

Selvitys DC- ja AC-magneettikenttien nykytasosta ja arvio mahdollisesti tulevaisuudessa raitiovaunuliikenteestä aiheutuvasta magneettikenttähäiriöstä raitiotien läheisyydessä olevissa laboratorioissa, joissa mahdollisesti on magneettikentille herkkiä mittalaitteita.

Prof. Janne Ruokolainen 26. 6. 2025

**Selvitettävät kohteet:**

Kohteiksi sovittiin Ratatek 19. 8. 2022 tehdystä alustavasta Turun raitiotien YS, magneettikenttäselvitys raportissa olevat kohteet:

**Åbo Akademi** Aurum,

**Turun yliopisto** Quantum

**Turun yliopisto** Biolääketieteenlaitos Medisiina C.

**Turun AMK** Medisiina D

**Turun AMK** ICT-City Hammastekniikan laboratorio

**Turun AMK** Edu-City Akustiikkalaboratoriot.

## Sisällysluettelo:

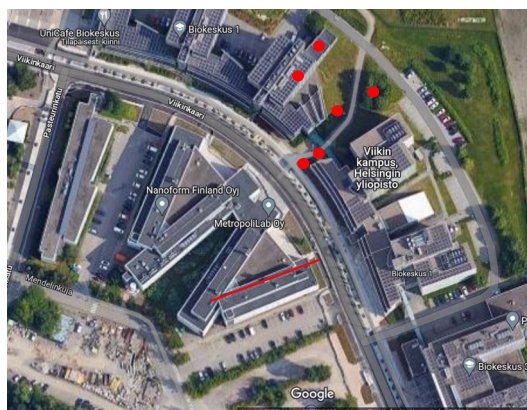
1. Taustaa: mittauksia Raidejokerin radalla Helsingin Viikissä ja laskennallisia magneettikenttä arvoja kompensoimattomalle raitiotie radalle. ....	3
Raitiotien aiheuttama magneettikenttä teoriassa: .....	4
Laskennalliset ja kokeelliset tulokset Raidejokerin radalla Viikissä. ....	5
2. Mittaustulokset Turussa ja arvio raitiovaunun aiheuttamista magneettikentistä.....	6
1) Medisiina C ja D: Turun yliopisto, Biolääketieteenlaitos Medisiina Imaging Centre (Medisiina C) ja 2) Turun AMK (Medisiina D). ....	7
3) Åbo Akademi, Aurum .....	8
4) Turun yliopisto, Quantum .....	9
5) Turun AMK, Edu-City, Akustiikkalaboratoriot .....	11
6) Turun AMK, ICT-City, Hammastekniikan laboratorio .....	12
3. Yhteenveto: .....	13

# 1. Taustaa: mittauksia Raidejokerin radalla Helsingin Viikissä ja laskennallisia magneettikenttä arvoja kompensoimattomalle raitiotie radalle.

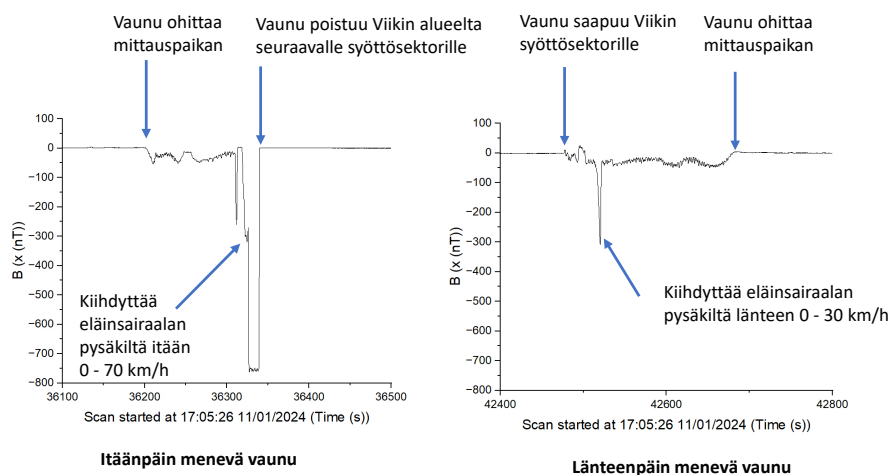
**Aluksi hieman mittaustuloksia Helsingin raitiotie linjalta, josta voidaan arvioida millaisia magneettikenttiä mahdollisesti syntyy myös Turun raitiotien läheisyydessä.**

