

*Maanmittaus 79:1-2 (2004)*

*Saapunut 5.7.2004*

*Hyväksytty 8.10.2004*

## Vaaituksen mittakaavasta

**Mikko Takalo**

Geodeettinen laitos, Geodesian ja geodynamiikan osasto

PL 15 (Geodeetinrinne 2), 02431 Masala

mikko.takalo@fgi.fi

**Tiivistelmä.** Vaaituksen mittakaavan realisaatio on latta-asteikko, jonka pituusyksikkö Suomessa on metri. Latta-asteikko on muuttunut vaaitustekniikan kehittymisen myötä perinteisestä tasavälijakoisesta viiva-asteikosta nykyiseen digitaalivaaituksen viivakoodiasteikkoon. Mittakaavan oikeellisuuden tarkistus on myös muuttunut vuosien saatossa normaali-metrivertauksesta vaaka-asennossa pystyasentoiseen laserinterferometriä hyödyntävään automatisoituun lattavertailuun. Digitaalivaaitustekniikka toi esille järjestelmäkibrointitarpeen, jota varten kehitettiin systeemikalibrointikomparaattori. Vaaituksen mittakaavan oikeellisuus voidaan nykyisin tarkistaa lattakalibroinnissa  $\pm 1$  ppm ja systeemikalibroinnissa  $\pm 5$  ppm tarkkuudella.

**Avainsanat:** vaaituksen mittakaava, metri, lattakomparaattori, digitaalivaaitus, viivakoodi, laserinterferometri, systeemikalibrointi.

### 1 Johdanto

Mittakaavalla, englanniksi *scale*, latinaksi *skala*, tarkoitetaan mittaustekniikassa mitta-asteikkoa – toisin kuin karttojen yhteydessä, missä se on kuvaobjektin suhdetta todelliseen ilmaiseva suhdeluku. Mittakaava-asiat kuuluvat metrologian eli mittauksia käsittelevän tieteenalan piiriin ja koska siinä käytetty terminologia on selkeää, mutta ei kovin tunnettua, annetaan artikkelin lopussa olevassa liitteessä luettelo keskeisistä termeistä.

Vaaituksen mittakaava on latta-asteikko, jonka pituudella realisoidaan käytössä oleva mittayksikkö. Mittayksikkö on metri, joka kuuluu SI-järjestelmään (Système International d'Unités). Se on käytössä kaikissa kehittyneissä maissa muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Metrin määritelmä ja sen realisaatiot ovat muuttuneet historian saatossa muutaman kerran. Viimeisin määritelmä vuodelta 1983, ”metri on sellaisen matkan pituus, jonka valo kulkee tyhjiössä aikavälissä  $1/299\,792\,458$  sekuntia”, perustuu valon nopeuteen eli luonnonvakioon, mikä on huomattavasti helpottanut metrin realisointia interferometrisesti.

Mittakaavan oikeellisuus tarkistetaan vertaamalla mitta-asteikon pituutta mittayksikön pituuteen. Toimenpiteellä on tärkeä merkitys mitatun korkeuden kannalta, koska mitä suurempi korkeusero, sitä merkittävämpi on mittakaavan virheen vaikutus vaaitukseen. Tosiasia on, että mittakaavavirhe on aina systemaattinen, eikä tule esiin edes vaaitusverkon silmukan sulkuvirheessä.

Tässä kirjoituksessa on tarkasteltu vaaituksen mittakaavaa, sen realisaatioita ja oikeellisuuden tarkistusta.

## 2 Kuinka mittakaava vaikuttaa vaaitukseen

Vaaituksessa yksittäisen kiintopisteen korkeusluku sisältää aina tietoa vaaituksen mittakaavasta. Suomen valtakunnallisen tarkkavaaituksen pääkiintopiste PP (Kuva 1), joka sijaitsee Helsingissä Tähtitorninmäellä tähtitieteellisen observatorion pihalla, on seuraavassa valittu tällaisen tarkastelun kohteeksi. Pisteen korkeusluku N60-korkeusjärjestelmässä on  $H_{N60 PP} = 30,5138$  m (Kääriäinen 1963). (Luku poikkeaa kiveen hakatusta luvusta  $H_{NN PP} = 30,4652$  m, joka on NN-korkeusjärjestelmän mukainen arvo (Suomen Tie- ja Vesirakennusten Ylihallitus 1910); eri korkeusjärjestelmiä ei tässä yhteydessä käsitellä laajemmin.)

Kyseinen korkeusluku on pääkiintopisteen ja N60-korkeusjärjestelmän lähtötason ( $H_{N60 \text{ Lähtö}} = 0$ ) välinen korkeusero

