

Matti Liski

INERTIAMITTAUSLAITTEISTON SOVELTAMINEN RATAGEOMETRIAN MITTAUKSESSA

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Helmikuu/2020

TIIVISTELMÄ

Matti Liski: Inertiamittauslaitteiston soveltaminen ratageometrian mittauksessa (Application of inertial measurement equipment for surveying track geometry)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikka

Helmikuu 2020

Ratageometrian mittaaminen on oleellinen osa radanrakentamista ja kunnossapitoa. Radan huono kunto aiheuttaa ennen kaikkea turvallisuusriskejä henkilöliikenteelle, mutta myös esimerkiksi matkustusmukavuuden heikkenemistä ja rataa kohdistuvien kuormitusten kasvamista. Radan kuntoa mitataan nykyisillä radantarkastusmittauksilla verrattain harvoin ja radassa tapahtuvat geometriavirheet ovat omiaan entisestään lisäämään virheiden suurusluokkaa ja määrää. Lisäksi kunnossapitotyön aikana raskaan radantarkastusvaunun käyttö on hankalaa ja perinteiset takymetreillä tapahtuvat mittaukset eivät tuota jatkuvaa mittaustietoa ja ovat verrattain hitaita.

Inertiamittauksella tarkoitetaan kiihtyvyyteen perustuvaa mittausta. Inertiamittauksen avulla saatava mittaustieto tuottaa jatkuvaa ja tarkepisteillä sekä GPS-mittauksella saatuun tietoon yhdistettynä myös absoluuttista mittaustietoa mitatusta rataosuudesta. Inertiamittaukseen perustuvaa paikannusta on hyödynnetty laiva- ja lentoliikenteessä jo vuosikymmenien ajan. Radanrakentamisessa tai kunnossapidossa inertiamittausta ei maailmalla vielä laajamittaisesti hyödynnetä ja tässä työssä on tarkoitus tutkia, että riittääkö inertiamittauslaitteiston tarkkuus radantarkastusmittausten tarpeisiin.

Tässä työssä valittiin inertiamittauslaitteistolle kaksi eri sovellusta. Ensimmäisessä tarkastellaan, että voidaanko laitteistoa hyödyntää pienen kokonsa ja verrattain edullisen hintansa vuoksi säännöllisesti liikennöivässä kalustossa. Toinen sovellus on erityinen työnaikaisiin ja tukemistyötä edeltäviin mittauksiin tarkoitettu radantarkastuskärry. Molempien sovelluksien osalta tutkimus keskittyy laitteiston mittatarkkuuden riittävyyteen.

Kärryllä tapahtuvalla inertiamittauksella voidaan parhaimmillaan riittävällä tarkepisteiden määrällä saavuttaa alle yhden millimetrin suuruinen mittavirhe. Tällöin voidaan katsoa laitteiston tarkkuuden olevan vähintäänkin riittävä radanrakentamiseen ja tuentaan liittyviin mittauksiin. Säännöllisesti liikennöivällä kalustolla mittatarkkuus ja etenkin mittausten toistettavuus koettiin kuitenkin ongelmaksi, ja menetelmä soveltuu lähinnä radan pystygeometriassa tapahtuvien äkillisten muutosten seuraamiseen, jolloin varsinaisella mittauskalustolla tehtäviä mittauksia voitaisiin tarkemmin kohdentaa alueille, joilla ongelmia esiintyy.

Avainsanat: inertiamittaus, ratageometria, inertiamittauslaitteisto, radantarkastusmittaus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. RADAN GEOMETRIA	2
2.1 Pystygeometria	2
2.2 Vaakageometria	3
3. GEOMETRIAVIRHEET	6
4. RADANTARKASTUSMITTAUS	9
5. INERTIAMITTAUSLAITTEISTO	10
6. INERTIAMITTAUSLAITTEISTO RATAGEOMETRIAN MITTAUKSESSA	13
6.1 Säännöllisesti liikennöivässä kalustossa	13
6.2 Radanmittauskärryssä	15
7. YHTEENVETO	18
LÄHTEET	19

1. JOHDANTO

Tutkimus liittyy inertiamittauslaitteiston hyödyntämiseen raidegeometrian mittaamisessa. Työn tarkoitus on tutkia voiko kiihtyvyyteen perustuvaa mittaustietoa hyödyntää myös raideliikenteen tarpeisiin erityisesti raidegeometrian mittauksissa. Nykyään raiteita mitataan pääasiassa takymetreilla ja näin saatu tieto ei tuota jatkuvaa tietoa radan geometriasta, kallistuksista ja näihin liittyvistä mahdollisista virheistä, vaan tiedon tarkkuus riippuu mitattujen pisteiden välisestä välimatkasta. Inertiamittauslaitteisto mahdollistaisi jatkuvan tiedon radasta ja takymetrimittauksia tarvitaan huomattavasti vähemmän kiintopisteiden mittaamiseen. Koska takymetrimittauksia tarvitaan vähemmän, on inertiamittauksessa mahdollisuus myös työtehtävän nopeuttamiseen.

Työssä keskitytään inertiamittauslaitteiston mittatarkkuuteen, eikä niinkään muihin inertiamittauslaitteiston ominaisuuksiin. Tarkoituksena on siis tutkia, voidaanko inertiamittauslaitteistoa hyödyntää riittäväällä tarkkuudella radanrakentamisen ja kunnossapidon tarpeisiin.

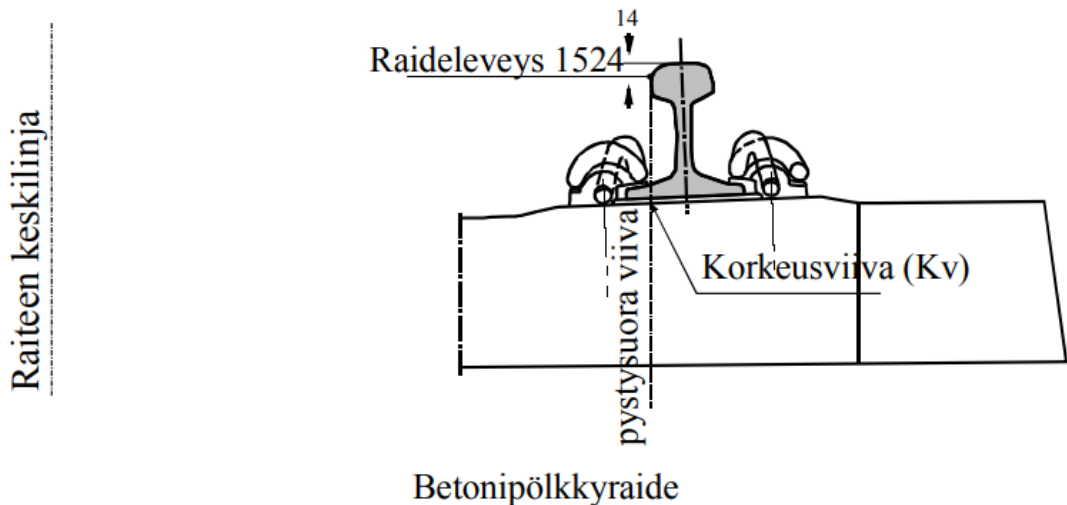
Toisessa luvussa kerrotaan radan geometriasta ja siihen liittyvistä käsitteistä ja suureista. Kolmannessa luvussa esitellään ratageometriassa esiintyvät yleisimmät geometriavirheet. Neljännessä luvussa kerrotaan radantarkastusmittauksesta Suomessa käytössä olevilla nykyisillä menetelmillä. Viidennessä luvussa käydään läpi inertiamittauslaitteiston toimintaa ja kuudennessa kyseisen laitteiston kahta eri sovellutusta ratageometrian mittaamisessa. Seitsemännessä luvussa kootaan yhteen tutkimuksessa kerätyt tiedot ja huomionarvoiset asiat.

