

Putkien ja ohutlevyjien muovaus hydromuovauskoneella

Veli-Matti Pelimanni

Tekniikka
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinööri (AMK)

KEMI 2014

ALKUSANAT

Tämä dokumentti on tehty Lapin ammattikorkeakoulun kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelman opinnäytetyönä keväällä 2014. Opinnäytetyö on laadittu Lapin AMKn TKI-yksikön resursseihin kuuluvan jaloterässtudion muovausosaamiseen perustuen. Työn tarkoituksena on ollut tuottaa dokumentti hydromuovauskoneen käytöstä metallinmuokkauskoneena.

Kiitän työn ohjauksesta esimiestäni TkL Timo Kauppia. Työni taustalla on ollut kuitenkin useita henkilöitä ja organisaatioita. Erityiset kiitokset ansaitsevat jaloterässtudion asiakkaat ja yhteistyökumppanit, joita ilman ei tämän työn tekeminen olisi ollut mahdollista. Kiitän myös perhettäni kannustuksesta suorittaa opintoni loppuun.

Torniossa 15.5.2014

Veli-Matti Pelimanni

TIIVISTELMÄ

LAPIN AMMATTIKORKEAKOULU, Tekniikka

Koulutusohjelma:	Kone- ja tuotantotekniikka
Opinnäytetyön tekijä:	Veli-Matti Pelimanni
Opinnäytetyön nimi:	Hydromuovauskoneen käyttö putkien ja ohutlevyjen muovauksessa
Sivuja (joista liitesivuja):	114 (14)
Päiväys:	20.5.2014
Opinnäytetyön ohjaaja:	TkL Timo Kauppi
<p>Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana oli Lapin ammattikorkeakoulun resursseihin kuuluva jaloterässtudio. Työn aiheena oli jaloterässtudiolla sijaitsevan hydromuovauskoneen käyttö putkien ja ohutlevyjen muovauksessa. Tarkoituksena oli tutkia hydromuovauskoneella tehtyjä testejä, niiden tuloksia, muovausprosessien vaiheita sekä tuottaa opinnäytetyödokumentti, joka palvelisi jaloterässtudiota metallin muovauksen sovelluksissa hydromuovauskoneella.</p> <p>Hydromuovauksen ja syvävedon teoriaa ja periaatteita käsiteltiin niiden keskeisimmiltä osa-alueilta. Koska opinnäytetyön kohteena on Suomessa harvinainen hydromuovauskone, käsiteltiin työssä myös koneen rakennetta.</p> <p>Lähdemateriaaleina käytettiin vuosien 2008 - 2014 aikana kertynyttä kokemukseräistä tietoa, dokumentteja ja muovausteknologian teoksia sekä tutkimusaineistoja. Putken hydromuovauksesta esiteltiin testatun tuplakaksoiskartioputken valmistusta ja teknologiaparametrien määrittelyä. Levyn muovauksesta käsiteltiin levyaihion hydromuovauksen periaatteet ja levyn muovausta nykyisellä koneen ohjausjärjestelmällä. Levyn muovauksesta esiteltiin myös kahden esimerkkitapauksen käytännön toteutus työkalusuunnittelusta valmistukseen.</p> <p>Työn tuloksena syntyi opinnäytetyöraportti, joka palvelee jaloterässtudion asiantuntijoita ja operaattoreita metallin muovauksessa ja hydromuovauskoneen käytössä. Työtä voidaan käyttää myös hydromuovauskoneen kehittämisen työkaluna erilaisiin metallin muokkaamista vaativiin valmistusprosesseihin ja tutkimustöihin.</p>	
Asiasanat: muovaus, muotit, mallit, ruostumaton teräs, prosessit.	

ABSTRACT

LAPLAND UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, Technology

Degree programme:	Mechanical and Production Engineering
Author:	Veli-Matti Pelimanni
Thesis title:	Hydroforming Machine in the Applications of Sheet Metal and Tubular Products
Pages (of which appendixes):	114 (14)
Date:	20 May 2014
Thesis instructor:	Lic.Sc. (Tech.) Timo Kauppi
<p>The commissioner of this thesis was Special Steel Studio which is part of Lapland University of Applied Sciences. The central theme of the thesis was the applications of tubular and sheet metal products made by a hydroforming machine. The objective was to study the tests and their results, the phases of forming and to produce the document that benefits the staff of Special Steel Studio in the applications of forming by the hydroforming machine.</p> <p>At the beginning of the thesis the theories and principles of deep drawing and hydroforming were dealt with. Because the hydroforming machine is a very unusual device in Finland, the structure of the machine is described as well.</p> <p>Over the years 2008 - 2014, many documents of and much experience on forming technology have accumulated and they were utilized in this thesis. Literature and research materials of forming technology were also utilized. The forming of tubular products is described by an example of manufacturing a double conical part and its technological parameters. The principle of sheet metal hydroforming process and sheet metal hydroforming with the present control system of the hydroforming machine was also described. Two examples of sheet metal forming including work tool planning and manufacturing are introduced in this thesis.</p> <p>The product of this thesis was the document that will serve the purpose of operating and developing the hydroforming machine for different kind of metal forming processes and research work.</p>	
<p>Keywords: forming, moulds, models, stainless steel, processes.</p>	

SISÄLLYS

ALKUSANAT.....	2
TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET	7
1 JOHDANTO.....	8
1.1 Jaloterästudio.....	8
1.2 Työn tausta ja tavoitteet	9
2 SYVÄVETO.....	11
2.1 Syvävedon määritelmä.....	11
2.2 Syvävedon periaate	12
2.3 Aihion mitoitus.....	14
2.4 Vetosuhde.....	14
2.5 Syvävedon muut parametrit	17
2.6 Syvävedon virheellisten prosessiparametri en seuraukset	19
3 HYDROMUOVAUS	21
3.1 Nestemuovausprosessit ja niiden luokittelu	21
3.2 Putken hydromuovauksen periaate	22
3.3 Putken hydromuovaukseen vaikuttavat tekijät.....	23
3.4 Työkappaleen pituuden arviointi	25
3.5 Putken hydromuovauksen prosessiparametrit	25
3.5.1 Putken hydrostaaattinen sisäpaine	26
3.5.2 Aksiaalisylinterien voima	27
3.5.3 Muotin sulkuvoima.....	28
3.6 Levyaihion hydromuovauksen periaate	28
3.7 Hydromuovauksen edut	30
3.8 Hydromuovauksen varjopuolet	31
3.9 Hydromuovauksen sovellusalueita	32
4 OLI-24-SUURPAINEMUOVAUSPURISTIN	34
4.1 Hydromuovauskoneen rakenne	34
4.2 Puristimen hydraulikka	35
5 KARTIOPUTKEN HYDROMUOVAUS.....	40
5.1 Hydromuovaamalla valmistettava kartioputki	40

5.2	Vaihtoehtoinen työkalu	41
5.3	OLG-53 -työkalu	42
5.4	Kartioputken muovauksen tärkeimmät parametrit	43
5.4.1	Materiaalitulavuuksien tasapaino	44
5.4.2	Muotin sulkuvoima.....	49
5.4.3	Muovauspaine putken sisällä	50
5.4.4	Aksiaalisylinterien voima	52
5.5	Muovauksessa käytetty putkiaihio.....	52
5.6	Kartion valmistuksen työprosessi.....	53
5.7	Muovaustietojen kerääminen	54
6	LEVYAIHION HYDROMUOVAUS OLI-24 KONEELLA	56
6.1	Nykyisen ohjausjärjestelmän käyttö levyaihion muovauksessa.....	56
6.2	Pullistustesti	60
6.3	Laitteiston kehittäminen toimivammaksi levyn hydromuovauksessa	62
7	AUTON APURUNGON MUOVAUS (PROTOTYYPPI).....	64
7.1	Muovattavat kappaleet	64
7.2	Materiaali	65
7.3	Työkalun suunnittelu	66
7.4	Työkalun valmistus.....	68
7.5	Työkalun asennus	69
7.6	Aihion suunnittelu	70
7.7	Muovausprosessi	71
8	Y-PROFIILISEN PAKOSARJAN MUOVAUS (PROTOTYYPPI).....	75
8.1	Materiaali	75
8.2	Muovauksen esivalmistelut	76
8.3	Työkalun suunnittelu	77
8.4	Työkalujen valmistus	79
8.5	Aihion suunnittelu	80
8.6	Muovausprosessi	81
8.7	Kokoonpano	84
9	KOKOELMA TESTATUISTA JA VALMISTETUISTA TUOTTEISTA.....	86
10	POHDINTA.....	94
	LÄHTEET	97
	LIITTEET.....	99

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

DIN	Deutsches Institut Fur Normung (German National Standard)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure (Association of German Engineers)
Rp0.2	metallin 1. myötöraja, plastiseen muodonmuutokseen perustuva venymisraja 0,2 %:n kohdalla jännitys-venymä käyrässä [MPa]
Rm	metallin murtoraja [MPa]
A50	metallin murtovenymä [%]
ANSYS	Analysis System, elementtimenetelmään (FEM = Finite Element Method) perustuva rakenteiden simulointiin tarkoitettu ohjelma.

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Lapin ammattikorkeakoulun TKI:n (tutkimus- kehitys- ja innovaatiotoiminta) materiaalin käytettävyyden tutkimusryhmän resursseihin kuuluvalla jaloterästudiolle. Työssä tutkitaan jaloterässtudiolla sijaitsevan hydromuovauskoneen käyttöä monipuolisena metallisten putkien ja levyaihioiden muovauskoneena.

Syväveto ja hydromuovaus kuuluvat jaloterässtudion erikoisosaamisalueeseen. Työn alussa käsitelläänkin näitä teknologioita teoreettisesti. Koska työn kohteena oleva suurpainemuovauskone on useimmille tuntematon ja harvinainen laite, esitellään tässä työssä myös koneen rakennetta yleisellä tasolla. Tämän jälkeen edetään selvittämään koneella tehtyjä muovaustestejä kuten myös prototuotteiden valmistusta, joista tuleekin muodostumaan tämän opinnäytetyön lopullinen tavoite eli koneella tehtyjen muovausprosessien dokumentointi. Koska koneen käytöstä on runsaasti muovauksen esimerkkitapauksia, on työssä otettu huomioon opinnäytetyön laajuutta koskevat näkökohdat ja valittu käsiteltäväksi jaloterässtudion kannalta merkittävimmät työt.

1.1 Jaloterästudio

Jaloterässtudion ”synnytys” käynnistyi 1.4.2003 Länsi-Lapin ammatti-instituutilla jaloterästuotteiden tuotantostudio-projektilla, jonka yhtenä osana oli EAKR-projekti ”Jaloterästuotteiden tuotantostudion prototehdas”. Prototehtaan alkuperäinen ajatus oli olla ruostumattoman teräksen jatkojalostuksen osaamisen edelläkävijä. Jaloterästudio liitettiin Raahen Seudun Teknologiakeskuksen hallinnoiman metallialan osaamiskeskus ProMetallin liitännäisjäseneksi, johon kuuluvat myös Raahen osaamiskeskus (Steelpolis) ja Nivalan tuotantostudio (ELME-Studio). Nelivuotinen projekti päättyi vuonna 2007. Studion omistajaksi ja toimijaksi tuli Länsi-Lapin koulutuskuntayhtymä ja myöhemmin koulutuskuntayhtymä Lappia. Toiminta perustui aluksi ruostumattoman teräksen tutkimus-, tuotekehitys- ja alihankintatyöhön, jossa pääpaino oli olemassa olevien hankkeiden eteenpäinvieminen. (Hyväri 2010, 13.)

Prototehtaaseen hankittiin projektin aikana (2003 - 2007) ruostumattoman teräksen leikkaukseen, muovaukseen, liittämiseen ja pinnan viimeistelyyn soveltuvaa teknologiaa, kuten Trumpf TruLaser Robot 5020 -robotityöasema, joka mahdollistaa 3D leikka-

uksen ja hybridihitsauksen, tandem mig/mag –laitteisto, tasolaser, levyleikkuri, 130 tonnin särmäysasema, suurnopeusmuovauslaite (sähkö- ja magneetti-impulssi-muovaus) ja vierintämuovauslaite VTT:n Lappeenrannan yksiköstä. Lisäksi prototehtaaseen sijoitettiin VTT:n hankkima ja omistama 5000 baarin suurpainemuovauslaite (hydromuovauskone). (Ruoppa 2006, 4.)

1.1.2010 jaloterässtudio yhdistettiin Kemi-Tornion AMKn (1.1.2014 alkaen Lapin AMK) materiaalin käytettävyyden tutkimusryhmän toimintaan, jossa jaloterässtudio toimii teknologisten kokeiden tekemisen sekä tuotteiden protovalmistuksen resurssina. Laitekantaa on uusittu hankkimalla ”vanhahkon” laseryksikön tilalle nykyaikainen muovaavilla työkaluilla ja laserilla varustettu levytyökeskus. Muovauslaitteistoa on päivitetty vastaamaan tehokkaampaa tuotantoa hankkimalla syvävetoon soveltuva 150 tonnin puristin hydromuovauskoneen rinnalle. Studion laitekanta palveleekin nykyisin erityisesti muovattavuuden ja liitettävyyden tutkimista sekä niihin liittyvää palvelutoimintaa.

1.2 Työn tausta ja tavoitteet

Työn tausta on vuosien 2008 - 2014 aikana jaloterässtudiolla sijaitsevalla suurpainemuovauslaitteella tehdyt erilaiset muovaustestit ja muovausteknologialla valmistetut prototuotteet. Tuona aikana on testattu mm. kaksoiskartioputken valmistamista hydromuovaamalla suorasta ruostumattomasta teräksestä valmistetusta putkiaihiosta, polttoainetankin ja levykannen valmistusta alumiinista ja ruostumattomasta teräksestä sekä erilaisten auton korin osien valmistusta alumiinista. Hydromuovauskonetta on käytetty myös suurta puristusvoimaa vaativien monimutkaisten muovattavien protokappaleiden kuten laajan ja lujan auton apurungon ja massiivisen pakosarjan valmistamiseen ruostumattomasta teräslevyaihiosta kiinteällä painimella ja muotilla. Lisäksi konetta on kehitetty ultralujien terästen särmäysteihin.

Työn kohteena oleva hydromuovauskone on erittäin harvinainen laitteisto Suomessa. Sen koko ja tekniset ominaisuudet herättävät kansainvälisestikin varsin paljon huomiota. Puristimen muottipöydän mitat ovat 1600 mm x 1200 mm ja pääsylinterin sulkuvoima 30 000 kN. Pääsylinterin massiivinen voima mahdollistaa lujien ja laakeidenkin kappaleiden muottiin painamisen ja 500 MPa:n (max) muovauspaine yhdessä pääsylin-

terin sulkuvoiman kanssa myös lujien monimutkaisten kappaleiden valmistamisen hydromuovaamalla. Kone on hankittu VTT:n rahoittamana jaloterästuotteiden tuotantostudio -projektin yhteydessä vuonna 2004 venäläiseltä laitevalmistajalta JSC VNITI.

Koska jaloterässtudiolla oleva hydromuovauskone on suunniteltu pelkästään putkiaihioiden hydromuovaukseen, on koneen monipuolisemmasta käytöstä esimerkiksi levykappaleiden hydromuovauksessa, syvävedossa ja särmäyksessä vain ns. hiljaista tietoa. Tämä on luonut tarpeen tutkimukselle, jossa selvitetään koneella jo tehtyjä tutkimustöitä ja protovalmistusta.

Tämän opinnäytetyön päätavoitteena oli tuottaa dokumentti selvittämällä jo tehtyjen muovausprosessien vaiheita. Projekti aloitettiin tutkimalla vuonna 2010 päättyneen Hydro+ -projektin -aikana tehtyjä dokumentteja kartioputken hydromuovauksesta. Kartioputken muovausprosessissa käydään läpi parametrien teoreettista laskentaa. Tämän jälkeen edetään levyaihion hydromuovaukseen, josta esitetään levyaihion hydromuovauksen prosessi nykyisellä ohjausjärjestelmällä sekä pohditaan ongelma-alueita. Seuraavaksi tarkastellaan laakean lujasta ruostumattomasta teräksestä valmistettavan auton apurungon ja massiivisen protopakosarjan muovaustyöprosessin vaiheita kiinteällä painimella ja muotilla. Työn lopussa esitellään myös lyhyesti muita hydromuovauskoneella valmistettuja tuotteita. Tuloksena syntyi raportti, joka palvelee jaloterässtudion asiantuntijoita ja operaattoreita hydromuovauskoneen käytössä ja kehittämisessä erilaisiin metallin muokkaamista vaativiin valmistusprosesseihin ja tutkimustöihin.

2 SYVÄVETO

2.1 Syvävedon määritelmä

Syvävetoa (Deep Drawing) voidaan pitää yhtenä tärkeimmistä levymäisten kappaleiden muovausmenetelmistä. Sitä käytetään laajasti sarjatuotannossa mm. erilaisten kotelojen valmistuksessa, autoteollisuudessa, keittiövälineteollisuudessa, jne. Standardin DIN 8584 mukaan syväveto on levyjen veto-puristusmuovausta, jossa levy pyritään saamaan haluttuun ontelomaiseen kolmiulotteiseen muotoon (astiamaiseksi, kuppimaiseksi) tai jo syvävedetyn kappaleen poikkileikkauspintaa pyritään pienentämään muuttamatta tarkoituksellisesti seinämävahvuutta. (Siegert & Wagner 1994, 3.)

Syvävetoprosessi suunnitellaan siten, että tarvittava voima levyn muovautumiseksi voidaan tuoda muovattavalle alueelle. Muovaukseen tarvittava voima siirtyy painimen (punch) läpi työkappaleen (workpiece) pohjaan ja edelleen laipan alueelle. Painimen kosketusalueella levyssä tapahtuu rajoitettua deformaatiota, jolla ei kuitenkaan ole yhteyttä muovausalueen (forming zone) materiaalin vähenemiseen. Prosessin rajat (suurin mahdollinen korkeuden suhde halkaisijaan) saavutetaan, kun suurinta mahdollista veto-voimaa ei enää voida siirtää laipan alueelle (tyssäysalueelle). Tästä tilasta voidaan johdattaa syvävedon käyttäytymisominaisuudet, jolloin voidaan tehdä useita peräkkäisiä jatkovetoja ilman välihehkutuksia. (Siegert 1994, 3.)

Taulukossa 1 on esitetty syvävedon määritelmä saksalaisen kansallisen standardin (DIN) Deutsches Institut Fur Normung mukaan.

Taulukko 1. Syvävedon määritelmä (DIN 8584-3, 2003.)

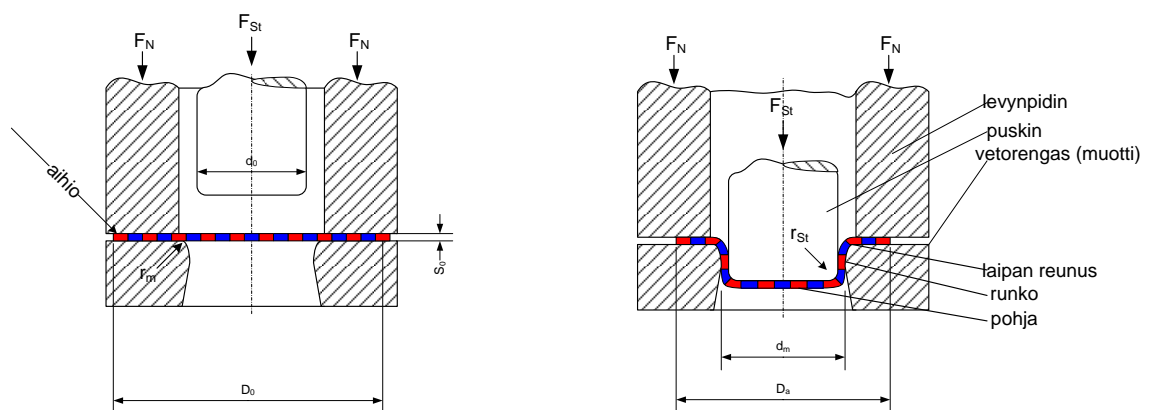
Syvävedon määritelmä (DIN 8584)	
Määritelmä:	Syväveto on vetoon ja puristukseen perustuva levynmuovausmenetelmä, jossa levyaiho muovataan ontelomaiseksi (kuppimaiseksi, astiamaiseksi) (deep drawing in one step) tai jossa ontelomaista kappaletta muovataan edelleen (redrawing).

Standardin DIN 8584 mukaan syväveto luokitellaan syvävetoon työkaluilla, syvävetoon aktiivisella väliaineella ja syvävetoon aktiivisella energialla (DIN 8584-3, 2003.). Syväveto työkaluilla on ns. ”perinteistä” syvävetoa. Aktiivinen väliaine voi olla esimerkiksi

hydromekaanisessa syvävedossa oleva neste, jonka painetta nostetaan. Energiaa käytetään puolestaan esimerkiksi impulssimuovauksessa.

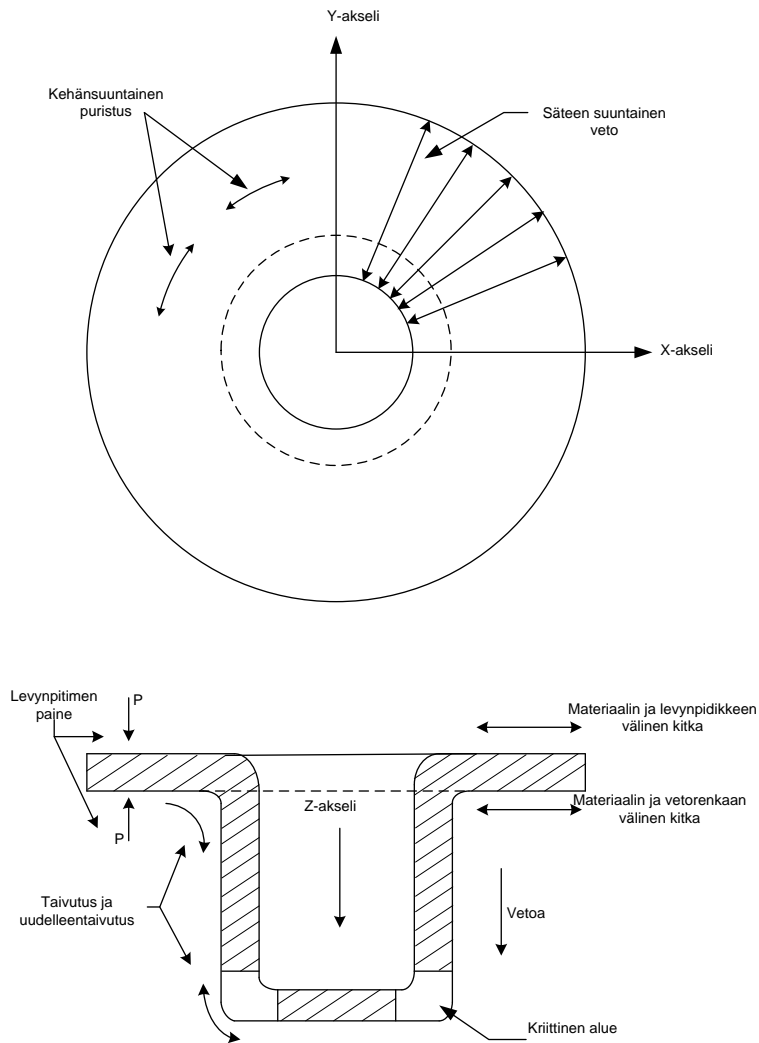
2.2 Syvävedon periaate

Syväveto on hallittavissa oleva muovaustapahtuma ja oikein suoritettuna työkalupaleen materiaalivahvuus pysyy muuttumattomana. Kuviossa 1 on esitetty levynpidikkeen (esim. pidätinrenkas) avulla tehtävän syvävedon periaate. Laipan reunoissa esiintyvä muodonmuutos on seurausta tangentialisesta puristuksesta ja radiaalisesta venymisestä. Veto ja puristus saadaan aikaan painimella, jolla levy vedetään muotin läpi kuppimaiseksi. Levynpitimen tehtävänä on estää levyn laskostuminen muovausprosessissa. Levynpitimen läpi menevä voima on pieni verrattuna radiaaliseen ja tangentialiseen kuormitukseen. Syvävetoprosessin hallittavuuteen vaikuttavat tärkeimmät tekijät ovat levynpitimen puristusvoima (F_N), puskinen työntövoima (F_{St}), puskinen halkaisija (d_0), aihion halkaisija (D_0), vetorengkaan pyöristyssäde (r_m) ja levyaihion materiaalivahvuus (S_0). Kuviossa 1 oleva muuttuja (D_a) on laipan hetkellinen halkaisija muovausprosessin aikana. (Siegert 1994, 5.)



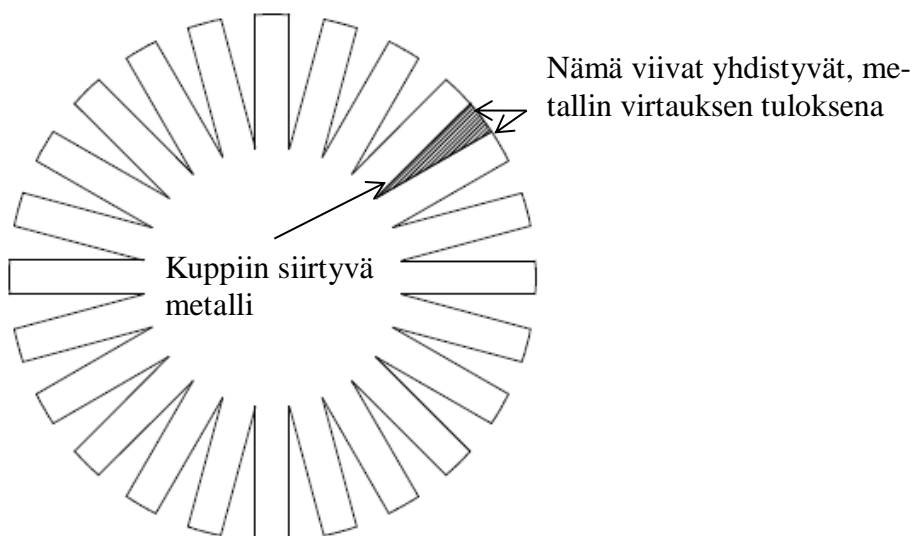
Kuvio 1. Syvävedon periaate ja tärkeimmät parametrit (Siegert 1994, 5.)

Kuviossa 2 on havainnollistettu syvävedon prosessin aikaisia jännitystiloja. Kuvioista nähdään reunoille tuleva säteen suuntainen vetojännitys ja kohtisuoraan säteeseen nähdä tuleva puristusjännitys.



Kuvio 2. Kupin syvävetoprosessissa vaikuttavat voimat (Suchy 2005, 368.)

Kuviossa 3 on havainnollistettu materiaalsegmenttien siirtymistä syvävetoprosessissa. Materiaali siirtyy tyypillisesti laipasta vedettävään kuppiin.



Kuvio 3. Metallin siirtyminen syvävedossa (Suchy 2005, 368.)

2.3 Aihion mitoitus

Aihion mitoituksella on tärkeä rooli muovauksen onnistumiselle. Pyörähdysymmetrisissä kappaleissa aihion halkaisijan arviointiin on runsaasti laskentakaavoja riippuen valmistettavan kappaleen muodosta. Mikäli on tarpeellista, laskennallista tulosta tarkennetaan kokeilemalla. Liitteessä 1 (liite 1) on koottu Schulerin käsikirjan (Metal Forming Handbook 1998) mukaan 27 erimuotoisen pyörähdysymmetristen kappaleen aihion halkaisijoiden laskentakaavat.

Nelikulmaisten kuppien aihion kokoa ei voida määrittellä yhtä tarkasti kuin pyörähdysymmetrisillä kappaleilla. Laskenta perustuu nelikulmaisen kappaleen suorien sivujen levittämiseen pohjan tasoon. Laskemalla saadaan likiarvoja, jonka jälkeen aihion kokoa tarkennetaan kokeilemalla. Liitteessä 2 (Liite 2) on esitetty laskentamalli nelikulmaisen kappaleen aihiolle. (Honka 2000, 14.)

Epäsäännöllisten kappaleiden aihiot mitoitetaan kokeilemalla (Honka 2000, 15.). Muovausta voidaan simuloida simulointiohjelmilla. Simulointiin tarkoitetut ohjelmat ovat usein kalliita, samoin kun niitä tarjoavat palvelut. Käytännössä ahiomallit ja mitat arvioidaan likimääräisesti ja tulosta parannellaan testien jälkeen.

2.4 Vetosuhde

Vetosuhde on tärkeä numeerinen lukuarvo syvävedossa, varsinkin määritettäessä jatkovetojen tarpeellisuutta. Vetosuhde on aihion halkaisijan suhde painimen halkaisijaan. Materiaalin vetosuhde määrää kupin suurimman mahdollisen syvyyden ja suurimman mahdollisen halkaisijan. (Metal Forming Handbook 1998, 167.)

Vetosuhde β pyörähdysymmetrisillä kappaleilla saadaan kaavasta 1. Kaava on voimassa silloin, kun tarvitaan vain yksi veto:

$$\beta = \frac{D}{d} \tag{1}$$

missä

D on aihion halkaisija

d on painimen halkaisija

Esim.

Painimen halkaisija on 216 mm ja käytettävän levyaihion halkaisija on 350 mm. Vetosuhteeksi saadaan tällöin:

$$\beta = \frac{350 \text{ mm}}{216 \text{ mm}} = 1,62$$

Maksimi vetosuhte (rajavetosuhde) riippuu käytettävän materiaalin ominaisuuksista. Yleinen karkea arvio on, että ensimmäisen vedon vetosuhte ei saisi ruostumattomilla teräksillä olla suurempi kuin 2. Mikäli näin on, tarvitaan jatkovetoja halutun lopputuloksen saamiseksi. Jatkovetoja tehtäessä on myös huomioitava materiaalin muokkauslujittuminen ensimmäisen vedon yhteydessä. Jatkovedoissa vetosuhteen pitäisi olla karkeasti arvioiden alle 1,3. Mikäli materiaalille tehdään välihehkutus ennen jatkovetoa, voidaan β :n arvoksi asettaa 1,7. (Metal Forming Handbook 1998, 167.)

$$\beta_1 = \frac{D}{d_1} \text{ (ensimmäinen veto)} \quad (2)$$

missä

D on aihion halkaisija

d_1 on painimen halkaisija ensimmäisessä vedossa

β_1 on ensimmäisen vedon vetosuhte

$$\beta_2 = \frac{d_1}{d_2} \text{ (jatkoveto)} \quad (3)$$

missä

d_1 on aihion halkaisija jatkovedossa

d_2 on painimen halkaisija jatkovedossa

β_2 on toisen vedon vetosuhte

$$\beta_3 = \frac{d_2}{d_3} \text{ (toinen jatkoveto)} \quad (4)$$

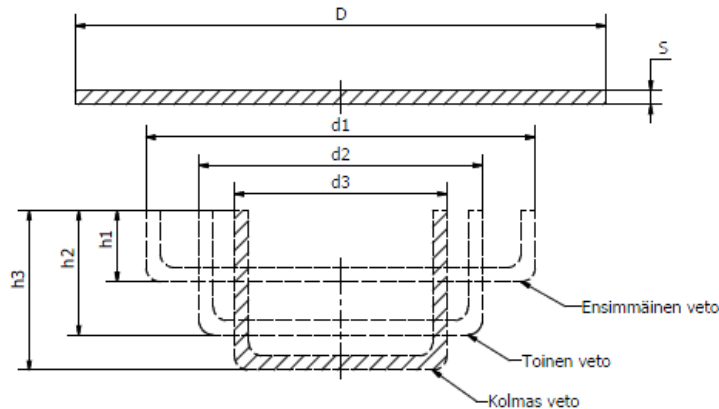
missä

d_2 on aihion halkaisija toisessa jatkovedossa

d_3 on painimen halkaisija toisessa vedossa

β_3 on kolmannen vedon vetosuhte

Jatkovedossa kupin halkaisija pienenee, jolloin rajavetosuhde ei ylitä. Kuviossa 4 on periaatekuva jatkovedon suorittamisesta.



Kuvio 4. Vetosekvenssit (Suchy 2005, 377.)

Jatkovedossa d_1 on aihion halkaisija ensimmäisessä vaiheessa, d_2 on painimen halkaisija toisessa vaiheessa ja d_3 painimen halkaisija kolmannessa vaiheessa, jne. Vastaavasti aihion halkaisija on toisessa vedossa d_1 ja kolmannessa vedossa d_2 , jne. Kokonaisvetosuhte β_{kok} on siten: $\beta_{\text{kok}} = \beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3 \times \dots \times \beta_n$. (Metal Forming Handbook 1998, 168.)

Nelikulmaisissa kappaleissa vetosuhteen laskemiseen voi alkutilanteessa käyttää pyörähdyssymmetristen kappaleiden arvoja. Nelikulmaisten kappaleiden aihion ja painimen näennäiset halkaisijat D_n ja d_n voidaan määrittää yhtälöillä 5 ja 6 (Honka 2000, 10.):

$$D_n = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (5)$$

$$d_n = \sqrt{\frac{4a}{\pi}} \quad (6)$$

missä

A on aihion pinta-ala

a on painimen poikkipinta-ala

Vetosuhde neliömäisillä kappaleilla määritetään yhtälöllä:

$$\beta = \frac{D_n}{d_n} \quad (7)$$

missä

β on rajavetosuhde ensimmäisessä vedossa

Neliömäisissä kappaleissa rajavetosuhde on ensimmäisessä vedossa sama kuin pyöreiläkin, mutta suorakaiteen mallisissa se on hieman pienempi. Nurkkien pyörityssäteen vaikutusta ei tarvitse huomioida, jos se on vähintään kuudesosa (1/6) kappaleen korkeudesta ja vähintään kahdeksan (8) kertaa levynpaksuus. (Honka 2000, 10.)

2.5 Syvävedon muut parametrit

Vetosuhteen ohella syvävedon onnistumiseen vaikuttavat materiaali, työkalu, voitelun onnistuminen, painimen voima (vetovoiman), levynpidätysvoima ja vetonopeus. Käytännössä mahdolliset laskennat suoritetaan käyttäen yksinkertaisia laskutoimituksia ja saatuja tuloksia tarkennetaan kokeilemalla.

Materiaalin ominaisuuksista tärkein on syvävedettävyys. Kitkan pienentäminen ja kitkasyöpymien vähentäminen tapahtuu hyvällä voiteluaineella. Sopivin voiteluaine löytyy yleensä kokeilemalla. (Vemta 2011.)

Työkaluparametreina tärkeimmät ovat vetoväli ja vetorenkkaan pyörityssäde. Vetovälin laskentaan riittää useimmiten ohjearvoksi kaavan 8 tulos (Honka 2006, 21.):

$$u = s \sqrt{\frac{D}{d}} \quad (8)$$

missä

s on levynvahvuus

D on aihion halkaisija

d on painimen halkaisija

Vetorenkkaan säde saadaan puolestaan kaavasta (Honka 2006, 19.):

$$r_v = 0,8\sqrt{(D-d)s} \quad (9)$$

missä

D on aihion halkaisija

d on painimen halkaisija

s on levyn paksuus

Pyörähdyssymmetrisen kappaleen vetovoiman maksimiarvoa $F_{p\max}$ voidaan arvioida kaavan (9) avulla (Metal Forming Handbook 1998, 168.):

$$F_{p\max} = \pi(d+s)sR_m 1,2 \frac{\beta-1}{\beta_{\max}} \quad (10)$$

missä

d on painimen halkaisija

s on levyn paksuus

R_m on materiaalin murtolujuus

β on kappaleen vetosuhde

β_{\max} on rajavetosuhde

Nelikulmaisten ja muiden mallisten kappaleiden vetovoimaa voidaan arvioida samalla tavalla käyttämällä kappaleiden näennäisiä halkaisijoita. Nelikulmaisten kappaleiden näennäiset halkaisijat saadaan edellä esitetyistä kaavoista (5) ja (6). (Honka 2000, 16.)

Yleensä vetovoiman arvioimiseen käytetään murtumiseen tarvittavan voiman kaavaa (11). Kaava on voimassa kappaleen muodosta riippumatta (Honka 2000, 16.):

$$F_{p\max} = 1,15LsR_m \quad (11)$$

missä

L on vetorenkaan sisäreunan ympäröisyysmitta

Muottiin painamisessa tapahtuvaan pohjaan iskuun tarvittavat voimat voivat olla moninkertaisia verrattuna normaalin syvävedon tarvittaviin voimiin. Tällöin edellä mainitut kaavat ovat usein vain suuntaa antavia. (Honka 2000, 16.)