$$\Delta H = H_{N60 PP} - H_{N60 \text{ Lähtö}}, \quad (1)$$

jossa lähtötasoksi on määritelty Kaivopuiston rannassa sijaitsevan Helsingin mareografin teoreettisen keskiveden korkeus vuoden 1960 alussa (Lisitzin 1963) eli  $\Delta H$  on ymmärrettävä korkeutena merenpinnan yläpuolella. Kyseisen korkeuseron vaaitsi prof. Erkki Kääriäinen vuonna 1955 (Kääriäinen 1966). Teoreettisesti tarkastellen hän käytti pituuden mittakaavana vaaituksen mittakaavaa [1m]' eli lattametrin pituutta metreinä, joka poikkesi enemmän tai vähemmän tosiarvosta eli oikeasta pituusyksikön mittakaavasta [1m]. Erotus [1m]' - [1m] on vaaituksen mittakaavan korjaus, jonka määrittämistä käsitellään kappaleessa 4. Jos lattametri [1m]' on liian pitkä oikeaan metriin [1m] nähden, esim. 1,001 m, mikä latta-asteikossa tarkoittaa sitä, että jakoviivat ovat liian kaukana toisistaan, niin mitattu korkeusero on liian pieni lattametrilukemina. Esimerkkitapauksessa korjaus on +1 mm eli samanmerkkinen kuin kalibrointituloksella 1 m + 1 mm. Liittämällä mittakaavan korjaus vaaitushavainnoista laskettuun korkeuseroon  $\Delta H'$  saadaan korjattu korkeusero muotoon

$$\Delta H = \Delta H' \{1 + ([1m]' - [1m]) / [1m]\} \quad (2)$$

ja edelleen sievennettynä

$$\Delta H = \Delta H' \{[1m]' / [1m]\}. \quad (3)$$



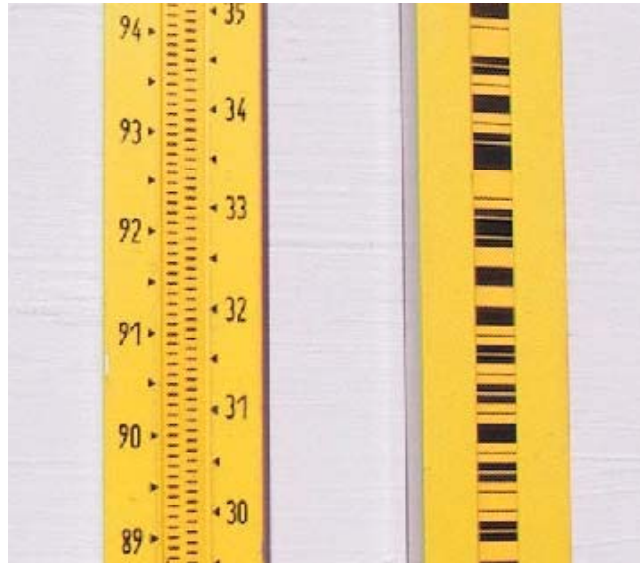
*Kuva 1. Suomen valtakunnallisen tarkkavaaituksen pääkiintopiste. Kuva on julkaisusta: Suomen Tie- ja Vesirakennusten Ylihallitus (1910) "Suomen Tarkkavaaaitus 1892-1910".*

### 3 Vaaituksen mittakaavan realisointi

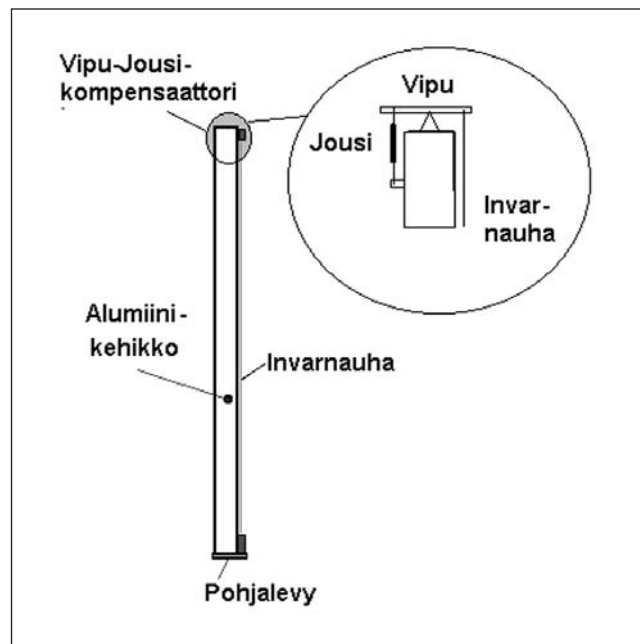
Vaaituksen mittakaavan realisaatio on latta-asteikon pituus. Latta-asteikkoja on kahden tyyppisiä: tasavälijakoisia viiva-asteikkoja ja viivakoodiasteikkoja (Kuva 2). Tasavälijakoisia käytetään perinteisessä ja viivakoodiasteikkoja digitaalissa vaaitustekniikassa (Takalo 1991). Kummassakin mittakaavan eli latan toimintaperiaate on kuitenkin sama: asteikossa kukin viiva tai viivaryhmä on määrättyllä nimellis- eli nominaalietäisyydellä joko latan pohjalevystä tai asteikon lähtökohdasta. Peräkkäisten viivojen tai geometrisesti merkitsevien viivaryhmien keskikohtien välimatkat ovat läpi koko asteikon aina saman suuruisia (Ingensand 1999).

Perinteisissä latoissa perättäisten viivojen välimatka on Euroopassa 5 mm tai 10 mm ja Amerikassa tuuma tai sen monikerta. Asteikko tai rinnakkaiset asteikot on maalattu joko puiselle alustalle tai invarnauhalle, joka on vipu-jousi-mekanismilla (Kuva 3) jännitetty puu- tai alumiinikehikkoon. Yleisimmin käytetyt lattojen pituudet vaihtelevat metristä neljään metriin ja kehikot ovat joko yhtenäisiä, taitettavia tai jatkettavia.