2. RADAN GEOMETRIA

Radan geometria kuvaa raiteen sijaintia, suuntaa, korkeusasemaa, kaarteita, kallistuksia ja raidelevyettä. Radan geometrian peruskäsitteiden ymmärtäminen on oleellista, jotta voidaan tarkastella inertiamittauslaitteiston hyödyntämistä radan geometrian mittaamisessa. Ratageometria jaetaan karkeasti kahteen osaan, pystygeometriaan ja vaakageometriaan. Tässä luvussa on esitelty radan geometrian peruselementit ja käsitteet.

2.1 Pystygeometria

Pystygeometria kuvaa radan sijaintia korkeussuunnassa. Radan korkeusasema ilmoitetaan radan korkeusviivan (kuva 1) kohdalta, mikä tarkoittaa raiteen korkeutta aluslevyn tai välilevyn alapinnan tasossa kiskon kulkureunan kohdalla. (Liikennevirasto 2010)



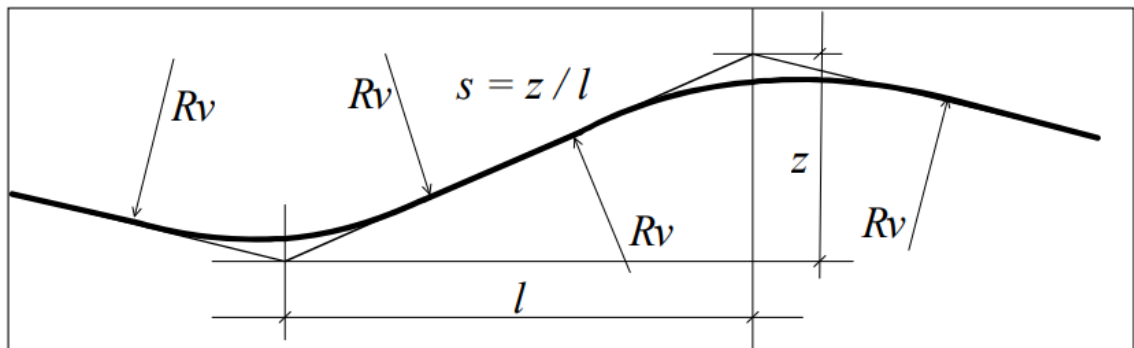
Kuva 1. Raiteen korkeusviiva kallistamattomalla betonipölkkyraiteella (Liikennevirasto 2010).

Suoralla ja kallistamattomissa kaarteissa raiteen korkeusviiva ilmoitetaan toisen kiskon kulkureunan kohdalta ja kallistetuissa kaarteissa alemman, eli käytännössä useimmiten kaarteiden sisäreunan puoleisen, kiskon kulkureunan kohdalta. (Liikennevirasto 2010)

Pystygeometria muodostuu pituuskaltevuusjaksoista, joiden arvo muodostuu korkeuseron ja vaakapituuden välisestä suhteesta kaavan

$$s = \frac{z}{l} \quad (1)$$

mukaan, missä s on pituuskaltevuus, z on korkeusero metreinä ja l vaakapituus metreinä. Pituuskaltevuus ilmoitetaan joko promilleina, esim. 3‰, tai tuhannesosina, esim. 0,003. Pituuskaltevuuden negatiivinen arvo kuvaa alamäkeä raiteen pituusmittauksen suuntaan. Pituuskaltevuusjaksojen taitepisteessä tasausviiva pyöristetään pyöristyskaarresäteellä R_v , siirtymäkaarria ei käytetä. Pyöristyskaarresäde ja pituuskaltevuusjaksojen taitepiste määräävät pyöristyskaaren tangenttipisteiden paikat. (Liikennevirasto 2010) Havainnekuva raiteen pystygeometriasta kuvassa 2.



Kuva 2. Esimerkkikuva raiteen pystygeometriasta (Liikennevirasto 2010).

2.2 Vaakageometria

Vaakageometriassa määritellään radan linjaus sen keskilinjan mukaan, sekä kallistuksissa käytettävä raiteen kallistus. Vaakageometria muodostuu erilaisista elementeistä, joita ovat suorat, kaaret, siirtymäkaaret ja vaihteet. Vaakageometria myös usein määrittää kullekin raiteelle käytössä olevan maksiminopeuden. (Liikennevirasto 2010)

Raiteen kallistus tarkoittaa määritelmän mukaan sisä- ja ulkokiskon keskilinjan, eli kulkupinnan, välistä korkeuseroa 1600 mm etäisyydeltä toisistaan. Käytännössä raiteen kallistus mitataan kuitenkin usein sisä- ja ulkokiskon korkeimpien kohtien välisenä korkeuserona. Raiteen kallistus ja siihen liittyvät suureet on esitetty kuvassa 3. Raiteen kallistuksen suunnittelu perustuu poikittaiskiihtyvyyteen tai nykyisin useimmiten kallistuksen vajakseen. Kallistuksen vajakus kertoo raiteen todellisen kallistuksen ja tasapainokallistuksen välisen eron. Tällöin kallistuksen vajakusen ollessa 0, on kyseessä tasapainokallistus eikä kalustoon kohdistu sivuttaissuuntaista kiihtyvyyttä.

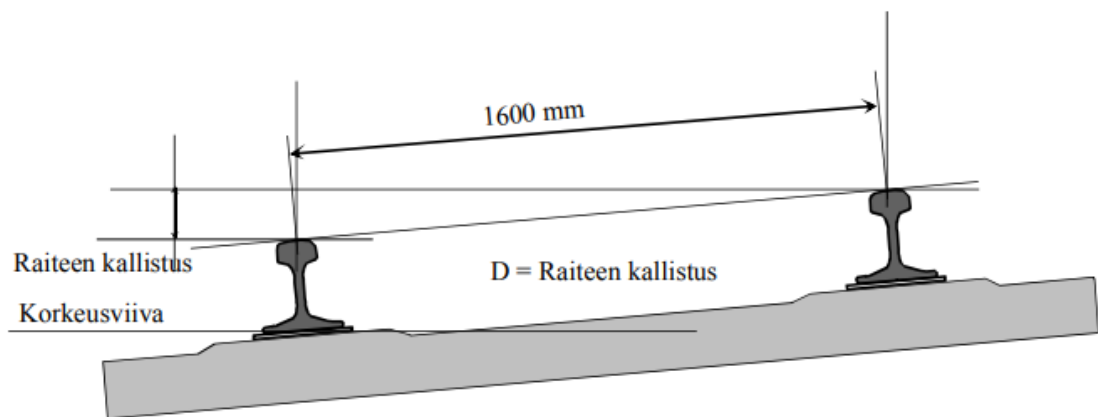
Kallistuksen vajoaus ja poikittaiskiihtyvyyden kuvaavat samoja asioita, mutta ovat ilmaistu eri nimellä ja mittayksiköllä. Kallistuksen vajoaus lasketaan kaavalla

$$I = \frac{12,5V^2}{R} - D, \quad (2)$$

missä I on kallistuksen vajoaus millimetreinä, V on nopeus kilometreinä tunnissa, R on kaarresäde metreinä ja D on raiteen kallistus millimetreinä. Sen vastaavuus poikittaiskiihtyvyyteen on

