

Jukka Ruusunen

# Lattakomparaattorin automatisointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Automaatiotekniikka

Insinöörityö

15.5.2014

Tekijä(t) Otsikko	Jukka Ruusunen Lattakomparaattorin automatisointi
Sivumäärä Aika	38 sivua + 1 liite 15.5.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	kappaletavara-automaatio
Ohjaaja(t)	lehtori Markku Inkinen vanhempi tutkija Mikko Takalo
<p>Insinööri työ oli osa Geodeettisen laitoksen projektia, jonka tarkoituksena oli rakentaa tilaustyönä uusi vaaitusvälineiden laserlattakomparaattori ja toimittaa se tilaajan käyttöön syksyllä 2014. Lattakomparaattorin tilaajana oli Venäjän valtiollinen maanmittauslaitos. Geodeettinen laitos on paikkatietoalan tutkimus- ja asiantuntijalaitos ja se toimii pituuden ja putoamiskiihtyvyyden kansallisena mittanormaalilaboratoriona.</p> <p>Lattakomparaattori on laite, jolla voidaan kalibroida muun muassa digitaalisia vaaituskojeita ja viivakoodilattoja. Vaaituksen tarkoitus on määrittää kahden pisteen välinen tarkka korkeusero vaaituskojeen ja latta-asteikon avulla. Kalibroinnin tarkoituksena on varmistaa vaaituslaitteilla tehtyjen mittausten luotettavuus ja antaa vaaitukselle mittakaava.</p> <p>Kalibroinnin automatisointi toteutettiin rakentamalla lattakomparaattorille kalibrintiohjelma Visual Studio 2010 -ohjelmankehitysympäristöllä. Lisäksi luotiin tiedonsiirtoyhteydet ohjelman ohjauksesta vastaavan teollisuus-PC:n ja lattakomparaattoriin liitettyjen laitteiden välille. Komparaattoriin liitetyt laitteet ovat laserinterferometri, CCD-kamera, vaaituskoje, askelmoottori ja sääasema. Tiedonsiirto laitteiden ja PC:n välillä tapahtuu USB 2.0 -, USB 3.0 -, RS-232 - ja RS-485 -väylien välityksellä.</p> <p>Kalibrintiohjelma laskee kalibrintitulokset kalibroitaville vaaituslaitteille automaattisesti 1–2 tuntia kestävästä kalibrintiprosessista aikana. Ohjelman toiminta perustuu sekventiaaliseen mittausslooppiin, jossa laskenta suoritetaan sääasemalta, vaaituskojeelta, CCD-kameralta ja laserinterferometriltä vastaanotettujen mittaustietojen perusteella. Kalibrintitulosten avulla määritetään vaaitusjärjestelmän mittakaava ja tärkeimpiä yksittäisiä tuloksia ovat latalle määritetty lattametrin korjaus ja lämpölaajenemiskerroin.</p> <p>Työn tuloksena rakennettiin täysin automatisoitu lattakomparaattori, jolla voidaan kalibroida Trimble Incin, Leica Geosystemin ja Topconin vaaitusjärjestelmiä sekä perinteisiä tasavälijakoisia latta-asteikkoja. Kalibrintitulosten perusteella kalibroiduille vaaituslaitteille kirjoitetaan virallinen kalibrintitodistus, joka sisältää muun muassa mittausselosteen, mittaustulokset, virherajat, ajankohdat ja tiedot kalibroiduista laitteista.</p>	
Avainsanat	Geodeettinen laitos, lattakomparaattori, latta, lattakalibrointi, systeemikalibrointi, vaaituskoje

Author(s) Title	Jukka Ruusunen Automation of a Rod Comparator
Number of Pages Date	38 pages + 1 appendix 15 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automation Engineering
Specialisation option	Manufacturing Automation
Instructor(s)	Markku Inkinen, Senior Lecturer Mikko Takalo, Senior Research Scientist
<p>The thesis was a part of the Finnish Geodetic Institute's project whose purpose was to develop a new custom-built laser rod comparator for levelling instruments and supply it to the subscriber in autumn 2014. The comparator was commissioned by FSBI Center of Geodesy, Cartography and SDI in Russia. The Geodetic Institute is a research and expert institute for spatial data infrastructure and it operates as National Standards Laboratory.</p> <p>A rod comparator is a device which can be used to calibrate digital levels and bar code rods. The purpose of levelling is to determine an accurate height difference between two points with the help of a levelling instrument and rod scales. The purpose of the calibration is to give a scale to a levelling system and to ensure that measurements carried out by levelling instruments are reliable.</p> <p>Automation of the calibration was carried out by developing a calibration program for the rod comparator using Visual Studio 2010 integrated development environment. Communication links were created between an industrial PC and apparatuses which are attached to the rod comparator. Those apparatuses are a laser interferometer, a CCD camera, a digital level, a stepper motor and a weather station. Communication between PC and apparatuses is carried out via USB 2.0 -, USB 3.0 -, RS-232 - and RS-485 -interfaces.</p> <p>The calibration program calculates calibration results for the calibrated levelling instruments automatically during the calibration process which normally takes 1–2 hours. The program is based on a sequential measurement loop where the calculation is performed based on the received measurement data from the weather station, digital level, CCD camera and laser interferometer. The scale of the levelling system is determined on the basis of the calibration results, and the most important results are rod scale correction and thermal expansion coefficient.</p> <p>The result of the project was a fully automated rod comparator that can be used to calibrate traditional rod scales and digital levelling systems manufactured by Trimble Inc, Leica Geosystem and Topcon. On the basis of the calibration results an official calibration certificate is written for the levelling instruments. The certificate contains e.g. measurement results, error limits, dates and basic information about the calibrated instruments.</p>	
Keywords	Finnish Geodetic Institute, rod comparator, rod, rod calibration, system calibration, digital level

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Vaaitusjärjestelmä	2
2.1	Latta	2
2.1.1	Yleistä	2
2.1.2	Viivakoodilatta	2
2.1.3	Klassinen latta	2
2.2	Vaaituskoje	3
2.3	Digitaalivaaituskojeiden valmistajat	5
2.3.1	Trimble Inc	5
2.3.2	Leica Geosystem AG	5
2.3.3	Topcon	6
3	Lattakomparaattori	6
3.1	Käyttö	6
3.2	Rakenne	7
3.3	Toimintaperiaate	9
3.3.1	Kalibroinnin vaiheet	9
3.3.2	Lattakalibrointi	10
3.3.3	Systeemikalibrointi	13
3.3.4	Kalibrointitulokset	13
4	Laitteet ja kommunikointi	16
4.1	Teollisuus-PC	16
4.2	Laserinterferometri	17
4.2.1	Renishaw XL-80	17
4.2.2	Lasersäteen suuntaus	18
4.2.3	Aallonpituuden kompensointi	21
4.2.4	Laserlukeman määrittäminen kalibrointiohjelmassa	22
4.3	CCD-kamera	22
4.3.1	Basler ace acA640-120 µm	22
4.3.2	Kameran asetukset ja ohjelmisto	22
4.3.3	Valaistus	23
4.4	Askelmoottori	24
4.4.1	Schneider MDrive 34 Plus	24
4.4.2	Ohjelmointi ja käyttö	25

4.4.3	Välimatkataulukot	26
4.4.4	Rajakytkimet	27
4.5	Sääasema	27
4.5.1	Almemo 2590-4S	27
4.5.2	Mittausolosuhteet	28
4.5.3	Lämpötila, paine ja ilmankosteus	29
5	Digitaalinen kuvankäsittely	30
5.1	Yleistä	30
5.2	Pikapaikannus	30
5.3	Tarkka paikannus	32
5.4	Pikselikoko	33
5.5	Tarkan paikan määrittäminen kalibrointiohjelmassa	33
6	Ohjelmointi	34
6.1	Ohjelmistonkehitys	34
6.2	Visual Studio -ohjelma	35
6.2.1	Pääohjelma	35
6.2.2	Käyttöliittymä	35
6.2.3	Muut ohjelmat	37
7	Yhteenveto	37
	Lähteet	39
	Liitteet	
	Liite 1. Kalibrointiohjelman lohkokaavio (Trimble Dini)	

## 1 Johdanto

Geodeettinen laitos on maa- ja metsätalousministeriön alainen paikkatietoalaan keskittyvä tutkimuslaitos, jossa työskentelee tällä hetkellä noin 100 henkilöä tutkimus- ja asiantuntijatehtävissä. Geodeettisen laitoksen tehtäväalueita ovat muun muassa tutkimustyö geodesian, navigoinnin, geoinfomaatiikan ja kaukokartoituksen aloilla sekä toimiminen pituuden ja putoamiskiihtyvyyden kansallisena mittanormaalilaboratoriona [1].

Geodeettinen laitos sai vuoden 2012 lopulla Venäjän valtiolliselta maanmittauslaitokselta tilaustyön rakentaa pystyasentoinen laserlattakomparaattori. Komparaattori oli tarkoitus saada valmiiksi kevään 2014 aikana ja toimittaa Moskovaan syksyllä 2014.

Projektin tavoitteena oli rakentaa täysin automatisoitu laserlattakomparaattori. Laitteella kalibroidaan muun muassa digitaalisia vaaituskojeita ja tarkkavaaituslattoja. Lattakomparaattorin tehtävänä on määrittää vaaitusjärjestelmän mittakaava. Kalibroititulosten avulla voidaan varmistaa vaaituslaitteilla tehtyjen mittausten luotettavuus [2].

Pääasiallinen tehtäväni tässä projektissa oli kehittää ohjelmakoodi ja käyttöliittymä lattakomparaattorille. Ohjelmointi toteutettiin Visual Studio 2010 -ohjelmankehitysympäristöllä. Ohjelmoinnin pohjana toimi Geodeettisen laitoksen vanhan lattakomparaattorin lähdekoodi, jota hyödynnettiin uuden kalibrintiohjelman rakentamisessa. Vanha lattakomparaattori valmistui vuonna 1997 ja se on edelleen käytössä [3].

Etuja uudessa lattakomparaattorissa verrattuna vanhaan on muun muassa selkeämpi ja informatiivisempi käyttöliittymä, kalibroititulosten helpompi käsittely ja mahdollisuus kalibroida latta ja vaaituskoje samanaikaisesti. Tämän projektin jälkeen Geodeettisen laitoksen vanha lattakomparaattori on tarkoitus nykyaikaistaa, mikä tarkoittaa käytännössä uuden PC:n hankkimista, uuden ohjelmiston ja sen käyttöliittymän luomista sekä uusien oheislaitteiden hankkimista.

## 2 Vaaitusjärjestelmä

### 2.1 Latta

#### 2.1.1 Yleistä

Vaaituslatta on pituusasteikko, joka on tavallisesti pituudeltaan 1–4 metriä ja leveydeltään 5–10 senttimetriä. Lattan materiaali on yleensä metallia, puuta, lasikuitua tai hiilikuitua. Lattakomparaattorilla kalibroidaan digitaalisia vaaituskojeita yhdessä viivakoodilattojen kanssa tai yksistään tasavälisiä klassisia latta-asteikkoja.

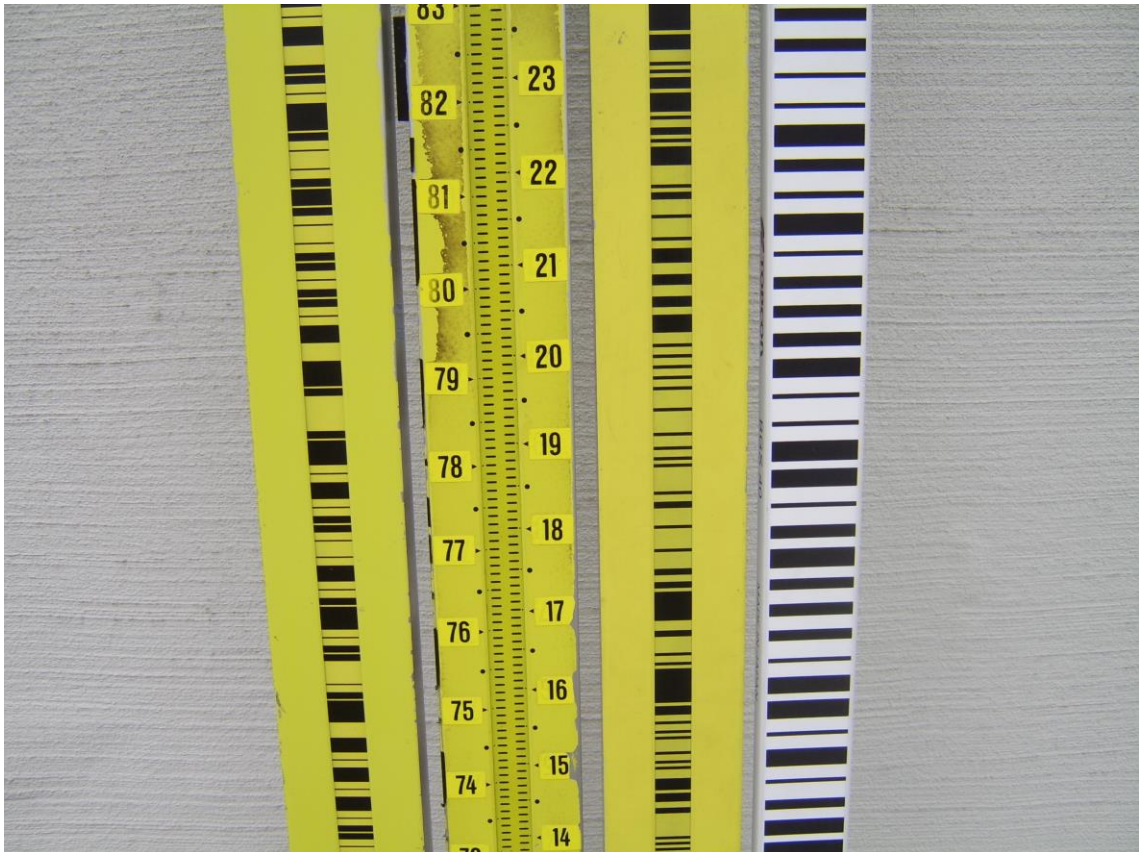
#### 2.1.2 Viivakoodilatta

Viivakoodilattan latta-asteikko on muodostettu yhtäjaksoisesta viivakoodikuvioista. Viivakoodiasteikko koostuu peräkkäisistä eri paksuisista valkoisista ja mustista koodiviivoista. Yksittäisen koodiviivan eli lattaviivan paksuus voi vaihdella noin yhdestä millimetristä useampaan senttimetriin. Viivakoodiasteikko on kaikissa saman valmistajan valmistamissa latoissa identtinen ja jokaisella lattaviivalla on tietty nimellisetäisyys lattan pohjalevystä.