Raitiotie aiheuttaa DC magneettikentän, jonka suuruus muuttuu ajovirran muutoksen mukaisesti. Lähietäisyydellä esimerkiksi 10 metrin etäisyydellä kiskoista kentän voimakkuus voi olla jopa 10 000 nT 1000 ampeerin ajovirralla. Kenttä vaimenee etäisyyden kasvaessa suhteellisen nopeasti - etäisyyden neliöön verrannollisesti, kuten myöhemmin mittauksista ja laskelmista ilmenee.

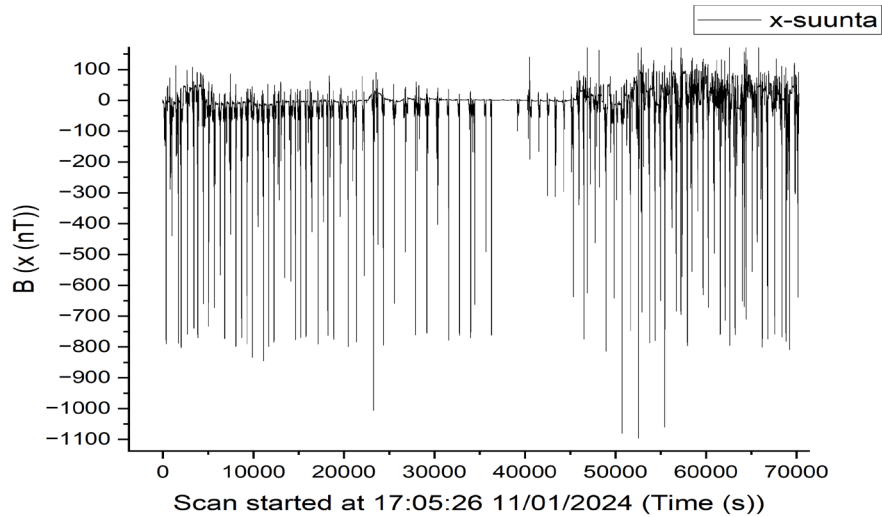
Salama vaurioitti Viikissä Raidejokerin pikaraitiotien magneettikenttä kompensoitajärjestelmää syksyllä 2023, jolloin järjestelmä oli poissa käytöstä yli vuoden ajan ja rataosuus vastasi täysin normaalia raitiotie linjaa. Tein mittauksia alueella vuoden aikana useissa eri kohteissa ja alla lyhyt yhteenveto tuloksista, joista voidaan arvioida mahdollisia magneettikenttiä myös Turun raitiotiellä. Lisäksi olen tehnyt magneettikenttä mittauksia yli 20 vuoden ajan Otaniemessä ja suomessa useimmilla Helsingin raitiotie linjoilla ja metrolinjalla ja lisäksi Saksassa raitiotien magneettikenttä mittauksia kahdessa kaupungissa.



**Kuva 1.** Mittauspisteet Helsingissä Viikinkaarella, joihin myös myöhemmät teoreettiset laskelmat on verrattu – punaiset mittauspisteet rataosuudella, jossa on pieni ulkokaarre (EM-laitos) ja punainen viiva sisäkaarteessa (Metropolilab). Mittaukset tehtiin 10 m, 20 m, 40 m ja 60 metrin etäisyydellä raitiotiestä, jotta voidaan verrata teoriaan ja sitten laskea kentät myös muille etäisyyksille.