Levynpidättimen tarkoituksena on estää levyn tangentialisesta puristusjännityksestä johtuva rypytyminen syvävedon aikana. Liian suurella levynpidätysvoimalla levyn laipan liukuminen paininta kohti vaikeutuu ja voi aiheuttaa pohjarepeämän. Liian pieni levynpidätysvoima aiheuttaa puolestaan laipan rypyttymisen.

Levynpidätyspaine voidaan arvioida Siebelin kaavan (12) avulla (Tschätsch 2006, 174.):

$$P_L = 2 \times 10^{-3} \left[(\beta - 1)^2 + \frac{D}{200s} \right] R_m \quad (12)$$

missä

β on vetosuhte

D on aihion halkaisija

s on levyn paksuus

R_m on murtolujuus

Yhtälön mukaan levyn lujuudella on suuri vaikutus pintapaineeseen. Teräksellä levynpidätyspaine on n. 2,5 N/mm² ja austeniittisella ruostumattomalla teräksellä jopa 8 N/mm².

Levynpidätysvoima saadaan yhtälöstä (Tschätsch 2006, 174.):

$$F_L = AP_L \quad (13)$$

missä

A on levyn pidätyspinnan ala

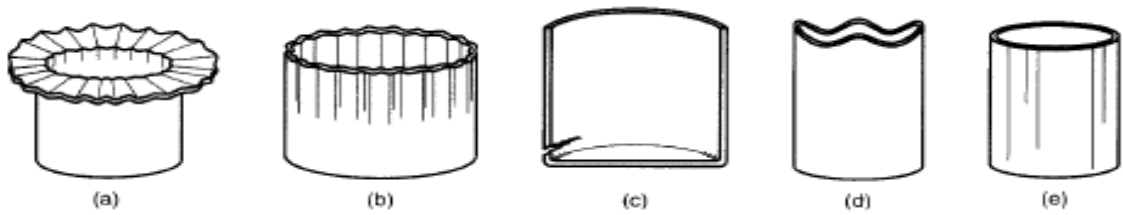
P_L on levyn pidätyspaine

2.6 Syvävedon virheellisten prosessiparametrien seuraukset

Virheellisten prosessiparametrien johdosta voi syväveto epäonnistua. Alla on lueteltu yleisimpiä syvävedossa tapahtuvia materiaalin virtauksen hallitsemattomuudesta johtuvia virheitä. Kuvassa 1 olevat kirjaimet vastaavat luettelossa esiintyvää virhettä.

- a) laipan rypistyminen, joka johtuu liian pienestä pidätysvoimasta

- b) seinämän rypistyminen, joka johtuu liian suuresta painimen ja vetorenkaan välyksestä
- c) pohjarepeämä, joka johtuu liian suuresta levynpidätysvoimasta tai liian pienistä pohjan pyöristyssäteistä
- d) korvat, jotka johtuvat materiaalin anisotropiasta
- e) naarmut seinämissä (kitkasyöpymät), jotka johtuvat huonosta voitelusta tai voiteluaineesta



Kuva 1. Syvävedon virheet (Groover 2008.)

Kohdassa d mainittu anisotropia syntyy levyn valssauksen yhteydessä. Anisotropia tarkoittaa levyn lujuusominaisuuksien vaihtelua eri suunnissa.

3 HYDROMUOVAUS

Suurpaine- eli hydromuovausta käytetään metallisten putkimaisten kappaleiden ja levyjen muovaamiseen haluttuun muotoon. Muovauksessa profiilin poikkileikkauspintaa muutetaan joko kokonaan tai vain tietyltä alueelta. Menetelmällä saadaan valmistettua profiililtaan monimuotoisia ja mittatarkkoja kappaleita. (Schellmann Marcus 2009.)

Taulukossa 2 on esitetty hydromuovauksen määritelmä. Määritelmä perustuu saksalaisen insinöörien yhdistyksen VDI:n (Verein Deutscher Ingenieure) esittämään standardiin VDI 3146.

Taulukko 2. Hydromuovauksen määritelmä (VDI 3146, lehti 1, 2.)

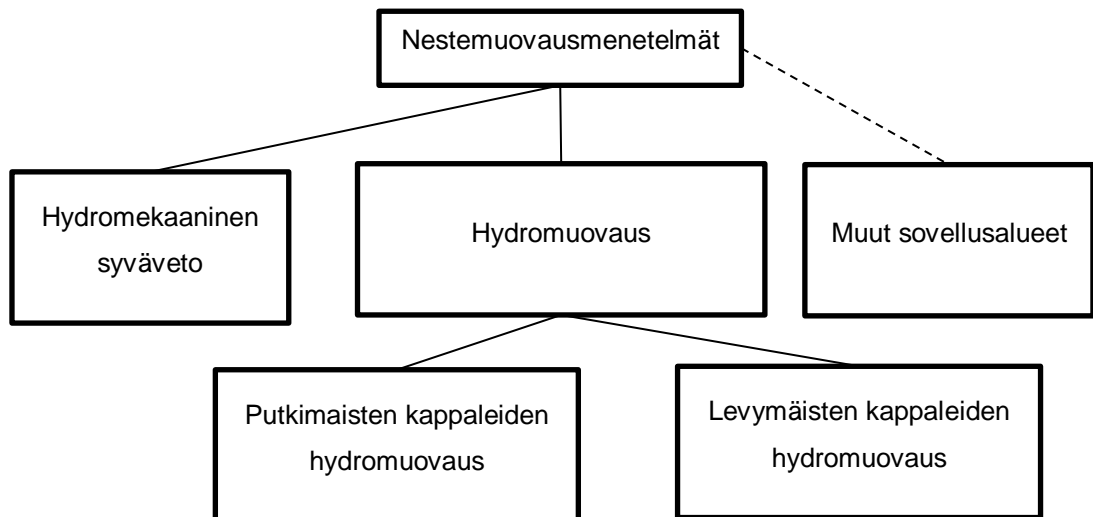
Hydromuovauksen määritelmä (VDI 3146)

Määritelmä: Hydromuovauksessa väliaineena toimiva neste johdetaan aihion ja hydromuovauslaitteiston muodostamaan onteloon. Työkappaletta muovataan paikallisesti tai koko alaltaan onteloon muodostettavalla nestepaineella. Muotin avulla kappaleeseen saadaan haluttuja piirteitä. Tarvittaessa prosessin onnistumiseksi työkappaleeseen johdetaan ulkoisia voimia.

3.1 Nestemuovausprosessit ja niiden luokittelu

Nestemuovausprosessissa aktiivisena väliaineena toimii neste. Menetelmässä materiaalin muovaus tapahtuu joko pelkästään nostamalla nesteen painetta laitteiston ja työkappaleen muodostamassa kammiossa (esim. putkiaihion sisällä) korkeaksi tai käyttämällä nestettä väliaineena tätä puristettaessa esimerkiksi kiinteällä painimella. (Schuler Academy 2009, 5.)

Nestemuovausprosessit luokitellaan onttojen (esim. putket) kappaleiden hydromuovaukseen ja levymäisten kappaleiden (esim. teräsohutlevy) hydromuovaukseen. Kuviossa 5 on graafinen esitys hydromuovauksen VDI 3146 -standardin mukaisesta luokittelusta.

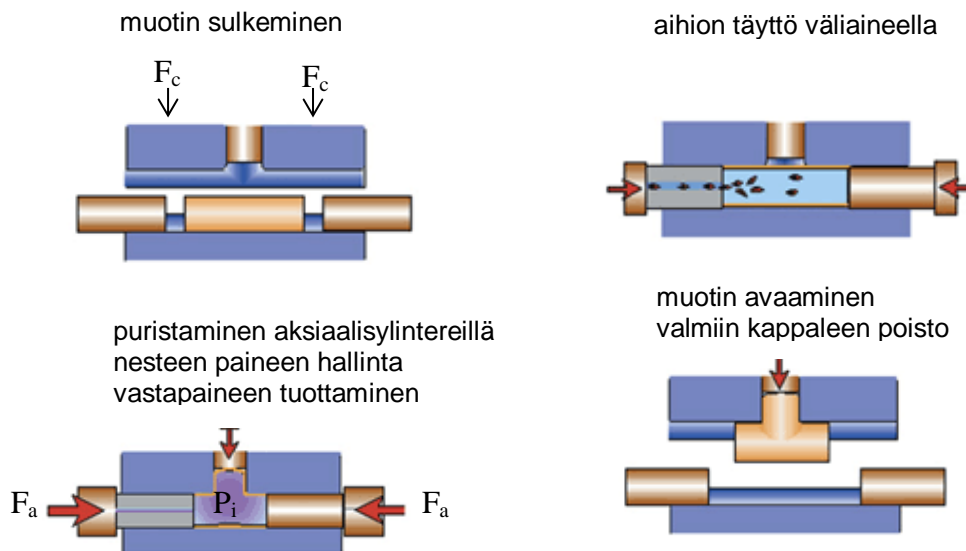


Kuvio 5. Nestemuovausprosessien luokittelu (VDI 3146, lehti 1, 2.)

3.2 Putken hydromuovauksen periaate

Putken hydromuovaus tapahtuu pääsääntöisesti nestepaineen (putken sisällä) ja putken ulkopuolisten voimien avulla. Ulkopuoliset voimat ovat putken hydromuovauksessa pääasiassa putken päihin kohdistuvat puristusvoimat ja joissakin sovelluksissa esimuovausvoimat.

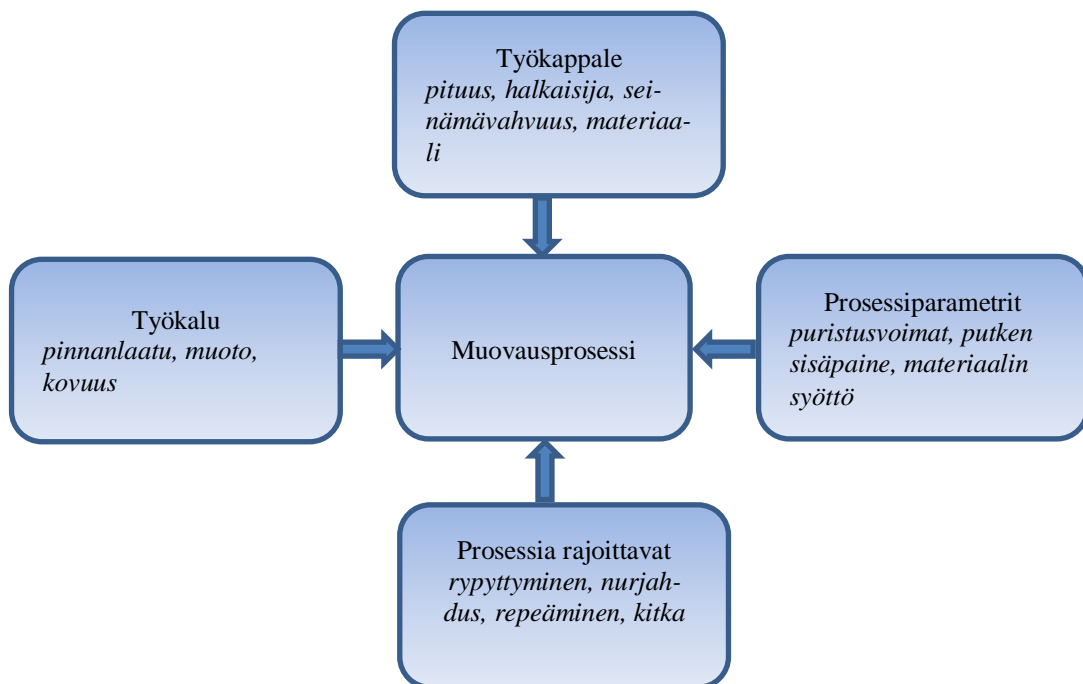
Tyypillinen hydromuovattava kappale on esimerkiksi T- kappale. Kuviossa 6 esitetyn periaatteen mukaisesti tuotteen valmistusprosessissa suoran putken sisälle johdetaan korkeapaineinen neste. Kahdella aksiaalisylinterillä tuotetaan putken päihin puristusvoima, joka tiivistää ja työntää T-haaraan tarvittavaa materiaalia. T-haaran vastavoima tuotetaan kappaletta kohtisuoraan olevalla sylinterillä. (Schuler Academy 2009, 5.)



Kuvio 6. T-kappaleen hydromuovausprosessi (Schuler Academy 2009, 5.)

3.3 Putken hydromuovaukseen vaikuttavat tekijät

Hydromuovausprosessin onnistumiseen vaikuttavat pääkomponentit ovat työkappale, työkalu ja prosessiparametrit. Muovausta rajoittavat tekijät kuten nurjahdus, rypytyminen ja repeäminen ovat lähinnä seurausta jonkin pääkomponentin virheellisestä parametrasta. Kuviossa 7 on esitetty kaaviona muovausprosessiin vaikuttavat tekijät.

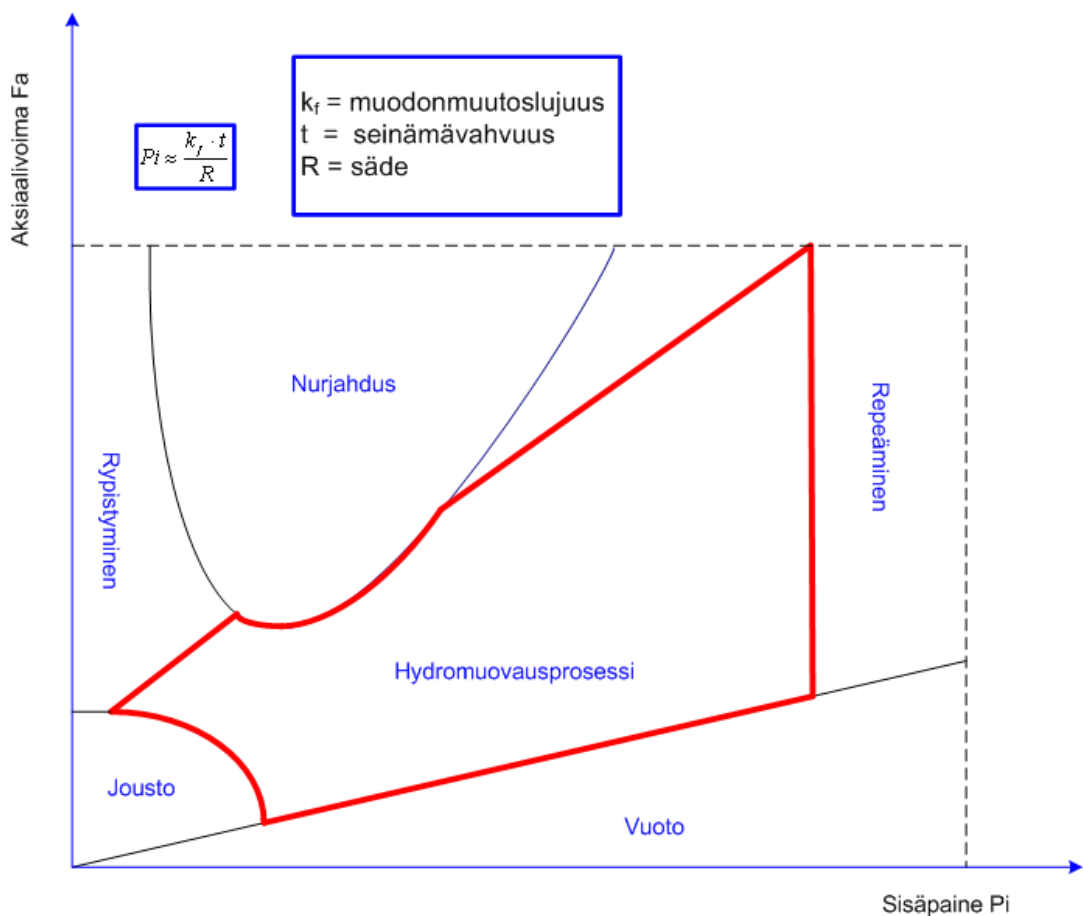


Kuvio 7. Muovausprosessiin vaikuttavat tekijät (ERC/NSM.)

Kuviossa 8 on esitetty putken hydromuovauksen työkaavio. Koordinaatistossa näkyvät muovauksen prosessiparametrit. Kaavion mukaan prosessiparametrien tulee täyttää seuraavat ehdot:

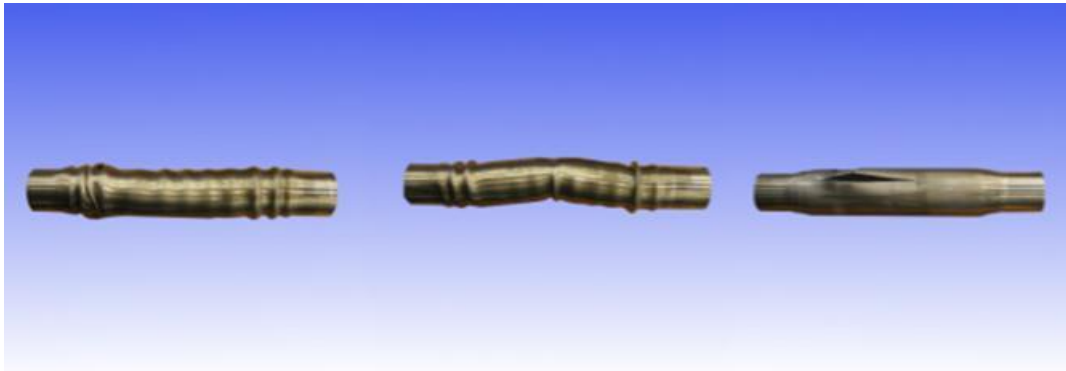
- Aksiaalivoiman ja sisäpaineen tulee olla tasapainossa ja pysyä kaavion punaisella rajatulla alueella.
- Sisäpaine tulee mitoittaa siten, että työkappaleessa tapahtuu mahdollisimman vähän seinämävahvuuden ohenemista.
- Maksimi aksiaalivoima tulee pysyä kokoajan nurjahdusalueen alapuolella.

Kaavio on kvalitatiivinen ja esimerkiksi prosessia rajoittavien tekijöiden rajat (rypytyminen, nurjahdus, repeäminen) voivat vaihdella. Vaihtelua tapahtuu esimerkiksi kuvion 7 työkalu- ja työkappaleparametrien muuttuessa radikaalisti. (Schuler Academy 2009, 31.)



Kuvio 8. Putken hydromuovauksen työkaavio (Schuler Academy 2009, 31.)

Kuvassa 2 on esitetty työkappaleet, joiden prosessiparametrit ovat olleet työkaavion alueilla rypistyminen, nurjahdus ja repeäminen. Esimerkiksi kuvan 2 ensimmäisen kappaleen rypistyminen johtui liian suuresta aksiaalivoimasta nestepaineeseen nähden, kuten kaaviosta 8 voimme havaita.



Kuva 2. Rypistyminen, nurjahdus ja repeäminen (Pelimanni 2009.)

3.4 Työkappaleen pituuden arviointi

Muovauksessa tapahtuvassa plastisessa muodonmuutoksessa metallin tilavuus tulisi pysyä samana, joten aihokappaleen koon määrittämisen pääsääntönä on aihion ja valmiin kappaleen materiaalitylavuuksien yhtäsuuruus. (Gretsov 2009, 25.)

Koska työkappaleen muodot vaihtelevat, ei yleistä materiaalitylavuuden laskentamallia voida esittää, vaan laskennat suoritetaan tapauskohtaisesti aihion ja valmiin kappaleen perusteella seuraavasti:

1. Selvitetään valmiin tuotteen materiaalitylavuus.
2. Selvitetään työkappaleelta vaadittava materiaalitylavuus prosessin onnistumiseksi.
3. Määritetään työkappaleen (aihion) pituus valmiin tuotteen materiaalitylavuuden perusteella.

3.5 Putken hydromuovauksen prosessiparametrit

Tärkeimmät putken hydromuovauksen prosessiparametrit ovat kuvion 2 mukaan puristusvoimat ja putken sisäpaine. Ennen muovauksen aloittamista tulisi näitä parametreja arvioida laskennallisin menetelmin.

Prosessiparametrien laskennasta on eri lähteissä erityyppisiä kaavoja. Tässä dokumentissa on esitetty pääosin Hydro+ -projektin (2008 - 2010) yhteydessä käytettyjä parametrimäärittelyjä.

3.5.1 Putken hydrostaaattinen sisäpaine

Hydromuovauksen päävoimaparametri on nesteen sisäinen hydrostaaattinen paine P_i , jota lisätään muodonmuutoslujuuden kasvaessa prosessin aikana. Sen suuruutta määrittelevät minimipaine ja maksimipaine. Maksimipaine määrittää putkiahion seinämän paineenkestokyvyn eli paineen, jolla saavutetaan materiaalin murtolujuus. Minipaine määritellään puolestaan paineella, joka on materiaalin muodonmuutoslujuutta vastaavalla tasolla. (Bolkisev, Gretsov, Semibratov 2003, 113, 114.)

Sisäpaine pitää olla määritelty siten, että se estää nurjahduksen muovauksen alkuvaiheessa, ylittää materiaalin myötörajan muovauksessa ja estää ryppyjen muodostumisen. Sisäpainetta lisätään muovauksen aikana materiaalin muodonmuutoslujuuden kasvaessa.

Putken sisäpainetta voidaan Bolkisevin, Gretsovin ja Semibratovin mukaan arvioida kaavan (14) avulla (Bolkisev 2003, 151.):

$$P_i = \frac{2\sigma_s t_y}{d} \text{ (MPa)} \quad (14)$$

missä

P_i on putkiahion sisäpaine

σ_s on materiaalin myötöraja (muodonmuutoslujuus)

t_y on on 87% ahion seinämaavahvuudesta

d on putken sisähalkaisija

Muodonmuutoslujuutta voidaan arvioida Hollomonin yhtälöllä (Kivivuori & Viljamaa 2011, 42.):

$$\sigma_s = k\varepsilon_t^n \quad (15)$$

missä

k on muokkauslujittumiskerroin

ε_t on todellinen venymä

n on muokkauslujittumiseksponentti

Venymää arvioitaessa käytetään venymän kerrointa K_d . Kerroin saadaan kaavasta (16). (Bolkisev 2003, 10.)

$$K_d = \frac{D}{d} \quad (16)$$

missä

D on valmiin putken suurin halkaisija

d on putkiaihiön halkaisija

Todellinen venymä saadaan puolestaan kaavasta (17). (Bolkisev 2003, 102.)

$$\varepsilon_t = \ln(K_d) \quad (17)$$

3.5.2 Aksiaalisylinterien voima

Aksiaalisylinterien tarkoituksena on siirtää materiaalia muovattavalle alueelle ohene-
misen minimoimiseksi, tiivistää putken päät nestevuotojen ehkäisemiseksi ja kompen-
soida muovauksessa aiheutuvat vastavoimat. Aksiaalisylinterien männäntapin päihin
vaikuttavat vastavoimat muodostuvat aihion sisäpaineesta (nesteaine), kitkasta ja aihio-
n muodonmuutoslujuudesta. Puristusvoimaa lisätään koko muovausprosessin ajan si-
säpaineen ja muodonmuutoslujuuden sekä kitkavoimien kasvaessa. Teräsputkiaihiöille
voidaan vastavoimien summaa F_a arvioida alla olevan funktion avulla. (Bolkisev 2003,
144.)

$$F_a = \frac{\sigma_s}{9,81} \times \pi \times r_0^2 + P_i \times \pi (r_0 - t)^2 \quad (18)$$

missä

σ_s on materiaalin myötöraja

r_0 on putkiaihion ulkohalkaisija

t on putken seinämävahvuus

P_i on putkiaihion nesteen sisäpaine muovauksessa

3.5.3 Muotin sulkuvoima

Muovausprosessin aikana muottiin vaikuttavat putkiaihion nestepaineen aiheuttamat muodonmuutosvoimat työkappaleen seinämässä. Puristimen sulkuvoiman F_c on säilyttävä koko prosessin ajan sellaisella tasolla, että muotti pysyy kiinni ja tiiviinä. Muottipuoliskoja vasten tuleva voima vaihtelee muovausprosessin aikana ja kasvaa maksimiin työkappaleen seinämän puristuessa kalibrointivaiheessa muottipuoliskoja vasten. Kaavan (19) avulla voidaan arvioida sulkuvoiman tarvetta muovauksen etenemisen aikana. (Gretsov 2009.)

$$F_c = \left[P_i + \frac{1,15\sigma_s t}{D-d} \right] D(L_i - D_i) \quad (19)$$

missä

σ_s on materiaalin hetkellinen myötölujuus

D on putkiaihion ulkohalkaisija

D_i on kappaleen hetkellinen ulkohalkaisija

t_i - kappaleen hetkellinen seinämävahvuus

L_i - kappaleen hetkellinen pituus

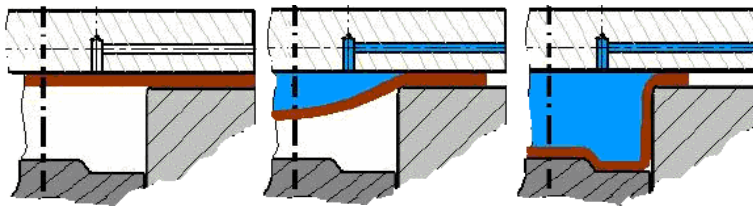
Käytännössä muotin sulkuvoima arvioidaan siten, että sama arvo pidetään koko prosessin ajan. Tällöin valitaan kaavaan 19 prosessin maksimiarvot. (Gretsov 2009.)

3.6 Levyaihion hydromuovauksen periaate

Levyaihioden hydromuovaus sai alkunsa putkimaisten kappaleiden muovauksista saattujen hyvien tulosten myötävaikutuksella. Lentokoneteollisuudessa sitä on käytetty jonkin aikaa, mutta Toyotan 1980 -luvulla aloittaman teknologiakehityksen myötä sen

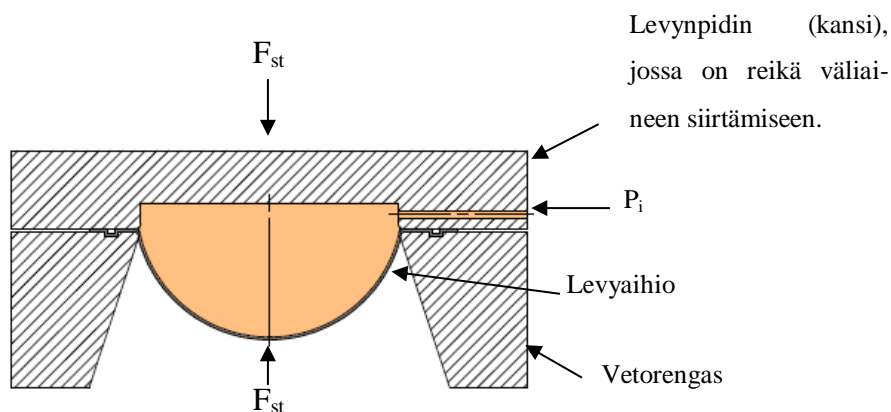
voidaan katsoa tulleen yleisempään käyttöön 1990 -luvulla. Levyaihion hydromuovaus on ohutlevyjen kylmämuovausmenetelmä, jossa levy muovataan nestepaineen avulla halutuksi kappaleeksi. Menetelmä jaetaan hydrauliseen syvävetoon ja hydromekaaniseen syvävetoon. Hydraulisessa syvävedossa käytetään muovaukseen pelkästään nesteen painetta kun taas hydromekaanisessa syvävedossa käytetään nesteen ohella perinteisen syvävedon tapaan myös paininta. (Korhonen&Larkiola 2012, 132, 133.)

Nestemuovausmenetelmää käytetään myös erilaisissa perinteisen syvävedon ja hydromekaanisen muovauksen yhdistelmissä. Kuviossa 9 on esitetty hydraulisen syvävedon periaate, jossa levyn annetaan ensin pullistua ja materiaalin virrata vapaasti kunnes aihio koskettaa muotin seinämää. Toisessa vaiheessa tehdään ns. kalibrointi, jolloin nesteen paine nostetaan sille tasolle, että levy vastaa kauttaaltaan muotin muotoa. Levynpitimen ja aihion välin tulee olla tiivis, jotta neste ei pääse purkautumaan niiden välistä. Tarvittaessa on käytettävä ”palletta” tai/ja tiivisterenkaita.



Kuvio 9. Hydraulinen syväveto (Yadav 2006, 40.)

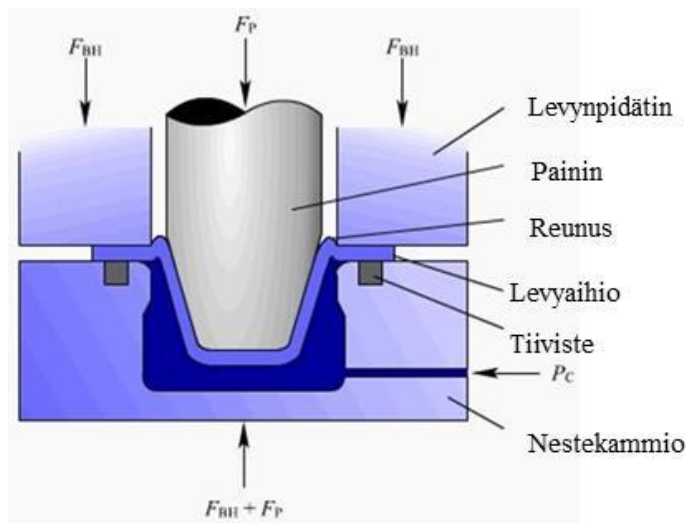
Pelkässä hydraulisessa venytysmuovauksessa materiaalin virtaus estetään lukitusrenkailla. Kuvion 10 tapauksessa (pullistustesti), on kysymyksessä venytysmuovaus. (Koç, Muammer 2008, 217.)



Kuvio 10. Pullistustesti (Koç, Muammer 2008, 217.)

Hydromekaanisessa syvävedossa käytetään nestettä ja paininta. Materiaali painetaan nesteellä paineistettuun kammioon. Nesteen paineen vaikutuksesta kappale muovautuu tiiviisti painimen muotoiseksi. (Koç, Muammer 2008, 224.)

Kuviossa 11 on esitetty hydromekaanisen syvävedon periaate. Nesteen painetta P_c säädetään prosessin aikana optimaaliseksi. Neste poistuu samaa kanavaa pitkin, josta se syötetään kammioon. Menetelmällä pystytään muovaamaan esimerkiksi syviä kartiomaisia kulmikkaita kappaleita, joiden muovaus perinteisellä syvävedolla on erittäin haastavaa.



Kuvio 11. Hydromekaanisen syvävedon periaate (European Aluminium Association & The University of Liverpool 2010.)

3.7 Hydromuovauksen edut

Hydromuovauksella savutetaan tietyissä tapauksissa huomattavia valmistukseen ja lopputuotteen ominaisuuksiin liittyviä etuja. Alla on lueteltu hydromuovauksen edut verrattuna perinteisellä teknologialla (esim. painosorvaus, syväveto, hitsaus, mankelointi, taivutus, ym.) valmistettuihin tuotteisiin (Gretsov 2009, 3; Schuler Academy 2009, 13, 14, 16, 18):

- Hydromuovauksella saadaan lujat ja yhtenäiset osat, joiden paino on 25 - 30 % kevyempi verrattuna perinteisellä teknologialla saatuihin osiin.

- Muovausprosessissa tapahtuu materiaalin muokkauslujittumista (murtoraja kasvaa 70 - 80 %).
- Korroosiostabiliisuus on hyvä.
- Mittatarkkuus on erinomainen.
- Hydromuovaus mahdollistaa monimutkaisten muotojen tekemisen.
- Hydromuovaus mahdollistaa useiden toimintojen integroimisen prosessin yhteyteen. Näitä ovat esimerkiksi taivutus, esimuovaus ja reikien teko.
- Työkalukustannukset ovat pienemmät, koska jatkovetoja ei tarvita ja usein selviää pelkällä muotilla.
- Tuotteelle saadaan hyvä pinnanlaatu.
- Levyn hydromuovauksessa rajavetosuhde on huomattavasti perinteistä syvävetoa isompi.
- Takaisinjousto ei ole tai se on erittäin vähäistä.
- Levyn hydromuovauksessa vetorangasta ei tarvitse muotoilla, eikä vastintyynyjä tarvitse lainkaan.
- Perusteellisella suunnittelulla voidaan välivaiheet poistaa kokonaan.
- Välihehkutuksia ei normaalisti tarvita.

3.8 Hydromuovauksen varjopuolet

Kuten kaikilla muillakin valmistusteknologioilla, on hydromuovauksellakin varjopuolia. Alla on lueteltu tärkeimmät hydromuovausteknologian käyttöönottoa rajoittavat tekijät:

- Hydromuovauksessa työsyklin kesto on pitempi verrattuna perinteiseen syvävetoon.
- Hydromuovauksen tuotantolinja on monimutkainen ja kallis.
- Hydromuovausosaamista on vähän tai sitä ei ole lainkaan saatavissa.
- Nesteen käyttö vaatii työkalulta tiiviyttä.
- Hydromuovauksessa tarvitaan suuria voimia.
- Kappale kastuu muovausnesteessä.
- Hydromuovauksen koulutustarjontaa ei Suomessa ole ja kansainvälisestikin sitä on vähän.

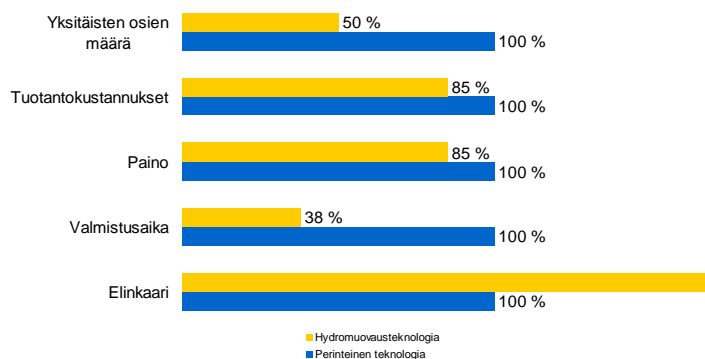
3.9 Hydromuovauksen sovellusalueita

Hydromuovauksen sovellusalueet löytyvät pääosin auto- ja polkupyörä teollisuudesta. Sovellusalueita ovat mm. pakoputket, pakosarjat, rungon osat (auto, polkupyörä) ja alustan osat. Kuvassa 3 on esimerkkejä tyypillisistä hydromuovaamalla valmistetuista kappaleista.



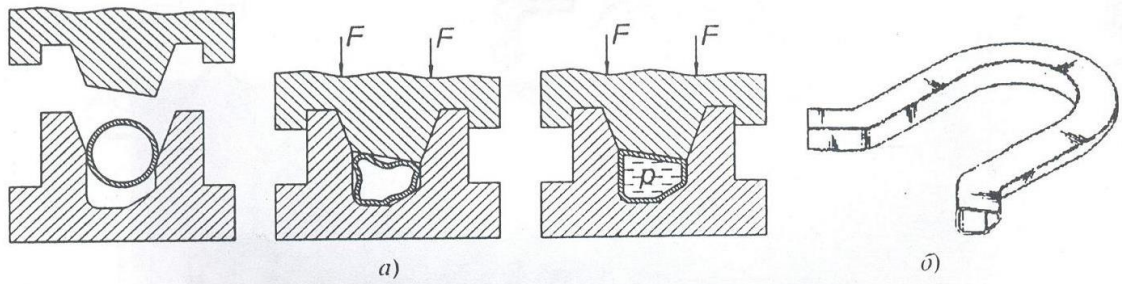
Kuva 3. Hydromuovattuja kappaleita (Schuler Hydroforming 2009.)

Alla on esitetty muutamia valmistusteknologian vertailua hydromuovaus vs. perinteinen valmistusteknologia. Kuvassa 4 on pakoputken valmistuksessa saadut edut verrattuna perinteiseen valmistusmenetelmään.



Kuva 4. Pakokaasujärjestelmät Volkswagen AG sarjatuotantoa Arvin Exhaust, Finnerop (Schuler Hydroforming 2009.)

Tyypillinen hydromuovauksen sovellusalue on myös auton apurunko (moottorin alusta). Valmistus tapahtuu esitaivuttamalla putkiaihio, jonka jälkeen taivutettu putki puristetaan muottiin. Putkeen johdetaan neste, jonka paine nostetaan niin korkeaksi, että mahdolliset rypyt oikenevat ja putki muovautuu muotissa haluttuun poikkileikkausprofiiliin. Kuviossa 12 on esitetty valmistusperiaate. (Gretsov 2009, 21.)