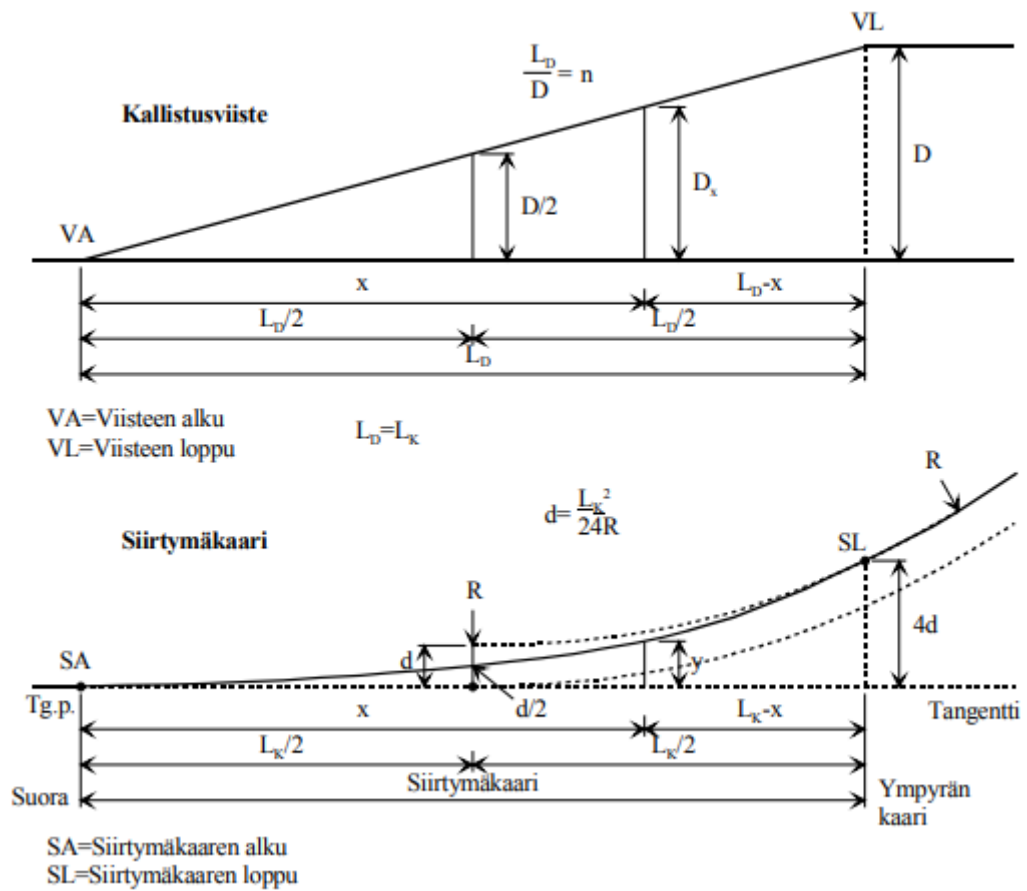
$$a_q = \frac{g \times I}{1600} = \frac{I}{163}, \quad (3)$$

missä a_q on poikittaiskiihtyvyyden ($\frac{m}{s^2}$), g on putoamiskiihtyvyyden ($\frac{m}{s^2}$) ja I on kallistuksen vajoaus millimetreinä. (Liikennevirasto 2010, Liikennevirasto 2010)



Kuva 3. Raiteen kallistus (Liikennevirasto 2010).

Siirtymäkaarta käytetään, jotta siirtyminen suoralta kaarelle tapahtuisi sujuvammin. Nykyisin yleisin siirtymäkaaren muoto on klotoidi, missä kaarevuus kasvaa lineaarisesti alkaen ensin suorasta ja päättyen haluttuun kaarretta vastaavaan kaarevuuteen. Siirtymäkaaren ansiosta kalustoon ja rataan kohdistuvat voimat pienenevät ja vältetään äkillisiltä kallistuksen vajouksen muutoksilta, jolloin myös matkustuskomfortti paranee. Mikäli kaarteessa on kallistusta, on siirtymäkaareissa käytettävä kallistusviistettä. Kallistusviisteessä kallistus kasvaa hiljalleen saavuttaen siirtymäkaaren lopussa kaarteessa käytettävän kallistuksen. Mikäli siirtymäkaarena käytetään klotoidia, kasvaa myös kallistus suoraviivaisesti. (Liikennevirasto 2010) Kuvassa 4 on esitetty kallistusviiste ja siirtymäkaari.



Kuva 4. Kallistusviiste ja siirtymäkaari (Liikennevirasto 2010)

Vastaavasti jos käytetään siirtymäkaarena esimerkiksi Helmertin siirtymäkaarta, käytetään kallistusviisteenä S-kallistusviistettä, joka on muodoltaan toisen asteen paraabeli. Helmerin siirtymäkaari kuitenkin rasittaa rataa klotoidia enemmän, aiheuttaen kunnossapidolle haasteita, joten sitä käytetään vain hyödyn ollessa merkittävä. (Liikennevirasto 2010)

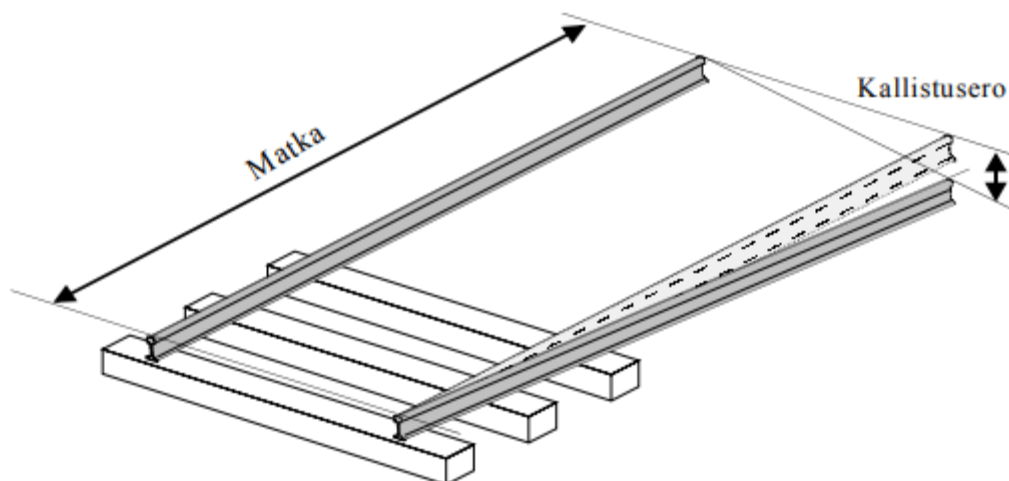
3. GEOMETRIAVIRHEET

Radan geometriassa tapahtuu muutoksia ulkoisten tekijöiden vaikutuksesta. Näitä ovat esimerkiksi toistuva altistuminen painavalle kalustolle ja radan tukikerroksen muokkaantuminen. Näin ollen radan geometria ajautuu pois suunnitellusta linjauksesta, ja tällä voi olla merkittäviä vaikutuksia esimerkiksi matkustusmukavuuteen ja radan turvallisuuteen. (Chen et al. 2018)

Toinen radan tukikerrokseen ja sitä kautta geometriaan vaikuttava tekijä on sää. Runsas sateet, kuivuus tai suuret lämpötilan muutokset voivat aiheuttaa kivaineoksen liikkumista tukikerroksessa tai muissa radan rakennekerroksissa. (Graeme 2017, s. 4) Suomessa merkittävä radan kuntoon vaikuttava tekijä on oletettavasti myös routiminen.

