

**IDEAL –  
Tehokkaan, laadukkaan ja mukautuvan ruiskuvalun uudet  
älykkäät työkalut**

**Jyväskylän yliopiston koeajoraportti**

---

Anssi Lensu ja Pasi Koikkalainen



Technical Reports of the Laboratory of Data Analysis  
Data-analyysin laboratorion tekniset raportit

Series editor:  
Pasi Koikkalainen

Distribution:  
Laboratory of Data Analysis  
Department of Mathematics and Statistics  
University of Jyväskylä  
P.O.Box 35  
FI-40014 University of Jyväskylä  
Finland

Electronic publications:  
<http://erin.mit.jyu.fi/datalab/publications/>

Copyright by Laboratory of Data Analysis ©2005  
University of Jyväskylä, Jyväskylä, 2005

## **Tiivistelmä**

TEKESin ja suomalaisen ruiskuvaluteollisuuden rahoittama IDEAL-projekti toteutettiin Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Muovi- ja elastomeeritekniikan laitoksen ja Jyväskylän yliopiston (JyY) Data-analyysin laboratorion yhteistyönä vuosina 2002–2004. Tämä raportti esittelee projektin koeajojen tulokset Jyväskylän yliopiston Data-analyysin laboratorion osalta. Koeajoja tehtiin sekä Tampereen teknillisen yliopiston Muovi- ja elastomeeritekniikan ruiskuvalulaboratoriossa että teollisuusympäristössä. Koeajoissa oli useita ennalta määriteltyjä tavoitteita, joista osa liittyi Jyväskylän yliopiston Data-analyysin laboratoriossa kehitetyn konenäköpohjaisen online-mittausjärjestelmän tarkkuuden selvittämiseen ja tämän järjestelmän mahdollistamien uusien sovellusten testaukseen.

Aluksi testausta tehtiin projektia varten suunnitellun laatikkomaisen testikappaleen avulla tuottamalla kappaleita sekä TTY:n ruiskuvalulaboratoriossa että Uponor Suomi Oy Proplastin Nastolan tehtaalla. Tuotetut kappaleet mitattiin viiden mitan osalta sekä TTY:n Muovi- ja elastomeeritekniikan optisella DeMeet 220 -mittauskoneella että JyY:n Data-analyysin laboratoriossa kehitetyllä mittausjärjestelmällä. Työn tavoitteena oli tutkia kehitetyn menetelmän tarkkuutta ja kameran, linssin, materiaalin, värin, jne. vaikutusta mittauksentarkkuuteen. Kappaleita tuotettiin eri materiaaleista, jotta materiaalin ja värin vaihtelut saatiin mukaan testaukseen.

Toinen vaihe toteutettiin Perlos Oyj:n Ylöjärven tehtaalla sijoittamalla kehitetty järjestelmä ruiskuvalukoneen yhteyteen. Teollisuusrobotti poimi tuotetut kappaleet muotista ja toi ne järjestelmän mitattaviksi. Tavoitteena ajoissa oli tutkia mittausjärjestelmän tarkkuutta teollisuusympäristössä, prosessidatan perusteella muodostetun mittojen ennustusmallin hyvyttä, sekä JyY:n Data-analyysin laboratoriossa kehitettyjen uusien adaptiivisten koesuunnittelustrategioiden toimivuutta käytännössä. Koska online-ratkaisussa kappaleiden ei annettu jäähtyä ennen mittauksia, oli tarpeen myös selvittää, miten kappaleiden mitat muuttuivat kappaleiden jäähtyessä, ja muodostaa tämän tutkimuksen pohjalta jäähtyneen kappaleen mittojen ennustusmalli. Vertailumittalaitteena käytettiin OGP:n valmistamaa SmartScope Flash 400 optista mittausjärjestelmää.

Tässä raportissa ei esitetä kehitetyn mittausjärjestelmän, mittojen ennustusmallin teon tai uusien koesuunnittelustrategioiden yksityiskohtia vaan ne on luettavissa erillisistä julkaisuista (Koikkalainen 2006, Silén et al. 2004, Lensu and Koikkalainen 2006).

## **Kiitokset**

Haluamme osoittaa kiitoksemme tutkimustyön rahoituksesta TEKESille ja IDEAL-projektin yrityksille: Nokia OyJ, Eimo OyJ/Foxconn Oy, Ensto Parts Oy/CMS Industry Oy, Inion Oy, Oy Juho Jussila, Okartek Oy, Perlos OyJ, Plastone Oy ja Uponor Suomi Oy Proplast. Lisäksi haluamme erityisesti kiittää Perlos OyJ:n Ylöjärven R&D-yksikköä mahdollisuudesta suorittaa heillä useita projektiin liittyviä testejä, koeajoja ja vertailumittauksia, Nokia OyJ:tä mahdollisuudesta käyttää eräiden testiajojen suoritukseen heidän tuotteeseensa liittyvää muottia, Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Muovi- ja elastomeeritekniikan ruiskuvalulaboratoriota ja Uponor Suomi Oy Proplast-yritystä projektiin liittyvien testikappaleiden tuottamisesta, ja edelleen TTY:n Muovi- ja elastomeeritekniikan yksikköä tuotettujen testikappaleiden mittaamisesta. Edellä mainittujen yksiköiden työntekijöiden, erityisesti Perlos OyJ:n Mikko Silvennoisen ja TTY:n Mari Kylmälän ja Timo Latvakankaan, ammattitaito edisti merkittävästi tämän työn tekemistä.

Anssi Lensu

# Sisältö

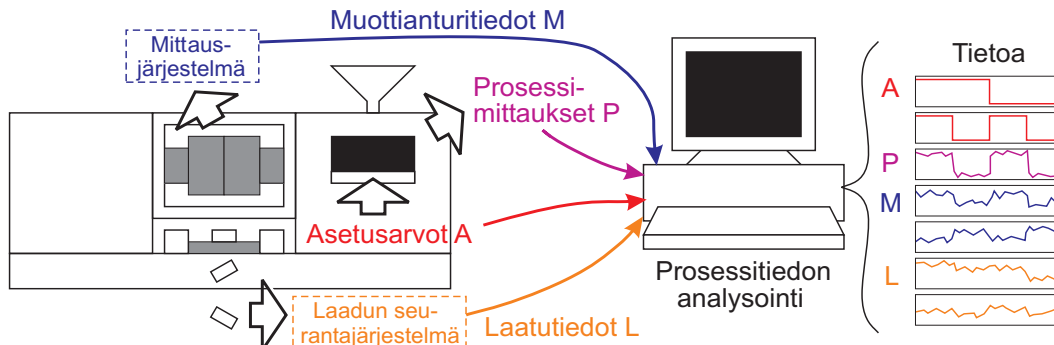
<b>1 Johdanto</b>	<b>5</b>
1.1 TTY:n ruiskuvalulaboratoriossa tehdyt koeajot . . . . .	6
1.2 Teollisuudessa tehdyt koeajot . . . . .	8
<b>2 Mittaus- ja koesuunnittelumenetelmät</b>	<b>12</b>
2.1 Konenäkö laadunmittauksessa . . . . .	12
2.1.1 Kehitetty mittausjärjestelmä . . . . .	12
2.2 Käytetty konenäkölaitteisto . . . . .	15
2.3 Uudet koesuunnittelustrategiat . . . . .	17
<b>3 Konenäkömenetelmän tarkkuus ja TTY:n ruiskuvalulaboratorion koeajot</b>	<b>19</b>
3.1 Vertailu konenäkölaitteiston ja DeMeet 220 mittalaitteen välillä . . . . .	19
3.2 Konenäköjärjestelmällä saavutettu mittaustarkkuus . . . . .	23
3.2.1 Laitteiston vaikutuksen vertailujen tulokset . . . . .	24
3.2.2 Kuvausjärjestelyn vaikutus hajontaan . . . . .	27
3.2.3 Materiaalin vaikutus tuloksiin . . . . .	28
3.2.4 Paksuseinämäiset kappaleet . . . . .	29
3.2.5 Menetelmäkehityksen vaikutus hajontaan . . . . .	30
<b>4 Teollisuudessa tehtyjen koeajojen tulokset</b>	<b>33</b>
4.1 Mittausjärjestelmän toimivuus teollisuusympäristössä . . . . .	33
4.2 Konenäkömittauksen tarkkuus ja mittojen ennustus . . . . .	34
4.2.1 Jäähdyttämisestä johtuva kutistuminen . . . . .	35
4.2.2 Mittojen ennustaminen tilastollisella mallilla . . . . .	37
4.3 Datan keruu koneen asetusarvojen muutoksen aikana . . . . .	38
4.4 Tuotantoajon toisto ja kuivaamattoman materiaalin vaikutus . . . . .	40
4.5 Uudet adaptiiviset koesuunnittelustrategiat . . . . .	42

<b>5 Johtopäätöksiä</b>	<b>48</b>
LIITE 1. Käytetty data-analyysiohjelmisto	1 sivu
LIITE 2. TTY:n IDEAL-raportti: PC/ABS, seinämänpaksuus 1 mm	9 sivua
LIITE 3. TTY:n IDEAL-raportti: PBT, seinämänpaksuus 1 mm	8 sivua

# 1 Johdanto

IDEAL-projekti on TEKESin ja kotimaisen muovien ruiskuvaluteollisuuden rahoittama tutkimushanke, jossa kehitettiin data-analyyysijärjestelmää ruiskuvaluprosessin<sup>1</sup> seurannan, tuotannon asetusarvojen optimoinnin, prosessin simuloinnin ja tuotoksen laadunseurannan avuksi. Järjestelmän olennaisen osan muodostaa konenäköön perustuva mittausjärjestelmä, jonka avulla tuotettujen kappaleiden hyvyys voidaan arvioida välittömästi kappaleen tultua ulos muotista. Perinteiset optiset koordinaattimittakoneet eivät sovellu tuotantolinjalle, koska niiden käyttäjäksi tarvitaan useimmiten ihminen ja koska mittaus tapahtuman suorittaminen niillä vaatii liian paljon aikaa.

Koska muovikappaleet mitataan välittömästi niiden tultua ulos muotista, ne eivät ole ehtineet jäähtyä riittävästi, ja siten niiden mitat muuttuvat kutistumisen seurauksena. Kuten myöhemmin tullaan osoittamaan, jäähtyneen kappaleen mittoja voidaan ennustaa kuumen kappaleen mittoilla ja muotista kerätyillä paine- ja lämpötilatiedoilla, jotka tässä hankkeessa kerättiin Dr. Gierth Ing. GmbH:n CQC-tiedonkeruujärjestelmällä. Edellä esitetty toimintatapa on askel kohti automatisoitua koesuunnittelua, jossa älykäs tietokoneohjelma vastaa koestrategiasta, kappaleiden mittauksesta ja ruiskuvalukoneen säädöstä (katso kuva 1). Tämä tosin edellyttää muutoksia ruiskuvalukoneen ohjausjärjestelmään, joka nykymalleissa on yleensä manuaalinen.



Kuva 1: Tietojen keruujärjestelmän kaavakuva. Tietoa kerätään koneen asetusarvoista, koneen sisäisestä tilasta, muottiin kytketyiltä antureilta ja tuotetuista kappaleista.

Projektissa kehitetyn mittausjärjestelmän tuloksia verrattiin optisten koordinaattimittakoneiden antamiin tuloksiin. Vertailumittaukset tehtiin aikaisintaan seuraavana päivänä, jotta kappaleet olisivat varmasti saavuttaneet lopullisen kokonsa ja muotonsa. Itse kehitetyllä konenäköjärjestelmällä osa testeistä suoritettiin samalla tavalla eli kuvaamalla ja mittaamalla kappaleet myöhemmin. Poikkeuksen muodostivat teollisuusympäristössä tehdyt online-mittaukset, joissa mittojen muutokselle tarvittiin korjausmalli. Tässä yhteydessä muutosmalli tehtiin tilastollisella regressiolla erillisen, kutistumista selvittävän

<sup>1</sup>prosessin kuvaus löytyy esim. Belofsky 1995, luku 9.

kokeen perusteella. Tulevaisuudessa tämä ylimääräinen koe lienee mahdollista korvata ainakin osittain numeerisella simuloinnilla.

Teollisuusympäristössä tehtiin lisäksi testejä sekä liittyen mittojen ennustamiseen uusissa, koesuunnitelmaan kuulumattomissa pisteissä että liittyen uusiin adaptiivisiin koesuunnittelustrategioihin. Tässä raportissa ei esitetä kehitetyn mittausjärjestelmän tai muiden menetelmien yksityiskohtia vaan soveltamisohjeet löytyvät tarkemmin lähteistä (Koikkalainen 2006, Lensu and Koikkalainen 2006, Haranen et al. 2006, Silén et al. 2004).

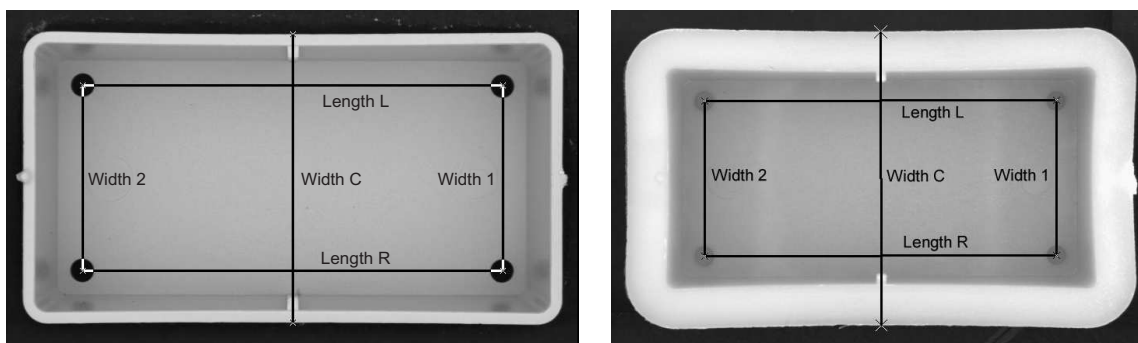
Eräs projektissa tehty havainto liittyy mittaustarkkuuden arvioinnin vaikeuteen. Ero oman järjestelmän ja kaupallisen mittalaitteen välillä koostuu nk. harhasta eli keskimääräisestä systemaattisesta erosta sekä satunnaisvaihtelusta. Periaatteessa harha on poistettavissa kalibroinnilla, mutta tämä edellyttää suurta huolellisuutta. Esimerkiksi mitaustilan lämpötila (ks. luku 3) saattaa vaikuttaa merkittävästi saatuihin tuloksiin. Myös inhimillisten virheiden vaikutus tuloksiin on kohtuullisen merkittävä.

## **1.1 TTY:n ruiskuvalulaboratoriossa tehdyt koeajot**

Laboratoriossa tehtäviä kokeita varten kehitettiin kokonaan oma testikappale. Samaa kappaletta käytettiin projektin koeajoissa, tilastollisten mallien testauksessa, FEM-simulointiohjelmien testauksessa, projektiyritysten henkilöstön koulutuksessa ja materiaalitutkimuksessa. Kappale on muodoltaan laatikkomainen ja sen seinämävahvuus on etumuotista riippuen 1 tai 4 mm. Kappaleen mitat ovat seinämävahvuudesta riippuen:  $24 \times 44 \times 11$  mm (1 mm) tai  $30 \times 50 \times 14$  mm (4 mm). Materiaaleina päätettiin käyttää GE Cycloy C1000HF ABS+PC-seosta, Dupont Zytel 70G30HSL PA66:tta ja GE Valox 260HPR PBT:tä. Kuva 2 sisältää ABS+PC-seoksesta (1 mm seinämävahvuus) ja PA66-materiaalista (4 mm seinämävahvuus) valmistettujen kappaleiden kuvat, joihin on merkitty testauksessa käytettävät viisi mittaa.

Ohuen seinämän (1 mm) tapauksessa ympyräiset kohteet ovat reikiä ja paksun seinämän tapauksessa vain syvennyksiä, mikä vaikeuttaa niiden havaitsemista kuvasta. Mitoille ei erikseen määritelty tavoitearvoja, mutta muottimittaus kuitenkin suoritettiin. Sen tuloksena saatiin siis mitat, joita kutistumisesta johtuen ei ollut ainakaan mahdollista ylittää. Nämä mitat on esitetty taulukossa 1. Materiaalien ominaiskutistuma vaihtelee, joten mittojen tavoitearvot tulisi asettaa materiaaliakohtaisesti. Eri materiaalien ominaiskutistumat ja muut perustiedot on esitetty taulukossa 2. Kutistuman määrä riippuu materiaalin lisäksi ruiskuvalukoneen asetuksista. Asetusarvot vaikuttavat mm. kappaleen lämpötilaan sen tullessa ulos muotista eli siihen, paljonko jäähtymistä edelleen tapahtuu. Lisäksi esimerkiksi korkea jälkipaine vähentää jälkikäteen tapahtuvan kutistuman määrää, koska tiukemmin muottiin pakkautunut muovi kutistuu vähemmän.





Kuva 2: Laboratoriokokeissa käytettyjen testikappaleiden kuvat (vasemmalla 1 mm seinämä ja oikealla 4 mm), joihin on merkitty testauksessa käytettävät mitat. Materiaalin syöttöpiste on kappaleen keskellä kuvan oikeassa reunassa näkyvän nystyn kohdalla.

Seinämävahvuus	Width 1	Width 2	Width C	Length L	Length R
1 mm	15.98	16.01	24.00	36.02	36.02
4 mm	15.98	16.01	29.98	36.02	36.02

Taulukko 1: Laatikkomaisen testikappaleen muottimittauksen tulokset, mm.

Materiaali	Kutistuma flow (%)	Kutistuma xflow (%)	Sulan lämpö (°C)	Muotin lämpö (°C)	Väri
ABS+PC	0.4-0.6	0.4-0.6	140-290	60-90	Vaaleansininen
PA66	0.3	1.1	280-305	65-120	Osin läpinäkyvä
PBT	1.1-1.8	0.9-1.8	230-270	40-100	Tummanharmaa

Taulukko 2: Testikappaleen yhteydessä käytettyjen muovimateriaalien ominaisuudet. Kutistuma voi olla erilainen virtauksen suuntaan (flow) ja sitä vastaan kohtisuoraan (xflow).

Pvm	Materiaali	Koesuunnitelma	Par.lkm	Tasoja	Ajoja	Kpl/ajo
14.5.2003	ABS+PC	CQC-osakoe	4	2 <sup>1/2</sup>	10	10
Useita	ABS+PC	Täyskoe	4	3	81	10
15.5.2003	PBT	CQC-osakoe	4	2 <sup>1/2</sup>	9	10
6.10.2003	PA66	Osakoe	5	2	11	10

Taulukko 3: Mittausjärjestelmän testaukseen käytetyt, TTY:n ruiskuvalulaboratoriossa tehdyt ohutseinämäisen (1 mm) laatikkokappaleen koeajot.

Ohutseinämäisiä (1 mm) kappaleita tuotettiin useiden eri koeajojen yhteydessä TTY:n laboratoriossa, mutta konenäköjärjestelmän testaukseen käytettiin neljää koetta, joiden ajankohdat, tyypit ja käytetyt materiaalit on esitetty taulukossa 3. Tuotetut kappaleet mitattiin Tampereella jäähtymisen jälkeen optisella DeMeet 220 koordinaattimittausko-

neella. Muutettavat parametrit olivat: sulan lämpötila, muotin lämpötila, ruiskutusnopeus ja jälkipaine sekä PA66:n tapauksessa lisäksi jäähtymisaika. ABS+PC-materiaalin täyskoe ajettiin kahdessa osassa CQC-järjestelmän laitteistovian ilmenemisen vuoksi ja kaikkiaan ajoja tehtiin kolmena päivänä: 2.6. ajot 1–27, 15.7. ajot 28–54 ja 16.7.2003 ajot 55–81.

CQC-osakoe tarkoittaa koeajoa, jossa ajetaan ensimmäisenä ja viimeisenä parametrien nollapiste, jossa kaikki muutettavat parametrit ovat keskiarvossaan, ja samoilla parametreilla kahdeksan ajon mittainen kahden tason koe (kolme parametreista täysmatriisilla ja yksi laskettuna muista), minkä vuoksi tasojen määrä on taulukossa merkitty  $2^{1/2}$ :ksi. PA66:n osakokeessa ajettiin nollapiste, jossa oli muita lyhyempi jälkipaineen vaikutusaika (4 s), ja kunkin muutettavan parametrin osalta yksi alempi ja yksi korkeampi taso pitäen muut parametrit vakioina eli nollapisteen arvoissa (poikkeuksena oli jälkipaineen vaikutusaika, joka oli 6 s).