Kuvio 12. Moottorin alustan valmistusperiaate (Gretsov 2009, 21.)

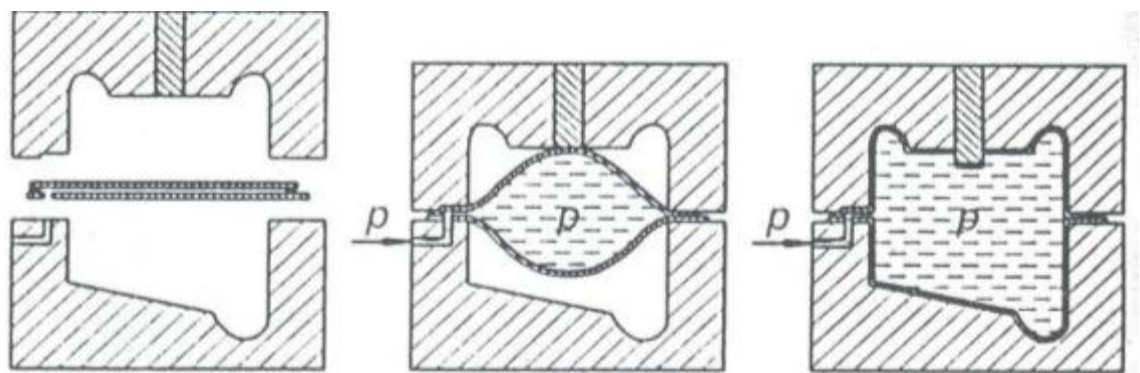
Kuvassa 5 on Opel Astran ja Opel Zafirin apurunkoja. Sarjatuotantolinja sijaitsee Saksassa Adam Opel Bochumin tehtaalla. Kuvan ohessa on esitetty myös valmistusteknologiasta saadut hyödyt.



- teräslaatu St 34
putkiaihio 2600 x 65 x 2 mm
- vähemmänyksittäisiä osia
 - kevyempi
 - vähemmän hitsausta ja saumoja
 - hyvä toistettavuus valmistettaessa
 - pienemmät muotti- ja työkalukustannukset

Kuva 5. Moottorin alusta, Opel Astra, Opel Zafira, sarjatuotantoa Adam Opel AG, Bochum (Schuler Hydroforming 2009.)

Kuviossa 13 on esitetty levyaihion hydromuovauksen sovellusalueista polttoainetankin muovaus kahdesta toisiinsa liitetystä levyistä. Menetelmällä voidaan yhdellä iskulla valmistaa ajoneuvon polttoainetankki. Teknologia on vielä tutkimusvaiheessa (2009), mutta avaa kehittäjien mielestä uusia mahdollisuuksia polttoainetankin valmistamiseksi vähentämällä radikaalisti hitsauksen ja syvävedon työvaiheita. (Gretsov 2009, 15.)



Kuvio 13. Polttoainetankin hydromuovauksen periaate (Gretsov 2009, 15.)

4 OLI-24-SUURPAINEMUOVAUSPURISTIN

Jaloterässtudiolla sijaitseva OLI-24-mallin hydromuovauslaitteisto on yksi kaikkien aikojen tehokkaimmista tunnetuista tutkimus- ja tuotantokoneista. Koneen koko on kansainvälisestikin huomioiden mittava. VTT:n hankkimalla laitteistolla onkin ollut tarkoituksena kehittää hydromuovauksen tuntemusta ja tutkimusta Suomessa. OLI-24 koneella pystytään muovaamaan monimutkaisia volumetrisia osia. Se on tarkoitettu pääasiassa kartiomaisten ja taivemuotoisten profiilien muovaamiseen kuten esimerkiksi T -kappale, ristikkappale ja kartioputki. Profiilityyppiset (pyöreä/kantikas) osat, voivat olla halkaisijaltaan 32 - 50 mm, seinämävahvuudeltaan 1 - 10 mm ja pituudeltaan 100 - 1000 mm.

Jaloterässtudiolla olevan hydromuovauskoneen toiminta perustuu raskaaseen ja lujaan mekaniikkaan, voimakkaaseen hydraulikkaan ja erittäin tarkkaan sähköiseen ohjaukseen. Muovausprosessin hallinta vaatiikin kaikkien näiden toimintojen saumatonta yhteistyötä.

4.1 Hydromuovauskoneen rakenne

OLI-24-hydromuovauslaitteistoon kuuluu puristinosan lisäksi manipulaattori, putkiaihioiden asetuspöytä ja työkalunvaihtovaunu. Tässä työssä keskitytään ainoastaan puristinosaan, koska manipulaattoria ja asetuspöytää ei ole juurikaan muovausprosesseissa käytetty. Kuvassa 6 on esitetty hydromuovauskoneen puristinosa ja manipulaattori.

Hydromuovauskoneen varustukseen kuuluu myös työkalun asennusta varten suunniteltu kiskoilla oleva työkalun kuljetusvaunu. Vaunu sijaitsee ohjauspaneelistä katsoen puristimen takana.



Kuva 6. Suurpainemuovauspuristin ja manipulaattori

4.2 Puristimen hydraulikka

Hydromuovauskoneen hydraulikan tarkoituksena on siirtää tarvittavia voimia työkapaleeseen muovausprosessin aikana. Ohjausjärjestelmän avulla annetaan hydraulikalle parametrit, jotka määrittävät työliikkeiden nopeudet ja voimat. Puristimessa on kaiken kaikkiaan 10 eri sylinteriä.

Pääsylinterin tehtävänä on muotin sulkuvoiman pitäminen sillä tasolla, jonka muovausprosessi vaatii. Sylinterin toiminnot ovat puristuspaineen nosto, pito ja laskeminen. Sylinterin maksimi muotin sulkuvoima on 30 000 kN 32 MPa:n paineella. Sylinteri on yksitoiminen ja asennettu yläpoikittaistuen keskelle. Pääsylinterin männäntappiin on kiinnitetty liikkuva puskin (traverse), jonka alapuolelle on pallonivelellä kiinnitetty T - uritettu muotinkiinnityslevy.

Koska sylinterin pinta-ala on vain hieman alle 1 m^2 , niin sylinterin voima voidaan arvioida karkeasti suoraan, kertomalla annettu paine sadalla. Taulukoon 3 on laskettu painearvojen vastaavaa sylinterivoimat hieman tarkemmin käyttäen hydromuovaimen pääsylinterin todelliseen pinta-alaan perustuvaa laskentaa. Pääsylinterin todellinen pinta-ala on koneen piirustusten mukaan $0,985 \text{ m}^2$, joten sylinterin voima voidaan laskea kaavan (20) avulla.

$$F = \frac{P}{A} \quad (20)$$

missä

P on öljykammion öljyn paine

A on sylinterin pinta-ala

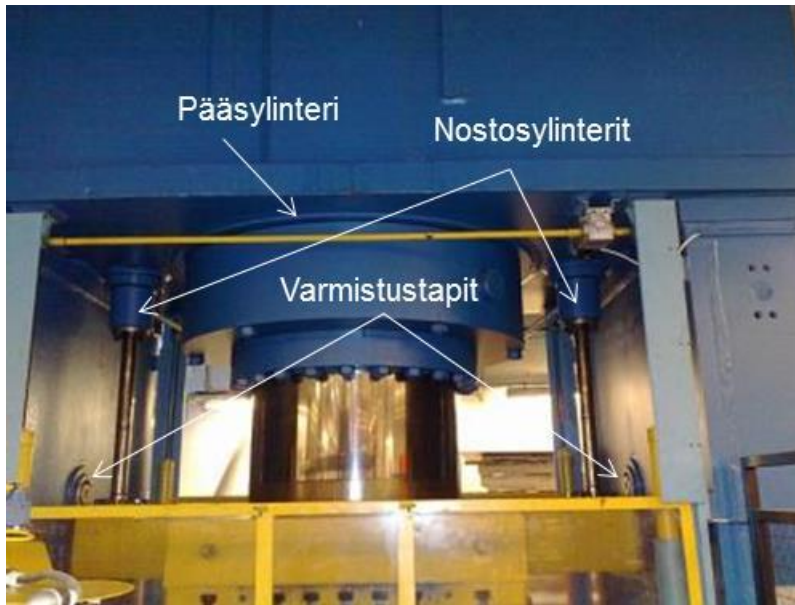
Taulukkoon 3 on arvioitu kaavan 20 mukaisesti pääsylinterin voima 5 - 120 bar:n kammiopaineella olettaen, että sylinterin pinta-ala on 9850 mm^2 .

Taulukko 3. Pääsylinterin voima

P _{max} /bar	F _{sulku} /kN	Massa/tonnia
0	0	0
5	493	50
10	985	100
15	1478	151
20	1970	201
25	2463	251
30	2956	301
35	3448	352
40	3941	402
45	4433	452
50	4926	502
55	5419	553
60	5911	603
65	6404	653
70	6896	703
75	7389	753
80	7882	804
85	8374	854
90	8867	904
95	9359	954
100	9852	1005
105	10345	1055
110	10837	1105
115	11330	1155
120	11822	1206

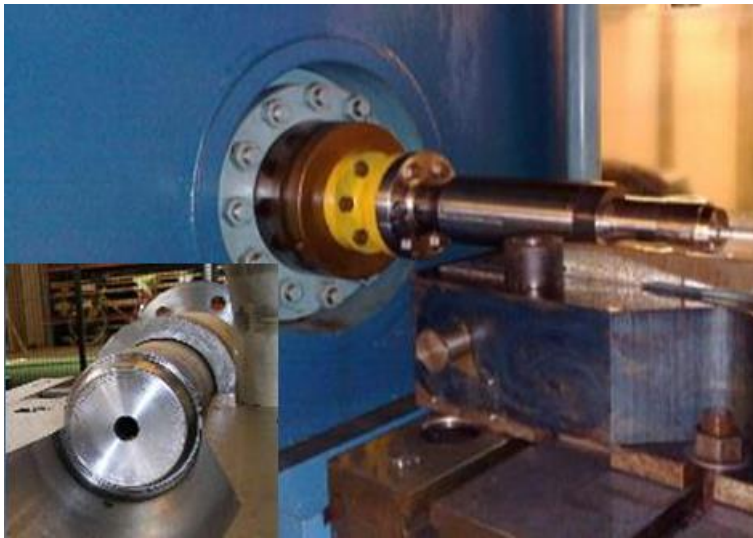
Pääsylinterin molemmille sivuille yläpoikittaistukeen on kiinnitetty palautussylinterit, joiden tehtävänä on pääsylinterin nosto muovausprosessin loputtua ja laskeminen ennen muovausprosessin käynnistymistä. Palautussylinterien männäntapit ovat kiinni puski-messa, jonka välityksellä pääsylinterin nosto ja laskeminen tapahtuu. Palautussylinteri-en nimellisvoima on 660 kN. Puskimen ja pääsylinterin alas valumisen estämiseksi on

pystypalkkeihin kiinnitetty kaksi kaksitoimista sylinteriä, joiden männäntapit ulostyönnettyinä toimivat ns. varmistustappeina (clamps). Kuvassa 7 on esitetty pää- ja nostosylinterit.



Kuva 7. Pääsylinteri, nostosylinterit ja varmistustapit

Pystypalkkeihin on kiinnitetty kaksi aksiaalisylinteriä, joiden tehtävänä on puristaa työ kappaletta muovausprosessissa. Ohjauspaneelistä päin katsottuna vasemmalla puolella olevan sylinterin (SWD) männäntapin keskellä on muovausöljyn kuljetuskanava, joka johtaa kyseisessä sylinterissä olevaan korkeapainekammioon. Sylinteri ja männäntappi on esitetty kuvassa 8. Kammiossa voi olla maksimissaan 500 MPa:n paine. Aksiaalisylinterit ovat kaksoissylintereitä, joiden uloimpiin mäntiin on kiinnitetty muovausprosessissa tarvittavat tiivistystapit. Sylintereiden nimellisvoima on 3500 kN.



Kuva 8. Aksiaalisylinteri (SWD), jossa on öljynsiirtokanava

T- ja ristikappaleiden muovaamista varten on laitteistossa irrotettavat poikittaissylin-
terit. Näiden sylinterien tehtävänä on tuottaa esimerkiksi ristikappaleen muovauksessa
tarvittavat vastavoimat. Poikittaissylinterit asennetaan tarvittaessa puristimen etu- ja
takapuolelle ohjauspaneelista katsottuna kohtisuoraan aksiaalisylintereihin nähden. Sy-
linterien nimellisvoimat ovat 2000 kN. Kuvassa 9 on ohjauspaneelista katsottuna pu-
ristimen takana oleva poikittaissylinteri.



Kuva 9. Poikittaissylinteri

Puristimen pöydän alapuolella on alasylinteri. Alasylinterin tarkoituksena on vastavoi-
man tuottaminen esimerkiksi suorakaideprofiilin taivuttamisessa. Alasylinteriä voidaan

myös muovaustapahtumasta riippuen käyttää myös työkappaleen irrottamiseen. Sylinterin vastavoima on maksimissaan 2000 kN ja ulostyöntövoima 100 kN.

Paineenkohottimen tehtävänä on tuottaa hydromuovaustapahtumassa tarvittava korkea nestepaine. Paineenmuuntimessa on kaksi sylinteriä, joiden halkaisijat poikkeavat huomattavasti toisistaan. Toisen sylinterin mäntänä toimii toisen sylinterin männänvarsi. Kun varsinaisen männän taakse johdetaan paineistettu neste, puristuu korkeapainekammioon männänvarren tuottamana huomattavasti sylinterin mäntää liikuttava korkeampi paine. Hydromuovauskoneen paineenkohottimella pystytään tuottamaan maksimissaan 500 MPa:n paine. Kuvassa 10 on paineenkohotin ohjauspaneelista katsoen puristimen vasemmalla sivulla.



Kuva 10. Paineenkohotin ja korkeapainekammio

Muovaustapahtuman päätyttyä työkappaleessa ollut muovausöljy valuu alapoikittaistuksessa olevia rännejä pitkin puristimen alla olevaan säiliöön. Säiliön täytyessä tietylle tasolle pinnankorkeutta mittaavan anturi antaa tiedon täyttöjärjestelmälle pumpata öljy laitehuoneessa olevaan välisäiliöön. Välisäiliön pintavahti valvoo keruuöljyn määrää ja pumppaa suodattimien kautta tarvittaessa keruuöljyn takaisin varsinaiseen muovausöljysäiliöön.

5 KARTIOPUTKEN HYDROMUOVAUS

OLI-24-hydromuovauslaitteiston mukana toimitettiin OLG-53 keskeisen supistuskartioputken muovaustyökalu. Työkalulla voidaan muovata \varnothing 101,6 mm:n putkiaihiosta ns.tupla kaksoiskartio ja josta voidaan leikata neljä (4) kahden kokoista supistuskartiota.

Tässä osassa on esitetty hydromuovaamalla valmistettavien kartioiden valmistamista OLI-24-koneella. Kartioputki on t-kappaleen ohella tyypillinen putkiaihiön hydromuovauksen sovellus.

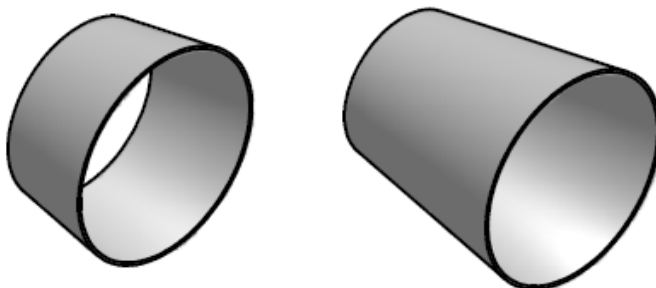
5.1 Hydromuovaamalla valmistettava kartioputki

Hydro+ -projektissa (2008 - 2010) testattiin mm. kahdenlaisen standardikokoisen keskeisen supistuskartion valmistamista hydromuovaamalla. Suomessa ei supistuskartioiden valmistamiseen käytetä lainkaan hydromuovausta. Perinteisin kartion valmistustekniikka on mankelointi ja hitsaus.

Taulukossa 4 on esitetty valmistettavien standardikokoisten supistuskartioiden mitat. Kuvassa 11 on tuotteiden 3D -mallit.

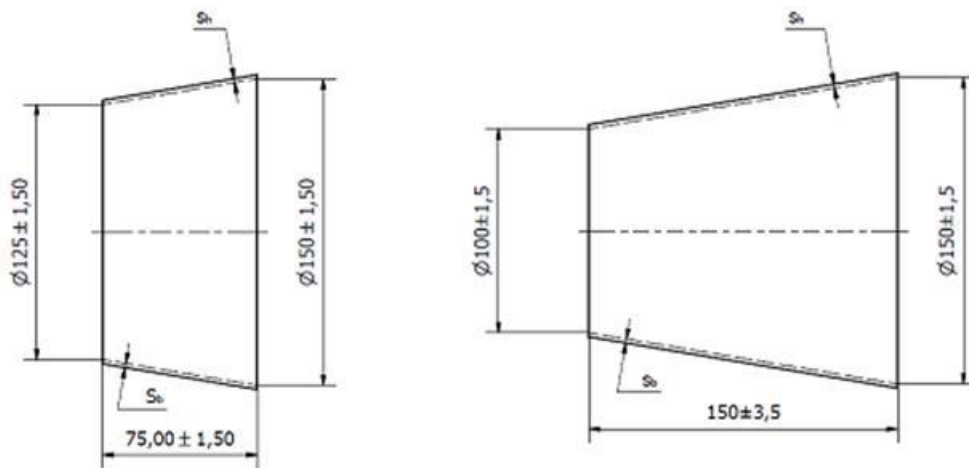
Taulukko 4. Valmistettavan keskeisen supistuskartion mitat

KESKEINEN SUPISTUSKARTIO $L=3x(D-d)$, EN 1.4318			
Sisämitat	Ulkomitat	Seinämvahvuus	Korkeus
Ds/ds mm	Du/du mm	s mm	L mm
150/100	154/104	2	150
150/125	154/129	2	75



Kuva 11. Keskeisten kartioiden 3D -mallit (Pelimanni 2009.)

Ennen varsinaisen muovausprosessiin kuuluvien työvaiheiden aloittamista on valmistettavista kappaleista saatava tarkat mittapiirustukset toleransseineen työkalun valmistamista varten. Kuviossa 14 on valmistettavien kartioiden mittapiirustus.

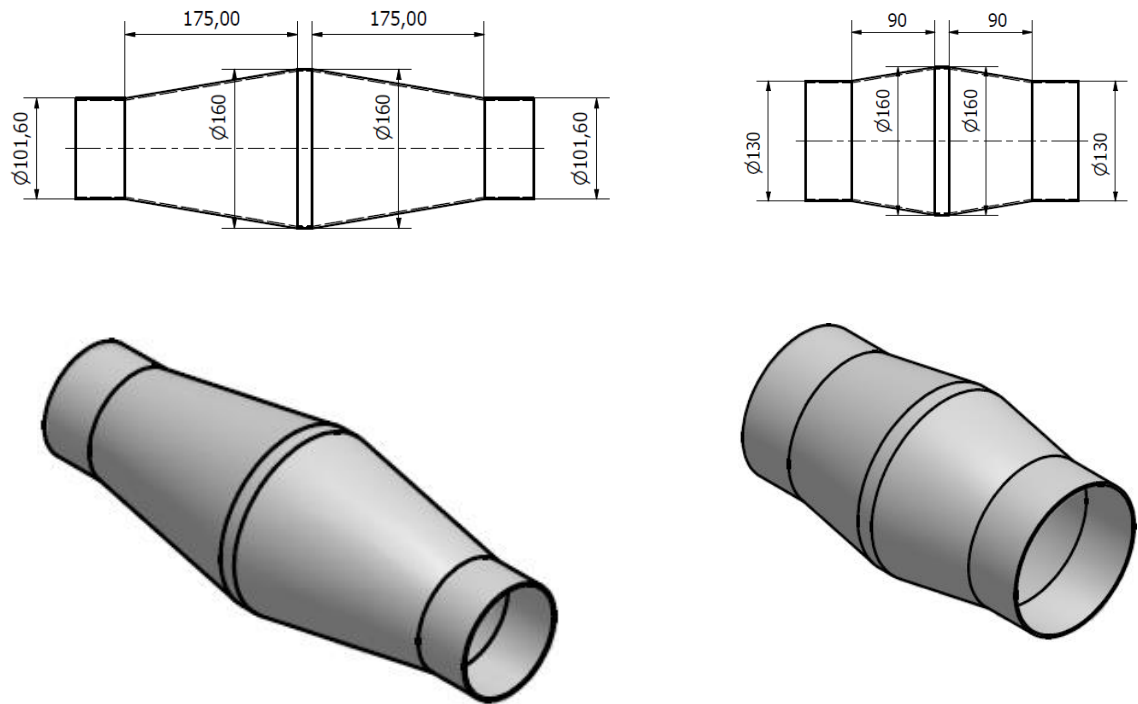


Kuvio 14. Valmistettavien kartioiden mittapiirustus (Pelimanni 2009.)

5.2 Vaihtoehtoinen työkalu

Kartiot voitaisiin valmistaa tekemällä kummankin kokoiselle kartiolle oma työkalu, jolloin saataisiin yhdellä iskulla kaksi samanlaista kartiota. Tällöin jouduttaisiin valmistamaan kaksi erilaista työkalua sekä suorittamaan työkalun vaihto siirryttäessä toisen kokoisen kartion valmistamiseen. Tämä vaihtoehto olisi perusteltua esimerkiksi silloin, kun kappaleiden tarpeelliset valmistusmäärät poikkeaisivat huomattavasti toisistaan.

Kuvassa 12 on esitetty vaihtoehdon mukaisten tuotteiden mallit. Kuvan mallien mukaisen kaksoiskartioiden tekemiseen ei ole tällä hetkellä työkaluja, vaan tässä on esitetty pelkästään vaihtoehtoinen ratkaisu esimerkkitapaukseen nähden.

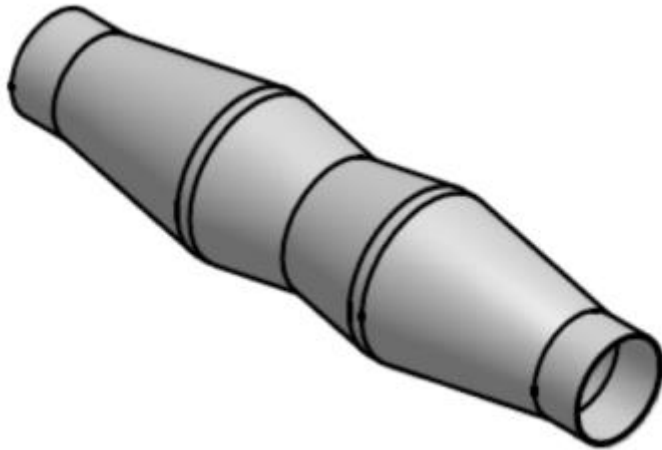


Kuva 12. Kaksoiskartiot (Pelimanni 2009.)

5.3 OLG-53 -työkalu

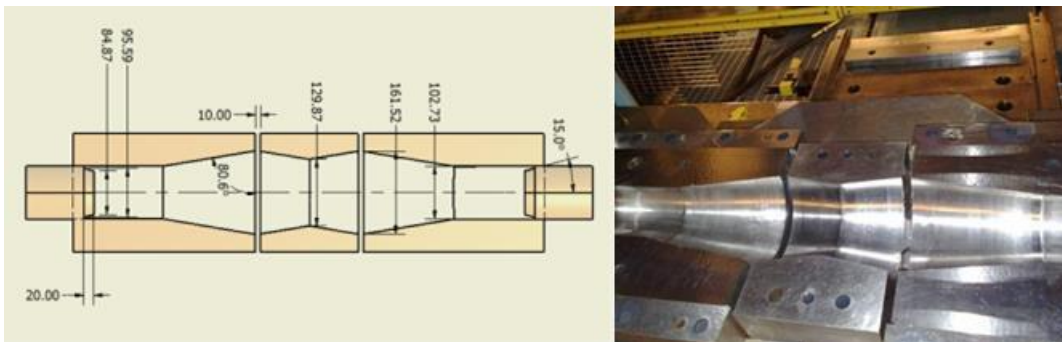
Toisena vaihtoehtona on tuplakaksoiskartion valmistus, jota voidaan tehdä olemassa olevalla OLG-53 -työkalulla. OLG-53 -työkalu on kuusiosainen tuplakaksoiskartionmallinen muotti, joka on suunniteltu halkaisijaltaan $\varnothing 101,6$ mm:n ja pituudeltaan 755 - 800 mm:n työkappaleelle. Työkalu on jaettu kahteen identtiseen puoliskoon, joissa molemmissa on kolme erillistä osaa. Nämä ns. ”matriisit” mahdollistavat suuren laajentumiskertoimen omaavien kappaleiden valmistamisen. Muotti on rakennettu siten, että sillä pystytään muovaamaan kahta erikokoista kartiota yhdellä työskulla kaksi kappaletta kumpaakin. Kartioiden maksimi koot ovat $\varnothing 101,5$ mm x 160 mm ja $\varnothing 160$ mm x 125mm, joista voidaan leikata myös edellä mainitut standardikokoiset keskeiset supistuskartiot. Tämä valmistusvaihtoehto on perusteltua silloin, kun molempia supistuskartioita tarvitaan samat määrät. Molemmat koot valmistuvat yhdellä työkalulla, joten työkaluvaihtoja ei tarvitse suorittaa.

Kuvassa 13 on esitetty OLG-53 -työkalulla valmistettavan tuplakaksoiskartion 3D -malli. Lopputuotteet rajataan leikkaamalla halutut kartiot valmiista työkappaleesta.



Kuva 13. Tuplakaksoiskartio (Pelimanni 2009.)

Hydro+ -projektissa skannattiin 3D-skannerilla tuplakaksoiskartiolyökalu. Kuvassa 14 on esitetty 3D -skannauksella generoitu 3D -malli muotista mittatietoineen ja kuvan oikeassa laidassa OLG-53 -työkalun muottipuolisko.



Kuva 14. Skannattu muotti ja sen mitat (Joutsenvaara 2009.)

5.4 Kartioputken muovauksen tärkeimmät parametrit

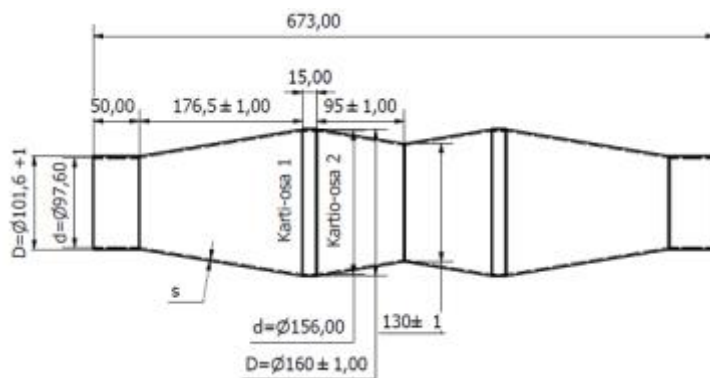
Ennen varsinaista työtä selvitettiin kappaleessa 3 esitetyn kuvion 7 mukaisesti muovaukseen vaikuttavia tekijöitä. Muovauksen laskennalliset parametrit olivat siten ensimmäisten valmistustestien lähtökohtana. Näitä arvoja tarkennettiin testitulosten perusteella. Koska työkalu oli jo valmiina, ei työkalun parametreihin kiinnitetty huomiota.

Putkiaihiön hydromuovauksen teknologisten parametrien laskentaa on tarkasteltu kappaleessa 3. Teoreettinen tarkastelu on välttämätön, jotta saadaan muovaukseen lähtöti-

lanne materiaalin ominaisuuksien ja aihion mittojen osalta. Laskennallisia arvoja tarkennetaan sitten testien perusteella.

5.4.1 Materiaalilavuuksien tasapaino

Tuplakaksoiskartion putkiaihion pituus L_0 määriteltiin kappaleessa 3 esitetyn suunnitelun mallin ja aihion materiaalilavuuksien tasapainon perusteella. Kuviossa 15 on esitetty lähtötilanne, jossa on annettu hydromuovaamalla valmistettavan tuplakaksoiskartion mitat.



Kuvio 15. Valmistettavan kaksoiskartion mitat (Pelimanni 2009.)

Kuvan 14 -mukaisen tuotteen materiaalitasapainoa arvioitiin laskemalla ensin lopputuotteen materiaalilavuus, jonka jälkeen selvitettiin tarvittavan aihion materiaalilavuus, joka tässä tapauksessa oli halkaisijaltaan $\text{Ø } 101,6 \text{ mm}$:n ja seinämävahvuudeltaan 2 mm :n kokoinen putki. Käytännössä lopputuloksena oli tarvittavan putkiaihion karkea pituus L_0 . Aihion kokoa olisi voitu arvioida myös kappaleen lyhenemiseen perustuvilla matemaattisilla malleilla, mutta tässä yhteydessä niitä ei käsitellä.

Laskenta aloitettiin muodostamalla katkaistun kartion puolikkaan ulko- ja sisäseinämän nousua kuvaavat suorien yhtälöt. Suorien kulmakerroin (k) saatiin yhtälöstä:

$$k = \frac{r - r_0}{h_k} \quad (21)$$

missä

r on kartion isomman ympyrän säde

r_0 on kartion pienemmän ympyrän säde

h_k on kartion pituus

Nousevan suoran ratkaistun muodon yhtälön perusteella voitiin muodostaa funktio:

$$fk(h) = kh + r_0 \quad (22)$$

missä

h on pituuden muutos

Sijoittamalla yhtälö (21) yhtälöön (22), saatiin kartion nousua kuvaava funktio, joka on muotoa:

$$fk(h) = \left(\frac{r - r_0}{h_k} \right) h + r_0 \quad (23)$$

Edelleen sijoittamalla yhtälöön kartion ulkomitat saatiin muodostettua kummankin kartion ulkomittojen muutosta kuvaavat suoran yhtälöt:

$$fk1(h) = \left(\frac{80 - 50,6}{176,5} \right) mm \times h + 50,6 mm \quad (24)$$

missä

$fk1(h)$ on kartio-osan 1 ulkomitan noususuora

h on pituuden muuttuja

$$fk2(h) = \left(\frac{80 - 65}{95} \right) mm \times h + 65 mm \quad (25)$$

missä

$fk2(h)$ on kartio-osan 2 ulkomitan noususuora

Vastaavasti sisämitan nousua kuvaavat yhtälöt saatiin vähentämällä ulkomitoista kappaleen seinämävahvuus:

$$fk_s(h) = \left(\frac{(r - t) - (r_0 - t)}{h_k} \right) h + (r_0 - t) \quad (26)$$

missä

t on putken seinämävahvuus

$fk_s(h)$ on sisämitan nousufunktion yhtälö

Sijoittamalla ulkomitat ja t:n arvo funktioon, voitiin muodostaa sisäpinnan noususuorien yhtälöt:

$$fk1_s(h) = \left(\frac{(80-2) - (50,6-2)}{176,5} \right) mm \times h + (50,6-2)mm \quad (27)$$

missä

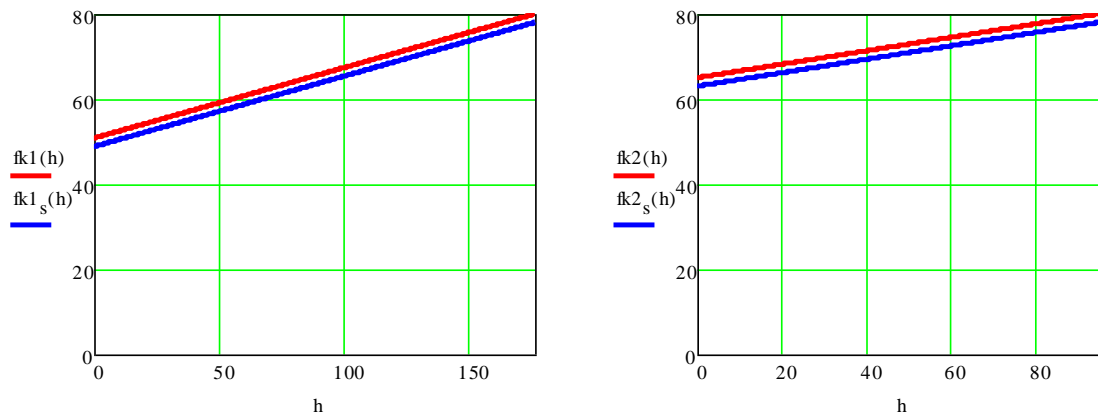
$fk1_s(h)$ on kartio-osan 1 sisämitan noususuora

$$fk2_s(h) = \left(\frac{(80-2) - (65-2)}{95} \right) mm \times h + (65-2)mm \quad (28)$$

missä

$fk2_s(h)$ on kartio-osa 2 sisämitan noususuora

Kuviossa 16 on MathCad-ohjelmistolla muodostettu grafiikka kummankin kartion ulko- ja sisäpinnan laajenemisesta.