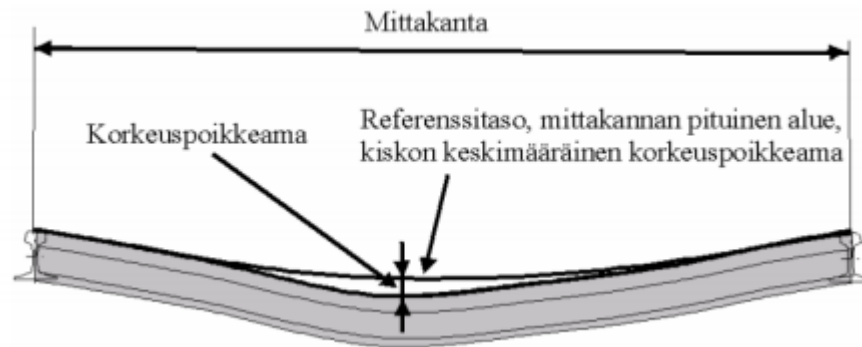
Tässä luvussa on esitetty joitakin yleisimpiä geometriavirheitä, joita geometriamittauksella pyritään havaitsemaan, jotta virheet voidaan korjata esimerkiksi raiteen tuennalla ja rataosuuden liikennöinti pysyy turvallisena.

Kieroudella tarkoitetaan määrättyllä etäisyydellä toisistaan mitattua vierekkäisten kiskojen välistä korkeuseroa. Kierouden mittauksessa ei kuitenkaan huomioida siirtymäkaarissa tapahtuvaa suunniteltua kallistusviistettä vaan kierous ilmoitetaan poikkeamana suunnitellusta tasosta. (Ratahallintokeskus 2006, s. 7) Havainnekuva radan kieroudesta on esitettynä kuvassa 5. Kieroutta voidaan mitata joko mittavaunulla tai laskemalla kallistusten välinen erotus määrättyllä välillä.



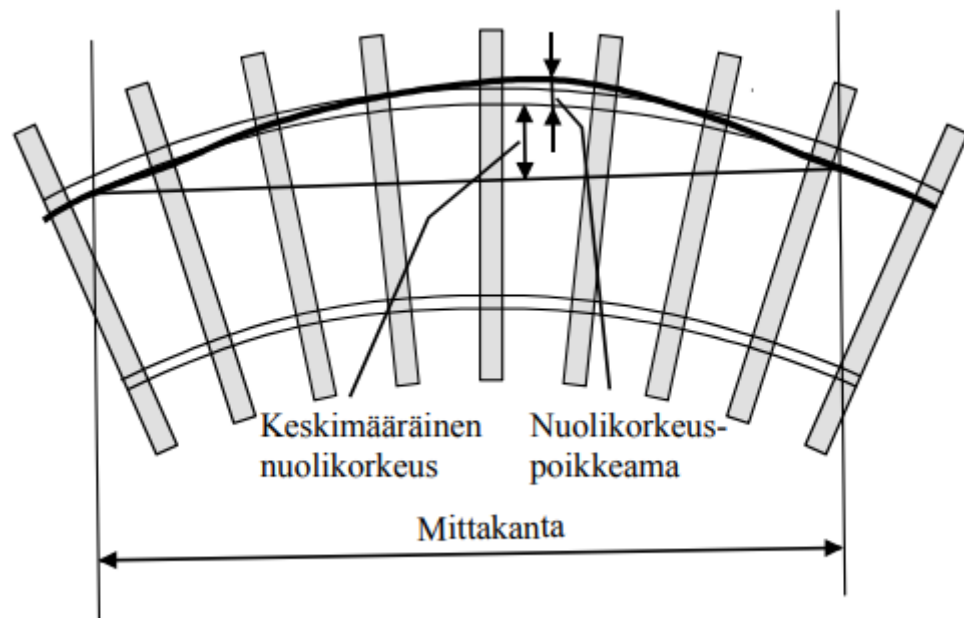
Kuva 5. Radan kierous (Ratahallintokeskus 2006, s. 8)

Korkeuspoikkeama tarkoittaa kiskon kulkupinnan korkeussuuntaista poikkeamaa verrattuna kiskon kulkupinnan keskimääräiseen tasoon tai määrättyyn referenssitasoon (kuva 6). Referenssitaso määräytyy käytettävän mittakannan mukaan.



Kuva 6. Korkeuspoikkeama (Ratahallintokeskus 2016, s. 8).

Nuolikorkeudella tarkoitetaan suurinta sivupoikkeamaa suorasta, mittakannan pituisesta jännteestä. Ympyränkaarella nuolikorkeus on suurin ympyränkaaren keskikohdalla. Nuolikorkeuspoikkeama on vastaavasti poikkeama kiskon keskimääräiseen nuolikorkeuteen. (Ratahallintokeskus 2006) Nuolikorkeus ja sen poikkeama on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Keskimääräinen nuolikorkeus ja nuolikorkeuspoikkeama (Ratahallintokeskus 2006, s. 9)

Raidelevyyden muutoksilla tarkoitetaan raidelevyyden poikkeamaa suunnitellusta raidelevydestä. Raideleveys voi joko levenyä tai kaventua. Raidelevyyden

kapeneminen on raiteella liikkuvalla kalustolla haitallisempaa, joten sen raja-arvot ovat levenemistä tiukemmat. (Ratahallintokeskus 2006; Pesonen 2015)

4. RADANTARKASTUSMITTAUS

Maailmalla on käytössä karkeasti kahteen luokkaan jaettavia radantarkastusvaunuja: suhteellista ja absoluuttista mittaustietoa antavia vaunuja. Suhteellista mittaustietoa keräävät vaunut hyödyntävät jotakin ennalta määrättyä mittakantaa, jonka perusteella luodaan tietoa geometriassa tapahtuvista poikkeamista jonkin referenssitason suhteen. Vaunussa voi myös olla jokin inertiamittausta hyödyntävä mittalaite, esimerkiksi gyroskooppi, joka mittaa esimerkiksi raiteen kallistusta. Inertiamittauksen tarkkuus kuitenkin heikentyy mitattavan matkan pidentyessä. Absoluuttista mittaustietoa keräävät vaunut mittaavat myös radan geometriaa jonkin referenssitason suhteen, mutta mittaavat samalla raiteen keskilinjan maantieteellisen sijainnin jonkin geodeettisen mittalaitteen, kuten takymetrien tai satelliittipaikannusjärjestelmän avulla, ja yhdistävät geometriasta saadut mittaustulokset tähän paikkatietoon. (Chen et al. 2018)

Radantarkastusvaunumittaus aloitettiin Suomessa vuonna 1981. Tällä hetkellä radantarkastukseen käytetään Radantarkastusvaunu Ttr1 51:tä, lempinimeltään ”Emmaa”. Emma käyttää mittaamiseen mittaustelevä sekä niiden väliin sijoitettuja antureita. Näillä mitataan korkeuspoikkeamaa, nuolikorkeutta, raidelevyettä, kallistusta ja kieroutta. Kaikki Emmalla tapahtuvat virheiden mittaukset perustuvat perusviivasta tapahtuviin poikkeamiin (Mikkonen 2005; Ratahallintokeskus 2005). Emmalla ei siis saada virheistä absoluuttista paikkatietoa.

Ttr1 51 Emman mittaustarkkuutta ei ole kerrottu, mutta Ratahallintokeskus on ohjeessaan Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta (2006) ilmoittanut, ettei mittaustuloksissa esiinny virheiden ylikorostuneisuutta. Myöskään ajonopeudella tai -suunnalla ei ole ohjeen mukaan merkitystä virheiden suuruudelle.

