 \right) - 2 \cdot (8 + 6) = -12.09 \cdot 2 = -24.18$$

Lasketaan korjaava tekijä v2 kaavalla (3)

$$v2 = \pi \cdot \left(\frac{180-135}{180} \right) \cdot \left(8 + \frac{6}{2} \times 0.71 \right) - 2 \cdot (8 + 6) \cdot \tan \frac{180-135}{2} = -3.64 \cdot 2 = -7.28$$

Lasketaan oikaistu pituus kaavalla (1)

$$100+100+200+100+100-24.18-7.28 \approx 569 \text{ mm}$$

7 Mittaukset

Mittauksiin käytettiin leican absolute tracker at960 laitetta, joka on kuvassa 26.



kuva 26. leican absolute tracker at960. (Hexagon AB)

johon oli yhdistettynä leican t-scan 5 käsikäyttöinen skanneri (kuva 27). Mittauksien jälkeen kappaleita tarkasteltiin polyworks ohjelmassa, johon skannatut kappaleet siirtyvät ja niitä saadaan verrattua Creolla parametricilla suunniteltuihin 3D-malleihin. Kyseiselle leican T-scan 5 luvattu mittatarkkuus on pituudessa ± 0.0010 , säteessä ± 0.0006 ja pinnoilla ± 0.0031 . (Hexagob AB 2021)



kuva 27. leican t-scan 5 käsiskanneri. (Hexagon AB)

8 Tulokset

S355MC-materiaalissa ei näkynyt silmämääräisesti säröilyä, mutta Strenx 700MC plus-materiaalissa säröily oli pitkittäissuunnassa valssausuuntaan nähden voimakasta, mutta murtumia ei ollut havaittavissa silmämääräisesti. Särmäyksellä poikittain tai pitkittäin valssausuuntaan nähden ei ollut mittaheittojen perusteella merkittävää vaikutusta, tosin pitkittäin valssausuuntaan särmätyillä kappaleilla venymä oli suurempaa. Särmäyskulman pienentyessä mittaheitto oli myös suurempi kuin väljemmillä kulmilla. Sisäsäde on Strenx 700MC plus-materiaalilla taivutuksissa aina pienempi ja materiaali myös venyy vähemmän taivutuksissa verrattuna S355MC-materiaaliin.

Mittaheittoihin vaikuttaa myös monen muun asian summa esim. käytettävät terät, niiden kunto, särmäyskoneen oma mittaheitto, sekä särmäys edellisestä kantista vastaamalla vaikutti aiheuttavan aina paljon mittaheittoa. Sisäsädetä mitattaessa kyseisellä menetelmällä se on kovin hankalaa johtuen pienestä yläterän säteestä ja aina tapahtuvasta tyssäntymisestä, joka jättää kappaleeseen terävänkohdan.

Tuloksia voidaan tosin pitää suuntaa antavina, sillä tehtyjen kappaleiden määrä oli niin pieni, että satunnaisvirheellä voi olla vaikutusta tuloksiin. Alla olevissa taulukoissa yksi-neljä on kappaleiden suunnitellut mitat ja toteutuneet tulokset keskiarvoina sekä niiden keskihajonta molemmille materiaaleille. mitattuihin tuloksiin pätevät standardin SFS 5803 toleranssit.

kappale 1	suunniteltu	toteutunut S355MC	keskihajonta S355MC	toteutunut Strenx 700MC plus	keskihajonta Strenx 700MC plus
kulma	90,000 0.42°±	89,815	0,373	89,752	0,190
pituus 1	125,000 1±	125,270	0,247	124,740	0,401
pituus 2	137,000 1±	136,070	0,119	136,070	0,252
sisäsäde	16,000 1,5±	14,814	0,616	12,758	0,101

Taulukko 1. Toteutuneet tulokset taivutus kappaleelle 1.