ABS+PC- ja PBT-materiaalien CQC-osakokeisiin liittyviä dataja on analysoitu TTY:n toimesta ja niiden analyysien tuloksia löytyy tämän raportin liitteenä olevista kahdesta raportista (joita ei ole muuten virallisesti julkaistu) ja yhdestä TTY:llä tehdystä diplomityöstä (Latvakangas 2004). Diplomityöstä löytyvät myös kyseisten materiaalien ominaisuustaulukot. Vastaavasti Zytel PA66-materiaalin koeajotaulukko ja materiaalin ominaisuustaulukko löytyvät toisesta diplomityöstä (Välipakka 2004). Tämä diplomityö keskittyy kuitenkin kappaleiden mikrorakenteen tutkimukseen, joten siinä ei ole tehty asetusarvojen ja mittojen välistä prosessidatan analyysiä.

Seinävahvuudeltaan 4 mm kappaleet tuotettiin Uponor Suomi Oy Proplastin Nastolan tehtaalla. Niitä ei käytetty johdonmukaisesti testaukseen, koska niiden mittaaminen oli hankalaa sekä konenäköjärjestelmälle että optiselle mittauskoneelle. Suurimmaksi ongelmaksi konenäköjärjestelmän yhteydessä muodostui sellaisen valaistuksen löytäminen, jossa kappaleen sisäpohjassa olevat halkaisijaltaan 1 mm syvennykset saataisiin erottumaan riittävän hyvin. Osittain läpinäkyvän PA66-materiaalin tapauksessa mittaus onnistui siedettävästi, mutta tummanharmaa PBT-materiaali tuotti konenäköjärjestelmälle ongelmia. Mittaus olisi edellyttänyt vähintään uudentyypisen valaistusratkaisun suunnittelua, mistä luovuttiin resurssien vähäisyyden vuoksi.

## **1.2 Teollisuudessa tehdyt koeajot**

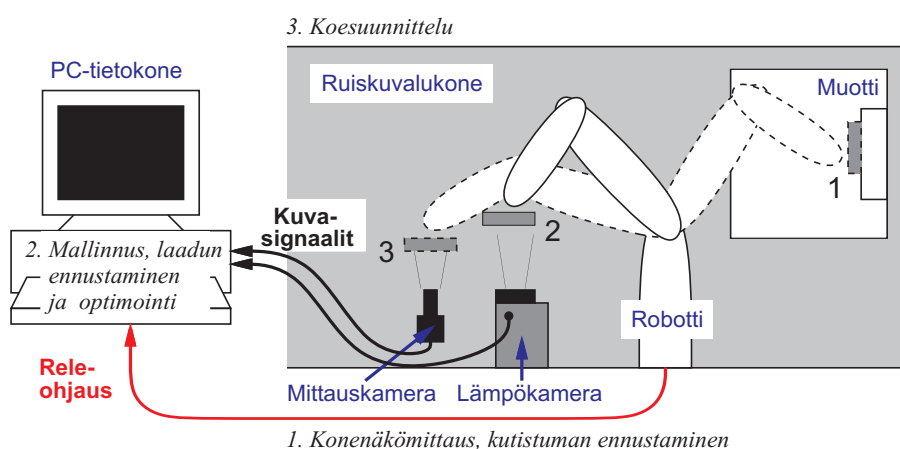
Teollisuusympäristössä tehdyt koeajot suoritettiin kolmessa vaiheessa Perlos Oyj:n Ylöjärven tehtaalla vuoden 2004 touko-, syys- ja marraskuussa. Koeajojen yksityiskohdat ja päätulokset on esitetty myös IDEAL-projektin loppuraportissa (Silén et al. 2004). Koeajojen tavoitteina oli selvittää:

1. Onko kehitetty konenäköön perustuva mittausjärjestelmä riittävän toimiva ja tarkka

teollisuusympäristössä käytettäväksi?

2. Voidaanko tilastollisiin mallinnusmenetelmiin perustuviin laadun ennustummalleihin ja asetusarvojen optimoinnin tuloksiin luottaa?
3. Voidaanko koesuunnittelua tehdä jotenkin paremmin, jotta sen kokonaiskustannuksia ja siihen kuluva aikka saataisiin pienennettyä?

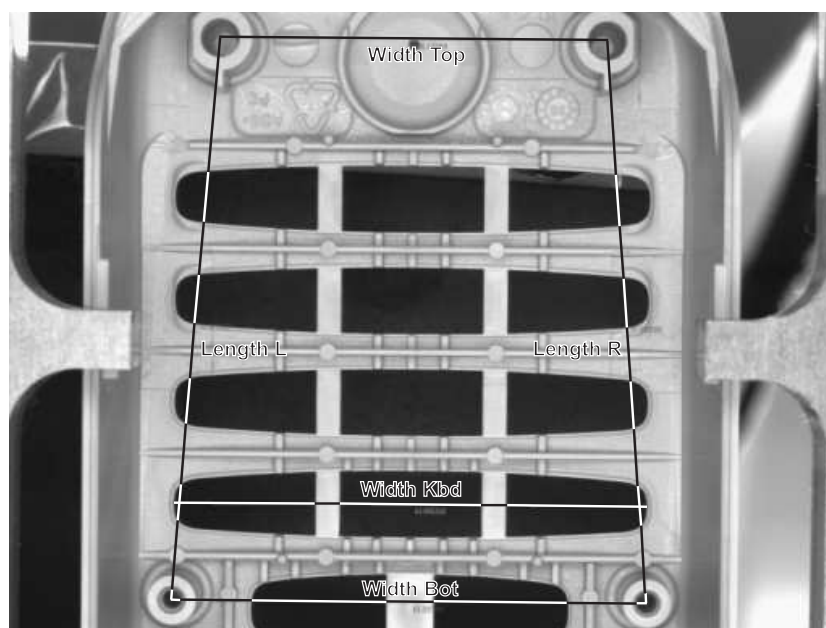
Koeajoja varten rakennettiin uutta laitteistoa ja toteutettiin uusia ohjelmia. Online-laadunseurantajärjestelmän kaavakuva on esitetty kuvassa 3 ja se myös osoittaa tutkimuksellisesti haasteelliset osuudet.



Kuva 3: Testijärjestelmän kaavakuva, johon on merkitty tutkimuksellisesti haastavat asiat kursivoituna (kolme kohtaa). Robotti ottaa tuotetut kappaleet muotista ja vie ne lämpö- ja mittauskuvauksiin. Robotti ohjaa myös PC:n kuvien ottoa relekytkennän avulla.

Teollisuusympäristön testeissä käytettiin Nokia Oyj:n suostumuksella tuotannosta poistuneen matkapuhelimen muovikuorta. Tuotettavat kuoret olivat sellaisia, että niistä voitiin määritellä laadunseurannan kannalta mielekkäitä mittauskohteita. Yksi mitoitusta oli kahden eri näppäimen reunojen välinen etäisyys, ja muut neljä mittauskohtaa oli kuoren kiinnitykseen käytettävien ruuvivornien keskustojen välisiä etäisyyksiä (katso kuva 4).

Kaikki teollisuusympäristön koeajot tehtiin GE Cyloloy C1000HF ABS+PC-seoksella. Tuotetut kuoret olivat väriltään vaaleansinisiä. Ensimmäisessä testiajossa konenäköjärjestelmän kuvien otto toimi ihmisen ohjauksessa. Käytön monimutkaisuudesta johtuen ei tällöin ajettu kokonaista koesuunnittelmaa vaan testattiin kolmea erikokoista kappaletta tuottavaa ajoparametrikombinaatiota. Kappaleiden jäähtymisen jälkeen ne mitattiin OGP:n valmistamalla SmartScope Flash 400 optisella mittausjärjestelmällä. Toisessa ja kolmannessa testiajossa konenäkömittaus käynnistettiin kappaleita muotista ottavan teollisuusrobotin relekytkennän avulla. Näiden testien yhteydessä ajettiin läpi useita koesuunnitelmia, jotka ovat esitelty taulukossa 4.



Kuva 4: Testauksessa käytetyn kappaleen kuva, johon on merkitty käytettävät mitat. Neljä mitoista oli samalla korkeudella olevien ruuvitornien keskipisteiden välisiä etäisyyksiä ja yksi oli näppäimistön leveyteen liittyvä mitta.

Testi	Pvm	Koesuunnitelma	Par.lkm	Tasoja	Ajoja	Kpl/ajo
1.	6.5.2004	Kolme pistettä	1	3	3	10
2.	3.9.2004	Fractional factorial	3	3	9+1	10
	6.9.2004	Fractional + muutosajot	4	3	22	5-70
3.	16.11.2004	Tuotantoajo	–	–	1	50
	16.11.2004	Tuotantoajo (kuivaamaton)	–	–	1	20
	16.11.2004	Adaptiivinen tapa 1	4	–	10+1	7
	17.11.2004	Adaptiivinen tapa 2	4	–	7	10
	17.11.2004	Adaptiivinen tapa 1 opt	4	–	10+2	7
	18.11.2004	Adaptiivinen tapa 2 min	4	–	6+3	10
	18.11.2004	Adaptiivinen tapa 3	4	–	12	7

Taulukko 4: Teollisuusympäristössä tehdyt matkapuhelimen muovikuoreen liittyvät koeajot. Ajojen sisällöt on esitetty tarkemmin tekstissä. Adaptiivisissa ajoissa ei voida puhua samalla tavalla parametrien tasoista, koska niissä ajettava piste valitaan algoritmisesti eikä ennalta valittuja tasoja käyttäen.

Ensimmäisessä testiajossa muutettiin pelkästään jälkipainetta. Muissa koesuunnitelmissa muutettavat parametrit olivat: sulan lämpötila, muotin lämpötila, jälkipaine ja (neljän parametrin tapauksessa lisäksi) jäähdytysaika. Ajossa, joka tehtiin 3.9., oli tavoitteena testata mittoja ennustavia tilastollisia malleja keräämällä dataa osakokeella, jossa oli 9 ajopistettä. Koeajon jälkeen ajettiin 10 kappaleen mittainen tuotantoajo (taulukon Ajoja-

sarakkeen +1), jossa mallien hyvyys testattiin. Ajossa, joka tehtiin 6.9., tutkittiin mittojen muuttumista koneen hitaasti muuttuvien asetusarvojen (sulan lämpötila ja muotin lämpötila) muutoksen aikana. Tavoitteena oli selvittää, voidaanko mittoja ennustaa muotiantureilta kerättävien tietojen perusteella silloinkin, kun koneen tila ei ole tasaantunut. Tällaiselle tiedonkeruulle ja ennustusmallille voisi olla käyttöä adaptiivisessa koesuunnittelussa.

Kolmannessa testiajossa, 16.–18. marraskuuta, toistettiin aluksi 3.9. tuotantoajo pidentettynä (50 kpl) ja 20 kappaleen ajo, jossa käytettiin osittain kuivaamatonta materiaalia. Tarkoituksena oli tutkia, vastaavatko tuotantoajon mitat syyskuun ajossa saatuja mittoja ja onko kuivaamattomalla materiaalilla vaikutusta mittoihin. Muut marraskuun ajot testasivat itse kehitettyjen adaptiivisten koesuunnittelustrategioiden toimivuutta teollisuusympäristössä. Tavoitteena näissä ajoissa oli löytää mahdollisimman hyvin ennalta asetettuja tavoitemittoja vastaavia kappaleita tuottavat koneen ajoarvot mahdollisimman nopeasti.

Adaptiivisissa ajoissa ei voida puhua samalla tavalla parametrien tasoista kuin tavallisten koesuunnittelutaulukoiden tapauksessa, sillä ajettavat pisteet valitaan algoritmisesti. Näiden kohdalla ajojen lukumäärä kertoo myös, plus-merkillä (+), mahdolliset koeajon suorittajien jälkikäteen esittämät ylimääräiset testipisteet. Nämä ylimääräiset testipisteet olivat sellaisia, joissa ihmistietämyksen perusteella kuviteltiin saatavan vielä optimaalisempaa laatua. Käytännössä lisäpisteet eivät kuitenkaan parantaneet kokonaistulosta menetelmän löytämään optimiin verrattuna.

## 2 Mittaus- ja koesuunnittelumenetelmät

Konenäköön perustuva mittausmenetelmä on esitetty huolellisesti raportissa (Lensu and Koikkalainen 2006). Tässä luvussa esitetään lyhyesti menetelmän ominaisuudet, jotta testien ja vertailujen tavoitteet tulevat selviksi. Koesuunnittelun osalta adaptiivisten menetelmien kehitystyö on vasta alkanut, joten siksi tässä ei esitetä lopullisia ratkaisuja, vaan lyhyesti tähän mennessä testatut koeajomenetelmät.

### 2.1 Konenäkö laadunmittauksessa

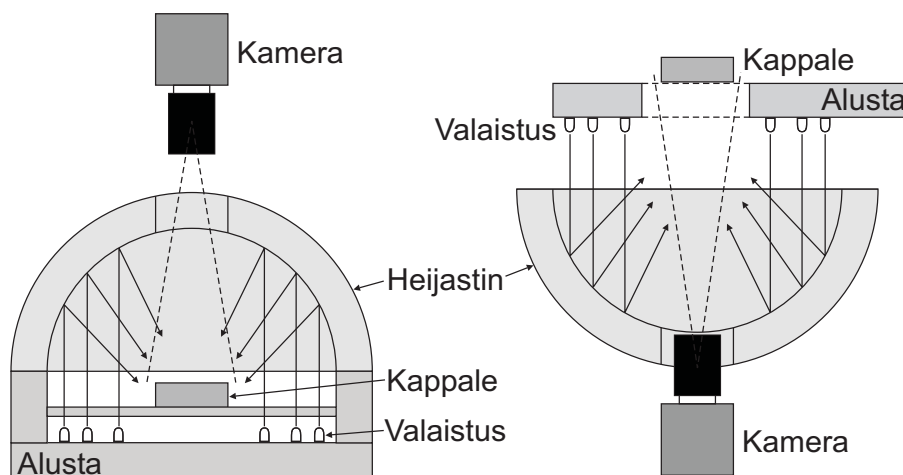
Konenäköjärjestelmillä ja kuvankäsittelyn menetelmillä (Forsyth and Ponce 2003, Gonzales and Woods 2002, Bovik et al. 2000, Jain 1989) voidaan tietyissä tapauksissa automatisoida tuotettujen kappaleiden laatuviikojen tunnistus. Kuvista voidaan esimerkiksi mitata kohteiden välisiä etäisyyksiä (Lensu and Koikkalainen 2006), tutkia kappaleen muotoa (Dryden and Mardia 2002, Haranen et al. 2006) sekä etsiä pinta- ja värivirheitä. Kaksi ensimmäistä tehtävää, mittaus ja muodon tarkastus, edellyttävät, että kuvista löydetään tarkasti jonkinlaisia ennalta määriteltyjä vastinpisteitä, joiden etäisyyttä lasketaan tai joiden keskinäisiä sijainteja verrataan. Mittaus edellyttää lisäksi sitä, että kuvista löydetyt sijainnit ja etäisyydet on voitava muuntaa todelliseksi reaali maailman sijainneiksi ja etäisyyksiksi.

Kaikki edellä mainitut tehtävät edellyttävät, että kappaleen kuvausolosuhteet ja tuenta järjestetään sopiviksi. Valaistukselta edellytetyt ominaisuudet riippuvat osittain suoritettavasta tehtävästä, mutta kaikkia havainnointitehtäviä häiritsee valaistuksen riittämättömyys ja välkkyminen. Hämärässä kuvattaessa joudutaan käyttämään suurempaa aukkoa tai pidempää valotusaikaa, jolloin yksityiskohtien tarkkuus huononee tai kuvaan tulee helposti näkyvää kohinaa. Pitkä valotusaika altistaa kuvaustapahtuman myös tärinälle ja muille muutoksille. Valojen välkkyminen aiheuttaa taas sen, että lyhyttä valotusaikaa käytettäessä konenäkökameralla otettujen kuvien kirkkaus voi selkeästi vaihdella. Siksi konenäkökäytössä käytetään usein tasavirralla toimivia LED-komponentteihin perustuvia valaisimia tai normaalia korkeammalla taajuudella toimivia loisteputkia.

#### 2.1.1 Kehitetty mittausjärjestelmä

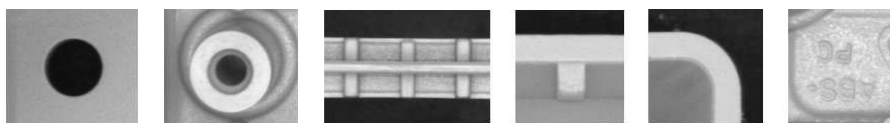
Kehitetty konenäkömittausjärjestelmä (Lensu and Koikkalainen 2006) mahdollistaa kuvista havaittavien samalla etäisyydellä kamerasta olevien kohteiden välisten etäisyyksien mittaamisen. Järjestelmä perustuu yhden konenäkökameran ja kiinteäpolttovalaisen linsin käyttöön, joten mittaaminen edellyttää, että kuvia otettaessa kappaleet ovat aina samassa asennossa ja samalla etäisyydellä kameraan nähden. Järjestelmässä käytetään

LED-valoja, joiden valo johdetaan epäsuorasti kuvattavaan kappaleeseen. Tällöin valon suora heijastuminen kappaleesta kameraan päin minimoituu ja kohteet saadaan määrittettyä tarkemmin. Kuva 5 sisältää molemmat käytetyt kuvausjärjestelyt. Vasemmalla on laboratoriomittauksissa käytetty järjestely ja oikealla teollisuusympäristön järjestely, jossa kuvaus tehdään kappaleen tuentaan käytetyn alustan läpi.



Kuva 5: Testauksessa käytetyt kuvausjärjestelyt: vasemmalla laboratoriossa käytetty järjestely ja oikealla teollisuusympäristön ratkaisu. Molemmissa valaistus on toteutettu LED-komponenteilla, jotka sijaitsevat kuvattavan kappaleen ympärillä ja joiden valo johdetaan epäsuorasti valoa sirottavan styrox-heijastimen kautta kappaleeseen. Kuvaus suoritetaan tämän puolipallon muotoisen heijastimen läpi.

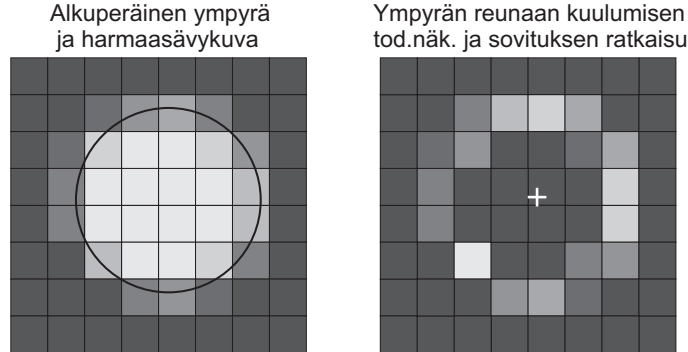
Kappaleesta etsittävät kohteet ovat testien tapauksessa ympyröiden keskipisteitä ja kappaleen reunoja, mutta myös muunlaisia vapaamuotoisia kohteita voitaisiin käyttää. Kuvassa 6 on esitetty esimerkkejä kohdetyypeistä. Reunojen tapauksessa on määriteltävä myös se kohta huolellisesti, mistä paikasta reuna haetaan.



Kuva 6: Kuvia erilaisista kohdetyypeistä: reikä, ruuvitorni, ripa, reuna, kulma ja merkintä.