Viivakoodilatoissa koodielementin tai merkitsevän viivaryhmän leveys on valmistajasta riippuen 10 mm Topconilla ja Sokkialla, 1,0125 mm Wildillä eli nykyisellä Leicalla ja 20 mm Zeissillä eli nykyisellä Trimblellä (Ingensand 1999).



**Kuva 2.** Latta-asteikkotyypit: Vasemmalla perinteinen, tasavälijakoinen viiva-asteikko ja oikealla viivakoodiasteikko. Molemmista lattatyypeissä käytetään nykyään alumiinikehikkoa.



**Kuva 3.** Invarlatan rakenne ja vipu-jousi kompensattorin toimintaperiaate. Nykyisissä latoissa invarnauha on suoraan jousen välityksellä kiinni alumiinikehikossa.

#### 4 Mittakaavan oikeellisuus

Latta-asteikon kalibrointi suoritetaan siten, että kunkin asteikkoviivan etäisyys latan pohjalevystä tai asteikon lähtöviivasta määritetään vertaamalla sille pituusstandardin avulla saatua pituutta  $[1m]'$  latta-asteikon nimellispituuteen  $[1m]$ . Näiden erotusta kutsutaan latan jakoviivan korjaukseksi, joka sisältää mittakaavan korjauksen ja lämpötilakorjauksen. Korjattu mittakaava on

$$[1m] = [1m]' + \delta[1m] + \alpha(t-t_0) [1m], \quad (4)$$

missä

- $[1m]'$  = vaaituksessa käytetty mittakaava eli lattametrin pituus,
- $\delta[1m]$  = mittakaavan korjaus,
- $\alpha$  = lineaarinen lämpölaajenemis- eli lämpöpitenemiskerroin,
- $t$  = mittauslämpötila ja
- $t_0$  = vertailulämpötila, esim. 20°C.

Aikaisemmin latta-asteikon kalibroinnissa pituusstandardit eli vertailumitat olivat pääasiassa mekaanisia normaalimetrejä, kuten kansallinen metriprototyyppi eli pituuden mittanormaali (Kuva 4); myös puolen metrin (Unkarissa) ja kahden metrin (Puolassa) pituisia mittanormaaleja oli käytössä. Kansallisessa pituuden mittanormaalissa metri oli kummassakin päässä mittaa olevien piirtoviivojen välinen etäisyys plus muutaman mikrometrin korjaus, joka määritettiin suhteellisella mittausepävarmuudella  $\pm 10^{-7}$ .

Metriprototyyppi kalibroidiin säännöllisesti vertaamalla sen pituutta kansainvälisen metriprototyypin pituuteen Pariisissa kansainvälisessä Paino- ja Mittatoimistossa (BIPM). Suomessa kansalliset käyttönormaalit verrattiin taas Vakaustoimiston metrikomparaattorissa kansalliseen metriprototyyppiin ja käyttäjien normaalimetrit, esim. Geodeettisen laitoksen metrit verrattiin em. kansallisiin käyttönormaalieihin mittausepävarmuuden ollessa  $\pm 1$  ppm. Kun saatua kalibrointitulosta käytettiin sitten lattakalibroinnissa, mittausepävarmuus kasvoi  $\pm 3 \dots 5$  ppm:ksi. Normaalimetrit olivat joko teräksestä, invarista tai muusta metalliseoksesta valmistettuja, mutta metriä pidemmät normaalit olivat esim. puisia (Puolassa) ja puolen metrin normaalit esim. keraamisia (Unkarissa).

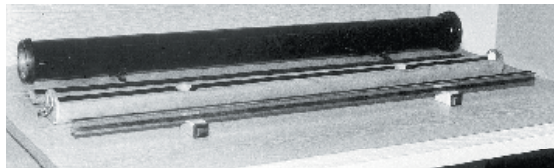
Koska aikaisemmin portaaton vertailumittausmahdollisuutta ei ollut, lattakalibroinnissa voitiin määrittää kerrallaan vain mittanormaalin pituuden päässä toisistaan olevien jakoviivojen välimatka. Asteikko käytiin läpi siirtämällä vertailumittaa tai lattaa sopivin askelin ja tuloksista laskettiin keskiarvo, joka edusti keskimääräistä lattametrin korjausta. Nykyään Suomessa kansallisen pituuden mittanormaalien realisaatio perustuu suoraan metrin määritelmään jodistabiloitujen He-Ne-lasereiden avulla (Kuva 5). Käyttäjille metri realisoituu jäljitettävästi omilla kalibroiduilla laserinterferometreillä mittausepävarmuuden ollessa olosuhteista riippuen  $\pm 10^{-7} \dots 10^{-9}$ . Vaaituksen mittakaava saadaan vertaamalla latta-asteikon pituutta laserinterferometrillä saatua pituuteen. Mittausepävarmuus, joka

riippuu olosuhteista ja lattaviivojen laadusta on pystyasentoisessa lattakomparaattorissa  $\pm 1$  ppm tai parempi.