Yleisin vaaituksessa käytössä oleva lattatyyppi on invarlatta (Kuva 1). Sen viivakoodiasteikko on 25 millimetriä leveässä invarnauhassa, joka on kiinnitetty lattan alumiinirunkoon jousen avulla [4, s. 36].

#### 2.1.3 Klassinen latta

Klassisella latalla (Kuva 1) tarkoitetaan tasavälijakoisia lattaa, joka on materiaaliltaan yleensä joko puuta tai alumiinia. Latta-asteikko koostuu yhden millimetrin paksuista mustista lattaviivoista, jotka ovat joko 5 tai 10 millimetrin etäisyydellä toisistaan [5, s. 189].



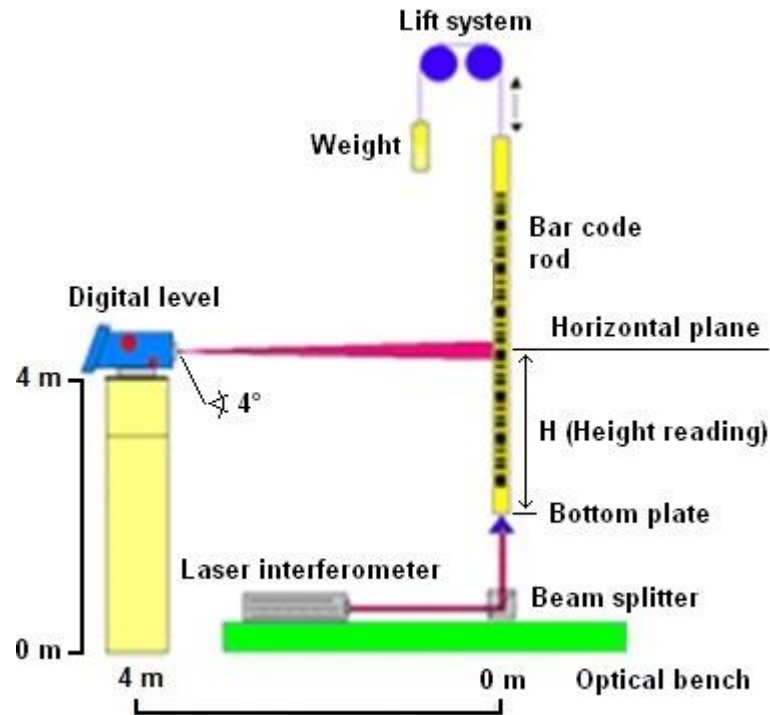
Kuva 1. Vaaituslatat vasemmalta oikealle: Zeiss Dini LD13 invarlatta, Nedo klassinen tasavälijakoinen latta, Leica GPCL3 invarlatta ja Topcon BGS40 lasikuitulatta.

## 2.2 Vaaituskoje

Vaaituskoje käsittää kaukoputken ja tasaimen. Tasain voi olla runkoon kiinnitetty vesi-vaakaputki tai kompensattorina toimiva riippuva prisma tai peili [6, s. 92]. Tasain antaa vaaituskojeelle vaakatason, jolla tähdätään latta-asteikkoon ja josta vaaituskoje määrittää korkeuslukeman. Digitaalinen vaaituskoje sisältää sisäisen CCD-ilmaisimen ja kuvankäsittelyohjelman. Vaaituskoje tunnistaa sen CCD-ilmaisimelle kuvautuvan latan viivakoodikuvion ja määrittää kuvankäsittelyohjelmansa avulla korkeuslukeman.

Vaaituskojetyypistä riippuen kojeen näkemä kuva-alue muodostuu noin kahden asteen kulmassa ylös- ja alaspäin vaaituskojeen vaakatasosta. Esimerkiksi jos vaaituskojeen etäisyys latasta on 3 metriä, näkee koje noin 20 senttimetriä korkean alueen latan viivakoodikuvion (Kuva 2). Vaaituskojeen määrittämä korkeuslukema on aina etäisyys latan pohjalevystä siihen kohtaan lattaa mihin vaaituskojeen vaakataso kohdistuu [3].





Kuva 2. Systeemikalibrointikomparaattorin rakenne. Kuvassa havainnollistettu vaaituskojeen näkemä kuva-alue sekä alue johon korkeuslukema (H) muodostuu. Piirros M Takalo.

Vaaituskoje kytketään tietokoneen sarjaporttiin RS-232-kaapelilla. Lattakomparaattorin kalibrointiohjelmassa eri valmistajien vaaituskojeita käsitellään lähes samalla tavalla. Erona ovat ainoastaan poikkeavat tiedonsiirtoparametrit sekä korkeuslukeman mittaus- ja lukukomennot. Ennen mittausdatan siirtoa vaaituskojeesta tietokoneeseen, määritetään oikeat sarjaportin tiedonsiirtoparametrit tietokoneella ja vaaituskojeella.

Lattakomparaattorin kalibrointiohjelma kysyy vaaituskojeelta korkeuslukemaa kalibroinnin edetessä latta-asteikolla viiva viivalta. Korkeuslukema saadaan lähettämällä PC:ltä sarjaporttiin merkkijonomuotoinen mittauskomento. Vaaituskoje vastaa lähettämällä paluuviestinä sarjaporttiin merkkijonon, joka sisältää määritetyn korkeuslukeman. Vaaituskoje antaa korkeuslukeman yleensä joko 0,01 millimetrin tai 0,1 millimetrin tarkkuudella.

Lattakomparaattorilla kalibroidaan pääsääntöisesti Trimble Incin, Topconin ja Leica Geosystem AG:n vaaitusjärjestelmiä (Kuva 3), jotka ovat maailman johtavia vaaitusjärjestelmien valmistajia. Eri valmistajien vaaituskojeissa on rakenteellisia eroavaisuuksia, mutta niiden kaikkien toimintaperiaate on samanlainen. Toisaalta eri valmistajien vaaituskojeita ja lattoja ei voida käyttää eikä kalibroida ristiin, sillä vaaituskoje pystyy määrittämään korkeuslukeman vain saman valmistajan viivakoodista [7].



Kuva 3. Vasemmalla Trimble DiNi12-, keskellä Leica DNA03- ja oikealla Topcon DL503-vaaituskoje.

## 2.3 Digitaalivaaituskojeiden valmistajat

### 2.3.1 Trimble Inc

Trimble Inc on vuonna 1978 perustettu yhdysvaltalainen maanmittauskojeita ja GPS-järjestelmiä valmistava yritys. Lattakomparaattorilla kalibroidaan Trimblen DiNi-tyyppisiä vaaituskojeita (Kuva 3). Vaaituskojeita on olemassa useita eri versioita kuten esimerkiksi DiNi10 ja DiNi12, joita valmisti ja kehitti Carl Zeissin perustama yritys Carl Zeiss AG. DiNi-vaaituskojeen kanssa kalibroidaan yleensä Trimblen 3 metrin pituisia alumiinisia viivakoodi invarlattoja.

Trimblen latoissa kalibroitavien lattaviivojen väliset etäisyydet toisistaan ovat aina 10 millimetriä tai sen monikerta, jota kutsutaan nominaalipituudeksi. Sitä käytetään hyväksi kalibrointitulosten laskennassa. Dini-viivakoodisto on rakennettu siten, että aloitettaessa kalibrointi määrätystä kohdasta lattaa on peräkkäin kalibroitavien lattaviivojen väliset etäisyydet toisistaan aina 20 millimetriä koko latan pituudelta [4, s. 33].

### 2.3.2 Leica Geosystem AG

Leican vaaitusjärjestelmiä valmistaa nykyään sveitsiläinen Leica Geosystem AG (aikaisemmin tunnettu nimellä Wild Heerbrugg). Yritys on 200 vuotta vanha, mutta nykyään Leica Geosystem AG on keskittynyt nimenomaan maanmittauskojeiden valmistukseen. Lattakomparaattorilla kalibroidaan Leican DNA- (Kuva 3) ja NA-sarjan vaaituskojeita.

Leican lattojen viivakoodin nominaalipituus on 2,025 millimetriä siten, että yksittäisen lattaviivan paksuus on aina 2,025 millimetriä tai sen monikerta [4, s. 26].

### 2.3.3 Topcon

Topcon on vuonna 1938 perustettu japanilainen optiikka-alaan keskittyvä konserni. Lattakomparaattorilla kalibroidaan Topconin DL-500 sarjan vaaituskojeita (Kuva 3) yhdessä Topconin lattojen kanssa, joissa on nykyään Sokkian viivakoodisto käytössä sen jälkeen kun Topcon ja Sokkia konsernit yhdistyivät Japanissa. Latat ovat materiaaliltaan lasikuitua, alumiinia tai metallisia invarlattoja.

Topconin lattojen viivakoodikuvio on muodostettu käyttämällä RAB-koodia (Random Bidirectional Code). Lattojen nominaalipituus on 16 millimetriä siten, että jokaisen mustan lattaviivan keskikohdan etäisyys seuraavaan mustan lattaviivan keskikohtaan on 16 millimetriä.

## 3 Lattakomparaattori

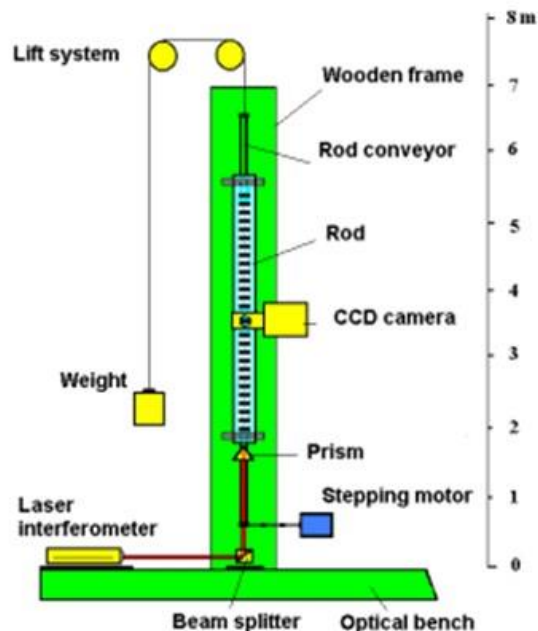
### 3.1 Käyttö

Lattakomparaattoria käytetään lattojen ja vaaitusjärjestelmien kalibrointiin. Vaaitusjärjestelmä (vaaituskoje ja latta yhdessä) on järkevää kalibroida yksi tai kaksi kertaa vuodessa luotettavan mittaustarkkuuden ylläpitämiseksi. Uudessa lattakomparaattorissa voidaan suorittaa lattakalibrointi sekä latan ja vaaituskojeen kalibrointi eli systeemikalibrointi samanaikaisesti. Vanhalla lattakomparaattorilla lattakalibrointi ja systeemikalibrointi suoritettiin erikseen.

Kalibroinnin avulla selvitetään vaaitusjärjestelmän yksityiskohtaisia ominaisuuksia, jotka kirjataan kalibrointitodistukseen eli sertifikaattiin. Asiakkaan tuodessa vaaitusjärjestelmän kalibroitavaksi hän saa kalibroinnin valmistuttua virallisen kalibrointitodistuksen, jossa on tiedot muun muassa mittaustuloksista, virherajoista, ajankohdista ja kalibroiduista laitteista. Tärkeimpiä mittaustuloksia ovat latalle määritetyt mittakaava- ja lämpötilakorjaukset.

### 3.2 Rakenne

Lattakomparaattori on pystysuuntaan asennettu noin 8 metriä korkea laite (Kuva 4). Komparaattorin puukehikko koostuu kahdeksasta puuelementistä (koko 22,5 cm x 11,5 cm x 200 cm). Puuelementit on asetettu pystyasentoon päällekkäin kahteen pinnoon noin 30 senttimetrin etäisyydelle toisistaan ja kiinnitetty toisiinsa yhtenäisellä vanerilevyllä, joka muodostaa komparaattorin takaseinän. Komparaattorin puukehikko on kiinnitetty komparaattorihuoneen seinään kahdella alumiinista valmistetulla konsolilla, min­kä ansiosta laite pysyy tukevasti pystyssä. Lisäksi komparaattori on eristetty suorasta kosketuksesta lattiaan säädettävän teräsjalustan avulla, jonka ansiosta lattian kautta ei välity tärinää komparaattorin rakenteisiin ja jolla puukehikon suoruutta voidaan korjata. Tarvittaessa komparaattori voidaan purkaa neljään osaan kuljetuksen helpottamiseksi.



Kuva 4. Lattakomparaattorin rakenne sekä oleelliset osat ja laitteet. Piirros M Takalo.

Lattakomparaattori sisältää puukehikon lisäksi teräksiset lineaarijohteet eli kiskot, kuularuuvit, kelkan ja vastapainon. Lineaarijohteet on asennettu pystyasentoon suunnilleen 40 senttimetrin etäisyydelle toisistaan komparaattorin puukehikon etupuolelle. Kelkka on noin 3,5 metriä pitkä ja se liikkuu lineaarijohteiden välissä pystysuuntaisesti. Kelkka on kiinnitetty molemmilta puolilta kahteen kuulalaakerivaunuun, jotka liukuvat lineaarijohteita pitkin. Lisäksi kelkkaan on kiinnitetty vaijerin välityksellä 21 kilon vastapaino. Vaijerin toinen pää on kiinni kelkan yläosassa ja toisessa päässä roikkuu vastapaino. Vaijeri kulkee komparaattorin kattoon kiinnitettyjen kahden väkipyörän kautta.

Komparaattorin alaosaan on kiinnitetty metallisen kiinnityslaipan avulla askelmoottori. Askelmoottori pyörittää pystyasennossa olevaa kuularuuvia, joka on 3,5 metriä pitkä ja 32 millimetriä paksu. Kuularuuvi sijaitsee komparaattorin puuelementtien välissä ja on kiinnitetty teräslaippojen avulla komparaattorin seinärakenteisiin. Latan kuljetinkelkka on kuularuuvissa kiinni kuulamutterin välityksellä. Askelmoottorin akselin ja kuularuuvin alaosan välillä on vaihde (Kuva 14), joka välittää akselin pyörimisliikkeen kuularuuviin ja poistaa siitä mahdolliset epälineaariset liikkeet.

Vaaituskoje on asetettu 4 metriä korkean betonipilarin päälle ja pilarin vaakasuora etäisyys komparaattorista on noin 4,3 metriä (Kuva 2). Vaaituskojeelle on rakennettu erillinen metallinen kiinnitysalusta, johon koje kiinnitetään ruuvilla. Kiinnitysalusta sisältää myös CCD-kameran jalustan, jonka asentoa voidaan muuttaa kiristettävän ruuvin avulla. CCD-kameraan kiinnitetty objektiivi asetetaan mahdollisimman lähelle vaaituskojeen okulaaria ja tarkennetaan vaaituskojeen kuvatasoon. Kuvasta 5 nähdään, että kameran korkeutta ja sivuttaista suuntausta voidaan säätää kameran jalustan avulla. Kameran jalusta liukuu kuljetinkiskon päällä, mikä mahdollistaa objektiivin etäisyyden säädön vaaituskojeen okulaarin suhteen.