Kuvio 16. Kartioiden nousukäyrät (MathCad-grafiikka)

Pyörähdyskappaleen tilavuuden laskusäännön mukaisesti saadut suorat pyöräytettiin akselin h ympäri. Tällöin muodostui 2 pyörähdyspintaa, jotka eivät leikkaa toisiaan ja joiden rajaamat tilavuudet voitiin laskea määrätyn integraalin avulla yhtälöllä:

$$V_k = \pi \int_0^{h_k} (fk(h))^2 dh \quad (29)$$

Materiaalitulavuus saatiin sitten vähentämällä ulkopinnan rajaama tilavuus sisäpinnan rajaamasta tilavuudesta. Tällöin kartio-osan 1 ($V1_{mat}$) ja kartio-osan 2 ($V2_{mat}$) materiaalitilavuudet olivat:

$$V1_{mat} = \left[\pi \int_0^{176,5} (f1(h))^2 dh - \pi \int_0^{176,5} (f1_s(h))^2 dh \right] mm^3 = 142837 mm^3$$

$$V2_{mat} = \left[\pi \int_0^{95} (f2(h))^2 dh - \pi \int_0^{95} (f2_s(h))^2 dh \right] mm^3 = 85357 mm^3$$

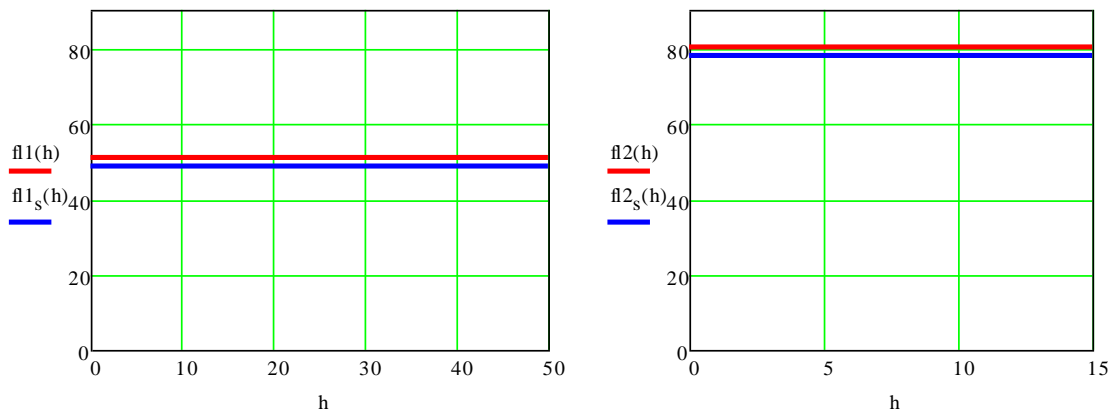
OLG-53 -työkälulla tuplakaksoiskartiota valmistettaessa oli aihiomitoituksessa otettava huomioon myös työkappaleen päihin ja kartio-osien väliin jäävät lieriöt. Lieriöiden materiaalitilavuus laskettiin samalla periaatteella muodostamalla suoran yhtälöt $f1$ ja $f2$ lieriösille:

$$f1(h) = 50,8 mm$$

$$f1_s(h) = 50,8 mm - 2 mm$$

$$f2(h) = 80 mm$$

$$f2_s(h) = 80 mm - 2 mm$$



Kuvio 17. Lieriöiden suorat (MathCad-grafiikka)

Edelleen pyöryttämällä myös lieriöt akselin h ympäri saatiin laskettua lieriösien materiaalitilavuus helposti integroimalla:

$$Vl1_{mat} = \left[\pi \int_0^{50} (f1(h))^2 dh - \pi \int_0^{50} (f1_s(h))^2 dh \right] mm^3 = 31290 mm^3$$

$$Vl2_{mat} = \left[\pi \int_0^{15} (f2(h))^2 dh - \pi \int_0^{15} (f2_s(h))^2 dh \right] mm^3 = 14891 mm^3$$

Saadut tilavuudet laskettiin yhteen ja kerrottiin kahdella (2). Näin saatiin tarvittava materiaalitilavuus muovattavalle putkiaihiolle.

$$Vk_{kok} = 2 \times (Vk1_{mat} + Vk2_{mat} + Vl1_{mat} + Vl2_{mat}) = 548751 mm^3$$

Aihion teoreettinen mitta voidaan määrittää kaavalla:

$$L_0 = \frac{Vk_{ko}}{\left(\pi \times \frac{D^2}{4} \right) - \left(\pi \times \left(\frac{d^2}{4} \right) \right)} \quad (30)$$

missä

D on aihion ulkohalkaisija

d on aihion sisähalkaisija

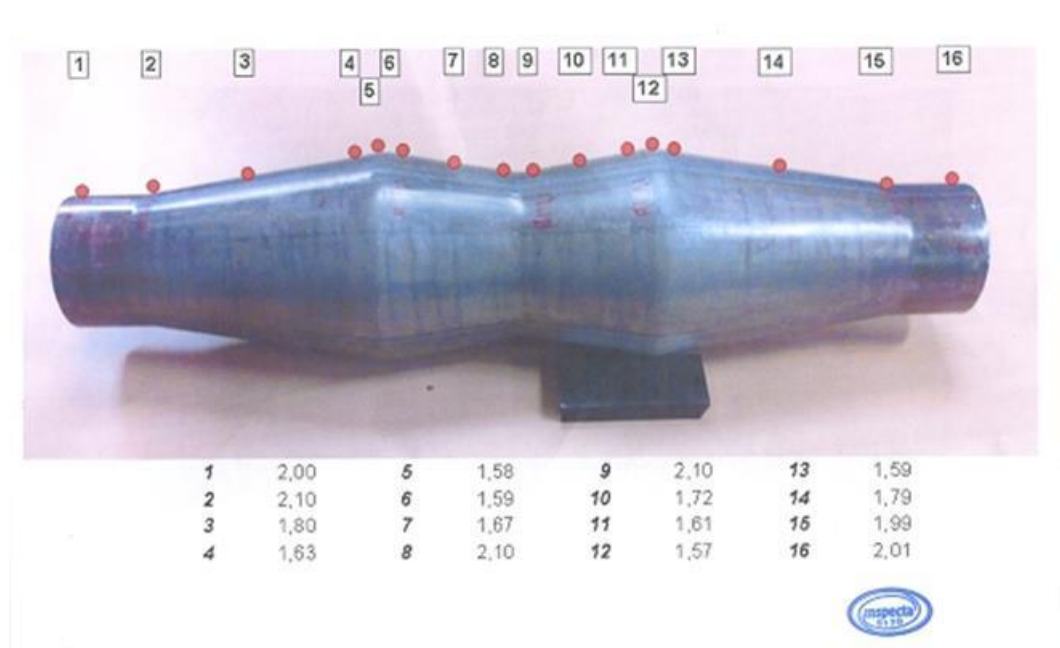
Käytettävän putkiaihion halkaisijan mitat ja tarvittava materiaalitilavuus sijoitettiin kaavaan (30), jolloin saatiin putkiaihion pituus.

$$L_0 = \frac{548751 mm^3}{\left(\pi \times \frac{(101,6 mm)^2}{4} \right) - \left(\pi \times \left(\frac{(101,6 mm - 4 mm)^2}{4} \right) \right)} \approx 877 mm$$

Bolkisevin, Gretsovin ja Semibratovin kirjassa esitettyjen testien perusteella hydro-muovauksessa tapahtui seinämävahvuuksien vaihtelua valmiissa työkappaleessa. Hydro + -projektin v:n 2009 testien perusteella seinämävahvuus oli kartiokappaleen muovauksessa laajentumiskertoimen K_D ollessa yli 1,5 (valmiin kappaleen suurimman kohdan halkaisijan ja aihion halkaisijan suhde) keskimäärin 9 % pienempi verrattuna aihion seinämävahvuuteen. Seinämävahvuuden muutoksista oli myös laskennallisia menetelmiä, mutta karkeallakin arvioilla päästiin hyvään lopputulokseen. Venymistä tapahtui merkittävästi suurimman laajennuksen alueella. Kartioiden lieriömäisillä rajapinta-

alueilla tapahtui puolestaan hieman tyssäystä. Valmiin kappaleen materiaalitylisyys voitiin näin arvioida hieman pienemmäksi ja pienentää n. 9 % - 13 % saadusta tuloksesta. (Gretsov 2009)

Edellä olevan laskelman mukainen aihion koko olisi näin ollen ≈ 795 mm - 810 mm, joka oli muovaustesteissäkin käytetyn aihion mitta. Kuvassa 15 on esitetty Hydro+ -projektissa 2009 Inspectalla tehdyt seinämävahvuuden mittaukset muovatussa tuplakaksoiskartiosta.



Kuva 15. Seinämävahvuuksien vaihtelut muovatussa kartioputkessa (Inspecta 2009)

Materiaalitasapainoa voidaan arvioida myös empiirisesti. Esimerkiksi Autodeskin Inventor -mallinnusohjelmalla kappaleiden 3D -mallien avulla, saadaan luodun mallin ominaisuustiedoista kappaleen tilavuus helposti.

5.4.2 Muotin sulkuvoima

Kappaleessa 3 esitetyn kaavan 19 avulla arvioitiin muotin sulkuvoiman tarve perustuen prosessin maksimiarvoihin. Suurin käytettävä putken sisäpaine oli arvioitu olevan kalibrointivaiheessa n. 100 MPa:a. Kaavan 19 mukaan laskettiin teoreettinen maksimi sulkuvoima.

$$F_c = \left[100MPa + \frac{1,15 \times 426MPa \cdot 2mm}{101,6mm - 2 \times 2mm} \right] \cdot 101,6mm \times (573 - 158)mm = 4621kN$$

Taulukosta 5 katsomalla pääsylinterin sulkuvoima 4621 kN vastaa pääsylinterin neste-painekammion arvoa ≈ 50 baaria, joten tämä arvo asetetaan hydromuovauskoneen sulkuvoiman arvoksi.

5.4.3 Muovauspaine putken sisällä

Taulukon 4 mukaan muovattavan materiaalin myötölujuus muokkaamattomana on 330 MPa. Muovattavan putken vahvuus on 2 mm ja halkaisija 101,6 mm. Teoreettinen myötöraajapainearvio kyseisen putken sisällä on kappaleessa 3 esitetyn kaavan 14 mukaan

$$\frac{2 \times 330Mpa \times 0,87 \times 2mm}{97,6mm} = 12MPa = 120bar$$

OLI-24-koneen ohjausparametreihin voitiin asettaa myötöraajapaineeksi 120 baaria. Materiaalin myötöraja on tärkeä aloitusparametri OLI-24-koneen ohjausarvona.

Muodonmuutoslujuuden teoreettinen kehittyminen arvioitiin kaavan 15 (Hollomonin yhtälö) mukaisesti. Muovatus putken maksimihalkaisija oli 160 mm ja aihion halkaisija oli 101,6 mm. Suurin K_d :n arvo saatiin kaavan 16 mukaisesti.

$$K_{d\max} = \frac{160mm}{101,6mm} = 1,57 \approx 1,6$$

Suurimmaksi todellisen venymän arvoksi $\epsilon_{t\max}$ saatiin kaavan 17 mukaisesti.

$$\epsilon_{t\max} = \ln(1,6) \approx 0,47$$

Painearvioinnissa käytettiin muokkauslujittumiseksponenttin n arvoa 0,53 ja muokkauslujittumiskertoimen arvoa 1550 (Joutsenvaara 2009). Maksimaalisella venymällä $K_{d\max}$ saatiin siten muodonmuutosjännityksen maksimiarvo kaavan 15 mukaisesti.

$$\sigma_{s\max} = 1550 \times 0,47^{0,53} \approx 1039 \text{MPa}$$

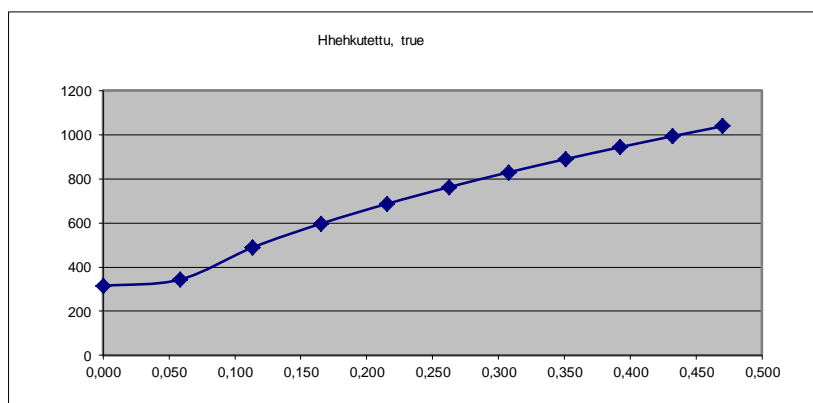
Muodonmuutoslujuutta vastaava putken maksimi sisäpaine 60 % venymällä ennen varsinaista kalibrointivaihetta ($K_d=1,6$) arvioitiin puolestaan kaavan 14 avulla.

$$P_{i\max} = \frac{2 \times 1039 \text{MPa} \times 0,87 \times 2 \text{mm}}{(101,6 \text{mm} - 2 \times 2 \text{mm})} \approx 37 \text{MPa} \approx 370 \text{bar}$$

OLI-24 -koneen ohjausjärjestelmään syötetään muovaustapahtuma hetkellisen venymän K_d perusteella jaettuun kymmeneen (10) eri vaiheeseen. Taulukossa 5 on esitetty muovauksen etenemisen teoreettiset sisäpaineet putken venymän eri vaiheissa ja kuviossa 18 on vastaava jännitysvenymäkäyrä.

Taulukko 5. Painearviointia (Joutsenvaara 2009)

Stress-strain kuvaajasta (TRUE)					
$\epsilon_{\text{eng}} (\%)$	ϵ_{true}	σ_{eng}	σ_{true}	Painearvio(BAR)	
0,01 %	0,000	330	330	112	
6,00 %	0,058	324	344	123	
12,00 %	0,113	436	489	174	
18,00 %	0,166	506	597	213	
24,00 %	0,215	554	687	245	
30,00 %	0,262	587	763	272	
36,00 %	0,307	610	830	296	
42,00 %	0,351	626	889	317	
48,00 %	0,392	638	944	336	
54,00 %	0,432	645	993	354	
60,00 %	0,470	649	1039	370	



Kuvio 18. Jännitysvenymäkäyrä (Joutsenvaara 2009)

5.4.4 Aksiaalisylinterien voima

Kappaleessa 3 esitetyn kaavan 18 mukaisesti muovaustapahtuman vaatima aksiaalisylinterien maksimi voima oli 1039 MPa:n jännityksellä ja 370 barin sisäpaineella

$$F_a = \frac{1039 \text{ MPa}}{9,81} \times \pi \times (48,8 \text{ mm})^2 + 37 \text{ MPa} \times \pi (48,8 \text{ mm} - 2 \text{ mm})^2 \approx 1135 \text{ kN}$$

Teoreettiset aksiaalivoimat laskettiin kaavan 18 mukaisesti kuten putken sisäpaineen arvot hetkellisen venymän kertoimen K_d arvoilla. Aksiaalivoimien arvot syötettiin OLI-24-koneen ohjauksjärjestelmään kuten sisäpaineen arvotkin. Laskennalliset aksiaalivoimat on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Arvioidut aksiaalivoimat (Pelimanni 2010)

σ_{true} (MPa)	Painearvio (bar)	Aksiaali voiman tarve (kN)
330	112	356
344	122	375
489	174	534
597	213	653
687	245	750
763	271	833
830	296	907
889	317	972
944	336	1031
993	354	1085
1039	370	1135

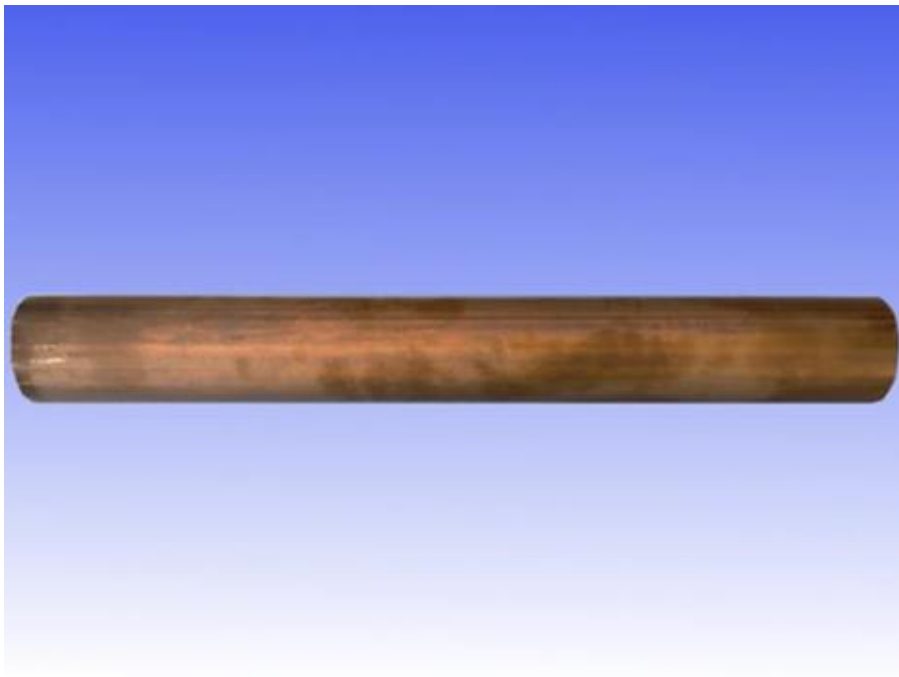
5.5 Muovauksessa käytetty putkiaihio

Muovauksessa käytettiin materiaalista 1.4318 valmistettua putkea. Työkappale (putki) hehkutettiin 1050° C lämpötilassa 5 minuuttia 3 m:n salkoina Outokummun Tornion tehtaiden lämpökäsittelyuunissa ennen muovausta. Taulukossa 7 on kappaleen perusaineen mekaaniset ominaisuudet.

Taulukko 7. Materiaalin 1.4318 mekaaniset ominaisuudet

EN/AISI/Outokumpu 1.4318/301LN/4318	0,2 %- raja RP _{0,2} N/mm ²	1 %-raja RP _{1,0} N/mm ²	Murtolujuus RP _m N/mm ²	Murtovenymä % A ₅
Kuumavalssattu (raakalevy)	330	370	630	35
Kylmävalssattu levy ja nauha	350	380	650	40
Hehkutettu	250	280	600 - 950	40
Outokumpu tyypilliset arvot	360	395	765	47
EN minimiarvot	350	380	650	40
ASTM minimiarvot	240	-	550	45

Muovattavat putkiaihiot leikattiin vannesahalla 800 mm:n mittaiseksi työkappaleeksi. Työkappaleen pinta oli hehkutuksesta johtuen värjäytynyt ruskeaksi. Kuvassa 16 on esitetty leikattu putkiaihiö.



Kuva 16. Muovattava putkiaihiö

5.6 Kartion valmistuksen työprosessi

Tuplakaksoiskartion työprosessi aloitetaan asettamalla muovattava putkiaihiio OLG-54 muotin alaosaan. Muottipuoliskot suljetaan ja putkiaihion avoimet päät tiivistetään painamalla aksiaalisylinterien kartiomaiset männäntäpät putken päihin. Putkiaihion sisälle johdetaan neste (OLI-24-koneessa öljy), jonka painetta nostetaan aihion sisällä, kunnes saavutetaan sellainen painetaso, että putken seinämissä alkaa tapahtua venymistä (myötöraja). Tämän jälkeen muotin sulkuvoimaa lisätään ja paineistettua putkiaihiota puristetaan hydraulisesti molemmista päistä tarkoin määritellyillä voimaparametrilla. Samanaikaisesti putken nurjahtamisen ja rypistymisen estämiseksi on aihion sisällä olevan nesteen painetta nostettava tarpeen mukaan. Aksiaalisylinterien puristusvoimaa lisätään lähes koko prosessin ajan, jotta muovaus etenisi materiaalin lujittumisen, kitkan ja nesteen paineen aiheuttaman vastavoiman lisääntyessä. Muovautuneen putken koskettaessa muotin seinämiä lähes kauttaaltaan, suoritetaan ns. kalibrointivaihe, jolloin paine nostetaan sille tasolle, että putken seinämät puristuvat tiivistä muottia vasten, jolloin työkappale on valmis. Lopuksi nesteen paine lasketaan turvalliselle tasolle, aksiaalisylinterien männäntäpät vedetään sisään, muotti avataan ja työkappale poistetaan muotista.

OLI-24-kone voidaan ohjelmoida suorittamaan edellisessä kappaleessa mainitut työvaiheet automaattisesti. Laskennalliset ohjausparametrit syötetään koneen ohjausohjelmiston muistiin ohjauksen käyttöliittymän kautta, jonka jälkeen muovausprosessi voidaan käynnistää.

Taulukon 4 mukaisten kartioiden tekemiseksi rajataan muovattu tuplakaksoiskartio oikeista kohdista. Kuvassa 17 on esitetty rajauskohdat ja rajatut kartiot.

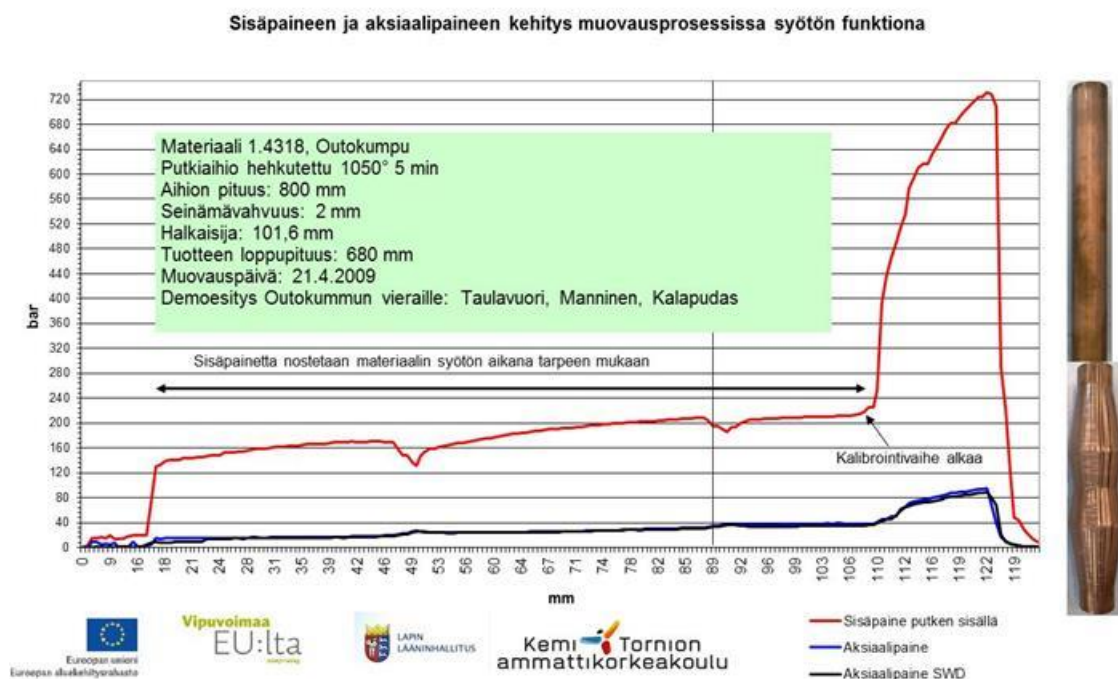


Kuva 17. Valmis tuplakaksoiskartio ja kartioaihiosta rajatut keskeiset kartiot

5.7 Muovaustietojen kerääminen

OLI-24-hydrumuovauskoneen ohjausjärjestelmä tallentaa muovausprosessin aikana kammiopaineet ja akselien siirtymätiedot muistiin. Näiden tietojen avulla voidaan tehdä analyyseja ja muuttaa tarvittaessa laskennallisia ohjausparametreja analyyysien perusteella.

Muovaustiedot taltioituvat CSV-tiedostoksi, joka voidaan avata mm. MsExcel- taulukkolaskenta ohjelmistolla. Saatuja numeerisia tietoja voidaan edelleen käsitellä ja muodostaa muovauksen etenemistä kuvaavaa grafiikkaa. Kuviossa 19 on esitetty valmistetun tuplakaksoiskartion aksiaalisylinterien kammioiden paineiden (voimien) ja putken sisäpaineen kehitys muovauksen aikana materiaalivirtauksen funktiona.



Kuvio 19. Painearvojen muutos materiaalivirtauksen funktiona (Pelimanni 2010)

6 LEVYAIHION HYDROMUOVAUS OLI-24 KONEELLA

Jaloterästudiolla sijaitsevalla kansainvälisestikin suhteellisen voimakkaalla ja monipuolisella hydromuovauskoneella on testattu pääasiassa putkimaisten kappaleiden muovattavuutta. Laitteen mukana tulleet työkalut ovat putkimaisten kappaleiden muovaukseen tarkoitettuja ja niin ikään myös ohjausjärjestelmä on suunniteltu pelkästään edellä mainituille työkaluille. Laitetta ei ole koskaan aiemmin testattu levymäisten kappaleiden hydromuovaamisessa, joka tekee testauksesta varsin haastavan nykyisellä ohjausjärjestelmällä ilman ohjelmistoon tehtäviä muutoksia.

Hydromuovausta ja sen soveltuvuutta ohutlevyjen muovaamiseen testattiin Torniossa jaloterässtudiolla MLab/Hydro+ -projektin yhteydessä. Tutkimuksessa etsittiin jaloterästudiolla olevalle hydromuovauskoneelle uusia sovellusalueita putkimaisten kappaleiden muovausteknologian rinnalle. Menetelmän käytettävyyden ja kustannustehokkuuden arvioimiseksi, testattavat tuotteet olivat sellaisia, joita valmistetaan ns. perinteistä menetelmää käyttäen tai sellaisia, joita ei voida lainkaan valmistaa perinteisillä muovaustekniikoilla.

Tässä kohdassa on esitetty jaloterässtudiolla olevan hydromuovauskoneen käyttöä levyaihion muovauksessa olemassa olevalla ohjausjärjestelmällä. Esimerkkitapaukseksi on valittu pullistustesti. Koneella on testattu myös ohutlevymuovaussovelluksena polttoainetankin puoliskon ja mittatarkan levykannen valmistamista hydromuovausteknologialla. Kappaleessa kahdeksan on esitetty testattujen tuotteiden kuvat.

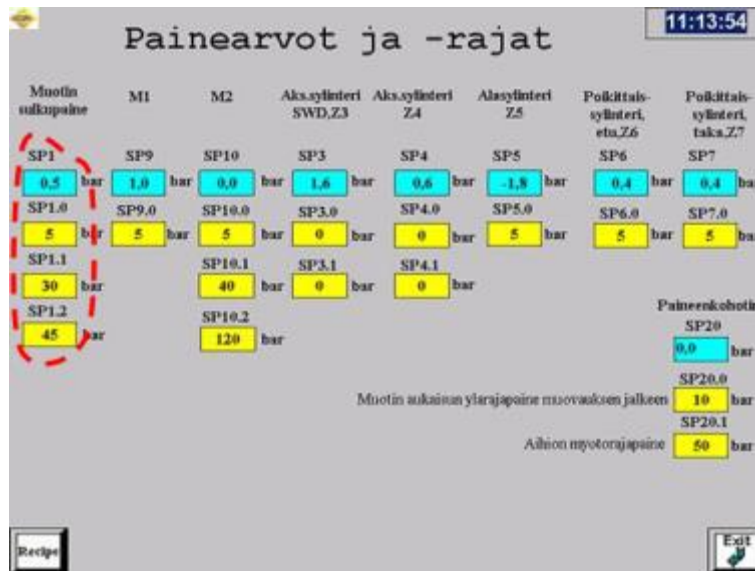
6.1 Nykyisen ohjausjärjestelmän käyttö levyaihion muovauksessa

Ohjausjärjestelmän muuttamiseksi toimimaan levykappaleen muovauksessa, tuli huomioida seuraavat asiat:

- pääsylinterin ohjaus ja sen toimiminen levynpitimenä/muotin sulkijana
 - o pidätysvoiman/sulkuvoiman ohjaus
 - o pääsylinterin rajojen asettaminen
- nestepaineen nostaminen levyn muovaamiseksi
 - o täyttöjärjestelmän ja paineenkohottimen ohjaus
- aksiaalisylintereiden toiminnan estäminen

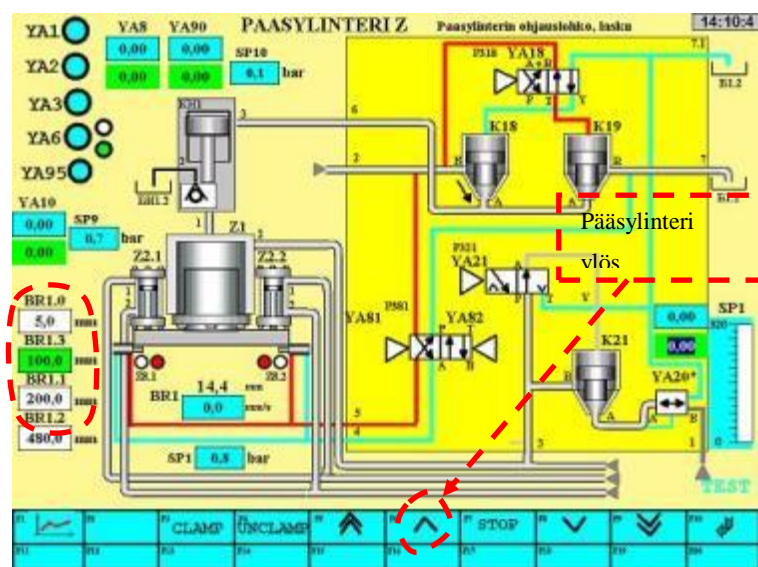
- aksiaalisyntereitten ohjaus
- aksiaalisyntereiden rajat ja muut parametrit
- ohjauksissa tarvittavien rajojen ja nopeuksien ohjaus
- prosessin käynnistäminen
- prosessin lopettaminen

Pääsylinterin sulkuvoima asetetaan valitsemalla päävalikosta painearvojen asetusikkuna. Asetetaan pääsylinterin maksimi paine arvo kohtiin SP 1.1 ja SP1.2. Paine nousee vaiheittain ensin arvoon, joka on annettu kohdassa SP1.1 ja täyttämisen aikana lopulliseen arvoonsa, joka on annettu kohdassa 1.2. Kuvassa 18 on esitetty paineen asetusikkuna, jossa maksimipaineeksi on asetettu 45 baria, joka vastaa n. 4450 kN:n sulkuvoimaa.



Kuva 18. Painearvojen asetusikkuna

Muotin korkeus poikkesi ”normaalista”, joten pääsylinterille oli asetettava uudet liikerajat. Liikerajat voidaan asettaa esimerkiksi suoraan pääsylinterin ohjaus/hydrauliikkakaavio -ikkunassa. Kuvassa 19 kohtaan BR1.2 on asetettava maksimi alarajaksi arvo, joka ylittää hieman sylinterin aseman, silloin kun vetorengas koskettaa alustaansa. Testeissä käytettiin arvoa BR1.2 = 473 mm - 480 mm.



Kuva 19. Pääsylinterin hydraulikkakaavio ja ohjausikkuna

Väliaineen paine nousee kun täyttöjärjestelmä aloittaa öljyn pumppaamisen (putkimaisessa kappaleessa aihion täytön) levynpidätysvoiman saavuttaessa asetusarvon. Kun nesteen paine saavuttaa painekeytimellä esiasetetun rajan, käynnistyy paineen kohotin, joka huolehtii paineen nostamisesta painerajan jälkeen.

Levyaihioiden muovauksessa ei tarvita aksiaalisylintereitä. Ohjausjärjestelmä on suunniteltu kuitenkin siten (putkimaisille kappaleille), että ne joudutaan jossakin muodossa ottamaan mukaan prosessiin. Vaarana on aksiaalisylintereiden liikkuminen siten, että ne rikkovat työkalun. Testitapauksissa aksiaalisylinterien ohjausparametrit säädettiin siten, että sylinterit eivät varsinaisesti hankaloittaneet testejä.

Kuvassa 20 on prosessinäyttö, jossa näkyvät sylintereille annetut liikerajat. Testeissä asetettiin rajat BR2.3 ja BR3.3 arvoon 103,0. Sylintereiden liike ei kuitenkaan näytä pysähtyvän automaatiotilassa (vrt. manuaalijajo) näihin rajoihin vaan määräävänä prosessiparametrina näyttäisi olevan parametri ”L1”, joka on putkiaihion muovauksessa putken loppupituus. Kuvan 20 tilanne on siitä, kun aksiaalisylinterit ovat pysähtyneet. Tilanteessa ikkunassa näkyy arvo ”Parth Length”, joka on sama kuin L1 (1 mm.n ero johtuu siitä, että männäntappeja on joskus jouduttu lyhentämään, mutta korjausta ei ole tehty ohjausohjelmaan.) Aksiaalisylinterit liikkuvat kumpikin 25 mm prosessin aikana eli pysähtyvät rajaan L1. Forma-ikkunasta nollattiin asetusarvot ”Forming/ Z3/Z4” ja ”Press”

- Täyttöjärjestelmä aloittaa väliaineen pumppaamisen ja muovauspaine nousee, jolloin myös levy alkaa muovautua.

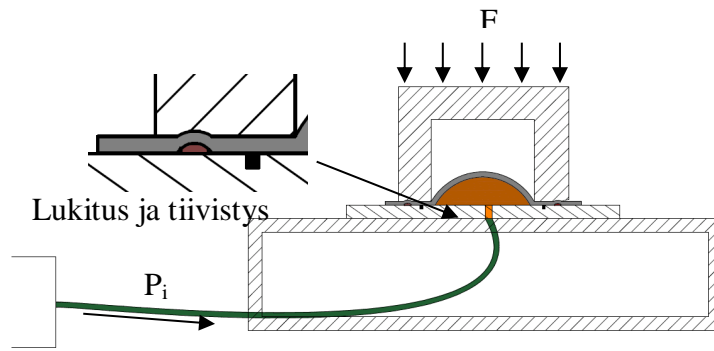
Nykyisellä ohjauksella muovauspaine nousee kunnes, operaattori pysäyttää prosessin painamalla ”CYCLE STOP”-painiketta. Jos vuotoja ei ole, väliaineessa vallitsee edelleen saavutettu muovauspaine. Kuvassa 20 näemme pysäytyksen jälkeisen tilan, jolloin muovauspaine on 52,8 baaria. Tämän paineen vapauttamiseksi menetellään seuraavasti:

- Valitaan kytkimestä moodi: ”ADJUSTMENT”.
- Siirrytään pääsylinterin ohjausikkunaan.
- Painetaan sekunnin murto-osan verran pääsylinterin ylösnostopainiketta (KUVA 19).
- Korkea paine pääsee purkautumaan syntyneestä pienestä raosta työkappaleen ja alatason välistä.
- Paineen purkamisessa pitää noudattaa erityistä varovaisuutta, koska nestesuihku on hyvin voimakas ja voi etuverhoon osuessaan roiskuttaa muovausnestettä ympäristössä olevien henkilöiden päälle.
- Paineen vapauttamisen jälkeen, voidaan muotti avata ja työkappale poistaa.

6.2 Pullistustesti

Muovaustestejä suoritettiin 28.7.2010 – 3.8.2010 -välisenä aikana. Testeillä tutkittiin hydraulisen levynmuovausmenetelmän soveltuvuutta hydromuovauskoneella.

Muovaus tapahtui painamalla ylätyökalu tiiviisti tiivistelevyn päälle asetettua levyä vasten. Paineistettu neste johdettiin levyn alapintaan, jolloin levy muovautui puolipallon muotoiseksi. Kuviossa 20 on esitetty työkalun toimintaperiaate.

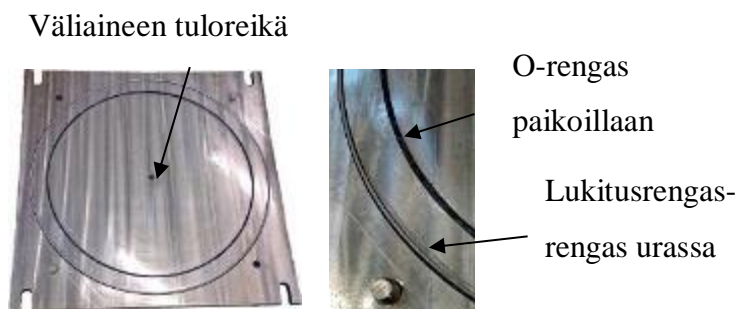


Kuvio 20. Työkalun toimintaperiaate (Pelimanni 2010)

Testeissä käytettiin 20 mm:n rakenneteräslevyistä tehtyä alustaa, tiivistelevyä ja lie-riönmallista ylätyökalua. Tiivistelevyssä oli lukitusrengas materiaalin virtauksen estä-miseksi, jolloin saatiin puhdas venytysmuovaus. Nesteen johtamiseen käytettiin 780 MPa:n paineen kestävää hydraulikkaletkua. Muovausneste saatiin vasemman aksiaa-lisylinterin männän korkeapainekammioon johtavan kanavan kautta. Kuvissa 22 - 24 on esitetty työkalujen komponentit.



Kuva 22. Alataso ja muottirunko

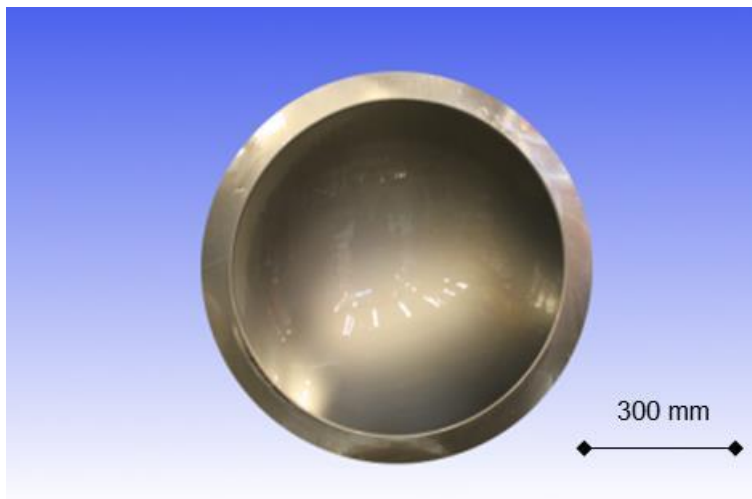


Kuva 23. Tiivistelevy



Kuva 24. Öljynsyöttöaukko ja hydraulikkaletku

Muovaus suoritettiin kuvion 22 prosessin mukaisesti johtamalla neste levyaihion alle. Kuvassa 23 esitetty muottirunko painettiin tiiviisti levyä vasten. Levy muovautui puolipallon muotoiseksi pyörähdyssymmetrisen pidätyslevyn ansiosta. Kuvassa 25 on pullistustestityökalulla muovattu puolipallo.



Kuva 25. Hydromuovattu puolipallo

6.3 Laitteiston kehittäminen toimivammaksi levyn hydromuovauksessa

Koska laitteisto on alun perin suunniteltu pelkästään putkimaisten kappaleiden hydromuovaukseen, olisi koneen toimintaa kehitettävä edelleen. Pienillä ohjaukseen ja käyttöliittymään tehdyillä muutoksilla levyaihioden hydromuovaus olisi sujuvaa ja paremmin hallittavissa.