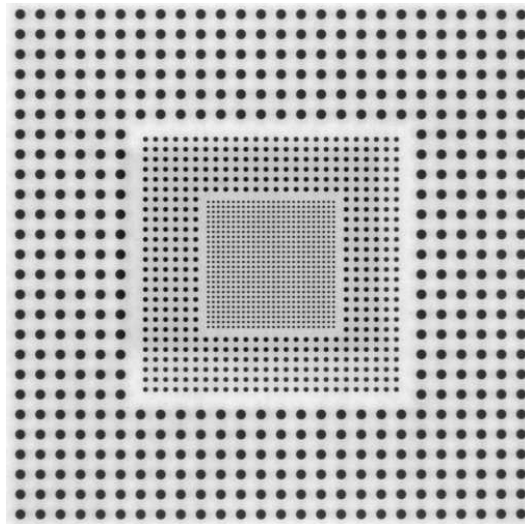
Kohteiden sijaintien määrittämisessä voidaan käyttää avuksi kuvissa olevaa harmaasävyinformaatiota (katso esimerkki kuvasta 7), jolloin sijaintitarkkuus saadaan selvästi paremmaksi kuin yksittäisen pikselin leveys. Tällaisia menetelmiä kutsutaan ns. alipikseli- eli *subpixel*-tekniikoiksi. Toinen vaihtoehto tarkkuuden parantamiseen on ottaa kohteesta useita kuvia ja konstruoida niiden perusteella alkuperäisiä tarkempi kuva superresoluutiomenetelmällä (Chaudhuri et al. 2001, Park et al. 2003). Superresoluutiomenetelmät kuitenkin edellyttävät kohteen tai kamerasiirron liikuttamista kuvien oton välillä ja ovat laskennal-

lisesti vaativia (hitaita), mikä hankaloittaa niiden soveltamista online-käytössä. Näiden asioiden vuoksi toteutus on harmaasävyinformaatioon perustuva.



Kuva 7: Esimerkki kuvien harmaasävyinformaatioon perustuvasta sijainnin määrittämisestä: ympyrän keskipisteen haku parametriseen sovitukseen avulla. Menetelmä poimii ympyrän kehään kuuluvat kuvapisteen,  $(x_i, y_i)$ , laskien niille painot,  $w_i$ , sen mukaan, miten todennäköisesti ne kuuluvat ympyrän kehään, ja sovittaa niihin ympyrän yhtälön  $r_0^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$  minimoimalla funktiota  $f(x_0, y_0, r_0) = \sum_i w_i |(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r_0^2|$ . Ratkaisuna saadaan keskipiste  $(x_0, y_0)$  ja säde  $r_0$ .

Kuvista havainnoitavien kohteiden reaali maailman sijaintien määrittämiseen ja linssivirheiden korjaamiseen on testiajoissa käytetty Edmund Opticsin Grid Distortion Target-nimistä lasilevyä, jossa on 50x50 mm alueella ympyröitä hilan muodossa. Alueen reunoilla on halkaisijaltaan 1 mm ympyröitä 2 mm välein, niiden sisällä 0.5 mm ympyröitä 1 mm välein ja keskellä 0.25 mm ympyröitä 0.5 mm välein (katso kuva 8).



Kuva 8: Kuva kalibrointilevystä, jossa on kolmen kokoisia ympyröitä hilan muodossa.

Levy kuvataan sijoitettuna samalle etäisyydelle kamerasta kuin havainnoitavat kohteet, jolloin kappaleiden kuvista tehtävät havainnot voidaan suoraan muuntaa reaali maailman



sijaintitiedoiksi. Sijaintitietojen laskemiseen käytetään kalibrointimallia, joka kykenee korjaamaan käytettävän linssin virheet. Tämänlainen kalibrointilevy soveltuu vain kohtalaisen pienten kappaleiden mittojen selvittämiseen. Suurien kappaleiden yhteydessä mittojen laskemiseen tarvittaisiin vähintään kolme kiintopistettä sisältävä sopivan mittakaavan kalibrointikohde.

Koska konenäkökameroissa käytettävä valoherkkä (CCD- tai CMOS-tyyppinen) tunnistinkenno ja signaalin analogiset siirtotiet aiheuttavat kuviin aina kohinaa, mittaustulokset eivät ole samoja, vaikka sama kappale kuvattaisiin kaksi kertaa peräkkäin tekemättä mitään muutoksia kuvien oton välillä. Kohinan ja häiriöiden vaikutusta voidaan kuitenkin vähentää ottamalla samasta kappaleesta 5 (tai 10) kuvaa samoissa olosuhteissa ja laskemalla niistä määritellyt mitat (10 kuvan tapauksessa leveys- ja pituusmitat saadaan riippumattomiksi). Tällä tavalla saadaan viisi mittaustulosta, joista voidaan lopulliseksi mittaustulokseksi laskea keskiarvo tai valita mediaani. Koska mittaustulokset eivät välttämättä kaikissa tilanteissa ole normaalijakautuneita, päätettiin mittojen valinnassa käyttää mediaania eli poimia tuloksista keskimäinen arvo. Suuri osa tämän raportin laboratoriotesteistä on kuitenkin tehty käyttäen yksittäiskuvausta ja -mittausta.

Kohinan vaikutusta minimoitiin myös kuvia silottamalla. Kuvalle tehtiin siis lievä Gaussinen silotus ennen mittauspisteiden tarkkaa etsimistä. Tämä vähentää yksittäisissä kuvapisteissä olevaa kohinaa oleellisesti huonontamatta kohteiden sijainnin tarkkuutta. Silotus tosin tekee menetelmästä hitaamman, mitä voidaan kompensoida silottamalla vain kohdepisteiden ympäristö koko kuvan sijaan.

Mittausta varten kuvista etsittäviä kohteiden sijainteja voidaan käyttää myös kappaleiden muodon virheiden analysoinnin lähtöaineistona. Tällaista analyysiä varten kohteet tulee valita siten, että ne kuvastavat riittävällä tarkkuudella kappaleen muotoa. Esimerkki tämänkaltaisesta analyysistä löytyy raportista (Haranen et al. 2006).

## 2.2 Käytetty konenäkölaitteisto

Käytettävissä oli kolme konenäkökameraa ja neljä erilaista objektiivia. Teollisuusympäristössä mittaamiseen käytettiin aina tarkinta kameraa ja parasta linssiä, mutta laboratoriomittauksissa testattiin myös muita kameroita ja linsejä. Taulukko 5 esittää kameroiden perusominaisuudet lyhyesti. Siinä on myös esitetty kameran yhden kuvapisteen leveys (tai korkeus) reaali maailman etäisyytenä kuvattaessa laboratoriossa laatikkokappaleita ja teollisuudessa matkapuhelimen kuorta, joiden kuvausjärjestelyt ja -etäisyydet olivat hieman erilaiset.

JAI:n ja Rainbow:n kameroiden liitäntätapa tietokoneeseen on analoginen komposiittivideo signaali, jolloin kuvien kaappaamiseen käytettiin National Instrumentsin NI-1409 PCI-korttia. Harmaasävyt näytteistettiin 8 bitin A/D-muunnoksella, joten sävyjä kuvissa oli

Merkki/malli	Tarkkuus	Sävyjä	Liitäntä	Kuvapisteen koko		Hinta
				Laboratorio	Teollisuus	
JAI CV-A1	1380x1035	256	Analoginen	n. 35 $\mu\text{m}$	n. 50 $\mu\text{m}$	2124 e
VC 2065E	768x576	256	Ethernet	n. 65 $\mu\text{m}$	–	3600 e
Rainbow CL4624	768x576	256	Analoginen	n. 65 $\mu\text{m}$	–	400 e

Taulukko 5: Käytetyt konenäkökamerat ja niiden ominaisuudet. Kuvapisteen koko ilmaisee yhden kuvapisteen leveyden (tai korkeuden) reaaliaikaisen etäisyydenä kuvattaessa kohdetta laboratoriotesteissä ja teollisuusympäristössä. Kuvausjärjestelyt ja mitattavien kohteiden koot olivat erilaiset eri ympäristöissä. Hinnat ovat vuosilta 2000 (Rainbow) ja 2003 (muut).

maksimissaan 256. Rainbow CL4624 on itse asiassa värikamera, mutta silläkin otettiin vain harmaasävykuvia. Vision Components VC2065E -kamera sisältää Texas Instrumentsin C6000-sarjan signaaliprosessorin (150 MHz TMS320C6211) sekä ohjelma- ja kuva-muistia, jolloin kuvainformaatio voidaan lukea suoraan kameran CCD-kennolta muistiin. Kuvia voidaan käsitellä (ja kappaleet mitata) kameran omalla prosessorilla, tai siirtää ne PC-tietokoneelle kameran verkkoliitännän (100 Mbit Ethernet) kautta. Toimintatapa on sellainen, että kameran sisään sijoitetaan verkkoyhteyksiin vastaava palvelinohjelma, joka joko nappaa tai käsittelee kuvia ja johon PC:n asiakasohjelma ottaa yhteyden.

Objektiiveja oli neljä erilaista: Tamronin 25 mm tarkkuuslinssi (High Precision), Tamronin 35 ja 50 mm tavalliset konenäkölinssit sekä Rainbow:n edullinen Zoom-linssi (8-48 mm). Kaikki linssit ovat manuaalisesti säädettäviä eli tarkennus, aukon säätö ja mahdollinen zoomaus (Rainbow) on tehtävä käsin. Kaikki objektiivit olivat C-kierteellä varustettuja ja siten helposti liitettävissä konenäkökameroihin. Objektiivien ominaisuudet on esitetty taulukossa 6.

Merkki/malli	Polttoväli	Valovoima	Sopivuus	Min.etäisyys	Hinta
Tamron TA23FM25SP	25 mm	F1.4	C-mount, $\frac{2}{3}$ "	0,15 m	350 e
Tamron TA35HB	35 mm	F2.1	C-mount, $\frac{2}{3}$ "	0,30 m	150 e
Tamron TA21HC	50 mm	F2.8	C-mount, $\frac{2}{3}$ "	0,44 m	150 e
Rainbow M6x8	8–48 mm	F1.0	C-mount, $\frac{1}{2}$ "	Pv vaikuttaa	240 e

Taulukko 6: Käytetyt konenäköobjektiivit ja niiden ominaisuudet. Polttoväli on 35 mm kinofilmikameraan suhteutettu arvo, valovoima on standardi F-luku, sopivuus kertoo kierteen ja kameran CCD-kennon maksimikoon, min.etäisyys määrittelee linssin minimin tarkennusetäisyyden ja hinta ostohinnan yliopistolle vuosina 2000 (Rainbow) ja 2003 (Tamron).

## 2.3 Uudet koesuunnittelustrategiat

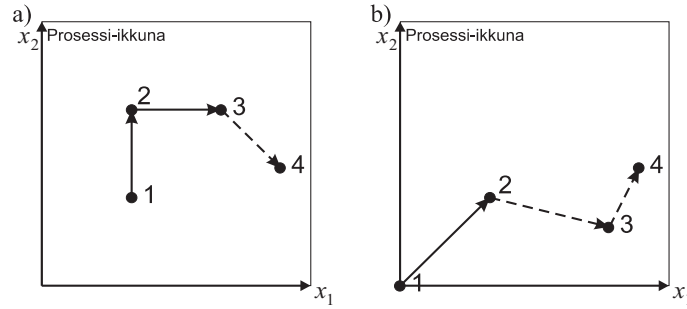
Koesuunnittelua tehdään tavallisesti käyttämällä ennakkoon valittuja suunnittelutaulukoita sen mukaan, minkälaisia asetuservojen välisiä yhteisvaikutuksia prosessissa oletetaan olevan. Esimerkiksi täyskokeella (yhteensä  $T^p$  ajoa, missä  $T$  on tasojen määrä ja  $p$  on parametrien määrä) saadaan selvitettyä kaikkien asetuservojen väliset yhteisvaikutukset. Osakokeella nähdään vain osa niistä. Siihen, minkälaista taulukkoa tulisi käyttää, vaikuttaa oletettu riippuvuuden muoto, esimerkiksi oletetaanko laadun olevan lineaarisesti riippuva asetuservoista vai voiko riippuvuus olla epälineaarinen. Täysin lineaariselle ilmiölle ja lineaariselle mallille riittää kaksi tasoa / parametri, muussa tapauksessa tulisi käyttää kolmea tai useampaa tasoa.

Tavalliset 2 – 3 tason koesuunnittelutaulukot keräävät tietoa pääasiassa prosessi-ikkunan nurkista ja 3 tason tapauksessa myös keskipisteestä, mutta muitakin menetelmiä optimaalisten näytteistypisteiden valintaan on olemassa. Esimerkiksi *optimal design* -menetelmillä (Fedorov 1972) voidaan ratkaista optimaaliset näytteenottopisteet, jos ilmiön kuvaamiseen käytettävä tilastollinen malli (esim. lineaarinen regressio) ja näytepisteiden lukumäärä on ennakkoon valittu. Menetelmä antaa lineaaristen mallien tapauksessa hyvin samankaltaisia pisteitä kuin 2 tason koesuunnittelutaulukoissa käytetään.

Jos koesuunnittelun tuloksena saatavaa, laatua asetuservojen funktiona kuvaavaa tilastollista mallia halutaan parantaa, *optimal design* -menetelmät ovat käyttökelpoisia. Jos koesuunnittelun suorittamiseen kuluva aikaa halutaan samalla minimoida, eivät kyseiset menetelmät ole parhaita mahdollisia lähestymistapoja. Niiden sijaan kannattaa käyttää adaptiivisia koesuunnittelumenetelmiä, joissa tietoa ei kerätä enempää kuin on tarpeen. Ensin on kyllä kerättävä hieman tietoa joistakin prosessi-ikkunan pisteistä, mutta seuraavien pisteiden valinta tehdään esimerkiksi tilastollisella mallilla, joka tehdään asetuservojen,  $A$ , ja laadun,  $L$ , välille:  $L = f(A)$ . Tilastollisesta mallista ratkaistaan sellainen ajopiste, jossa mallin perusteella saataisiin parasta laatua,  $A_{opt} = f^{-1}(L_{opt})$ , ja ajetaan se. Optimaalinen piste ei yleensä löydy ensimmäisellä muutosaskelella vaan joudutaan muodostamaan uusia malleja ja ajamaan seuraavia pisteitä (katso kuva 9).

Kuvatekstissä kuvailtuja adaptiivisia menetelmiä testattiin sekä dataa tuottavalla simulaattorilla että käytännössä teollisuusympäristössä. Lisäksi testattiin kolmatta aivan erilaista menetelmää (taulukoissa algoritmi 3), jossa uudet ajopisteet valittiin aina sen mukaan, missä saataisiin parhaiten uutta tietoa ilmiöstä optimipisteen luotettavuuden parantamiseksi. Nämä ajot olivat oikeastaan vain ensimmäinen kyvykkyydesti, ja jatkossa menetelmiä tulee edelleen kehittää ja niiden hyvyttä tulee testata muillakin kappaleilla.

Näissä testiajossa tavoitearvot määriteltiin kuumen kappaleen mittoina. Lopullisessa toteutuksessa tavoite tulisi määritellä jäähtyneiden kappaleiden mittojen avulla ja silloin tarvitaan lisäksi malli kutistuman määrän ennustamiseen,  $L_{kuuma} \mapsto L_{jäähtynyt}$ . Tähän



Kuva 9: Kaksi esimerkkiä adaptiivisista koesuunnittelustrategioista kahden asetusmuuttujan  $x_1$  ja  $x_2$  tapauksessa. Ennalta päätetyt askelet on merkitty kuviin yhtenäisellä viivalla ja menetelmän valitsevat askelet katkoviivalla. a) Algoritmi 1, jossa ajetaan ensin pieni koe minimoiden tarvittavat asetusten muutokset. Kolmen askelen mittaustietojen avulla muodostetaan malli  $L = f(A)$  ja ratkaistaan siitä mahdollisimman optimaalista laatua  $L_{opt}$  tuottava asetusarvoyhdistelmä  $A_{opt} = f^{-1}(L_{opt})$  neljänneksi ajopisteeksi. Pisteitä ajetaan ja malleja tehdään, kunnes ehdotettu piste alkaa pysyä samana. b) Algoritmi 2, jossa ajetaan vain kaksi pistettä ja tehdään malli. Mallin optimipiste  $A_{opt}$  ajetaan seuraavaksi, täydennetään mallia, valitaan seuraava piste, jne.

ennustukseen tarvitaan tietoja muottiantureista, joiden avulla voitaisiin myös siirtyä menetelmään, jossa laatua,  $L$ , ennustettaisiin muottiantureiden tunnusluvuilla,  $M$ , ja näitä tunnuslukuja ennustettaisiin asetusarvoilla,  $A$ . Tällöin prosessin tasoittumista ei välttämättä tarvitsisi odottaa vaan tietoa  $M \mapsto L$  -mallia varten voitaisiin kerätä myös silloin, kun kone on siirtymässä asetusarvoyhdistelmästä toiseen. Tällöin mallien ketjuksi muodostuisi siis  $A \mapsto M \mapsto L_{kuuma} \mapsto L_{jahtynyt}$ .

### 3 Konenäkömenetelmän tarkkuus ja TTY:n ruiskuvalulaboratorion koeajot

Kappaleita tuotettiin kolmesta eri materiaalista taulukon 3 mukaisesti kesällä ja syksyllä 2003. Kappaleet mitattiin kuvan 2 määritelmän mukaisesti TTY:llä kohtalaisen pian tuotannon jälkeen DeMeet 220 koordinaattimittausjärjestelmällä ja myöhemmin JyY:n kehittämällä konenäkömittausjärjestelmällä (Lensu and Koikkalainen 2006).

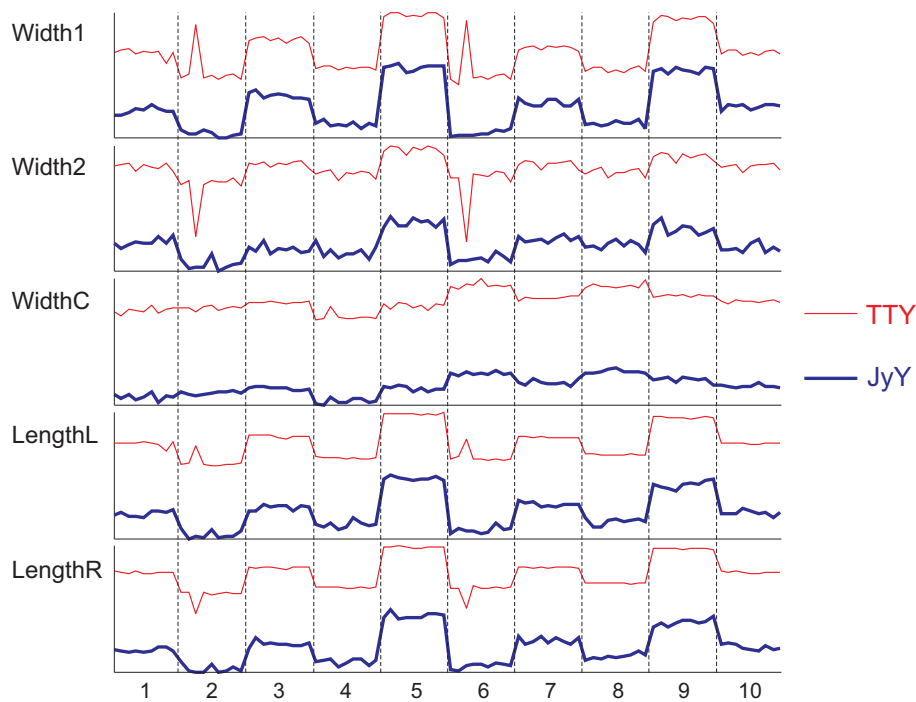
Optisen mittausjärjestelmän tuloksissa on aina jonkin verran systemaattista virhettä eli harhaa (*bias*), mutta tämä virhetyyppi on kalibroitavissa pois, jos samaa kappaletta mitataan toistuvasti kalibroitavalla järjestelmällä ja jollakin referenssimittausjärjestelmällä. Harhaan voi olla useita syitä: kappaleen reunojen pyöristykset, kuvausperspektiivin vaikutus kuvan kulmissa oleviin kohteisiin, tulevan valon suunta ja varjot, värien merkitys eli valon eri aallonpituuksien erilainen taittuminen linseissä, ulkoisten olosuhteiden vaikutus mitattavaan kappaleeseen, kalibrointilevyn mahdolliset virheet, jne. Menetelmän kehitystyössä on keskitytty tulosten hajonnan minimointiin, sillä se jää jäljelle kalibroinnista huolimatta edustamaan mittauksen todellista epävarmuutta.