Kuva 5. Vaaituskojeen metallinen kiinnitysalusta, CCD-kameran jalusta ja sen kuljetinkisko. CCD-kameraan kiinnitetty objektiivi on asetettu kiinni vaaituskojeen okulaariin.

### 3.3 Toimintaperiaate

#### 3.3.1 Kalibroinnin vaiheet

Ennen kalibroinnin aloitusta latta kiinnitetään kelkkaan mahdollisimman pystysuoraan esimerkiksi vatupassin avulla. Vaaituskoje asetetaan paikoilleen ja säädetään kojeen taseus sekä latta-asteikon valaistus kohdilleen. Vaaituskojeen fokusointiruuvien avulla säädetään lattaviivan kuva teräväksi ja kohdistetaan kuva sivusäätöruuvilla keskelle latta-asteikkoa. Tämän jälkeen ajetaan askelmoottorilla latta kalibroinnin aloituskohtaan. Latasta riippuen aloituskohdan haku voidaan suorittaa manuaalisesti tai automaattisesti kalibroitiohjelman avulla. Seuraavaksi avataan kalibroitiohjelma, josta määritetään oikeat kalibroitiasetukset, avataan yhteydet tietokoneen ja oheislaitteiden välillä ja käynnistetään kalibrointi.

Kalibroitavasta vaaitusjärjestelmästä riippuen kalibrointi kestää 1–2 tuntia. Kalibroitiohjelman käyttäjä voi seurata kalibroinnin tilaa ja sen etenemistä käyttöliittymästä. Kalibroinnin aikana laitteen käyttäjän ei tarvitse suorittaa mitään toimenpiteitä, sillä latakomparaattori toimii täysin automaattisesti. Kalibroinnin valmistuttua kalibroitiohjelma muodostaa automaattisesti tulostiedostot, joista tärkeimmät kalibroititulokset ovat välittömästi nähtävissä. Tulostiedostot ovat tyypiltään Excel- ja tekstitiedostoja (Kuva 6), jotka kalibroitiohjelma tallentaa automaattisesti tietokoneen kovalevylle.

03-19-2014		15:09:53		Pressure: 748,562 mmHg		Humidity: 49 %	
Line	Laser reading ( $\mu\text{m}$ )	Rod correction ( $\mu\text{m}$ )	Sum of rod corrections ( $\mu\text{m}$ )	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )			
0	0	0	0	22,3			
1	4,955	-3,199	-3,199	22,3			
2	9,979	-4,007	-7,206	22,3			
3	15,003	7,751	0,545	22,3			
4	20,007	0,663	1,208	22,3			
5	25,014	-4,588	-3,379	22,3			
6	30,02	1,059	-2,32	22,3			
7	35,024	2,522	0,202	22,325			
8	40,007	0,314	0,516	22,325			
9	45,014	-4,177	-3,661	22,325			
10	50,018	-1,244	-4,906	22,3			
11	55,023	0,724	-4,182	22,3			
12	60,008	1,719	-2,463	22,3			
13	65,012	2,131	-0,332	22,325			
14	70,018	1,486	1,154	22,325			
15	75,021	-3,526	-2,371	22,325			
16	80,004	0,961	-1,41	22,325			
17	85,009	5,467	4,057	22,325			
18	90,012	-4,596	-0,539	22,325			
19	95,018	-0,499	-1,038	22,325			
20	100,022	-1,689	-2,727	22,3			
21	105,006	3,158	0,431	22,325			
22	110,01	-6,031	-5,6	22,3			
23	115,014	3,359	-2,241	22,325			
24	120,018	1,541	-0,7	22,325			
25	125,021	-2,71	-3,41	22,325			

Kuva 6. Esimerkki kalibrintiohjelman muodostamasta tulostiedoston (.txt) alkuosasta.

### 3.3.2 Lattakalibrointi

Latan valmistajasta riippuen lattakalibroinnissa mitataan kaikki tai vain tietty osa as- teikon lattaviivoista. Lattakalibroinnissa CCD-kameran ottamasta kuvasta lasketaan kalibrintiohjelman kuvankäsittelylaskennan sekä laserinterferometrillä havaittujen la- serlukemien avulla lattaviivan pituus ja verrataan sitä vastaavaan lattaviivan nimellispi- tuuteen eli oikeaan pituuteen, jolloin saadaan tulokseksi lattakorjaus. Nimellispituus määritetään latan nominaalipituuden avulla. Nominaalipituus on etäisyys, joka toistuu latassa säännöllisesti tiettyjen lattaviivojen tai viivanreunojen välillä [2].

Lattakorjaus voidaan laskea myös kahden sellaisen viivanreunan väliltä, jotka eivät sijaitse latassa peräkkäin eli ne eivät muodosta yhtenäistä mustaa tai valkeaa lattavii- vaa. Tällöin kalibrintiohjelma laskee lattakorjauksen tunnettujen viivanreunojen välille ja tulkitsee alueen kuten yksittäisenä lattaviivana. Lattakalibroinnin laskennan kannalta

ei ole merkitystä onko lattakorjaus laskettu peräkkäisistä vai ei-peräkkäisistä viivanreunoista, vaan oleellista on se että viivanreunojen välinen nimellispituus tunnetaan.

Jokainen lattaviiva sisältää ylemmän ja alemman viivanreunan. Kalibroitiohjelmassa lattaviiva on indeksoitu ylemmän viivanreunan mukaan ja alempi viivanreuna on seuraavan lattaviivan indeksi (Kuva 7).

Lattakalibroinnissa lasketaan lattaviivan niin sanottu redukoitu tarkka paikka (*red*) kuva-alueen keskikohdan suhteen seuraavan kaavan mukaisesti:

$$red = (middlePix - pos) * pixelSize$$

*middlePix on tarkasteltavan kuva-alueen keskikohta (pix)*

*pos on viivanreunan tarkka paikka (pix)*

*pixelSize on pikselin korkeus ( $\mu m$  / pix)*

*red on redukoitu viivanreunan tarkka paikka ( $\mu m$ )*

Muuttujat *middlePix* ja *pixelSize* ovat vakioita, koska niiden arvot eivät muutu kalibrointiohjelmassa yksittäisen kalibroinnin aikana. Muuttujalle *pos* lasketaan uusi arvo jokaisen kalibroitavan lattaviivan kohdalla. Muuttujan *pos* arvo on se kuva-alueen korkeuden tarkka pikseliarvo, jossa viivanreuna sijaitsee (Kuva 7).

Seuraavaksi lasketaan lattaviivan etäisyys kalibroinnin aloituskohdasta (*rodLine*) havaitun laserlukeman avulla:

$$rodLine = laserReading - red$$

*laserReading on laserlukema kalibroinnin aloituskohdasta ( $\mu m$ )*

*rodLine on lattaviivan etäisyys kalibroinnin aloituskohdasta ( $\mu m$ )*

Tämän jälkeen latta ajetaan seuraavan kalibroitavan lattaviivan kohdalle ja lasketaan uudet arvot muuttujille *red* ja *rodLine*. Edellisen lattaviivan kohdalla lasketut vanhat arvot on tallennettu kalibroitiohjelman muistiin. Lattaviivan lattakorjaus määritetään kaavalla:



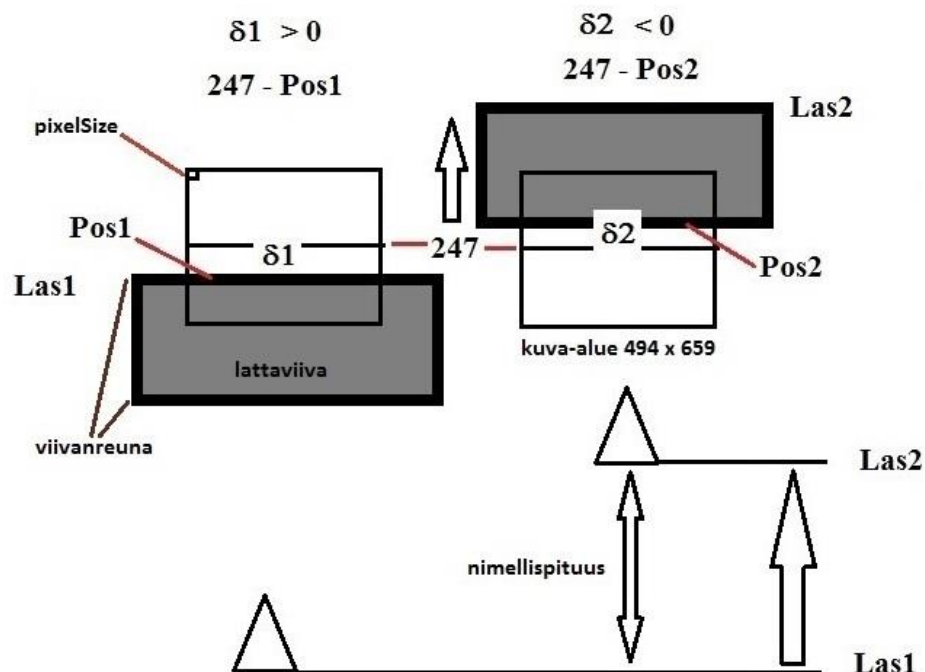
$$\text{rodCorrection} = (\text{rodLine} - \text{rodLinePrev}) - \text{nimellispituus}$$

*rodlinePrev on edellisen lattaviivan etäisyys kalibroinnin aloituskohdasta ( $\mu\text{m}$ )*

*nimellispituus on latan nominaalipituuden avulla määritetty lattaviivan oikea pituus ( $\mu\text{m}$ )*

*rodCorrection on lattakorjaus ( $\mu\text{m}$ )*

Lattakorjaus tarkoittaa kalibrointiohjelman laskeman lattaviivan pituuden ja vastaavan lattaviivan nimellispituuden erotusta. Tavallisesti lattakorjauksen arvo on  $\pm 0\text{--}30$  mikrometrin luokkaa. Tarkkuuteen vaikuttaa oleellisesti latan viivanreunojen laatu. Lattakorjaus voidaan laskea ainoastaan niille lattaviivoille, joiden nimellispituus tunnetaan.



$$\text{Lattakorjaus} = (\text{Las2} - ((247 - \text{Pos2}) * \text{pixelSize})) - (\text{Las1} - ((247 - \text{Pos1}) * \text{pixelSize})) - \text{nimellispituus}$$

Kuva 7. Havaintokuva lattakorjauksen laskennasta yhdelle lattaviivalle. Kuvassa on esitetty lattaviivan ylemmän ja alemman viivanreunan mahdollinen sijainti kuva-alueella. Piirros M Takalo.

Latan tyypistä ja pituudesta riippuen latassa voi olla yksittäisiä lattaviivoja muutamasta sadasta jopa tuhanteen. Kaikkia lattaviivoja ei välttämättä kalibroida ajan säästämiseksi, koska lattaviivoja voidaan ohittaa laskemalla lattakorjauksia myös ei-peräkkäisten viivanreunojen välille.

### 3.3.3 Systeemikalibrointi

Systeemikalibroinnissa verrataan vaaituskojeella määritettyjen latan korkeuslukemien (etäisyys latan pohjalevystä) erotusta todelliseen laserinterferometrillä mitattuun vastaavaan pituuteen, jolloin tulokseksi saadaan digitaalivaaitusjärjestelmän skaalakorjaus (systeemikorjaus). Kalibrointiohjelmassa systeemikalibrointi suoritetaan lattakalibroinnin kanssa samanaikaisesti. Systeemikorjaus voitaisiin laskea mistä kohdasta lattaa tahansa, sillä vaaituskojeella pystytään määrittämään korkeuslukema kaikkialta latta-asteikosta lukuun ottamatta alueita aivan latan ala- ja yläosissa. Yleinen suositus on, että 20–30 senttimetriä latta-asteikon ala- ja yläpäästä jätetään käyttämättä, koska niistä saatu korkeuslukema voi olla virheellinen.

Systeemikorjaus lattaviivalle lasketaan määrittämällä lattaviivan alemman ja ylemmän viivanreunojen kohdilta laserlukemat ja vaaituskojeen korkeuslukemat. Systeemikorjaus saadaan kaavasta:

$$\text{systemCorrection} = \Delta\text{laserReading} - \Delta\text{digitalLevelReading}$$

*$\Delta\text{laserReading}$  on laserinterferometrillä määritetty lattaviivan pituus ( $\mu\text{m}$ )*

*$\Delta\text{digitalLevelReading}$  on vaaituskojeella määritetty lattaviivan pituus ( $\mu\text{m}$ )*

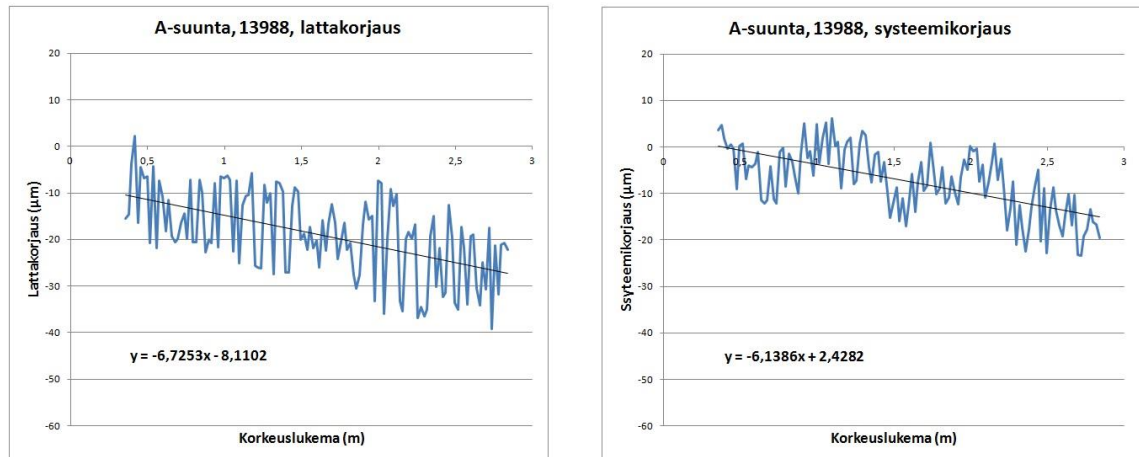
*systemCorrection on systeemikorjaus ( $\mu\text{m}$ )*

Systeemikorjauksen tarkkuuteen vaikuttaa latan viivanreunojen laatu ja vaaituskojeen ominaisuudet. Tavallisesti systeemikorjauksen arvo on  $\pm 0\text{--}100$  mikrometrin luokkaa. Systeemikorjauksen arvo on epätarkempi kuin lattakorjauksen, mikä johtuu vaaituskojeen korkeuslukeman huonommasta mittaustarkkuudesta ( $\pm 0,01\text{--}0,1$  mm) verrattuna lattakorjauksen kuvankäsittelylaskennan tarkkuuteen ( $\pm 0,005$  mm).