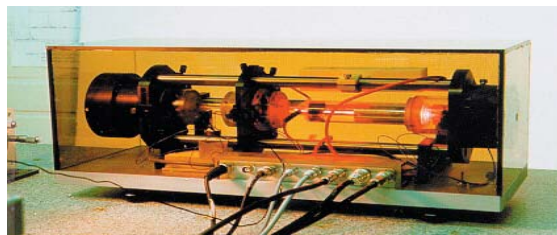
Suomen Ensimmäisessä tarkkavaaituksessa (1892–1910) lattojen kalibrointi suoritettiin siten, että mittanormaali asetettiin asteikon päälle ja suurennuslasilla luettiin vertailumitan ja vastaavan jakoviivan erotus kummastakin päästä mittanormaalia. Latta-asteikon läpikäyminen näin oli työlästä ja vei paljon aikaa. Suomen Toisessa tarkkavaaituksessa (1935–1975) käytettiin mikroskooppikomparaattoria (Kuva 6), jossa mittanormaali pidettiin paikallaan ja lattaa siirrettiin komparaattorin alla. Kalibrointi oli edelliseen verrattuna tarkempaa ja nopeampaa ja työtä helpotettiin jakamalla lattakalibrointi kahteen vaiheeseen: peruskalibrointi ja seurantakalibrointi. Edellinen kohdistui jakoviivaväleihin ja se tehtiin vain kerran latan käyttöhistorian aikana. Jälkimmäinen kohdistui taas invarnauhan pintaan tehtyihin mikroskooppisiin mittamerkkeihin. Yleensä näitä oli kolmen metrin latassa kolme metrin päässä toisistaan olevaa mittamerkkiparia.

Kalibrointitulokset hyödynnettiin kertomalla vaaituksessa havaittu korkeusero  $\Delta H'$  lattametrim korjauksella  $\delta$  [1m], jolloin saadaan mittakaavan mukainen korkeusero

$$\Delta H = \Delta H' + \delta [1m] \Delta H' . \quad (5)$$



**Kuva 4.** Metrini realisointi ennen. Suomen kansallinen platina-iridium-metriprototyyppi saatiin vuonna 1890 ja sitä käytettiin aina vuoteen 1983 saakka. (Kuva: MIKES 2004)



**Kuva 5.** Metrini realisointi nykyään. Mittatekniikan keskus (MIKES) realisoii metrini Suomessa mm. jodistabiloitujen 633 nm He-Ne-lasereiden avulla. (Kuva: MIKES 2004)



**Kuva 6.** Geodeettisen laitoksen mikroskooppikomparaattori. Laitetta käytettiin Suomen Toisessa tarkkavaaituksessa latta-asteikkojen ja mittanormaalien kalibrointiin vuosina 1935–1970. Kuvassa ylioppilas E. Hänninen on suorittamassa lattojen kalibrointia Pieksämäellä 1945. (Kuva: E. Kääriäinen)

Suomessa laserinterferometrin (Kuva 7) käyttöönotto lattakalibroinnissa 1970-luvun alussa teki mahdolliseksi määrittää jokaiselle jakoviivalle paikkakorjaus eli viivan ja latan pohjalevyn välisen etäisyyden poikkeama nimellisetäisyydestä. Kuitenkin käytännössä edelleen määritetään lattametrin korjaus sovittamalla em. jakoviivojen korjauskäyrään regressiosuora, jonka kulmakerroin edustaa keskimääräistä lattametrin korjausta (Kuva 9).



**Kuva 7.** HP Laserinterferometri 5529A.

## 5 Vaatuslaitteiston kalibrointi nykyään

### 5.1 Lattakomparaattori

Lattojen kalibrointi suoritetaan Geodeettisessa laitoksessa pystyasentoisella lattakomparaattorilla (Kuva 8), jossa vertailupituus saadaan laserinterferometrillä (Takalo 1997).

Komparaattorin osat ovat puinen 8 m korkea kehikko, latan kuljetin, johon kuuluu 6 m pitkä teräskisko, kaksi kuljetinvaunua, hissi, askelmoottori ja 12 m pitkä hammashihna. Lisäksi komparaattoriin kuuluvat CCD-kamera, laservalolähde, säteenjakaja, latan alapäähän magneetilla kiinnitettävä heijastinprisma ja automaattinen sääasema.

