

RUISKUVALUMUOTIN
MUODONMUUTOSTEN MITTAAMINEN
VENYMÄLIUSKAN AVULLA

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Muovitekniikan koulutusohjelma
Opinnäytetyö
Kevät 2008
Petri Oinonen

Lahden ammattikorkeakoulu
Muovitekniikan koulutusohjelma

OINONEN, PETRI:

Ruiskuvalumuotin muodonmuutosten
mittaus venymäliuskan avulla

Muovitekniikan opinnäytetyö, 32 sivua, 12 liitesivua

Kevät 2008

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia ruiskuvalumuotissa ruiskuvaluprosessin aikana tapahtuvia muodonmuutoksia venymäliuskatekniikan avulla. Tavoitteena oli myös selvittää, ovatko muodonmuutokset kyllin suuria muodostaakseen muovijätettä muottipuoliskojen väliin.

Työn suoritus tapahtui kokonaan Lahden Ammattikorkeakoulussa. Mittauksen toteuttamiseen tarvittavan tilan sekä välineistön tarjosi Lahden ammattikorkeakoulu.

Työ on jaettu neljään osaan, joista ensimmäisessä kerrotaan venymäliuskasta mittaussäiliönä, sen toimintaperiaatteesta, rakenteesta, käytöstä ja erilaisista liuskatyypeistä sekä niiden eri konfiguraatioista. Työssä käsitellään lisäksi venymäliuskan valintaperusteita ja niiden vaikutusta sen toimintaan. Toisessa osassa kerrotaan Solidworks-ohjelmasta, sillä mallintamisesta ja siihen liittyvästä Cosmosworks-laajennuksesta sekä sen käytöstä. Kolmas osa käsittelee ruiskuvaluprosessia, ruiskuvalukonetta sekä ruiskuvalumuottia. Neljäs osuus kertoo tutkimuksen tarkoituksesta, suunnittelusta, suorittamisesta sekä saatujen tulosten analysoinnista.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että tutkitun ruiskuvalumuotin taipuman arvot ovat niin pieniä, että muottiin ei pääse syntymään muovijätettä. Tutkimuksessa selvisi myös, että hyvin suunnitellussa muotissa taipuma ei pääse lähellekään haitallisia taipuman arvoja, mikäli muottia käytetään asianmukaisesti.

Avainsanat: venymäliuska, ruiskuvalu, taipuma

Lahti University of Applied Sciences
Plastics engineering

OINONEN, PETRI:

Measuring of deformations in an injection molding mold with the help of a strain gage

Bachelor's Thesis in Plastics engineering, 32 pages, 12 appendices

Spring 2008

ABSTRACT

The subject of this thesis was to investigate the deformations in an injection molding mold with the help of a strain gage. Secondary objective of this study was to find out if the deformations are large enough to cause forming of plastic waste between the mold parts.

The study was commissioned by Lahti University of Applied Sciences. The facilities and the equipment needed for the research were offered by Lahti university of Applied Sciences as well.

This Thesis is divided into four parts. The first concentrates on strain gage as a measuring tool, its operating principles, construction, usage, various gage types and configurations. It also processes strain gage selection methods and their effect on the strain gage operation. The second part deals with the Solidworks computer program and its utilization along with its cosmosworks extension. The third section is about injection molding process, injection molding machine and injection molding mold. The fourth part glances at the purpose of the research, its planning, execution and analyzation of the results.

The study indicates that the strains affecting the mold being examined, are too small to allow the forming of excess plastic inside the mold. Based on the results of the study, it can also be stated that if the mold is properly designed and used, the strain cannot grow large enough to reach the critical values.

Keywords: strain gage, injection molding, strain

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	VENYMÄLIUSKA	2
2.1	Historia	2
2.2	Venymäliuskan toimintaperiaate	3
2.3.	Venymäliuskan asentaminen	4
2.4	Wheatstonen silta	4
2.5.	Venymäliuskalla mitattavat jännitykset	5
2.6.	Liuskatyypit	6
2.6.1	Lankaliuska	6
2.6.2	Metallikalvoliuska	7
2.6.3	Puolijohdeliuska	7
2.7	Venymäliuskan valinta	7
2.8.	Venymäliuskojen valintaperusteita	8
2.8.1	Vastuslangan/verkon materiaali	8
2.8.2.	Liuskan materiaali	10
2.8.3.	Liuskan resistanssi	11
2.8.4.	Liuskan pituus	11
2.8.5.	Metallikalvojen suuntaus	12
3.	SOLIDWORKS	12
3.1.	Solidworks	12
3.2.	Levinneisyys ja kilpailijat	13
3.3.	Solidworksin ominaisuudet	13
3.4.	Kappaleen mallintaminen Solidworksin avulla	14
4.	RUISKUVALU	14
4.1	Ruiskuvaluprosessi	14
4.2	Ruiskuvalukone	15
4.3	Ruiskuvalumuotti	16
5.	TUTKIMUS	17

5.1 Tutkimuksen tarkoitus	17
5.2 Mittauksessa käytettävä välineistö	18
5.2.1 Venymäliuska Kyowa KFG-2-350-D1-11	18
5.2.2 Venymäliuska-anturin vahvistin Lau 73.1	18
5.2.3 Tiedonkeräyslaite Kistler Dataflow 2853	19
5.3 Mittausjärjestelyt	20
5.4 Kokeen suorittaminen	22
5.5 Muotin taipuminen	24
5.6 Tulosten määrittäminen	26
5.7 Tulosten analysointi	27
6. YHTEENVETO	29
7. LÄHTEET	30
8. LIITTEET	32

1 JOHDANTO

Venymäliuska on anturi, jolla mitataan kappaleiden muodonmuutoksia. Sen toimintaperiaatteena on muuntaa mekaaninen liike elektronisen signaalin muotoon. Signaalin elektroninen muoto puolestaan mahdollistaa venymien mittauksen liuskaan kytkettyjen mittalaitteiden avulla.

Tutkimuksen kohteena on muovituotteiden valmistukseen käytetty ruiskuvalu-muotti. Tuotteita valmistettaessa muottiin kohdistuu suuria voimia, jotka pyrkivät taivuttamaan sitä eri suuntiin. Sen ulkopintoihin vaikuttaa muotin sulkemiseen käytetty sulkuvoima ja muottipesän sisäpintoihin ruiskutusaine, jolla muovisula levitetään pesän reunoille.

Tutkimuksen tarkoitus on selvittää venymäliuskan avulla, riittävätkö muottiin työprosessin aikana vaikuttavat voimat taivuttamaan sitä niin paljon, että muotin väliin syntyisi rakoja. Raon syntyminen aiheuttaisi muovijätteen eli purseen syntymistä muottipuoliskojen väliin, joka vaikuttaa tuotteen ulkonäköön ja voi pahimmillaan aiheuttaa ongelmia koneen toiminnalle.

Tutkimus on ensimmäinen Lahden ammattikorkeakoulussa tehty venymäliuskatekniikkaan perustuva tutkimus ja siinä hyödynnetään koulun omia laitteita sekä tiloja. Venymäliuskamittaus on yksinkertainen, halpa ja tehokas keino mitata kappaleissa tapahtuvia muodonmuutoksia, siksi se soveltuu venymien mittaamiseen melkein millä vain teollisuuden alalla.

2 VENYMÄLIUSKA

2.1 Historia

Venymäliuskan toiminta perustuu Lordi Kelvinin vuonna 1856 havaitsemaan ilmiöön, jonka mukaan metallisten johtimien resistanssi muuttuu, kun niitä venytetään mekaanisesti. Ilmiötä sovellettiin käytäntöön kuitenkin vasta 1930-luvulla, jolloin venymäliuska keksittiin.

Amerikkalainen professori Arthur C. Ruge keksi venymäliuskan vuonna 1938 miettiessään keinoa, jolla mitata vesisäiliöihin kohdistuvaa rasitusta maanjäristysten aikana. Hänen ensimmäinen venymäliuskasovelluksensa oli vesisäiliöön liimattu pala savukepaperia, johon oli liimattu metallilanka. Metallilangan molemmissa päissä oli liitännät mittalaitteistolle, joilla langan venymisestä aiheutuvaa resistanssin muutosta voitiin mitata. Hakiessaan patenttia, Ruge kuitenkin sai selville, että Caltechissa työskennellyt sähköinsinööri nimeltään Edward E. Simmons oli keksinyt samankaltaisen laitteen vuotta aiemmin. Tästä huolimatta, molemmat miehet saivat jaetun patenttioikeuden tuotteelle ja tunnustuksen laitteen keksijöinä. (Omega.com.2008.)

1950-luvulla, Bell Laboratoriesin tiedemiehet huomasivat germaniumin ja piin piezoresistiiviset ominaisuudet. Niillä havaittiin olevan yli 100-kertainen herkkyys metallilanka- ja metallikalvovenymäliuskoihin nähden, lisäksi ne myös palautuivat paremmin alkuperäiseen pituuteensa venytyksen jälkeen. Huonoina puolina oli kuitenkin materiaalien herkkyys lämpötilan vaihteluille sekä niiden epälineaarisuus. Uusin venymäliuskatyyppi on Piistä ja Germaniumista valmistettu puolijohdevenymäliuska, joka otettiin käyttöön 1970-luvulla. (Omega.com.2008.)

2.2 Venymäliuskan toimintaperiaate

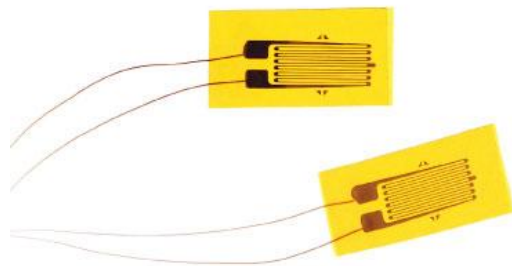
Venymäliuska on kappaleen muodonmuutosten (venymien) mittaamiseen tarkoitettu voima-anturi, jolla voidaan mitata kappaleeseen kohdistuvaa voimaa, jännitystä sekä kappaleen venymää.

Venymäliuskan toimintaperiaatteena on muuntaa mekaaninen liike elektronisen signaalin muotoon, jolloin venymä voidaan mitata liuskaan kytketyn mittalaitteiston avulla.

Mekaaninen liike tapahtuu liuskassa olevissa vastuslangoissa, jotka venyvät muodonmuutosten syntyessä. Venyessään langan poikkipinta-ala pienenee ja vastusarvo (resistanssi) kasvaa.

Venymäliuska-anturi koostuu polyimidi- tai epoksi liuskasta, johon on kiinnitetty vastuksena toimiva kupariseoksesta valmistettu metallilanka, metallikalvo, tai puolijohde. Vastus kiemurtelee pohjamateriaalissa ja on havaittavissa paljain silmin (Kuvio 1). Venymäliuska kiinnitetään kohteeseen yksi- tai kaksikomponenttiliiman avulla. Liiman tehtävänä on kiinnittää anturi mahdollisimman tukevasti mitattavaan pintaan sekä toimia sähköeristeenä anturin ja pinnan välillä.

(Kuoppala 1986, 58-59.)



KUVIO 1. Venymäliuska

Liuskan mitta-alue on tyypillisesti 2 – 10 mm ja huolellisesti asetetulla liuskalla voidaan mitata ainakin 10 % venymiä. Anturien pituudet vaihtelevat 0.2 - 100 mm välillä, mutta tavallisimpiin sovelluksiin suositellaan yleensä 3 - 6 mm pituisia liuskoja. (Efunda.com.2008.)

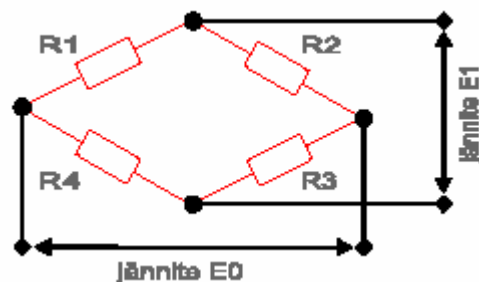
2.3. Venymäliuskan asentaminen

Liuskan asentamisessa on erittäin tärkeää, että liuskan liimaus suoritetaan huolellisesti, jotta mitattavassa kohteessa tapahtuvat muodonmuutokset valittyvät liuskaan mahdollisimman tehokkaasti. On myös tärkeää, että kiinnitykseen käytettävä liima on varta vasten venymäliuskojen kiinnittämiseen tarkoitettua, sillä monet tavalliset liimat ja epoksit menettävät ominaisuutensa mittauksen aikana tapahtuvan kuormituksen, lämpötilan vaihtelun sekä hystereesin vaikutuksesta.

(Andersson, 1981, 72-73.)

2.4 Wheatstonen silta

Toimiakseen venymäliuska on kytkettävä vastussiltaan, johon ohjataan yleensä 5-15 voltin tasa- tai vaihtovirta. Vastussilta muodostetaan Wheatstonen silta-kytkennällä (Kuvio 2.). Siltoja on kolme eri tyyppiä: kokosilta, johon kuuluu 4 liuskaa, puolisolta, johon kuuluu 2 liuskaa sekä harvemmin käytetty neljäsosasilta (1 liuska). Yhden ja kahden liuskan tapauksissa puuttuvat liuskat korvataan tavallisilla vastuksilla jotta Wheatstonen silta saadaan aikaan. Liuskasta tuleva signaali on vahvuudeltaan vain kymmeniä millivolteja, joten se on yleensä vahvistettava ennen mittauslaitteistoon syöttämistä. Mittaustuloksia voidaan tarkastella erilaisilla liuskan kytkettävillä mittalaitteilla sekä tietokoneella. (Oulun yliopisto.2008.)