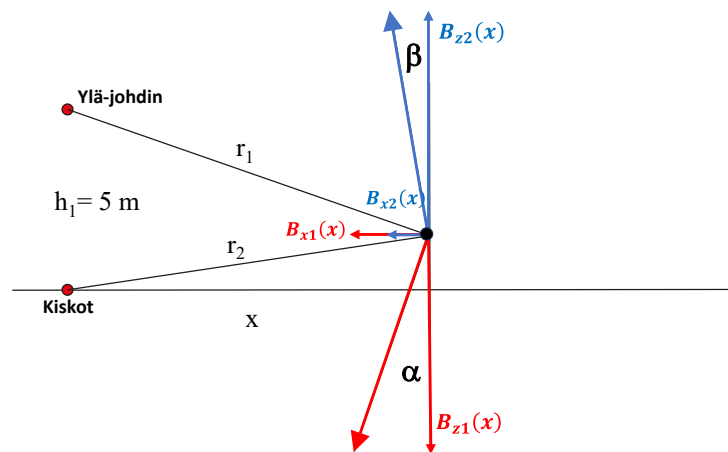


**Kuva 2.** Esimerkki mittauksesta 40 metrin etäisyydellä radasta, jossa pikaraitiotien vaunu kiihdyttää pysäkiltä itään päin 70 km/h tuntinopeuteen (vasen) ja aiheuttaa hetkellisen 750 nT suuruisen magneettikenttähäiriön ja oikealla kuva, jossa vaunu kiihdyttää pysäkiltä länteen päin 30 km/h nopeuteen ja häiriö on nyt n. 300 nT. Tämä jälkimmäinen tilanne vastaa todennäköisesti paremmin Turun raitiotie tapausta.



**Kuva 3.** Tässä kuvassa on esitetty koko vuorokauden mittaus, jossa nämä kuvan 2 molemmat häiriöt näkyvät raidejokerin vuoroväli sykleissä ja yöllä on pieni häiriötön jakso (Viikissä alle 1 h), jolloin raitiovaunut eivät aja.

### Raitiotien aiheuttama magneettikenttä teoriassa:



***h1** Ylä-johtimen korkeus, **h2** Mittauspaikan korkeus, **r1** Mittauspaikan etäisyys ylä-johtimesta **r2** Mittauspaikan etäisyys kiskosta **x** Mittauspaikan etäisyys maatapitkin kiskosta **α** ja **β** magneettikenttävektorin kulmat kohtisuoraan nähden*

**Kuva 4.** Raitiotien ylä- ja alajohtimien aiheuttama magneettikenttä, ja niiden x, z suuntaiset komponentit (kuvaan piirretty selkeyden vuoksi vain yksi alajohdin, joita todellisuudessa on kaksi – kiskot). Lisäksi kaikki myöhemmät laskelmat on tehty kahdelle raiteelle, joissa on siis 2 yläjohtinta 5 m korkeudella ja 4 alakiskoja (kiskojen väli 1 m ja raiteiden väli 3 m).

### Yhden suoran johtimen aiheuttama magneettikenttä saadaan Biot’n ja Savartin laista:

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \quad \text{missä} \quad \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{N}{A^2}$$

Ja magneettikentän Z ja X komponentit saadaan laskettua mittauspaikan ja johtimien geometriasta eli etäisyydestä ja kulmista.

$$B_{z1}(x) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_1} \cos(\alpha) \quad B_{z2}(x) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_2} \cos(\beta)$$

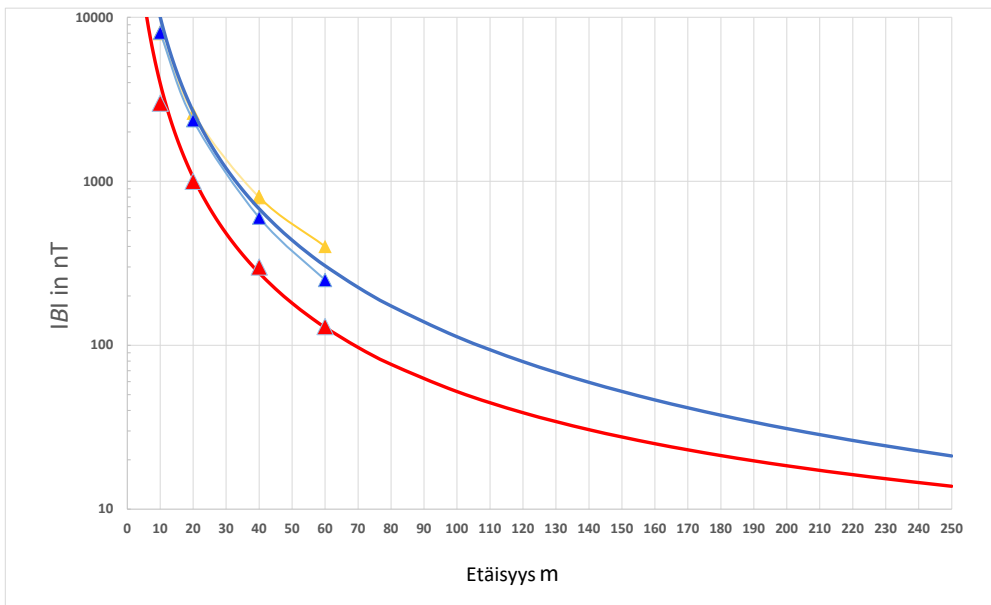
$$B_{x1}(x) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_1} \cos(90 - \alpha) \quad B_{x2}(x) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_2} \cos(90 - \beta)$$