#### 3.1 Vertailu konenäkölaitteiston ja DeMeet 220 mittalaitteen välillä

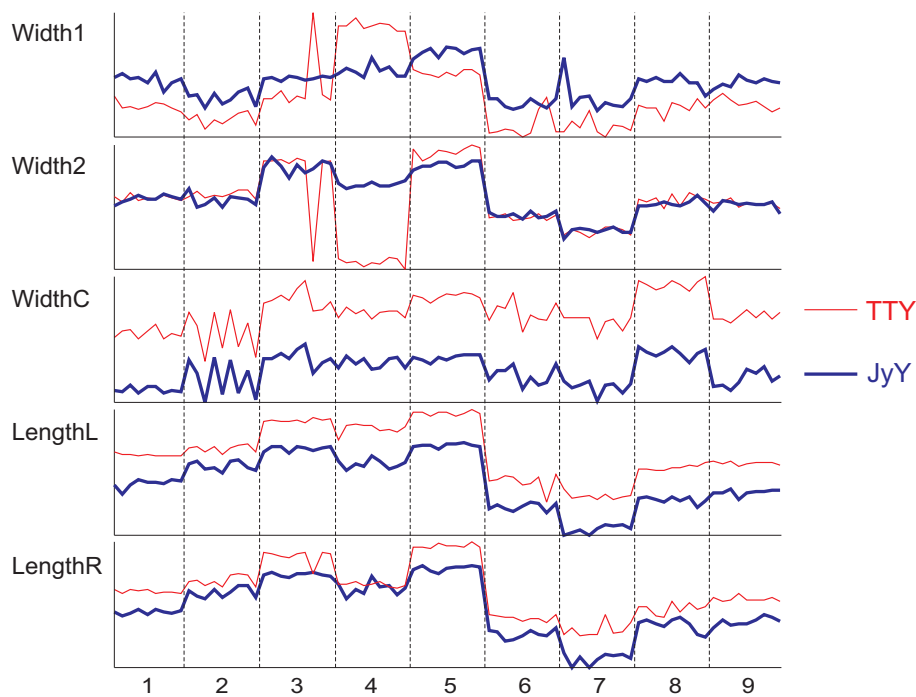
Kuvissa 10 – 13 on esitetty taulukon 3 koeajojen kaikkien kappaleiden mittaustulosten kuvaajat. Kuvaajissa näkyy sekä konenäkömittauksen (JyY) että vertailulaitteena käytetyn DeMeet 220 koordinaattimittausjärjestelmän (TTY) antamat tulokset ja niistä on helppo tehdä muutamia selkeitä havaintoja.

ABS+PC-materiaalin osakokeen mittaustuloksissa on TTY:n mittauksessa kaksi kappaletta mitattu väärin päin. Nämä näkyvät erityisesti leveysmittojen kohdalla piikkeinä, sillä mittojen keskiarvotasot olivat erilaiset (Width2 oli suurempi kuin Width1 ja LengthR suurempi kuin LengthL). Vastaavasti PBT-materiaalin testissä on kolmannen ajon yksi kappale ja neljäs ajo kokonaisuudessaan mitattu asettamalla kappaleet väärin päin. Tämäkin eroavaisuus näkyy selvästi mittaustulosten kuvaajissa. PA-materiaalin tapauksessa JyY:n mittausjärjestelmän harha ja hajonta olivat suuria (WidthC:tä ei mitattu).

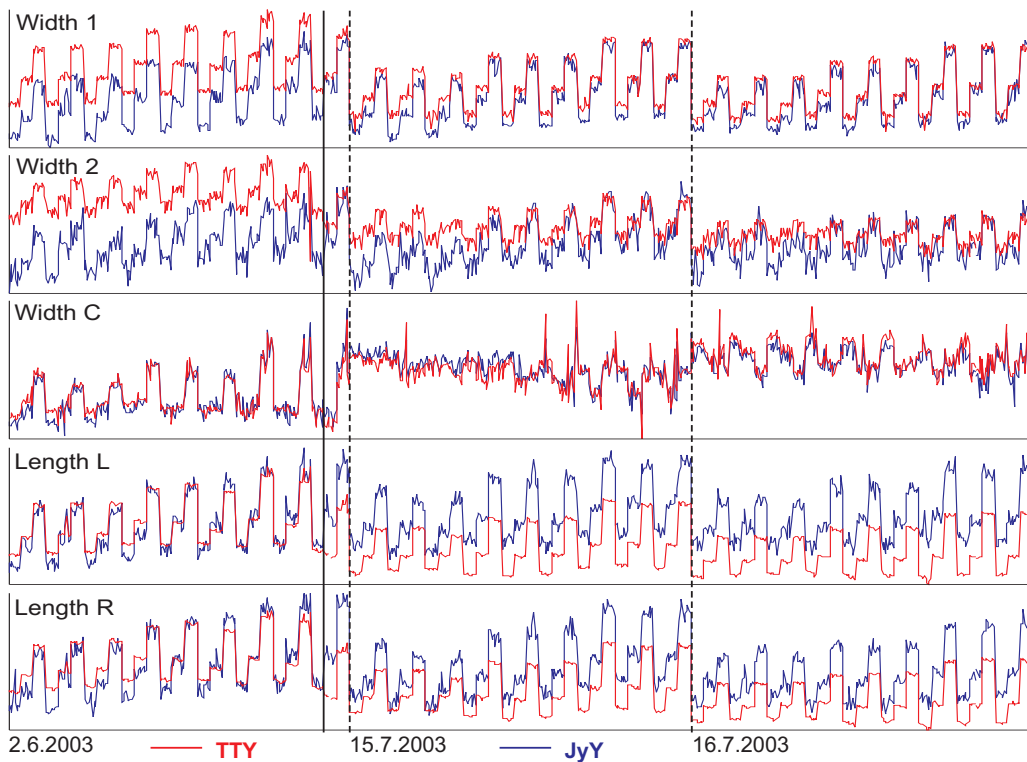
Konenäköjärjestelmän antamat mitta-arvot olivat ABS+PC-materiaalin kohdalla selkeästi pienempiä kuin optisen mittauskoneen antamat tulokset, mikä johtui osittain mittaustilasta ja osittain konenäköjärjestelmän kuvausjärjestelystä. Tampereella mittaukset tehtiin kuumana kesäaikana huonosti ilmastoidussa huoneessa ja Jyväskylän mittauskuvaukset joulukuussa huoneessa, jossa on tehokas ilmastointilaitte, joten vallitsevassa mittaustilassa oli selkeä ero. Tämä vaikutti sekä kappaleisiin että mittausjärjestel-



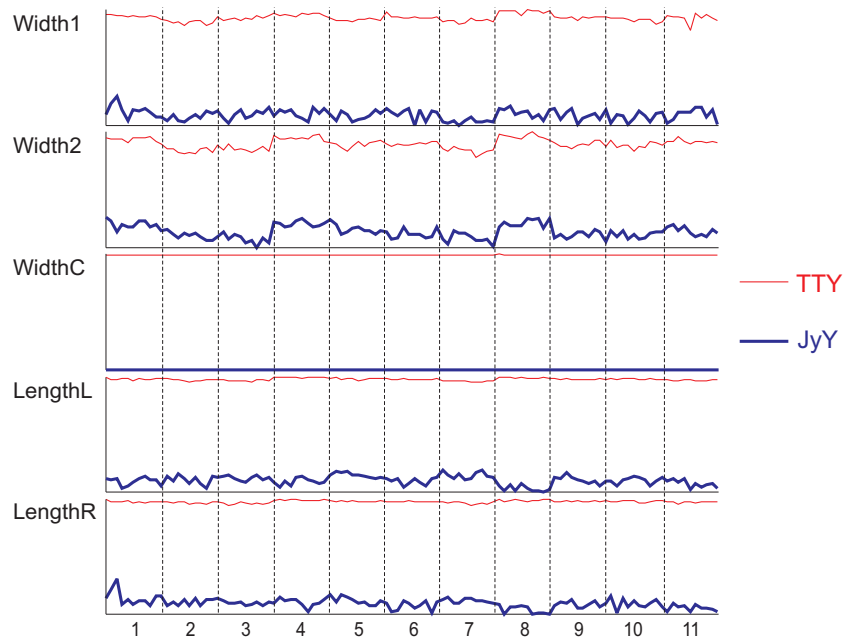
Kuva 10: Laatikkokappaleen ABS+PC-materiaalin osakokeen mittaustulokset kymmenen erilaisen asetusravokombinaation funktiona.



Kuva 11: Laatikkokappaleen PBT-materiaalin osakokeen mittaustulokset yhdeksällä erilaisella asetusravokombinaatiolla.



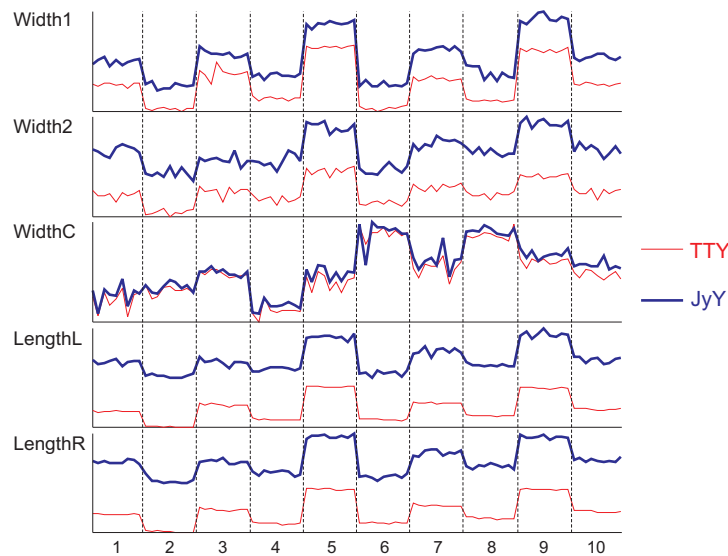
Kuva 12: Laatikkokappaleen ABS+PC-materiaalin täyskokeen mittaustulokset, jossa erilaisia asetusrvojen kombinaatioita on 81.



Kuva 13: Laatikkokappaleen PA-materiaalin osakokeen mittaustulokset yhdellätoista erilaisella asetusrvojen kombinaatiolla. WidthC:tä ei kehitetyllä järjestelmällä mitattu.

män kalibrointiin. Mittauslämpötilan vaikutus mittaustulokseen näkyy hyvin ABS+PC-materiaalin täyskokeen kuvaajissa, joihin on yhtenäisellä pystyviivalla merkitty kohta, jossa TTY:n mittaustulosten taso yllättäen laskee. Myöhemmin asiaa selviteltäessä todettiin, että ensimmäiset 25 erää oli mitattu eri päivänä kuin loput. Mittaushuoneen lämpötila oli alkuosaa kuvattaessa ollut korkeampi eikä sitä kyseisessä huoneessa voitu pitää vakiona.

Minimoidaksemme mittausolosuhteiden vaikutusta mittaustuloksiin, järjestettiin toukuussa 2004 uusi mittauslaitteistojen vertailu, joka suoritettiin TTY:n mittaushuoneessa siirtämällä JyY:n konenäkömittauslaitteisto sinne ja pyrkimällä mittaamaan kappalesarjat peräjälkeen eri laitteistoilla. Konenäkölaitteisto oli kuitenkin huomattavasti nopeampi mittausten teossa ja mittaushuoneen lämpötila kohosi päivän aikana noin 21:stä yli 25:een asteeseen, joten täysin samoista olosuhteista ei siinäkään yhteydessä voitu puhua. Kuvat 14 ja 15 sisältävät tämän vertailumittauksen kuvaajat.

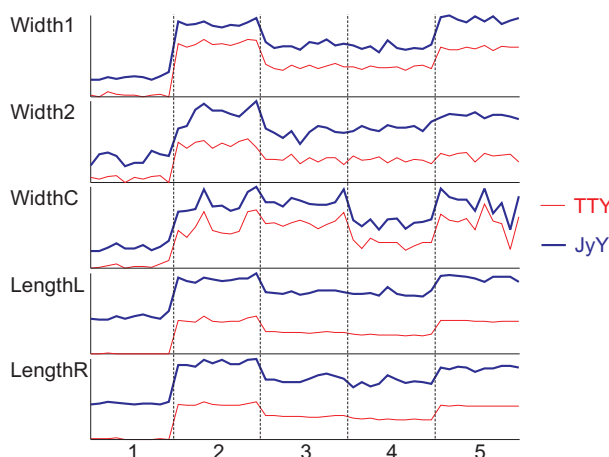


Kuva 14: Laatikkokappaleen ABS+PC-materiaalin osakokeen uusintamittauksen tulokset.

Selvitettäessä eri mittalaitteiden antamien keskiarvotulosten eroja, eli harhaa, huomattiin erojen koostuvan monesta tekijästä: laitteiden kalibroinnista, mittauslämpötilasta sekä mittauskohdeiden tarkasta määrittäytävasta. Ennen uutta mittausta kuvausjärjestely oli kalibroitu siten, että konenäköjärjestelmä antaisi yhdenmukaisempia tuloksia vertailumittalaitteen kanssa. Kun konenäköjärjestelmää uudessa vertailumittauksessa käytettiin samassa huonetilassa kuin DeMeet 220:stä ja tilan lämpötila oli korkeampi kuin DeMeet-laitteen kalibrointilämpötila, olivat konenäkömenetelmän mittaustulokset hieman suurempia kuin vertailumittalaitteen. Erojen määrät on esitetty taulukossa 7.

Jos tämä harha poistetaan, olisivat mittaustulokset olleet hyvin lähellä toisiaan. Konenäköjärjestelmän mittaustulosten hajonta oli ainakin kuvaajien perusteella jonkin verran suurempaa. Kaikissa näissä mittauksissa käytettiin konenäköjärjestelmän osalta yksit-





Kuva 15: Laatikkokappaleen ABS+PC-materiaalin täyskokeesta poimitun otoksen (5 ajoa, 50 kpl) uusintamittauksen tulokset.

Mitta	Harha (mm)
Width1	0.0141
Width2	0.0144
WidthC	0.0085
LengthL	0.0553
LengthR	0.0486

Osakoe

Mitta	Harha (mm)
Width1	0.0156
Width2	0.0132
WidthC	0.0360
LengthL	0.0573
LengthR	0.0446

Täyskokeen otos

Taulukko 7: TTY:n mittaustilassa tehdyn vertailumittauksen systemaattiset erot: Harha = Mitta(konenäkö) – Mitta(DeMeet).

täiskuvausta, joten hajonta olisi saatu pienemmäksi, jos olisi käytetty toistokuvausta ja -mittausta tai kohinan poistoa kuvaa silottamalla (katso luvun 3.2.5 testit).

### 3.2 Konenäköjärjestelmällä saavutettu mittaustarkkuus

Tässä luvussa esitettävistä tuloksista miltei kaikki perustuvat konenäköjärjestelmän tapauksessa yksittäismittauksen käyttöön ilman silotusta (menetelmän parannustavat on esitetty luvun 2.1.1 lopussa). Projektin edetessä kuitenkin havaittiin, että toistomittauksella saadaan hieman pienempi hajonnan arvo (katso luvun 3.2.5 testit). Kaikkia kappaleita ei kuitenkaan kannattanut kuvata uudestaan kaikilla kameroiden ja linssien yhdistelmillä, joten siksi kamera- ja objektiivivertailut perustuvat edelleen ohjelmiston vanhempaan versioon.

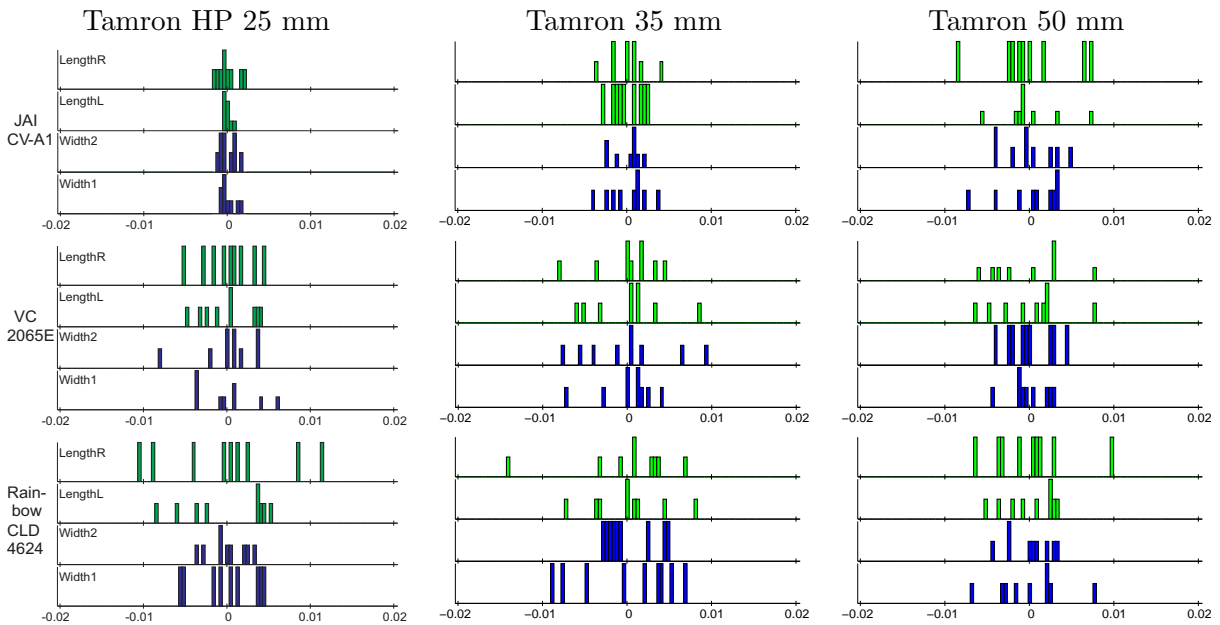
Keskihajonnan laskemiseksi saman kappaleen mittausta on toistettu useita kertoja. Itse mittausta tehdään viidessä vaiheessa: laitetaan kappale siirtokelkkaan, siirretään se kelmalla

kuvattavaksi, otetaan kuva(t) ja mitataan, vedetään kelkka pois kuvauspaikalta ja otetaan kappale pois kelkasta. Toistojen lukumäärä on esitetty jokaisen taulukon yhteydessä muodossa: esimerkiksi  $n = 11$  tarkoittaa, että mittausproseduuria on kyseisessä tapauksessa toistettu 11 kertaa. Tavoitteena oli vertailla sekä materiaalin että laitteiston vaikutusta keskihajontaan kuitenkin niin, että testaukset suoritettiin erikseen. Materiaalin vaikutusta testattiin vain parasta laitteistoa käyttäen ja laitteiston vaikutusta tutkittiin käyttäen ABS+PC-materiaalista valmistettua kappaletta, jonka kuvausjärjestely saatiin pienimmällä vaivalla riittävän hyväksi.

### 3.2.1 Laitteiston vaikutuksen vertailujen tulokset

Tarkoituksena oli tutkia kameran ja linssin yhteisvaikutusta saman kappaleen toistokokeen,  $n = 9$ , hajontaan. Käytetyt kamerat ja linssit olivat luvun 2.2 mukaiset. Kuvassa 16 on esitetty tulosten jakaumat histogrammeina siten, että kamerat vaihtuvat riveittäin ylhäältä alas ja linssit sarakkeittain vasemmalta oikealle. Taulukossa 8 on esitetty mittakohtaisesti kyseisen testauksen keskihajonnan arvot mikrometreinä.

Hieman yllättävää on, että objektiivien paremmuus näyttää lähes käänteiseltä JAI- ja Rainbow-kameroiden välillä. Tämän taustalla saattaa tosin olla Rainbow-kameran epäonnistunut fokuointi. Joka tapauksessa tarkin kamera (JAI) ja kallein linssi (Tamron 25 mm) antavat parhaan tuloksen.

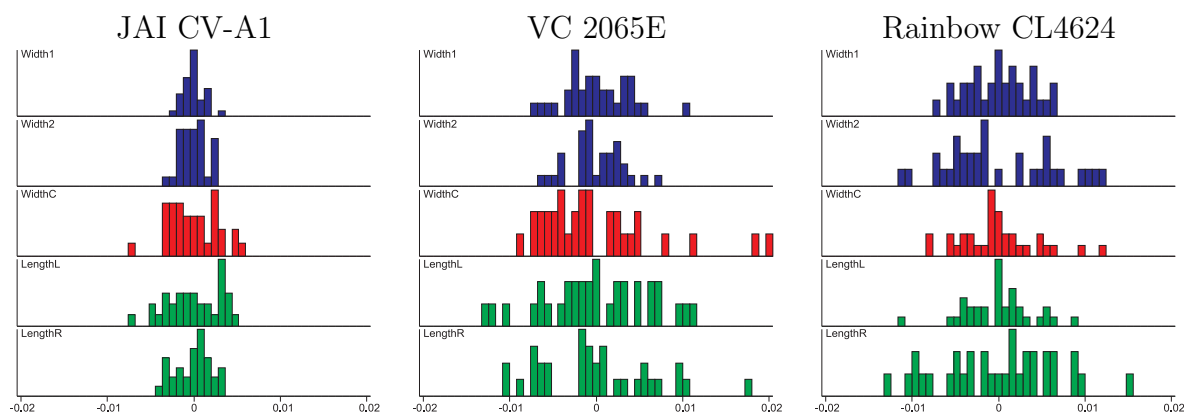


Kuva 16: Laitteistovertailun tulokset, 4 mittaa,  $n = 9$ , eroina (mm) keskiarvotuloksista.