### 3.3.4 Kalibrointitulokset

Kalibrointitulokset muodostetaan yksittäisten latta- ja systeemikorjausten perusteella. Tulosten laskennassa käytetään latta- ja systeemikorjausten summia, jolloin saadaan yksittäisen lattaviivan etäisyyden virheen korjaus latan pohjalevyn suhteen. Useimmiten latta kalibroidaan molempiin suuntiin ensin latan yläosasta alaosaan ja tämän jälkeen välittömästi latan alaosaan yläosaan. Molemmissa tapauksissa latta- ja systeemikorjaukset lasketaan samoista lattaviivoista.

Kalibrointitulokset lasketaan muodostamalla latta- ja systeemikorjausten summista kuvaajat vaaituskojeella määritettyjen korkeuslukemien funktiona (Kuva 8). Latta- ja systeemikorjauksien summista muodostetaan erilliset kuvaajat molempiin suuntiin kalibroitaessa. Näin yhdellä kalibrointikerralla saadaan yhteensä neljä kuvaajaa.



Kuva 8. Latta- ja systeemikorjauksista muodostetut kuvaajat kalibroitaessa latta yhteen suuntaan. Tuloksiin on sovitettu regressiosuorat, joiden yhtälöt on esitetty kuvaajissa. Regressiosuoran kulmakerroin tarkoittaa lattametrin korjausta yksikössä  $\mu\text{m} / \text{m}$ .

Lattakalibroinnissa kuvaajan y-akselilla on lattakorjausten summa ja x-akselilla vaaituskojeen korkeuslukema. Systeemikalibroinnissa kuvaajan y-akselilla on systeemikorjausten summa ja x-akselilla vaaituskojeen korkeuslukema. Kuvaajiin sovitetaan regressiosuora, jonka kulmakerroin tarkoittaa lattametrin korjausta yksikössä  $\mu\text{m} / \text{m}$ . Kulmakertoimien poiketessa suuresti toisistaan eri kuvaajien välillä on kalibroinnin aikana vaikuttanut todennäköisesti jokin ulkopuolinen häiriö. Yleensä lopullinen lattametrin korjaus lasketaan kaikkien eri kuvaajien kulmakertoimien keskiarvosta. Lattametrin korjaus (K) vastaa latan mittakaavakorjausta, yleensä  $20\text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilaan redukoituna. Kentällä vaaituskojeella havaittu korkeusero korjataan lattametrin korjauksella seuraavasti:

$$\Delta H_K = \Delta H_{\text{havaittu}} + \Delta H_{\text{havaittu}} * K * 10^{-6}$$

$\Delta H_K$  on korjattu korkeusero (m)

$\Delta H_{\text{havaittu}}$  on havaittu korkeusero (m)

K on lattametrin korjaus ( $\mu\text{m} / \text{m}$ ) lämpötilassa  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

Jotta lattametrin korjaus voidaan redukoida haluttuun lämpötilaan, on tehtävä lämpölaajenemiskertoimen määrittäminen. Tämän vuoksi latta kalibroidaan vähintään kolmessa eri lämpötilassa, joissa kussakin määritetään erikseen lattametrin korjaus. Tavallisesti kalibrointilämpötilat ovat 10 °C, 20 °C ja 30 °C. Tällöin voidaan muodostaa kuvaaja, johon sijoitetaan yksittäisten lattametrin korjausten arvot kalibrointilämpötilan funktiona (Kuva 9). Pisteiden kautta sijoitetun suoran kulmakerroin ilmoittaa lattan keskimääräisen lämpölaajenemiskertoimen ( $\alpha$ ) yksikössä  $\mu\text{m} / \text{m}^\circ\text{C}$ . Lattametrin korjaus  $K$  ( $\mu\text{m} / \text{m}$ ) lämpötilassa 20 °C saadaan sijoittamalla regressiosuoran yhtälöön (Kuva 9)  $x$ :n arvoksi 20.

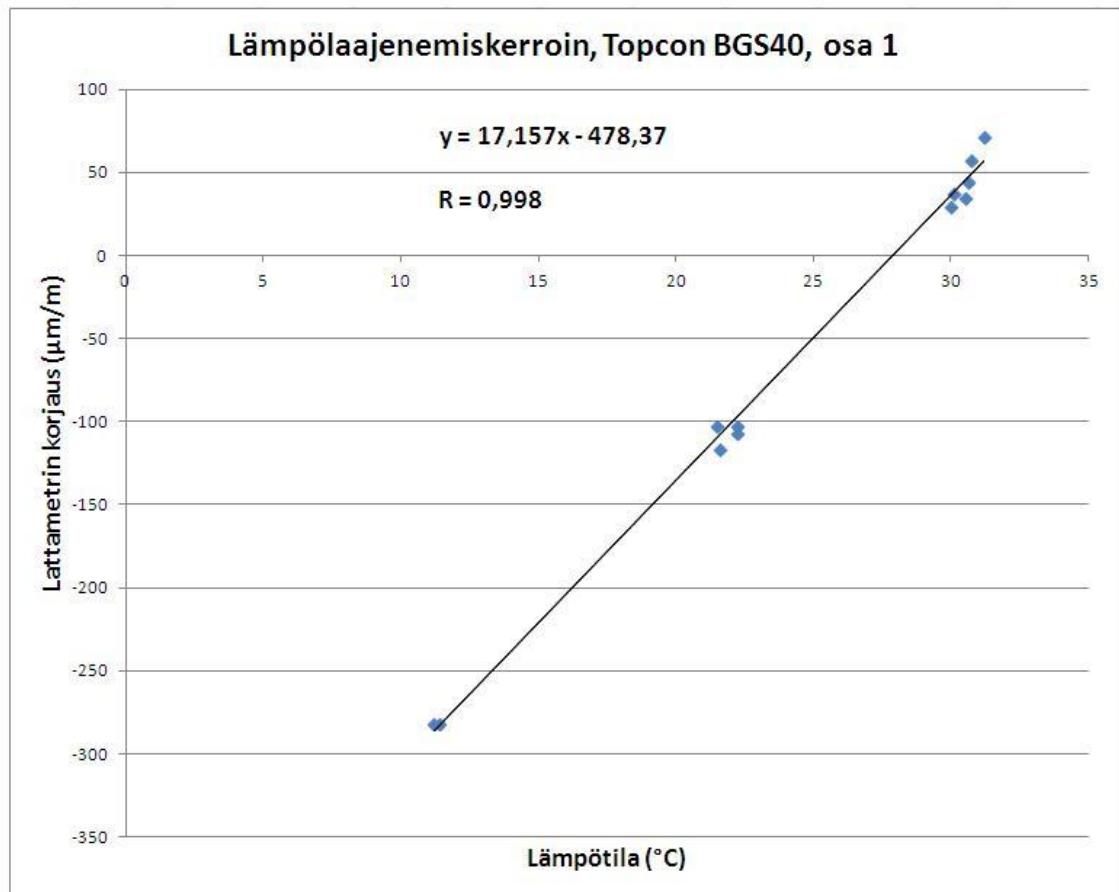
Vaaitusjärjestelmällä kentällä tehtyjen mittausten tuloksia korjataan ulkolämpötilaa vastaavalla lämpölaajenemiskertoimen arvolla seuraavasti:

$$\Delta H_t = \Delta H_{\text{havaittu}} * \alpha * (t - 20^\circ\text{C}) * 10^{-6}$$

$\Delta H_t$  on havaitun korkeuseron  $\Delta H_{\text{havaittu}}$  (m) lämpötilakorjaus lämpötilaan 20 °C [m]

$\alpha$  on lämpölaajenemiskerroin ( $\mu\text{m} / \text{m}^\circ\text{C}$ )

$t$  on ulkolämpötila (°C)



Kuva 9. Topconin BGS40 lasikuitulatalle määritetty lämpölaajenemiskerroin ( $\alpha = 17,157$ ) ja korrelaatiokerroin ( $R = 0,998$ ) eri kalibrointilämpötiloissa määritettyjen lattametrin korjausten avulla.

## 4 Laitteet ja kommunikointi

### 4.1 Teollisuus-PC

Lattakomparaattorin ohjausyksiköksi valittiin Axiomtekin eBOX640-860-FL teollisuus-PC (Kuva 10), johon asennettiin Windows-7 käyttöjärjestelmä. Teollisuus-PC sisältää 4 x USB 2.0 -porttia, 2 x USB 3.0 -porttia ja 4 x RS-232-porttia, joihin kaikki komparaattorin oheislaitteet voidaan kytkeä. Teollisuus-PC soveltuu hyvin kalibrointiolosuhteisiin, sillä laitteen käyttölämpötila on  $-5\text{ °C} - +50\text{ °C}$  ja ilmankosteuden sietokyky 90 prosenttia.



Kuva 10. Axiomtek eBOX640-860-FL Teollisuus-PC.

## 4.2 Laserinterferometri

### 4.2.1 Renishaw XL-80

Lattakomparaattoriin pituudenmittauslaitteeksi hankittiin Renishawin XL-80 laserinterferometri. Laserinterferometri lähettää yksitaajuista Helium Neon -lasersädettä, jonka aallonpituuden stabiilius on vakaa ja jäljitettävissä kansainvälisiin standardeihin [8]. Laitteen mittaustarkkuus on 0,001 mikrometriä. Laserinterferometri kytketään tietokoneeseen kahden metrin pituisella USB 2.0 -kaapelilla.

Laserinterferometrin lisäksi laserlukeman määrittämistä varten tarvitaan säteenjakaja, kaksi heijastinprismaa ja säätöjalusta. Lattakomparaattorissa käytössä olevaa mittausmenetelmää kutsutaan lineaariseksi mittaukseksi, joka toteutetaan yhdistämällä säteenjakaja ja toinen heijastinprismoista yhdeksi yhtenäiseksi osaksi (Kuva 12), jota kutsutaan lineaari-interferometriksi. Säteenjakaja ja heijastinprismat tilattiin Renishawilta laserinterferometrin yhteydessä. Säätöjalusta laserinterferometrille ja lineaari-interferometrille on teetetty Aalto-yliopistolla. Säätöjalusta on laitettu 9 senttimetriä paksun puutason päälle, joka puolestaan on asetettu kahden betoniharkon päälle. Puutaso on kiinnitetty reunoistaan kulmalevyillä komparaattorin puukehikkoon (Kuva 11).

Laserinterferometriä voidaan käyttää myös Renishawin omalla XL-Laser Linear measurement -ohjelmalla. Ohjelmasta voidaan muun muassa lukea reaaliaikaisesti laserlukema ja lasersäteen signaalinvoimakkuus sekä analysoida kerättyä mittausdataa. Ohjelmaa ei tarvita lattakomparaattorin kalibrointiohjelmassa, sillä laserinterferometriä ohjataan Visual Studio -ohjelman kautta, kuten kaikkia komparaattoriin liitettyjä oheislaitteita.

Ennen laserinterferometrin käyttöä tietokoneeseen tulee asentaa tarvittavat ajurit. Renishawin internet sivuilta on saatavilla Renishaw SDK (Software Development Kit) -paketti, joka sisältää COM-pohjaiset ohjelmakirjastot Visual Studio ohjelmointia varten. COM (Component Object Model) on ohjelmointialustasta riippumaton, jaettu oliopohjainen systeemi, joka tarjoaa rajapinnan laitteen ja tietokoneen väliselle vuorovaikutukselle [9]. Kirjastot sisältävät valmiit rajapinnat (esim. aliohjelmat ja funktiot) laserin eri toiminnoille ja ominaisuuksille.

#### 4.2.2 Lasersäteen suuntaus

Lasersäde joudutaan usein suuntaamaan uudestaan komparaattorihuoneen lämpötilan muuttuessa merkittävästi, sillä eri materiaalien lämpölaajeneminen komparaattorissa aiheuttaa sen, että latan alkuperäinen kulkulinja komparaattorissa muuttuu. Tällöin paluusäde ei enää osu keskelle laserinterferometrin lasersäteen paluuporttia. Suuntaamista varten laserinterferometrin säätöjalusta koostuu metallisesta pohjalevystä, jonka päälle on kiinnitetty kaksi erillistä pienempää metallista levyä (Kuva 11). Pienemmät levyt on kiinnitetty pohjalevyyn säätöruuveilla, joilla pystytään säätämään levyjen kallistusta. Ulomman levyn päällä on laserinterferometri ja sisemmän levyn päällä lineaariinterferometri. Aluksi tulee varmistaa esimerkiksi vatupassin avulla, että molemmat levyt ovat vaakasuorassa ja samalla korkeudella.

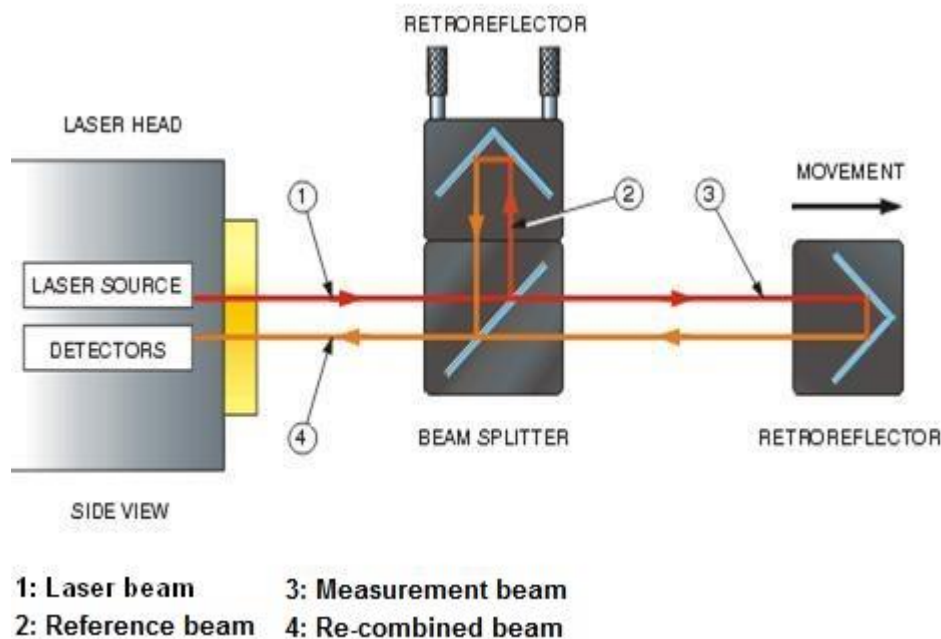


Kuva 11. Laserinterferometrin metallinen säätöjalusta asetettuna puutason päälle. Säätöjaluksen asemaa säätöpöydällä voidaan säätää tarkasti puupöytään kiinnitettyjen säätöruuvien avulla.