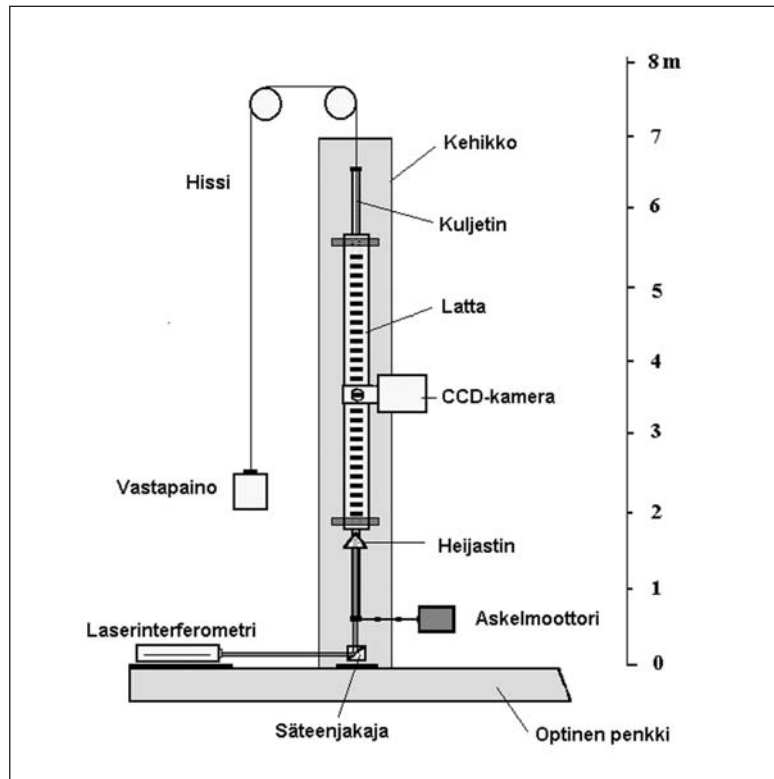
Kohteen eli lattaviivan tunnistaminen CCD-kameralla perustuu valolle herkien tunnistinkensojen eli pikselien kykyyn muuntaa saapuva valo digitaaliseksi harmaasävyarvoksi. Täysin mustan arvo on nolla ja täysin valkoisen 256. Digitaalissa kuvankäsittelyssä viivareuna paikannetaan reunan ylimenevän pikselijonon perättäisten harmaasävyarvojen muutoksesta, joka saavuttaa maksimiarvon viivareunan kohdalla. Pikselit ovat kennostossa säännöllisenä matriisina muodostaen CCD-kameran kuvakehikon koordinaatiston.

Komparaattorin toimintoja ohjataan tietokoneohjelman avulla. Kalibroinnit suoritetaan ilmastoidussa laboratoriossa, jossa kosteutta voidaan muuttaa välillä 5% ... 95% ja lämpötilaa välillä +5°C ... 35°C.

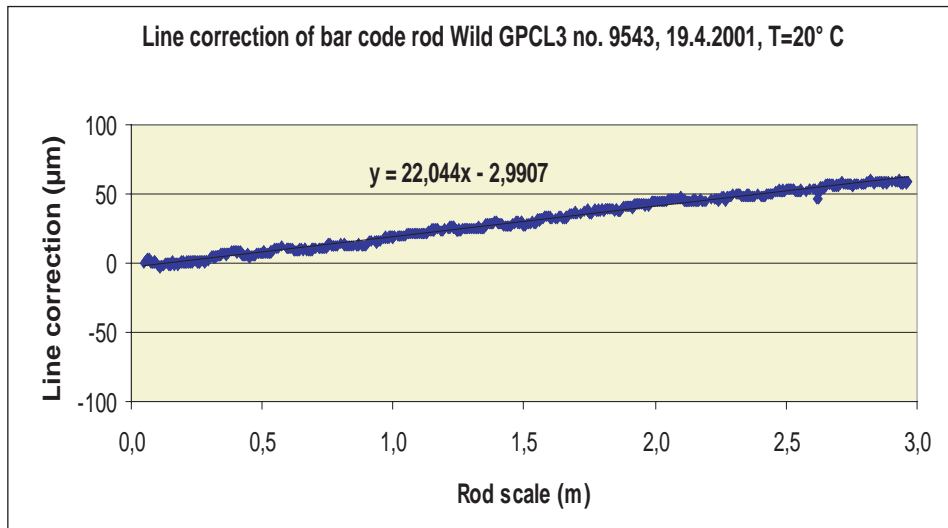
Komparaattorin toimintaperiaate on seuraava: Latta asetetaan kuljetinkehkaan pystyasentoon siten, että asteikko näkyy terävänä CCD-kameran näkökentässä. Siirretään ensimmäinen mitattava asteikkoviiva kuvaruudun keskelle, havaitaan sen tarkka paikka kameras kuvakoordinaatistossa ja samanaikaisesti laserinterferometrin lukema sekä säähavainnot. Seuraavaksi siirretään lattaa niin, että asteikon seuraava viiva osuu CCD-kameran alle, ja havaitaan jälleen viivan paikka- ja laserlukema. Näiden kahden havaintoparin avulla voidaan laskea perättäisten viivojen etäisyys ja verrata sitä viivojen välimatkan nimellisarvoon, jolloin saadaan ko. viivavälin korjaus. Jatkamalla näin koko viiva-asteikko läpi ja summaamalla korjaukset saadaan asteikon viivojen korjauskäyrä aloitusviivan suhteen (Kuva 9).

Komparaattorilla mittaus tapahtuu automaattisesti. Sen mittausepävarmuus on pienempi kuin  $\pm 1$  ppm ja kalibrointimittauksen epävarmuus, joka riippuu mm. jakoviivojen laadusta, lattakehikon suorudesta, jne., vaihtelee välillä  $\pm 1 \dots 5$  ppm (Takalo 1999 ja 2000).