KUVIO 2. Wheatstonen silta-kytkentä

Wheatstonen sillan ulostulojännite U_A saadaan sillassa olevien vastusten resistanssien R_1 , R_2 , R_3 ja R_4 sekä syöttöjännitteen U_E avulla seuraavasti:

$$U_A = \frac{R_1 R_2 - R_3 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_E$$

Jos $R_1 R_3 = R_2 R_4$, on Wheatstonen sillan ulostulojännite $U_A = 0$ ja silta on tasapainossa.

Tasapainotilasta poikkeutetun Wheatstonen sillan ulostulojännite U_A on

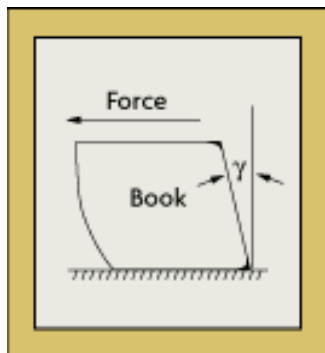
$$U_A = \frac{r}{(1+r^2)} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) U_E$$

jos R_2/R_1 on r . (Lujari-5.hut.fi.2008.)

2.5. Venymäliuskalla mitattavat jännitykset

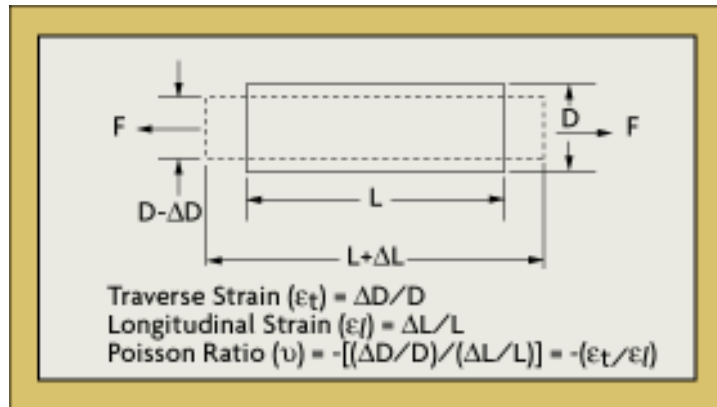
Ideaalisessa tapauksessa kappaleen resistanssin muutokseen vaikuttaisivat vain kappaleen pinnan muodonmuutokset, mutta käytännössä resistanssiin vaikuttaa moni eri tekijä. Näitä tekijöitä ovat: lämpötila, käytetty liima, materiaalin ominaisuudet ja mittaolosuhteiden pysyvyys. Koska materiaalin ominaisuudet eivät ole samat joka suuntaan, niin ei riitä että jännitys mitataan vain yhdessä suunnassa. Mahdollisimman tarkan mittaustuloksen saavuttamiseksi voidaan mittauksesta määrittää lisäksi leikkaus-, Poisson-, taivutus- sekä torsionaalinen jännitys.

Leikkausjännitys pyrkii venyttämään kappaletta suunnikkaan muotoon siihen kohdistuvan horisontaalisen voiman vaikutuksesta. Leikkausjännitys voidaan määrittää kappaleen alkuperäisen ja venymän jälkeisen sijainnin muodostaman kulman muutoksen avulla: leikkausjännitys on kulman tangenti. Tapahtumaa on havainnollistettu kirjan avulla kuviossa 3.



KUVIO 3. Esimerkki leikkausjännityksestä.

Poisson-jännitys ilmaisee liuskassa tapahtuvan ohenemisen ja venymän (Kuvio 4). Se määritetään kuparilangassa tapahtuvan poikittaissuuntaisen kapeneman suhteella pitkittäissuuntaiseen venymään. Langan venyessä ja ohetessa sähköinen resistanssi kasvaa.



KUVIO 4. Esimerkki Poisson-jännityksestä.

Taivutus- eli momenttijännitys voidaan määrittää kappaleeseen kohdistuneen voiman ja taipuman suhteella. Torsionaalinen jännitys voidaan laskea jakamalla torsionaalinen jännitys torsionaalisella kimmokertoimella. (Omega.com.2008.)

2.6. Liuskatyypit

Venymäliuskoja on kolme eri päätyyppiä: lankaliuska, metallikalvoliuska sekä puolijohdeliuska

2.6.1 Lankaliuska

Lankaliuska valmistetaan vastuslangasta, joka on paksuudeltaan 0,015 - 0,03 mm. Se taivutellaan monin kerroin, jotta liuskalle saataisiin mahdollisimman suuri resistanssi ja siten saavutettaisiin myös maksimaalinen herkkyys. Lankaliuskat ovat tunnetusti hyvin stabiileja ja kestävät voimakkaitakin dynaamisia kuormituksia.

2.6.2 Metallikalvoliuska

Metallikalvoliuska on nykyään käytetyin venymäliuskatyyppi. Liuskan johdinkalvo valmistetaan joko etsaamalla tai ohutkalvotekniikalla. Etsaus on valmistusmenetelmästä yleisempi. Siinä muutamia mikrometrejä ohut metallikalvo päällystetään valoherkällä aineella, valotetaan maskin lapi ja kehitetään. Seuraavaksi valottuneet alueet poistetaan syövyttämällä, jolloin jäljelle jää haluttu johdinkuvio. Ohutkalvomenetelmässä kuvio höyrystetään tyhjiössä suoraan liuskan pohjamateriaalin päälle, tällä tavoin liuskasta saadaan erittäin ohut. Metallikalvoliuskoissa on myös valittavana useita erilaisia johdinkuvioita.

2.6.3 Puolijohdeliuska

Puolijohdeilla on muissa liuskoissa käytettyjä metallivastuksia suurempi ominaisvastus, joten puolijohdeliuska voidaan valmistaa rakenteeltaan yksinkertaisemmaksi. Puolijohde on myös ominaisuuksiltaan metalleja herkempi, joten samalla suhteellisella venymällä voidaan saavuttaa monikymmenkertainen herkkyyks metalliliuskaan verrattuna. Puolijohdeliuska on kuitenkin herkkä lämpötilan vaihteluille, jotka voivat aiheuttaa mittausvirheitä. Liuskalla on myös heikko lineaarisuus. (Kuoppala 1986, 58 - 59.)

2.7 Venymäliuskan valinta

Venymäliuskoja on tarjolla monia erilaisia ja jokainen liuska on valmistettu tietynlaisia mittausolosuhteita varten. Kokeneet käyttäjät voivat kuitenkin koota haluamansa tyyllisen liuskan lukuisista tarjolla olevista materiaaleista. Materiaaleja yhdistelemällä käyttäjä voi muokata liuskan vastaamaan mittausolosuhteiden vaatimuksia. Tarkoituksenmukaisen venymäliuskan valinta voidaan suorittaa lukuisien erilaisen valintaperusteiden mukaan, joista yleisimmät ovat: vastuslangan materiaali, vastuskalvon kuvio, liuskan materiaali, liuskan resistanssi ja liuskan pituus. Edellä mainitut ominaisuudet vaikuttavat eri tavoin liuskan kestävyys ja mittaustark-

kuuteen, siksi niihin on syytä paneutua tarkasti ennen valintaa. Standardityyppiset venymäliuskat on esitetty taulukossa 1. (Efunda.com.2008.)

TAULUKKO 1. Standardityyppiset venymäliuskat

EA	Konstantaanikalvo, polyimidiliuska
CEA	Kapseloitu konstantaanikalvo, polyimidiliuska
N2A	Konstantaanikalvo, ohut polyimidiliuska
WA	Kapseloitu konstantaanikalvo, suurikestoiset metalliset liitinlangat
SA	Kapseloitu konstantaanikalvo, suurikestoiset metalliset liitinlangat
EP	Suuria pituudenmuutoksia kestävä konstantaanikalvo
ED	Isoelastinen kalvo, polyimidiliuska
WD	Kapseloitu isoelastinen kalvo, suurikestoiset metalliset liitinlangat
SD	Kapseloitu isoelastinen kalvo, juottoliitospisteet
EK	K-Seos kalvo, polyimidiliuska
WK	Kapseloitu K-seos kalvo, suurikestoiset metalliset liitinlangat
SK	Kapseloitu K-seos kalvo, juottoliitospisteet
S2K	Kapseloitu K-seos kalvo, suuret juottoliitospisteet

2.8. Venymäliuskojen valintaperusteita

2.8.1 Vastuslangan/verkon materiaali

Venymäliuskan vastusosa on merkittävin mittaustulokseen vaikuttava tekijä. Yleisin valmistusmateriaali on konstantaani eli kuparin ja nikkelin seos (A- ja P-Seokset) kun taas erikoisempiin mittauksiin voidaan käyttää K-, D- tai platinaseosta.

P-Seos:

- On yleispätevä materiaali, joka sopii kaikkiin venymäliuskasovelluksiin, se voidaan valita esim. jos käyttäjällä ei ole tietoutta muiden materiaalien ominaisuuksista.
- On sopiva materiaali jos rasitus ei vaihtelee mittauksen aikana.
- Sopii suurien venymien mittaukseen
- Voidaan valita, jos halpa hinta on tärkeää. Konstantaani on halvimpia markkinoilla olevia vastuslankamateriaaleja.

A-seos:

Ominaisuudet muuten samat kuin edellä, mutta lisäominaisuutena lämpötilakompensointi. Eli materiaali on optimoitu siten, että se tuottaa mahdollisimman vähän lämpöä lämpöalueella -45°C - $+200^{\circ}\text{C}$. Tämä ominaisuus siten myös vähentää lämpötilan vaihtelusta johtuvia mittausvirheitä.

Isoelastinen seos (D-Seos):

- Sopiva materiaali jos lämpötila on kontrolloitu ja koepaikkana on esim. tuuletettu laboratorio.
- Sopii mittauksiin, jossa kohde on vaihtelevan rasituksen alaisena.
- Voidaan käyttää sovelluksiin, jossa venymäliuskalta vaaditaan tavallista suurempaa rasituskestävyyttä.

K- eli Karma-seos:

- Soveltuu mittauksiin, jotka suoritetaan erittäin matalissa tai vaihtelevissa lämpötiloissa (materiaalin lämmönkestoalue on -269°C - 260°C).
- Sopii, jos materiaalilta edellytetään lämpötilan kompensointia.
- Kannattaa käyttää vain, jos käyttäjällä on riittävästi kokemusta materiaalien liittämistä juottamisen avulla, sillä K-seoksen juotosliitos on yleensä vaikea toteuttaa.

Platinapohjainen seos

- Voidaan valita, jos mittaus tapahtuu korkeissa lämpötiloissa ($>230\text{ °C}$). (Efunda.com.2008.)

2.8.2. Liuskan materiaali

Myös itse liuskaosa voidaan valita mittaukseen sopivaksi, tarjolla on useita valmistusmateriaaleja tavallisista hieman erikoisempiin.

Polyimidiliuska:

- Yleispätevä materiaali, sopii kaikkiin venymäliuskasovelluksiin, voidaan valita esim. jos käyttäjällä ei ole tietoutta muiden materiaalien ominaisuuksista.
- Soveltuu mittauksiin, joissa jännitys on suurimmilta osin staattista.
- Ei sovi ääriolosuhteisiin, esim. paikkoihin, joissa vallitsevat suuret lämpötilat.

Epoksiliuska:

- Sopii mittauksiin, joissa liuskamateriaalista johtuvien mittausvirheiden eliminointi on tärkeää.
- Soveltuu vain kokeneille käyttäjille, sillä epoksiliuskat ovat hauraita ja vaativat käyttäjältä taitoa asennusvaiheessa.

Lasikuituvahvisteinen epoksiliuska:

- Soveltuu mittauksiin, jossa kohde on vaihtelevan rasituksen alaisena.

Tarraliuska:

- Kiinnitysvaiheessa pinta repäistään pois, jolloin ainoastaan eristeenä toimiva epoksi ja vastuslanka jäävät kohteeseen.
- Kun mittaus pitää suorittaa mahdollisimman nopeasti (n. 10 minuuttia kiinnittämisestä). (Efunda.com.2008.)

2.8.3. Liuskan resistanssi

Liuskan resistanssi on suhteessa liuskan herkkyyteen: mitä suurempi resistanssi liuskalla on, sitä suurempi on liuskan herkkyys. Seuraavassa on verrattu erilaisten liuskojen ominaisuuksia.

Suuriresistanssinen liuska:

- 350 tai 1000 Ω
- Käytetään, jos liuskalta vaaditaan suurta herkkyyttä.

Pieniresistanssinen liuska:

- 120 Ω
- Jos liuska joutuu väsymiskuormituksen alaiseksi, niin pieniresistanssinen liuska on soveltuva ratkaisu, koska se on suuriresistanssista liuskaa suurempi ja kestää siksi väsymiskuormaa paremmin.
- Jos halpa hinta on tärkeä.

2.8.4. Liuskan pituus

Liuskan pituus vaikuttaa sekä liuskan hintaan että sen asennettavuuteen.

Lyhyt liuska (3 mm tai pienempi) kannattaa valita, jos:

- Liuskan asentamiselle on erittäin vähän tilaa
- Mittauskohde on epätasainen, esim. kohde sijaitsee kolossa tai halkeamassa.
- Tarkkuus ei ole kriittinen tekijä mittauksen kannalta.

Pitkä liuska (6mm tai pidempi) kannattaa valita jos:

- Asentamisnopeus on tärkeää. Pitkät liuskat ovat helpompia käsitellä ja asentaa.
- Liuska altistuu kuumuudelle, pidempi liuska on vähemmän herkkä lämmön vaikutuksille.
- Jos mitattava materiaali on epähomogeenistä, esim. betoni. Tällöin liuskan pituus on oltava vähintään kaksi kertaa niin suuri, kuin materiaalin epähomogeeniset osat.

- Jos halpa hinta on tärkeä. Pituudeltaan 5 - 12.5 mm olevat liuskat ovat muita halvempia. (Efunda.com.2008.)

2.8.5. Metallikalvojen suuntaus

Metallikalvojen suunta ja määrä vaikuttavat olennaisesti mittaustuloksiin.