Kuvassa 12 on esitetty lasersäteen kulkumatka laserinterferometrin valolähteestä lineaari-interferometrin ja heijastinprisman kautta takaisin laserinterferometrin paluuporttiin. Ennen kalibroinnin aloitusta lasersäde tulee suunnata siten, että latan pohjalevyyn kiinnitetystä heijastinprismasta takaisin heijastunut lasersäde osuu paluuporttiin koko latan kulkumatkalta.

Lasersäde lähtee laserinterferometrissä vaakasuoraan ja lineaari-interferometrissä heijastuu takaisin referenssisäde (puolet alkuperäisestä säteestä), joka suuntautuu laserinterferometrin paluuporttiin. Lisäksi lineaari-interferometrissä heijastuu ylöspäin säde (toinen puoli alkuperäisestä säteestä), joka osuu latan pohjalevyyn kiinnitettyyn heijastinprismaan. Säde heijastuu prismasta takaisin lineaari-interferometriin, josta se heijastuu edelleen paluuporttiin. Referenssisäde ja latan pohjalevyn prismasta heijastunut säde muodostavat interferenssisäteitä, josta laserinterferometrin detektori määrittää laserlukeman. Laserinterferometrin toiminta noudattaa niin sanottua Michelsonin interferometrin toimintaperiaatteetta [8].





Kuva 12. Lineaarisen mittausmenetelmän toimintaperiaate. Asettamalla lineaari-interferometri vaakatasoon voidaan mitata pystysuuntaista liikettä. Kuva Renishaw manuaalista.

Lasersäteen suuntauksen alkuvaiheessa latan pohjalevyyn kiinnitetty heijastinprisma tuodaan mahdollisimman lähelle lineaari-interferometriä ajamalla askelmoottorilla kelkka mahdollisimman alas. Siirretään latan pohjalevyssä olevaa heijastinprismaa siten, että paluusäde osuu keskelle laserinterferometrin paluuporttia. Seuraavaksi ajetaan kelkka kalibroinnin ääriasentoon, jolloin lineaari-interferometrin ja heijastinprisman välinen välimatka on latasta riippuen yleensä 2–3 metrin luokkaa. Kun kelkka on ääriasennossa, katsotaan osuuko paluusäde paluuporttiin vai meneekö se ohi. Paluusäteen mennessä ohi esimerkiksi 2 millimetriä vasemmalta puolelta paluuporttia, muutetaan lineaari-interferometrin kallistumaa säätöruuveista siten, että paluusäde menee 2 millimetriä ohi oikealta puolelta paluuporttia. Tämän jälkeen siirtämällä latan pohjalevyyn heijastinprismaa asetetaan paluusäde osumaan keskelle paluuporttia. Latta ajetaan takaisin alkuasentoon ja tarvittaessa suoritetaan samat toimenpiteet uudestaan samassa järjestyksessä kunnes säde osuu paluuporttiin koko kalibrointimatkalta. Suuntaus vaatii yleensä 1–3 latan edestakaista ajoa säätötoimenpiteineen.

Mikäli kelkan liike ei ole riittävän suoraviivaista ylöspäin ei lasersädettä voida suunnata, vaan täytyy korjata lineaarijohteiden suoruus. Lineaarijohteet on kiinnitetty puukehikoon ruuvien avulla siten, että johteiden asentoihin voidaan tehdä muutoksia. Mittaamalla lineaarijohteiden suoruus esimerkiksi luotilangan tai ulkoisen lasersädeanturin

avulla voidaan varmistua siitä, että kelkka kulkee suoraviivaisesti koko kalibroitimattakan.

#### 4.2.3 Aallonpituuden kompensointi

Lasersäteen aallonpituus riippuu lämpötilasta, paineesta ja ilmankosteudesta. Mikäli jokin näistä suureista muuttuu, täytyy havaitun laserlukeman arvoon tehdä korjaus. Aallonpituuden kompensoitakorjaus olisi voitu määrittää Renishawin omalla XC-80 kompensoitoyksiköllä, mutta osittain sen korkean hinnan takia ratkaisu toteutettiin siten, että kalibroitiohjelma lukee lämpötilan, paineen ja ilmankosteuden arvot erikseen sääasemalta ja laskee korjauksen.

Lasersäteen aallonpituus normaaliolosuhteissa on 633 nanometriä. Normaaliolosuhteissa sääparametrien arvot ovat seuraavat:  $t = 20 \text{ °C}$  (lämpötila),  $p = 760 \text{ mmHg}$  (paine) ja  $H = 50 \text{ %}$  (ilmankosteus). Laserinterferometri määrittää oletuksena laserlukeman näillä sääparametrien arvoilla. Laserlukemaan tehdään korjaus, jonka suuruus riippuu kalibroitihuoneessa vallitsevista sääparametrien arvoista. Aallonpituuden kompensoinnissa lasketaan ensin kompensoitakorjausluku (comcoe) seuraavalla kaavalla [2]:

$$\text{comcoe} = \frac{10^{12}}{N+10^6} - 999000 - c_0, \text{ jossa}$$

$$N = 0,38363919 * p * \left[ \frac{1 + (0,817 - 0,0133 * t) * p * 10^{-6}}{1 + 0,003661 * t} \right] - 0,0030339 * H * e^{0,057627 * t}$$

*t on lämpötila (°C)*

*p on paine (mmHg)*

*H on ilmankosteus (%)*

*e on Neperin luku ( $e \approx 2,718282$ )*

*c<sub>0</sub> on sääparametreja  $t = 20 \text{ °C}$ ,  $p = 760 \text{ mmHg}$  ja  $H = 50 \text{ %}$  vastaava kompensoitakorjausluku ( $c_0 = 728,76621$ )*

Comcoen arvo riippuu ainoastaan lämpötilan, paineen ja ilmankosteuden arvoista. Korjatun laserlukeman ( $las_K$ ) arvo on:

$$las_K = las_{havaittu} [\mu\text{m}] + las_{havaittu} [\text{m}] * comcoe$$

jossa havaitun laserlukeman ( $las_{havaittu} [\text{m}]$ ) ja kompensatiokorjausluvun ( $comcoe$ ) tulo (laserlukeman pituuskorjaus  $[\mu\text{m}]$ ) lisätään havaitun laserlukeman ( $las_{havaittu} [\mu\text{m}]$ ) arvoon, jolloin saadaan tulokseksi korjattu laserlukema ( $las_K [\mu\text{m}]$ ). Korjattua laserlukemaa käytetään latta- ja systeemikorjausten laskennassa.

#### 4.2.4 Laserlukeman määrittäminen kalibrointiohjelmassa

Kalibrointiohjelmassa laserlukema lasketaan 10 peräkkäisen laserlukeman mittauksen keskiarvona. Mittausten välillä on 50 millisekunnin viive. Ennen laserlukeman keskiarvon muodostusta tarkastetaan, ettei yhdenkään mitatun laserlukeman arvo poikkea muista mitatuista laserlukeman arvoista yli 0,2 mikrometriä. Menetelmällä poistetaan mahdollisuus latan pystysuuntaiseen liikkumiseen. Laserlukeman määrittäminen eli 10 peräkkäistä mittausta aloitetaan alusta, jos poikkeaman suuruus ylittää raja-arvon.

### 4.3 CCD-kamera

#### 4.3.1 Basler ace acA640-120 $\mu\text{m}$

Lattakomparaattoriin hankittiin Baslerin ace-sarjan acA640-120  $\mu\text{m}$  -tyyppinen CCD-kamera (Kuva 5). Kamera on kooltaan pieni (n. 30 mm x 30 mm x 30 mm) ja se painaa 80 grammaa. Kuva-alueen koko on 659 x 494 pikseliä ja kuvanottonopeus on 120 kuvaa sekunnissa. CCD-sensorin koko on 3,69 mm x 2,77 mm ja yksittäisen pikselin koko 5,6  $\mu\text{m}$  x 5,6  $\mu\text{m}$ . Kameran saadaan harmaasävykuvaa Mono 8 -formaattissa, jolloin yksittäisellä pikselillä voi olla 256 eri harmaasävyarvoa. Kameran objektiiviksi valittiin 35 mm kiinteäpolttovälinen konenäköobjektiivi. Kamera yhdistetään tietokoneeseen USB 3.0 -kaapelilla, josta kamera saa myös käyttövirran.

#### 4.3.2 Kameran asetukset ja ohjelmisto

Baslerin internet sivuilta on ladattavissa Pylon Viewer -ohjelmisto, jolla voidaan käyttää kaikkia Baslerin kameroita. Ohjelma tunnistaa kameran automaattisesti kameran ollessa kytkettynä tietokoneeseen USB 3.0 -porttiin. Ohjelmalla on mahdollista näyttää jatkuvaa

kuvaa tai kaapata yksittäisiä kuvia. Lisäksi ohjelmasta voidaan muuttaa kameran eri toimintaparametreja. Tämän sovelluksen kannalta oleellisin parametri on vahvistus (Gain), joka vaikuttaa näkyvän kuvan kirkkauteen. Kalibroitiohjelmassa vahvistus säädetään useimmiten automaattiasetukselle, jolloin kamera säätää kuvan kirkkautta automaattisesti sopivaksi ympäröivän valaistuksen perusteella.

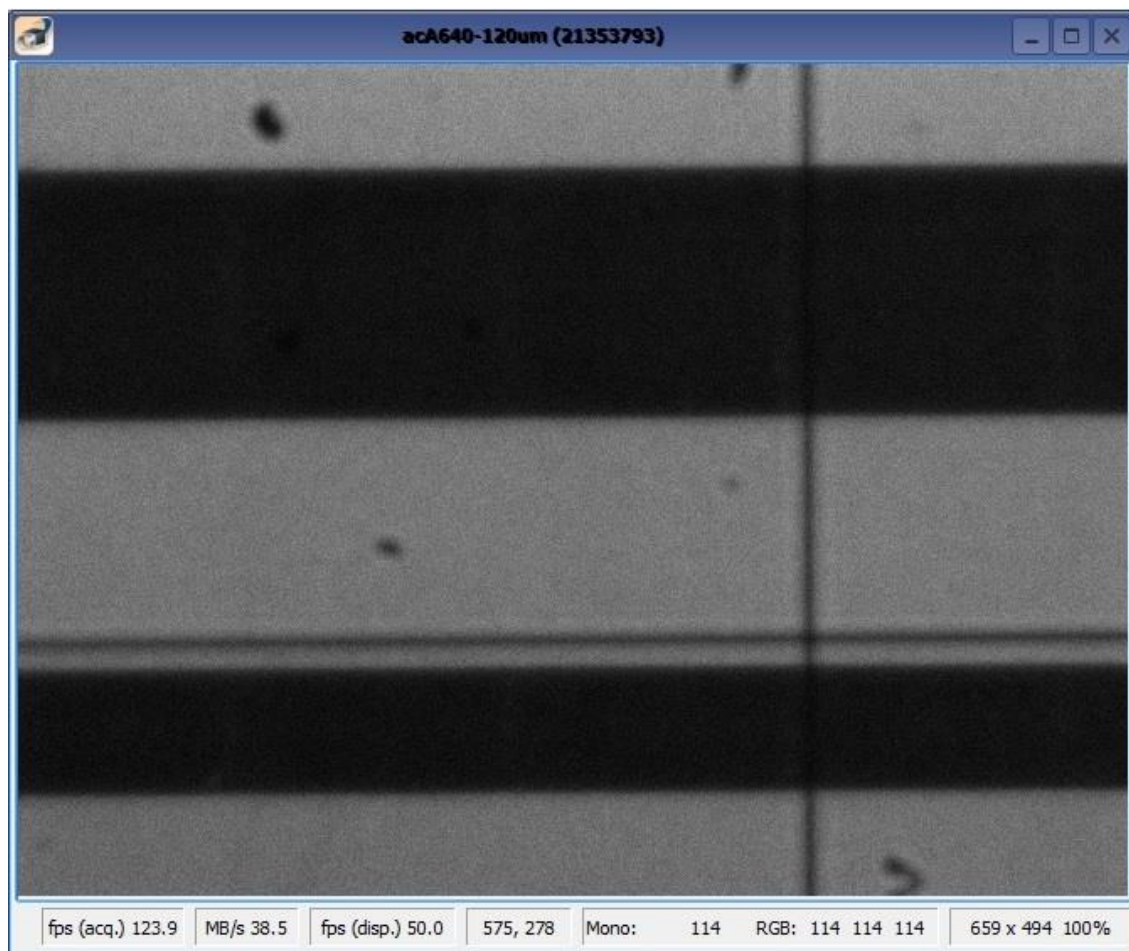
Pylon Viewer -ohjelmistoa käytetään latta- ja systeemikalibroinnissa apuohjelmana, koska sillä voidaan hakea manuaalisesti kalibroinnin aloituskohta. Aluksi ohjelma asetetaan näyttämään jatkuvaa kuvaa. Tämän jälkeen latta ajetaan askelmootorilla kalibroinnin aloituskohtaan siten, että latan aloitusviiva näkyy kuva-alueella. Näin kalibroinnin aloitusviiva pystytään asettamaan kameran kuva-alueella tarkasti haluttuun kohtaan.

Baslerin sivuilta ladattiin kameralle .NET-pohjainen ohjelmakirjasto. .NET Framework on Microsoftin oma ohjelmistokomponenttikirjasto ja .NET tyyppisiä kirjastoja käytetään Visual Studio.NET -sovelluksissa. Pylon.NET kirjasto sisältää menetelmät mm. kameran yhteyden avaamiseen ja sulkemiseen, kuvankaappaukseen ja kameran parametrien muokkaukseen.

#### 4.3.3 Valaistus

Latta-asteikon riittävä valaistus on tärkeää, jotta CCD-kamera pystyy muodostamaan tarpeeksi kirkkaan ja terävän kuvan kohteesta. Mitä terävämpi kuva on, sitä selkeämmin latan viivanreuna näkyy kuvasta (Kuva 13). Tällöin pikseleiden harmaasävyarvojen muutoskohta kuva-alueella näkyy tarkemmin, jolloin viivanreunan tarkka paikka voidaan myös määrittää tarkemmin. Valaistus ei saa kuitenkaan olla liian kirkas, sillä silloin kuvasta tulee ylivalottunut ja siten epätarkka.

Valaistuksen säätämistä varten lattakomparaattoriin asennettiin kaksi LED-valaisinta. Valaisimissa on taipuva runko, minkä ansiosta ne voidaan kohdistaa haluttuun kohtaan. Valaisimet asennettiin ruuvikiinnikkeiden avulla noin puolen metrin etäisyydelle latasta symmetrisesti sen molemmille puolille.