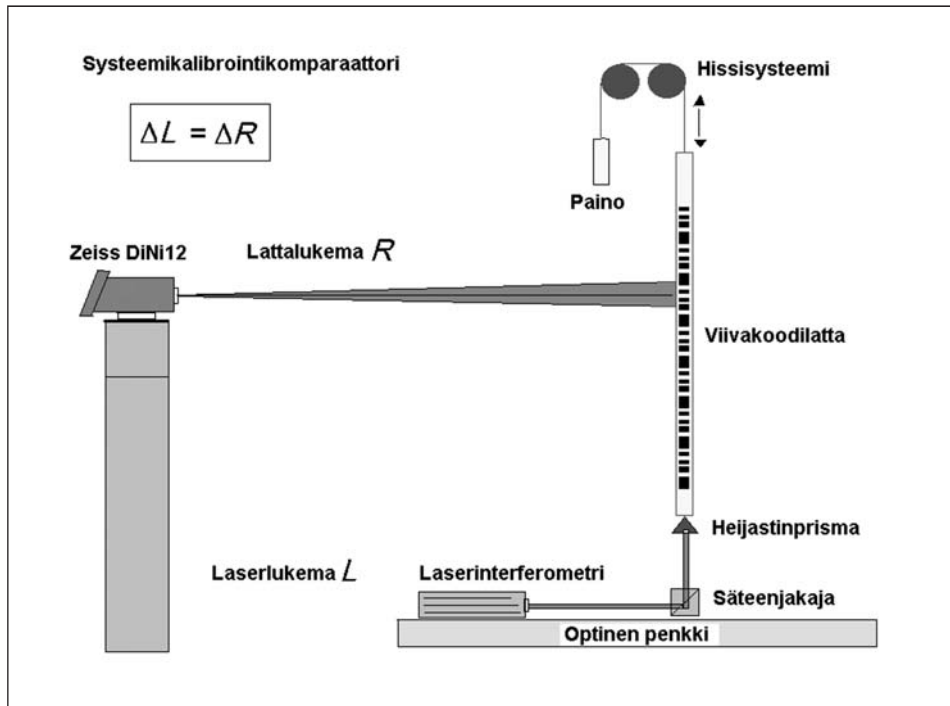
Geodeettinen laitos on suorittanut lattakalibrointeja viimeisen 10 vuoden aikana omien lattojensa lisäksi Baltian maiden, Pohjoismaiden sekä kotimaisten yritysten ja laitosten latoille. Lattakomparaattori soveltuu sekä perinteisten tasavälijakoisten että nykyaikaisten viivakoodilattojen kalibrointiin.



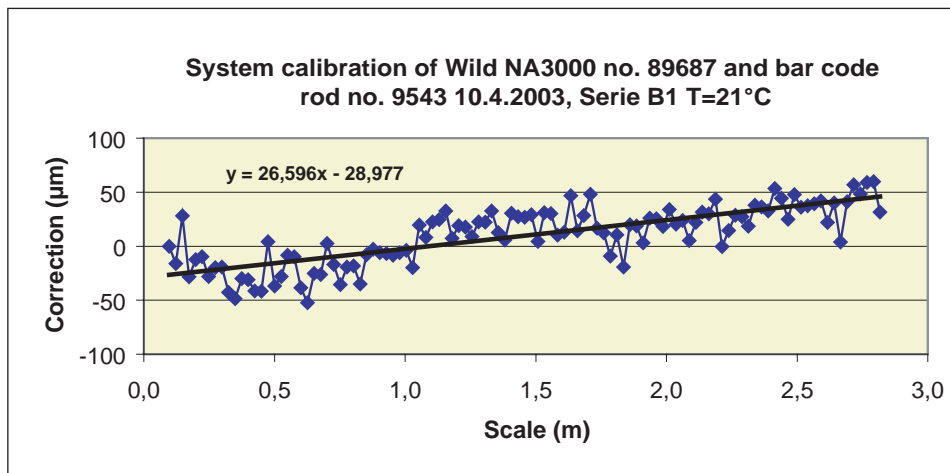
**Kuva 8.** Pystyasentoinen laserlattakomparaattori. Puinen kehikko jatkuu metrin verran alaspäin, jota osaa ei ole esitetty kuvassa.



**Kuva 9.** Mittakaavan määrittäminen lattakomparaattorilla Wild-viivakoodilattalle n:o 9543. Korjaus on  $+22,0 \pm 1,0$  ppm.



*Kuva 10. Systeemikalibrointikomparaattori.*



*Kuva 11. Mittakaavan määritystulos systeemikalibroinnilla, latta n:o 9543 ja koje n:o 89687. Korjaus on  $+26,6 \pm 4,5$  ppm.*

## 5.2 *Systeemikalibrointikomparaattori*

Kun vaaitusmenetelmien kehitys 1990-luvun alussa johti digitaalivaaitustekniikkaan (Ingensand 1991), heräsi kysymys, riittääkö vaaituksen mittakaavan oikeellisuuden varmistamiseen pelkkä lattakalibrointi. Digitaalivaaituksessa ihmismä korvattiin lineaarisella CCD-kameralla ja tasavälijakoinen latta-asteikko viivakoodilla. Lattalukeman muodostamista varten CCD-kamera kuvaa viivakoodiasteikosta vaakatason ylä- ja alapuolisia viivoja ja vertaa niitä kojeen muistissa olevaan viivakoodiin ja määrittää kuvattua paikkaa vastaavan korkeuslukeman. Kun latta perinteisessä vaaituksessa antoi vaaituksen mittakaavan, nyt mittakaavan muodostamiseen vaikuttaa myös CCD-kamera, kuvankäsittelyohjelmisto, kojeen optiikka, elektroniikka jne. Pitääkö siis koko järjestelmä kalibroida eli koje ja latta yhdessä? Vastaus on kyllä, koska CCD-kamera ja elektroniikka saattavat muuttua ajan kuluessa.