Suomessa suoritetaan tällä hetkellä tarkastusvaunumittauksia korkean kunnossapitotason (tasot 1A, 1AA) radoille kuusi kertaa vuodessa ja normaalin kunnossapitotason (tasot 1–4) radoille yhdestä kolmeen kertaa vuodessa (Ratahallintokeskus 2006).

Suomessa on lähivuosina tarkoituksena ottaa käyttöä Mecmercin valmistama radantarkastusvaunu, kutsumanimeltään Meeri (Väylä 2017). Meerin oli tarkoitus aloittaa toimintansa jo vuoden 2019 alussa, mutta käyttöönotto on ilmeisesti syystä tai toisesta viivästynyt.

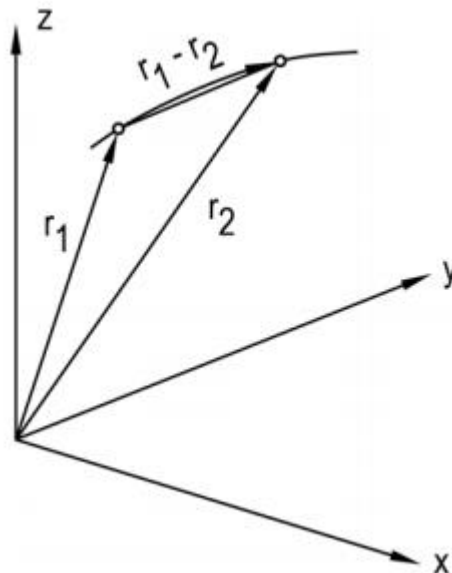
5. INERTIAMITTAUSLAITTEISTO

Inertiamittaus kehitettiin alun perin raketien tarpeisiin, ja sen ensimmäinen laajamittainen sovellus oli Saksan toisessa maailmansodassa käyttämät V2 -raketit. Tuolloin mittavirheet olivat kuitenkin suuria ja kyse oli enemmän lentoradan approksimoinnista kuin varsinaisesta mittauksesta. Vielä yli kymmenen vuotta sodan päättymisen jälkeen inertiamittausta tutkittiin lähinnä aseteollisuuden tarpeita varten. Sitten inertiamittausta on hyödynnetty esimerkiksi ensimmäisissä avaruuslennoissa ja nykyään siviilimaailmassa sitä käytetään laajamittaisesti ilmailussa ja laivaliikenteessä. (Dick et al. 2006)

Inertiamittaus perustuu pitkälti mekaniikan peruslakeihin, erityisesti Newtonin toiseen lakiin

$$F = ma, \quad (4)$$

missä F on kappaleeseen kohdistuva voima, m kappaleen massa ja a kappaleen kiihtyvyys. Kuvassa 8 on esitetty massallisen kappaleen liike avaruudessa.



Kuva 8. Massallisen kappaleen liike avaruudessa. (Caspary 1985)

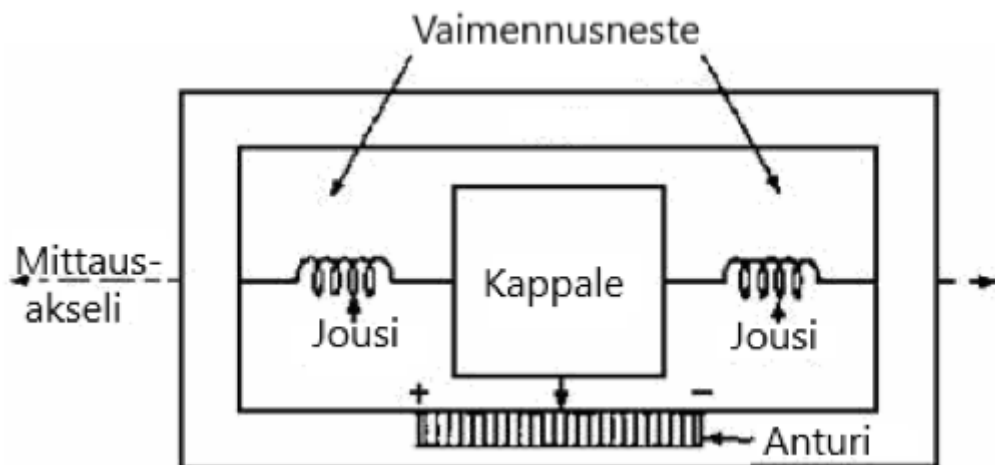
Kun tiedetään kappaleen massa ja siihen kohdistuva voima, voidaan laskea kappaleeseen kohdistuva kiihtyvyys jossakin määrättyssä koordinaatistossa kaavan (4) mukaan.

Edelleen voidaan laskea kappaleen siirtymä integroimalla kiihtyvyys kahdesti ajan suhteen

$$r_2 - r_1 = \iint_{t_1}^{t_2} a(t) dt dt, \quad (5)$$

missä siirtymä on paikkavektoreiden r_2 ja r_1 välinen erotus (Caspary 1985).

Inertiamittauslaitteisto sisältää kiihtyvyyssantureita ja gyroskooppeja. Kiihtyvyyssanturi on yksinkertaisimmillaan laite, jossa on putki ja sen sisällä jokin kappale, yleensä kitkan minimoimiseksi pallo. Kappaletta pitää paikoillaan putken keskellä kaksi mekaanista joustia tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää sähkömagneettista kenttää. Kiihtyvyys saadaan mittaamalla joustien puristusta ja venymää tai vaihtoehtoisesti sähkövirtaa, jonka vaikutuksesta pallo ei kiihtyvyydestä huolimatta liiku. (Caspary 1985) Kuvassa 9 on esitetty yksinkertainen kiihtyvyyssanturi.