Levyn hydromuovaukseen tarkoitettuun ohjaukseen riittää varsin yksinkertainen käyttöliittymä. Tarvittavat ohjausparametrit ovat:

- nesteen paineen hallittavuusparametrit
 - o maksimipaineen asetus
 - o turvarajan asetus
- muotin sulkuvoiman parametrit
 - o sulkuvoiman asetus
 - o sulkuvoiman turvaraja-asetus
- prosessin aloittaminen
- prosessin lopettaminen

Nesteen paineen ohjaukseen riittäisi käyttöliittymässä muovauksen maksimipaineen ja turvarajan ohjausarvot. Nykyisin levynmuovauksen maksimipaine nousee kunnes operaattori pysäyttää toiminnon. Maksimipaine ei ole hallittavissa riittävän hyvin ja vie prosessissa turhaa energiaa ja on myös turvallisuusriski.

Muotin sulkuvoima voidaan asettaa olemassa olevassakin järjestelmässä halutulle tasolle. Sulkuvoiman hallittavuus lopetustilanteessa on kuitenkin ongelmallista. Levy-muovausjärjestelmään tulisikin asettaa muovauksen lopettamisen ohjaustoiminnot sekä ”pehmeä” keskeytystoiminto tilanteissa, jossa muovaus tulisi jostakin syystä lopettaa ennen prosessin päättymistä.

Tällä hetkellä levyn muovausprosessissa ovat mukana myös aksiaalisylinterit. Niiden liike on rajoitettu pieneksi. Ne joudutaan kuitenkin ajamaan kotiasemaan, ennen uutta muovaustapahtumaa. Joissakin levy-muovaussovelluksissa voidaan tarvita myös kappaleen ulkopuolisia voimia, joten levyaihion hydromuovauksen ohjauslogiikassa tulisi näiden kuten myös poikittaissyylinterien käyttö liittää valinnaiseksi toiminnoksi.

Viime vuosien kokemusten perusteella levy-mäisten kappaleiden hydromuovaussovellusideoita on esiintynyt huomattavasti enemmän kuin putken hydromuovausta. Tämä tukee sitä ajatusta, että jaloterässtudiolla olevaa hydromuovauskonetta tulisi kehittää edelleen varsinkin levy-mäisten kappaleiden syväveto ja hydromuovaussovelluksiin.

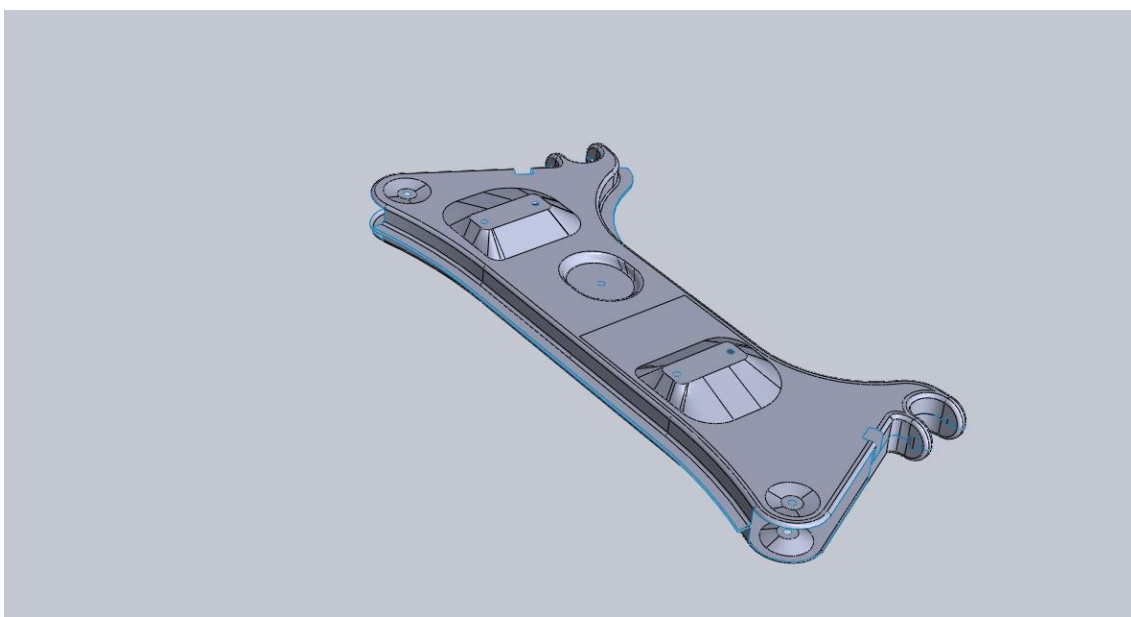
7 AUTON APURUNGON MUOVAUS (PROTOTYYPPI)

Vuonna 2012 BFCC-projektin yhteydessä muovausteknologiaa testattiin erilaisilla tuotteilla ja erilaisilla materiaalilaaduilla. Projektin yhteydessä testattiin ruostumattoman teräksen lisäksi myös muita metallilaatuja kuten kuvassa 58 esitetty jousilautasen kuppi, joka valmistettiin Ruukin sinkkipinnoitetusta lujasta HX420LAD-ohutlevymateriaalista.

Tässä osassa on esitetty laakean kappaleen valmistusta lujitetusta ruostumattomasta teräksestä. Kappaleet valmistettiin hydromuovauskoneella muottiin painamalla.

7.1 Muovattavat kappaleet

Muovattavat kappaleet olivat auton apurungon osat. Apurunko koostui kahdesta osasta, jotka liitettiin laipoista liimaamalla ja pistehitsauksella. Kuvassa 26 on 3D -malli valmistettavasta tuotteesta.



Kuva 26. Alkuperäinen malli valmistettavasta tuotteesta

Alkuperäistä 3D mallia muokattiin valmistusteknisistä syistä siten, että reiät täytettiin ja laippaosa jatkettiin kummankin valmistettavan osan ympäri. Mallia muutettiin myös siten, että ja yläpuolen suppiloiden välissä oleva kuppi poistui lopullisesta tuotteesta.

Kuvassa 27 on esitetty apurungon yläosa. Mallissa laipat ovat koko tuotteen ympärillä ja kiinnitysreiät on täytetty muotin generoimista varten.



Kuva 27. Muokattu yläpuolen malli

Kuvassa 28 on vastaavasti alaosan muokattu 3D -malli. Mallissa on niin ikään laipat koko kappaleen ympärillä. Alaosan painettava pohjaprofiili on hieman erilainen kuin yläosassa.



Kuva 28. Muokattu alapuolen malli

7.2 Materiaali

Aihiomateriaalina käytettiin Outokummun Tornion tehtailla valmistettua lujitettua 2 mm:n ruostumatonta austeniittista (1.4301 TR) teräslevyä. Materiaali on jo perusominaisuuksiltaan erittäin lujaa. Sen myötölujuus ($R_{p0.2}$) on liitteessä 3 olevan ainestodistuksen mukaan 843 MPa ja murtolujuus (R_m) 987 MPa. Materiaali on austeniittiselle

ruostumattomalle teräkselle tyypillisesti muovauksessa lujittuvaa, joten nämä ominaisuudet yhdistettynä laakeaan pinta-alaan vaativat muovauskoneelta erittäin suuria voimia. Materiaalin venymä (A50 %) on vain 17. Varsinkin yläpuolen kappaleen kupiosissa tarvitaan materiaalilta hyviä venymäominaisuuksia, joten muovattavuudeltaan materiaali on tässä tapauksessa haastava.

Vaihtoehtoiseksi materiaaliksi valittiin venymäominaisuuksiltaan hieman parempi (A50 % = 36) lujitettu ruostumaton teräs 1.4318 TR, jonka myötölujuus (Rp0.2) on liitteen 4 aineistodistuksen mukaisesti 663 MPa ja murtolujuus (Rm) 925 Mpa. Tätä materiaalia ei kuitenkaan käytetty varsinaisten toimitettujen kappaleiden valmistuksessa.

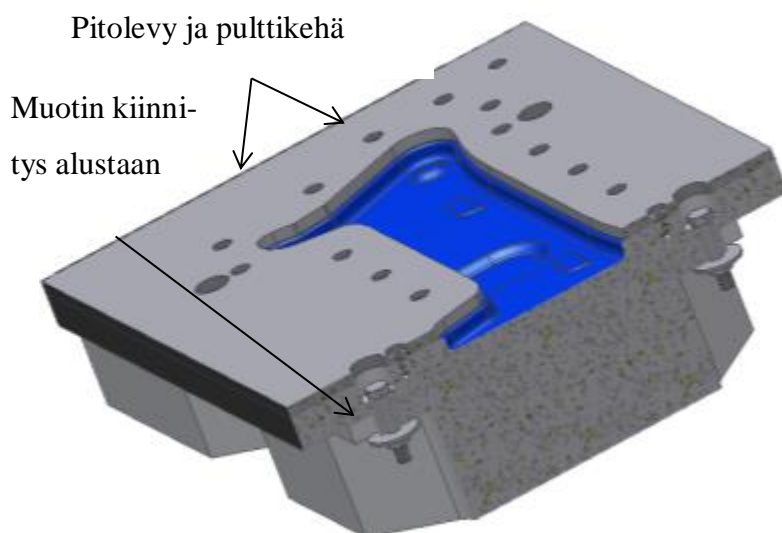
7.3 Työkalun suunnittelu

Koska kysymyksessä on prototyyppi ja osia valmistetaan vain muutamia kappaleita, on muovaustyökalun suunnittelussa pohdittava edullisia ratkaisuja. Tässä tapauksessa muovattava materiaali oli kuitenkin erittäin lujaa ja muovausvoimat suuria, joten työkalumateriaaliksi valittiin teräs. Kokemuksen mukaan tavallinen rakenneteräs S355 kestää kohtuullisen hyvin muovauskertoja ja on myös edullinen koneistaa verrattuna esimerkiksi työkaluteräkseen.

Ennen varsinaisten työkalujen suunnittelua oli ratkaistava muottien ja painimien kiinnitys puristimeen. Myös työkalujen asentamisen sujuvuuteen tuli kiinnittää huomiota. Hydromuovauslaitteiston mukana oli toimitettu työkalun siirtovaunu, jota oli käytetty massiivisten jopa viisi (5) tonnia painavien hydromuovaustyökalujen siirtämiseen ja poistamiseen puristimen pöydältä. Työkalun siirtovaunun päällä oli tuplakaksoiskartioputken n. 5000 kg painava työkalu. Työkalun yläpinta (ylämuotin kiinnityspuoli) on erittäin tasainen, joten tuplakaksoiskartion työkalu sopi hyvin apurunkomuotin pöydäksi. Lisäksi siinä oli kiinnityspulteille sopivat kolot. Painin kiinnitettäisiin puristimen puskinen t-uramuttereilla, joille puskimessa on valmiit urat. Työkalu voitaisiin myös helposti siirtää vaunulla varsinaiselle puristimen pöydälle.

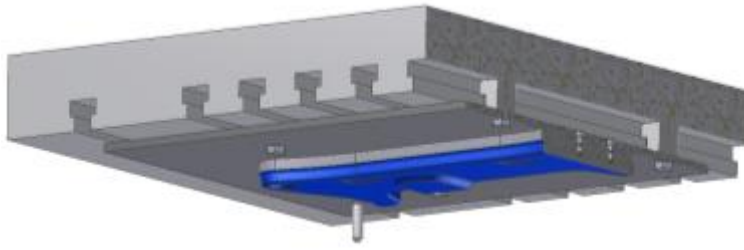
Jotta työkalujen kiinnitysratkaisut olisi helpompi tehdä, oli syytä mallintaa asennuspöytä ja puskin. Myös asennus- ja kokoonpanokuvia sekä myöhempää tarvetta varten oli mallien teko perusteltua.

Kuvien 27 ja 28 mukaisista ohutlevymalleista generoitiin 3D -mallinnusohjelman avulla muotit ja niiden profiilia vastaavat painimet. Muottiosien runkoa laajennettiin alustalle sopivaksi. Koska hydromuovauskoneessa ei ole pitovoiman tuovia sylintereitä, tuotiin voima pitolevylle pulttikehän avulla. Pulttikehää oli käytetty menestyksekkäästi aikaisemmissa protovalmistustesteissä. Pitovoimaa voitiin näin lisätä alueille, jossa sitä tarvittiin enemmän ja edelleen vähentää alueilta, jossa sitä ei tarvittu. Ratkaisu on helppo ja edullinen toteuttaa, mutta hidastaa muovausprosessia merkittävästi ja soveltuu ainoastaan muutaman kappaleen muovaussarjoihin ja protovalmistukseen. Toisena vaihtoehtona olisivat olleet elastiset pidätintyynyt. Niiden haittapuolena on pitovoiman merkittävä lisääntyminen muovauksen loppuvaiheessa. Pitolevy on tämän kokoluokan työkalussa raskas, joten sen paikaltaan nostamisessa ja asentamisessa käytettiin puristimen nostosylintereitä. Kuvassa 29 on esitetty pitovoimaratkaisu.



Kuva 29. Pitovoimaratkaisu

Painimen puskiimeen kiinnittämistä varten suunniteltiin erityinen kiinnityslevy, joka asennettiin painimen pohjaan. Puskimessa on työkalun kiinnittämistä varten pallonivelillä oleva t-uritettu levy, johon kiinnityslevy asennettiin. Kuvassa 30 on esitetty painimen kiinnitysratkaisu. Työkalun piirustukset löytyvät liitteestä 6. (Liite 6.)

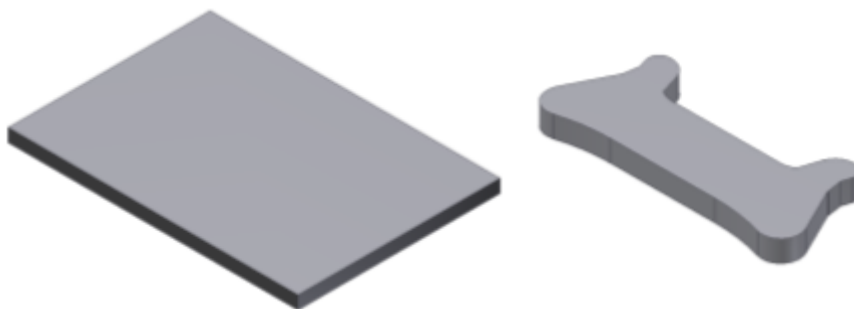


Kuva 30. Painimen kiinnitysratkaisu

7.4 Työkalun valmistus

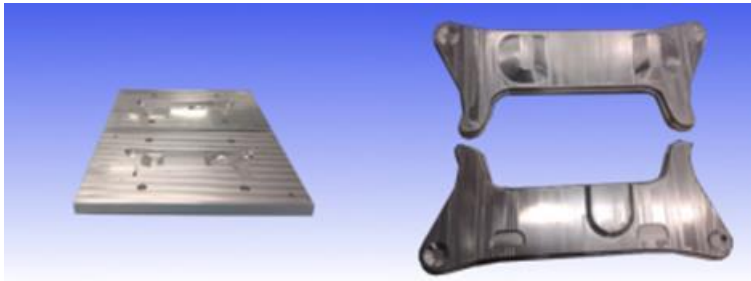
Työkalun muotit ja painimet valmistettiin koneistamalla. Koneistusta varten suunniteltiin optimaaliset ahiomallit, jotka polttoleikattiin S355 -rakenneteräslevystä. Tuotteen alaosan syvimmän kohdan mitta oli 42,25 mm laippaosan alapinnasta. Painimen korkeuteen tuli huomioida pitolevyn vahvuus (20 mm) sekä muovaustekniset välykset, joten tuotteen alaosan painimen ahiomateriaaliksi valittiin 70 mm:n levy. Tuotteen yläosan korkein kohta oli puolestaan 52 mm, joten painimen valmistamiseksi tarvittiin 80 mm:n levy. Painimien ahiomallit muotoiltiin karkeasti niitä vastaaviin profiileihin.

Muottiaihioissa tuli huomioida syvimmän kohdan pohjan paksuus. Liian ohut pohjan materiaali saattaisi pohjaan vaikuttavien suurien voimien vuoksi murtua. Muotin yläpintaan kohdistuvat kitkavoimat ovat suuria, joten pinnanlaadun arvoksi suunniteltiin Ra6.3. Muottiaihion levyvahvuudessa otettiin huomioon myös tasaisen osan koneistusvara pinnanlaadun optimoimiseksi. Muotin pohja kuten myös painimen pohja voitiin jättää ennalleen. Muottien koneistamiseen tarvittiin alapuolen osalle 60 mm:n ja yläpuolen osalle 70 mm:n teräslevy. Kuvassa 31 on esitetty suunnitellut ahiot muottikoneistusta varten.



Kuva 31. Muottiahiomallit

Muottien ja painimien pohja- ja ympärysprofiilit olivat monimuotoisia, joten oli tarkoituksenmukaista valita CadCam -ohjelmistoa käyttävä koneistuskeskus. Tällöin työkalu voitiin koneistaa 3D -mallin pohjalta. Kuvassa 32 ovat valmiit koneistetut muotit ja painimet.



Kuva 32. Valmiit apurungon muotit ja painimet

7.5 Työkalun asennus

Työkalun laskennalliseksi kokonaispainoksi 3D -mallinnusohjelman mukaan saatiin hieman yli 800 kg,. Näin painavan työkalun asentaminen jouduttiin tekemään työkalun asennukseen suunnitellulla siirtovaunulla, joka kuuluu hydromuovauskoneen lisävarusteisiin.

Asennus tapahtui siten, että muovattavan rungon yläosan työkalu asetettiin suunnitelmiensa mukaisesti työkalun siirtovaunulla olevan ja tässä tapauksessa työkalupöytänä toimivan tuplakaksoiskartiotyökalun päälle. Tämän jälkeen työkalupaketti siirrettiin varsinaiselle hydromuovauskoneen työkalupöydälle siirtovaunulla. Painin ja muotti asetettiin ohjaustappien avulla kohdakkain. Kuvassa 33 on esitetty asennustapahtumaa.

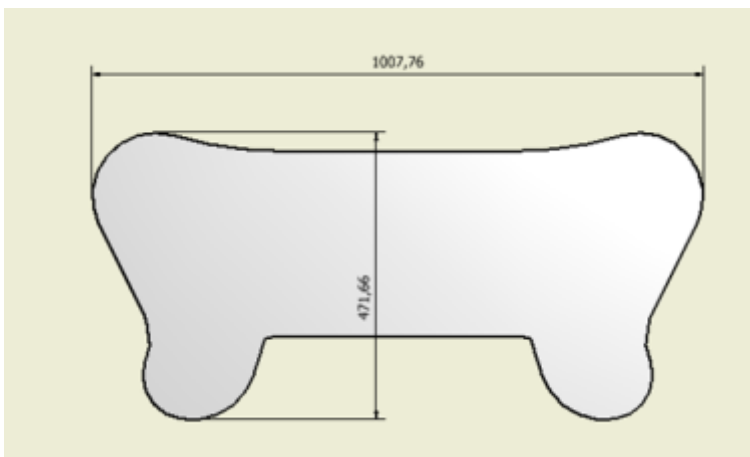


Kuva 33. Työkalun asentaminen

7.6 Aihion suunnittelu

Muovauksen suunnittelu aloitettiin aihion mallin ja koon arvioimisella. Tämän muotoiselle kappaleelle on usein vaikea tai miltei mahdotonta löytää optimaalista profiilia teoreettisesti. Usein joudutaan tekemään useitakin testejä, ennen kuin ”oikea” aihion malli löytyy.

Tässä tapauksessa aihion malli suunniteltiin alkutilanteessa muovattavan kappaleen profiilia noudattaen. Mitoituksessa oli huomioitava myös laipat, joista tapahtuisi apurungon puoliskojen liittäminen. Kuviossa 21 on esitetty ensimmäinen ahiomalli.



Kuvio 21. Ensimmäinen ahiomalli

7.7 Muovausprosessi

Muovauksessa työkappale voideltiin kitkavoimien pienentämiseksi syvävetoon tarkoitettulla rasvalla. Aihio sijoitettiin muotin ja pitolevyn väliin. Pitolevyn pulttikehän pultit kiristettiin kaikki ensimmäisessä testissä 30 Nm momenttiin. Koska kysymyksessä oli erittäin luja ja laakea kappale oli painimen voiman tarve suuri. Painimen voimaa arvioitiin kaavan 11 avulla. Vetorenkään (tässä tapauksessa muotin reunan) ympäröimiseksi saatiin noin 2570 mm. Sijoittamalla ympäröimismitta, ainestodistuksesta saatu murtolujuus ja materiaalivahvuus kaavaan 11 saatiin:

$$F_{p\max} = 1,15 \times 2570\text{mm} \times 2\text{mm} \times 987\text{MPa} \approx 5470\text{kN}$$

Painimen maksimi voimaksi asetettiin saatua tulosta hieman suurempi arvo, jotta pohjaan isku tapahtuisi täydellisesti. Voimantarpeeksi arvioitiin 6500 kN. Taulukosta 3 katsomalla tämä vastasi pääsylinterin n. 65 baarin öljykammion painetta. Asetusarvo riitti hyvin kappaleen muovaamiseksi.

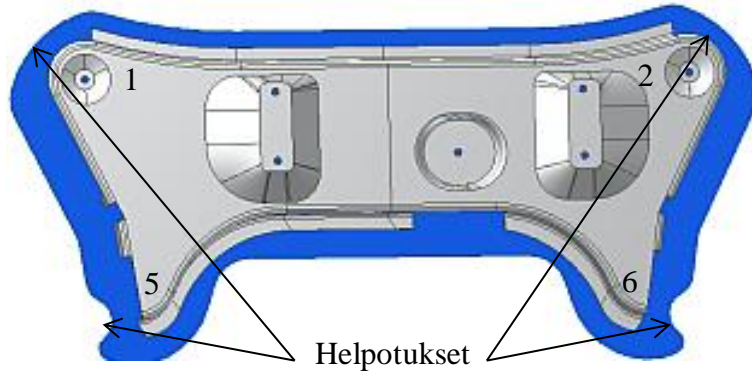
Ensimmäisessä muovauksessa yläosan syvimpien kohtien suorakaiteen muotoisen pohjan reunalla materiaali murtui pituus- ja poikkisuuntaisesti. Murtumia esiintyi myös kaikkien kaarevien nurkkien pohjan reunoilla. Kuvassa 34 on esitetty materiaalin murtumakohdat (1, 2, 3, 4, 5 ja 6).



Kuva 34. Murtumakohdat (1, 2, 3, 4 ja 5)

Suuremman säteen nurkkien (1 ja 2) murtumisen syynä oli selkeästi laipan liian suuri pidätysvoima. Suorakaiteen muotoisen pohjan ja sen seinämän välisen nurkan (3 ja 4) murtuminen tulisi sitä vastoin olemaan vaikeammin ratkaistavissa pelkillä säädöillä. Pohjan kupprien muovautumisessa tapahtui vain vähän vetoa ja oli siten suurimmaksi osaksi venytysmuovausta. Kuvan 34 kohtien 3 ja 4 pohjan ja sen seinämän välinen taivutussäde oli erittäin pieni, joten ratkaisuna olisi pyöristyssäteen suurentaminen. Myös pienemmän säteen nurkkien (5 ja 6) pysyminen ehjänä vaatisi tarkkaa aihion ja pitovoiman suunnittelua.

Kuvan 34 kohtien 1, 2, 5 ja 6 murtumaongelma saatiin ratkaistua muuttamalla aihiomallia ja säätämällä pitovoimat optimaalisiksi. Lopputuote rajataan kuvan 26 mukaiseksi, jossa nurkissa 5 ja 6 on laippaosa vain osittain tuotteesta. Aihioon voitiin tehdä rajattaville kohdille ns. helpotukset. Samoin nurkkien 1 ja 2 kohdalla laippa rajataan lopputuotteesta, joten pitovoima voitiin laittaa lähes olemattomaksi. Samoin paikallista vetosuhdetta voitiin pienentää tältä osin. Toinen ahiomalli on esitetty kuvassa 35 aseteltuna rajattavan kappaleen alle.



Kuva 35. Toinen ahiomalli

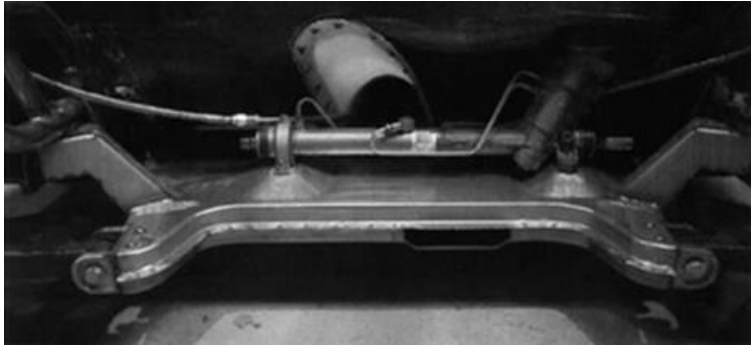
Muotin syvimmän kohdan (26,644 mm tasaisesta pohjasta) pyöristyssäteitä muutettiin asettamalla työkappaleen päälle kuoppien kohdalle pohjan alaa hieman isommat 0,8 mm:n paksuiset levyn suikaleet ja 1 mm:n vahvuiset kumisuikeleet, jolloin kuopan reunat pysyivät ehjinä. Levy painui kuitenkin muottia vasten, joten mitta pysyi lähes entisellään.

Alaosan valmistuksessa käytettiin täsmälleen samankokoista ja muotoista ahiota. Alapuolen pohjassa oleva syvennys oli vain 14,25 mm, joten vastaavaa murtumaongelmaa ei alakappaleen valmistuksessa esiintynyt. Kuvassa 36 on valmiita prototyyppijä.



Kuva 36. Valmiita protokappaleita

Materiaalin lujuudesta johtuen muovattuihin kappaleisiin jäi jonkin verran jännitystiloja, jotka näkyivät matalina aaltolina kappaleissa. Kuvassa 37 on esitetty valmis apurunko kiinnitettynä kohteeseen.

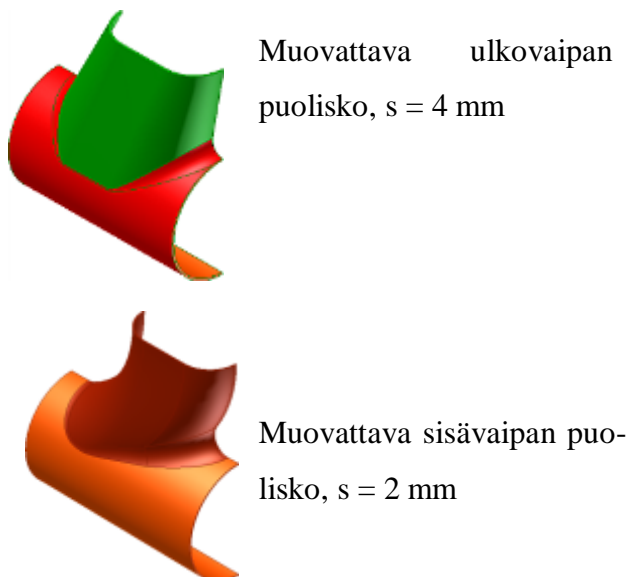


Kuva 37. Valmis apurunko paikoillaan

8 Y-PROFIILISEN PAKOSARJAN MUOVAUS (PROTOTYYPPI)

Keväällä 2013 jaloterässtudio sai valmistettavaksi massiivisen kokoisen pakosarjan prototyypin. Pakosarjaprototyyppi käsitti viisi (5) pakoputkea, joissa kussakin oli yhdeksän (9) kokoonpantavaa osaa. Kaksikymmentä (20) komponenttia tuli valmistaa muovausteknologialla ja loput kaksikymmentäviisi (25) koneistamalla. Muovattavat työkappaleet olivat ns. y-haaroja. Y-kappaleita on valmistettu myös hydromuovaamalla putkesta. Tässä tapauksessa valmistusteknologiaa mietittäessä, hydromuovaus olisi ollut protokappaleen valmistuksessa taloudellisesti huonompi vaihtoehto, joten valmistusteknologiaksi valittiin syväveto/muottiin painaminen. Valmistettavan tuotteen materiaalina oli ruostumaton teräs. Lopputuotteen osat liitettiin kokoonpanovaiheessa toisiinsa hitsaamalla.

Tässä osassa on esitetty muovausteknologialla valmistettujen pakosarjan osien työvaiheita ja ongelma-alueita sekä niiden ratkaisuja. Ongelmien ratkaisussa käytettiin vain vähän teoreettista tarkastelua. Ongelmat ratkaistiin nopeasti pääosin käyttöinsinöörin kokemukseräisen tiedon ja empiirisen tutkimuksen avulla. Kuvassa 38 on 3D -malli muovaamalla valmistettavista osista.



Kuva 38. Muovaamalla valmistettavat osat

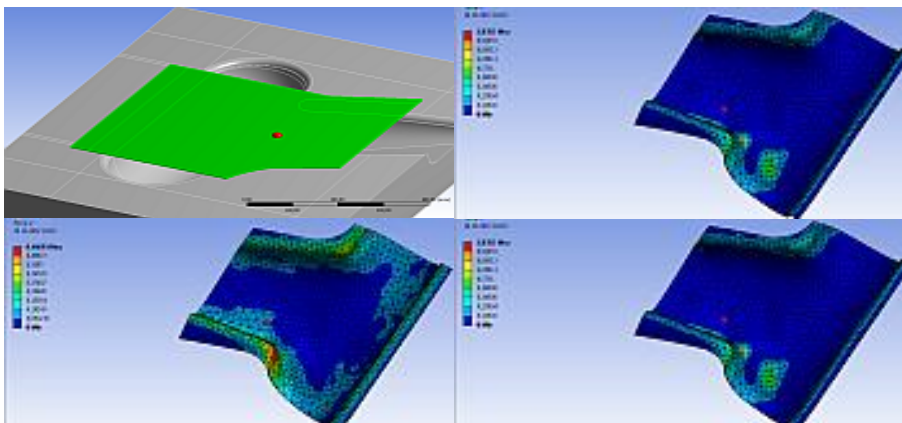
8.1 Materiaali

Aihiomateriaalina käytettiin Outokummun Tornion tehtailla valmistettua ruostumatonta 2 mm:n ja 4 mm:n ferriittistä (EN 1.4509) teräslevyä. Kahden (2) millimetrin aihiomateriaali toimitettiin 2B -pinnalla, jonka myötöraja ($R_{p0.2}$) on liitteessä 5 esitetyn aines-todistuksen mukaan 316 MPa:a ja murtoraja (R_m) 486 MPa:a. (Liite 5). Materiaalin venymä (A50 %) on 34. Neljän (4) millimetrin levyjen vastaavat ominaisuudet ovat puolestaan vetokoetulosten perusteella 385 MPa:a ($R_{p0.2}$) ja 483 MPa (R_m) sekä venymä A50% 31 (Heikkinen 2014). Materiaalin 1.4509:n muovattavuus on hyvä ja soveltuu siten erinomaisesti syvävetoon (Ruoppa 2013).

Ferriittisiä ruostumattomia teräslautuja on viime aikoina alettu tutkia yhä enemmän moottorien ja varsinkin pakoputkien valmistuksessa. Edullisemmalla materiaalilla pyritään mahdollisuuksien mukaan korvaamaan kalliimpaa austeniittista ruostumatonta terästä. Ferriittisellä ruostumattomalla teräksellä on lämpölaajenemiskerroin austeniittista ”isoveljeään” pienempi. Tämä ominaisuus tuo etua ajoneuvojen kuumissa kohteissa kuten pakoputkissa (Pohjanne 2014).

8.2 Muovauksen esivalmistelut

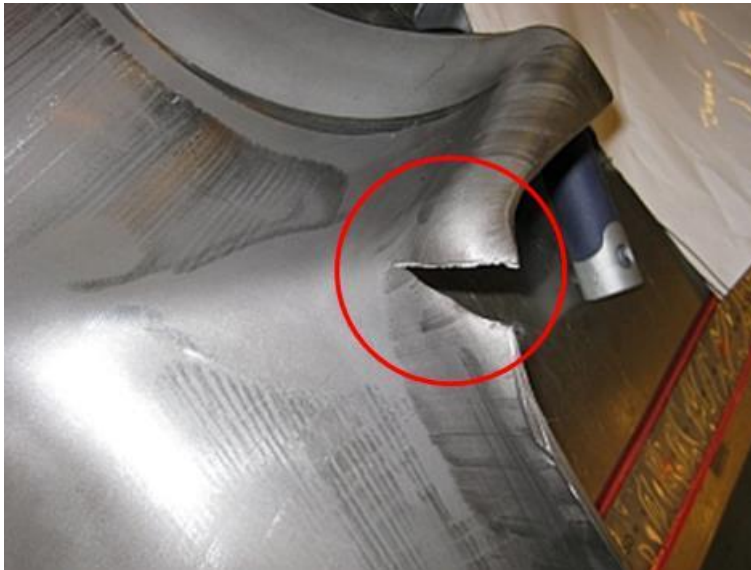
Muovaustapahtumaa esivalmisteltiin simuloimalla sisävaipan varsinainen muottiin painamisen prosessi. Simulointi tehtiin elementtimenetelmään perustuvalla Ansys -ohjelmistolla. Kuvassa 39 on esitetty simuloinnin tulos.



Kuva 39. Ulkovaipan muovauksen simulointi (Joutsenvaara 2013)

ANSYS-simulointimallista nähtiin ulkovaipan muovauksen kriittiset kohdat. Simulointi näytti suurinta venymää (punainen kohta) y-haaran ja suoran putkiosan jyrkempään tai-

tekulmaan. Tässä kohtaa tapahtuisi todennäköisimmin materiaalin murtuminen. Kuvassa 40 on ulkovaipan testimuovaus, jossa materiaali on murtunut simuloinnin osoittamalta alueelta.



Kuva 40. Murtuma ulkovaipan muovauksessa

8.3 Työkalun suunnittelu

Työkalujen suunnittelussa käytettiin aikaisemmin muovattujen apurungon prototyyppi-työkalujen periaatetta, jossa pitovoimaratkaisu toteutettiin pitolevyllä ja pulttikehällä. Tämä ratkaisu mahdollisti pitovoiman säätämisen tarvittaessa eri puolilla työkappaletta. Pulttikehäratkaisu hidastaa muovausprosessia huomattavasti, mutta voidaan käyttää muutaman kappaleen prototyypin valmistuksessa. Toisena haittapuolena on tarvittavan pitovoiman suuruus. Pulteilla ei välttämättä pystytä tuomaan pitolevyyn tarpeeksi suuria voimia.

Muovaus tapahtui työkappaleen mallisen muotin ja sitä vastaavan painimen avulla. Tässä muovattiin neljä (4) erilaista kappaletta. Jokaiselle työkappaleelle suunniteltiin oma työkalu, joten muovattavien protokappaleiden valmistaminen vaati neljä (4) erilaista muottia ja neljä (4) erilaista paininta.

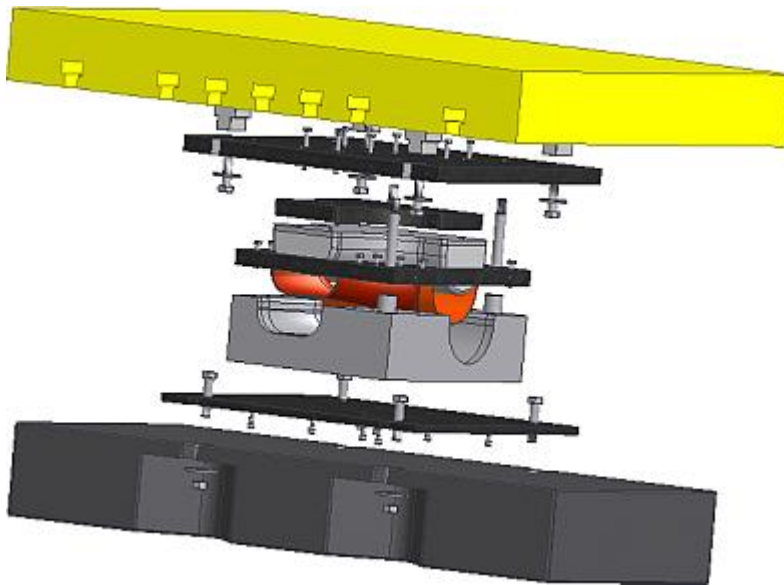
Muotti ja paininmallit generoitiin ohutlevymallista 3D -mallinnusohjelmalla. Muottisuunnittelussa huomioitiin muotin syvimmän kohdan ja pohjan välinen materiaali-
vaih-

vuus riittävän lujuuden saavuttamiseksi. Kuvassa 41 on esitetty muottien ja painimien malleja. Vastakappaleiden työkalut ovat luonnollisesti toistensa peilikuvia.