Geodeettisessa laitoksessa siirryttiin digitaalivaaituskauteen v. 2000 hankkimalla kolme Zeiss DiNi12 -digitaalivaaitusjärjestelmää. Kukin näistä sisältää digitaalivaaituskojeen ja kaksi viivakoodilattaa. Näiden kalibrointia varten rakennettiin systeemikalibrointikomparaattori (Kuva 10), jonka muodostaa kaksi havaintopilaria (vain toinen näkyy kuvassa), latan kuljetin sekä laserinterferometri. Komparaattorissa on käytetty hyväksi jo olemassa olevan lattakomparaattorin (Luku 5.1) rakenteita. Käytettävät tähtäysvälit ovat 3,0 m ja 7,6 m.

Systeemikalibroinnissa mittausjärjestelmän antamaa tulosta verrataan laserinterferometrin vastaavaan. Mittausperiaate on yksinkertainen: kalibroinnin aloituksessa kojeen vaakatahtäys kohdistuu niin alas viivakoodiasteikon alapäähän kuin mahdollista, eli kohtaan missä koje muodostaa vielä lukemia. Havaitaan lattalukema ja samanaikaisesti laserinterferometrin lukema. Siirretään lattaa noin 25 mm kerrallaan askelmottorin avulla ja havaitaan latta- ja laserlukemat. Vertaamalla näiden kahden lukemaparin erotuksia edelliseen, saadaan lattalukemalle korjaus. Jatkamalla näin koko viivakoodiasteikko läpi saadaan korjauskäyrä (Kuva 11), johon sovitettuna regressiosuora antaa tuloksena digitaalisen vaaitusjärjestelmän mittakaavan.

Systeemikalibroinnin tuloksena saatu lattalukeman korjauskäyrä (Kuva 11) poikkeaa usein lattakalibroinnin vastaavasta (Kuva 9). Jälkimmäisessä korjauskäyrä on lineaarinen ja hajonta vähäistä, edellisessä taas hajonta on suurta ja sisältää selviä systemaattisia piirteitä. Eron syytä ei ole vielä tarkemmin tutkittu, mutta asia johtunee kalibrointiepävarmuuksien erosta, systeemikalibrointi on liki viisi kertaa epätarkempaa kuin lattakalibrointi. Toiseksi lattakalibrointi kohdistuu kerrallaan vain yhteen viivaan, kun taas systeemikalibroinnissa kohteena on kokonainen viivaryhmä, esim. NA3000-digitaalikoje näkee latta-asteikon n. 2° kulmassa. Fokusoitavirheellä on todettu olevan vähäinen vaikutus hajontaan, mutta huomattavasti suurempi vaikutus saattaa olla kojeen kompensattorilla esim. rakennuksen tai maaperän tärinän vaikutuksesta ja kohteen valaistuksella.

Tähän mennessä Geodeettisessa laitoksessa on tehty useita systeemikalibrointeja eri maiden mittausvälineille. Kokemus on osoittanut, että systeemikalib-

rointi lattakalibroinnin ohessa on tarpeen vaaituksen mittakaavan oikeellisuuden tarkistamiseksi.

Systeemikalibroinnin mittausepävarmuus,  $\pm 3...5$  ppm (Takalo 2004), voisi olla parempi, jos markkinoilla olevien digitaalivaaituskojeiden lukemaresoluutio olisi parempi kuin nykyinen  $10 \mu\text{m}$ , josta johdettu yhden lukeman epävarmuus on  $\pm 5,8 \mu\text{m}$ . Kun tätä vertaa referenssinä olevan laserinterferometrin mittausepävarmuuteen  $\pm 0,05 \mu\text{m}$ , voidaan todeta, että laserlukema on noin 100 kertaa tarkempi kuin lattalukema.

## 6 Yhteenveto

Vaaituksen mittakaavan realisaatio on latta-asteikko ja sen pituusyksikkö on Suomessa metri. Latta-asteikon kalibrointi eli vaaituksen mittakaavan oikeellisuuden tarkistus suoritetaan lattakomparaattorilla, jossa latta-asteikon pituutta verrataan laserinterferometrin antamaan pituuteen. Digitaalivaaitusjärjestelmän kalibrointi suoritetaan systeemikalibrointikomparaattorilla, jossa kojeen antaman lattalukemien erotusta verrataan laserinterferometrin vastaavaan eli latta ja koje kalibroidaan yhtenä kokonaisuutena.

Vaaituksen mittakaavan oikeellisuus on suositeltavaa tarkistaa säännöllisesti, esim. kerran vuodessa, mittakaavan muutosten seuraamiseksi. Muutokset saattavat johtua mm. latan kehikon ja invarnauhan välisen kompensatiomekanismin toimimattomuudesta ja erityisesti digitaalivaaituksessa CCD-kameran tai kojeen sisältämän elektroniikan vanhenemisestä.