Lopullinen magneettikenttä kahden johtimen tapauksessa on:

$$B_x = B_{x1} + B_{x2} \quad B_z = B_{z2} - B_{z1} .$$

Kuten kuvista 4 ja 5 nähdään niin etäisyyden kasvaessa Z komponentti kumoutuu tehokkaasti ja jäljelle jää pääasiassa vain X-suuntainen komponentti, joka vaimenee etäisyyden r kasvaessa  $1/r^2$ .

## Laskennalliset ja kokeelliset tulokset Raidejokerin radalla Viikissä.

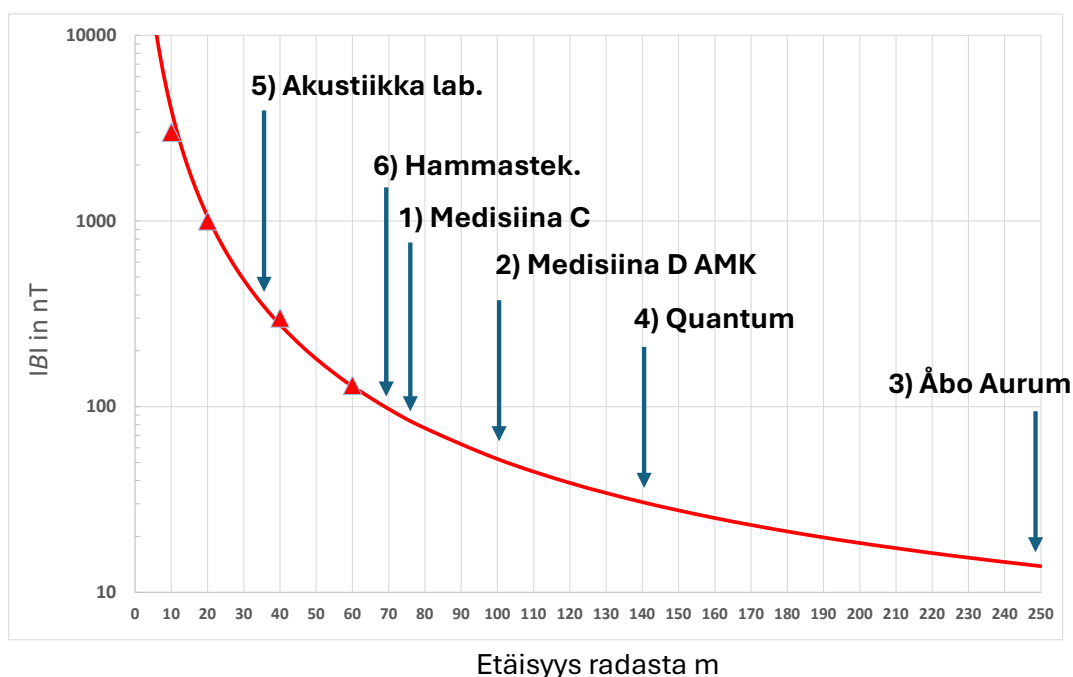


**Kuva 5.** Magneettikenttämittaukset ja teoreettinen laskelma etäisyyden funktiona raitiokiskoista. Kolmiot ovat mitattuja arvoja – keltaiset lievistä sisäkaarteista ja siniset lievistä ulkokaarteista 0 - 70 km/h kiihdytys tapauksessa ja punaiset kolmiot (0 - 30 km/h kiihdytys). Sininen käyrä on laskennallinen arvo 1100 Ampeerin ajovirralla ja punainen käyrä on laskennallinen arvo 450 Ampeerin virralla. Kuten kuvasta nähdään niin mittaustulokset täsmäävät täysin laskennalliseen suoran johtimen aiheuttaman magneettikentän kanssa. Laskelmissa on myös käytetty 15 ampeerin hajavirtaa, joka katoaa alakiskoista syöttökeskusten välillä (eli ylälangassa kulkee 15 A enemmän virtaa kuin alakiskoissa), mikä on todettu keskimääräiseksi arvoksi näissä kohteissa.