Kuva 41. Muottien ja painimien 3D -mallit

Työkalujen kiinnitys suunniteltiin samalla tavalla kuin apurungon työkaluissa. Muotin kiinnitys suunniteltiin tuplakaksoiskartiökalun päälle, jolloin työkalun siirtäminen puristimen pöydälle oli helppoa työkaluvaunun avulla. Valmiita komponentteja hyödynnettiin mahdollisimman paljon. Muotin kiinnityslevynä (väliskappale) suunniteltiin käytettäväksi apurungon kiinnityslevyä siten, että sitä voitiin käyttää sekä sisä- että ulkovaipan ja näiden peilikuvamuottien kiinnityksessä. Painimen kiinnitykseen oli tehtävä uusi kiinnityslevy. Tässä päädyttiin niin ikään ratkaisuun, jossa levyä voitiin käyttää kaikissa painimissa, jolloin painimen peilikuva voitiin asentaa levyn vastakkaiselle puolelle. Painimen ja muotin kohdistus toteutettiin kolmella (3) ohjaustangolla. Kuvassa 42 on esitetty työkalun kokoonpanomalli, johon on asetettu myös muovattu kappale (punainen väri).

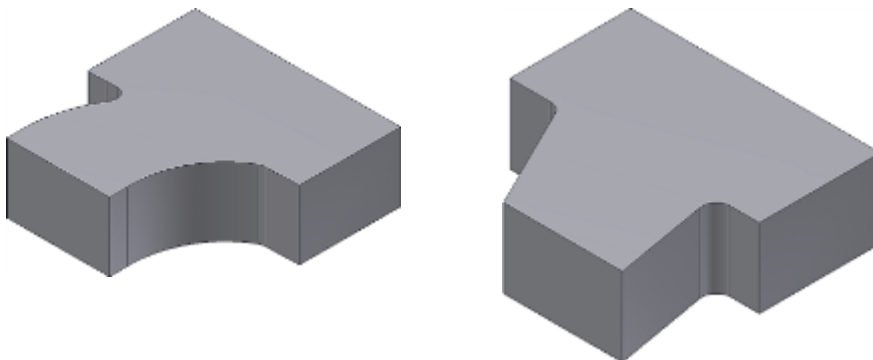


Kuva 42. Työkalukokoonpano

8.4 Työkalujen valmistus

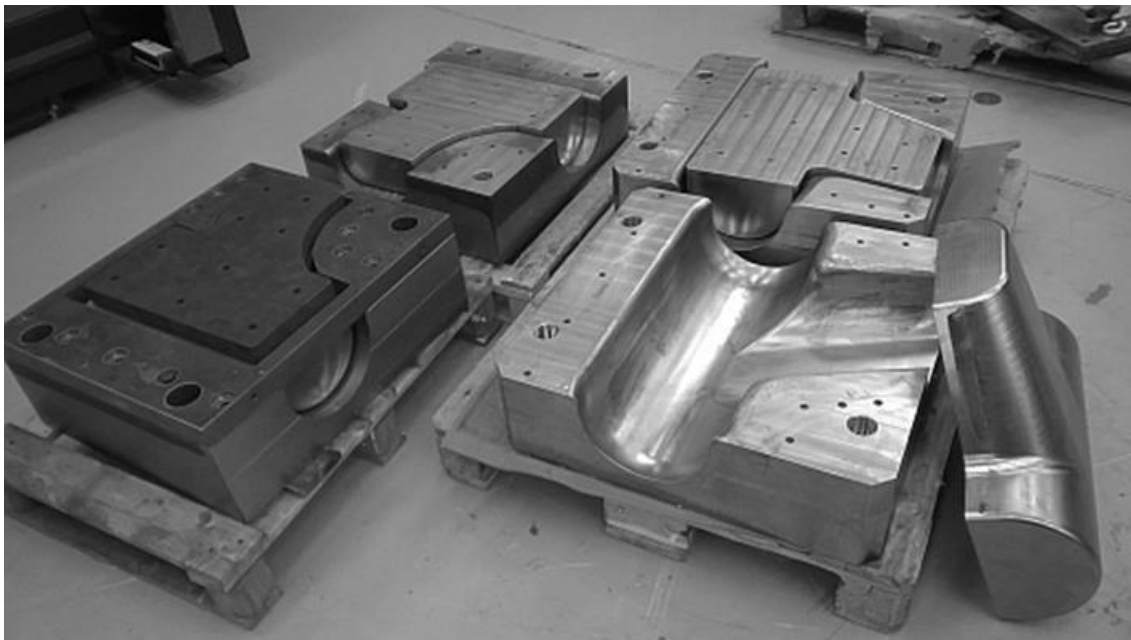
Työkalun muotit ja painimet valmistettiin koneistamalla. Aihiomateriaaliksi valittiin S355 -rakenneteräslevy. Edullinen rakenneteräs oli kestänyt riittävän hyvin aikaisemmissa prototyökaluissa, joten kyseisen materiaalin käyttö oli perusteltua. Muotitaihiot polttoleikattiin suorakaiteen muotoisiksi ja paininaihiot mahdollisimman lähelle painimen profiilia koneistusajan minimoimiseksi. Paininaihioiden materiaalivahvuudeksi valittiin 150 mm ja muottien 170 mm.

Painimen kiinnityslevy, välikappale ja niihin tarvittavat reiät leikattiin vesileikkauksella. Reikiin tarvittavat upotukset koneistettiin. Kuvassa 65 on esitetty painimien ahiomallit.



Kuva 43. Painimien ahiomallit

Muotit ja painimet koneistettiin CadCam-ohjatulla koneistuskeskuksella 3D-mallien mukaisiksi. Pitolevy, kiinnityslevyt ja välikappale leikattiin suunniteltujen profiilien mukaisiksi vesileikkauksella. Kuvassa 44 on esitetty valmiit koneistetut muotit, painimet, pitolevy ja välikappale.

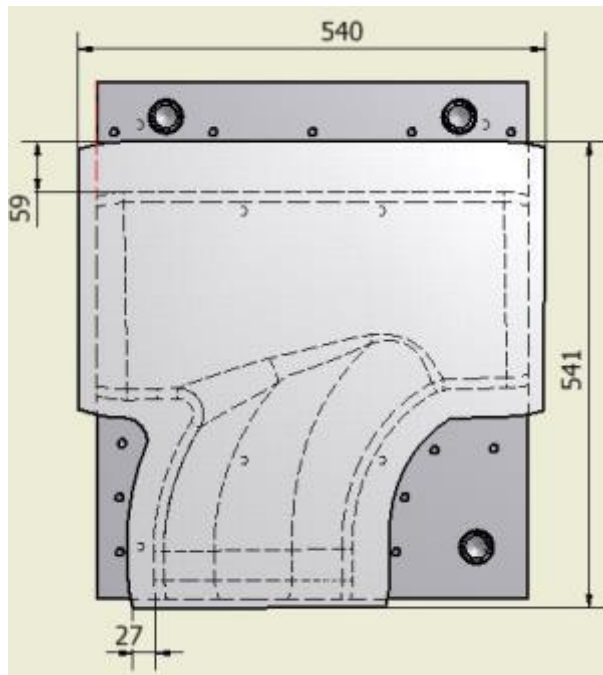


Kuva 44. Muotit, painimet, välikappale ja pidäinlevy

8.5 Aihion suunnittelu

Muotti oli suunniteltu siten, että muovatussa tuotteessa olisi 30 mm:n rajausvara. Työkappale voitiin siten puristaa yli muotin reunojen jättämättä lainkaan laippaosaa.

Profiililtaan monimuotoisen kappaleen aihion muodon arviointi on haastava prosessi. Lopputuotteen mallia pitää analysoida ja päättää jonkinlainen lähtöaihiomalli. Tämän jälkeen haetaan testitulosta analysoimalla uusi malli, mikäli on tarpeellista. Kokeilemalla muutamia eri vaihtoehtoja saadaan usein aika nopeasti sopiva aihion muoto ja koko. Tässä tapauksessa muovattavan kappaleen aihion malli suunniteltiin tuotteen profiilin mukaiseksi. Ensimmäinen sisävaipan ahiomallisuunnitelma on esitetty kuvassa 45.



Kuva 45. Sisävaipan levyaihiomalli aseteltuna muottimallin päälle

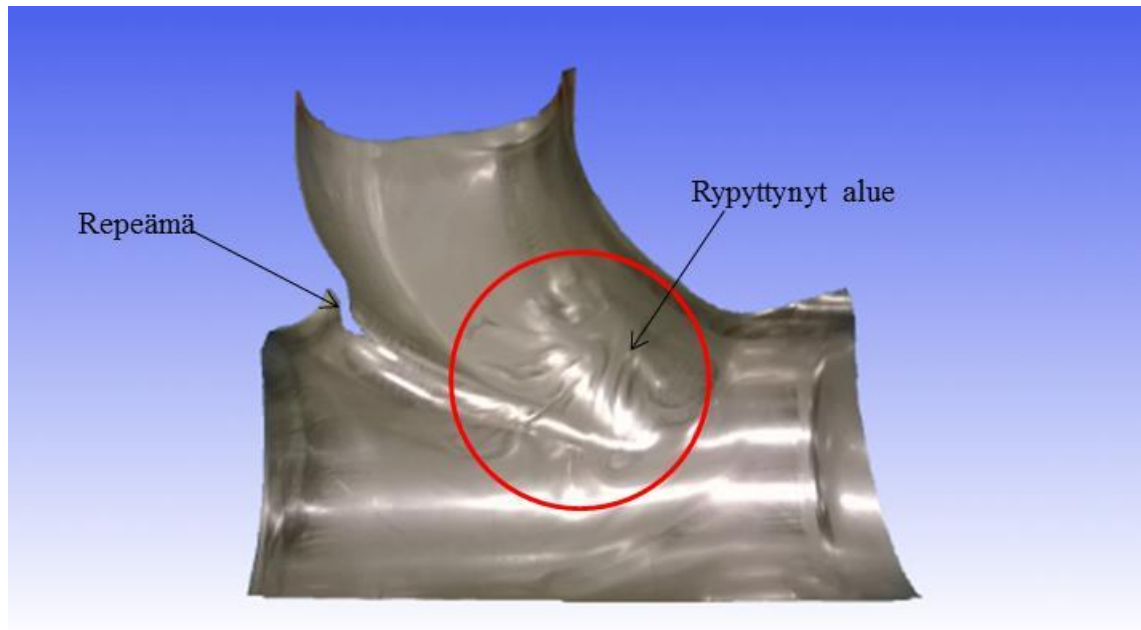
8.6 Muovausprosessi

Muovaus aloitettiin sisävaipan painamisella. Painimen voiman tarvetta arvioitiin ennen muovausta. Muotin reunojen ympärysmitaksi saatiin 1850 mm. Kaavan 11 avulla arvioitiin painimen teoreettista voiman tarvetta.

$$F_{p \max} = 1,15 \times 1850 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 486 \text{ MPa} \approx 2070 \text{ kN}$$

Painimen puristusvoimaksi asetettiin 3500 kN. Pitolevyn voimantarvetta ei arvioitu, koska pulttikehäratkaisussa sen määrittäminen olisi vienyt liikaa aikaa. Työkappale voideltiin kitkavoimien pienentämiseksi syvävetoon tarkoitetulla rasvalla. Aihio sijoitettiin muotin ja pitolevyn väliin. Pitolevyn pulttikehän pultit kiristettiin ensimmäisessä testissä 30 Nm:n momenttiin, joka oli havaittu hyväksi aloitusarvoksi pulttikehäratkaisussa.

Testauksessa muovattu työkappale murtui y-haaran jyrkemmässä taitekohdassa. Työkappale rypistyi myös y-haaran loivemman osan läheltä kuvan 46 osoittamalta alueelta.



Kuva 46. Ensimmäinen testikappale

Repeäminen aiheutui selkeästi liian pienestä pyörityssäteestä kyseisellä alueella, joten ratkaisuna oli työkalun reunan pyöristäminen repeämän aiheuttamalla alueella. Muotista hiottiin kuvan 47 osoittamasta kohdasta y-haaran taitekohtaa matalammaksi ja pyöritys ulotettiin mahdollisimman lähelle lopullisen tuotteen rajauskohtaa. Korjauksen yhteydessä muotin sisäpinta hiottiin erittäin sileäksi, jotta kitkavoimat saataisiin mahdollisimman pieniksi.



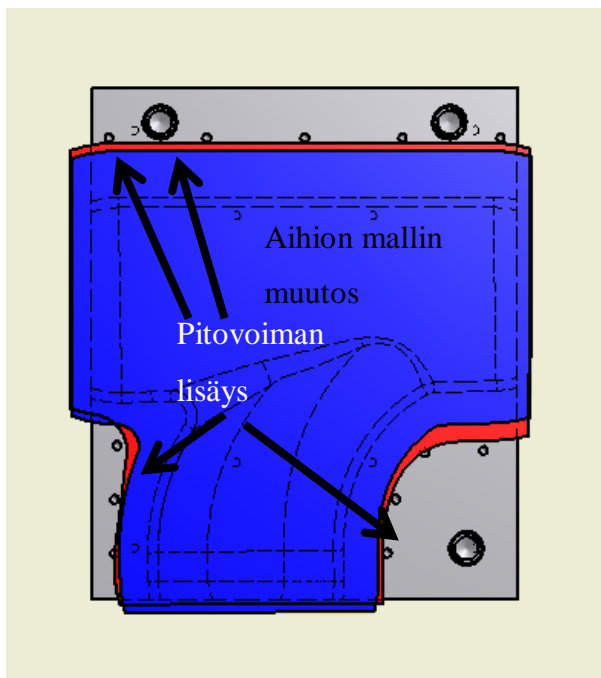
Kuva 47. Y-haaran taitekohdan pyörityssäteen muuttaminen

Ferriittisessä teräslaadussa pienetkin, jopa näkymättömät reunahaavat lisäävät repeämän riskiä haavauman kohdalla (Manninen, Ruoppa 2013). Tämän vuoksi muovattavan aihion reunat hiottiin erittäin hienolla hiekkapaperilla. Aihion muotoa mietittiin myös uu-

delleen. Repeämäalueen kohdalta aihioon jätettiin materiaalia hieman leveämmälle alueelle, jotta repeämälle herkän reunan venymä pienenesi.

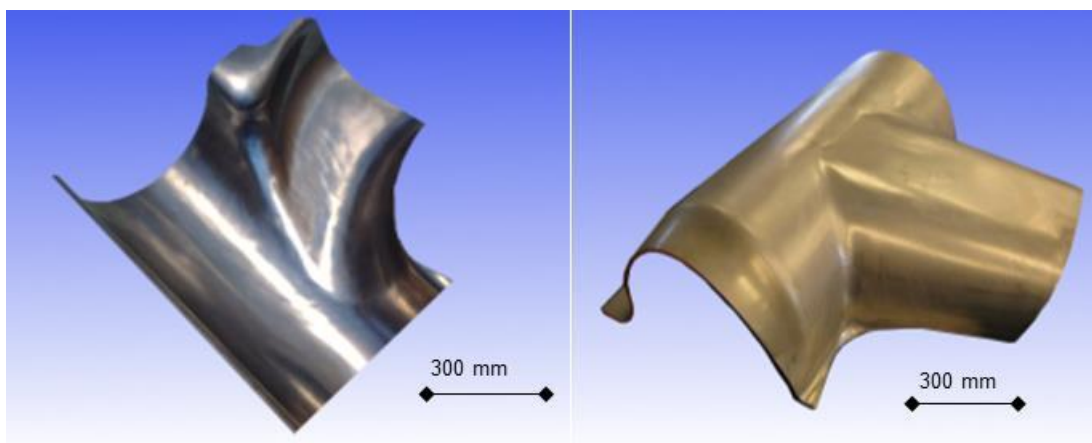
Rypytyminen johtuu muovauksessa olevien tangentiaalisten voimien puristaessa materiaalia kasaan voimien vaikutusalueella. Tässä tapauksessa painin kohtaa materiaalin ensimmäisenä suoralla osuudella, jossa materiaali virtaa reunojen yli erittäin voimakkaasti kohti putken pohjaa. Prosessin edetessä y-haaran taitekohtaan jää hetkeksi ”tyhjä tila”, johon työkalu ei ole kosketuksissa. Tällöin materiaali pyrkii tältä kohtaa rypyttymään painimen y-haaran osuessa työkappaleeseen. Rypytyminen ei kuitenkaan oiennut täysin pohjaan iskussa ja tuotteeseen jäi aaltoja. Joissakin testeissä materiaali tyssäntyi limittäin ja murtui.

Työkappaleen rypyttymistä yritettiin pienentää lisäämällä pitovoimaa kohtisuoraan tssäsaaltoihin nähden suoran osuuden suunnalta sekä y-haaran oikealta puolelta. Aihion mitan kasvattaminen ja pitovoiman voimakas lisääminen suunnitelman mukaisesti ei poistanut aaltoja kokonaisuudessaan, mutta vähensi niitä siinä määrin, että protokappaleelle asetetut vaatimusmäärittelyt täyttyivät. Kuvassa 48 on suunniteltu aihion malli (punainen uusi ja sininen vanha) sekä pitovoiman lisäyksien suunnat.



Kuva 48. Uusi aihiomalli (punainen) ja pitovoimat

Ulkovaipan muovaus toteutettiin samalla periaatteella, kuin sisävaipankin muovaus. Jyrkän taitoksen pyöritys jouduttiin muuttamaan mahdollisimman loivaksi jyrkän taitokohdan repeämisen estämiseksi. Vaipan profiili oli kuitenkin muovauksen kannalta sisävaipan profiilia edullisempi. Neljän (4) millimetrin materiaalivehvyys teki työkalupaleesta myös jäykemmän, joten painin ehti koskettaa työkalupaleta joka puolelta ennen kuin suuria aaltoja ehti tulemaan. Kappale muovautui lopulta suunnitelmien mukaiseksi. Kuvassa 49 on muovatut sisä- ja ulkovaipat.

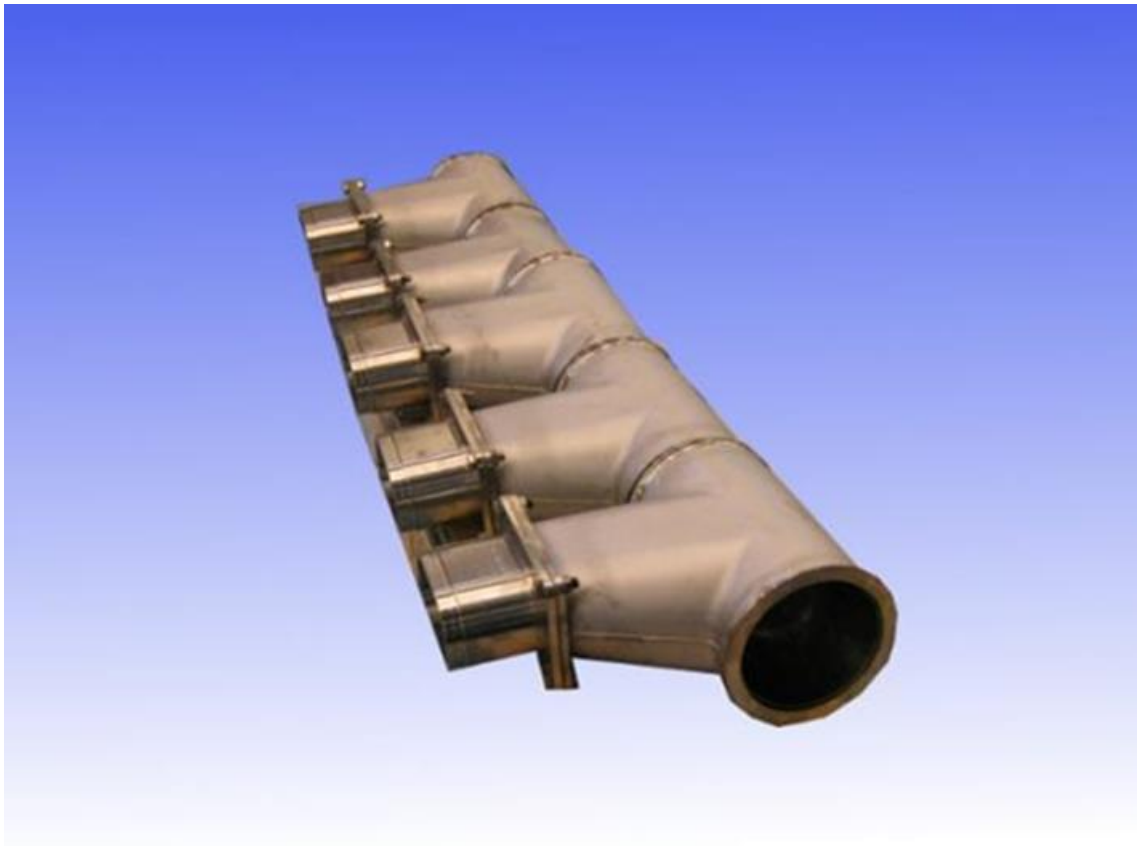


Kuva 49. Muovattu sisä- ja ulkovaippa

8.7 Kokoonpano

Lopullisen tuotteen kokoonpano suoritettiin rajaamalla kappaleet työpiirustusten mukaisiksi ja hitsaamalla vaipan puoliskot yhteen putkeksi. Koneistetut laipat liitettiin putkihaarojen päihin. Välikappaleeseen hitsattiin niin ikään laipat. Välikappale kiinnitettiin pulteilla y-haaran laippaan.

Valmistettu tuote tulee sijaitsemaan vaativissa olosuhteissa. Hitsien on oltava tällöin virheettömiä, joten hitsien laatu tarkastettiin tarkastuspätevyudet omaavan Inspecta Oy:n toimesta. Lopuksi suoritettiin hitsattujen osien viimeistelyt peittaamalla ja huuhtelemalla tuotteet puhtaiksi. Kuvassa 50 on esitetty kokoonpantu valmis pakosarja.



Kuva 50. Valmis pakosarjan prototyyppi

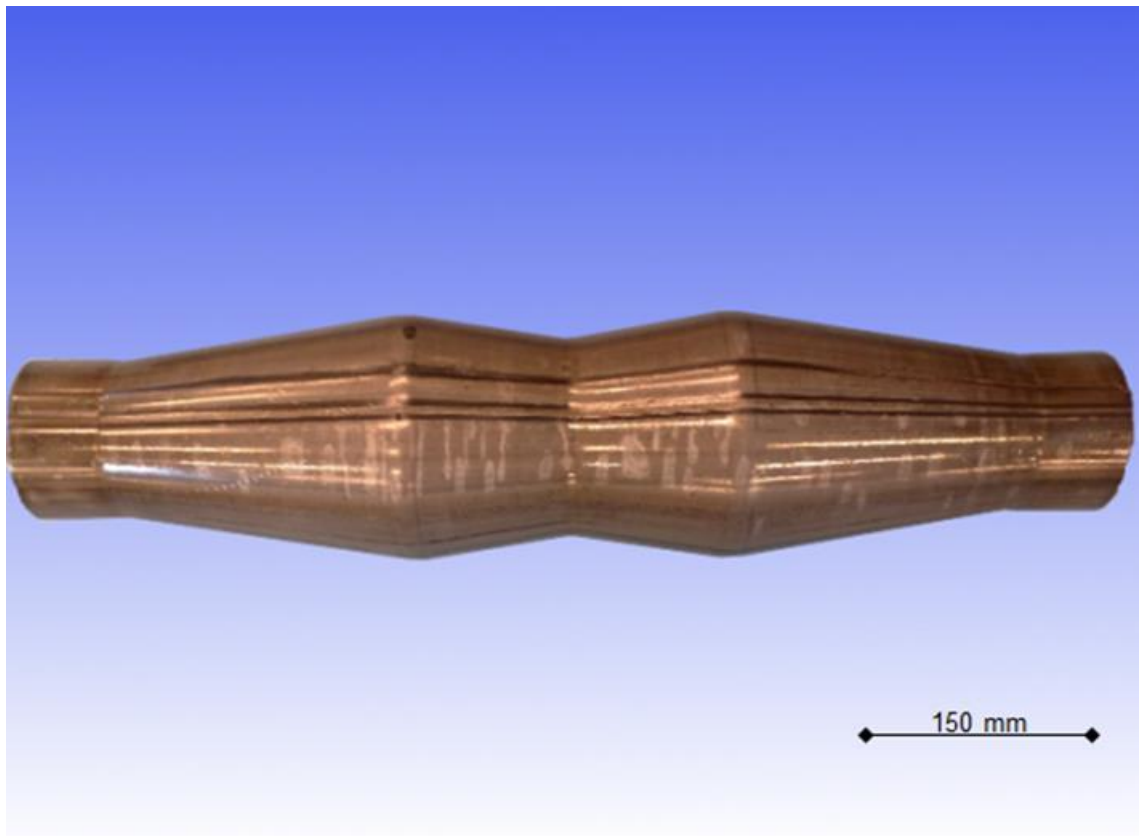
9 KOKOELMA TESTATUISTA JA VALMISTETUISTA TUOTTEISTA

Vuosien 20010 - 2014 välisenä aikana on hydromuovauskoneella tehty lukuisia testejä ja prototuotteita. Taulukossa 2 on esitetty 12 eri tuotetta, niiden valmistusmenetelmä sekä aihiomateriaali. Kuvissa 51 - 63 on esitetty valmistetut tuotteet.

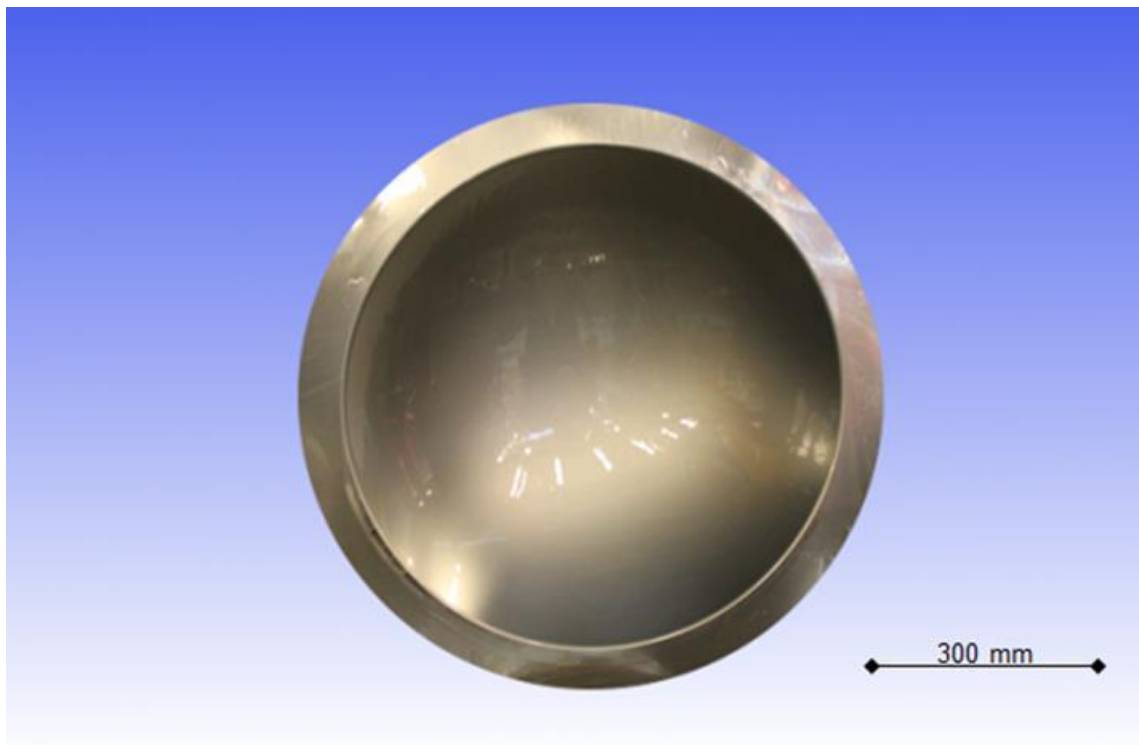
Kohdissa 6 - 9 käsiteltiin tarkemmin kartioputken ja levyaihion hydromuovausta sekä apurungon ja pakosarjan syväveto prosesseja. Näiden osien tiedot ja kuvat on esitetty myös tässä kokoelmassa. Taulukkoon 8 on koottu yhteenvetona testattuja ja valmistettuja tuotteita. Taulukossa on esitetty myös muovausmenetelmä ja materiaalitiedot.

Taulukko 8. Hydromuovauskoneella testatut tai valmistetut tuotteet

Tuote	Menetelmä	Aihio
Kaksoiskartioputki	Putken hydromuovaus	Putki, 1.4318 Ø101,6 x2 mm
Puolipallotestit	Levyn hydromuovaus	Levy, 1.4509 ja 1.4301 1,5 mm
Polttoainetankki	Levyn hydromuovaus	Levy, alumiini 1050A 1,5 mm ja 1.4509 0,8 mm
Auton korin osia	Levyn hydromuovaus	Levy, alumiini 1050A 1,5 mm
Levykansi	Levyn hydromuovaus	Levy, alumiini 1050A 1,5 mm ja 1.4301, 1 mm
Vetonivelen suoja- kuppi	Syväveto/muottiinpainaminen	Levy, 1.4509 1,5 mm
Pakosarjan lämpö- pellit	Syväveto/muottiinpainaminen	Levy, 1.4301 ja 1.4512
Ajoneuvon jousilau- tasen kuppi	Syväveto/muottiinpainaminen	Levy, HX420LAD 2.8mm
Ajoneuvon apurun- ko	Syväveto/muottiinpainaminen	Levy, 1.4301 TR 2 mm
Sähkömoottorin kytkentäkopan kansi	Syväveto/muottiinpainaminen	Testattu eri materiaaleja 2 mm
Pakosaraja	Syväveto/muottiinpainaminen	Levy, 1.4509 2 mm ja 1.4509 4 mm
Ultralujat teräkset	Särmäys	Levy, 10 - 25 mm



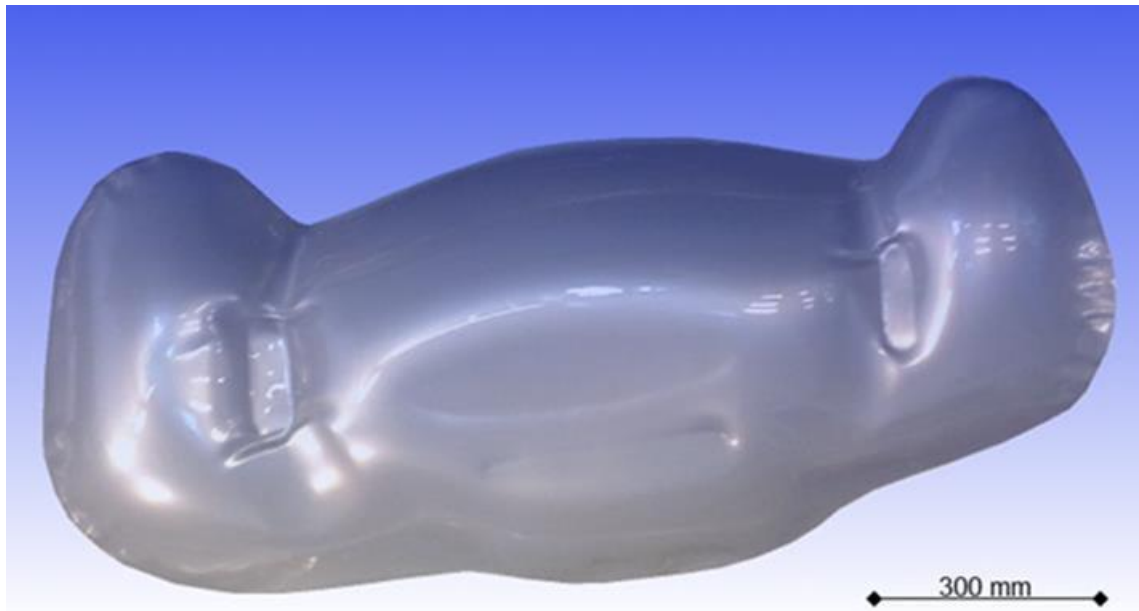
Kuva 51. Putkesta hydromuovattu kaksoiskartio (materiaali 1.4318, $s = 2$ mm)



Kuva 52. Levystä hydromuovattu puolipallo (Bulge Test, 1.4509, $s = 1,5$ mm)



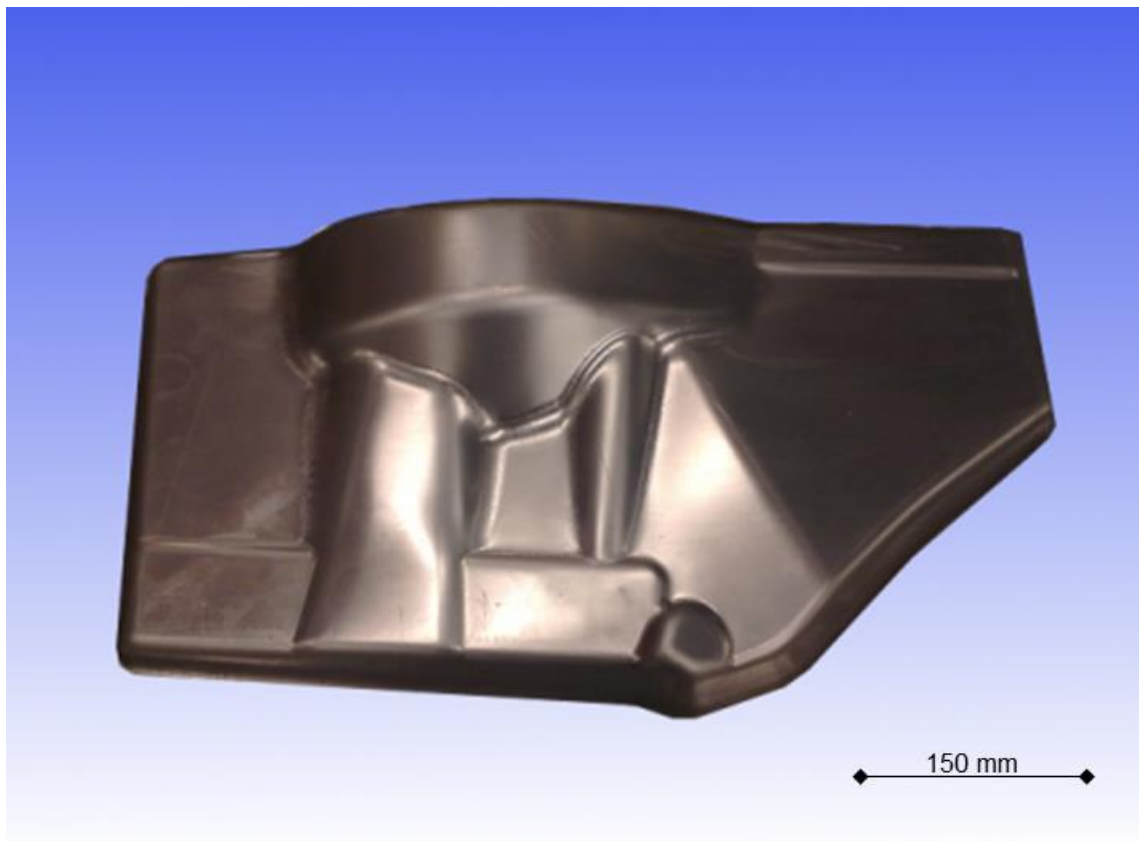
Kuva 53. Levystä hydromuovattu polttoainetankki (materiaali 1.4509, $s = 0,8$ mm)