Yksiaksiaalinen venymäliuska:

Liuskaan on asennettu yksi metallikalvo, joka on asennettu 0° tai 90° kulmaan. Yksiaksiaalinen liuska voidaan valita jos mittausta tapahtuu vain yhteen suuntaan. Se on toimiva vaihtoehto myös silloin, kun halpa hinta on tärkeä.

Biaksiaalinen venymäliuska:

Biaksiaalisessa liuskassa on kaksi metallikalvoa, joista toinen on 0° ja toinen 90° kulmassa. Se soveltuu mittauksiin, joissa on useampi suuntainen kuormitus ja suunnat tunnetaan.

Triaksiaalinen venymäliuska:

Triaksiaalisessa liuskassa on kolme metallikalvoa, jotka on asennettu 0° -, 45° - ja 90° - tai 0° -, 60° - ja 120° kulmiin. Sitä voidaan käyttää mittauksissa, joissa kuormitus tapahtuu monessa eri suunnassa ja suuntia ei tunneta.

(Efunda.com.2008.)

3 SOLIDWORKS

3.1 Solidworks

Solidworks on mekaaninen, 3-ulotteinen CAD-tyyppinen suunnitteluohjelma. Ohjelman on suunnitellut Solidworks Corporation ja se on suunniteltu Microsoft Windows-käyttöjärjestelmälle.

3.2 Levinneisyys ja kilpailijat

Solidworksia käyttävät enimmäkseen insinöörit ja suunnittelijat. Ohjelman käyttäjäryhmä vaihtelee yksilöistä suuriin yrityksiin ja se kattaa suuren osan tuotannon markkina-alueesta. Ainoa heikko alue ohjelman markkinoinnille on lentokone- ja autoteollisuus, joiden suunnittelijat käyttävät edelleen ”perinteisiä”, hyväksi havaitsemiaan suunnitteluohjelmia, kuten CATIA:a ja Unigraphicsia. Solidworksin pääasiallisia kilpailijoita ovat edellä mainittujen lisäksi ohjelmat Solid Edge, Autodesk Inventor sekä Pro/ENGINEER.

3.3 Solidworksin ominaisuudet

Solidworks hyödyntää parametrisuunnitteluun ja yksityiskohtiin perustuvaa suunnittelumekanismia kappaleiden ja kokonaisuuksien mallintamisessa.

Parametrit ovat suunnittelussa käytettäviä mittoja ja rajoituksia, jotka määrittelevät kappaleen koon, muodon sekä piirteet. Kappaleessa käytettävät parametrit ovat joko numeerisia, kuten mittoja (esimerkiksi ympyrän halkaisija) tai geometrisiä (kuten muotojen yhdensuuntaisuus, samanlaisuus tai samankeskisyys).

Yksityiskohtien mallintaminen suoritetaan parametrisuunnittelun jälkeen muokkaamalla kappaletta erilaisilla muokkaustoiminnoilla. Ohjelmassa on valmiina erilaisia muotoon ja operaatioon perustuvia muokkaustoimintoja. Muotoon perustuvien (features) toimintojen avulla kappaleeseen voidaan tehdä esimerkiksi reikiä, lovia, korostuksia tai vaikka poistaa/lisätä materiaalia. Muotoon perustuvat toiminnot vaativat, että kappale on suunniteltu 2- tai 3-ulotteisen ”sketsin” eli luonnoksen avulla. Operaatioon perustuvilla (operations) toiminnoilla voidaan esimerkiksi pyöristää kappale tai tehdä siitä ontto, operations-toiminnot eivät vaadi ”sketsiä” toimiakseen. (Solidworks.com.2008.)

3.4. Kappaleen mallintaminen Solidworksin avulla

Kappaleen mallintaminen aloitetaan luomalla joka 2- tai 3-ulotteinen luonnos eli ”sketsi”. Sketsi koostetaan hyödyntämällä ohjelman tarjoamia geometrioita, joita ovat esimerkiksi: viiva, kaari, ympyrä tai neliö. Ohjelmassa on mittatyökalu, jonka avulla kappaleelle määritellään mitat. Kappaleille voidaan myös määrittää keskinäisiä yhteneväisyyksiä relations-toiminnon avulla. Toiminnolla kappaleet voidaan määrittää esim. keskenään samansuuntaisiksi. Solidworks mallintamisessa parametrit määräävät geometriaa, eikä päinvastoin, eli geometria käyttäytyy määrättyjen mittojen ja suhteiden mukaan. (Solidworks.com.2008.)

3.5 Cosmosworks

Cosmosworks on Solidworksin laajennus, jossa voidaan testata Solidworksilla mallinnettujen kappaleiden käyttäytymistä erilaisten voimien ja rasiusten vaikutuksen alaisena. Kappaleesta voidaan etsiä sen heikot kohdat erilaisten testien avulla ja siten se voidaan myös optimoida kestävämmän halutun tyyppistä rasiusta. Cosmosworksilla voidaan tutkia yleisimpiä kappaleeseen vaikuttavia rasituksia, kuten siirtymää, taivutusta, puristusta, vääntöä, kitkaa tai painetta. Kappaleessa tapahtuvat muodonmuutokset saadaan näkymään erivärisinä osina rasiuksen mukaan. (Solidworks.com.2008.)

4 RUISKUVALU

4.1 Ruiskuvaluprosessi

Ruiskuvalu on tärkein muovituotteiden valmistustekniikka, jolla valmistetaan kolmiulotteisia muovikappaleita. Siinä sula muovimassa ruiskutetaan paineella ruiskuvalumuottiin ja massa muotoutuu jäähtyessään muottipesän määräämään muotoon. Muotit ovat usein vesijäähdytteisiä, jotta jäähtyminen olisi nopeampaa. Valmistus-

kierto kestää kappaleen koosta riippuen muutamasta kymmenestä sekunnista muutamisiin minuutteihin. Mitä suurempi seinämäpaksuus kappaleella on, sitä hitaammin se jäähtyy. Ruiskuvalukoneella valmistettavien kappaleiden koko voi vaihdella alle grammasta useisiin kiloihin, riippuen koneen koosta. Koneen muottien aukeaminen on useimmiten toteutettu siten, että muotin auetessa kappale irtaana. Monesti kappale vain putoaa muotista koneen alla olevaan laatikkoon tai kuljettimelle, mutta nykyään on yleistymässä tekniikka jossa teollisuusrobotti poimii valmiin kappaleen ja siirtää sen tarjottimelle. Tarjottimelta kappale voidaan automatisoidusti poimia seuraavassa työvaiheessa. Ruiskuvaletusta kappaleesta voidaan yleensä nähdä ruiskutuskohta, muotin sauma ja seinämien pieni päästö kappaleen poistumissuuntaan. Yleisimmät ruiskutettavat muovilaadut ovat Polystyreeni, ABS, Polyamidi, Polypropeeni ja Polyeteeni. Ruiskuvalulla voidaan valmistaa kaikenlaisia muoviesineitä yksinkertaisesta esineestä teknisiin osiin. Yleisiä valmistettavia tuotteita ovat esimerkiksi: astiat, lelut, kännykänkuoret, kotelot, ämpärit, kertakäyttömukit, jne. (Järvelä, ym.1999, 47 - 57.)

4.2 Ruiskuvalukone

Ruiskuvalukoneen keksivät veljekset John Wesley ja Isaiah Hyatt vuonna 1872, kone toimi mäntäperiaatteella. Vuonna 1946 James Hendry kehitti ensimmäisen ruuvia hyödyntävän ruiskuvalukoneen, joka mullisti muovituotteiden valmistuksen. Nykyisin suurin osa (noin 95 %) ruiskuvalukoneista toimii ruuviperiaatteella.

Ruiskuvalukone koostuu rungon lisäksi sulkuyksiköstä, ruiskutusyksiköstä, käyttöyksiköstä, ohjausyksiköstä sekä muotista. Koneen tehtävä on suorittaa muotin avaaminen ja sulkeminen, plastisoidun muovin ruiskutus muottiin sekä uuden annoksen plastisointi. Sulan ruiskuttaminen muottiin tehdään yleensä hyvin suurella nopeudella, tämä aiheuttaa muottipesään paineen, joka pyrkii aukaisemaan muottia. Jotta muotti pysyisi kiinni, tarvitaan muottipuoliskojen kiinnipitämiseen puristava voima, jota nimitetään sulkuvoimaksi. Sulkuvoiman pitää olla sitä suurempi, mitä suurempi paine ja sen vaikutuspinta-ala on muottipesässä.

Ruiskuvalukoneen tyyppin luokittelu tehdään yleensä sulkuvoiman perusteella, mutta myös ruiskutuspainetta ja ruuvikokoa käytetään luokitteluperusteena. Sulkuvoima voi vaihdella alle 5 tonnista 6000 tonniin.

Muotin sulkujärjestelmä on yleensä asennettu koneeseen siten, että muotti aukeaa vaakatasossa, mutta joissain tapauksissa järjestelmä on rakennettu pystysuuntaan aukeavaksi.

(Järvelä, ym. 1999, 92 - 112.)

4.3 Ruiskuvalumuotti

Muotin tehtävänä on antaa muovisulalle haluttu muoto, jähmetettävä se, sekä työntettävä valmis kappale ulos. Näistä tehtävistä selviytyäkseen muotin on kestävä muovisulan aiheuttamia suuria paineita sekä koneen aiheuttamien sulkuvoimien vaihteluja, ohjattava muotinpuoliskot tarkasti yhteen ja oltava helposti avattavissa.

Jokaiselle erilaiselle kappaleelle joudutaan suunnittelemaan oma muottinsa. Muotin omistajana toimii yleensä muotin ja muovituotteen suunnitellut yritys. Yritys, jossa ruiskuvalaminen tapahtuu, on kuitenkin vastuussa muottien asentamisesta ja käytöstä. Muotteja valmistavat myös muotinvalmistukseen erikoistuneet yritykset. Nykyään muottirungot on standardoitu ja niille on olemassa omat toimittajansa. Jokainen muotti on yksilöllinen ja juuri tietylle kappaleelle varta vasten suunniteltu, myös materiaalivalinta ja valmistusmenetelmä on muottikohtaista. Nämä tekijät nostavat muotin hintaa. Nykyään apuna valmistuksessa käytettävät tietokoneet ovat lyhentäneet muotin valmistusaikaa, mutta valmistuskustannuksia ei ole silti onnistuttu laskemaan samassa suhteessa.

Muotti koostuu vähintään kahdesta perusosasta: kiinteästä muottipuolikkaasta ja liikkuvasta muottipuolikkaasta. Muottikokoonpanoissa on kuitenkin yleensä myös monia muita elementtejä. Sula massa ohjataan muottipesään syöttökanavien avulla, jonka jälkeen muottipesä jäähdyttää sen ja antaa sille muodon. On tärkeää, että muotin avautuessa ja sulkeutuessa liikkuvat osat keskitetään toisiinsa ohjausele-

menttien avulla mahdollisimman tarkasti. Jos osat eivät ole tarkasti keskitetyt, voi jakotaso muodostaa porrastuksen ja se puolestaan vaikuttaa kappaleiden laatuun. (Järvelä, ym. 1999, 112 – 134.)

5 TUTKIMUS

5.1 Tutkimuksen tarkoitus

Tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella ruiskuvalumuotissa muovituotteen valmistusprosessin aikana tapahtuvia muodonmuutoksia venymäliuska-anturin avulla. Tehtävänä oli myös selvittää, aiheuttavatko muotissa tapahtuvat muodonmuutokset purseen syntymistä. Ohjaajanani toimineen Reijo Heikkisen kokemuksen mukaan pursetta voi syntyä muottiin, jos muottipuoliskojen väliin pääsee syntymään yli 0.03 millimetrin suuruinen rako.

Ennen varsinaista mittausta oli tarkoitus mallintaa Solidworksilla mitoiltaan ja materiaaliltaan kokeessa käytettävää muottia vastaava muotti. Mallinnetulla muotilla oli tarkoitus simuloida koetta vastaavaa tilannetta kuormittamalla sitä niillä voimilla ja paineilla, joita kokeessa tulnaisiin käyttämään. Simulointi oli määrä toteuttaa Solidworksin Cosmosworks-laajennuksessa. Oli kuitenkin tiedossa, että Cosmosworksista saatava taipuma-analyysi on vain suuntaa antava, joten sen ainoa tarkoitus oli selvittää, mitä suuruusluokkaa taipuma tulisi olemaan. Lopuksi kokeen arvoja tuli verrata Cosmoksen arvoihin suuruusluokan osalta. Esimerkki Cosmosworksin taipuma-analyysistä on työssä liitteenä (liite 12).

5.2 Mittauksessa käytettävä välineistö

Mittauslaitteisto koostui venymäliuskan lisäksi lukuisista eri komponenteistä.

Mittauslaitteisto:

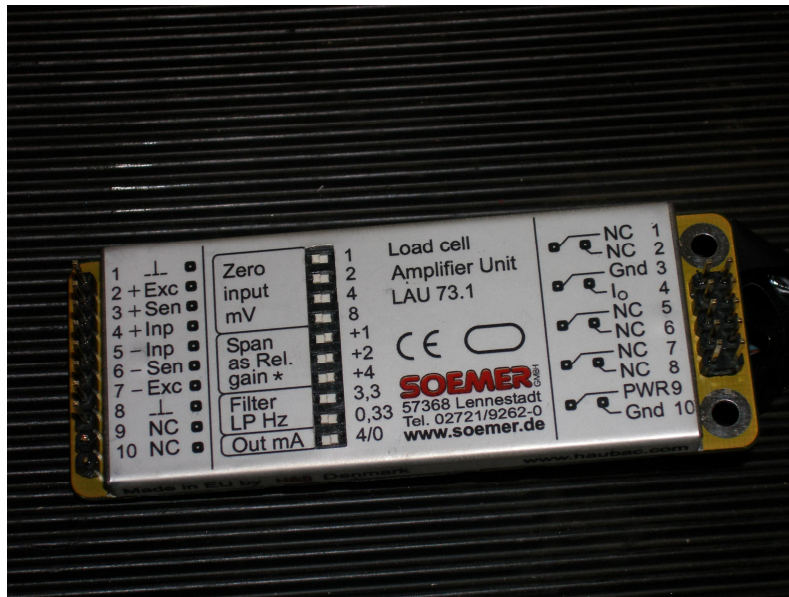
- tiedonkeräyslaite Kistler Dataflow 2853
- venymäliuska-anturin vahvistin Lau 73.1
- Kyowa KFG-2-350-D1-11, biaksiaalinen 0°/90°-venymäliuska
- potentiometri
- tietokone.