kappale 2	suunniteltu	toteutunut S355MC	keskiha- jonta S355MC	toteutunut Strenx 700MC plus	keskiha- jonta Strenx 700MC plus
kulma 1	135,000 0.42°±	133,987	0,141	135,530	0,820
kulma 2	90,000 0.42°±	89,294	0,141	89,740	0,350
pituus 1	112,000 1±	111,347	0,141	110,910	0,220
pituus 2	115,700 1±	115,356	0,212	115,120	0,060
pituus 3	299,000 1,2±	297,847	0,212	297,840	0,080
sisäsäde 1	16,000 1,5±	27,492	0,141	21,486	0,710
sisäsäde 2	16,000 1,5±	15,341	0,141	12,735	0,870

Taulukko 2. Toteutuneet tulokset taivutus kappaleelle 2.

kappale 3	suunniteltu	toteutunut S355MC	keskiha- jonta S355MC	toteutunut Strenx 700MC plus	keskiha- jonta Strenx 700MC plus
kulma1	90,000 0.42°±	90,428	0,663	90,426	0,332
kulma 2	90,000 0.42°±	90,09	0,491	90,522	0,237
pituus	294 1,2±	292,158	0,597	290,850	0,85
sisäsäde 1	1,2±	14,336	0,523	9,259	1,297
sisäsäde 2	16,000 1,5±	15,108	1,112	9,751	0,316

Taulukko 3. Toteutuneet tulokset taivutus kappaleelle 3.

kappale 4	suunniteltu	toteutunut S355MC	keskiha- jonta S355MC	toteutunut Strenx 700MC plus	keskiha- jonta Strenx 700MC plus
kulma 1	90,000 0.42°±	88,465	2,460	89,880	0,205
kulma 2	135,000 0.42°±	134,590	0,110	135,585	0,303
kulma 3	135,000 0.42°±	135,150	0,540	135,291	0,566
kulma 4	90,000 0.42°±	90,006	0,500	89,764	0,275
sisäsäde1	16,000 1,5±	15,162	0,033	12,091	0,357
sisäsäde 2	16,000 1,5±	14,796	0,849	12,456	0,227
sisäsäde 3	16,000 1,5±	26,290	0,624	21,710	1,032
sisäsäde 4	16,000 1,5±	25,725	1,331	21,939	0,917
pituus 1	100,000 1±	99,506	0,251	98,787	0,263
pituus 2	100,000 1±	100,570	0,430	99,500	0,188
pituus 3	100,000 1±	99,470	0,356	98,961	0,289
pituus 4	100,000 1±	100,29	0,192	99,086	0,643

pituus 5	75,000 1±	75,637	0,761	73,920	0,645
pituus 6	474,000 2±	471,860	3,283	469,345	0,299
pituus 7	200,000 1 2±	197,760	0,575	198,043	0,039

Taulukko 4. Toteutuneet tulokset taivutus kappaleelle 4.

9 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli särmäyksen tarkkuuden hallinta suunnittelusta valmistukseen. Mielestäni opinnäytetyössä päästiin pintaraapaisun tasolla tarkastelemaan suunnitellun ja käytännössä toteutetun särmäyskappaleen tarkkuutta. Opinnäytetyön myöhäinen aloittaminen ja itsestä riippumattomat viikkojen viivästykset söivät paljon aikaa, mutta uskon siltikin, että tämä on suuntaa antava pohja lisätutkimuksia varten.

Kaikista kappaleista ei tullut taivutettuina suunnitellun pituisia käsin eikä Creo parametric -ohjelman laskennan mukaan käytetyillä arvoilla. Creo parametric -ohjelman arvoja muuttamalla oikaistupituus muuttuu tosi paljon, joten olisi ollut kiinnostavaa leikata erimittaisia levykappaleita näillä lasketuilla arvoilla ja särmätä ne sekä vertailla miten lähelle ne olisivat osuneet suunniteltua.