Kamera	Linssi	$\sigma_{\text{Width1}}$	$\sigma_{\text{Width2}}$	$\sigma_{\text{LengthL}}$	$\sigma_{\text{LengthR}}$
JAI CV-A1	Tamron 25 mm	0.81	0.86	0.44	1.19
	Tamron 35 mm	2.34	1.52	1.73	2.11
	Tamron 50 mm	3.66	3.02	3.51	4.62
VC 2065E	Tamron 25 mm	3.38	3.46	3.08	2.99
	Tamron 35 mm	3.29	5.41	4.43	3.72
	Tamron 50 mm	2.25	2.77	4.20	4.35
Rainbow CL4624	Tamron 25 mm	3.69	2.28	5.13	7.00
	Tamron 35 mm	5.71	2.89	4.40	5.85
	Tamron 50 mm	4.11	2.50	3.07	4.59

Taulukko 8: Laitteistovertailun keskihajonnan  $\sigma_{\text{mitta}}$  arvot mittakohtaisesti,  $\mu\text{m}$ .

Jälkikäteen pohdittiin toistojen lukumäärän vaikutusta tulokseen ja sitä, että tässä toistokokeessa kappaletta ei otettu eri mittauskertojen välillä pois kuvauskelkasta. Niinpä päätettiin suorittaa uusi testimittaus, jossa toistojen määrä oli kasvatettu 33:een ja mitaukset tehtiin toistaen myös kappaleen asemointi. Tässä kuvaamista ja mittaamista oli kuitenkin niin paljon, että kaikkia kameroiden ja linssien yhdistelmiä ei haluttu testata. Siksi kamerat ja linssit testattiin nyt erikseen: kaikki kamerat käyttäen parasta 25 mm tarkkuuslinssiä ja kaikki linssit käyttäen tarkinta kameraa. Tulokset on esitetty kuvissa 17 – 18 ja taulukoissa 9 – 10.

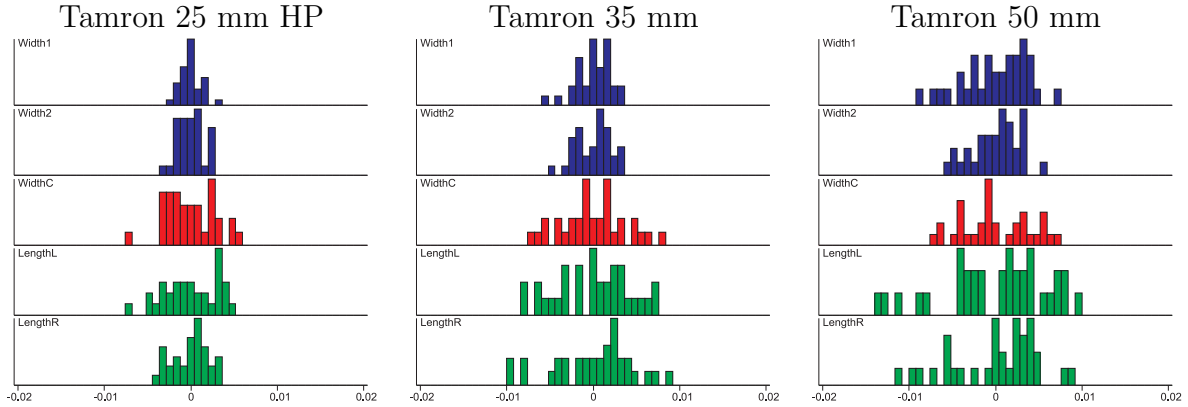


Kuva 17: Kameravertailun tulokset, viisi mittausta,  $n = 33$ , eroina (mm) keskiarvoista.

Nämä uuden toistokokeen tulokset kuvastanevat luotettavammin menetelmän todellista tarkkuutta. Kameran vaaka- ja pystyresoluution kaksinkertaistaminen pienentää mittojen hajontaa keskimäärin noin 50 %. Kallein (25 mm High Precision) linssi tuottaa pienimmän hajonnan, mikä johtuu osittain myös siitä, että kuvausetäisyys on sillä pienin. Pienempi etäisyys vähentää mm. ympäristön tärinän yms. asioiden vaikutusta. Kaikkein edullisinta ratkaisua verrattiin vielä tarkimpaan ja saatiin kuvassa 19 ja taulukossa 11 esitetyt

Kamera	Resoluutio	$\sigma_{\text{Width1}}$	$\sigma_{\text{Width2}}$	$\sigma_{\text{WidthC}}$	$\sigma_{\text{LengthL}}$	$\sigma_{\text{LengthR}}$
JAI CV-A1	1380x1035	1.13	1.41	2.75	2.98	2.01
VC 2065E	768x576	3.66	3.13	7.01	6.08	6.51
Rainbow CL4624	768x576	3.63	6.09	4.42	3.92	6.42

Taulukko 9: Kameran vaikutus keskihajontaan  $\sigma_{\text{mitta}}$ , yksikkönä ( $\mu\text{m}$ ). Materiaali Cycology ABS+PC 1 mm, Tamron 25 mm High Precision -linssi ja mittaustoistoja  $n = 33$ .



Kuva 18: Linssivertailun tulokset, viisi mittausta,  $n = 33$ , eroina (mm) keskiarvoista.

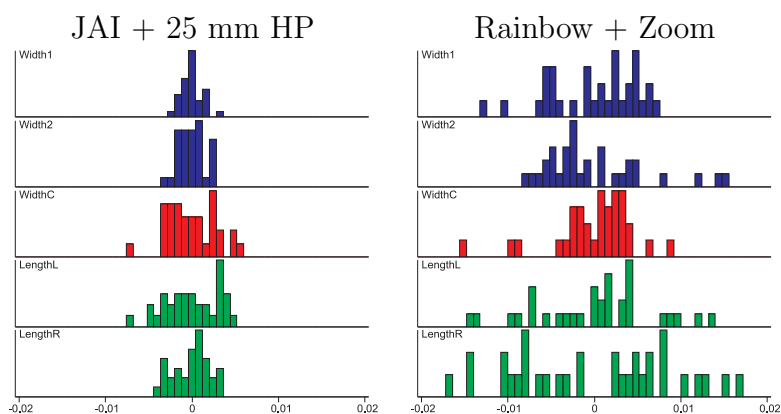
Linssi	$\sigma_{\text{Width1}}$	$\sigma_{\text{Width2}}$	$\sigma_{\text{WidthC}}$	$\sigma_{\text{LengthL}}$	$\sigma_{\text{LengthR}}$
Tamron 25 mm HP	1.13	1.41	2.75	2.98	2.01
Tamron 35 mm	1.95	2.03	3.61	4.14	4.51
Tamron 50 mm	3.75	2.61	3.90	5.92	4.83

Taulukko 10: Linssin vaikutus keskihajontaan  $\sigma_{\text{mitta}}$ , yksikkönä ( $\mu\text{m}$ ). Materiaali Cycology ABS+PC 1 mm, JAI CV-A1 kamera ja mittaustoistoja  $n = 33$ .

tulokset. Edullisimman tapauksessa kappale täytti vain osan kuva-alasta, kun linssin minimikuvausetäisyys oli liian suuri optimaalisemman kuvausjärjestelyn aikaansaamiseen.

Kamera	Linssi	$\sigma_{\text{Width1}}$	$\sigma_{\text{Width2}}$	$\sigma_{\text{WidthC}}$	$\sigma_{\text{LengthL}}$	$\sigma_{\text{LengthR}}$
JAI CV-A1	Tamron 25 mm	1.13	1.41	2.75	2.98	2.01
Rainbow CL4624	Rainbow Zoom	4.99	5.83	4.49	6.69	8.95

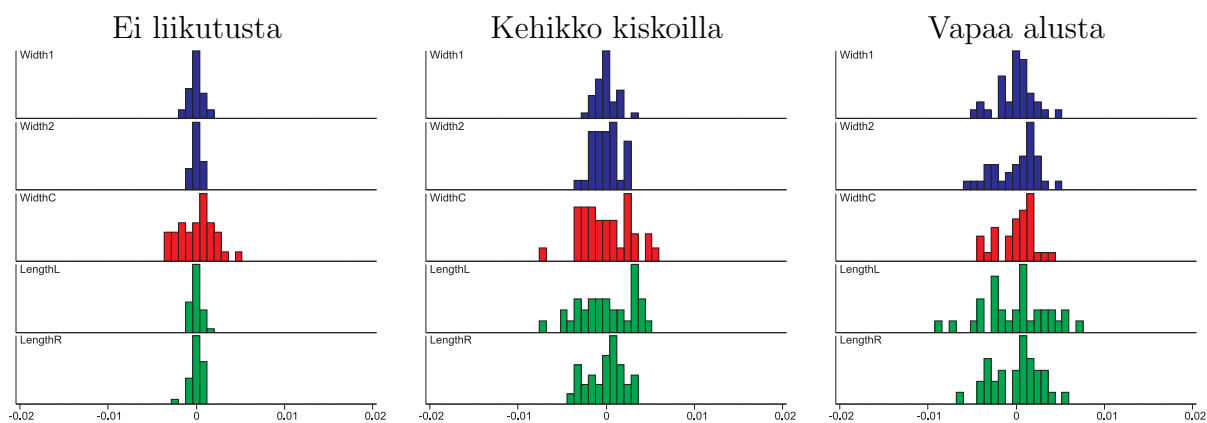
Taulukko 11: Laitteiston hinnan vaikutus keskihajontaan  $\sigma_{\text{mitta}}$ , yksikkönä ( $\mu\text{m}$ ). Materiaali Cycology ABS+PC 1 mm ja mittaustoistoja  $n = 33$ .



Kuva 19: Laitteiston hinnan vaikutus hajontaan, viisi mittausta,  $n = 33$ , eroina (mm) keskiarvoista.

### 3.2.2 Kuvausjärjestelyn vaikutus hajontaan

Kuvausjärjestelyllä voi olla merkittävä vaikutus hajontaan, jos kuvausalustan geometria ei ole kunnossa tai mittausmenetelmä ei siedä esim. kappaleen kiertoa tms. Tässä testissä sama kappale mitattiin 33 kertaa kolmella eri tavalla: pitämällä kappale paikallaan ja toistamalla kuvausta/mittausta, käyttämällä tavallista kuvausratkaisua, jossa kappale kuvataan kehikossa, sekä kuvaamalla/mittaamalla kappaletta sijoitettuna vapaasti alustalle (kappale saattoi liikkua noin  $\pm 2\text{mm}$  ja kiertyä noin  $\pm 20^\circ$  vapaasti kuva-alan sisällä). Kuva 20 ja taulukko 12 sisältävät tämän testin keskihajonnan tulokset. Kuvausalustan pysyvyydellä on siis merkitystä hajontaan, mutta jopa vapaata alustaa käytettäessä keskihajonnan arvot pysyvät kohtuullisina.



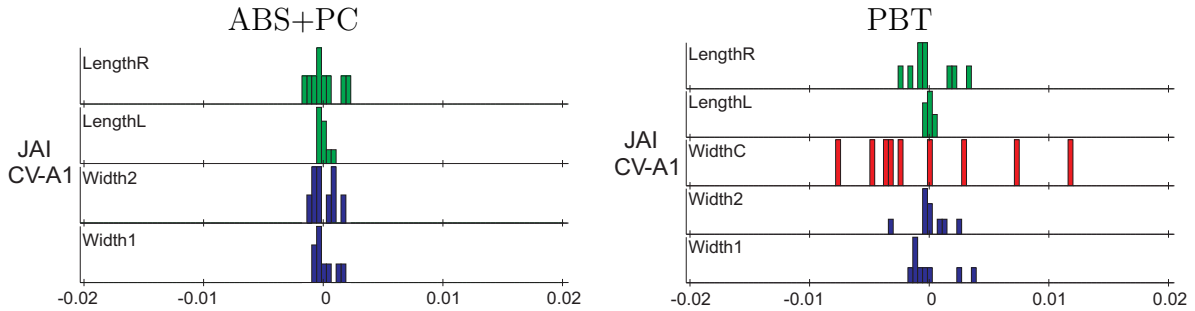
Kuva 20: Kuvausjärjestelyn vaikutus hajontaan, viisi mittausta,  $n = 33$ , eroina (mm) keskiarvoista.

Mittaustapa	$\sigma_{\text{Width1}}$	$\sigma_{\text{Width2}}$	$\sigma_{\text{WidthC}}$	$\sigma_{\text{LengthL}}$	$\sigma_{\text{LengthR}}$
Ei liikutusta	0.66	0.42	1.95	0.60	0.69
Kehikko	1.13	1.41	2.75	2.98	2.01
Vapaa alusta	2.00	2.43	2.06	3.68	2.69

Taulukko 12: Kuvausjärjestelyn vaikutus keskihajontaan  $\sigma_{\text{mitta}}$ , yksikkönä ( $\mu\text{m}$ ). Materiaali Cycology ABS+PC 1 mm, käytössä paras laitteisto ja mittaustoistoja  $n = 33$ .

### 3.2.3 Materiaalin vaikutus tuloksiin

Kappaleen valmistusmateriaalin vaikutusta tutkittiin kahdessa testissä. Ensin tehtiin pieni testi, missä kappaletta ei otettu pois kuvauskelkasta, parhaalla laitteistolla kahdelle materiaalille: ABS+PC ja PBT, jossa toistojen lukumäärä oli yhdeksän. Tämän testin tulokset on esitetty kuvassa 21 ja taulukossa 13.



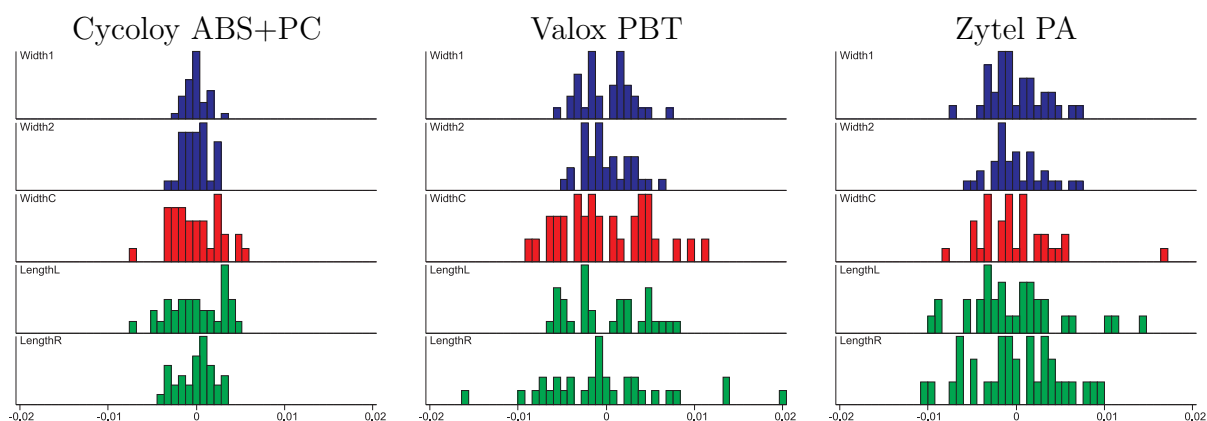
Kuva 21: Materiaalin vaikutus hajontaan, neljä/viisi mittausta,  $n = 9$ , luvut eroja (mm) keskiarvoista.

Materiaali	$\sigma_{\text{Width1}}$	$\sigma_{\text{Width2}}$	$\sigma_{\text{WidthC}}$	$\sigma_{\text{LengthL}}$	$\sigma_{\text{LengthR}}$
ABS+PC	0.81	0.86	n/a	0.44	1.19
PBT	1.84	1.51	6.06	0.35	1.85

Taulukko 13: Materiaalin/värin vaikutus keskihajontaan  $\sigma_{\text{mitta}}$ , yksikkönä ( $\mu\text{m}$ ). Käytössä paras laitteisto ja mittaustoistoja  $n = 33$ .

Myöhemmin materiaalin ja värin vaikutusta tutkittiin huolellisemmalla koejärjestelyllä. Testauksessa oli käytössä paras laitteisto (JAI CV-A1 kamera ja Tamron 25 mm HP - linssi) ja mittaustoistoja tehtiin 33. Materiaaleina olivat ABS+PC, PBT ja PA66. Tulokset löytyvät kuvasta 22 ja taulukosta 14.

Kappaleen värillä näyttää olevan vaikutusta tuloksiin. ABS+PC-materiaalilla saatiin parhaat tulokset todennäköisesti siksi, että kuvausolosuhteet saatiin sen kanssa parhaimmiksi. Kappale saatiin hyvin erottumaan mustasta taustasta, kohina saatiin pieneksi ja yli-


 Kuva 22: Materiaalin vaikutus hajontaan, viisi mitta,  $n = 33$ , eroina (mm) keskiarvoista.

Materiaali	Väri	$\sigma_{\text{Width1}}$	$\sigma_{\text{Width2}}$	$\sigma_{\text{WidthC}}$	$\sigma_{\text{LengthL}}$	$\sigma_{\text{LengthR}}$
Cycloy ABS+PC	Vaaleansininen	1.13	1.41	2.75	2.98	2.01
Valox PBT	Tummanharmaa	2.87	2.68	5.00	4.25	7.43
Zytel PA66	Läpinäkyvä	3.08	2.93	4.32	5.34	5.03

 Taulukko 14: Materiaalin/värin vaikutus keskihajontaan  $\sigma_{\text{mitta}}$ , yksikkönä ( $\mu\text{m}$ ). Käytössä paras laitteisto ja mittaustoistoja  $n = 33$ .

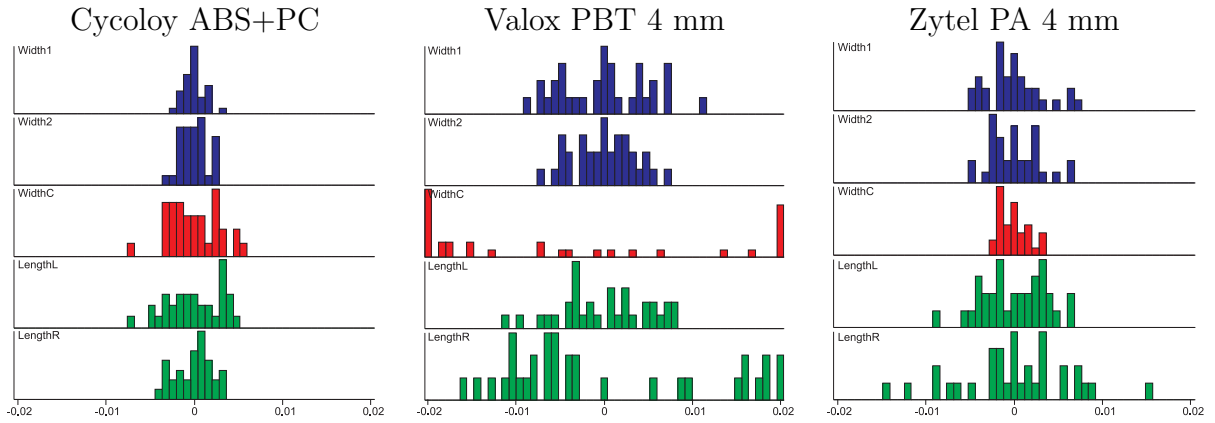
tai alivalotusta ei tarvittu. Tumma PBT-materiaali oli ongelmallinen lähinnä siksi, että pohjan reikien näkymisen varmistamiseksi jouduttiin käyttämään alustan läpi tehtävää valaisua. Sitä varten ei ollut (kuvaushetkellä) käytettävissä LED-valoa ja täten ainakin valojen lievä välkkyminen tuotti vaihtelua kuvien valaistusolosuhteisiin.

Osittain läpinäkyvä PA66-materiaali kuvattiin hyvällä valaistusjärjestelyllä mustaa taustaa käyttäen, mutta sen pohjan reiät eivät olisi tulleet kunnolla näkyviin ilman lievää yli-valottamista. Reunojen mittaamisen luotettavuuden parantamiseksi ylivalotusta ei voinut kuitenkaan tehdä liikaa, jolloin reikien reunojen havainnointi jäi vajavaiseksi.