5.2.1 Venymäliuska Kyowa KFG-2-350-D1-11

Mittauksessa käytettävä venymäliuska on tyypiltään Kyowa KFG-2-350-D1-11, biaksiaalinen 0°/90°-metallikalvoliuska, jonka alustan mitat ovat 10 x 8.5 mm, mitapituus on 2 mm ja resistanssi 350.9(+/-1.5) Ω . Sen käyttölämpötila-alue on -196 °C -asteesta +150 °C -asteeseen. Liuska on lisäksi lämpötilakompensoitu teräkselle ja lämpötila-alueelle +10 – 100 °C. Sen liuskavakiot ovat 2.12 (+/-1.0) ja 2.11 (+/-1.0) 24 °C:n lämpötilassa, edellyttäen, että suhteellinen ilmankosteus on 50 %.

5.2.2 Venymäliuska-anturin vahvistin Lau 73.1

Lau 73.1 on analoginen venymäliuska-anturin vahvistin. Vahvistimella siltaan kytetyn venymäliuskan millivolteina antama signaali muutetaan milliampeerimuotoon. Lau 73.1:een voidaan syöttää 0 - 0.25 mV/V tai 0 - 2.3 mV/V-suuruinen jännite ja sen ulostulo voidaan säätää 0 - 20 tai 4 - 20 milliampeerin voimakkuudelle. Vahvistimesta saadaan ulos 0 - 10 V, käytettäessä 0 – 20 mA voimakkuutta ja 500R vastusta.



KUVIO 5. Lau 73.1

5.2.3 Tiedonkeräyslaite Kistler Dataflow 2853

Kistler dataflow on tiedonkeräyslaite, johon voidaan kytkeä erilaisia antureita ja mittalaitteita. Tietojen keräämiseksi laitteessa on 16 - 32 kanavaa tyypistä riippuen, joita kaikkia voidaan käyttää samanaikaisesti. Laitteen tarkoituksena on kerätä antureiden välittämä tieto, muuntaa se numeeriseksi dataksi ja siirtää se eteenpäin analysointia varten. Analysointivälineenä toimii yleensä tietokone, johon on asennettu koneen mukana tuleva Dataflow-tietokoneohjelma. Ohjelma on suunniteltu käytettäväksi Windows NT/2000/XP -ympäristössä ja siinä on tarjolla erilaisia suureita ja asteikoita, joista käyttäjä voi valita mieleisensä. Mittaustuloksista voidaan muodostaa erilaisia käyriä tai taulukoita, joiden avulla saadaan selkeämpi kuva mitatusta tiedosta. Koejärjestelyssä voi olla esimerkiksi yhdessä kanavassa paine, toisessa lämpötila ja kolmannessa venymä. Laite näkyy kuviossa 6.

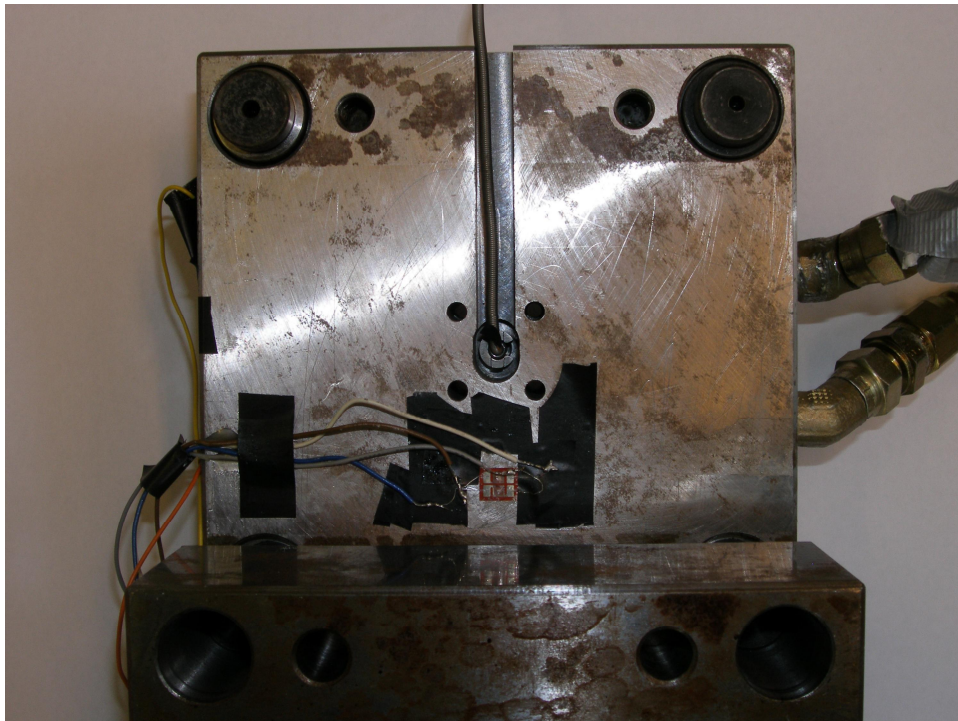
(Kistler.com.2008)



KUVIO 6. Kistler Dataflow 2853

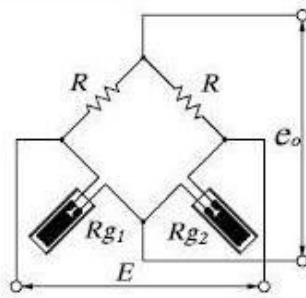
5.3 Mittausjärjestelyt

Venymäliuska-anturit oli kiinnitetty ruiskuvalukoneen takamuottiin liiman ja teipin avulla. Kiinnityspaikka oli muotin takapinnassa, paikka voidaan havaita kuviosta 7.



KUVIO 7. Takamuotin takapinta.

Venymäliuskat oli kytketty Wheatstonen silta kytkentään. Silta koostui kahdesta venymäliuskasta, joista toinen oli asennettu 0° asteen ja toinen 90° asteen kulmaan. Siltaan oli liitetty myös kaksi venymäliuskaa, josta ei mitattu venymää, vaan niiden tehtävänä oli toimia muiden venymäliuskojen kanssa samanarvoisina vastuksina. Tällaista Wheatstonen silta-konfiguraatiota kutsutaan myös nimellä puolisolta. Edellä mainittujen komponenttien lisäksi siltaan oli liitetty potentiometri, jolla silta säädettiin tasapainotilaan. Siltaan oli myös liitetty venymäliuskavahvistin, jonka tehtävänä on muuntaa sillasta tulevat millivoltit volteiksi. Vahvistin oli kytketty tiedonkeräyslaitteeseen, johon vahvistimen antamat lukemat tallentuivat voltteina. Sillan kytkentäkaavio on esitetty kuviossa 8.



KUVIO 8. Puolisillan kytkentäkaavio

Kuvion selitykset:

e_0 on sillasta ulostuleva jännite millivolteina

E on sillan jännite

R_{g1} ja R_{g2} ovat siltaan liitetyt mittaavat venymäliuskat

R :t ovat siltaan liitetyt ei-aktiiviset venymäliuskat

Muotti :

Kokeessa käytetty ruiskuvalumuotti oli lieriömäisellä pesällä varustettu, ruostumattomasta teräksestä valmistettu kaksiosainen muotti. Mallinsin mitoiltaan ja materiaaliltaan vastaavan muotin Solidworksilla. Lisäsin työhön liitteeksi (liite 11) muotin työpiirustuksen, josta voidaan nähdä sen mitat.

Materiaali:

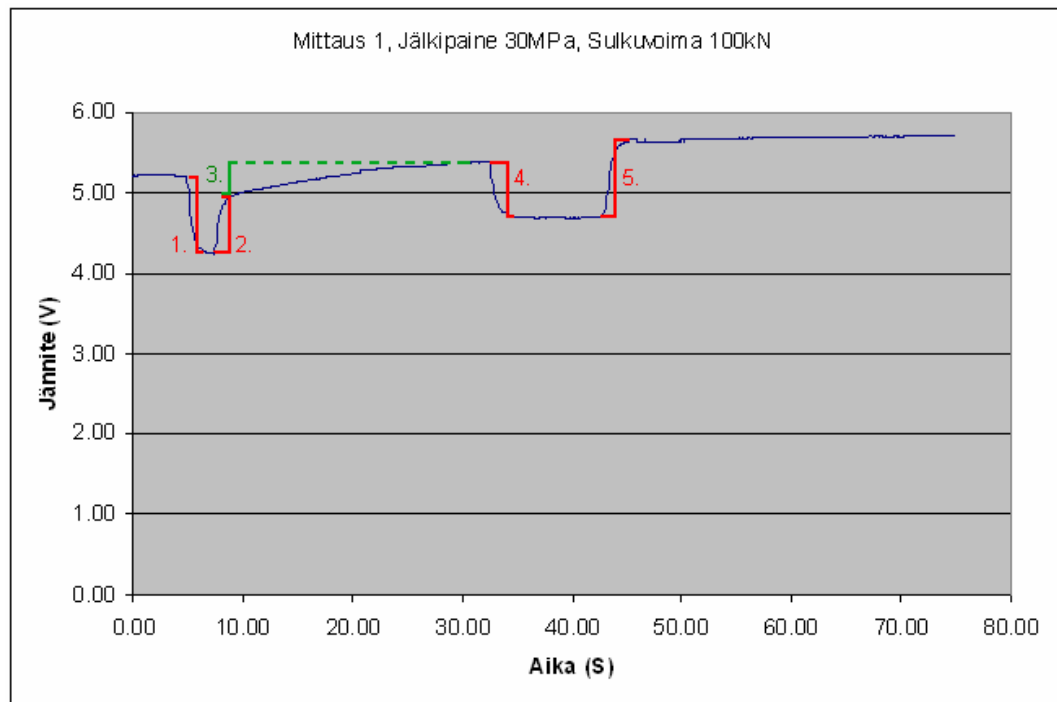
Mittauksessa käytetty muovimateriaalina oli Polypropeeni tyypiltään Borealis HE125MO. Se on ruiskuvaluun soveltuva homopolymeeri, jonka ominaisuuksiin kuuluvat hyvät virtausominaisuudet sekä suuri jäykkyys. Rakenteensa ansiosta se sopii erityisen hyvin suurinopeuksiseen ruiskuvaluun. Sitä käytetään usein kotitaloustuotteiden, pakkausten sekä ohutseinämäisten tuotteiden valmistukseen. (Ides.com.2008)

5.4 Kokeen suorittaminen

Ruiskuvalukonetta operoi työtäni ohjannut opettaja. Määritimme kokeessa käytettävät ruiskutuspaineen ja sulkuvoiman arvot hänen kanssaan. Arvojen suuruutta rajoittivat käytettävän ruiskuvalukoneen teho ja koko sekä käytetty muotti.

Mittaustulokset tallennettiin tietokoneelle numeerisina paineen, lämpötilan ja venymän arvon muutoksina. Muodostin venymäliuskan antamista arvoista käyriä Excel-ohjelman avulla, jotka helpottavat vaihteluiden tulkitsemista. Mittaamalla käyrien huippukohtien erot, minun oli mahdollista selvittää ruiskuvaluprosessin eri vaiheiden aikana tapahtuvat arvojen vaihtelut. Paineen ja lämpötilan käyrät olivat tutkimuksen kannalta toisarvoisia, koska paineen arvot tunnettiin valmiiksi ja lämpötila ei vaikuttanut mittaustuloksiin. Paineen ja lämpötilan käyrät ensimmäisen mittauksen osalta ovat kuitenkin työn liitteenä (liite 10). Venymäliuskamittausten käyrät ilmenevät liitteistä 5 - 9.

Taipuman mittaus suoritettiin ruiskuvaluprosessin kaikissa eri vaiheissa. Ruiskuvaluprosessin tapahtumat on havainnollistettu käyrän avulla kuviossa 9. Kuviossa käytetty käyrä on muodostettu ensimmäisen mittauksen arvoista.



KUVIO 9. Ruiskuvaluprosessin tapahtumat käyrän avulla esitettynä.