Rajoitettu särmäyskoneen ylä- sekä alaterä valikoima rajoitti testien kokeilemista muilla teräyhdistelmillä. Varsinkin eri alaterän kokeileminen olisi ollut iso tekijä, joka vaikuttaa lopputulokseen. Särmäyksien tekeminen eri taivutusjärjestyksessä taivuttamalla uusi taivutus takavasteissa kiinni ilman edellistä taivutusta vaikutti myös särmäyksen mittaheittoon merkittävästi. Särmäysjärjestyksen muuttamisen vaikutus kokonaispituuteen olisi ollut kiinnostava nähdä.

Lähteet

- Bystronic. 2021. Laserleikkausjärjestelmät. <https://www.bystronic.fi/fi/tuotteet/Laserleikkausjaerjestelmaet/> 10.6.2021
- Harsle. 2021. Standard Press Brake Tooling. <https://www.harsle.com/Standard-Press-Brake-Tooling-pd6976244.html> 15.03.2021
- Hexagon AB. 2021 Laser-seurainjärjestelmät. <https://www.hexagonmi.com/fi-fi/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at960> 08.05.2021
- Hexagon AB. 2021. Laser-skannerit <https://www.hexagonmi.com/fi-FI/products/3d-laser-scanners/leica-tscan-5> 08.05.2021
- Lumen verkkolehti. 2016. Ultralujien terästen särmättävyyden tutkimus ASM-tutkimusryhmässä. 25.4.2016 <https://blogi.eoppimispalvelut.fi/lumenlehti/2016/04/25/ultralujien-terasten-sarmattavyyden-tutkimus-arctic-steel-and-mining-asm-tutkimusryhmassa/> 18.3.2021
- Matilainen, J., Parviainen, M., Havas, T., Hiitelä, E & Hultin, S. 2011. Ohutlevytuotteiden suunnittelijan käsikirja Helsinki: Teknologiainfo Tekno
- Pertti, L & Risto, y. 2016. Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. Helsinki: Sanoma Pro
- PTC. 2018. Oikaistun pituuden ymmärtäminen <https://precisionlms.ptc.com/view/course/en/1453260/page/1453277> 23.03.2021
- Suomen Standardisoimisliitto. 2015. Valssatun teräsohutlevyn kylmätaivutus SFS 5998.
- Suomen Standardisoimisliitto. 2015. Meistotekniikka yleistoleranssit. SFS 5803
- SSAB. 2019. SSAB Domex 355MC Data sheet. <https://www.ssab.fi/tuotteet/brandit/ssab-domex/products/ssab-domex-355MC> 22.4.2021
- SSAB. 2017. Strenx 700MC Plus Data sheet. <https://www.ssab.fi/tuotteet/brandit/Strenx/tuotteet/Strenx-700-mc-plus> 22.4.2021

SFS 5803 STANDARDIN TOLERANSSITAUUKOT

Muovaamalla valmistettujen meistätyökappaleiden pituusmittojen sallitut poikkeamat.