### 3.2.4 Paksuseinämäiset kappaleet

Etumuottia vaihtamalla päästiin tuottamaan seinämävahvuudeltaan 4 mm kappaleita. Näitä tuotettiin vain PBT- ja PA66-materiaaleista, joten siksi vertailussa ei ole mukana ABS+PC:n 4 mm kappaleita. Vertailukohtana käytetään sen vuoksi 1 mm ABS+PC-kappaletta, jolla saavutettiin parhaat hajontatulokset.

Paksujen kappaleiden välttävät tulokset johtuvat sekä siitä, että pohjan reiät eivät olleet läpireikiä vaan syvennyksiä, että siitä, että parasta mahdollista valaistus- ja kuvausjärjestelyä ei saatu niiden kohdalla toteutettua. PBT:n leveysmitan heikko tulos johtuu siitä,



Kuva 23: Seinämävahvuuden vaikutus hajontaan, viisi mittaa,  $n = 33$ , eroina (mm) keskiarvoista.

Materiaali	Seinäämä	$\sigma_{\text{Width1}}$	$\sigma_{\text{Width2}}$	$\sigma_{\text{WidthC}}$	$\sigma_{\text{LengthL}}$	$\sigma_{\text{LengthR}}$
Cycoloy ABS+PC	1 mm	1.13	1.41	2.75	2.98	2.01
Valox PBT	4 mm	4.88	3.54	30.63	5.11	11.72
Zytel PA66	4 mm	3.06	2.72	1.57	3.58	6.08

Taulukko 15: Materiaalin vaikutus keskihajontaan  $\sigma_{\text{mitta}}$ , kun kappaleet ovat seinämävahvuudeltaan 4mm, yksikkönä ( $\mu\text{m}$ ). Käytössä paras laitteisto ja mittaustoistoja  $n = 33$ .

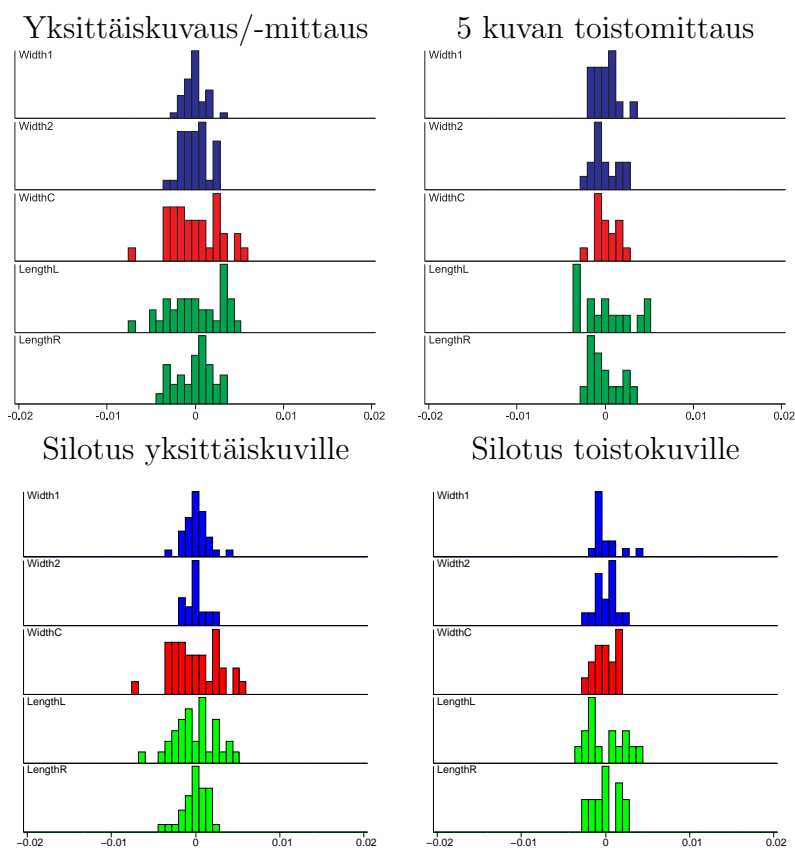
että tausta oli pakko laittaa mustaksi kuvan ylivalotuksen välttämiseksi ja silloin kappaleen reunaa ei voitu havaita kunnolla.

### 3.2.5 Menetelmäkehityksen vaikutus hajontaan

Vaikka yksittäiskuvauksella ja -mittauksella oli saatu kohtalaisen hyviä hajontatuloksia, haluttiin menetelmää edelleen kehittää, jotta kuvissa olevan kohinan vaikutus minimoituisi. Kohinan vaikutusta tuloksiin voidaan vähentää käyttämällä kuvaus- ja mittaussuunnitelmaa toistuvasti samalle kappaleelle. Kappaleesta siis otetaan viisi kuvaa ja lasketaan niistä kaikista halutut mitat. Tällöin saadaan viidet mitta-arvot, joista poimitaan mittakohtaiset mediaanit lopullisiksi mittaustuloksiksi. Tulokset ovat hieman parempia toistomittaukselle (katso kuva 24 ja taulukko 16).

Kohinan vaikutuksen minimoimiseksi kokeiltiin myös toista tapaa, jossa ennen kohteiden tarkennettua hakua kuvalle (yksittäiselle tai toistokuvauksen kaikille kuville) tehtiin Gaussinen silotus, jolloin pikselikohinan määrä kuvassa vähenee. Taulukon 16 perusteella kuvan silotuksesta on useimpien mittojen osalta hyötyä yksittäiskuvausta käytettäessä. Toistokuvauksen yhteydessäkin kokonaistulos paranee jonkin verran.





Kuva 24: Menetelmän vaikutus hajontaan: yksittäismittaus vs. toistomittaus ja Gaussisen silotuksen vaikutus, viisi mittausta, yksittäismittauksissa  $n = 33$  ja toistoissa  $n = 15$ .

Menetelmä	$\sigma_{\text{Width1}}$	$\sigma_{\text{Width2}}$	$\sigma_{\text{WidthC}}$	$\sigma_{\text{LengthL}}$	$\sigma_{\text{LengthR}}$
Normaali kuvaus ( $n=33$ )	1.13	1.41	2.75	2.98	2.01
5 kuvan mittojen mediaani ( $n=15$ )	1.29	1.41	1.29	2.87	1.68
Yksittäiskuvan silotus ( $n=33$ )	1.27	1.23	2.75	2.43	1.39
Toistokuvien sil. + med. ( $n=15$ )	1.42	1.38	1.29	2.27	1.54

Taulukko 16: Toistokuvauksen hajonta yksittäiskuvaukseen verrattuna ja Gaussisen silotuksen vaikutus hajontaan  $\sigma_{\text{mitta}}$ , yksikkönä  $\mu\text{m}$ . Materiaalina oli ABS+PC, 1 mm seinä-mävahvuus ja käytössä paras laitteisto (JAI CV-A1 kamera + 25 mm HP linssi).

Haittana näissä parannetuissa menetelmissä on mittauksen suoritusajan kasvaminen. Usean kuvan otto vie enemmän aikaa kuin yhden ja kohteiden haku useasta kuvasta moninkertaistaa hakuajan. Myös Gaussisen silotuksen suoritus aika voi olla pitkä, jos kameran saattavat kuvat ovat suuria. Pelkän mittauksen suoritusajat eri menetelmille olivat testikappaleen tapauksessa suunnilleen (AMD Athlon XP 2.2 GHz): yksittäiskuva 5.5 s, toistokuvauksen 5 kuvaa 7.7 s, yksittäismittaus (ylimääräisellä) Gaussisella silotuksella 10

s ja toistomittaus ylimääräisillä Gaussisilla silotuksilla yli 30 s, kun koko kuvalle tehtiin silotus.

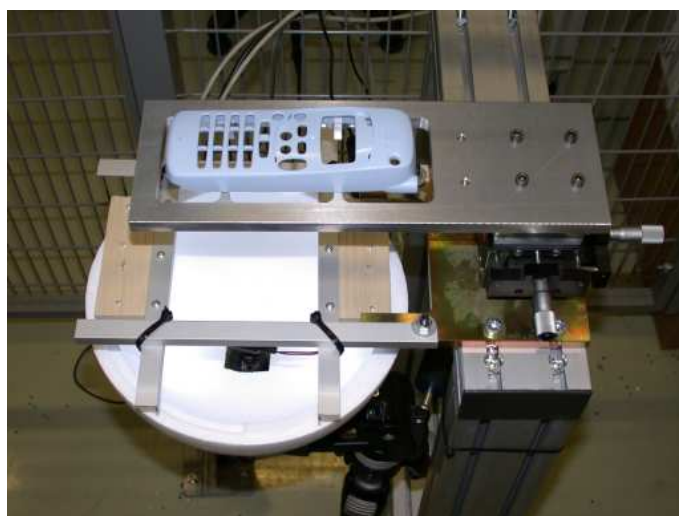
Jos kohteiden hakua ja kuvan silotusta tehtäisiin vain kohdepisteiden ympäristöissä eli käytettäisiin aluerajauksia kohteiden oletetun sijainnin mukaan, mittausaika putoaisi kaikilla menetelmillä alle viiteen sekuntiin. Toistomittauskin on täten riittävän nopea tuotantolinjalle laitettavaksi, sillä kuvaus vie noin sekunnin ja mittojen laskenta vain muutamia sekunteja riippuen lähinnä kohdemäärittelyistä. Teollisuusympäristön syys- ja marraskuun koeajot mitattiin toistomittausta käyttäen.

## 4 Teollisuudessa tehtyjen koeajojen tulokset

Tässä luvussa esitetään touko-, syys- ja marraskuussa 2004 Perlos Oyj:n Ylöjärven tehtaalla suoritettujen kolmessa vaiheessa tehtyjen testiajojen tulokset. Muovimateriaalina kaikissa ajoissa käytettiin ABS+PC:tä, eli tarkemmin GE Cycloy C1000 HF -raakaainetta. Ruiskuvalukoneen ohjauksesta vastasi Perlos Oyj:n Mikko Silvennoinen, CQC-järjestelmän käytöstä TTY:n Timo Latvakangas ja JyY:n mittausjärjestelmän asennuksesta ja käytöstä Anssi Lensu.

### 4.1 Mittausjärjestelmän toimivuus teollisuusympäristössä

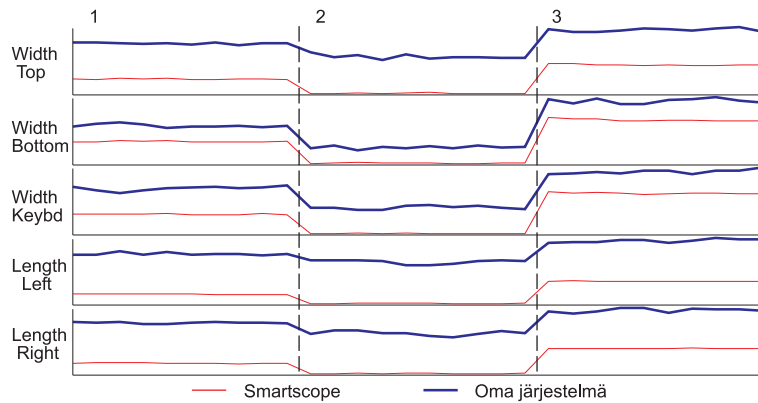
Ensimmäisessä testiajossa tavoitteena oli tutkia konenäköön perustuvan mittausjärjestelmän tulosten vaihtelun suuruutta tutkittaessa viittä mitta (katso kuva 4). Koeajossa käytettiin ruiskuvalukoneen lisäksi teollisuusrobotia ja PC-tietokonetta, joka otti järjestelmän käyttäjän ohjauksessa kuvia kappaleista ja laski niistä määritellyt mitat. Testiajojen käytännön kuvausalueista on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25: Kuvausalueista, johon teollisuusroboti on tuonut kappaleen kuvattavaksi. Koneenäkökamera on valkoisen styrox-muovisen kuvun alapuolella ja ottaa kuvia kuvun läpi. Kuvat vastaanottava tietokone on verkkoaidan ulkopuolella.

Konetta ajettiin kolmella eri jälkipaineen arvolla, 800 – 600 – 1000 (tavoitteena oli saada aikaan erikokoisia kappaleita) kuvaten kappaleet heti niiden tultua ulos muotista. Tuotetut kappaleet mitattiin myös Perlos Oyj:n optisella Smartscope-mittauskoneella niiden jäähtymisen jälkeen ja tutkittiin oman konenäkömittauksen ja mittauskoneen antamien mittaustulosten välisiä eroja. Mittaustulosten kuvaajat on esitetty kuvassa 26.

Mittojen välillä on kappaleiden jäähtymisen aiheuttamasta kutistumasta johtuva mittaero



Kuva 26: Teollisuusympäristön ensimmäisen koeajon mittaustulosten kuvaajat. Omalla järjestelmällä kappaleet on mitattu kuumana, joten siksi ero jäähtyneenä mitattuihin vertailutuloksiin on suuri.

eli harha (*bias*), joka oli kullekin mitalle koko testin (3 ajoa  $\times$  10 kpl/ajo) yli tarkasteltuna suuruudeltaan samankaltainen. Harha on erilainen eri mitoille, mikä johtunee ainakin osittain siitä, että kutistumista ei tapahdu aivan samalla tavalla eri kohdissa kappaletta. Lisäksi osa mitoista on virtaussuunnassa ja osa sitä vastaan kohtisuoraan.

Taulukossa 17 on esitetty mittojen ja harhojen mediaanit (eli järjestyksessä keskimmäiset arvot) eri asetusparametreilla tehdyn kolmen ajon yli, joista näkee kunkin mitan ja vastaavan harhan suuruusluokan. Taulukon rivillä “erojen vaihtelu” esitetään harhan osalta korjattujen mittojen hajonta. Kyseessä ei ole toistokokeen keskihajontaa vastaava luku, koska tässä mitattava kappale vaihtuu. Tämä luku edustaa tuotannon ja mittausvirheen yhteistä hajontaa kiinteillä asetusarvoilla.

Suure	Width Top	Width Bot	Width Kbd	Length L	Length R
Mitan mediaani	35.136	43.211	43.868	51.394	51.392
Harhan mediaani	0.0755	0.0393	0.0458	0.1249	0.1174
Erojen vaihtelu	0.0046	0.0042	0.0042	0.0056	0.0058

Taulukko 17: Testiajon mittojen mediaaniarvot, systemaattiset virheet eli harhat ja harhan osalta korjattujen mittojen hajonnat. Yksikkönä taulukossa on mm.

## 4.2 Konenäkömittauksen tarkkuus ja mittojen ennustus

Toisen koeajon tarkoituksena oli tutkia konenäkömittausjärjestelmän tulosten hajonnan suuruutta, jäähtyneiden kappaleiden mittojen ennustamista kuumana mitattujen arvojen perusteella sekä asetusarvoihin perustuvien laadun ennustusmallien hyvyttä. Ensimmäisen koeajon laitteistoa täydennettiin CQC-tiedonkeruujärjestelmällä, FLIR Flexcam

-lämpökameralla sekä robotin ja PC:n välisellä ohjauskytkennällä. Mittauksessa käytettiin CQC-järjestelmää muottianturitietojen keräämiseen, ja lämpökameraa kappaleiden keskimääräisen lämpötilan selvittämiseen välittömästi ennen mittauskuvausta (katso kuva 3). Robotin ja PC:n välisen ohjauskytkennän avulla järjestelmä käynnisti kuvan oton, kun kappale oli valmiina lämpö- ja mittauskuvauksipaikoilla.

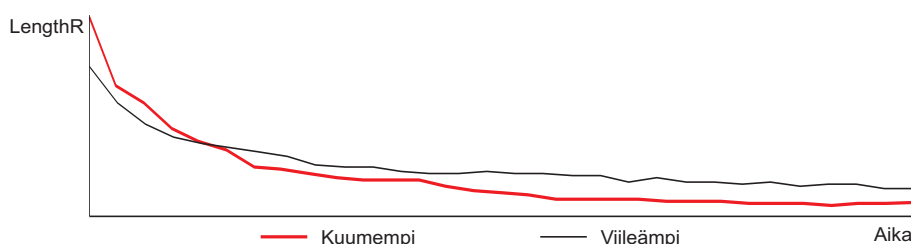
Ennen toistokokeen suorittamista jätettiin asetusarvoilla sula 280°C, muotti 70°C ja jälkipaine 800 bar, tuotettu kappale jäähtymään kuvauspaikalle yön ajaksi, jottei kutistuminen vaikuttaisi tulokseen. Seuraavana päivänä robotti toisti ketjua: otetaan kappale pois kuvauspaikalta, viedään se siihen takaisin ja otetaan kuvat. Toistokokeen tulos eli keskihajonnan määrä on mittakohtaisesti eriteltyä esitetty taulukossa 18. Nämä hajonnat edustavat konenäkömittauksen tarkkuutta teollisuusolosuhteissa.

Suure	Width Top	Width Bot	Width Kbd	Length L	Length R
Keskihajonta	0.0031	0.0026	0.0037	0.0026	0.0028

Taulukko 18: Testiajon toistokokeen ( $n = 11$ ) mittojen keskihajonnat. Tulos on saatu toistomittausta käyttäen ja yksikkönä taulukossa on mm.

#### 4.2.1 Jäähtymisestä johtuva kutistuminen

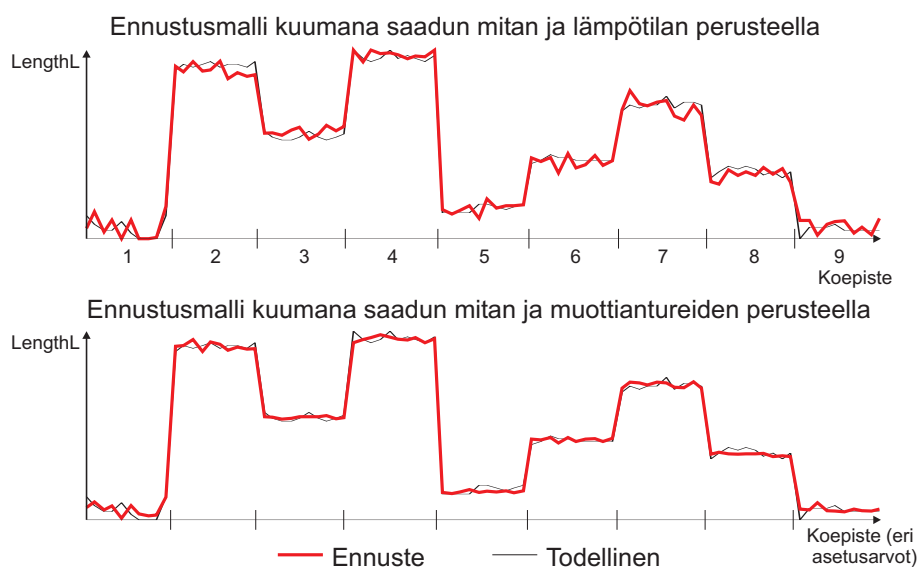
Jäähtymisen aiheuttaman kutistuman määrittämiseksi tuotettiin kappaleita kolmella eri asetusarvohdistelmällä siten, että mittaushetken lämpötila muuttui, esimerkiksi jäähtymisajan seurauksena. Kunkin arvohdistelmän kohdalla otettiin yksi kappale tarkkailuun, jossa se mitattiin 10 minuutin aikajakson sisällä 20 sekunnin välein. Jäähtymisen aikana tapahtuvaa mittojen muutosta havainnollistaa kuva 27, josta nähdään miten alunperin lämpimämpi kappale kutistuu jäähtyessään enemmän. Testeistä voitiin kuitenkin havaita, että alkulämpötilan lisäksi kutistuman määrään vaikuttaa muitakin tekijöitä.



Kuva 27: Yksittäisen mitan muuttuminen kappaleen jäähtymisen aikana. Aika-akselin pituus on 10 minuuttia. Muotista ulos tullessaan lämpimämpi kappale jäähtyy selkeästi enemmän.

Selvimmän tuloksista käy ilmi, että lyhyt jäähtymisaika lisää kutistumista ja korkea jälkipaine hieman vähentää sen määrää. Siksi pelkkä lämpökamerakuvasta laskettu lämpötila

tai muotin lämpötila-anturin lukuarvo ei riitä ennustamaan kutistuman määrää. Muotin paine- ja lämpötila-antureiden perusteella muodostettu tilastollinen malli toimii jo paremmin (katso kuva 28). Testissä lisäksi todettiin, että suurin osa kutistumisesta tapahtuu 10 minuutin kuluessa (katso taulukko 19).