Kuviossa 9 kuvattavat tapahtumat:

1. Muotin sulkeutuminen
2. Jälkipaineen lisääminen
3. Muotin lämpeneminen
4. Jälkipaineen poistaminen
5. Muotin avautuminen

Jokaisen vaiheen käynnistyminen ja loppuminen voitiin selvittää käyrän huippukohdan avulla. Taipuman arvot esitettiin käyrissä voltteina ja vaihtelun aiheuttanut volttimäärän muutos voitiin selvittää laskemalla yhden tapahtuman esim. muotin sulkeutuminen, aikana saavutetun kahden huippukohdan erotuksena. Suhteellisen venymän laskemiseksi, minun oli muutettava tulokset volteista millivolteiksi. Tämän jälkeen pystyin laskemaan suhteellisen venymän (ϵ_0) seuraavan kaavan avulla:

$$\epsilon = \frac{4 \cdot e_0}{(1 + \nu) \cdot E \cdot K_s}$$

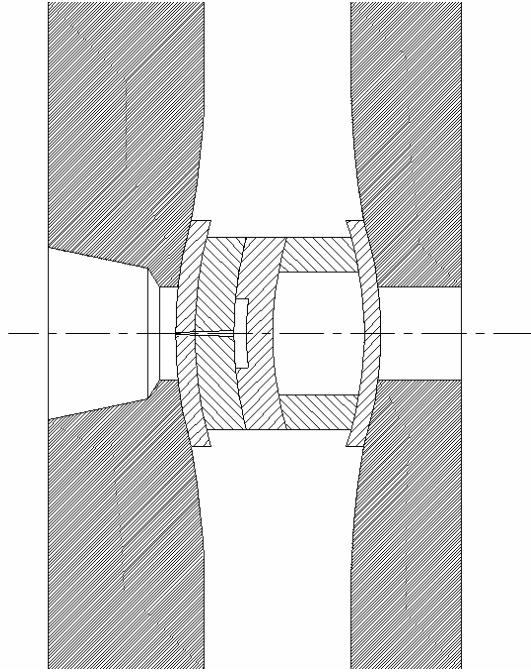
Mittauksia suoritettiin yhteensä 9 kappaletta, joista kaikissa käytettiin erilaisia jälkipaineita sekä sulkuvoimia. Mittauksessa käytettävät jälkipaineet olivat 30-50MPa ja sulkuvoimat 100-200 kN. Ajoarvot näkyvät taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Kokeiden ajoarvot

Koe nro.	Jälkipaine (MPa)	Sulkuvoima (kN)
1	30	100
2	30	150
3	30	200
4	40	100
5	40	150
6	40	200
7	50	100
8	50	150
9	50	200

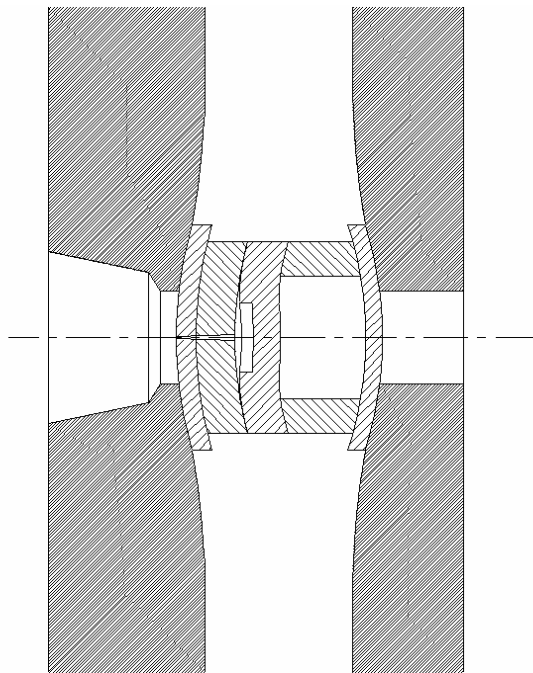
5.5 Muotin taipuminen

Muotin taipuminen alkaa sen sulkeutuessa, sulkuvoiman vaikutuksesta. Sulkuvoima vaikuttaa muottiin sen molemmilta puolilta, puristaen muottipuoliskoja toisiaan vasten. Muotti pyrkii taipumaan sulkuvoiman vaikutuksesta kuvion 9 osoittamalla tavalla. Sen sijaan että takamuotti taipuisi kiinnikkeidensä mukaisesti, se taipuukin samansuuntaisesti etumuotin kanssa. Tämä johtuu siitä, että etumuotin pinta on levymäinen ja sulkuvoiman vaikutuksesta kappaleet ovat niin painautuneet niin tiukasti kiinni toisiinsa, että takamuotilla ei ole muuta vaihtoehtoa kuin taipua sen mukana. Taipumisen tekee mahdolliseksi se, että muottipuolisko voidaan kiinnittää koneeseen ainoastaan sen reunoilta ja tämän vuoksi muotin keskelle jää taipumisen mahdollistava reikä kuten kuvioista 10 voidaan havaita.



KUVIO 10. Muotin taipuminen pelkän sulkuvoiman vaikuttaessa.

Sulkuvoiman jälkeen muottiin lisätään jälkipaine. Se kohdistuu muottipesään työntäen sen jokaista pintaa eri suuntaan. Jälkipaineen voimasta alamuotti pyrkii taipumaan eri suuntaan kuin sulkuvoima, aiheuttaen muotin osittaisen oikenemisen. Se taivuttaa myös ylämuottia entisestään, mutta taipuman suunta on päinvastainen kuin alamuotissa. Tapahtuma on esitetty kuviossa 11.



KUVIO 11. Muotin taipuminen sulkuvoiman ja ruiskutuspaineen vaikuttaessa.

5.6 Tulosten määrittäminen

Jotta kokeen tuloksia voitiin analysoida, piti venymäliuskalta saadut arvot muuttaa taipuman arvoiksi. Ennen tätä, jouduin kuitenkin etsimään pohjaksi koetilanteen kuormitustapausta vastaavan tapauksen koneenrakentajan käsikirjasta. Valitsin kuormitustapauksien joukosta palkin taivutuksen, jossa palkki on tuettu molemmista päistään kiinteillä, kahdenarvoisilla tuilla. Kirjan esimerkissä palkin keskelle kohdistuu pistemäinen voima F , joka taivuttaa palkkia alaspäin. Palkin alkuperäisen muodon ja taipuman jälkeisen muodon väliin muodostuu tila fm , eli taipuma, jonka yksikkö on millimetri.

Taipuma fm voidaan määrittää kaavalla:

$$fm = \frac{F \cdot l^3}{192 \cdot E \cdot I}$$

Taipuman määrittäminen ei kuitenkaan onnistunut pelkän yhden kaavan avulla, vaan käyttöön oli otettava useampia kaavoja, joiden tuli myös olla johdettuna sopivaan muotoon toimiakseen.

Venymäliuskan vahvistimeen asetetuilla arvoilla oli merkittävä tehtävä tulosten laskemisessa, koska niiden avulla venymäliuskoista saadut arvot voitiin muuttaa kaavoissa käytettävään muotoon.

Venymäliuskan vahvistin oli säädetty 0,25 mV/V-asentoon, jolla sen ulostuloksi saatiin 10 V. Saadut voltit oli muunnettava millivolteiksi, jotta suhteellinen venymä saatiin laskettua. Muuntaminen tapahtui seuraavan laskutoimituksen avulla:

$$\frac{0,25mV / V}{10V} = 0,025mV = e_0$$

Suhteellisen venymän ε_0 laskemiseksi käytettiin seuraavaa kaavaa:

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot e_0}{(1 + \nu) \cdot E \cdot K_s}$$

Suhteellisten venymien avulla oli mahdollista laskea jännitys kaavasta:

$$\delta = E \cdot \varepsilon$$

Kun jännitys oli laskettu, normaalivoima laskettiin johtamalla jännityksen toista kaavaa:

$$\delta = \frac{M}{W} + \frac{N}{A}$$

Poistin kaavasta sen alkuosassa olevan momentin ja taivutusvastuksen, koska niiden vaikutus mittaukseen oli merkityksettömän pieni. Edellä mainittujen elementtien poistamisen jälkeen kaavasta saatiin johdettua kaava normaalivoimalle:

$$N = A \cdot \delta$$

Kun kaavaan yhdistettiin normaalivoiman toinen kaava,

$$N = \frac{F}{2}$$

niin saatiin normaalivoiman kaavaa johtamalla seuraavanlainen kaava voimalle F:

$$F = (A \cdot \delta) \cdot 2$$

Kun voiman suuruus oli selvitetty, saatiin laskettua taipuma fm , sijoittamalla voima F kaavaan:

$$fm = \frac{F \cdot l^3}{192 \cdot E \cdot I}$$

5.7 Tulosten analysointi

Tuloksena saatujen taipumien arvot olivat suuruusluokkaa $x \cdot 10^{-4}$ mm. Vertasin taipumia ennalta määrättyyn vertailuarvoon 0,03 mm ja havaitsin, että taipumat eivät yllä lähellekään kyseistä arvoa, tulokset ovat noin 100 kertaa vertailuarvoa pienemmät. Arvo 0,03 mm on raja, jonka ylityttyä pursetta pääsee syntymään muottiin ja koska raja ei ylittynyt, niin voidaan päätellä, että taipuma ei ole riittävän suuri purseen syntymiseksi. Tulokset ovat liitteenä (liitteet 1 - 4).

Olin mallintanut ennen varsinaisen kokeen suorittamista Solidworksilla muotin, jonka mitat olivat samat kuin kokeessa käytetyllä muotilla. Olin myös testannut muotin taipumaa Cosmosworksilla, käyttäen samoja arvoja kuin varsinaisessa kokeessa. Kun vertasin kokeesta saatuja arvoja Cosmosworksin arvoihin, niin huomasin että ne näyttivät olevan samaa suuruusluokkaa kokeen arvojen kanssa. Cos-

mosworksin arvot tosin ovat vain suuntaa antavia, koska sen värimuutoksiin perustuva taipumien testaus ei anna tarkkoja arvoja.

Koe todistaa kuitenkin, että muotissa tapahtuu taipumaa ja taipuman arvot vaihtelevat ruiskuvaluprosessin eri vaiheissa. Tämä ilmenee parhaiten suhteellisten taipumien arvoista muodostetusta käyrästä. Vaihtelut ovat kuitenkin niin pieniä, että ne eivät vaikuta olennaisesti muotin toimintaan. Taulukoidut tulokset ovat työn liitteenä.

Taipumien pienuudesta voidaan päätellä, että muotti on hyvin suunniteltu, koska se kestää siihen kohdistetut voimat niin ettei niistä aiheudu haittaa sen toiminnalle. Suunnittelussa on todennäköisesti otettu huomioon muotin mittojen, varsinkin korkeuden ja tukipisteiden välisen matkan suhde toisiinsa. Nämä kaksi tekijää ovat suunnitteluteknisesti tärkeimmät.

Tärkein vaikuttava tekijä muotin taipumankestolle on sen tukipisteiden välissä oleva matka l , koska se korotetaan kolmanteen potenssiin taipuman kaavassa. Tämä tarkoittaa sitä, että matkaa suurennettaessa, taipumankesto kasvaa huomattavasti.

Toiseksi merkittävin tekijä taipumalle altistumiseen on muottilevyn korkeus. Korkeus on huomioitu taipuman kaavaan sisältyvässä neliömomentin kaavassa:

$$I = \frac{b \cdot h^2}{12}$$

Kaavasta voidaan nähdä, että korkeus kasvaa toiseen potenssiin ja korkeutta lisätessä neliömomentin arvo kasvaa huomattavasti.

6. YHTEENVETO

Tutkimuksen oli tarkoitus selvittää, aiheutuuko testattavaan ruiskuvalumuottiin ruiskuvaluprosessin aikana niin suuria taipumia, että muottipuoliskojen väliin voisi syntyä purseen muodostumisen mahdollistava rako. Purseen syntyminen alkaa, kun taipuma ylittää arvon 0,03 mm.

Kokeen tuloksina saadut arvot olivat suuruusluokkaa $x \cdot 10^{-4}$, eli noin 100 kertaa pienemmät kuin valitsemaamme vertailuarvo. Tämä tarkoittaa sitä, että muotti ei taipunut riittävästi, jotta rako olisi päässyt muodostumaan ja siksi pursesta ei syntynyt.

Taipumaa kuitenkin tapahtui muotissa, tämä voidaan havaita mittaustuloksista saatujen arvojen perusteella muodostetuista käyristä. Käyristä voidaan selkeästi erottaa jokainen ruiskuvaluprosessin vaihe. Vaiheet näkyvät käyrissä miinus- ja plusmerkkisinä huippukohtina.

Tuloksista voidaan päätellä, että muotti on hyvin suunniteltu, koska voimat eivät pysty taivuttamaan sitä riittävästi aiheuttaakseen purseen syntymistä.

7. LÄHTEET

Painetut lähteet:

Andersson, L, 1981, Mittaus- ja säätötekniikka, Helsinki, Otava

Järvelä, Syrjälä & Vastela, 1999, Ruiskuvalu, Plastdata Oy

Kuoppala, R, 1986, Anturit Koneautomaatioissa, Metalliteollisuuden Kustannus Oy

Elektroniset lähteet:

Efunda.com. 2008. Strain gages. Julkaisussa sensors [online]. [viitattu 21.3.2008]

Saatavissa Efunda-tietokannassa:

http://www.efunda.com/designstandards/sensors/strain_gages

Ides plastics web. 2008. Borealis PP HE125MO. Julkaisussa grades [online]. [viitattu 28.1.2008]

Saatavissa Ides-tietokannassa:

<http://www.ides.com/grades/ds/E80643.htm>

Kistler.com. 2008. Kistler dataflow 2853. Julkaisussa Kistler products. [online].