Mitat mm

Nimellis- mitta-alue	Toleranssiluokka	Sallitut poikkeamat paksuusalueella				
		≤ 1	> 1 ≤ 3	> 3 ≤ 6	> 6 ≤ 10	> 10
≤ 6	f	± 0,1	± 0,16	± 0,2	± 0,4	± 0,8
	m	± 0,2	± 0,3	± 0,4	± 0,6	± 0,8
	g	± 0,4	± 0,6	± 0,8	± 1,2	± 1,6
	sg	± 1	± 1	± 1,6	± 2	± 3
> 6 ≤ 10	f	± 0,16	± 0,2	± 0,3	± 0,4	± 0,8
	m	± 0,3	± 0,4	± 0,5	± 0,8	± 0,8
	g	± 0,6	± 0,8	± 1,2	± 1,6	± 1,6
	sg	± 1,6	± 2	± 2	± 3,0	± 3,0
> 10 ≤ 25	f	± 0,2	± 0,2	± 0,3	± 0,4	± 0,8
	m	± 0,4	± 0,5	± 0,6	± 0,8	± 1,2
	g	± 0,8	± 1	± 1,2	± 1,6	± 1,8
	sg	± 2	± 2	± 3	± 3	± 4
> 25 ≤ 63	f	± 0,2	± 0,3	± 0,4	± 0,6	± 0,8
	m	± 0,5	± 0,6	± 0,8	± 1	± 1,2
	g	± 1	± 1,2	± 1,6	± 2	± 2,4
	sg	± 2	± 2	± 3	± 4	± 6
> 63 ≤ 160	f	± 0,3	± 0,3	± 0,4	± 0,6	± 0,8
	m	± 0,6	± 0,8	± 1	± 1,2	± 1,6
	g	± 1,2	± 1,6	± 2	± 2,4	± 3,2
	sg	± 3	± 3	± 4	± 6	± 6
> 160 ≤ 400	f	± 0,4	± 0,6	± 0,6	± 0,8	± 1
	m	± 1	± 1,2	± 1,2	± 1,6	± 2
	g	± 2	± 2,4	± 2,4	± 3,2	± 4
	sg	± 3	± 4	± 5	± 6	± 6
> 400 ≤ 1 000	f	± 0,8	± 0,8	± 1	± 1	± 1,6
	m	± 1,6	± 1,6	± 2	± 2	± 3
	g	± 3,2	± 3,2	± 4	± 4	± 6
	sg	± 5	± 5	± 6	± 8	± 8
> 1 000 ≤ 2 500	f	± 1,6	± 1,6	± 1,6	± 2	± 2
	m	± 2,4	± 3	± 3	± 4	± 4
	g	± 5	± 5	± 6	± 8	± 8
	sg	± 8	± 8	± 8	± 8	± 8

Sallitut kulman poikkeamat

Mitat mm

Toleranssiluokka	Sallitut poikkeamat kulmayksiköissä lyhemmän laipan nimellismitta-alueille							
	≤ 6	> 6 ≤ 10	> 10 ≤ 25	> 25 ≤ 63	> 63 ≤ 160	> 160 ≤ 400	> 400 ≤ 1 000	> 1 000 ≤ 2 500
f	± 1°	± 1°	± 30'	± 30'	± 20'	± 10'	± 5'	± 5'
m	± 1°30'	± 1°30'	± 50'	± 50'	± 25'	± 15'	± 10'	± 10'
g, sg	± 3°	± 3°	± 2°	± 2°	± 1°	± 30'	± 20'	± 20'

Kulmat ja niitä vastaavat tangentti arvot

Kulma	Tangenttiarvo		Kulma	Tangenttiarvo		Kulma	Tangenttiarvo
5'	0,001 5		25'	0,007 3		1° 30'	0,026 2
10'	0,002 9		30'	0,008 7		2°	0,034 9
15'	0,004 4		50'	0,014 5		3°	0,052 4
20'	0,005 8		1°	0,017 5			