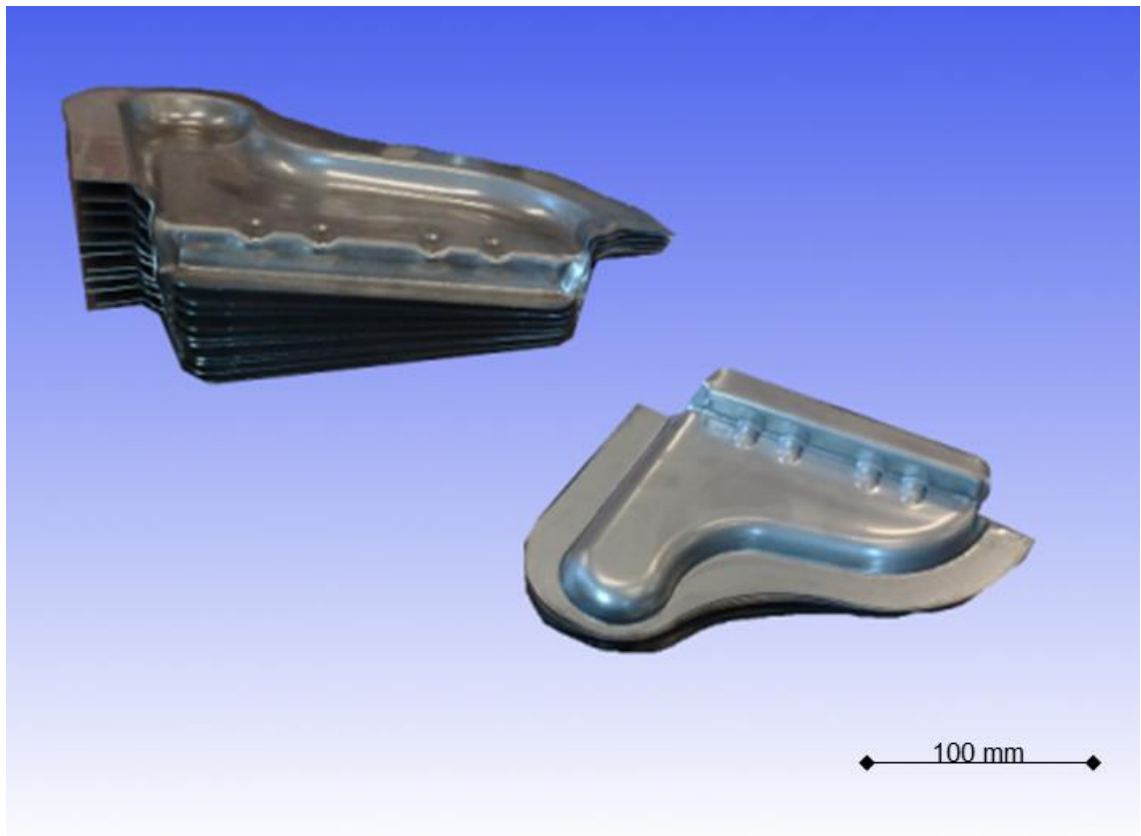
Kuva 54. Levystä hydromuovattu auton osa (materiaali 1.4301, $s = 1$ mm, testiajo)



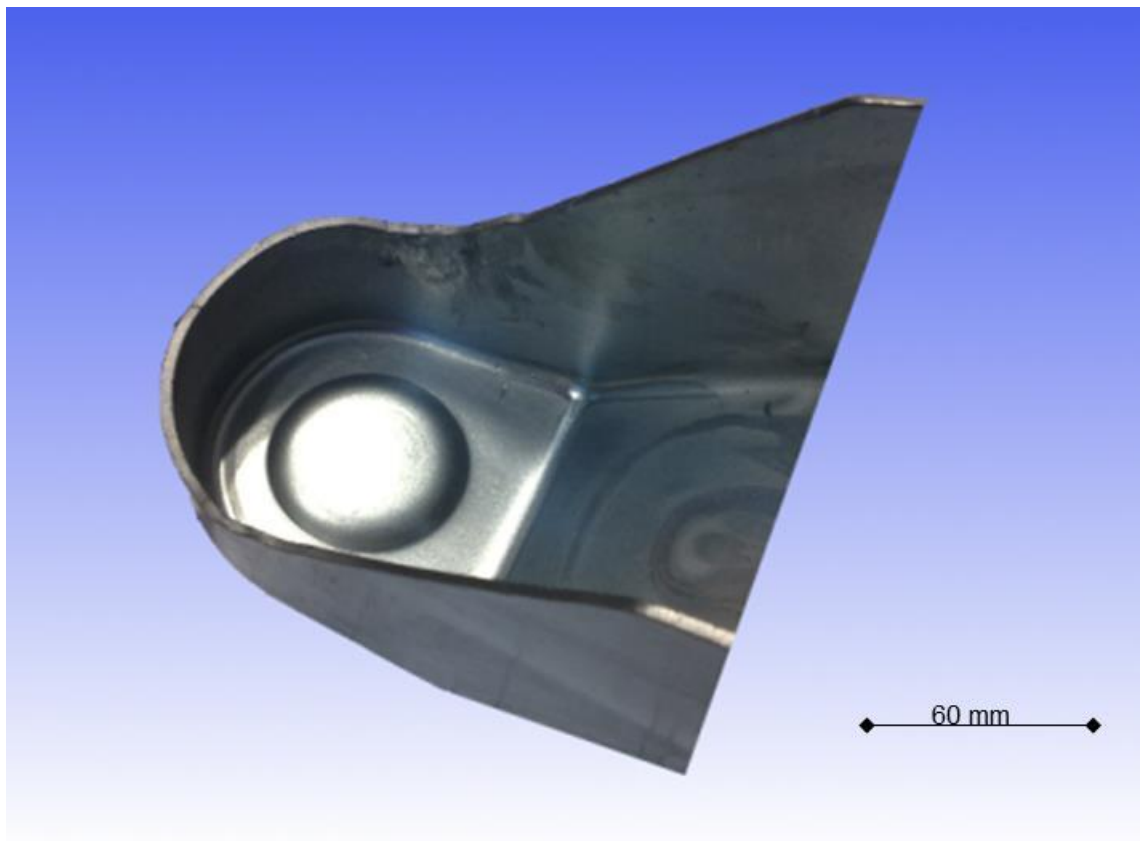
Kuva 55. Levystä hydromuovattu kansi (materiaali 1.4301, s = 1 mm)



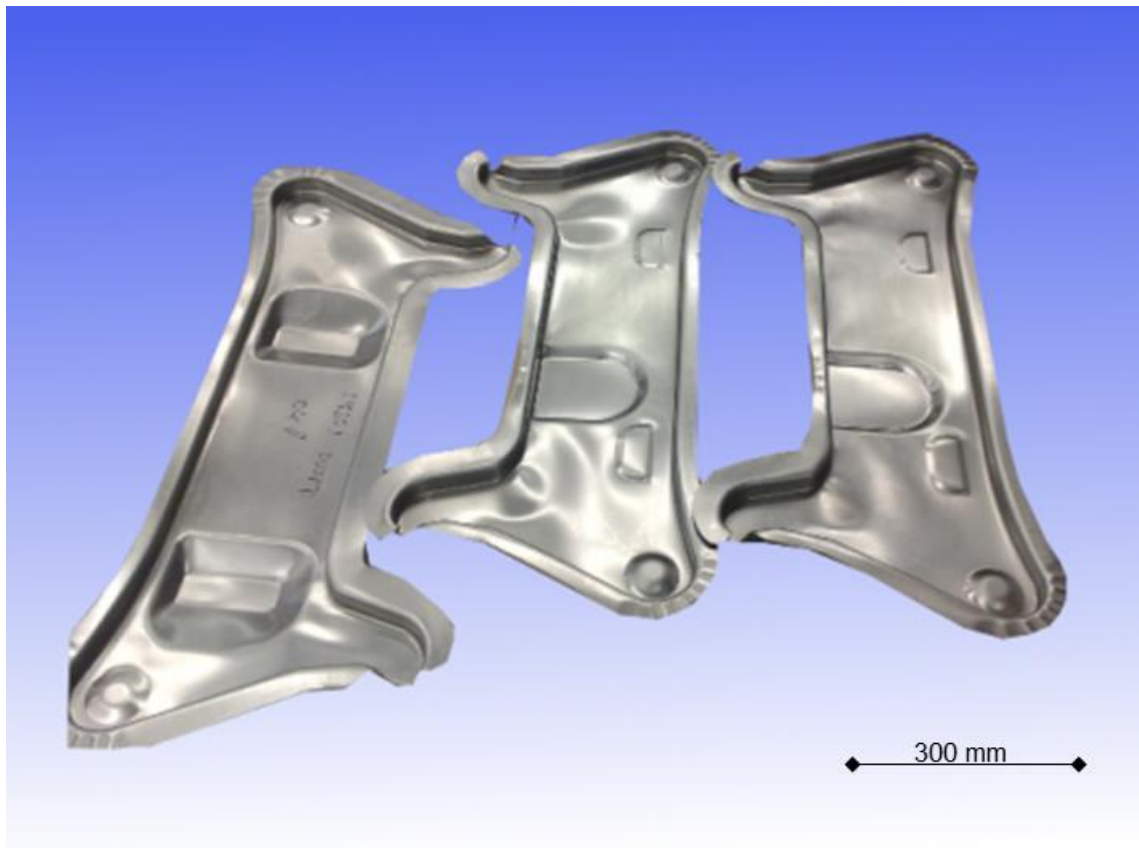
Kuva 56. Levystä muovattu suojakuppi (materiaali 1.4509, s = 1,5 mm)



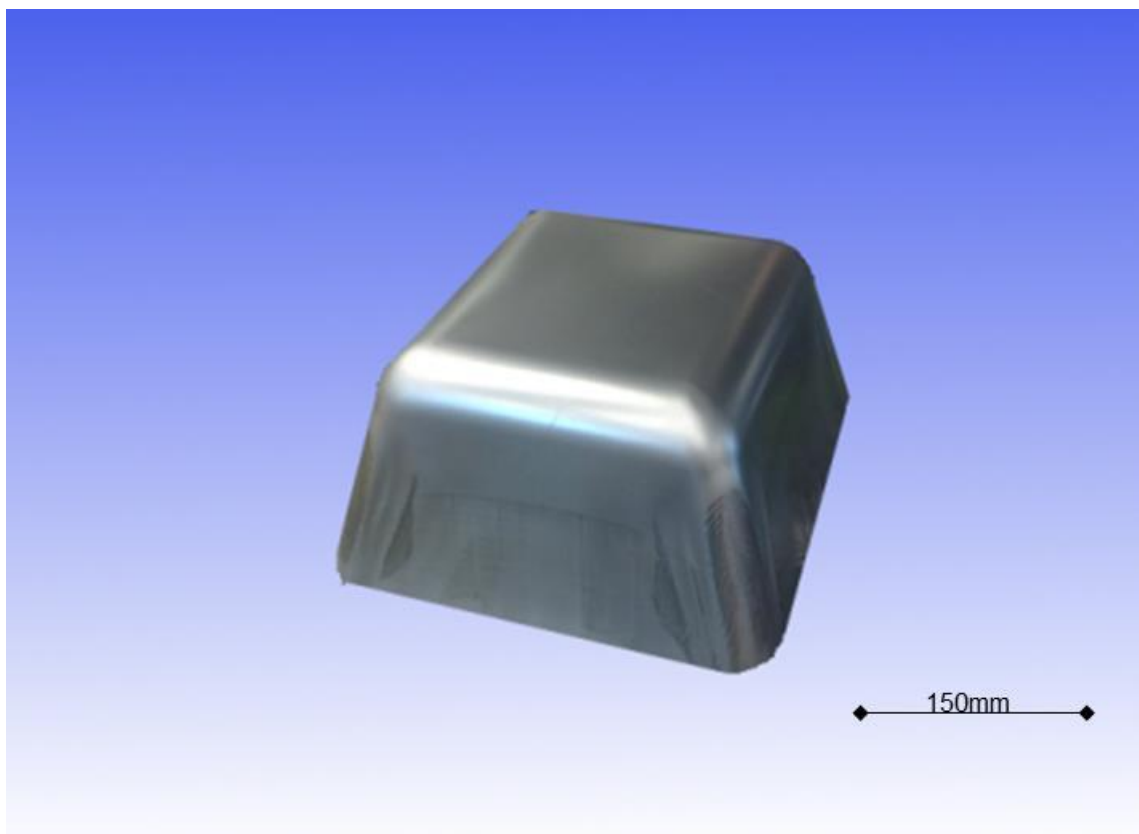
Kuva 57. Levystä muovatut lämpöpellit (materiaalit 1.4301 ja 1.4312, $s = 1$ mm)



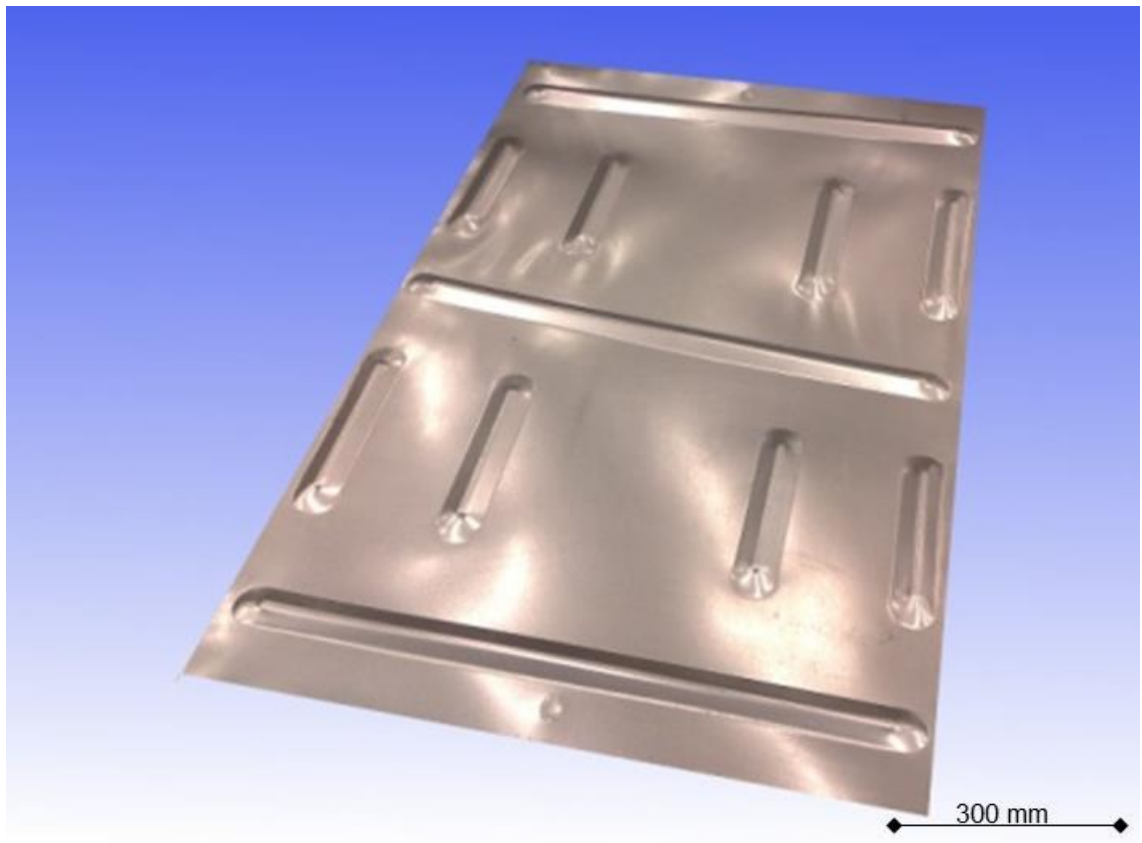
Kuva 58. Levystä muovattu jousilautasen kuppi (materiaali HX420LAD, $s = 2.8$ mm)



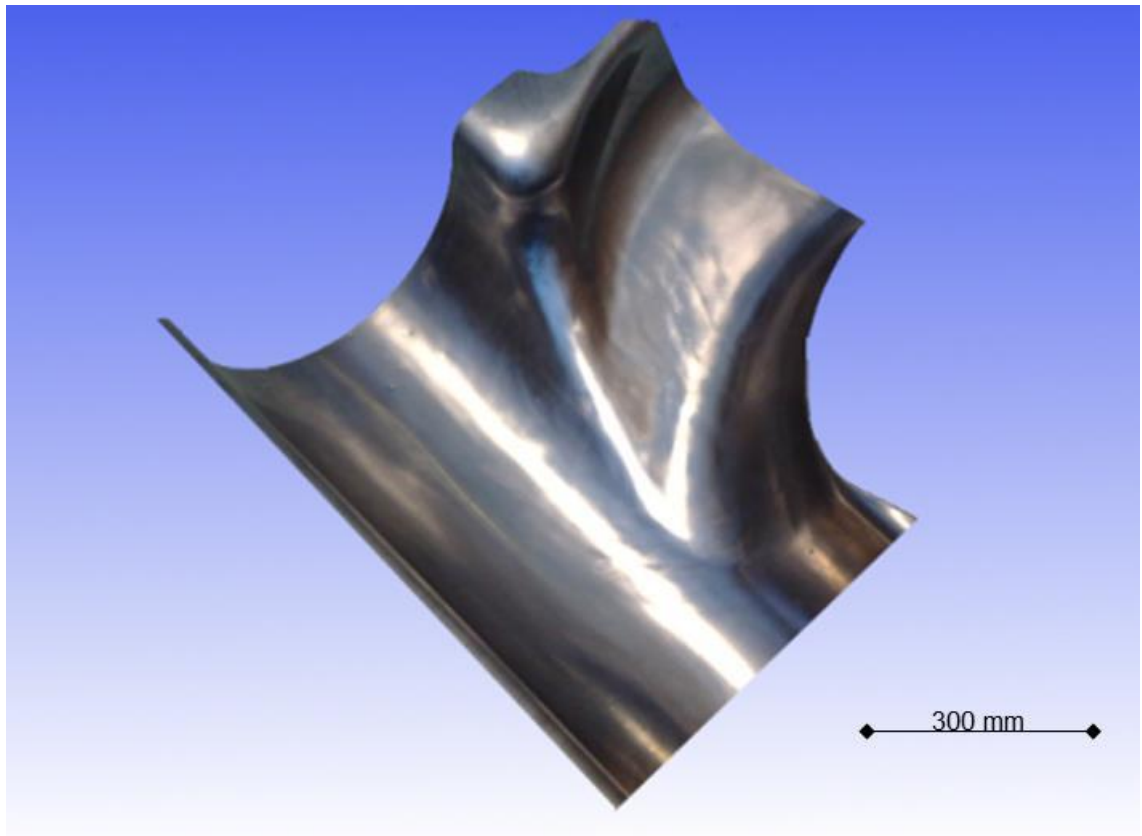
Kuva 59. Levystä muovatut apurungon puoliskot (materiaali 1.4301, luj., $s = 2 \text{ mm}$)



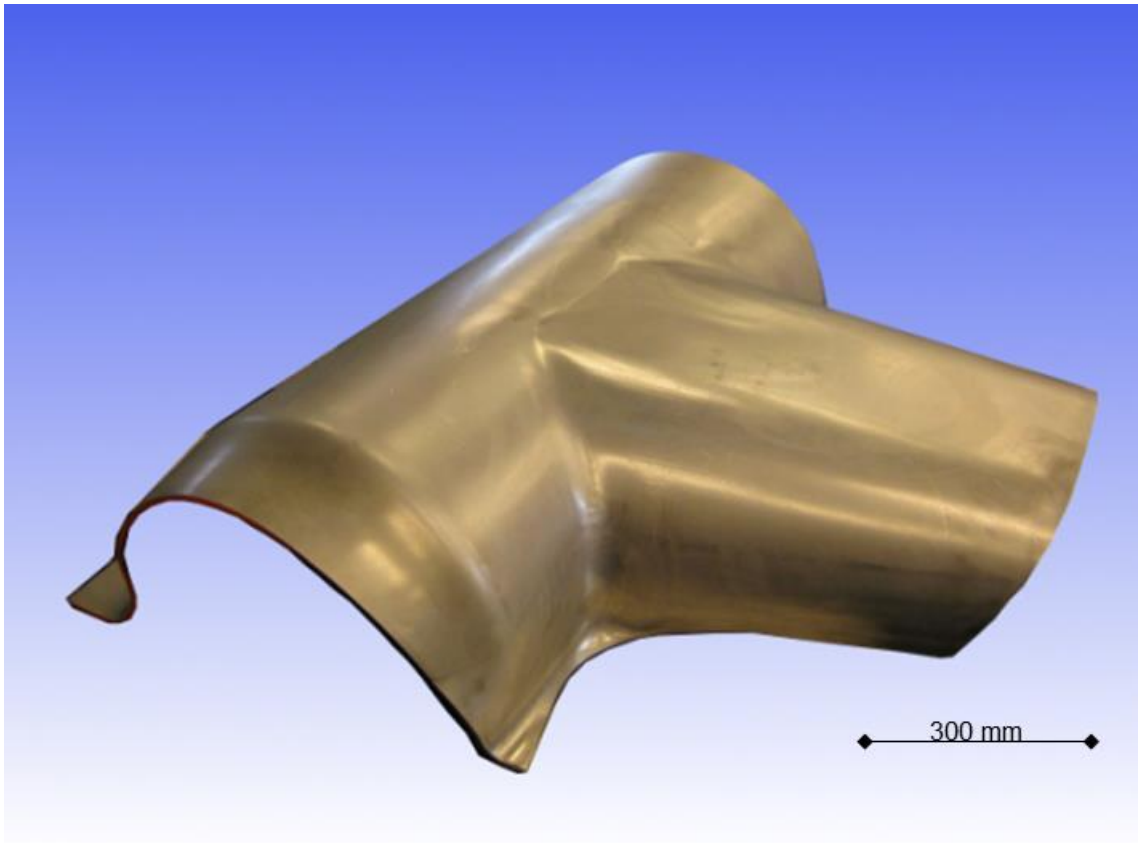
Kuva 60. Levystä muovattu kartiomallinen suojakoppa (materiaali 1.4301, $s = 1,5 \text{ mm}$)



Kuva 61. Levyyyn muovatut jäykisteet



Kuva 62. Levystä muovattu pakosarjan sisävaipan osa (materiaali 1.4509, $s = 2$ mm)



Kuva 63. Levystä muovattu pakosarjan ulkovaipan osa (materiaali 1.4509, s = 4 mm)

10 POHDINTA

Ruostumaton teräs vaikuttaa maailmanlaajuisesti lähes kaikkien ihmisten jokapäiväiseen elämään. Ruostumatonta terästä kohdataan päivittäin ruokailuvälineissä, astioissa, tiskipöydissä, koiran kupeissa, autoissa, laivoissa, sillan kaiteissa, rakennuksissa ja jopa kerrostalojen ulkovuorissa. Teollisuudessa ruostumaton teräs on tärkeä materiaali erityisen vaativissa olosuhteissa. Lounais-Lapissa ruostumaton teräs on tuonut hyvinvointia ja on edelleen alueen merkittävin työllistäjä itse teräksen valmistuksessa kuin myös jatkojalostuksessa.

Lounais-Lapin alueella Torniossa sijaitsee myös Lapin AMKn resursseihin kuuluva jaloterässtudio. Jaloterässtudio perustettiin alun perin juuri alueen vahvan ruostumattoman teräksen osaamisen tukijalaksi ja jatkojalostus- sekä tutkimusorganisaatioksi. Vuosien saatossa on jaloterässtudion tutkimus- ja palvelutoimintaan tullut ruostumattoman teräksen rinnalle myös lujat ja ultralujat rakenneteräkset, joita voidaan myös pitää Pohjois-Suomen, varsinkin Raahen seudun metalliosaamisen kärkituotteina.

Ruostumattomien ohutlevyjen jatkojalostuksessa metallin muokkausteknologioilla on merkittävä rooli. Särmäys ja muovaus ovat näistä ehkäpä tunnetuimmat menetelmät. Muovauksen osa-alueelta hydromuovaus on kuitenkin tekniikka, jonka osaaminen on Suomessa alkutekijöissä. Jaloterässtudiolle on hydromuovauksen osaamisen laajentamiseksi sijoitettu Suomessa harvinainen hydromuovauskone. Kone on Euroopan suurimpia tutkimus- ja tuotantokäyttöön suunniteltuja metallin muokkauslaitteistoja. Tässä opinäytetyössä keskityttiinkin jaloterässtudion muovausosaamiseen esittelemällä muovattavien tuotteiden valmistukseen liittyvää problematiikkaa hydromuovauskoneella. Pää tavoitteena oli tutkia suurpainemuovauskoneella tehtyjä muovaustestejä ja protovalmistusta.

Perinteisesti opinäytetöissä esitetään teoriaosuudessa tarkasteltavien valmistustekniikoiden periaatteet. Koska tämän työn yksi tavoitteista oli toimia myös muovaustekniikan apuvälineenä, tuotiin tähän työhön syvävedon ja hydromuovauksen tärkeimpiä teknologiaparametrien määrittelykeinoja. Muovausteknologioista syväveto on teollisessakin tuotannossa jo kohtuullisen vanha teknologia ja sitä on tutkittu paljon, joten sen teoreettiseen tarkasteluun saatiin tietoa kohtuullisen helposti. Sen sijaan hydromuovauksen läpimurto ajoittuu 1990 -luvun alkupuolelle ja on siten varsin uusi tekniikka teollisessa

tuotannossa. Koska hydromuovaus näyttölee suurta roolia varsinkin autoteollisuudessa, on hydromuovausteknologian tutkimusaineistoa saatavana pääasiassa vahvoista autoteollisuusmaista. Suomen kielistä materiaalia löytyy vain vähän.

Muovauksen teoreettisen tarkastelun jälkeen esitettiin työssä hydromuovauskoneella tehtyjä testejä. Työn laajuutta koskevien näkökohtien vuoksi, tutkittiin työssä kuitenkin vain jaloterässtudion kannalta tärkeimpiä valmistusprosesseja. Hydro+ -projektin yhteydessä testattiin tuplakaksoiskartioputken valmistamista hydromuovaamalla, josta esiteltiin valmistusprosessi parametrien määrittelystä valmistukseen. Uuden teknologian käyttöönotto oli varsin työläs prosessi, koska asiantuntemusta alalta ei Suomesta löytynyt. Dokumentteja oli kuitenkin riittävästi asian käsittelyä varten. Seuraavaksi työssä edettiin ohutlevyjen muovaukseen, josta esitettiin koneen kokoonpanon ja ohjauksen soveltuvuutta levyaihion hydromuovauksessa. Tässä yhteydessä esitettiin myös esimerkkitapaus ja koneen teknologian kehittämistä paremmin levyn muovaukseen sopivaksi. Levymuovauksen dokumentointi perustui yksistään käyttöinsinöörin kokemusperäiseen tietoon. Toimin kuitenkin itse käyttöinsinöörinä, joten tapauksen raportointi oli kohtuullisen helppoa.

Viime vuosien aikana koneella oli tehty myös levyn puristamista muottiin kiinteällä painimella. Esimerkkitapauksia oli useita, mutta työn laajuutta koskevien näkökohtien vuoksi dokumentoitiin vain kaksi jaloterässtudiolle merkittävintä muovausprosessia. Näistäkin tapauksista työvaiheista oli lähteenä vain käyttöinsinöörin kokemusperäinen tieto ja työkalupiirustukset, mutta toiminta onnistuttiin kuvaamaan mielestäni hyvin.

Työn viimeisenä asiana esiteltiin taulukkomuodossa hydromuovauskoneella valmistettuja ja testattuja tuotteita. Dokumenttiin tuotiin myös valmistettujen tuotteiden kuvat.

Työn tarkoituksena oli esitellä hydromuovaimen käyttöä myös monipuolisena metallin muokkauskoneena. Työssä esiteltiin koneen käyttöä erilaisilla muovausteknologioilla. Tulevaisuudessa hydromuovauskoneen käyttöä tullaan vieläkin laajentamaan. Tammikuussa 2014 hydromuovauskoneen suurta puristusvoimaa testattiin myös ultralujien terästen särmäyksessä. Paksummat ultralujat teräslevyt vaativat sellaista puristusvoimaa, jota ei tavanomaisilla suurillakaan särmäyspuristimilla ole. Testit näyttivät lupaavilta ja seuraava sovellusalue hydromuovauskoneen käytössä tulee olemaan juuri erittäin lujien terästen särmäys.

Työn tavoite toteutui mielestäni hyvin. Työn tekeminen vahvisti henkilökohtaista osaamistani muovausteknologian alueella. Opinnäytteessä esitettyjen projektien toteutus on vahvistanut myös erilaisten valmistustekniikoiden osaamistani ja suunnittelutaitoani. Tästä on hyvä jatkaa eteenpäin ja uskon, että opinnäytetyö on hyvä työkalu hydro-muovauskoneen kehittämisessä yhä monipuolisemmaksi laitteeksi.

LÄHTEET

- Ahmetoglu, Mustafa 5.3.2001. The basic elements of tubular hydroforming. Hakupäivä 13.4.2014. <<http://www.thefabricator.com/article/hydroforming/the-basic-elements-of-tubular-hydroforming>>
- Bolkisev, Sergei & Gretsov, Alexandr & Semibratov, Genrikh. Report on Research Work: "Technology of Manufacturing Hollow Axis-symmetrical Parts". VNiti 2003. DIN 8584-3, 9.1.2003. Manufacturing processes forming under combination of tensile and compressive conditions - Part 3: Deep drawing; Classification, subdivision, terms and definitions.
- ERC/NSM Ohio State University, Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing. Hakupäivä 16.4.2014. <<http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/THFModule1/html/designsystem.html>>
- European Aluminium Association and The University of Liverpool 2010. Hakupäivä 17.4.2014. <<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=191&pageid=2144416768>>
- Gretsov, Alexandr 2009. Keskustelut, johtopäätökset ja muistiinpanot. Hydro+ - projektin tuplakaksoiskartioputken muovaustesteistä. Materiaalin käytettävyyden tutkimusryhmän sisäinen verkkoasema. Hakupäivä 18.4.2014.
- Gretsov, Alexandr 2009. OLI24-koneen käytön mahdollisuudet levyaihion muovaamisessa. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu.
- Groover, Mikell P. 2008. ISE 311 Sheet Metal Forming Lab Cup Drawing. Fundamentals of Modern Manufacturing Third Edition. Hakupäivä 4.5.2014. <http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/Sheet_Metal_Cup_Drawing_Lab_Presentation.ppt>
- Heikkinen, Hannu-Pekka, tutkimusinsinööri, Outokumpu Stainless Oy. VL: ainestodistus. Sähköpostiviesti veli-matti.pelimanni@tokem.fi 12.5.2014.
- Honka, Iikka 2000. Meistotekniikka 46245 A. Oulun yliopiston kurssimateriaalia. Oulun yliopistonpaino 2000.
- Hyväri, Ida-Maria 2010. JaloteräsStudion liiketoimintasuunnitelma. Opinnäytetyö. Kemi - Tornion ammattikorkeakoulu, Kemi.
- Journal for Technology of Plasticity, Vol. 31 (2006), Number 1-2. Hakupäivä 15.4.2014. <<http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/JTP/Download/2006/Article8.pdf>>
- Joutsenvaara, Jukka 2009 - 2013. Materiaalin käytettävyyden tutkimusryhmän sisäinen verkkoasema. Hakupäivä 15.4.2014.
- Kivivuori, Seppo & Viljamaa, Ahti. Terästen kylmämuovattavuus. Ohutlevy 2/2011.
- Koç, Muammer 2008. Hydroforming for Advanced Manufacturing, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC 2008.
- Korhonen, Antti & Larkiola, Jari 2012. Ohutlevyjen muovauksen perusteet. Uniprint, Oulu 2012.
- Manninen, Timo, tutkimusinsinööri, Outokumpu Stainless Oy & Ruoppa Raimo, erikoisasiantuntija Lapin AMK. Keskustelu 20.2.2013.
- Metal Forming Handbook 1998. Schuler GmbH:n ja Münchenin yliopiston muovaus- ja valutekniikan laitoksen julkaisu.
- Pelimanni, Veli-Matti 2009 - 2014. Materiaalin käytettävyyden tutkimusryhmän sisäinen verkkoasema. Hakupäivä 15.4.2014.
- Pohjanne, Pekka. Teema koneenrakennus, artikkeli. Tekniikka & Talous 2.5.2014, 16.
- Ruoppa, Raimo 2006. Loppuraportti. Muovausteknologian osaamisen siirto ajalta 1.12.2002 - 30.9.2006.
- Ruoppa, Raimo, erikoisasiantuntija Lapin AMK. Keskustelu 20.2.2013.

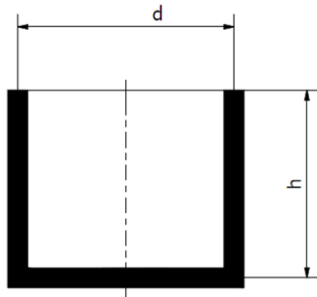
- Schellmann Marcus, Schuler Academy Wilnsdorf. Luennot hydromuovauskoulutuksessa aiheesta "Introduction of Hydroforming" 14.1.2009.
- Schuler Academy, 2009. Hydromuovauskoulutuksesta Schuler Academy Wilnsdorf 14.1. - 16.1.2009 luentomateriaalikansio. Schuler Academy 2009.
- Schuler Hydroforming 2009. Schuler Academy:n hydromuovauskoulutuksen luentomateriaalin liitteenä oleva CD -levy . Schuler Academy 2009.
- Siegert, K. ja Wagner, S. 1994, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, TALAT (Training in Aluminium Application Technologies) Lecture 3704.
- Suchy, Ivana 2005. Handbook of Die Design. Blacklick, OH, USA: McGraw-Hill Professional Publishing.
- Tschätsch, Heinz 2006. Metal Forming Practise: Processes - Machines - Tools. Springer - Verlag Berlin Heidelberg 17.5.2007.
- VDI 3146, 1999. Innenhochdruck-Umformen Grundlagen, lehti 1, sivu 2, Vorbemerkung.
- Vemta 2011. Keskustelut syvävetokoulutuksessa Vemta Oy:ssä 14. - 16.6. 2010.
- Yadav, Ajay 2006. Processes for hydroforming sheet metal, artikkeli. Stamping Journal tammikuu 2006, 40.