Kuva 13. Pylon Viewer -ohjelman kuva Leican GPCL3 invarlatan latta-asteikosta. Kuvassa näkyy myös osa vaaituskojeen kuvatasossa olevasta tähtäysristikosta.

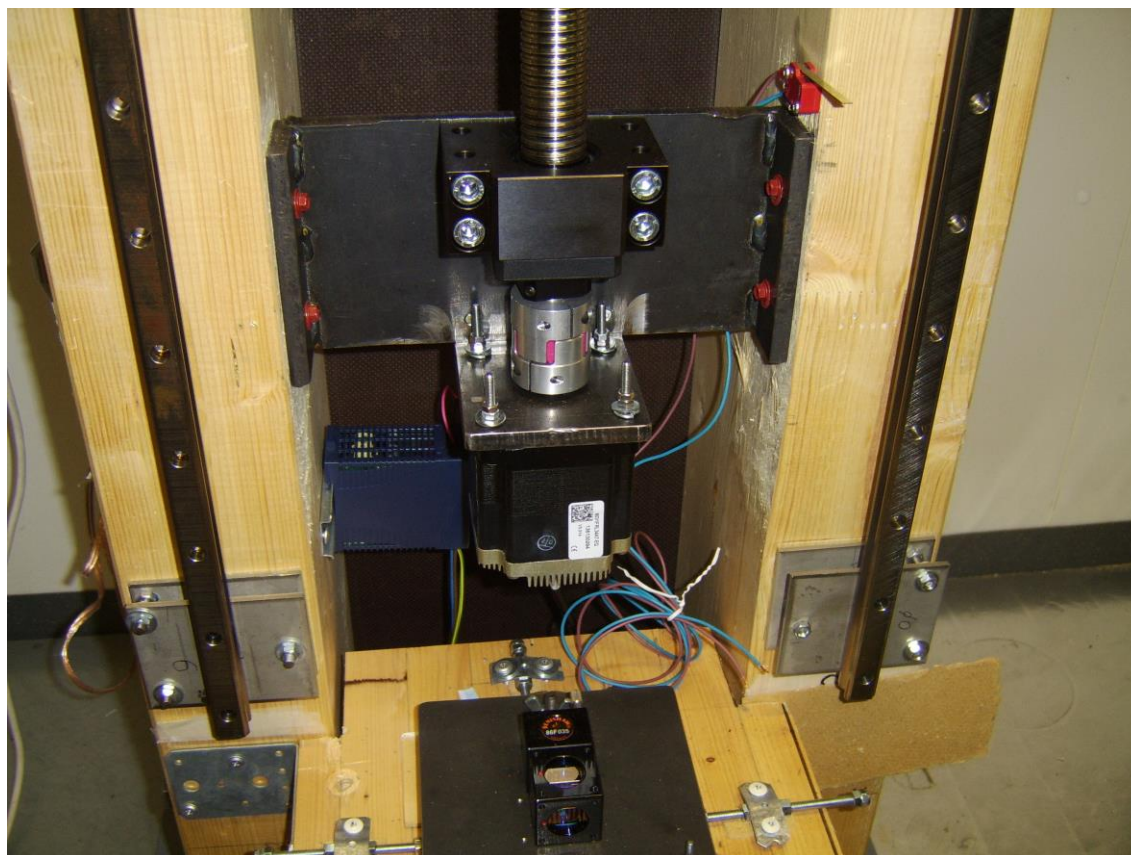
#### 4.4 Askelmoottori

##### 4.4.1 Schneider MDrive 34 Plus

Askelmoottoriksi valittiin Schneider Electricin MDrive 34 Plus -mallinen askelmoottori (Kuva 14), johon on integroitu ohjain, enkooderi ja virtalähde. MDrive 34 Plus on täysin ohjelmoitava askelmoottori, jolla päästään hyvin suureen ajotarkkuuteen. Suurin mahdollinen ja kalibrointiohjelmassa käytössä oleva ajotarkkuus on 51200 askelta yhtä kierrosta kohden, jonka ansiosta askelmoottorilla pystytään ajamaan kuularuuvia hyvin tarkasti halutun matkan verran.

Askelmoottori saa käyttöjännitteen TKT-LAMBDA DDP30-24 (1.3 A) hakkuriteholähteestä, joka on kiinnitetty komparaattorin puukehikon alaosaan. Kuvasta 14 käy ilmi askelmoottorin kiinnitys lattakomparaattoriin sekä askelmoottorin ja kuularuuvien välinen

liitäntämekanismi. Askelmoottori yhdistetään tietokoneeseen RS-485-kaapelilla. Kaapelissa on USB 2.0/RS-485 -muunnin, joka mahdollistaa kytkennän tietokoneen USB 2.0 -porttiin. Lisäksi kaapeliin on kytketty ylijännitesuoja, joka on maadoitettu lattakomparaattorin teräksiseen jalustaan. Ylijännitesuoja suojaa tietokonetta askelmoottorilta mahdollisesti tulevilta virtapiikeiltä.



Kuva 14. Askelmoottorin ja kuularuuvien kytkennät lattakomparaattorissa. Askelmoottori on ruuvattu kiinni metalliseen kiinnityslaippaan ja virtalähde askelmoottorille on kiinnitetty DIN-kiskolla puukehikkoon.

#### 4.4.2 Ohjelmointi ja käyttö

Askelmoottoria voidaan käyttää Schneiderin omalla IMS-Terminal ohjelmistolla, joka on ladattavissa Schneiderin internet sivuilta. Ennen ohjelman käyttöä tulee tietokoneeseen asentaa askelmoottorin ajurit, jotta tietokone tunnistaa laitteen. Askelmoottorille voidaan antaa yksittäisiä ohjaukskäskyjä tai luoda kokonaisia ohjelmia. Syötettävät komennot ovat yksinkertaisia merkkijonoja, jotka koostuvat yleensä yhdestä tai kahdesta kirjaimesta.

Askelmoottorin ohjaus Visual Studiosta on yksinkertaisempaa kuin laserinterferometrin ja CCD-kameran, sillä askelmoottorin käyttö ei edellytä ohjelmakirjastojen asennusta ja käyttöä. Aluksi kalibrointiohjelmasta määritetään oikeat sarjaportin tiedonsiirtoparametrit ja avataan yhteys askelmoottoriin. Tiedonsiirtoparametreista tulee määrittää portin nimi, tiedonsiirtonopeus, pariteetti, databittien määrä ja stopbittien määrä. Kommunikointi askelmoottorin ja tietokoneen välillä tapahtuu sarjaporttiin syötetyillä komennolla ja sarjaportista vastaanotettujen askelmoottorin tilatietojen avulla.

Sarjaporttiin lähetetään komentoja merkkijonoina ja askelmoottori reagoi komentoon sen tunnistaessa merkkijonon. Kaikki askelmoottorin hyväksymät komennot ovat nähtävillä askelmoottorin manuaalista. Ennen moottorin käyttöä tulee asettaa systeemiparametrien arvot oikeiksi tai moottori voi käyttäytyä arvaamattomasti. Näitä parametreja ovat muun muassa askelmoottorin pyörimisnopeus, alkunopeus, kiihtyvyys, hidastuvuus, pitovirta ja käyttövirta. Esimerkiksi syötettäessä porttiin merkkijono "RC 50" moottori asettaa käyttövirran tasoksi 50 prosenttia maksimista. Vastaavasti komento "MR 51200" pyörittää moottoria positiiviseen suuntaan 51200 askelta eli yhden täyden kierroksen.

#### 4.4.3 Välimatkataulukot

Latta-asteikon kalibrointi on mahdollista vain jos tunnetaan asteikkoviivojen väliset etäisyydet. Siksi tietokoneen kovalevylle on tallennettu tekstitiedostoina välimatkataulukot, jotka sisältävät kaikkien eri lattojen kalibroittavien perättäisten lattaviivanreunojen etäisyydet toisistaan. Trimblen, Leican ja Topconin latoille on kaikille omat välimatkataulukonsa. Ennen kalibroinnin aloitusta kalibrointiohjelma tallentaa tekstitiedostosta lattaviivojen välimatkat ohjelman muistiin.

Kalibrointiohjelmassa askelmoottori ajaa automaattisesti oikean pituisen matkan seuraavan lattaviivan kohdalle. Vaadittava askelten lukumäärä välimatkalle saadaan laskettua helposti, sillä tiedetään että yhden millimetrin nousu tai lasku latan korkeudessa vastaa noin 10240 askelta. Esimerkiksi jos seuraavan lattaviivan etäisyys on 20 millimetriä, vaaditaan askelmoottorilta  $10240 \times 20 = 204800$  askelta.

Viivanreuna asettuu kameran kuva-alueella aina melko tarkasti haluttuun kohtaan, sillä askelmoottorilla ajettaessa poikkeama tavoitematkasta on yleensä suurimmillaankin vain noin 20 mikrometrin luokkaa. Kalibrointiohjelmassa tavoitematkaa verrataan jokai-

sen lattaviivan kohdalla laserinterferometrillä mitattuun matkaan ja tehdään korjaus seuraavan lattaviivan ajomatkaan, mikäli poikkeaman suuruus ylittää 20 mikrometriä.

#### 4.4.4 Rajakytkimet

Lattakomparaattorin puukehikon sisäpuolelle asennettiin mekaaniset rajakytkimet, jotka katkaisevat askelmoottorista virran siinä tapauksessa jos kelkka on liikkumassa yli sallittujen rajojen. Rajakytkimiä on asennettu kaksi kappaletta, joista ensimmäinen komparaattorin alaosaan hieman askelmoottorin yläpuolelle (Kuva 14) ja toinen noin 7 metrin korkeudelle komparaattorin yläosaan. Kytkinten toiminta perustuu siihen, että ajettaessa kelkkaa liian pitkälle kelkan ala- tai yläosa painaa rajakytkimen metallisen koskettimen sisään, jolloin virtapiiri askelmoottorin ja askelmoottorin virtalähteen välillä katkeaa. Rajakytkimet ovat hyödyllinen suoja askelmoottorin manuaaliajossa, jossa ohjelman käyttäjä voi epähuomiossa syöttää liian suuren ajomatkan askelmoottorille tai antaa väärän ajosuunnan.

#### 4.5 Sääasema

##### 4.5.1 Almemo 2590-4S

Lämpötilan mittausta ja keruuta varten hankittiin Ahlbornin 4-kanavainen Almemo 2590-4S dataloggeri (Kuva 15). Dataloggeri toimii kolmella AA-paristolla ja se sisältää LCD-näytön. Laite kytketään USB 2.0 -kaapelilla tietokoneen USB 2.0 -porttiin.

Dataloggeriin liitettiin neljä Ahlbornin FTF109PH-lämpöanturia, jotka mittaavat lämpötilaa 0,1 °C tarkkuudella. Anturi sisältää NiCr-Ni (NikkeliKromi - Nikkeli) lämpönauhasensorin ja 1,5 metrin pituisen datakaapelin, joka kytketään dataloggeriin. Anturit kiinnitettiin ruuveilla lattakomparaattorin puukehikon sivuosaan siten, että ensimmäinen anturi on noin 1 metrin korkeudella tasosta, jolla laserinterferometri sijaitsee. Toinen anturi on 2 metrin korkeudella, kolmas anturi 3 metrin korkeudella ja neljäs anturi puukehikon yläosassa noin 8 metrin korkeudessa. Dataloggeri asetettiin muoviseen koriin, joka ruuvattiin kiinni lattakomparaattorin kehikon puolen välin korkeudelle. Ylimmälle ja alimmalle anturille tilattiin jatkokaapelit, sillä antureiden alkuperäisten kaapeleiden pituudet eivät olleet riittäviä.



Kommunikointi tietokoneen ja dataloggerin välillä tapahtuu USB 2.0 -väylän välityksellä. Aluksi laite yhdistetään tietokoneeseen määrittämällä sarjaportin tiedonsiirtoparametrit ja avaamalla yhteys. Dataloggeri sisältää neljä kanavaa ja ne on nimetty merkkijonoilla "M00", "M01", "M02" ja "M03". Esimerkiksi jos kanavasta 0 halutaan lämpötila-arvo, syötetään sarjaporttiin komento "M00", jonka jälkeen syötetään vielä mittauskomento "p". Laite vastaa lähettämällä sarjaporttiin merkkijonon, joka sisältää lämpötilan senhetkisen mittausarvon.



Kuva 15. Vasemmalla yksi FTF109PH-lämpöantureista asennettuna lattakomparaattorin puukehikon sivuosaan. Oikealla Almemo 2590-4S dataloggeri, johon kytketään neljä lämpöanturia.

#### 4.5.2 Mittausolosuhteet

Koska komparaattorihuone on noin 10 metriä korkea, muodostuu huoneeseen lämpötilagradientti, joka tarkoittaa lämpötilaeroa huoneen ala- ja yläosien välillä. Normaalisti kalibroinnin aikana huoneessa on ilmastointi päällä, jonka tarkoituksena on ylläpitää haluttu lämpötila ja tasoittaa huoneen lämpötilaeroja. Mahdollisten lämpötilaerojen takia lämpötila-antureita on asetettu eri korkeuksille.

Kalibroinnin aikana lämpötila-arvot luetaan lämpöantureilta aina silloin, kun määritetään laserlukema tai vaaituskojeen korkeuslukema. Korkeuslukeman määrittämisen yhteydessä luetaan lämpötila-arvot aina kaikilta neljältä anturilta ja lasketaan keskiarvo. Lämpötila-arvot tallennetaan tulostiedostoihin, joista voidaan havaita tapahtuneet lämpötilan muutokset kalibroinnin eri vaiheissa.

Laserlukeman määrittämisen yhteydessä luetaan lämpötila-arvot niiltä antureilta, jotka sijaitsevat lasersäteiden kulkualueella. Lämpötila määritetään siis joko pelkästään alimmasta anturista, alimman ja toiseksi alimman anturin keskiarvosta tai kaikkien kolmen alimman anturin keskiarvoista. Kahdeksassa metrissä olevaa ylintä anturia käytetään ainoastaan vaaituskojeen korkeuslukeman määrittämisen yhteydessä laskettaessa kaikkien neljän anturilukemien keskiarvoa.

#### 4.5.3 Lämpötila, paine ja ilmankosteus

Lämpötila on mittaussuureista kriittisin, sillä sen muutos vaikuttaa merkittävimmin kalibrointituloksiin ja lasersäteiden aallonpituuteen. Yhden celsiusasteen muutos lämpötilassa aiheuttaa noin 1 ppm:n suuruisen muutoksen laserlukeman arvoon ja vajaan yhden mikrometrin muutoksen latan pituuteen metriä kohden, sillä invarlatan lämpölaajenemiskerroin on n. 0,8 ppm / °C. Siksi on tärkeää, että lämpötilaa mitataan tarkasti ja luotettavasti.