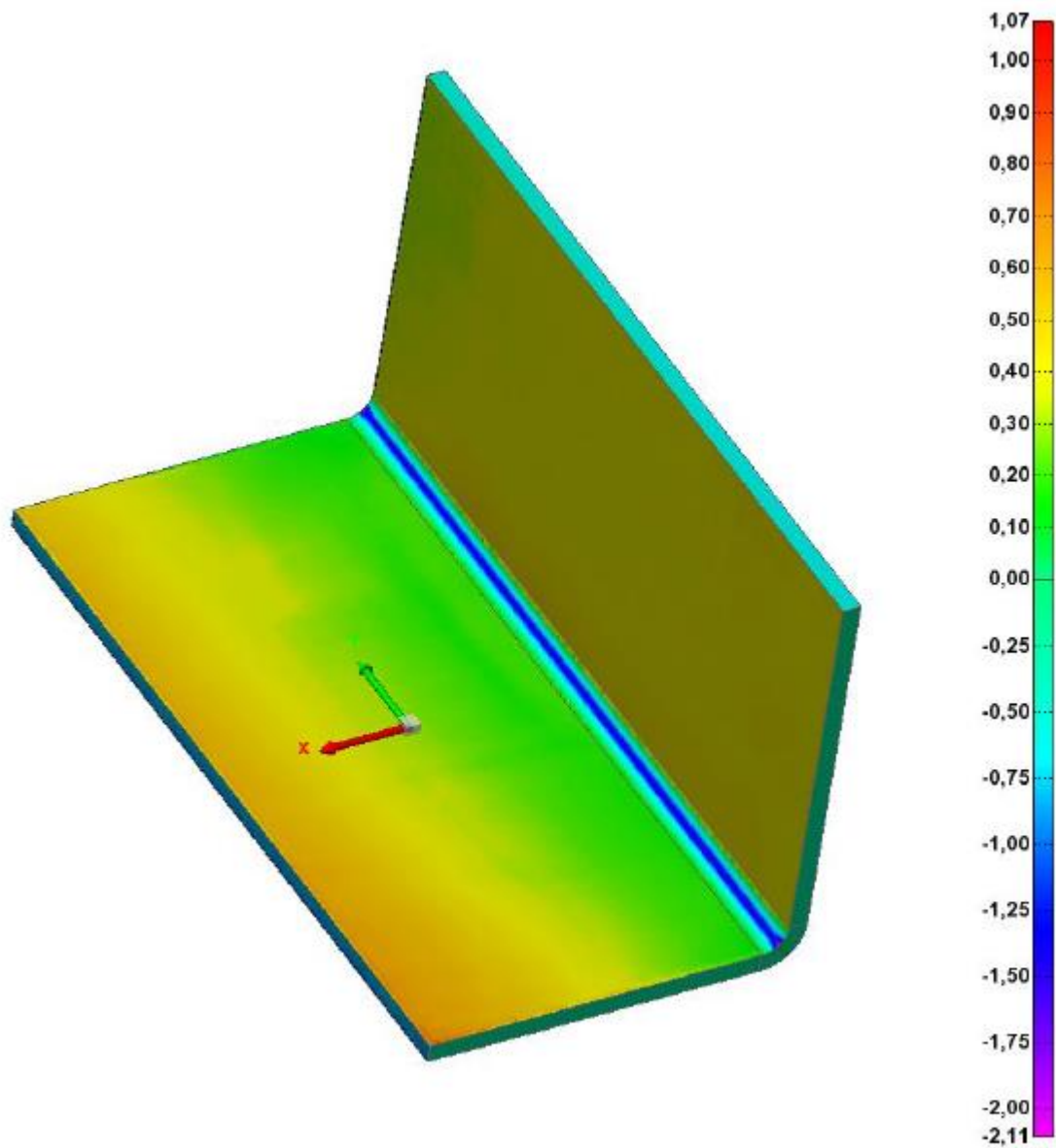
Muovaamalla valmistettujen meistätyökappaleiden pyöristyssäteiden sallitut poikkeamat.