LIITTEET

- Liite 1. Syvävedon pyörähdyssymmetristen aihoiden laskentamallit
- Liite 2. Syvävedon nelikulmaisen aihion laskentamalli
- Liite 3. Aineodistus materiaalista 1.4301 2H/TR
- Liite 4. Aineodistus materiaalista 1.4318 2H/TR
- Liite 5. Aineodistus materiaalista 1.4509 2B
- Liite 6. Apurungon työkalun piirustukset

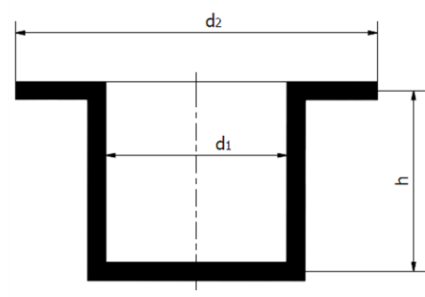
Liite 1 1(5)

1



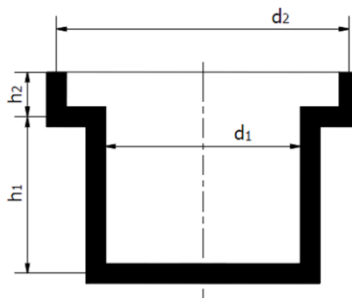
$$\sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h}$$

2



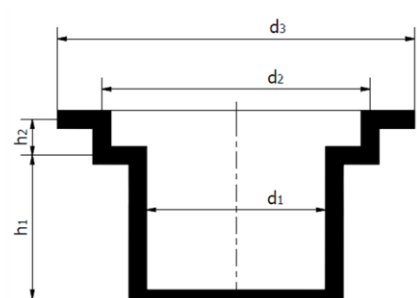
$$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h}$$

3



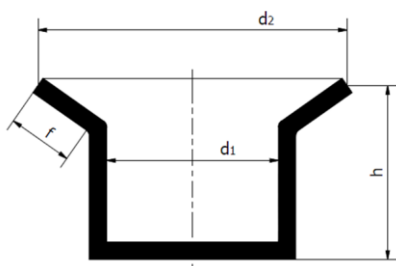
$$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2)}$$

4



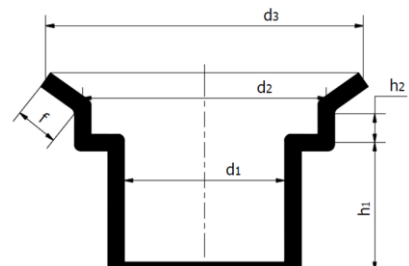
$$\sqrt{d_3^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2)}$$

5



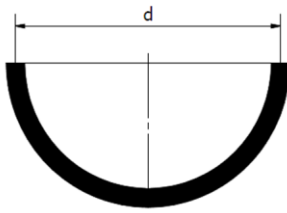
$$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h + 2 \cdot f \cdot (d_1 \cdot d_2)}$$

6



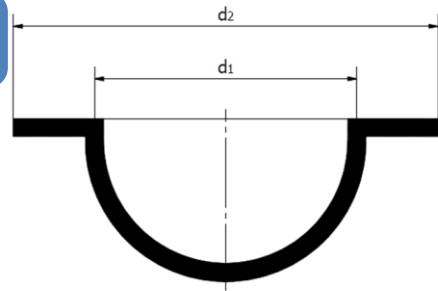
$$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2) + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3)}$$

7



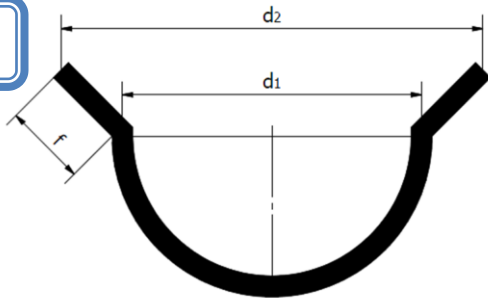
$$\sqrt{2 \cdot d^2} = 1,414 \cdot d$$

8



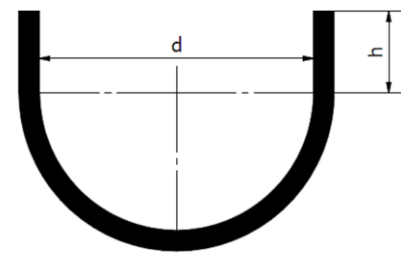
$$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$$

9



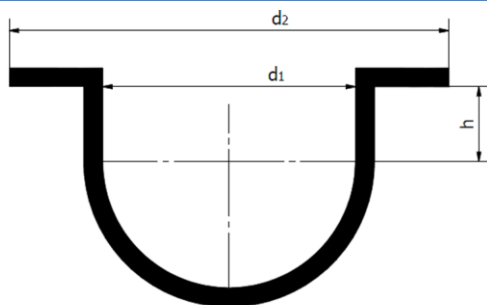
$$1,414 \cdot \sqrt{d_1^2 + f \cdot (d_1 + d_2)}$$

10



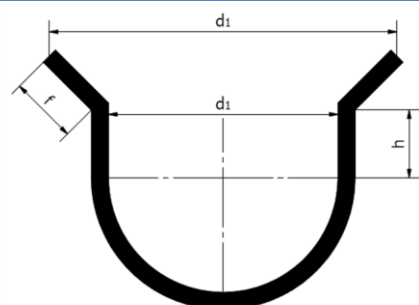
$$1,414 \cdot \sqrt{d^2 + 2 \cdot d \cdot h}$$

11



$$\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h}$$

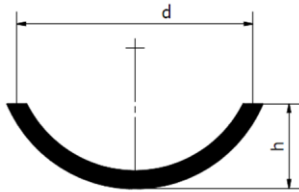
12



$$1,414 \cdot \sqrt{d_1^2 + 2 \cdot d_1 \cdot h + f \cdot (d_1 + d_2)}$$

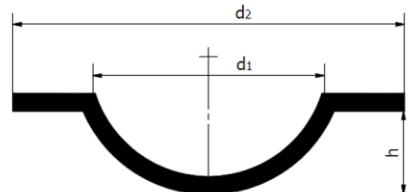
Liite 1 3(5)

13



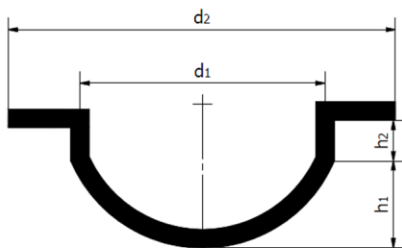
$$\sqrt{d^2 + 4 \cdot h^2}$$

14



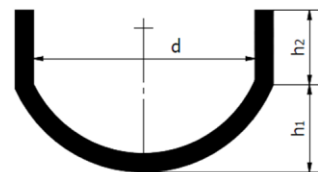
$$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot h^2}$$

15



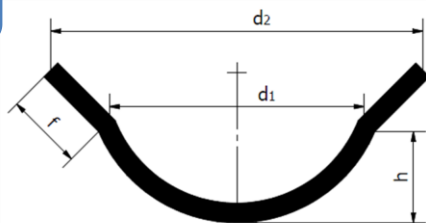
$$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (h_1^2 + d_1 \cdot h_2)}$$

16



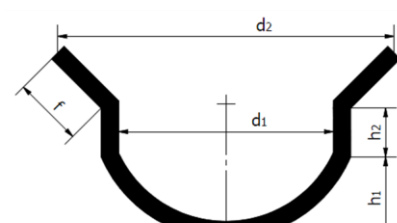
$$\sqrt{d^2 + 4 \cdot (h_1^2 \cdot d \cdot h_2)}$$

17



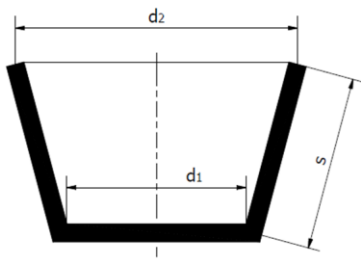
$$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot h^2 + 2 \cdot f \cdot (d_1 + d_2)}$$

18



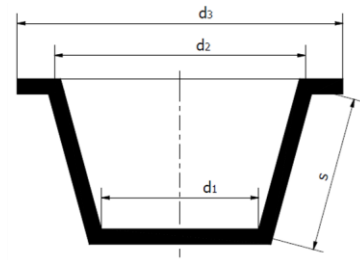
$$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot [h_1^2 + d_1 \cdot h_2 + 0,5 \cdot f \cdot (d_1 + d_2)]}$$

19



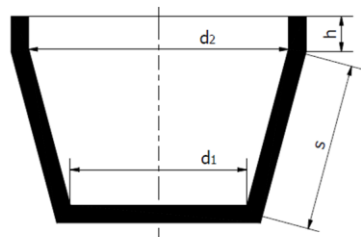
$$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot s \cdot (d_1 + d_2)}$$

20



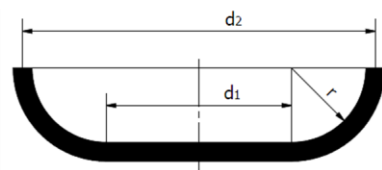
$$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot s \cdot (d_1 + d_2) + d_3^2 - d_2^2}$$

21



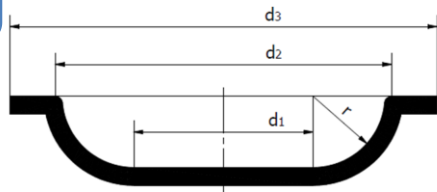
$$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot [s \cdot (d_1 + d_2) + 2 \cdot d_2 \cdot h]}$$

22



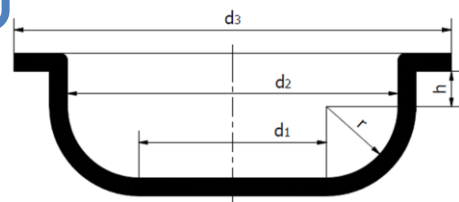
$$\sqrt{d_2^2 + 6,28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2}$$

23



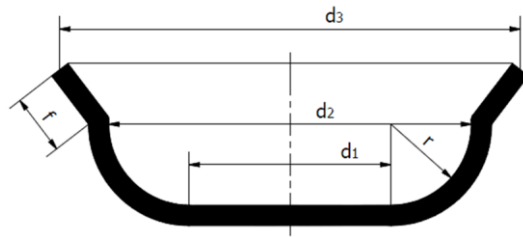
$$\sqrt{d_3^2 + 2,28 \cdot r \cdot d_2 - 0,56 \cdot r^2}$$

24

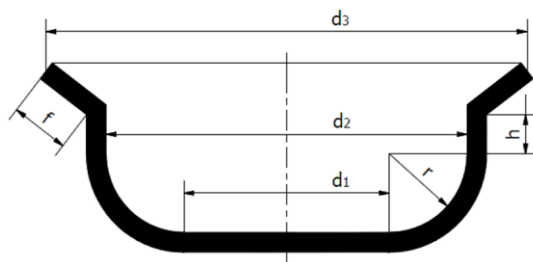


$$\sqrt{d_3^2 + 4 \cdot d_2 \cdot (0,57 \cdot r + h) - 0,56 \cdot r^2}$$

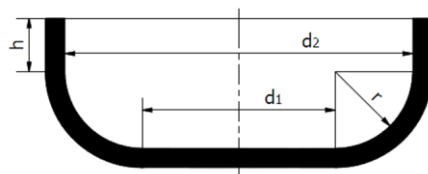
Liite 1 5(5)



$$\sqrt{d_1^2 + 6,28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3)}$$

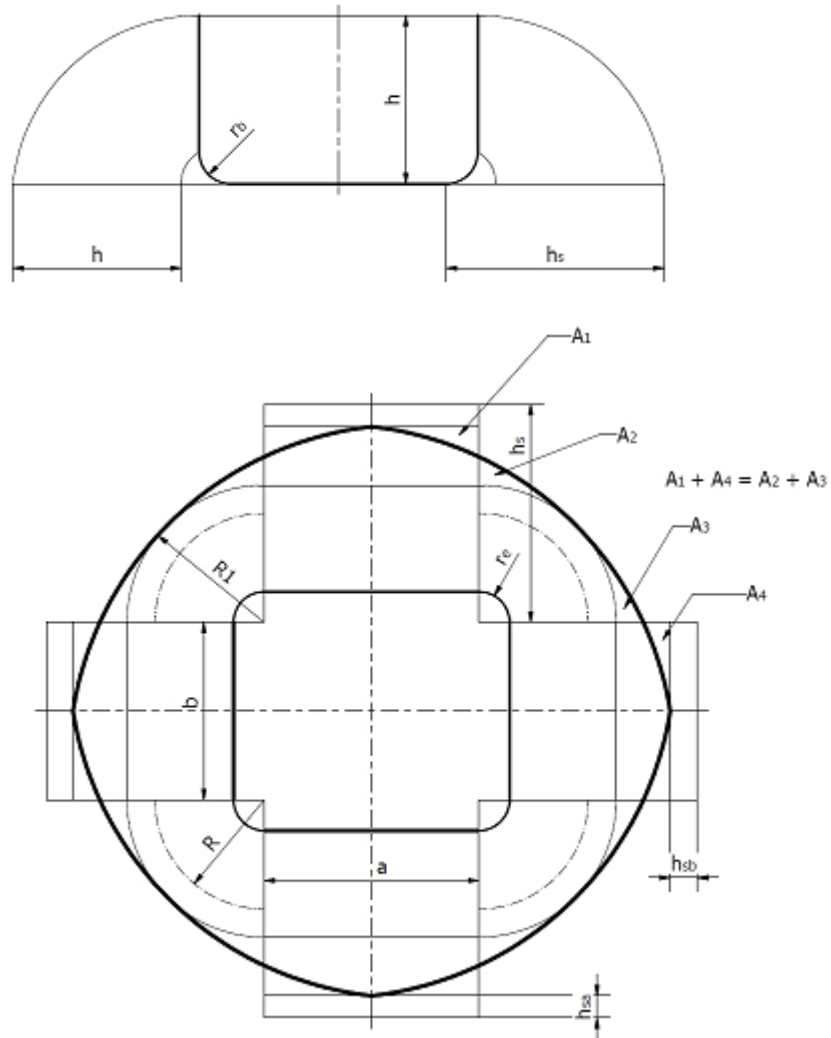


$$\sqrt{d_1^2 + 6,28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + 4 \cdot d_2 \cdot h + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3)}$$



$$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot (1,57 \cdot r \cdot d_1 + 2 \cdot r^2 + d_2 \cdot h)}$$

SYVÄVEDON NELIKULMAISEN AIHION LASKENTAMALLI (Honka 2000, 14)



Liitteen 2 kuva. Nelikulmisen kappaleen aihion määrittäminen

1. Lasketaan tasoon käännetyn seinämän leveys:

$$h_s = 0,57r_b + h + r_e$$

2. Pohjataso levittämättä jäävät kulmat, joiden halkaisija (ajatellaan sylinterimäisiksi):

$$d = 2r_e$$

3. Luotua sylinteriä pinta-alaltaan vastaavan pyöreän aihion säde:

$$D = \sqrt{0,253d^2 + d(h + 0,506r_b)}$$

Liite 2 2(2)

4. R suurennetaan arvoon R_1 :

$$R_1 = kR$$

missä

$$k = 0,074 \left(\frac{R}{2r_e} \right)^2 + 0,982$$

5. Vähennetään suorien sivujen suorakaiteet:

$$h_{sa} = y \frac{R^2}{a}$$

$$hb = y \frac{R^2}{b}$$

missä

$$y = y \frac{\pi}{4} (k^2 - 1)$$

INSPECTION CERTIFICATE 3.1
EN 10204 3.1

 Certificate No.
 Zeugnis Nr.
 N° du certificat

622527/001

 Page
 Seite
 Page

1 (01)

Date Datum Date

13.11.2012

Delivery address, Empfänger, Lieu de livraison OUTOKUMPU STAINLESS OY TERÄSTIE 95490 TORNIO SUOMI-FINLAND		OUTOKUMPU STAINLESS OY TERÄSTIE 95490 TORNIO SUOMI-FINLAND																						
Requirements, Anforderungen, Exigences EN 10088-2:2005		Our Order No. Unser Auftrag Nr. Notre commande n° 33769	Your order, Ihre Bestellung, Votre commande KUST.PAIKKA 4238022125 H-P HEIKKINEN																					
Product, Erzeugnisform, Produit SHEET, STAINLESS STEEL		Mark of Manufacturer Zeichen des Lieferanten Signe de producteur 	Process Erzeugnisart Mode de fusion AOD																					
Grade, Werkstoff, Nuance 1.4318		Tolerances Toleranzen, Tolérances 																						
Marking, Kennzeichnung, Marquage 1.4318 2H		Marks, Versandzeichen, Marques APPL-045																						
Line Reihe Ligne 1	Item Position Poste 	Charge-test No. Schmelze-Probe Nr. Coulee n° 1 18157 3	Size, Abmessungen, Dimensions 2,0 X 1500 X 2000 MM																					
		Quantity Stückzahl Nombre 10	Weight, Gewicht, Poids 458 KG																					
			Finish Ausführung Fini ENASTM																					
Charge no. Schmelze Nr. Coulee n° 18157		Chemical composition, Chemische Zusammensetzung, Composition chimique <table border="1"> <thead> <tr> <th>C %</th> <th>Si %</th> <th>Mn %</th> <th>P %</th> <th>S %</th> <th>Cr %</th> <th>Ni %</th> <th>N %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,020</td> <td>0,48</td> <td>1,21</td> <td>0,024</td> <td>0,002</td> <td>17,6</td> <td>6,6</td> <td>0,153</td> </tr> </tbody> </table>		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	N %	0,020	0,48	1,21	0,024	0,002	17,6	6,6	0,153					
C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	N %																	
0,020	0,48	1,21	0,024	0,002	17,6	6,6	0,153																	
Line Reihe Ligne 1	Mechanical properties, Mechanische Eigenschaften, Caractéristiques mécaniques <table border="1"> <thead> <tr> <th>Location Ort Lieu</th> <th>Rp0.2 MPa</th> <th>Rp1.0 MPa</th> <th>Rm MPa</th> <th>A5 %</th> <th>A50 %</th> <th>Hardness Härte, Dureté HB30</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>E</td> <td>606</td> <td>663</td> <td>925</td> <td>40</td> <td>36</td> <td>279</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>604</td> <td>661</td> <td>923</td> <td>41</td> <td>37</td> <td>282</td> </tr> </tbody> </table>		Location Ort Lieu	Rp0.2 MPa	Rp1.0 MPa	Rm MPa	A5 %	A50 %	Hardness Härte, Dureté HB30	E	606	663	925	40	36	279	A	604	661	923	41	37	282	Tensile test, Zugversuch, Essai de traction ISO 6892-1:2009 A223 SAMPLES PERPENDICULAR TO THE ROLLING DIRECTION TENSILE TEST AT ROOM TEMPERATURE IN DELIVERY CONDITION RP0.2 PROOF STRENGTH RP1.0 PROOF STRENGTH RM TENSILE STRENGTH A50 ELONGATION GL 50 MM A5 ELONGATION PROPORTION HB30 BRINELL HARDNESS HV10 VICKERS HARDNESS
Location Ort Lieu	Rp0.2 MPa	Rp1.0 MPa	Rm MPa	A5 %	A50 %	Hardness Härte, Dureté HB30																		
E	606	663	925	40	36	279																		
A	604	661	923	41	37	282																		
Identity test, Verwechslungsprüfung, Contrôle d'identification Size, Abmessungen, Dimensions Surface, Oberfläche, Surface Test of intergran. coros., Prüfung auf Interkrist. Korros., Test of coros. Interkrist. EN ISO 3651-2 A: OK		A = Beginning / Anfang / Début E = End / Ende / Fin																						
		We certify that the above mentioned products comply with the terms of the order contract. Wir bestätigen, dass die Lieferung den Vereinbarungen der Bestellannahme entspricht. Nous certifions que les produits énumérés ci-dessus sont conformes aux prescriptions de la commande.																						
		This test certificate is made by controlled ADP-system and is valid without signature. Dieses Zeugnis wurde von einem überprüften Datenverarbeitungssystem erstellt und ist ohne Unterschrift gültig. Ce certificat a été établi par un système informatique contrôlé et est valide sans signature.																						
		Outokumpu Stainless Oy Authorized inspector Werklooschwerständeriger inspecteur autorisé SUSANNA SIUKONEN																						
		FI-95490 Tornio, Finland Tel. +358 18 4521, Fax +358 18 452 350, www.outokumpu.com Domicile: Tornio, Finland. Business Identity Code 0823315-9																						

INSPECTION CERTIFICATE 3.1
EN 10204 3.1

 Certificate No.
 Zeugnis Nr.
 N° du certificat
628003/001

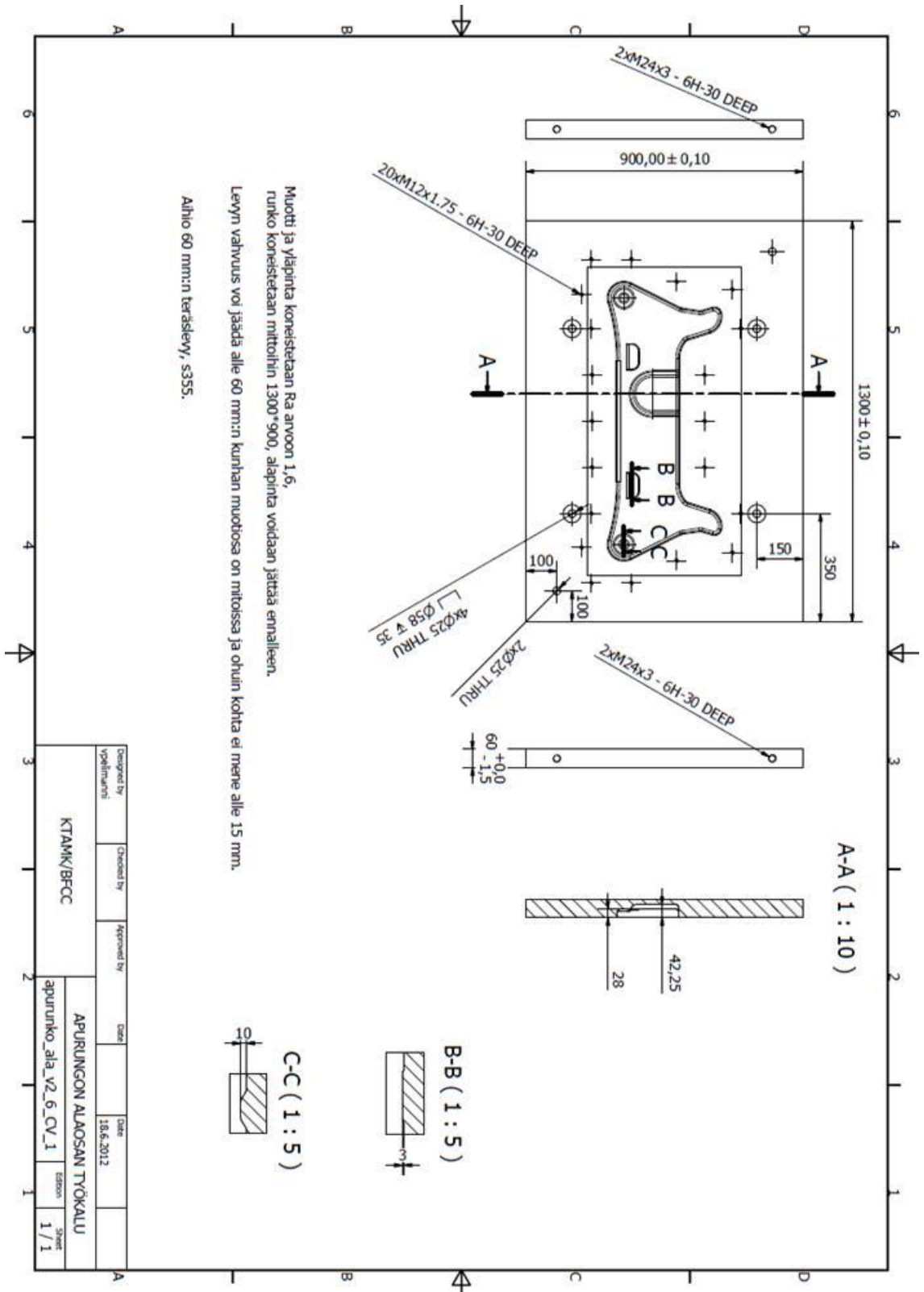
 Page
 Seite
 Page

1 (01)

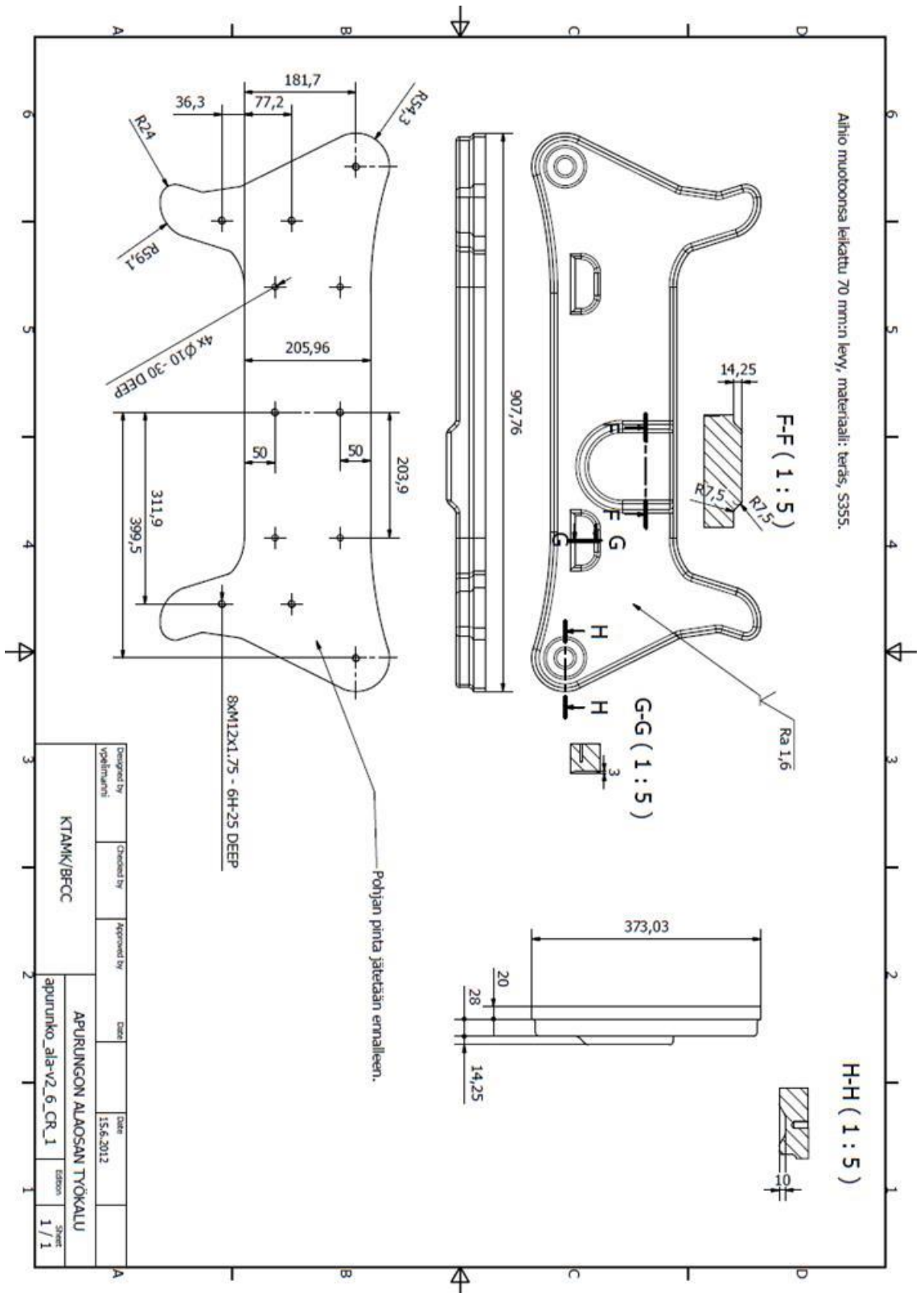
 Date Datum Date
22.01.2013

Delivery address, Empfänger, Lieu de livraison OUTOKUMPU STAINLESS OY		OUTOKUMPU STAINLESS OY									
TERÄSTIE 95490 TORNIO SUOMI - FINLAND		TERÄSTIE 95490 TORNIO SUOMI - FINLAND									
Requirements, Anforderungen, Exigences EN 10088-2:2005		Our Order No. Unser Auftrag Nr. Note commande n° 41170	Your order, Ihre Bestellung, Votre commande KUST.PAIKKA 42392900-076 P JANNE, ASPEGREN/KALAPUDAS								
Product, Erzeugnisform, Produit SHEET, STAINLESS STEEL		Merk of Manufacturer Zeichen des Lieferanten Signe de producteur 	Process Erzeugnisart Mode de fusion AOD								
Grade, Werkstoff, Nuance 1.4509		Tolerances Toleranzen, Tolérances									
Marking, Kennzeichnung, Marque 1.4509 2B		Marka, Versandzeichen, Marque FABRICS-PROJEKTI									
Line Reihe Ligne	Item Position Poste	Charge-test No. Schmelz-Probé Nr. Coulée n°	Size, Abmessungen, Dimensions								
1	2	18619 3	2,0 X 1500 X 3000 MM								
			Quantity Stückzahl Nombre 6								
			Weight, Gewicht, Poids 412 KG								
			Finish Ausführung Fini ENASTM 2B								
Charge no. Schmelz Nr. Coulée n°	Chemical composition, Chemische Zusammensetzung, Composition chimique										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Nb		
	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
	18619	0,012	0,46	0,27	0,028	<.001	18,2	0,2	0,14	0,40	
Line Reihe Ligne	Mechanical properties, Mechanische Eigenschaften, Caractéristiques mécaniques							Tensile test, Zugversuch, Essai de traction			
	Location Ort Lieu	Rp0.2 MPa	Rp1.0 MPa	Rm MPa	A5 %	A50 %	%	Hardness Härte, Dureté HBW			
1	E	316	336	486	49	34		176	ISO 6892-1:2009 A222		
	A	310	330	480	49	34		172	SAMPLES PERPENDICULAR TO THE ROLLING DIRECTION		
									TENSILE TEST AT ROOM TEMPERATURE IN DELIVERY CONDITION		
									RP0.2 PROOF STRENGTH		
									RP1.0 PROOF STRENGTH		
									RM TENSILE STRENGTH		
									A50 ELONGATION GL 50 MM		
									A5 ELONGATION PROPORTION		
									HBW BRINELL HARDNESS		
									HV10 VICKERS HARDNESS		
Identify test, Verwechslungsprüfung, Contrôle d'identification		Surface, Oberfläche, Surface									
-		Test of intergran. coros., Prüfung auf Interstit. Korros., Test de coros. interstit.									
		A = Beginning / Anfang / Début E = End / Ende / Fin									
		We certify that the above mentioned products comply with the terms of the order contract. Wir bestätigen, dass die Lieferung den Vereinbarungen der Bestellung entspricht. Nous certifions que les produits énumérés ci-dessus sont conformes aux prescriptions de la commande.									
		This test certificate is made by controlled ADP-system and is valid without signature. Dieses Zeugnis wurde von einem überprüften Datenverarbeitungssystem erstellt und ist ohne Unterschrift gültig. Ce certificat a été établi par un système informatique contrôlé et est valide sans signature.									
		Outokumpu Stainless Oy ANNE-MARIA SALMI									
		Authorized inspector Verlässchenstündiger Inspecteur autorisé									
		FI-95490 Tornio, Finland Tel. +358 18 4521, Fax +358 18 452 350, www.outokumpu.com Domicile: Tornio, Finland. Business Identity Code 0823315-9									

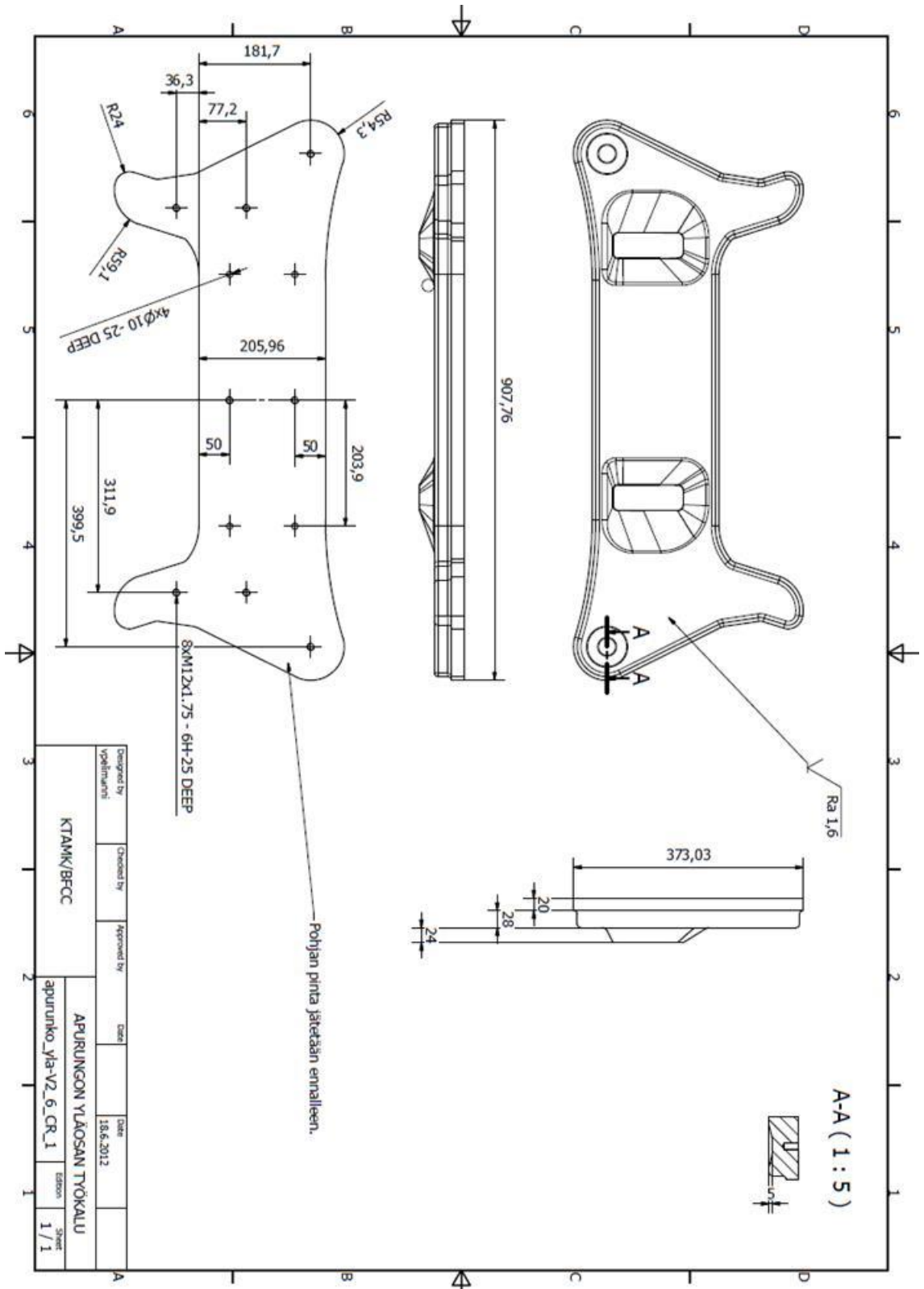
Liite 6 1(4)



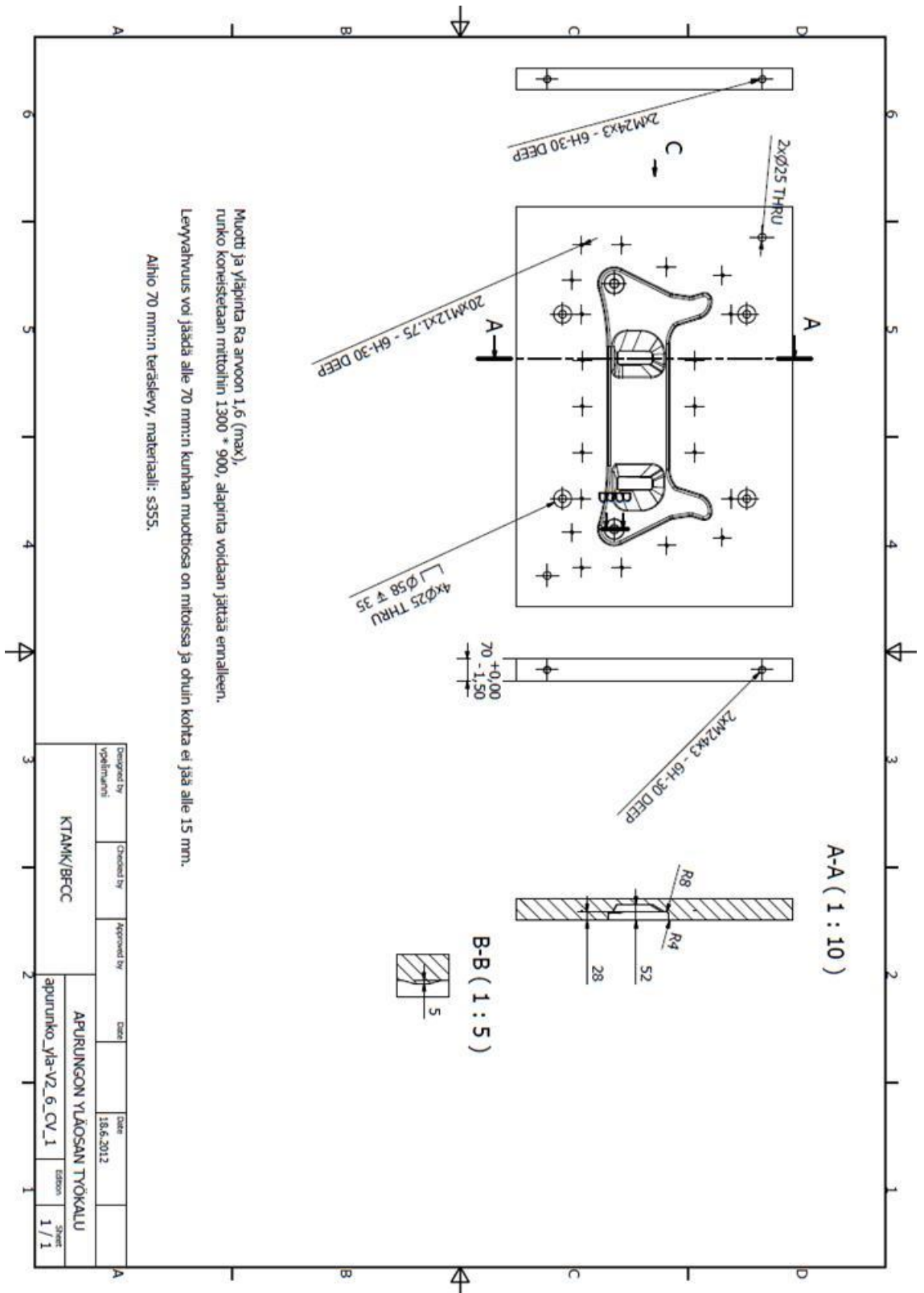
Liite 6 2(4)



Liite 6 3(4)



Liite 6 4(4)



Muotti ja yläpinta Ra arvoon 1,6 (max),
runko koneistetaan mittoihin 1300 * 900, alapinta voidaan jättää emälleen.
Levyvahvuus voi jäädä alle 70 mm:n kunhan muotossa on mittoissa ja ohuin kohta ei jää alle 15 mm.

Altio 70 mm:n teräslävy, materiaali: s355.