Kuva 28: Esimerkki kutistumien ennustamisesta yhdeksän erilaisen asetusravokombinaation funktiona seuraavan aliluvun koeajodatan perusteella. Jäähtyneen kappaleen mittaa LengthL on yritetty ennustaa pelkän lämpötilan (yllä) ja muutaman valitun muottianturiarvon perusteella (alla).

Aika	Width Top	Width Bottom	Width kbd	Length R	Length L
0 min	35.147	43.251	43.938	51.485	51.485
1 min	35.065	43.160	43.822	51.366	51.351
2 min	35.037	43.139	43.794	51.312	51.295
3 min	35.028	43.132	43.768	51.281	51.266
4 min	35.028	43.127	43.760	51.263	51.262
5 min	35.018	43.125	43.760	51.260	51.252
6 min	35.014	43.125	43.760	51.259	51.249
7 min	35.012	43.124	43.758	51.253	51.244
8 min	35.010	43.122	43.750	51.254	51.244
9 min	35.008	43.121	43.754	51.250	51.241
>16 h	35.017	43.127	43.757	51.251	51.236

Taulukko 19: Mittojen muuttuminen kappaleen jäähtyessä. Samaa kappaletta on seurattu ensin 10 minuuttia mitaten 20 sekunnin välein (taulukossa arvot vain minuutin välein) ja viimeinen mittausta tehtiin seuraavana aamuna.

### 4.2.2 Mittojen ennustaminen tilastollisella mallilla

Laadun ennustusmallin taustalla on koesuunnitelma (katso taulukko 20). Tämän mukainen ajo suoritetaan ruiskuvalukoneella keräten tiedot sekä prosessin tilasta että tuotettujen kappaleiden laadusta. Koeajodatan perusteella voidaan muodostaa tilastollisia malleja, jotka kuvaavat mittojen riippuvuutta koneen asetusarvoista, eli  $L = f(A)$ . Näitä malleja voidaan myös käyttää parhaiden asetusarvojen valintaan.

Ryhmä	Muotin lämpötila	Sulan lämpötila	Jälkipaine
1	50	255	400
2	50	265	800
3	50	275	600
4	60	275	800
5	60	265	400
6	60	255	600
7	70	255	800
8	70	265	600
9	70	275	400

Taulukko 20: Mittojen ennustuskokeen koesuunnitelma, joka suoritettiin 3.9. Kaikki muut asetusparametrit pidettiin vakioina, ja kullakin asetuksilla kappaleita tuotettiin 10 kpl.

Ennustusmallien hyvyyden testaamiseksi tehtiin pieni 10 kappaleen tuotantoajo koetaulukon ulkopuolisessa pisteessä 67°C, 274°C ja 798 bar. Näin voitiin testata mallin kykyä ennustaa uusia, ennen kokemattomia tilanteita koeajodatan perusteella. Malleja muodostettiin useita, sekä regressio- että MLP-neuroverkkomalleja. Kaikki mallit antoivat kohetuullisen samankaltaisia ennusteita. Alkuvaiheessa mallinnus tehtiin välittömästi koeajon suorituksen jälkeen, jolloin sekä koeajo- että tuotantokappaleet mitattiin ennen jäähtymistä. Tulokset, jotka perustuvat 2. asteen regressiomalliin on esitetty taulukossa 21. Taulukosta käy ilmi, että ainakin tässä tapauksessa konenäköjärjestelmän, koesuunnittelun ja mallinnuksen käyttö online-olosuhteissa osoittautui riittävän luotettavaksi.

Edellä kuvattu koe on askel kohti toimivaa online-laadunohjausjärjestelmää. Lopullinen tavoite on optimoida tuotanto siten, että prosessi tuottaisi kappaleita, joilla on halutut mitat jäähtymisen jälkeen. Tätä lähestyttiin seuraavasti. Koeajon ja tuotantoajon jäähtyneet kappaleet mitattiin riittävän pitkän ajan kuluttua Perloksen Smartscope-mittauskoneella. Näin voitiin mittojen ennustusmalli tehdä myös jäähtyneiden kappaleiden mittojen puolella. Eli jäähtyneiden koeajokappaleiden mittojen perusteella tehdyn mallin avulla ennustettiin tuotantopisteen jäähtyneinä saatuja mittaustuloksia. Taulukossa 22 on kolmen mallin ennusteet mitoille ja todellisen tuotannon ( $n = 10$ ) keskiarvot. Jälleen voidaan järjestelmän ennustuskykyä pitää riittävän hyvänä.

Seuraavassa vaiheessa kokeiltiin mallinnusta ennen jäähtymistä soveltaen edellisessä alilu-

Mitta	Ennuste	Tuotannon ka
Width Top	35.142	35.1413
Width Bot	43.252	43.2521
Width Kbd	43.926	43.9254
Length L	51.468	51.4706
Length R	51.472	51.4749

Taulukko 21: Testiajon ennustustuloksen vertaus tuotantoajoon. Ennuste-sarakkeessa on regressiomallista saadut mitat koeajoon kuulumattomalle pisteelle ja Tuotannon ka kertoo tuotantoajon ( $n = 10$ ) mittojen keskiarvot. Yksikkönä taulukossa on mm.

Mitta	Mallien ennusteet			Tuotannon ka
	Regressio1	Regressio2	MLP-verkko	
Width Top	35.048	35.051	35.050	35.042
Width Bot	43.149	43.143	43.160	43.145
Width Kbd	43.801	43.798	43.805	43.799
Length L	51.248	51.247	51.252	51.250
Length R	51.273	51.272	51.276	51.274

Taulukko 22: Jäähtyneen kappaleen mittojen ennustaminen jäähtyneenä mitatun koeajon kappaleiden avulla. Regressio1 on yksinkertainen regressiomalli, jossa on vain ensimmäisen asteen termit mukana. Regressio2 on toisen asteen regressiomalli, jossa on tavallisten 1. asteen termien lisäksi ristitermit ja neliötermit. MLP-verkko tarkoittaa täysin kytkettyä MLP-neuroverkkoa, jossa on yksi 3 neuronin piilokerros. Yksikkönä taulukossa on mm.

vussa esitettyä mittojen korjausmallia. Korjausmallissa siis ennustetaan jäähtyneen kappaleen mittoja kuuman kappaleen mittojen ja muiden prosessitietojen perusteella. Tuotantoajon kohdalla CQC-anturitietojen keräys epäonnistui, joten taulukon 23 mittakohteisissa ennustummalleissa on käytetty kuuman kappaleen vastaavaa mittaa, mittaustilaa ja tuotannon asetusarvoja. Tämä malli on tähän mennessä esitetyistä realistisin käytännön online-mittauksen ja laadunennustuksen näkökulmasta. Myös tässä tilanteessa tuloksia voidaan pitää riittävän hyvinä. Ilmeisesti CQC-anturitietoihin perustuvalla mallilla olisi saatu vielä luotettavampi ennuste.

### 4.3 Datan keruu koneen asetusarvojen muutoksen aikana

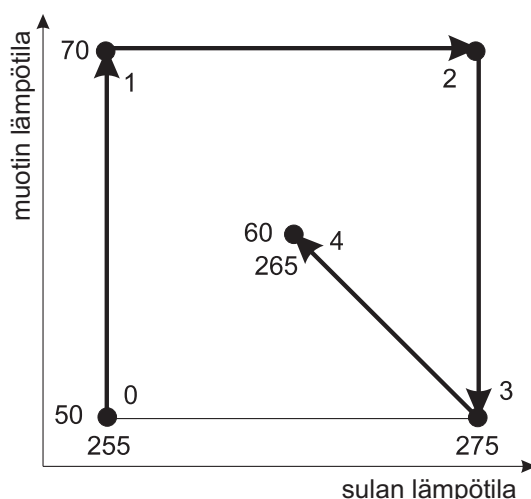
Syyskuun 6. päivänä tehdyssä koeajossa oli tarkoitus tutkia, saadaanko koneelta ja kappaleista käyttökelpoista dataa nopeasti asetusarvojen muuttamisen jälkeen, ennen kuin lämpötilat ja muut hitaat asetukset stabiloituvat. Tätä tarkoitusta varten tehtiin 15 pisteen koeajo neljällä muuttujalla: muotin lämpötila ja sulan lämpötila kuvan 29 mukaisesti (viisi lämpötilojen kombinaatiota), jälkipainetasoja ajettiin kussakin lämpötilakombinaa-



Mitta	Ennuste	Tuotannon ka
Width Top	35.033	35.042
Width Bot	43.144	43.145
Width Kbd	43.803	43.799
Length L	51.246	51.250
Length R	51.270	51.274

Taulukko 23: Testiajon kokonaistulos. Ennuste-sarakkeessa on kuumien kappaleiden mitaustulosten perusteella muodostetun mallin ja mittojen korjausmallin avulla tehty ennuste jäähtyneen kappaleen mitoille tuotantopisteessä. Tuotannon ka sisältää tuotantoajan ( $n = 10$ ) mittojen keskiarvot. Yksikkönä taulukossa on mm.

tiossa kolme ja jäähtymisaikaa vaihdeltiin muista laskettuna kahdella tasolla.

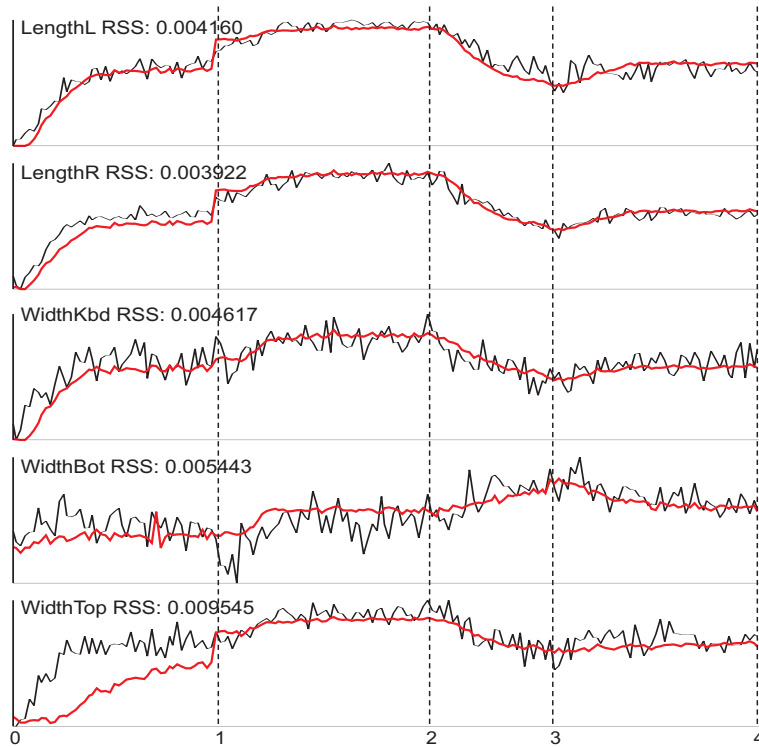


Kuva 29: Ajosuunnitelma datan keruuteistiin 6.9., jossa tutkittiin tiedon keräämistä koneen asetusarvojen muutoksen aikana. Sulan ja muotin lämpötiloja muutettiin tämän kuvan mukaisesti ja jokaisessa pisteessä 0, 1, ..., 4 muutettiin jälkipainetta kolmeen eri tasoon ja jäähtymisaikaa testattiin kahdella tasolla muista laskettuna.

Asetusarvopisteiden lisäksi tietoa kerättiin sulan ja muotin lämpötilojen tasoittumisen aikana sekä tuotetuista kappaleista (kuuman kappaleen mitat konenäöllä) että prosessista (koneen tilatiedot ja muottianturitiedot CQC:llä). Tavoitteena oli tutkia, voidaanko muutosten aikana tuotettujen kappaleiden tietoja hyödyntää myöhemmin esimerkiksi koesuunnittelussa.

Kun kaikki tiedot oli kerätty, muutosajojen datan laatua tutkittiin mallinnuksen avulla. Ideana oli selvittää, voidaanko muottisensoreilla tässä tilanteessa ennustaa laatua. Toisaalta tehtävänä on myös selvittää, voiko muottisensorien avulla ennustetulle laadulle määrätä sopivat asetusarvot esimerkiksi tekemällä käännteinen malli sensoritiedosta ase-

tusarvoihin. Mikäli tämä onnistuisi, voitaisiin koeajoja nopeuttaa huomattavasti, sillä suurin osa ajasta kuluu koneen asetusten, esimerkiksi muotin lämpötilan, stabiloitumiseen. Kuvassa 30 esitetään asetusarvojen muutosajojen aikana tuotettujen kappaleiden todelliset mitat ja muottiantureiden tunnuslukuihin perustuvien mallien ennusteet.



Kuva 30: Asetusarvojen muutosajojen aikana tuotettujen kappaleiden mittojen ennustuksen hyvyys. Ohut musta viiva osoittaa todelliset mitat ja paksu viiva mittakohtaisten mallien antamat ennusteet. Katkoviivat osoittavat kiintopisteiden paikat eli erillisiä muutosajoja oli kaikkiaan neljä kappaletta. RSS ilmaisee virheiden neliöiden summan.

Muuten mittojen ennustus näyttää toimivan kohtuullisesti, mutta WidthTopin ensimmäisen muutosajon ennustus näyttää toimivan väärällä tavalla. Hyvää selitystä tälle puutteelle ei keksitty, vaan todettiin, että tällaista datankeruumahdollisuutta tulisi tutkia myöhemmin uudestaan huolellisemmalla ja käytännönläheisemmällä testillä. Samasta syystä muottisensorien ja asetusten välistä yhteyttä ei nähty tarpeelliseksi selvittää tässä yhteydessä.

#### 4.4 Tuotantoajon toisto ja kuivaamattoman materiaalin vaikutus

Marraskuun testiajon yhteydessä uusittiin edellisessä kappaleessa esitetty syyskuun testiajon tuotantoajo siten, että kappaleita tuotettiin 50 kpl. Koneen asetukset olivat siis:

muotti 67°C, sula 274°C ja jälkipaine 798 bar. Tarkoituksena oli verrata jäähtyneiden kappaleiden mittaustuloksia ja katsoa, onko niissä eroa, kun kone käynnistetään pidemmän tauon jälkeen. Uuden ajon näytteeksi otettiin kaksi kappaletta. Ulkoiset olosuhteet olivat ajojen välillä muuttuneet oleellisesti: syyskuussa oli kosteahko syysilma ja marraskuussa muutama aste pakkasta. Taulukko 24 esittää kappaleiden mittojen keskiarvoja.

Mitta	Tuotannon ka	
	Syyskuu	Marraskuu
Width Top	35.042	35.044
Width Bot	43.145	43.149
Width Kbd	43.799	43.803
Length L	51.250	51.251
Length R	51.274	51.270

Taulukko 24: Tuotantoajon mittojen vertaus, syyskuu vs. marraskuu. Yksikkönä taulukossa on mm.

Samalla haluttiin myös katsoa, vaikuttaako kuivaamattoman materiaalin käyttö jotenkin mittaustuloksiin ja tuotantoajoa tehtiin 20 kappaletta siten, että koneelle menevän materiaalin joukkoon laitettiin suunnilleen puolet kuivaamatonta ja puolet kuivattua ABS+PC-seosta. Taulukko 25 esittää kappaleiden mittojen keskiarvot.

Mitta	Otoksen ka	
	Kuivattu	Osittain kuivaamaton
Width Top	35.044	35.037
Width Bot	43.149	43.140
Width Kbd	43.803	43.796
Length L	51.251	51.248
Length R	51.270	51.268

Taulukko 25: Osittain kuivaamattoman materiaalin vaikutus mittoihin. Molemmissa tapauksissa otoksena on 2 kpl isosta sarjasta. Yksikkönä taulukossa on mm.

Muutoksia on nähtävissä, mutta ne eivät ole hälyttävän suuria. Pakkaskelillä osa mittoista oli muutaman mikrometrin suurempia ja yksi oli pienempikin, mikä johtunee pienestä otoksesta, tuotettujen kappaleiden vaihtelusta tai mittaustulosten luonnollisesta vaihtelusta. Osittain kuivaamattoman materiaalinkin vaikutus mittoihin oli pieni: kappaleista tuli muutaman mikrometrin pienempiä.

## 4.5 Uudet adaptiiviset koesuunnittelustrategiat

Adaptiivisen koeajostrategian tavoitteena on korvata perinteinen kaksivaiheinen koesuunnittelu, jossa ensin laaditaan koeajotaulukko ja sitten suoritetaan kokeet ennalta määrättyllä tavalla, vaiheittain tarkentuvalla koeajostrategialla. Perusajatuksena on, että jokainen koe tehdään aiemmin kerätyn tiedon pohjalta.

Adaptiivisten strategioiden käytännön testiajossa pyrittiin hakemaan ruiskuvalukoneen optimaaliset ajoarvot neljälle parametrille: sulan lämpötila, muotin lämpötila, jäähdytysaika ja jälkipaine. Parametrien käyttäytymisestä tiedetään ennakkoon raja-arvot (maksimaalinen sallittu prosessi-ikkuna) sekä se, mitä muutaman pisteen alustavalla kokeella saadaan selville. Lopullinen koejärjestely jää adaptiivisen algoritmin tehtäväksi. Taulukko 26 esittää (kuuman kappaleen mittojen) tavoitearvot, toleranssit ja adaptiivisten menetelmien löytämät parhaat ratkaisut sekä poikkeamien suuruudet. Tavoitearvot oli tarkoituksella määritelty siten, että optimia ei voida täysin saavuttaa. Näin pyrittiin varmistamaan, että tehtävä ei ole liian helppo ja että eri algoritmien tuloksia on mahdollista verrata toisiinsa.

Mitta	Tavoite $\pm$ toleranssi	Algoritmi 1	Poikkeamat	Algoritmi 2	Poikkeamat
WidthTop	35.27 $\pm$ 0.1 mm	35.220	0.050	35.232	0.038
WidthBot	43.23 $\pm$ 0.1 mm	43.233	0.003	43.229	0.001
WidthKbd	43.90 $\pm$ 0.1 mm	43.912	0.012	43.911	0.011
LengthL	51.46 $\pm$ 0.1 mm	51.459	0.001	51.468	0.008
LengthR	51.46 $\pm$ 0.1 mm	51.450	0.010	51.457	0.003
Summa			0.076		0.061

Taulukko 26: Adaptiivisten menetelmien testiajojen tavoitearvot, toleranssit ja saavutetut mittojen keskiarvot.

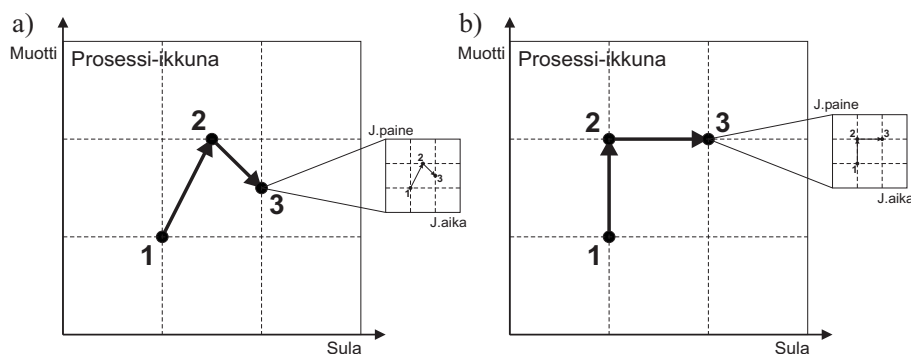
Koeajoja tehtiin kaikkiaan kolmella erilaisella algoritmilla. Algoritmi 1 pyrki samaan aikaan minimoimaan myös prosessin hajontaa, joten sen optimipiste ei ollut sama kuin algoritmin 2, joka minimoi pelkästään poikkeamaa tavoitearvoista. Jälkikäteen testasimme algoritmia 1 uudelleen käyttäen koeajossa kerättyä dataa jättäen hajonnan minimointikriteerin pois, ja silloin se antoi tuloksena saman optimaalisen ajopisteen kuin algoritmi 2. Löydettyjä ratkaisuja parempia arvoja ei saavutettu muissakaan marraskuun koe- tai testiajoissa.