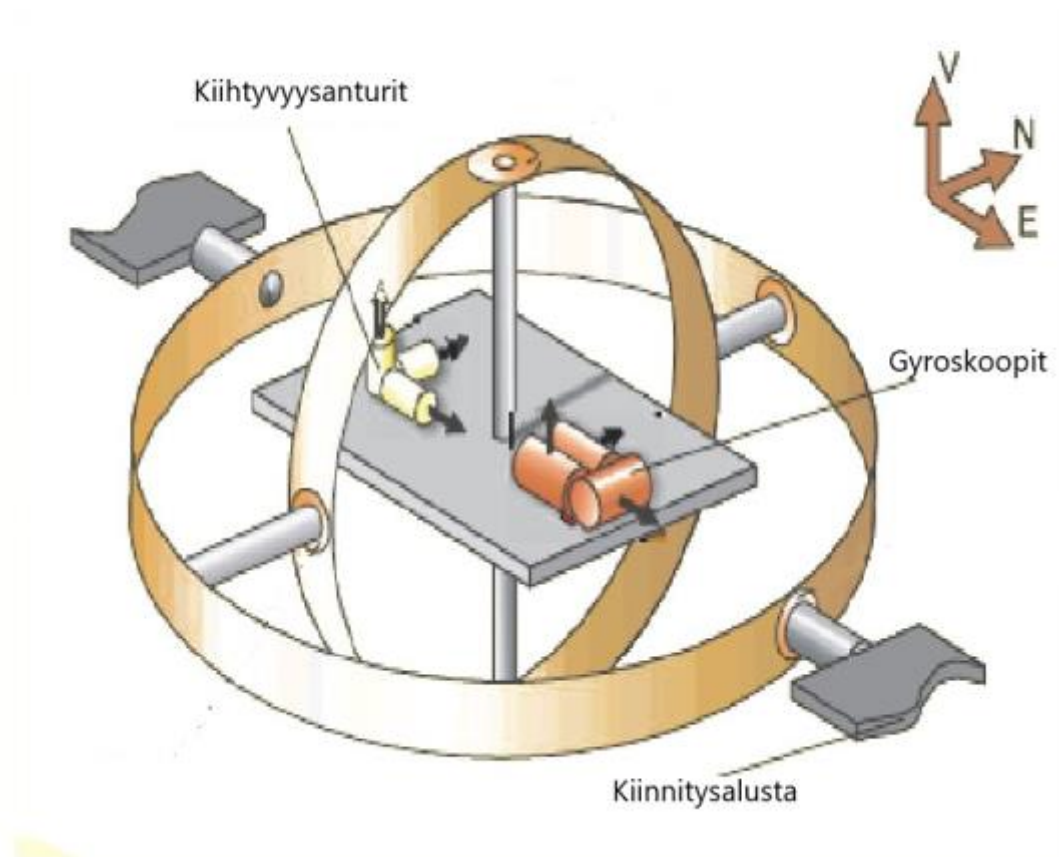


Kuva 9. Yksinkertainen kiihtyvyyssanturi. (Hicks 1998 s. 21)

Kiihtyvyyssanturi mittaa kiihtyvyyttä vain yhden akselin suhteen, joten kolmiulotteisessa avaruudessa tarvitaan kolme toisiinsa nähden kohtisuoraa kiihtyvyyssanturia, yksi kunkin mittausakselin suuntaisesti. (Caspary 1985)

Jotta kiihtyvyyssantureiden mittaustulokset ovat halutussa referenssisitasossa täytyy niiden pysyä koko mittauksen ajan samansuuntaisina. Tämän mahdollistaa mittauslaitteistoon sisältyvät gyroskoopit, joiden avulla laitteiston asema pidetään vakaana. Mittauslaitteisto gyroskooppeineen asennetaan mittauskalustoon siten, että se pääsee liikkumaan vapaasti ja lähes kitkattomasti. Näin kiihtyvyyssanturit mittaavat kiihtyvyyttä koko ajan saman tason suhteen, eivätkä kalustolle tapahtuvat liikkeet vaikuta mittauslaitteiston asentoon. (Caspary 1985)

Mekaanisen gyroskoopin toiminta perustuu liikkeen säilymisen lakiin, missä nopeaan pyörimisliikkeeseen saatettu pyörä säilyttää pyörimisnopeuden ja -suunnan, jolloin pyörän asento ei muutu, mikäli siihen ei kohdistu ulkoisia voimia. (McFadden 2017) Nykyään voidaan käyttää myös optisia gyroskooppeja, mitkä perustuvat ranskalaisen fyysikon Georges Sagnac'n löytämään ilmiöön, missä laitteessa tapahtuva liike aikaansaa kuitukäämissä vastakkaisiin suuntiin kulkevien valojen välille vaihe-eron, jolloin saadaan täsmällistä tietä laitteen asennosta. (Pascali 2017) Kuvassa 9 esitetty havainnekuva inertiamittauslaitteistosta ja sen osista.



Kuva 10. Inertiamittauslaitteto ja sen osat. (Quadri & Sidek 2014, s. 40)

Todellisuudessa laitteistot ovat kuitenkin kuvan esimerkkiä huomattavasti kompaktimpia ja teknisempiä. Toimintaperiaatteeltaan inertiamittaus on kuitenkin pysynyt samana tekniikan kehittyessä mahdollistaen entistä pienikokoisemmat ja tarkemmat sovellutukset.

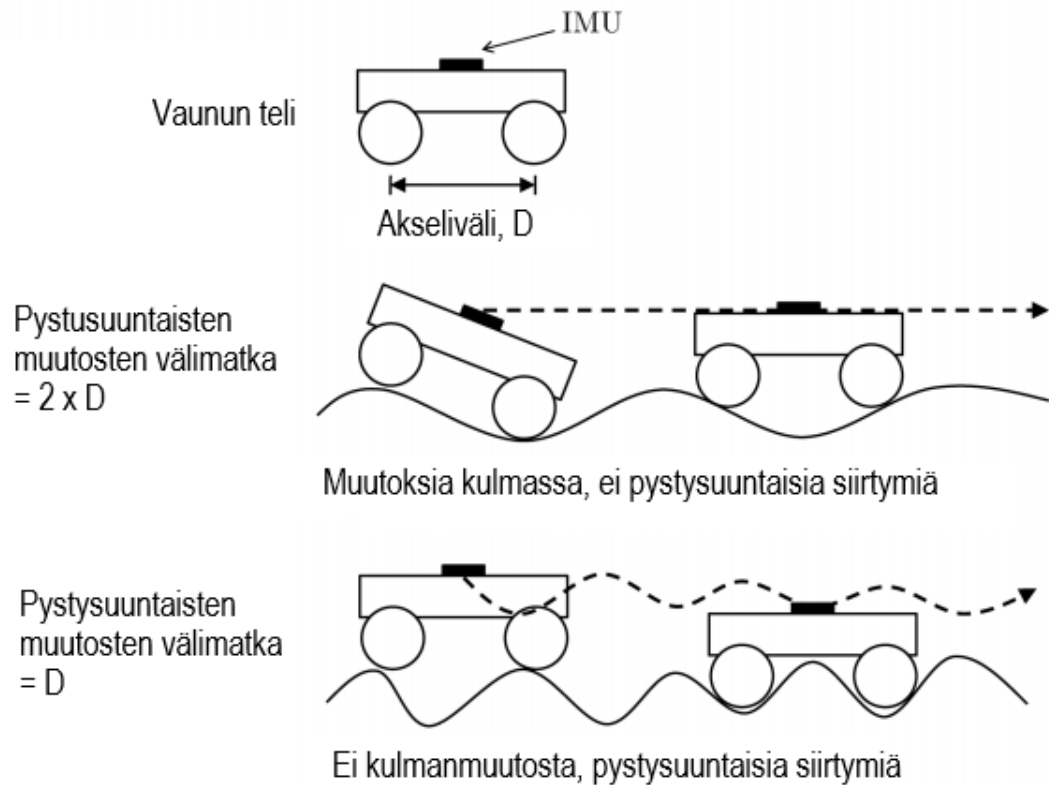
6. INERTIAMITTAUSLAITTEISTO RATAGEOMETRIAN MITTAUKSESSA

6.1 Säännöllisesti liikennöivässä kalustossa

Inertiamittauslaitteiston asentaminen normaaliin henkilö- tai tavaraliikennejunaan mahdollistaisi radan geometrian kunnan yhtäjaksoisen seuraamisen ja jopa päivittäisen mittaustiedon keräämisen. (Graeme 2017)

Eräässä menetelmässä kolmiaksaalinen kiihtyvyyssanturi ja kolmiaksaalinen gyroskooppi asennetaan vaunun teliin mahdollisimman lähelle sen painopistettä. Mittauslaitteistoon liitettiin myös GPS -antenni havainnoimaan junan liikettä ja keräämään mittaustiedosta suurpiirteistä paikkatietoa. Mittalaite käynnistyi vasta kun havaittiin junan liikkuvan GPS -antennin avulla. Mittausten tarkkuudeksi ilmoitettiin tällä laitteistolla ± 2 mm.