## 2. Mittaustulokset Turussa ja arvio raitiovaunun aiheuttamista magneettikentistä.

Mittaukset suoritettiin 13. 5. ja 12. 6. 2025. Mittauslaitteisto koostui kahdesta magneettikenttä anturista *Bartington Mag-13MSL100*, *Bartington Mag-03MSL100* ja kuusikanavaisesta tiedonkeruulaitteesta *Bartington Spectramag-6 Data Acquisition unit*.

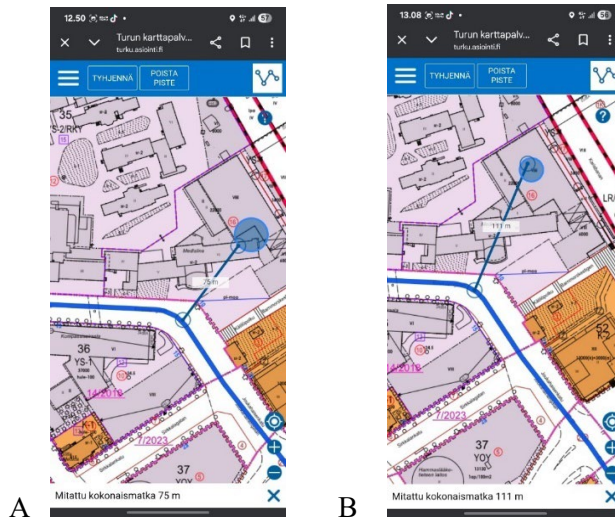
Alla olevassa kuvassa on esitetty Turun selvittävien kohteiden etäisyys radasta ja teoreettinen laskelma magneettikentälle sillä etäisyydellä. Laskennassa on käytetty 450 ampeerin kiihdytys virtaa, mikä raidejokerilla oli, kun kiihdytti hitaammin Viikissä. Laskelma on myös tehty äärettömän pitkän suoran johtimen mukaisesti, jolloin todellisuudessa ulkokaarteissa olevissa kohteissa kentät ovat pienempiä. Turussa suurin osa kohteista on ulkokaarteissa ja kaksi jopa 90 asteen ulkokaarre kohdalla.



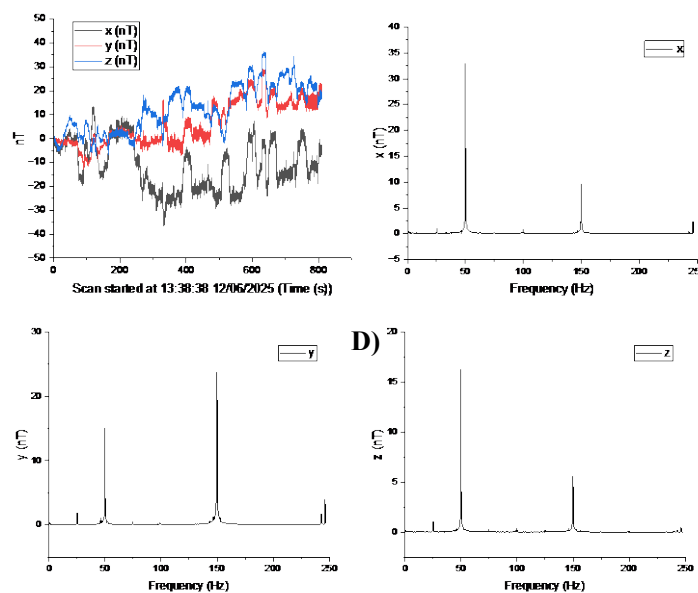
**Kuva 6.** Turun selvittävien kohteiden etäisyys radasta ja teoreettinen laskelma magneettikentälle 450 ampeerin viralla laskettuna äärettömän pitkälle suoralle radalle etäisyyden funktiona (2 yläjohdinta + 4 alajohdinta, 15 A hajavirta).