**Lähdeluettelo**

- Ingensand, H. (1991). The Wild NA2000, the first digital level in the world. AVN 6, June 1990, pp. 201-210.
- Ingensand, H. (1999). The evolution of digital leveling techniques – limitations and new solutions. In Lilje, M. (Ed.) The importance of heights. FIG, Gävle, Sweden, pp. 59-68.
- Kääriäinen, E. (1963). Suomen Toisen Tarkkavaaituksen Kiintopisteluettelo I. Bench Mark List I of the Second Levelling of Finland. Suomen Geodeettisen laitoksen julkaisuja N:o 57. Helsinki 1963.
- Kääriäinen, E. (1966). The Second Levelling of Finland in 1935-1955. Suomen Geodeettisen laitoksen julkaisuja N:o 61. Helsinki 1966.
- Lisitzin, E. (1964). Contribution to the knowledge of land uplift along the Finnish coast. Fennia 89, No. 4, Helsinki 1964.
- Suomen Tie- ja Vesirakennusten Ylihallitus (1910). Suomen Tarkkavaaaitus 1982-1910. Painettu Keisarillisen senaatin kirjapainossa, Helsingissä 1910.
- Takalo, M. (1991). WILD NA2000 vaaitusmittausjärjestelmä. Maanmittaus 66:2, s.15-23.
- Takalo, M. (1997). Automated Calibration of Precise Levelling Rods in Finland. Suomen Geodeettisen laitoksen tiedonantoja 97:3. Kirkkonummi 1997.
- Takalo, M. (1999). Verification of Automated Calibration of Precise Levelling Rods in Finland. Suomen Geodeettisen laitoksen tiedonantoja 99:7. Kirkkonummi 1999.
- Takalo, M. (2000). Tarkan korkeudenmäärittämisen automaatiosta. Maanmittaus 75:1-2, s. 60-64.
- Takalo, M. (2004). On System Calibration of Digital Level. Ingenieurvermessung 2004, 14th International Conference on Engineering Surveying, Zürich, March 15-19, 2004.

**Lüite. Metrologiasanasto.** (Lähteet: EUROMET hanke 595: Metrologiasta lyhyesti ja SFS 3700: Metrologia, Perus- ja yleistermien sanasto.)

**Metrologia** (*metrology*). Mittauksia käsittelevä tieteenala.

**Kansainvälinen mittayksikköjärjestelmä, SI** (*International System of Units, SI*). Koherentti mittaussyksikköjärjestelmä, jonka Yleinen paino- ja mittakonferenssi on omaksunut 1960 ja jota se suosittelee käytettävän.

**Kalibrointi** (*calibration*). Toimenpiteet, joiden avulla saadaan mittauslaitteen ja vastaavien mittanormaaleilla toteutettujen arvojen välinen yhteys.

**Jäljitettävyys** (*traceability*). Mittaustuloksen yhteys ilmoitettuihin kansallisiin tai kansainvälisiin mittanormaaleihin.

**Mittanormaali** (*standard*). Kiintomitta, mittauslaite tai -järjestelmä, jolla realisoidaan suureen mittayksikkö.

**Kansallinen mittanormaallaboratorio** (*national standards laboratory*). Kansallisen mittanormaallaboratorion tehtävä on pitää yllä kansallista mittanormaalia ja sen jäljitettävyttä sekä siirtää sen kautta mittayksikkö muihin mittanormaaleihin. Lisäksi sen tulee hoitaa kansallisten mittanormaalien ylläpitoon ja kehittämiseen liittyvää mittatieteellistä tutkimusta, osallistua kansainvälisiin vertailumittauksiin ja muuhun kansainväliseen yhteistyöhön sekä toimia asiantuntijana pätevyysalueellaan.

**Kokeellinen keskihajonta** (*experimental standard deviation*). Saman mittaussuureen  $n$  peräkkäisen mittauksen kokeellinen keskihajonta  $s$  kuvaa tuloksen hajontaa ja se saadaan kaavasta  $s = \sqrt{[\sum(x_i - x_0)^2 / (n-1)]}$ , missä  $x_i$  on mittauksen tulos ja  $x_0$  on tulosten ( $n$  kpl) aritmeettinen keskiarvo.

**Tosiarvo** (*true value*). Yksilösuureen määritelmän mukainen arvo, joka voitaisiin saada täydellisellä mittauksella.

**Mittauksen tarkkuus** (*accuracy of measurement*). Mittaustuloksen ja tosiarvon hyväksytty yhtäpitävyys.

**Mittausepävarmuus** (*uncertainty of measurement*). Mittaustulokseen liittyvä parametri, joka kuvaa mittaussuureen arvojen oletettua vaihtelua.

**Toistuvuus** (*repeatability*). Saman mittaussuureen peräkkäisten mittaustulosten yhtäpitävyys, kun mittaukset suoritetaan samoissa olosuhteissa.

**Satunnaisvirhe** (*random error*). Mittaustuloksen ja sellaisten mittausten keskiarvon erotus, jossa keskiarvo saataisiin mittaamalla sama mittaussuure äärettömän monta kertaa toistuvissa olosuhteissa.

**Systemaattinen virhe** (*systematic error*). Keskiarvon ja mittaussuureen tosiarvon erotus, missä keskiarvo saataisiin kuten satunnaisvirheessä.

**Suhteellinen virhe** (*relative error*). Mittausvirhe jaettuna mittaussuureen tosiarvolla.