Paineen vaikutus lasersäteiden aallonpituuteen on vähäisempi kuin lämpötilan, noin 1/10. Koska paineen ei oleteta muuttuvan merkittävästi noin 1–2 tuntia kestävässä kalibroinnin aikana, ei sen jatkuva seuranta paineantureiden avulla ole välttämätöntä. Paine luetaan erillisestä sääasemasta, jonka tarkkuus on 0,1 millibaaria, ja se syötetään kalibrointiohjelmaan ennen kalibroinnin aloitusta.

Ilmankosteuden merkitys vaikuttavista suureista on vähäisin ja myös sen arvo syötetään vakiona kalibrointiohjelmaan ennen kalibroinnin aloitusta. Ilmankosteus luetaan erillisestä sääasemasta, jonka tarkkuus on yksi prosenttiyksikkö. Verrattuna lämpötilaan ja paineeseen, ilmankosteuden muutos vaikuttaa vähiten lasersäteiden aallonpituuteen, sillä vasta noin 50 % muutos ilmankosteuden arvossa aiheuttaa 1 ppm:n muutoksen laserlukeman arvoon.

## 5 Digitaalinen kuvankäsittely

### 5.1 Yleistä

Digitaalista kuvankäsittelyä tarvitaan kalibroinnissa (Ks. Liite 1) yksittäisen lattaviivan tarkan paikan määrittämisessä. Digitaalisella kuvankäsittelyllä tarkoitetaan CCD-kameran kuva-alueen pikseleiden harmaasävyarvojen perusteella tehtävää laskentaa viivanreunan tarkan paikan määrittämiseksi. Pikselin harmaasävyarvo vaihtelee väliltä 0–255, missä arvo 0 vastaa täysin mustaa ja arvo 255 täysin valkoista väriä.

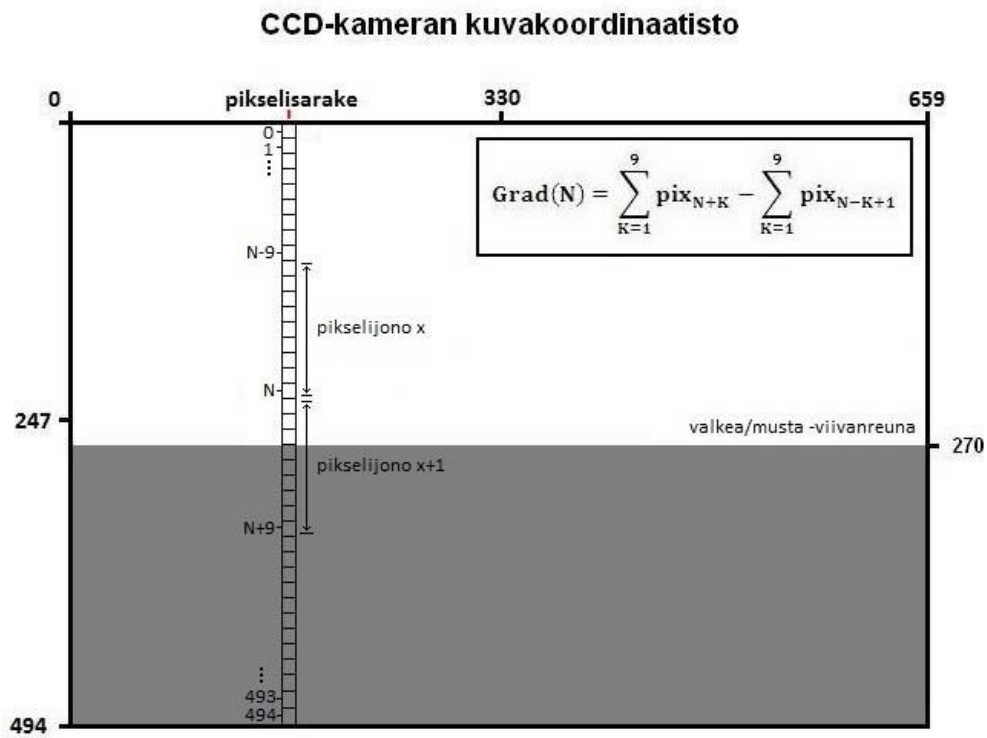
Latan viivanreunan sijainnin määrittämiseksi ajetaan viivanreuna askelmoottorilla mahdollisimman lähelle kuva-alueen keskikohtaa. Viivanreuna on tyypiltään joko valkea/musta- tai musta/valkea -reuna. Kuva-alueella saa näkyä samanaikaisesti vain yksi saman tyypin viivanreuna. Jos lattaviivat ovat hyvin ohuita, voidaan kuva-aluetta pienentää ottamalla vain tietty määrä pikselirivejä tai pikselisarakeita tarkasteluun eli käytetään rajattua kuvaikkunaa joko kuva-alueen keskeltä tai reunalta.

### 5.2 Pikapaikannus

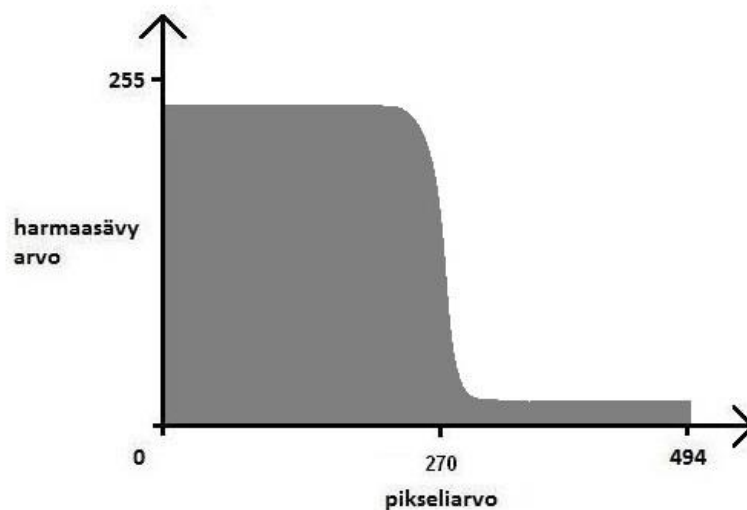
Pikapaikannuksen avulla määritetään viivanreunan paikka likimääräisesti ja sen avulla tiedetään tarkan paikannuksen määrittämisaluetta. Pikapaikannus toimii siten, että kuva-alueesta otetaan 60 pikselisaraketta, jolloin sarakkeiden väli on 10 pikseliä, tarkasteluun. Sarake sisältää 494 pikseliä ja jokaisesta sarakkeesta etsitään viivanreunan paikka. Sarake voi sisältää vähemmänkin pikseleitä, jos kuva-alueen korkeutta on supistettu. Vastaavasti tarkasteltavien pikselisarakeiden lukumäärä on alhaisempi, jos kuva-alueen leveyttä on supistettu. Viivanreunan kohdalla sarakkeiden pikseleiden harmaasävyarvot muuttuvat sen mukaisesti onko kyseessä valkea/musta- vai musta/valkea -reuna.

Pikapaikannuksessa käytetään gradienttimenetelmää. Menetelmässä otetaan tarkasteluun aina kaksi peräkkäistä yhdeksän pikselin pituista pikselijonoa aloittaen sarakkeen alusta eli kuva-alueen yläosasta. Molempien pikselijonojen yksittäisten pikseleiden harmaasävyarvot summataan yhteen ja sen jälkeen jälkimmäisen pikselijonon pikseleiden harmaasävyarvojen summa vähennetään edellisen pikselijonon pikseleiden harmaasävyarvojen summasta. Laskettu tulos tallennetaan kalibrointiohjelman Grad-

nimiseen taulukkoon ja siirrytään sarakkeessa seuraavaan yhdeksän pikselin pituisen pikselijonon kohdalle ja suoritetaan samat laskutoimenpiteet. Näin jatketaan kunnes koko pikselisarake on käyty läpi. Yksi Grad-taulukon alkio muodostetaan aina kahdesta peräkkäisestä yhdeksän pikselin pituisesta pikselijonosta ja taulukon alkio on indeksoitu ensimmäisen pikselijonon viimeisen pikselin rivi-arvon mukaisesti (Kuva 16). Riviarvolla tarkoitetaan sitä kuva-alueen vaakarivin pikseliarvoa, jolla kyseinen pikseli sijaitsee.



### Pikselijonon harmaasävyprofiili



Kuva 16. Viivanreunan paikan määrittämisen periaate pikapaikannuksessa.

Grad-taulukosta voidaan nyt etsiä se kohta missä viivanreuna sijaitsee. Määritettäessä valkea/musta -viivanreunan sijaintia, etsitään taulukosta  $\text{Grad}(i)$  suurin negatiivinen arvo. Viivanreunan sijainti on taulukon indeksi  $i$ . Vastaavasti määritettäessä musta/valkea -viivanreunan sijaintia, etsitään taulukosta suurin positiivinen arvo. Lopullinen pikapaikannuksen tulos saadaan, kun lasketaan jokaisesta 60 sarakkeesta viivanreunan sijainti ja lasketaan niistä keskiarvo. Pikapaikannuksen tuloksen yksikkö on pikseli. Esimerkiksi jos viivanreuna sijaitisi täysin keskellä kuva-aluetta, saataisiin pikapaikannuksen tulokseksi noin 247.

Pikapaikannus antaa yleensä viivanreunan todellisen sijainnin 1–5 pikselin tarkkuudella. Tämä tarkkuus ei ole kuitenkaan vielä riittävän hyvä kalibrointitulosten laskennan kannalta, vaan tarvitaan tarkkaa paikannusta.

### 5.3 Tarkka paikannus

Tarkan paikan määrittämisessä tutkitaan 36 pikselirivin kokoista aluetta kuva-alueelta, jonka keskikohta on laskettu pikapaikannuksella. Keskikohdan molemmilta puolilta otetaan tarkasteluun 18 pikselirivin kokoiset kaistaleet. Aluksi jokaisen tarkasteltavan pikselirivin pikseleiden harmaasävyarvot summataan yhteen.

Tässä insinööriyössä ei käsitellä viivanreunan tarkan paikannuksen määrittämistä yksityiskohtaisesti, sillä menetelmä on tekijänoikeussuojattu. Algoritmi tarkan paikan määrittämiselle on käytössä vanhassa lattakomparaattorissa [3], josta se otettiin käyttöön myös uuden lattakomparaattorin kalibrointiohjelmaan. Tarkassa paikannuksessa määritetään niin sanottu harmaasävyarvon käänneaste. Käänneaste määritetään tarkasteltavalle alueelle sijoitetusta kolmannen asteen polynomista, joka muodostetaan pikseliriveille laskettujen pikseleiden harmaasävyarvojen summien perusteella.

Tarkassa paikannuksessa viivanreunan paikan määrittämisessä päästään osapikselitarkkuuteen. Viivanreunan paikan tarkkuuden määrittämiseksi tehtiin testejä, joiden tuloksena yksittäisen viivanreunan tarkan paikan keskimääräiseksi tarkkuudeksi saatiin noin 3 mikrometriä tai parempi. Tulos on hyvä huomioon ottaen, että pikselin koko on noin 10-kertainen verrattuna siihen tarkkuuteen millä viivanreuna pystytään määrittämään.

#### 5.4 Pikselikoko

Ennen kalibroinnin aloitusta tulee määrittää kuva-alueen yksittäisen pikselin koko. Pikselikokoon vaikuttaa kamerassa käytettävän objektiivin ominaisuudet, vaaituskojeen optiset ominaisuudet ja vaaituskojeen etäisyys lattakomparaattorista. Pikselikoon määrittämistä varten on tehty erillinen Visual Studio -ohjelma. Määrittämisessä valitaan latasta hyvälaatuinen viivanreuna, jota tarkastellaan kameran kuva-alueella. Aluksi viivanreuna asetetaan esimerkiksi kuva-alueen keskelle ja määritetään viivanreunan tarkka paikka ( $Pos1$  [pix]) ja havaitaan samalla laserlukema ( $Las1$  [ $\mu\text{m}$ ]).

Seuraavaksi siirretään lattia joko ylös- tai alaspäin kuitenkin siten, että sama viivanreuna pysyy kameran kuva-alueella. Määritetään uusi tarkka paikka ( $Pos2$ ) ja laserlukema ( $Las2$ ). Pikselin koko määritetään kaavalla

$$PixelSize = \frac{|Las1 - Las2|}{|Pos1 - Pos2|}$$

Viivanreunojen tarkkojen paikkojen  $Pos1$  ja  $Pos2$  erotuksesta otettu itseisarvo kertoo pikseleiden lukumäärän viivanreunojen kahden eri sijainnin välillä. Näin jatketaan siirtämällä viivanreuna uuteen paikkaan kuva-alueella ja määrittämällä tarkka paikka sekä havaitsemalla laserlukema. Perättäisistä  $PixelSize$  määrittämisistä lasketaan keskiarvo, jota käytetään laskennassa pikselikokona.

#### 5.5 Tarkan paikan määrittäminen kalibrointiohjelmassa

Kalibrointiohjelmassa yksittäinen kuva lataan viivakoodiasteikosta muodostetaan 25 peräkkäisestä 20 millisekunnin välein otetusta kuvasta. Jokaisen kuvan vastinpikselien harmaasävyarvot summataan yhteen ja lasketaan keskiarvo kunkin pikselin harmaasävyarvolle, jolloin saadaan muodostettua yksi kuva. Menetelmällä vähennetään mahdollisen tärinän vaikutusta kuvaan, joka parantaa viivanreunan tarkan paikannuksen määrittämistarkkuutta.

Seuraavaksi lasketaan muodostetusta kuvasta viivanreunan tarkka paikka ja määritetään taas uusi kuva keskiarvona 25 peräkkäin otetusta kuvasta. Tämä prosessi toistetaan 10 kertaa, jolloin saadaan laskettua kymmenen viivanreunan tarkan paikan arvoa. Lasketuista tarkan paikan arvoista poistetaan pienin ja suurin arvo ja jäljelle jääneistä

arvoista lasketaan keskiarvo, jolloin saadaan lopullinen laskennassa käytettävä tarkan paikan arvo. Kokonaisuudessaan kalibroitiohjelmalla menee laskentaan aikaa yhteensä noin 5 sekuntia.

Menetelmällä satunnaisesti valitulle latan viivanreunalle määritetyt tarkan paikan arvot useissa peräkkäisissä mittauksissa eroavat toisistaan keskimääräisesti alle 0,03 pikselin verran. Tämä vastaa alle yhden mikrometrin epätarkkuutta viivanreunan tarkan paikan arvossa, jos pikselin koko on 30 mikrometriä. Tarkkuus täyttää lattakomparaattorille asetetut vaatimukset. Tarkkuutta voitaisiin vielä parantaa suurentamalla kameran ottamaa kuvaa, joko siirtämällä vaaituskojetta lähemmäs lattakomparaattoria (nyt etäisyys 4,3 metriä) tai käyttämällä suurempaa objektiivia kamerassa (nyt 35 millimetriä).