Taulukossa 27 esitetty ensimmäinen adaptiivinen koesuunnittelutapa teki kattavan alustavan tiedonkeruun käyttäen hierarkkista ratkaisua, jossa hitaasti muuttuvia sulan ja muotin lämpötilaa muutettiin käyttäen kolmea pistettä prosessi-ikkunan sisältä ja näissä pisteissä ajettiin kahdella nopeammin tasoittuvalla parametrilla kolmen pisteen ajo. Ensimmäiset yhdeksän ajoa ovat siis tiedon keruuta ja kymmenes testasi senhetkisen mallin

Ajo	Sula (°C)	Muotti (°C)	Jääht.aika (s)	Jälkipaine (bar)	Kappaleita
1	262	57	11	533	7
2	262	57	12	667	7
3	262	57	13	600	7
4	265	63	13	600	7
5	265	63	11	533	7
6	265	63	12	667	7
7	268	60	12	667	7
8	268	60	13	600	7
9	268	60	11	533	7
10	265	50	15	400	7
+1	265	50	9	400	7

Taulukko 27: Adaptiivisen koeajotavan 1 ensimmäinen kokeilu 16.11., jossa parametrien muutosjärjestystä ja käytettäviä arvoja ei oltu vielä optimoitu parhaalla tavalla.

antaman optimipisteen. Tässä vaiheessa algoritmi totesi suosittavansa samaa optimipistettä ja ilmoitti, että voitaisiin lopettaa. Ihmistietämyksen perusteella tulosta yritettiin edelleen parantaa lyhentämällä jäähtytysaikaa, mutta vaikutus kuuman kappaleen mittoihin ei ollut odotettu, joten tulos ei parantunut. Koeajon päätyttyä kuitenkin todettiin, että vielä vähäisempään hitaiden parametrien muutostarpeeseen päästäisiin, jos vain yhtä parametria muutettaisiin kerrallaan (jälkipaineen vaikutus on miltei välitön) ja jos sulan lämpötilaa ei tarvitsisi useaan kertaan laskea. Siksi seuraavana päivänä adaptiivisen algoritmin 1 osalta toteutettiin uusi koeajo (katso kuva 31), jonka kulku on esitetty taulukossa 28. Tämän kokeen suoritus aika oli merkittävästi lyhyempi, kuten taulukko 32 osoittaa.



Kuva 31: Ensimmäisen adaptiivisen koesuunnittelustrategian variaatiot. a) Ensimmäinen testaus, jossa ajettiin  $3 \times 3$  pistettä ja molempia parametreja muutettiin samalla kertaa. b) Kehittyneempi vaihtoehto, jossa vain yhden asetusparametrin arvo muuttuu kerrallaan.

Ensimmäisen kokeilun yhteydessä mittojen tavoitearvot olivat erilaiset kuin muissa testiajoissa, joten siksi sen tulosta ei voi verrata muihin testiajoihin. Toisen kokeilun tulos

Nro	Sula (°C)	Muotti (°C)	Jääht.aika (s)	Jälkipaine (bar)	Kappaleita	Muutos
1	262	57	11	533	7	✓ 5
2	262	57	11	667	7	✓ 14
3	262	57	13	667	7	✓ 31
4	262	63	11	533	7	✓ 10
5	262	63	11	667	7	✓ 9
6	262	63	13	667	7	✓ 23
7	268	63	11	533	7	✓ 3
8	268	63	11	667	7	✓ 15
9	268	63	13	667	7	✓ 18
10	265	63	10	460	7	✓ 4
+1	265	63	10	560	7	
+2	275	63	10	460	7	

Taulukko 28: Adaptiivisen koeajotavan 1 toinen kokeilu 17.11., jossa parametrien muutosjärjestys ja käytettävät arvot oli mietitty huolella etukäteen. Muutos-sarake kertoo, kuinka monta kappaletta jouduttiin tuottamaan odotettaessa koneen asettumista uusiin (seuraavan rivin) asetusarvoihin.

oli täysin vertailukelpoinen muihin menetelmiin, kuten taulukko 26 ja sitä seuraava teksti osoittavat.

Toisessa adaptiivisessa koesuunnittelualgoritmissa ideana oli kerätä vähemmän tietoa prosessista alkuun ja täydentää tuloksia myöhemmin adaptiivisia askeleita ottamalla. Siinäkin tehtiin kaksi testiajoa. Ensimmäisessä testissä (katso taulukko 29) kerättiin ensin tietoa viidestä pisteestä: prosessi-ikkunan asetusarvojen minimikulmasta ja kunkin asetusarvoakselin suuntaan 30% kohti maksimia siten, että muut arvot olivat minimissään. Koetta tehtäessä kuitenkin todettiin, että tällainen tiedonkeruutapa ei ole taloudellinen, koska hitaasti muuttuvia lämpötiloja jouduttiin muuttamaan sekä ylös- että alaspäin. Pelkästään akseleiden suunnassa tehty tiedonkeruu ei myöskään paljasta mitään asetusparametrien välisistä yhteisvaikutuksista, joten tämä menetelmä ei löytänyt nopeasti optimia. Sen virhesummaksi jäi 0.096 seitsemän ajopisteen jälkeen, eikä algoritmi näyttänyt vievän ajopistettä parempaan suuntaan.

Menetelmän testaus toistettiin (katso taulukko 30) käyttäen huomattavasti yksinkertaisempaa tiedonkeruuvaihetta: vain asetusparametrien minimipiste ja toinen piste siitä diagonaalisesti 30% kohti maksimiarvoja. Tällöin adaptiivisia askeleita tarvittiin tietysti paljon enemmän ja menetelmän antama tulos ei heti kiinnittynyt löydettyyn optimiin. Paras arvo saavutettiin askelella 5, mutta menetelmän suosittama piste kuusi päätettiin vielä ajaa. Sen ajo jouduttiin toistamaan, koska kone ei ollut ehtinyt tasaantua ennen mittauksen käynnistämistä. Tulos ei kuitenkaan enää parantunut, joten tähän olisi voitu lopettaa. Menetelmä sai kuitenkin virheelliset tiedot tasaantumattoman koneen kuudennessa

Nro	Sula (°C)	Muotti (°C)	Jääht.aika (s)	Jälkipaine (bar)	Kappaleita	Muutos
1	255	50	9	400	10	
2	261	50	9	400	10	
3	255	56	9	400	10	✓ 40
4	255	50	11	400	10	✓ 20
5	255	50	9	520	10	✓ 40
6	275	52	9	460	10	✓ 36
7	274	54	9	440	10	

Taulukko 29: Adaptiivisen koeajotavan 2 ensimmäinen kokeilu 17.11., jossa ajettiin viiden pisteen tiedonkeruu ennen adaptiivisen menetelmän käynnistämistä. Muutos-sarake kertoo, kuinka monta kappaletta jouduttiin tuottamaan odotettaessa koneen asettumista uusiin (seuraavan rivin) asetusarvoihin. Tätä ei seurattu aivan koeajon alusta alkaen.

ajosta ja olisi edelleen suosittanut uusia pisteitä, mutta niitä ei tule laskea mukaan suoritusajoihin, koska osa datasta oli silloin eri ilmiötä (eli tasoittumatonta konetta) kuvaavaa tietoa.

Nro	Sula (°C)	Muotti (°C)	Jääht.aika (s)	Jälkipaine (bar)	Kappaleita	Muutos
1	255	50	9	400	10	✓ 39
2	261	56	11	520	10	✓ 20
3	257	54	14	740	10	✓ 50
4	273	66	9	400	10	✓ 12
5	271	68	10	400	10	✓ 6
6	274	65	9	460	10	✓ 15
6	274	65	9	460	10	
7	274	65	10	420	10	
8	273	63	12	400	10	

Taulukko 30: Adaptiivisen koeajotavan 2 toinen kokeilu 18.11., jossa ajettiin minimaalinen vain kahden pisteen tiedonkeruu ennen adaptiivisen menetelmän käynnistämistä. Muutos-sarake kertoo, kuinka monta kappaletta jouduttiin tuottamaan odotettaessa koneen asettumista uusiin (seuraavan rivin) asetusarvoihin. Kuudes ajo jouduttiin toistamaan, koska luultiin, että koneen toiminta olisi jo ehtinyt tasoittua, mitä se ei ollut ehtinyt tehdä. Kuudenteen ajoon mennessä menetelmä oli kuitenkin jo löytänyt parhaat asetusarvot koneelle.

Kolmas adaptiivinen algoritmi (katso taulukko 31) teki aluksi viiden pisteen tiedonkeruun. Tämän jälkeen menetelmä pyrki keräämään tietoa sellaisissa pisteissä, jotka parantaisivat datan antamaa luottamusta optimipisteen sijaintitietoon. Menetelmä pyrki kuitenkin samalla minimoimaan hitaasti muuttuvien parametrien muutostarvetta, mikä saattoi vaikuttaa liikaa siihen, minkälaisia pisteitä menetelmä valitsi ajettavaksi. Tämä

adaptiivinen koeajotapa ei saavuttanut parasta optimia ja kulutti kuitenkin paljon aikaa. Sitä tulee kehittää ennen mahdollisia uusia testejä.

Nro	Sula (°C)	Muotti (°C)	Jääht.aika (s)	Jälkipaine (bar)	Kappaleita	Muutos
1	257	52	10	440	7	✓ 22
2	257	52	14	760	7	✓ 66
3	257	68	10	440	7	✓ 48
4	273	52	14	440	7	✓ 46
5	273	68	14	760	7	✓ 91
6	255	50	9	400	7	✓ 55
7	255	61	9	400	7	✓ 44
8	255	67	12	400	7	✓ 30
9	255	70	9	400	7	✓ 28
10	255	67	9	400	7	✓ 15
11	258	67	10	400	7	✓ 30
12	269	70	9	740	7	

Taulukko 31: Adaptiivisen koeajotavan 3 kokeilu 18.11., jossa ajettiin viiden pisteen tiedonkeruu ennen adaptiivisen menetelmän käynnistämistä. Muutos-sarake kertoo, kuinka monta kappaletta jouduttiin tuottamaan odotettaessa koneen asettumista uusiin (seuraavan rivin) asetusarvoihin.

Käytetyt menetelmät ovat toistaiseksi heuristisia hakumenetelmiä, mutta niissä on kuitenkin hyvää se, että tietoa kerätään runsaasti optimipisteen ympäristöstä. Tällöin mittojen ennustumalleista tulee luotettavia ainakin juuri sen pisteen lähistöllä, missä konetta tullaan tuotannon yhteydessä ajamaan. Menetelmät myös vähentävät ajopisteiden määrää, jos niitä verrataan monitasoiseen täyskokeeseen. Käytännössä lisäksi havaittiin, että kun ensimmäisenkin algoritmin alustava koe on yksinkertainen ja se minimoi hitaasti muuttuvien lämpötilaparametrien muutostarvetta, aikaa säästyy merkittävästi. Taulukko 32 esittää samalla kappaleella tehtyjen koeajojen kestoajat, kun jokaisen arvojen muutoksen jälkeen prosessin annettiin tasaantua muottilämpötilaa tarkkaillen.

Kannattaa huomata, että 3.9. ajetussa osakokeessa oli muutettavia parametreja vain kolme ja muissa neljä. Osakokeessa ja adaptiivisen algoritmin 1 ensimmäisessä ajossa (16.11.) oli käytössä eri tavoitepisteet, joten niiden poikkeama tavoitearvoista ( $\Sigma$  poikkeamat) ei olisi ollut ollenkaan vertailukelpoinen muiden ajojen kanssa. Toinen vertailua vaikeuttava tekijä on se, että adaptiivinen tapa 1 pyrki samalla minimoimaan hajonnan, kuten aiemmin tekstissä mainittiin.

Uusien adaptiivisten koesuunnittelutapojen 1 ja 2 tuoma aikasäästö on merkittävä varsinkin, jos otetaan huomioon menetelmien online-luonne. Asetusarvojen optimoinnin tulokset ovat saman tien käytettävissä ja tuotanto voidaan käynnistää. Tavallisen koesuunnittelun yhteydessä koeajoon ja sen tulosten analyysiin kuluu vielä se, että normaali-



Menetelmä	$\Sigma$ poikkeamat	Ajopisteiden lkm	Koeajon kesto
Kolmen parametrin osakoe 3.9.	Eri tavoite	9	3h 40min
Adaptiivinen tapa 1 ajo 16.11.	Eri tavoite	10	2h 20min
Adaptiivinen tapa 1 17.11.	0.076	10	1h 30min
Adaptiivinen tapa 2 17.11.	0.096	7	2h 20min
Adaptiivinen tapa 2 18.11.	0.061	6	1h 27min
(Adaptiivinen tapa 3 18.11.	0.082	12	4h 30min)

Taulukko 32: Adaptiivisten menetelmien testiajojen suoritusaika verrattuna tavalliseen yksinkertaiseen koesuunnitelmaan. Normaalissa kolmen parametrin osakokeessa oli mukana muotin lämpötila, sulan lämpötila ja jälkipaine, joista kahdella ensimmäisellä tehtiin 3-tasoinen täyskoe ja kolmas laskettiin niistä.

listi kappaleiden mittaus voitaisiin suorittaa vasta riittävän kappaleiden jäähtymisajan kuluttua, esimerkiksi seuraavana päivänä.

## 5 Johtopäätöksiä

Jyväskylän yliopiston Data-analyysin laboratoriossa kehitetyn konenäköpohjaisen mittaustulosten keskihajonta on parempi kuin  $1/10$  kameran yhden kuvapisteen koosta sekä laboratorio- että teollisuusolosuhteissa. Tämä tarkoittaa, että kohtuullisen edullisellakin konenäkökameralla voidaan saavuttaa teollisuuskäyttöön riittäviä mittaustuloksia. Se voi tarkoittaa myös, että hyvällä tarkkuuskameralla ja laadukkaalla optiikalla voidaan laboratorio-olosuhteissa päästä kohtuullisen hyvään mittaustarkkuuteen. Kuvausjärjestelyllä, konenäkölaitteistolla, valaistuksella ja tutkittavien kappaleiden ominaisuuksilla, kuten esimerkiksi väri, on vaikutusta mittaustulosten hajontaan.

Mittaustulosten on sijoitettavissa online-käyttöön, sillä se on tuotantolinjalle riittävän nopea ja koska tuotettujen kappaleiden kutistumaa on mahdollista ennustaa tilastollisella mallilla. Online-käytössä järjestelmä mahdollistaa kokonaan uusia sovelluksia, kuten esimerkiksi adaptiivisen koesuunnittelun. Adaptiivisilla koesuunnittelumenetelmillä saadut alustavat tulokset ovat lupaavia erityisesti koeajoihin kuluvan ajan vähentämisen mielessä. Niiden kehitystyötä tulee kuitenkin jatkaa, jotta tiedon riittävyys ja sitä kautta käytettävien tilastollisten mallien luotettavuus voidaan varmistaa.

Eräs ongelma konenäköpohjaisen mittauksen kehittämisessä on jäähtymisen aiheuttaman kutistuman huomiointi. Ei liene käytännöllistä olettaa, että kutistumista varten tehdään jokaisella kerralla oma tilastollinen malli ja sen vaatima erillinen koejärjestely. Tämän vuoksi tulevaisuudessa on selvitettävä, miten hyvin simuloinnilla voidaan ennustaa kutistuman vaikutus, sekä mahdollisesti korjata simuloinnin tuloksia tuotannon yhteydessä tehtävällä nopealla ja suppealla jäähdytyskokeella.

On joukko tehtäviä, joihin kehitetty järjestelmä soveltuu jo tässä vaiheessa ilman laajempaa lisäselvitystä. Näitä ovat mm. laadun vaihtelun online-seuranta, jota voidaan käyttää mm. tuotantohäiriöiden diagnostiikkaan ja ylisuurien tuotannonvaihteluiden karsimiseen. Konenäköjärjestelmä mahdollistaa myös nopean parametrien vaikutusanalyysin, jolloin saadaan selville tutkittavan tekijän vaikutussuunta mittoihin sekä erityyppisten tekijöiden merkittävyydet toisiinsa nähden.

Laboratoriomittausten rinnalla menetelmää voidaan käyttää myös nopeana ja helppokäyttöisenä vertailumittauksena, joka paljastaa mahdolliset inhimilliset mittausrvirheet. Tällöin mittaustulosten luotettavuus tulee tarkastettua ennen varsinaista data-analyysiä ja siitä tehtäviä johtopäätöksiä.

## Viitteet

- Belofsky, H. *Plastics: Product Design and Process Engineering*. Carl Hanser Verlag, Munich, Germany, 1995.
- Bovik, A. (ed.) *Handbook of Image and Video Processing*. Academic Press, San Diego, CA, 2000.
- Chaudhuri, S. (ed.) *Super-Resolution Imaging*. Kluwer Academic Publishing, Norwell, MA, 2001.
- Dryden, I. and Mardia, K. *Statistical Shape Analysis*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1998.
- Fedorov, V. *Theory of Optimal Experiments*. Academic Press, New York, 1972.
- Forsyth, D. and Ponce, J. *Computer Vision – A Modern Approach*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
- Gonzales, R. and Woods, R. *Digital Image Processing, Second Edition*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.
- Haranen, M., Lensu, A., and Koikkalainen, P. *Application of Shape Analysis to Gray Scale Images Taken of Plastic Parts*. Laboratory of Data Analysis, Technical Report, No. 05/2006. University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland, 2006.
- Jain, A. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- Koikkalainen, P. *Data-analyysi ruiskuvalun palveluksessa*. Data-analyysin laboratorio, Tekninen raportti, No. 04/2006. Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä, Finland, 2006.
- Latvakangas, T. *Ruiskuvaluprosessin kuvaus lineaaristen regressiomallien avulla* (Diplomityö). Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2004.
- Lensu, A. and Koikkalainen, P. *Machine Vision Based Measurement Methods for Quality Assurance in Injection Molding Industry*. Laboratory of Data Analysis, Technical Report, No. 03/2006. University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland, 2006.
- Park, S., Park, M., and Kang, M. 'Super-Resolution Image Reconstruction: A Technical Overview'. *IEEE Signal Processing Magazine*, May, 2003. Pages 21–36.
- Silén, J., Koikkalainen, P., Kylmälä, M., Lensu, A., Latvakangas, T., Välipakka, E., and Haranen, M. *Tehokkaan, laadukkaan ja mukautuvan ruiskuvalun uudet älykkäät työkalut (IDEAL) 2002-2004, Projektin loppuraportti*. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, Finland, 2004.

*IDEAL – Jyväskylän yliopiston koeajoraportti*

Välipakka, E. *Ruiskuvalukappaleen mikrorakenteen karakterisointi* (Diplomityö). Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2004.

## LIITE 1. Käytetty data-analyysiohjelmisto

Mittojen korjausmallien ja muidenkin prosessin taustalla olevien ilmiöiden selvittämiseen käytettiin omaa tekoa olevaa data-analyysiohjelmistoa, Injection Molding Process Analysis (IMPA), joka sisältää:

- Koesuunnittelumenetelmiä (*full factorial, fractional factorial, adaptive design*)
- Tilastollisen mallinnuksen menetelmiä,  $L = f(A)$  tai  $L = g(P, M)$ , missä  $L$  on osajoukko laatumittauksista,  $A$  asetusarvoista,  $P$  ruiskuvalukoneen sisäisistä mittauksista ja  $M$  muottianturitiedoista. Käytettävissä olevat mallinnusmenetelmät:
  - Lineaariset ja epälineaariset regressiomallit mallin luotettavuus- ja ennustusrajoineen. Sisältää muuttujien valintamenetelmän
  - MLP-neuroverkot (sisältää empiiriset mallin luotettavuus- ja ennustusrajat)
- Kerätyn tiedon ja mallien ennusteiden visualisointimenetelmiä (*Line diagrams, histograms, scatterplots, boxplots, interaction plots, 3-D surface plots*)
- Itseorganisoituvan kartan (*Self-Organizing Map*) datan sisällön visualisointiin
- Koneen asetusarvojen optimointimenetelmän,  $A_{opt} = f^{-1}(L_{opt})$ , ja asetusarvojen herkkyyksianalyysin
- Oikeasta prosessista kerättyyn tietoon perustuvan datasimulaattorin
- Muotoanalyysimenetelmän, joka identifioi kappaleen muotovääristymien tyypit ja suuruudet



**LIITE 2. TTY:n IDEAL-raportti:  
PC/ABS, seinämänpaksuus 1 mm**





**LIITE 3. TTY:n IDEAL-raportti:  
PBT, seinämänpaksuus 1 mm**