Mitat mm

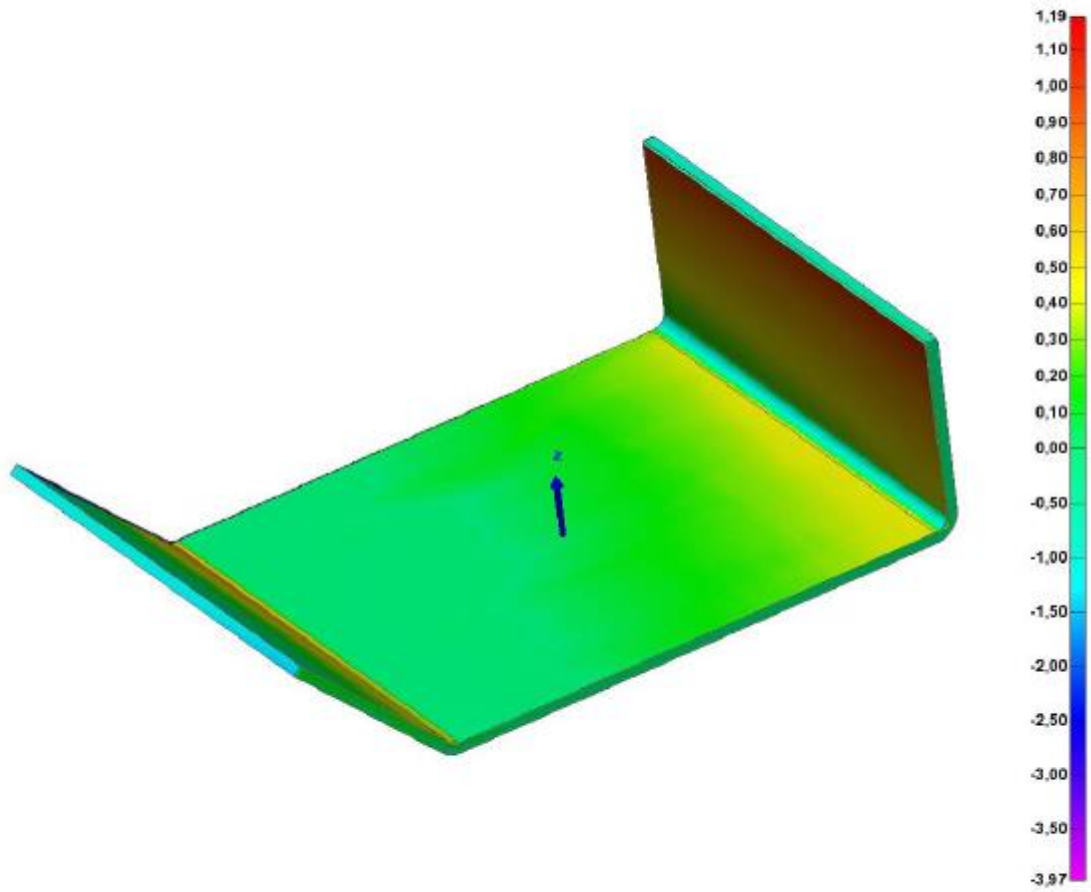
Nimellis- mitta-alue	Toleranssiluokka	Sallitut poikkeamat paksuusalueella				
		≤ 1	> 1 ≤ 3	> 3 ≤ 6	> 6 ≤ 10	> 10
≤ 6	f	± 0,2	± 0,3	± 0,6	–	–
	m	± 0,4	± 0,6	–	–	–
	g	± 0,6	–	–	–	–
	sg	–	–	–	–	–
> 6 ≤ 10	f	± 0,4	± 0,6	± 0,8	± 1	–
	m	± 0,6	± 1	± 1,2	± 1,5	–
	g	± 1,2	± 2	± 2,5	–	–
	sg	± 1,6	± 2	± 2,5	–	–
> 10 ≤ 25	f	± 0,6	± 0,8	± 1	± 1,2	± 1,5
	m	± 1	± 1,2	± 1,5	± 2	± 2,5
	g	± 2	± 2,5	± 4	–	–
	sg	± 2,5	± 4	± 4	–	–
> 25 ≤ 63	f	± 0,8	± 1	± 1,2	± 1,5	± 2
	m	± 1,2	± 1,5	± 2	± 2,5	± 4
	g	± 2,5	± 4	± 6	–	–
	sg	± 1	± 1	± 1,5	–	–
> 63 ≤ 160	f	± 1	± 1,2	± 1,5	± 2	± 2,5
	m	± 1,5	± 2	± 2,5	± 4	± 6
	g	± 4	± 6	± 10	± 15	± 25
	sg	± 6	± 10	± 10	± 15	± 25
> 160 ≤ 400	f	± 1,2	± 1,5	± 2	± 2,5	± 3
	m	± 2	± 2,5	± 4	± 6	± 10
	g	± 6	± 10	± 15	± 25	± 40
	sg	± 10	± 15	± 15	± 25	± 40
> 400 ≤ 1 000	f	± 1,6	± 2	± 2,5	± 3	± 4
	m	± 2,5	± 4	± 6	± 10	± 15
	g	± 10	± 15	± 25	± 40	± 60
	sg	± 15	± 25	± 25	± 40	± 60