## 6 Ohjelmointi

### 6.1 Ohjelmistonkehitys

Lattakomparaattorin ohjelma rakennettiin Visual Studio 2010 -ohjelmankehitysympäristöllä ja käytettävä ohjelmointikieli oli Visual Basic.NET. Vanhan lattakomparaattorin ohjelmakoodi oli tehty Visual Studio 6.0:lla, joten oli luontevaa että myös uuden komparaattorin ohjelmakoodi rakennetaan saman ohjelman uudemmallalla versiolle. Vanhasta kalibroitiohjelmasta pystyttiin hyödyntämään joitakin koodiosioita. Ohjelmakoodi täytyi ensin kääntää Visual Basic.NET ohjelmointikielelle, sillä vanha ohjelmakoodi tehtiin silloin käytössä olevalla Visual Basic -ohjelmointikielellä, joka ei ole enää yhteensopiva nykyisen VB.NET kielen kanssa.

Ohjelmakoodin kehitys aloitettiin täysin alusta ja käyttöliittymän (Kuva 17) rakenne ja ominaisuudet kehittyivät vähitellen lopulliseen muotoonsa työn edetessä. Ohjelman toimintaa sekä käyttöliittymän rakennetta ja ominaisuuksia muokattiin kalibroititestausten yhteydessä. Kalibroitiohjelman testausvaiheessa havaittiin mitkä ohjelman ominaisuudet ja koodiosiot olivat puutteellisia ja niihin tehtiin vaadittavat muutokset.

## 6.2 Visual Studio -ohjelma

### 6.2.1 Pääohjelma

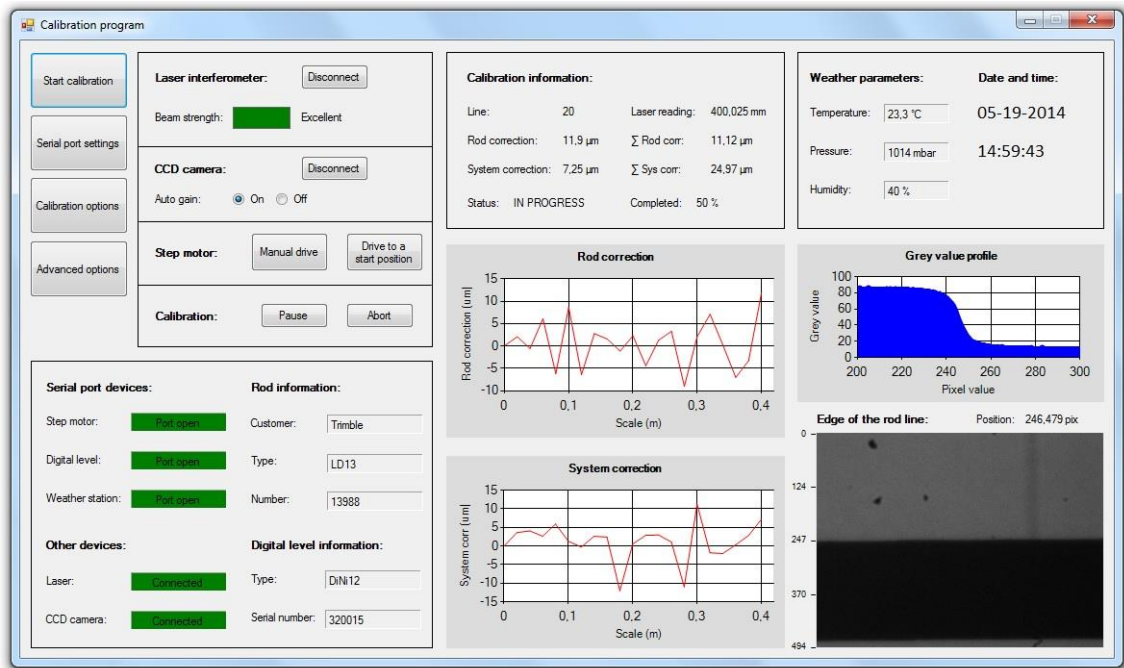
Pääohjelman teko aloitettiin luomalla uusi Windows Form Application -projekti Visual Studiossa. Projektityyppi mahdollistaa käyttöliittymän rakentamisen suoraan valmiiseen Form-valintaikkunaan. Formin koodiosio sisältää suurimman osan pääohjelman aliohjelmista ja funktioista. Kuvankäsittelyn aliohjelmat sekä kaikki ohjelman muuttujat sijoitettiin omiin erillisiin moduuleihinsa ohjelmakoodin selkeyttämiseksi. Pääohjelman toimintaperiaatetta kuvaava lohkokaavio on esitetty liitteessä 1.

Kaikki ohjelman yksittäiset toiminnot on rakennettu omiin aliohjelmiin (Sub) tai funktioihin (Function). Pääohjelma sisältää päämittausloopin, joka pyörii niin kauan kuin latan viimeinen viivanreuna on saavutettu. Päämittausloopista kutsutaan aliohjelmia ja tarvittaessa aliohjelmista kutsutaan uusia aliohjelmia. Ohjelman rakenteellisen yksinkertaisuuden vuoksi suurin osa muuttujista on julkisia (Public), jolloin niiden arvoja voidaan muokata ja lukea jokaisesta ohjelman eri osa-alueelta.

### 6.2.2 Käyttöliittymä

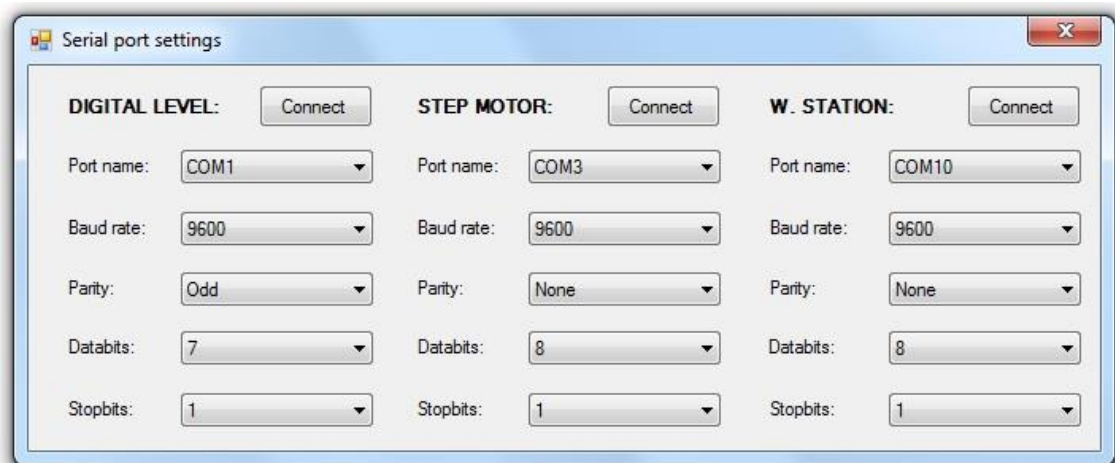
Käyttöliittymä kehitettiin pääohjelman kanssa samanaikaisesti. Tavoitteena oli rakentaa mahdollisimman helppokäyttöinen, selkeä ja informatiivinen käyttöliittymä. Käyttöliittymään (Form1) lisättiin neljä painiketta, josta voidaan avata neljä uutta valintaikkunaa (Form2 - Form5) (Kuva 18). Valintaikkunoista voidaan säätää ennen kalibroinnin aloitusta määritettävät kalibrointiasetukset, avata ja sulkea yhteydet sarjaportteihin ja muokata niiden tiedonsiirtoparametreja, ajaa askelmootoria manuaalisesti sekä säätää yksityiskohtaisia kalibrointiasetuksia kuten kalibrointitulosten laskentaa varten määritettyjen mittaussuureiden lukumääriä ja viiveitä. Käyttöliittymä sisältää myös Pause- ja Abort-painikkeet, joista käyttäjä voi halutessaan joko keskeyttää kalibroinnin ja jatkaa sitä myöhemmin tai pysäyttää kalibroinnin kokonaan.

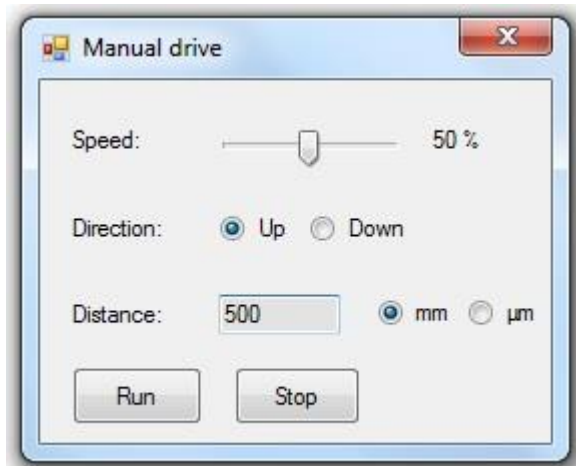




Kuva 17. Käyttöliittymän graafinen ulkoasu.

Käyttöliittymä sisältää informaatiota kalibroivasta vaaitusjärjestelmästä, kuten kalibroivatan ja vaaituskojeen tyytit ja sarjanumerot. Kalibroinnin etenemistä osoittavat automaattisesti päivittyvät trendit, joista voidaan seurata yksittäisten latta- ja systeemikorjausten arvoja. Viivanreunan terävyyttä, valoisuutta ja sijaintia voidaan tarkkailla erillisestä ikkunasta, jossa näytetään kameran ottama kuva latta-asteikosta. Lisäksi kuva-alueen pikseleiden harmaasävyarvojen muutosta lattaviivanreunan kohdalla voidaan seurata erillisestä kuvaajasta. Tiedot päivittyvät käyttöliittymässä automaattisesti jokaisen kalibroivatan lattaviivan kohdalla, joten käyttäjän on helppo seurata reaaliaikaisesti kalibroinnin etenemistä.





Kuva 18. Käyttöliittymäikkunat askelmoottorin manuaaliajoon ja sarjaporttien tiedonsiirtoparametrien muokkaukseen ja yhteyksien avaamiseen.

### 6.2.3 Muut ohjelmat

Pääohjelman kehitystyön ohessa rakennettiin useita apuohjelmia, joilla voidaan testata komparaattorin liitettyjen yksittäisten laitteiden tarkkuutta ja muita ominaisuuksia. Tärkein erillinen ohjelma on pikselikoon määrittystä varten rakennettu ohjelma.

CCD-kameralle rakennettiin ohjelma, jolla määritetään satunnaisen viivanreunan tarkan paikannuksen tarkkuus laskemalla tarkka paikka useita kertoja peräkkäin tietyllä aikavälillä. Epätavallisen suuret poikkeamat lasketuista tarkan paikan arvoista voivat johtua esimerkiksi vaaituskojeen tai kameran värinästä, joiden vaikutuksia vaimennetaan viiveillä ja keskiarvoistamalla määritettyjä suureita.

## 7 Yhteenveto

Projektin tavoitteena oli rakentaa lattakomparaattori valmiiksi kevään 2014 aikana. Rakentaminen käsitti lattakomparaattorin fyysisen rakentamisen, ohjelmiston ja käyttöliittymän rakentamisen sekä oheislaitteiden hankinnat ja asennukset. Osuuteni tässä projektissa keskittyi lähinnä lattakomparaattorin ohjelmiston ja käyttöliittymän rakentamiseen ja kehittämiseen. Myös oheislaitteiden toimintoihin, asennuksiin ja käyttöön täytyi perehtyä huolellisesti, jotta toimivan ohjelmakokonaisuuden rakentaminen onnistuisi. Lattakomparaattoriin liitetyt oheislaitteet ovat laserinterferometri, askelmoottori, säätöasema, vaaituskoje, CCD-kamera ja teollisuus-PC.

Projekti saatiin valmiiksi aikataulun mukaisesti. Kalibrointiohjelman ja käyttöliittymän toteutukset onnistuivat hyvin. Käyttöliittymä on ominaisuuksiltaan informatiivinen, selkeä ja helppokäyttöinen. Ohjelmakoodi rakennettiin yksinkertaiseksi ja selkeäksi kokonaisuudeksi, johon on helppo tehdä muutoksia jälkikäteen. Tuloksena saatiin täysin automatisoitu lattakomparaattori, jolla pystytään kalibroimaan Trimblen, Topconin ja Leican vaaitusjärjestelmiä sekä perinteisiä tasavälijakoisia lattoja (5/10 millimetrin jaotus).

Insinööriyötä tehdessäni opin paljon lisää Visual Studio -ohjelmistosta ja erilaisten ohjelmointimenetelmien käytöstä. Projektissa jouduin perehtymään yksityiskohtaisesti tietokoneen ja käytettävien oheislaitteiden väliseen tiedonsiirtoon ja yhteyksien muodostamisen toimintatapoihin. Ajoittain ohjelmoinnissa sekä teollisuus PC:n ja oheislaitteiden välisessä kommunikoinnissa tuli eteen haastavia ongelmia, jotka kuitenkin saatiin ratkaistua tiimityönä.

## Lähteet

- 1 Geodeettinen laitos. Yleistä tietoa. <<http://www.fgi.fi/fgi/fi/me/tietoa-meistä>>. Luettu 10.4.2014.
- 2 Takalo, Mikko. 1985. Horizontal-vertical laser rod comparator. Kirkkonummi. Geodeettinen laitos.
- 3 Takalo, Mikko. 1997. Automated calibration of precise levelling rods in Finland. Kirkkonummi. Geodeettinen laitos.
- 4 Woschitz, Helmut. 2003. System calibration of Digital levels: Calibration Facility, Procedures and Results. Aachen. Shaker Verlag.
- 5 Cooper, M.A.R. 1982. Modern Theodolites and Levels (Second Edition). Granada Publishing Ltd.
- 6 Heiskanen/Härmälä. 1967. Maastomittaus ja kartoitus. Porvoo. WSOY.
- 7 Deumlich/Staiger. 2001. Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. Wichmann.
- 8 Renishaw manuaali. Renishaw laser calibration system user guide. <<http://www.renishaw.com/lasercalsupport/en/xl-80-ml10-manuals--18930>>. Luettu 10.4.2014.
- 9 Microsoft Developer Network. Component Object Model (COM). <[http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ms680573\(v=vs.85\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ms680573(v=vs.85).aspx)>. Luettu 10.4.2012.

### Liite 1. Kalibrointihjelman lohko-kaavio (Trimble Dini)