[viitattu 11.2.2008] Saatavissa Kistler-tietokannassa:

http://www.kistler.com/do.productfinder.it.it-it?content=13_Productfinder¶m=App.2853A120

Omega.com. 2008. Strain gages. Julkaisussa literature [online]. [viitattu 11.2.2008]

Saatavissa Omega-tietokannassa:

<http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/strain.html>

Oulun yliopisto. 2008. Venymäliuska. Julkaisussa Teknologia nyt! [verkkójulkaisu]. [viitattu 12.3.2008]

Saatavissa Oulu.fi-tietokannassa:

<http://www.oulu.fi/teknokas/tehtavakortit/venymaliuska.pdf>

Santaoja.K.2001. Lujuusopin perusteet osa IB: Yhtälökokoelma [verkkojulkaisu] [viitattu 20.2.2008] Saatavissa Hut.fi-tietokannassa: <http://lujari-5.hut.fi/more/coursesinfo/IntroductionIB/Yhtalokokoelma.pdf>

Solidworks.com. 2008. Solidworks 2008. Julkaisussa products [online]. [viitattu 25.2] Saatavissa Solidworks-tietokannassa: http://www.solidworks.com/pages/products/swofficepro/documents/Office_prem_ENG_5s.pdf

8. LIITTEET

Liitteet 1 ja 2: Venymäliuskamittausten jännitykset ja suhteelliset venymät

Liitteet 3 ja 4: Venymäliuskamittausten taipumat

Liitteet 5-9: Venymäliuskamittausten käyrät

Liite 10: Paineen ja lämpötilan käyrät

Liite 11: Ruiskuvalumuotin työpiirustus

Liite 12: Cosmosworks-esimerkkikuva taipumasta

TAULUKKO 1. Jännityksen ja suhteellisen venymän arvoja

Mittaus 1				
Kerroin (mV)	Ulostulo (V)	Ulostulo (mV)	Suht.venymä ϵ_0	Jännitys σ (ϵ^*E)
0.0250000	-0.9500000	-0.0237500	-0.0000035	-0.6926723
0.0250000	0.7400000	0.0185000	0.0000027	0.5395552
0.0250000	0.3800000	0.0095000	0.0000014	0.2770689
0.0250000	-0.6800000	-0.0170000	-0.0000025	-0.4958075
0.0250000	0.9600000	0.0240000	0.0000035	0.6999635
Mittaus 2				
Kerroin (mV)	Ulostulo (V)	Ulostulo (mV)	Suht.venymä ϵ_0	Jännitys σ (ϵ^*E)
0.0250000	-1.1500000	-0.0287500	-0.0000042	-0.8384980
0.0250000	0.8400000	0.0210000	0.0000031	0.6124681
0.0250000	0.5900000	0.0147500	0.0000022	0.4301859
0.0250000	-0.7100000	-0.0177500	-0.0000026	-0.5176814
0.0250000	1.2300000	0.0307500	0.0000045	0.8968283
Mittaus 3				
Kerroin (mV)	Ulostulo (V)	Ulostulo (mV)	Suht.venymä ϵ_0	Jännitys σ (ϵ^*E)
0.0250000	-1.3800000	-0.0345000	-0.0000050	-1.0061976
0.0250000	0.7400000	0.0185000	0.0000027	0.5395552
0.0250000	0.4800000	0.0120000	0.0000017	0.3499818
0.0250000	-0.8000000	-0.0200000	-0.0000029	-0.5833030
0.0250000	1.3400000	0.0335000	0.0000049	0.9770324
Mittaus 4				
Kerroin (mV)	Ulostulo (V)	Ulostulo (mV)	Suht.venymä ϵ_0	Jännitys σ (ϵ^*E)
0.0250000	-0.9200000	-0.0230000	-0.0000034	-0.6707984
0.0250000	0.9700000	0.0242500	0.0000035	0.7072548
0.0250000	0.4000000	0.0100000	0.0000015	0.2916515
0.0250000	-0.9000000	-0.0225000	-0.0000033	-0.6562158
0.0250000	0.9400000	0.0235000	0.0000034	0.6853810
Mittaus 5				
Kerroin (mV)	Ulostulo (V)	Ulostulo (mV)	Suht.venymä ϵ_0	Jännitys σ (ϵ^*E)
0.0250000	-1.1400000	-0.0285000	-0.0000042	-0.8312067
0.0250000	1.0500000	0.0262500	0.0000038	0.7655851
0.0250000	0.3700000	0.0092500	0.0000013	0.2697776
0.0250000	-1.0000000	-0.0250000	-0.0000036	-0.7291287
0.0250000	1.1800000	0.0295000	0.0000043	0.8603719

TAULUKKO 2. Jännityksen ja suhteellisen venymän arvoja

Mittaus 6				
Kerroin (mV)	Ulostulo (V)	Ulostulo (mV)	Suht.venymä ϵ_0	Jännitys σ (ϵ^*E)
0.0250000	-1.4000000	-0.0350000	-0.0000051	-1.0207802
0.0250000	1.3200000	0.0330000	0.0000048	0.9624499
0.0250000	0.3700000	0.0092500	0.0000013	0.2697776
0.0250000	-1.0300000	-0.0257500	-0.0000038	-0.7510026
0.0250000	1.3500000	0.0337500	0.0000049	0.9843237
Mittaus 7				
Kerroin (mV)	Ulostulo (V)	Ulostulo (mV)	Suht.venymä ϵ_0	Jännitys σ (ϵ^*E)
0.0250000	-0.9200000	-0.0230000	-0.0000034	-0.6707984
0.0250000	1.1000000	0.0275000	0.0000040	0.8020416
0.0250000	0.3600000	0.0090000	0.0000013	0.2624863
0.0250000	-1.1200000	-0.0280000	-0.0000041	-0.8166241
0.0250000	0.9800000	0.0245000	0.0000036	0.7145461
Mittaus 8				
Kerroin (mV)	Ulostulo (V)	Ulostulo (mV)	Suht.venymä ϵ_0	Jännitys σ (ϵ^*E)
0.0250000	-0.7100000	-0.0177500	-0.0000026	-0.5176814
0.0250000	1.3000000	0.0325000	0.0000047	0.9478673
0.0250000	0.3200000	0.0080000	0.0000012	0.2333212
0.0250000	-1.2100000	-0.0302500	-0.0000044	-0.8822457
0.0250000	1.1600000	0.0290000	0.0000042	0.8457893
Mittaus 9				
Kerroin (mV)	Ulostulo (V)	Ulostulo (mV)	Suht.venymä ϵ_0	Jännitys σ (ϵ^*E)
0.0250000	-1.4200000	-0.0355000	-0.0000052	-1.0353627
0.0250000	1.3700000	0.0342500	0.0000050	0.9989063
0.0250000	0.3800000	0.0095000	0.0000014	0.2770689
0.0250000	-1.2900000	-0.0322500	-0.0000047	-0.9405760
0.0250000	1.3500000	0.0337500	0.0000049	0.9843237

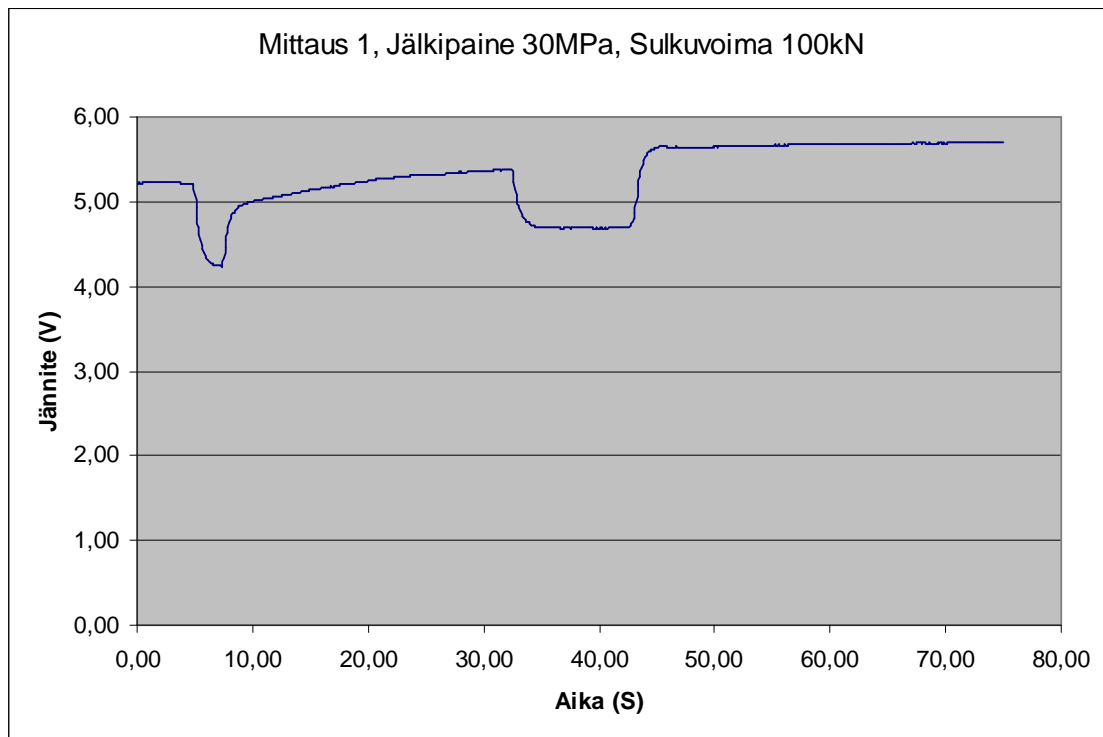
TAULUKKO 3. Taipuman arvoja

Mittaus 1	Voima F(kN)	Taipuma fm (mm)
	-9941,2322275	-0,0001593
	7743,6966825	0,0001241
	3976,4928910	0,0000637
	-7115,8293839	-0,0001140
	10045,8767773	0,0001610
Mittaus 2	Voima F(kN)	Taipuma fm (mm)
	-12034,1232227	-0,0001929
	8790,1421801	0,0001409
	6174,0284360	0,0000989
	-7429,7630332	-0,0001191
	12871,2796209	0,0002063
Mittaus 3	Voima F(kN)	Taipuma fm (mm)
	-14440,9478673	-0,0002314
	7743,6966825	0,0001241
	5022,9383886	0,0000805
	-8371,5639810	-0,0001342
	14022,3696682	0,0002247
Mittaus 4	Voima F(kN)	Taipuma fm (mm)
	-9627,2985782	-0,0001543
	10150,5213270	0,0001627
	4185,7819905	0,0000671
	-9418,0094787	-0,0001509
	9836,5876777	0,0001576
Mittaus 5	Voima F(kN)	Taipuma fm (mm)
	-11929,4786730	-0,0001912
	10987,6777251	0,0001761
	3871,8483412	0,0000620
	-10464,4549763	-0,0001677
	12348,0568720	0,0001979

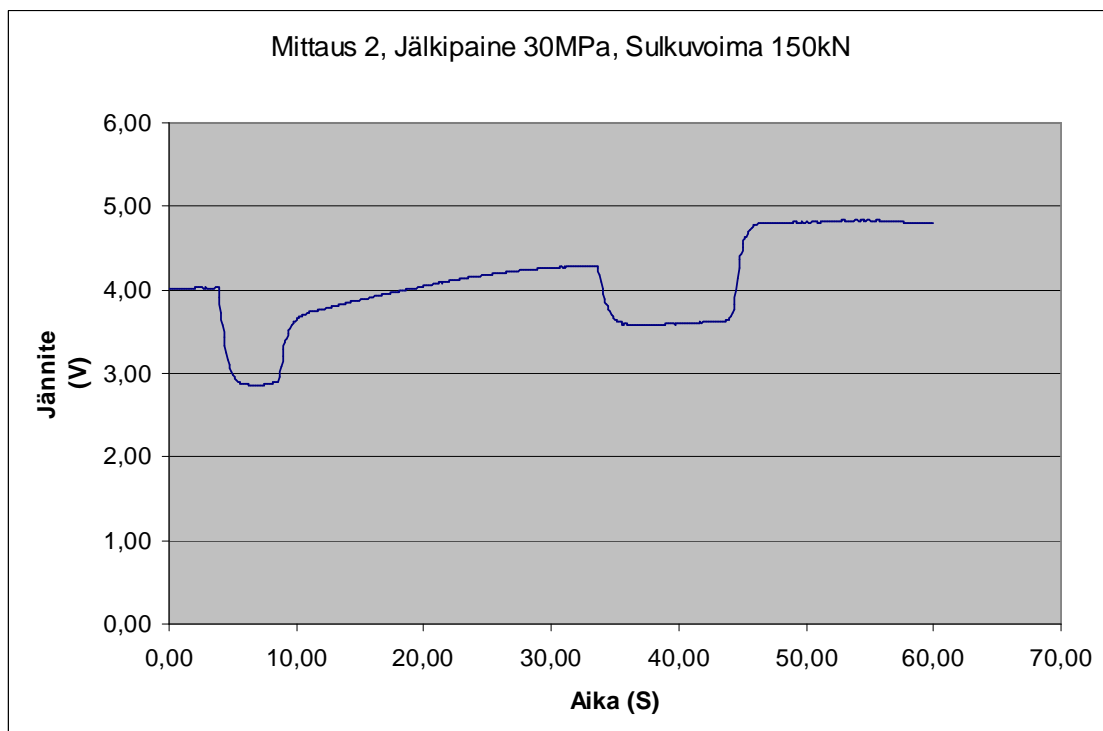
TAULUKKO 4. Taipuman arvoja

Mittaus 6	Voima F(kN)	Taipuma fm (mm)
	-14650,2369668	-0,0002348
	13813,0805687	0,0002214
	3871,8483412	0,0000620
	-10778,3886256	-0,0001727
	14127,0142180	0,0002264
Mittaus 7	Voima F(kN)	Taipuma fm (mm)
	-9627,2985782	-0,0001543
	11510,9004739	0,0001845
	3767,2037915	0,0000604
	-11720,1895735	-0,0001878
	10255,1658768	0,0001643
Mittaus 8	Voima F(kN)	Taipuma fm (mm)
	-7429,7630332	-0,0001191
	13603,7914692	0,0002180
	3348,6255924	0,0000537
	-12661,9905213	-0,0002029
	12138,7677725	0,0001945
Mittaus 9	Voima F(kN)	Taipuma fm (mm)
	-14859,5260664	-0,0002381
	14336,3033175	0,0002297
	3976,4928910	0,0000637
	-13499,1469194	-0,0002163
	14127,0142180	0,0002264