Suurin työ säännöllisesti liikennöitävään kalustoon sijoitettavan anturin mittauksissa on datan käsittely. Mittalaitteessa olevien gyroskoopin ja kiihtyvyyssanturin mittaustulokset tulee yhdistää, sillä niiden mittaustulokset voivat erota huomattavasti toisistaan. Esimerkiksi pystygeometriassa tapahtuvien muutosten välimatkan ollessa kaksinkertainen suhteessa telin akseliväliin ei pystysuunnassa tapahdu siirtymiä, mutta kulma vaihtelee. Vastaavasti vaihteluvälin ollessa sama telin akselivälin kanssa tapahtuu pystysuunnassa siirtymiä, mutta kulma pysyy vakiona (Graeme 2017, s. 64). Vaihteluvälin vaikutusta mittaustuloksiin on havainnollistettu kuvassa 11. Karkeasti voidaan myös sanoa, että kiihtyvyyssanturi on epätarkempi matalilla nopeuksilla, kun taas gyroskooppi ei kykene havaitsemaan pystysuunnassa tiheään tapahtuvia muutoksia (Graeme 2017, s 64.).



Kuva 11. Geometriavirheen aallonpituuden vaikutus mittaustuloksiin (Graeme 2017, s. 64.)

Yksittäinen mittaus henkilöliikennekalustolla ei siis tarjoa riittävän tarkkaa tietoa, jotta voitaisiin päätellä radan geometriassa tapahtuneiden poikkeamien suuruutta. Mittausten toistettavuus on myös huono. Kuitenkin useista junista saatavan jatkuvan mittaustiedon perusteella ongelmakohtia pystyttäisiin paikantamaan ilman varsinaisia radantarkastusmittauksia ja radan pystygeometriassa tapahtuvia äkillisiä muutoksia pystyttäisiin seuraamaan lähes reaaliajassa. Näin varsinaisia mittauksia voitaisiin kohdentaa tarkemmin mahdollisiin ongelmakohtiin.

Normaalissa liikennekäytössä oleva kalusto inertimittauslaitteineen ei kuitenkaan kykene korvaamaan varsinaiseen radantarkastukseen kehitettyä kalustoa, joka kykenee mittaamaan pystygeometrian lisäksi myös muita oleellisia radantarkastukseen liittyviä suureita. (Graeme 2017)

6.2 Radanmittauskärryssä

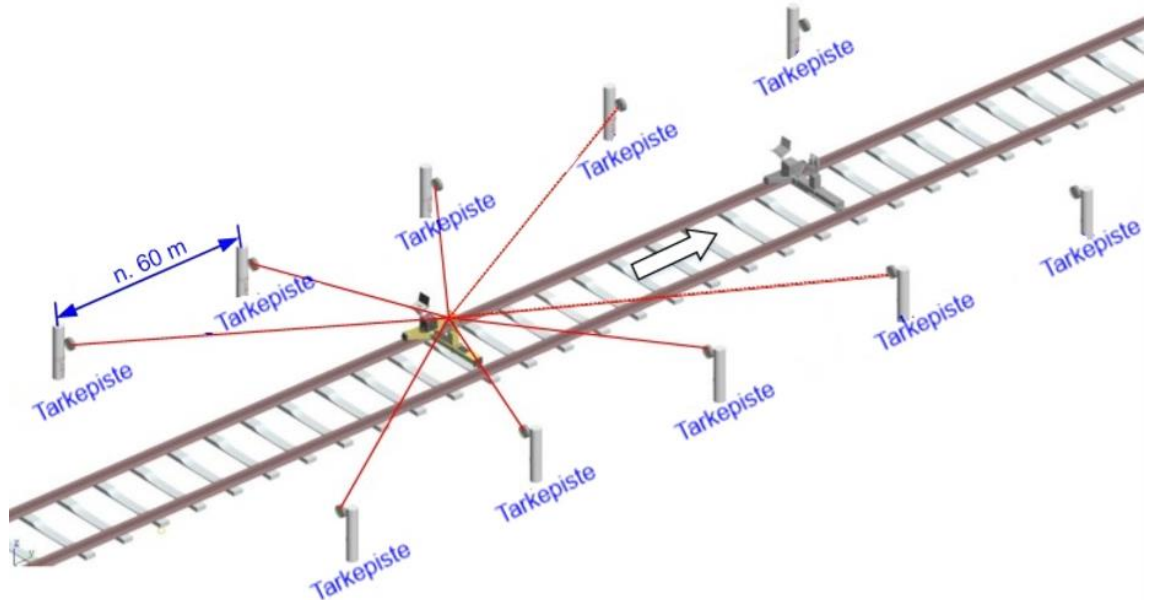
Inertiamittausta hyödyntäviä radantarkastuskärryjä käytetään esimerkiksi rakentamis- tai kunnossapitotyönaikaiseen mittaukseen. Niitä käytetään pääasiassa tukemista edeltävään ja tukemisen jälkeiseen mittaustyöhön. Trimblen valmistama Trimble GEDO CE 2.0 radanmittauskärry esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Trimblen GEDO CE 2.0 radantarkastuskärry.

Keveiden kärryjen etuna on niiden helppo liikuteltavuus verrattuna esimerkiksi radantarkastusvaunuun. Laitteen avulla voidaan mittauksia tehdä esimerkiksi paikallisia lyhyitä mittauksia liikennekatkoilla katkaisematta junaliikennettä mittausten ajaksi. Lisäksi ne tuottavat jatkuvaa ja absoluuttista mittaustietoa, jota voidaan hyödyntää radan tuennassa lähes välittömästi. Ne mittaavat myös radan pysty- ja vaakageometrian lisäksi raidelevyettä sekä kallistusta. Laitteisto vaatii kuitenkin suuren absoluuttiseen mittatarkkuuteen pystyäkseen geodeettisen paikannuksen esimerkiksi takymetriä

tietyin välimatkoin. Eräissä kokeissa vastaava laitteisto kykeni 1,4 mm tarkkuuteen absoluuttiseen tarkkuuteen, kun mittaus keskeytettiin ja laite paikannettiin uudelleen noin 120 m välein (Chen et al. 2018). Mittauksen kulkua havainnollistettu kuvassa 13.



Kuva 13. Mittauksen kulku radantarkastuskärryä käyttäen (Chen et al. 2018)

Valmistajan ilmoittamat tiedot laitteen teknisistä ominaisuuksista vaihtelevat jonkin verran riippuen ilmeisesti aiotusta käyttötarkoituksesta ja laitteen mallinumerosta. Taulukkoon 1 on kuitenkin koottu eräitä valmistajan ilmoittamia keskeisimpiä teknisiä ominaisuuksia.

Taulukko 1. Trimble GEDO Vorsys Tech Sheetissä ilmoitettuja laitteen ominaisuuksia

	Tarkkuus	Huomioitavaa
Suorituskyky	1400 m/h	
	2500 m/h	Kinematic -asetus
Mittaustaajuus	200 Hz	
Paikannustarkkuus	±1 mm	Stop&Go -asetus
	±3 mm	Kinematic -asetus
Raidevälin mittaustarkkuus	±0,3 mm	
Kallistuksen mittaustarkkuus	±0,5 mm	Paikallaan

Inertiamittausta hyödyntävän mittauskärryn soveltaminen ratageometrian mittaukseen on suhteellisen uusi sovellutus. Railway-technology.com sivuston uutisen mukaan laite on tullut markkinoille vuoden 2017 viimeisellä vuosineljänneksellä. Trimble on ollut myös ilmeisesti ensimmäinen kyseistä teknologiaa tarjoava yritys. Oletettavasti

tämänkaltainen mittaaminen lisääntyy myös Suomessa resurssien määrän rajoituessa ja radan kunnon vaatimustason kasvaessa uusia suurnopeusratoja silmällä pitäen.