**Taivutettavien kappaleiden kuvat taivutusvoima värikartalla polyworks
2020 ohjelmassa.**

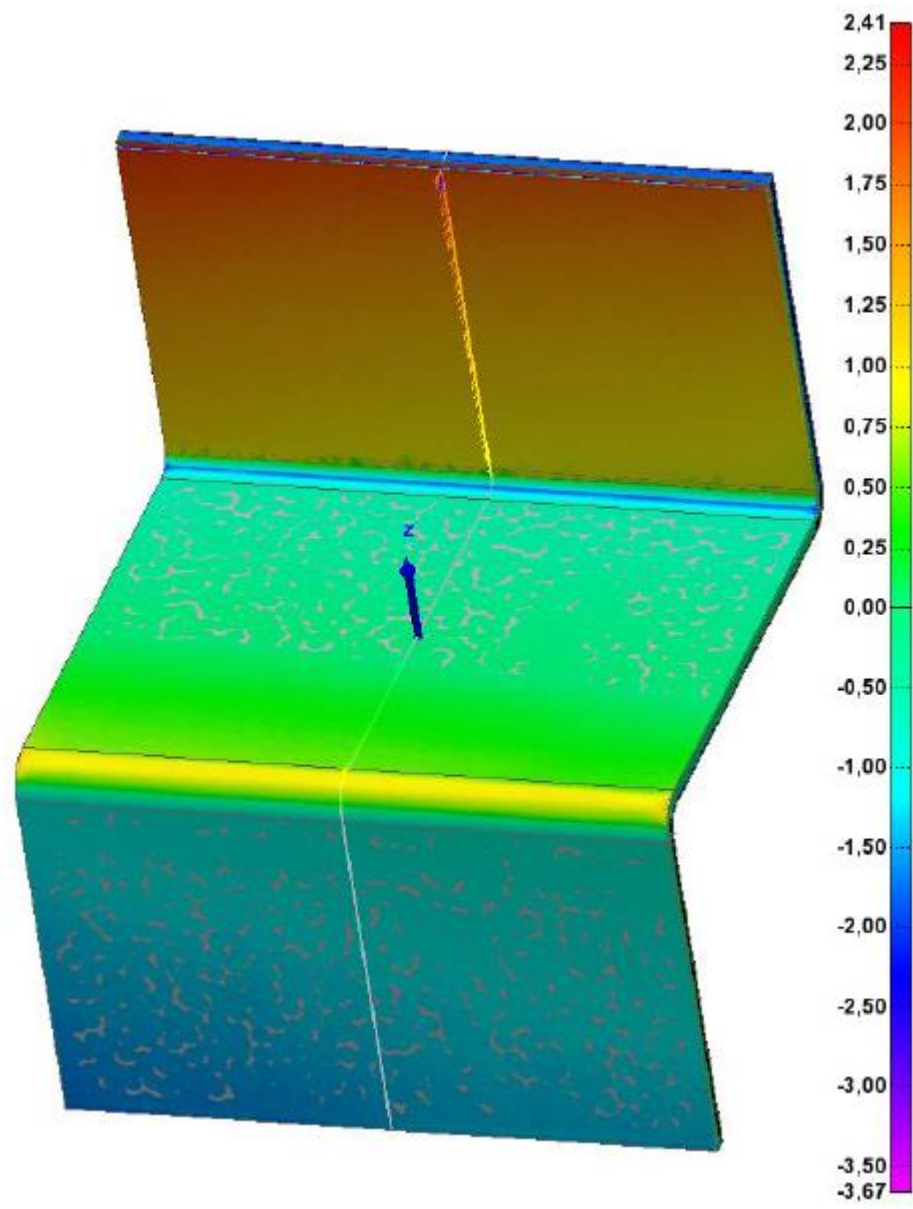
Taivutettava kappale 1



Taivutettava kappale 2



Taivutettava kappale 3



Taivutettava kappale 4