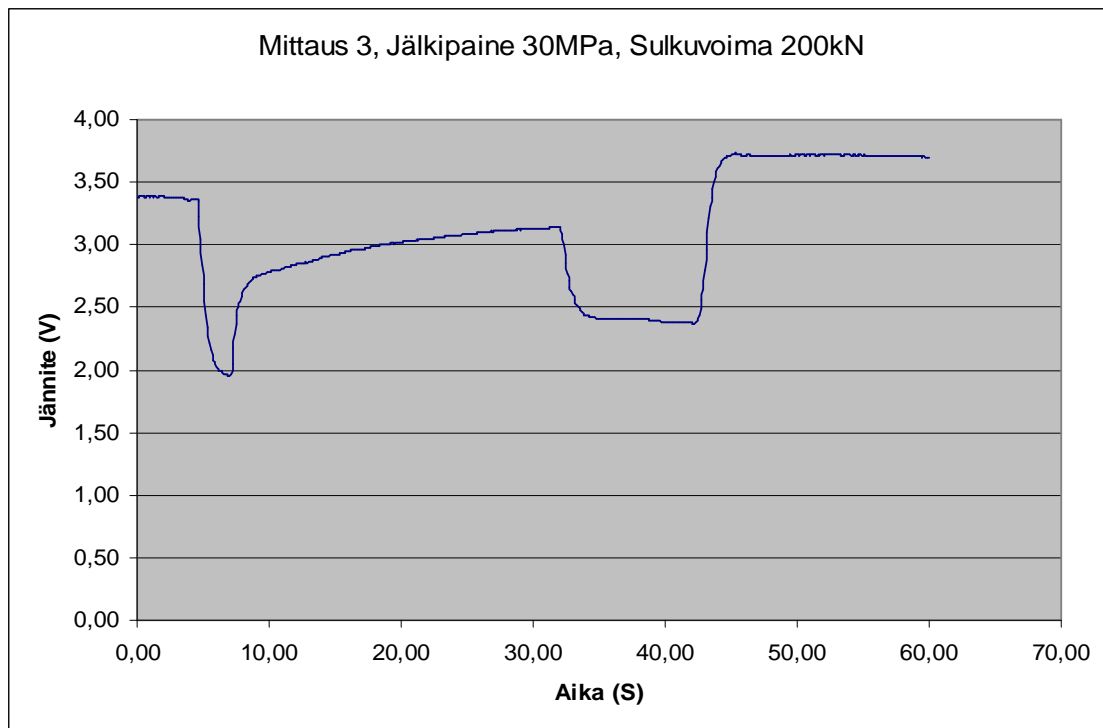
KUVIO 1. Mittaus 1, taipuman käyrä



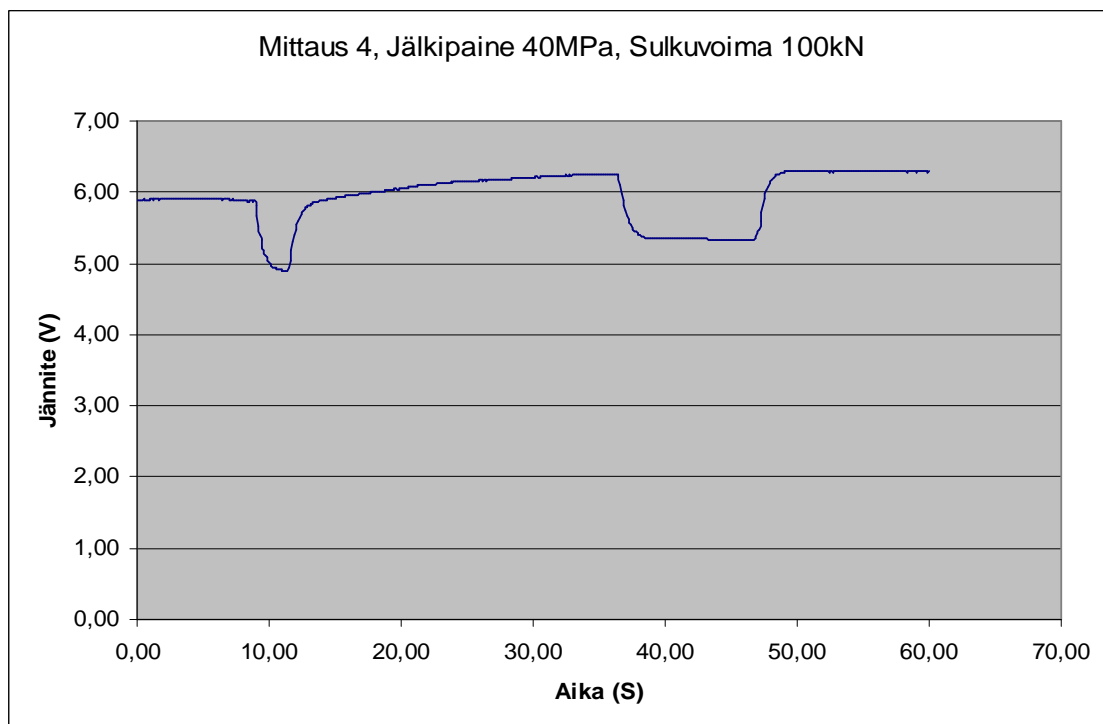
KUVIO 2. Mittaus 2, taipuman käyrä



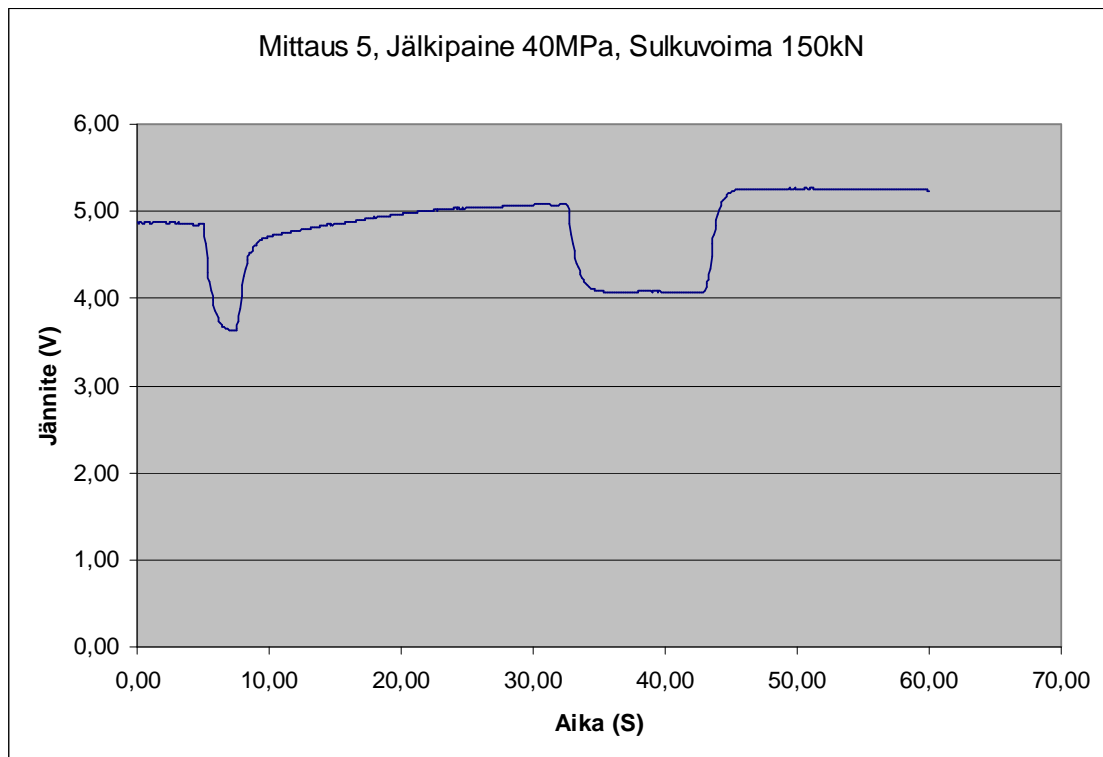
KUVIO 3. Mittaus 3, taipuman käyrä



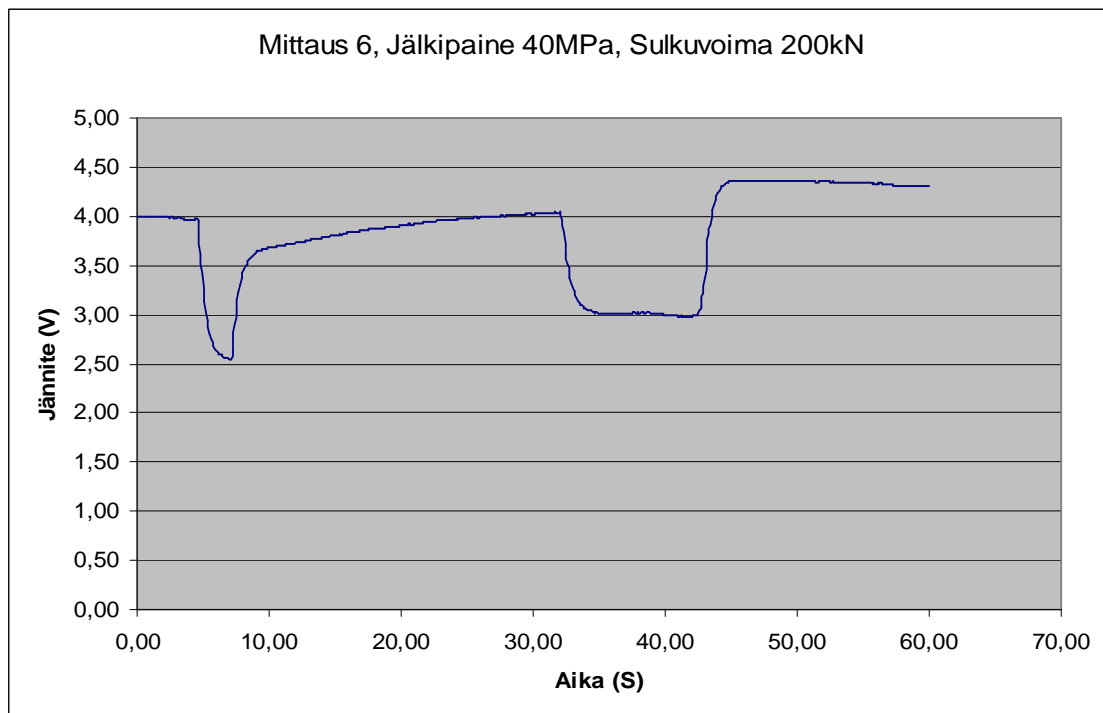
KUVIO 4. Mittaus 4, taipuman käyrä



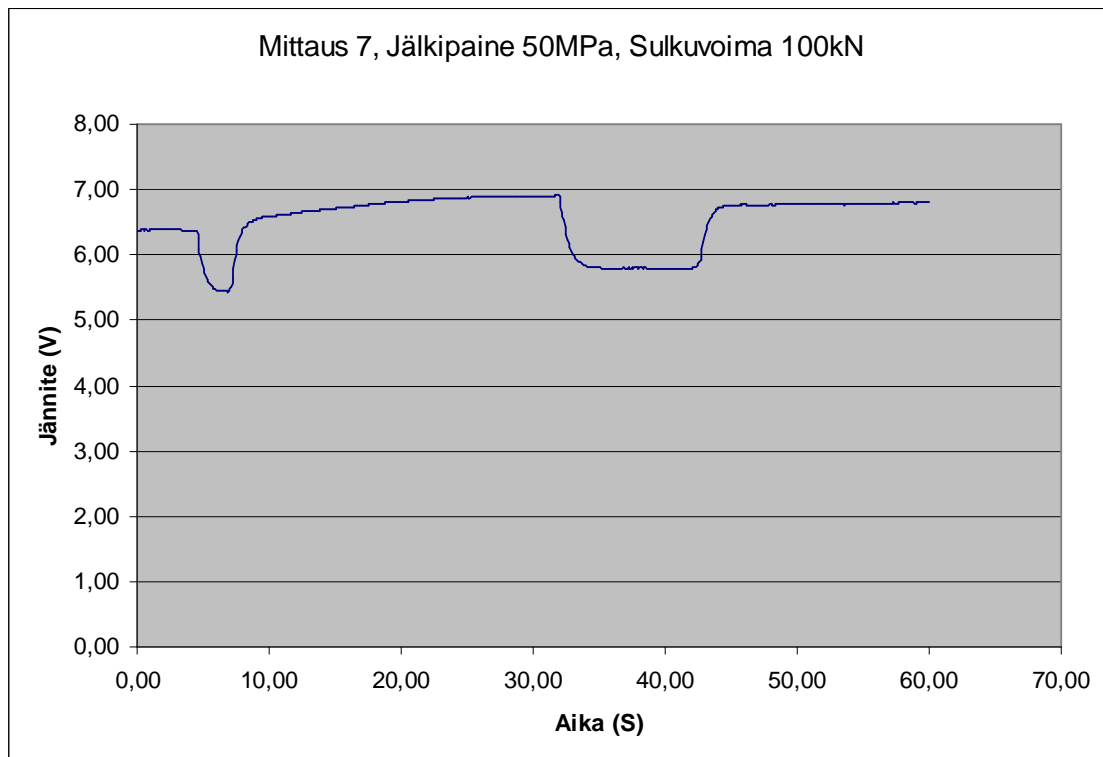
KUVIO 5. Mittaus 5, taipuman käyrä



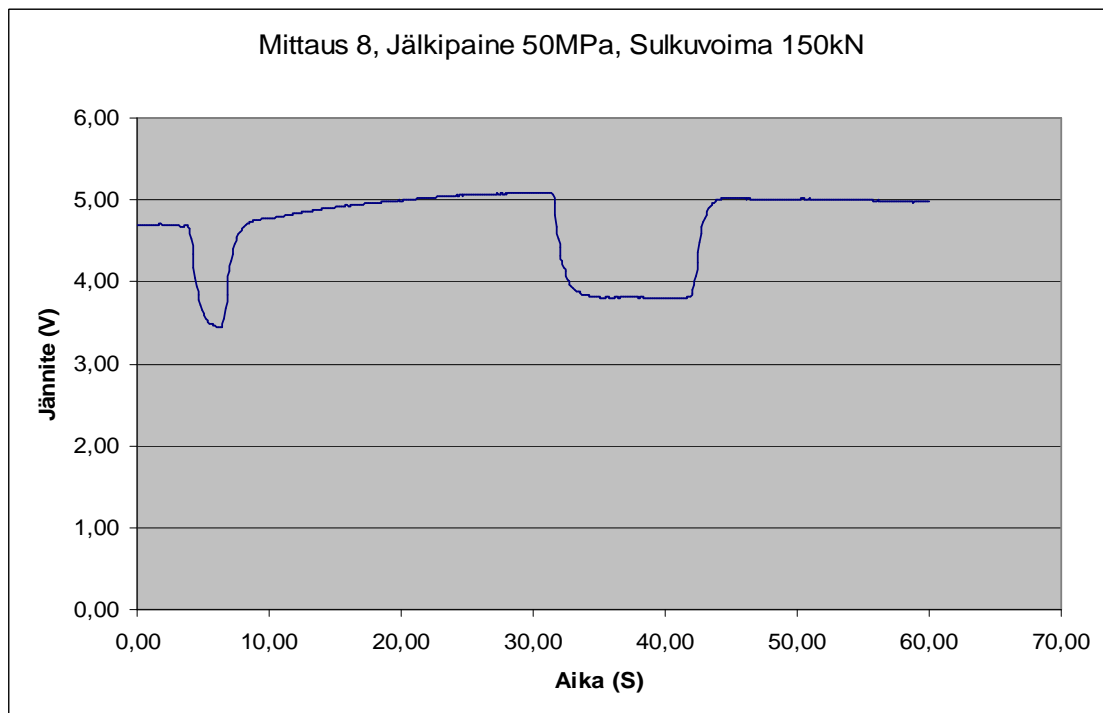
KUVIO 6. Mittaus 6, taipuman käyrä