7. YHTEENVETO

Ratageometrian mittaaminen on oleellista erityisesti liikennöinnin turvallisuuden kannalta, mutta ei sovi unohtaa rakennus- ja kunnossapitotyön aikaisia mittauksia. Erityisesti näissä inertiamittaus voi osoittautua edukseen laitteiston keveyden ja helpon liikuteltavuuden takia. Kevytrakenteiden radantarkastuskärry voidaan käsin nostaa radalle ja radalta pois, jolloin mittausten tekeminen on mahdollista radan liikennöinnissä tapahtuvien taukojen aikana.

Inertiamittauksen avulla saatu mittaustieto on myös absoluuttista ja jatkuvaa, jolloin tiedon käsittely helpottuu. Mittauksista saadut tiedot voidaan suoraan yhdistää haluttuun geodeettiseen koordinaatistoon, eikä mittausten tarkkuus riipu mittauspisteiden määrästä. Toki esimerkiksi mittauskärry vaatii tarkkaan mittaukseen kyetäkseen jonkin verran esimerkiksi takymetreilla mitattuja tarkepisteitä, mutta mittaaminen on mahdollista suurpiirteisesti sijoittaa koordinaatistoon myös pelkän GPS -paikannuksen avulla.

Suurimmat haasteet inertiamittauksen soveltamisessa ratageometrian mittaukseen liittyvät mittalaitteiston optimointiin ja datan käsittelyssä käytettävien algoritmien muodostamiseen. Mittauksessa eri sensoreilla saatavat paikoin ristiriitaiset mittaustiedot tulee voida yhdistää luotettavaksi mittaustiedoksi, jolloin vältetään laitteen käyttäjän tekemiltä vääriltä tulkinnoilta. Mittauksissa voi esiintyä myös lukuisista muista häiriötekijöistä johtuvia epätarkkuuksia, jotka on kyettävä huomioimaan ennen kuin mittatieto päätyy käyttäjälle. Esimerkiksi radan tuentaa tehdessä dataa voidaan siirtää langattomasti työmaalla suoraan mittalaitteelta tukemiskoneelle ja tällöin mittauksissa ei voi esiintyä epätarkkuustekijöiden aiheuttamia suuria poikkeamia.

Ratageometrian mittaaminen inertiamittausta soveltamalla on maailmallakin kohtalaisen uusi ilmiö ja vaikka aihetta on jonkin verran tutkittu ovat hyödynnettävät kaupalliset sovellukset ilmeisesti suhteellisen vähäisiä. Inertiamittauksen hyödyntäminen sekä säännöllisesti liikennöivässä kalustossa että radantarkastuskärryä hyödyntäen mahdollistaisi mittausten tarkemman kohdentamisen ja radan geometrisen kunnan seuraamisen myös kunnossapitotasojen määräämien mittausten ulkopuolisina ajanjaksoina.

LÄHTEET

- Caspary W. (1985). Inertial positioning, principles and procedures. 20 s. Institut für Geodäsie, Universität der Bundeswehr, München. Saatavissa (viitattu 28.11.2019): <https://www.unibw.de/geoinformatik/publikationen-und-vortraege/pdf-dateien-wissenschaftliche-publikationen/20-1-caspary-11-20.pdf>
- Chen, Q., Niu, X., Zuo, L., Zhang, T., Xiao, F., Liu, Y. & Liu, J. (2018). A railway track geometry measuring trolley system based on aided INS, 26 s. Saatavissa (viitattu 24.10.2019): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5856096/>
- Dick, S., Garber, S. (2006). Sputnik Biographies — Wernher von Braun (1912–1977) Saatavissa (viitattu 28.11.2019): <https://history.nasa.gov/sputnik/braun.html>
- Glaus, R. (2006). Kinematic track surveying by means of a multi-sensor platform, Zürich, Sveitsi. 165 s. Saatavissa (viitattu 28.11.2019):
- Graeme J. (2017). Monitoring railway track condition using inertial sensors on an in-service vehicle. 174 s. University of Birmingham. Saatavissa (viitattu 23.11.2019): <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/7531/2/Yeo17PhD.pdf>
- Hicks, J. (1998) Introduction to Test Equipment, Navy Electricity and Electronics Training Series (NEETS), Chapter 3. 27 s. Saatavissa (viitattu 28.11.2019): <http://www.rfcafe.com/references/electrical/NEETS-Modules/NEETS-Module-15-3-21-3-27.htm>
- LaPine, A. (1981) Inertial survey system (ISS). 6 s. International Hydrographic Review. Vol.58(2), pp.41-47.
- Liikennevirasto. (2010). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 2. Radan geometria. Helsinki. Liikenneviraston ohjeita 3/2010. 161 s. Saatavissa (viitattu 14.10.2019): https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo_2010-03_rato_2_radan_geometria_web.pdf
- McFadden, C. (2017) Gyroscopes: What They Are, How They Work and Why They Are Important. Interesting Engineering, Inc. Saatavissa (viitattu 28.11.2019): <https://interestingengineering.com/gyroscopes-what-they-are-how-they-work-and-why-they-are-important>
- Mikkonen, T. (2005) Pengerpaalurakenteet liikenteen alaisella raiteella. Diplomityö, Aalto-yliopisto. 108 s. Saatavissa (viitattu 23.11.2019): <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/30176>
- Obrien, E., Quirke P., Bowe C., Cantero D (2018). Determination of railway track longitudinal profile using measured inertial response of an in-service railway vehicle. 16 s. Structural Health Monitoring Vol.17(6), pp.1425-1440). Saatavissa (viitattu 2.2.2020): <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1475921717744479>
- Pascoli G. (2017) The Sagnac effect and it's interpretation by Paul Langevin 7 s. Comptes Rendus Physique. Vol.18(9-11), pp.563-569. Saatavissa (viitattu 28.11.2019): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070517300907>
- Pesonen A. (2015) Radan epätasaisuuksien vaikutus kaluston kokemiin värähtelyihin. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto. 104 s. Saatavissa (viitattu 12.10.2019): <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23982/Pesonen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Railway technology. (2017). Trimble develops new trolley solution for rail track survey. Verdict Media Limited. Saatavissa (Viitattu 2.2.2020): <https://www.railway-technology.com/news/newstrimble-develops-new-trolley-solution-for-rail-track-survey-5935950/>

Ratahallintokeskus (2005). Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta. 22 s. Saatavissa (viitattu 23.11.2019):

https://julkaisut.vayla.fi/pdf4/rhk_radantarkastusohjeita_raiteentarkastustulokset.pdf

Ratahallintokeskus. (2006). Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 13 Radan tarkastus. 51 s. + liitt. 28 s. Saatavissa (viitattu 14.11.2019): https://julkaisut.vayla.fi/pdf4/rato_13_radan_tarkastus.pdf

Trimble. (2017). GEDO Vorsys Tech Sheet. Saatavissa (viitattu 2.2.2020): https://trimble-railway.com/en/wp-content/uploads/sites/2/2014/06/ENG_GedoCE_2.0_Tamp_0716_LR.pdf

Sidek, O. & Quadri, S. A. (2014). Error and Noise Analysis in an IMU using Kalman Filter. International Journal of Hybrid Information Technology. Vol.7(3), pp.39-48. Saatavissa (viitattu 28.11.2019):

https://www.researchgate.net/publication/262883017_Error_and_Noise_Analysis_in_an_IMU_using_Kalman_Filter

Väylä. (2017) Rautatieohjeet päivittyvät. Saatavissa (viitattu 28.11.2019): <https://vayla.fi/-/rautatieohjeet-paivittyvat#.Xd-FLi3VLtQ>