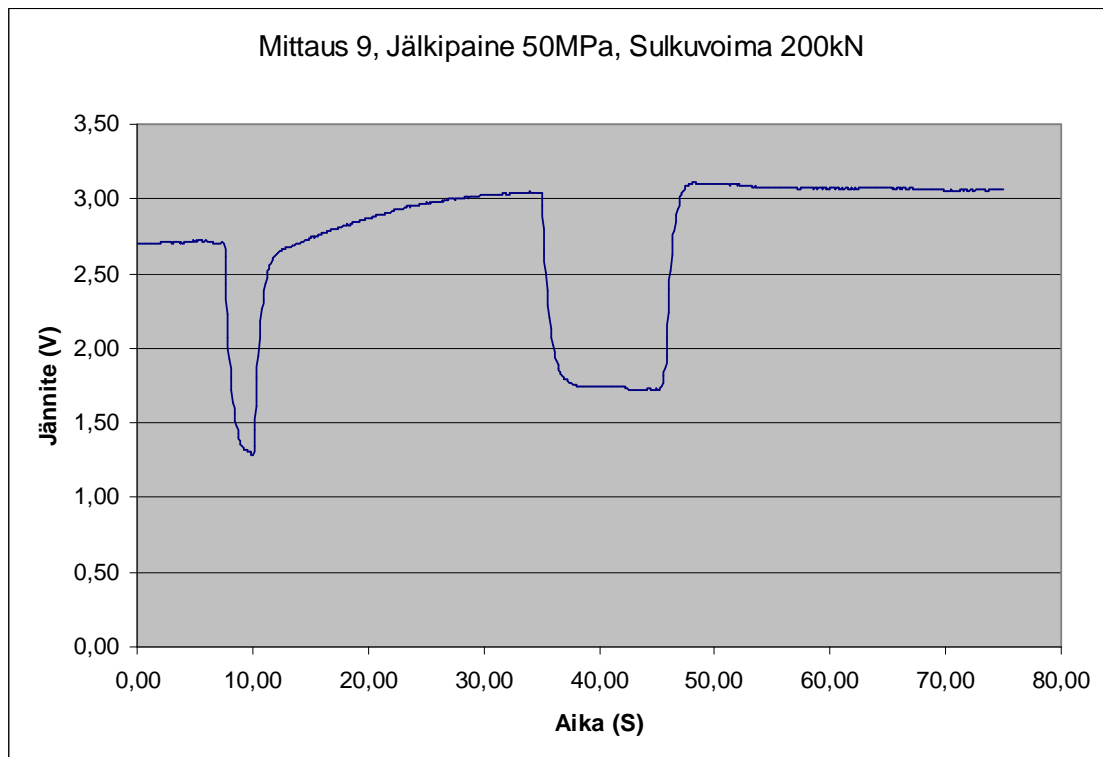
KUVIO 7. Mittaus 7, taipuman käyrä



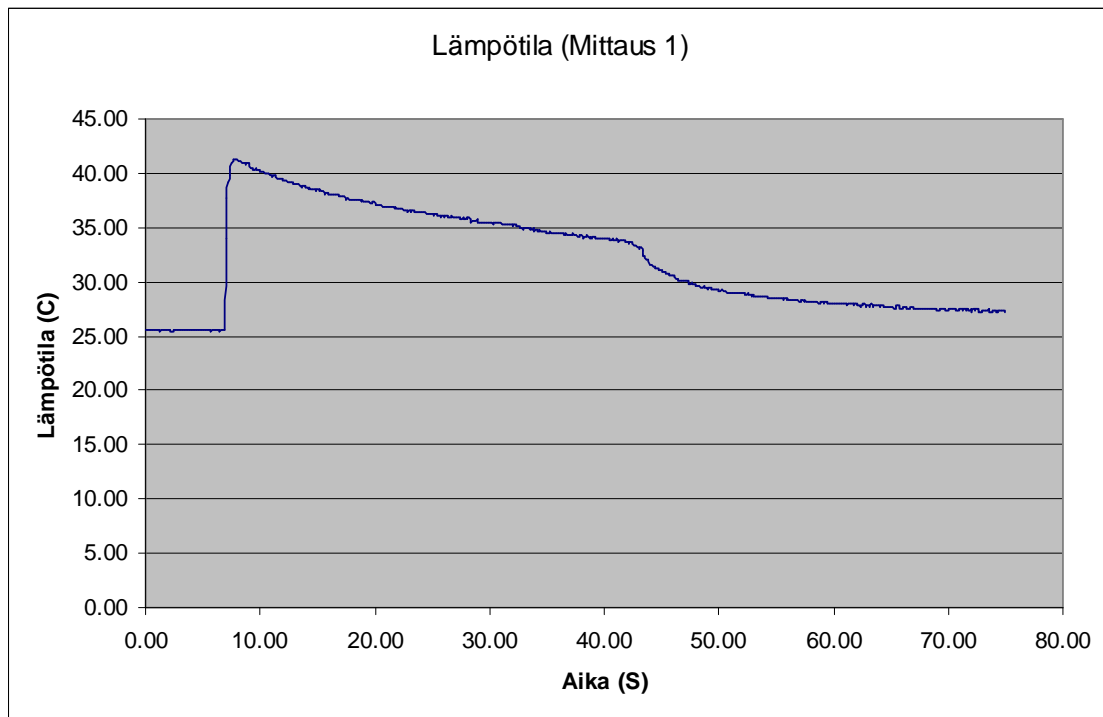
KUVIO 8. Mittaus 8, taipuman käyrä



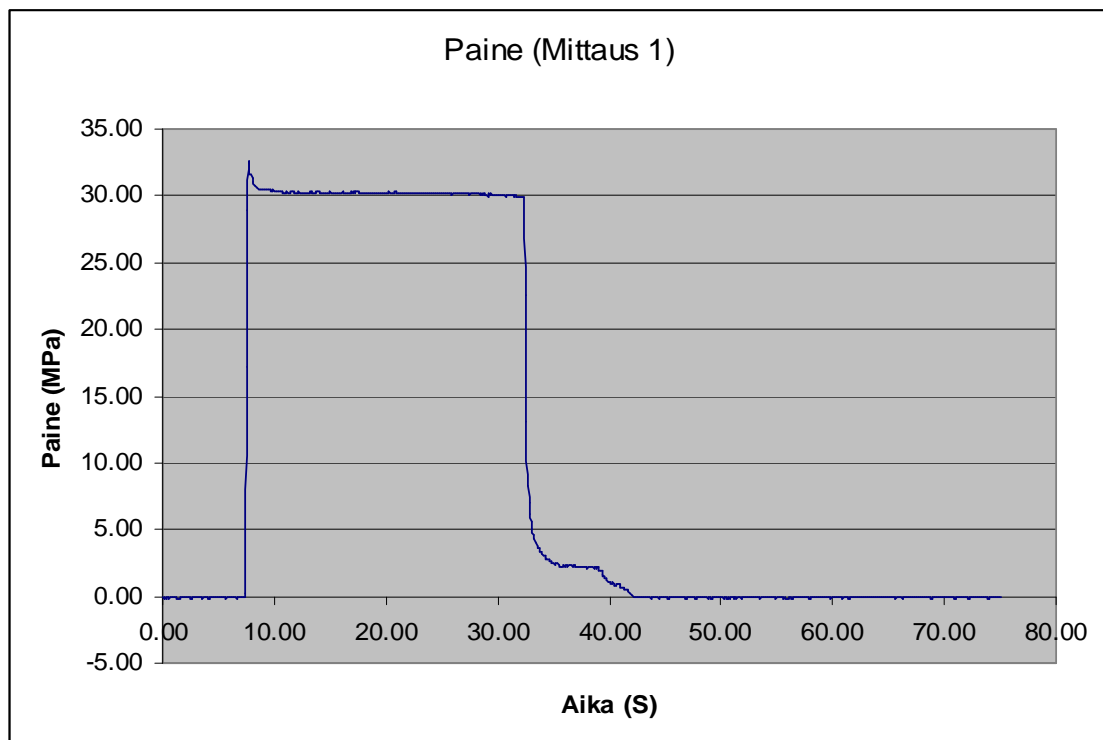
KUVIO 9. Mittaus 9, taipuman käyrä



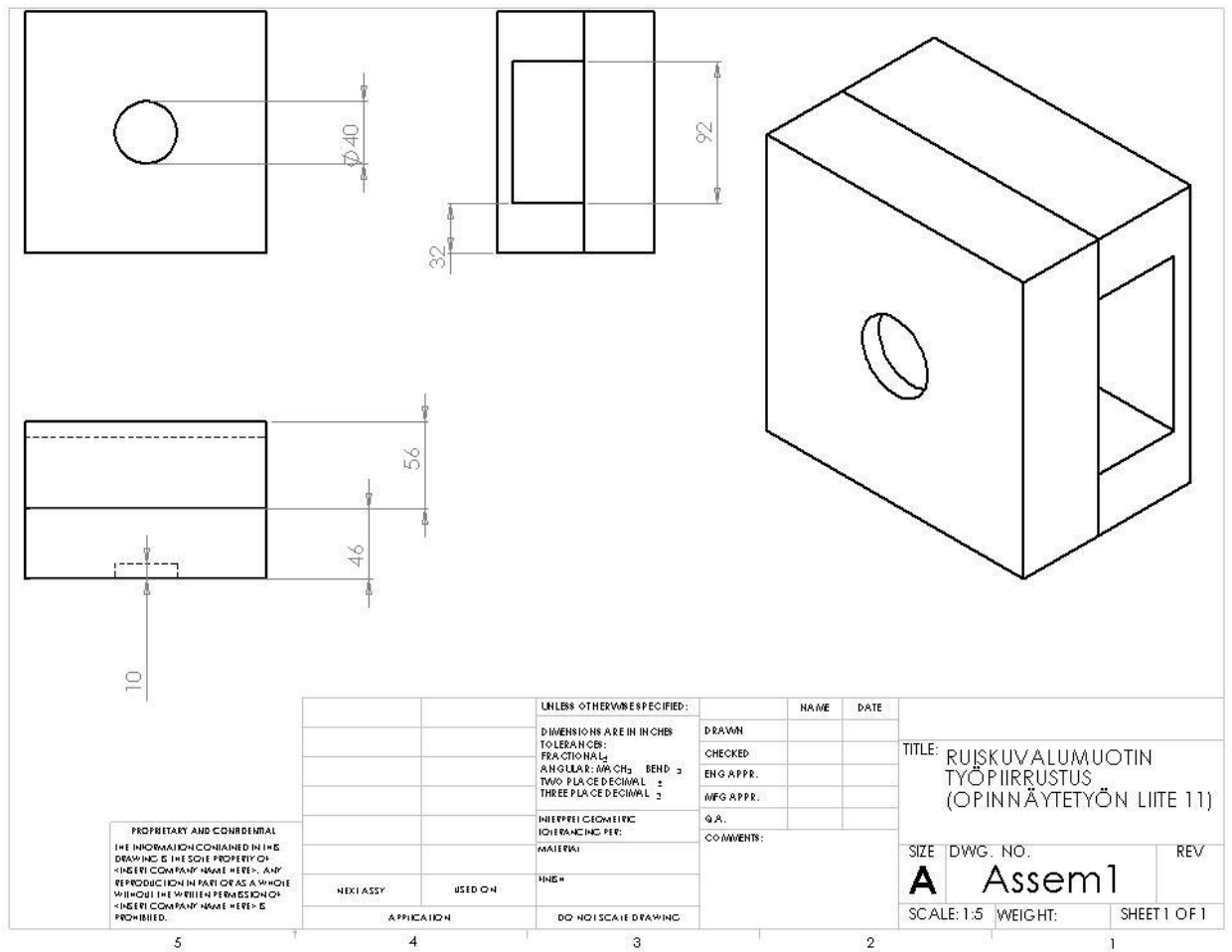
KUVIO 10. Mittaus 1, lämpötilan käyrä



KUVIO 11. Mittaus 1, paineen käyrä



KUVIO 12. Muotin työpiirustus



KUVIO 13. Cosmosworks-esimerkkikuva taipumasta, kun sulkuvoima on 100kN ja jälkipaine 30 MPa