# 1) Medisiina C ja D: Turun yliopisto, Biolääketieteenlaitos Medisiina Imaging Centre (Medisiina C) ja 2) Turun AMK (Medisiina D).

**Magneettikentälle herkät laitteet:** Turun yliopisto 120 kV Lämpäysmikroskoopi (TEM).  
 Magneettikentän raja-arvo alle 100 nT. Herkkien laitteiden etäisyys radasta noin 75 m.  
 AMK medisiina D:ssä ei luultavasti ole laitteita, joille raitiovaunun magneettikenttä aiheuttaa häiriötä.



**Kuva 7. A)** Turun Yliopiston Medisiina Imaging Centre (Medisiina C) Lämpäysmikroskoopin (TEM) etäisyys radasta n. 75 m. **B)** Turun AMK (Medisiina D) etäisyys radasta n. 100 - 120 m.



**Kuva 8. A)** Mitatut DC magneettikentät x, y, ja z suunta ja **B-D)** AC magneettikentät x, y, ja z suunnat. Tässä kohteessa oli pieniä DC magneettikenttiä (n. 30 nT vaihteluväli), jotka tulevat mahdollisesti jostakin lähellä olevasta tutkimuslaitteesta tai läheisestä hissistä tai lähellä olevasta junaradasta. AC kentät ovat myös aika pieniä alle 35 nT 50 Hz taajuudella.

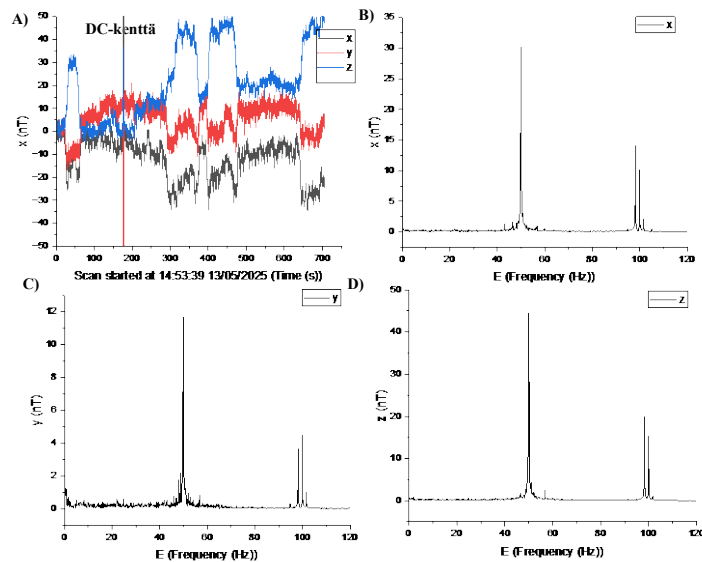
**Johtopäätös:** Raitiovaunun aiheuttamat magneettikentät 75 m etäisyydellä jäävät todennäköisesti alle 100 nT (laskennallinen arvo 450 A virralla on 85 nT, ja myös tämä kohde on ulkokaarteessa, jolloin todelliset kentät ovat hieman pienempiä kuin suoralla radalla), lisäksi TEM laitteet toimivat hyvin huomattavasti isoimmisäkin magneettikenttähäiriöissä, ellei haluta alle 2 Å resoluutiota tai tarkkaa EELS spektroskopiaa.

### 3) Åbo Akademi, Aurum

**Magneettikentälle herkät laitteet:** Pyyhkäisyelektronimikroskooppi (SEM) ja NMR spektroskopialaitteistot (Nuclear Magnetic Resonance). Magneettikentän raja-arvo alle 100 nT. Herkkien laitteiden etäisyys radasta noin 250 m



**Kuva 9.** Pyyhkäisyelektronimikroskoopin ja NMR laitteistojen etäisyys radasta noin 250 m. Lisäksi rata tekee 90 asteen mutkan pois päin mikä pienentää huomattavasti kenttiä verrattuna laskennalliseen arvioon, joka on 250 metrin etäisyydellä alle 15 nT suoralle radalle laskettuna.



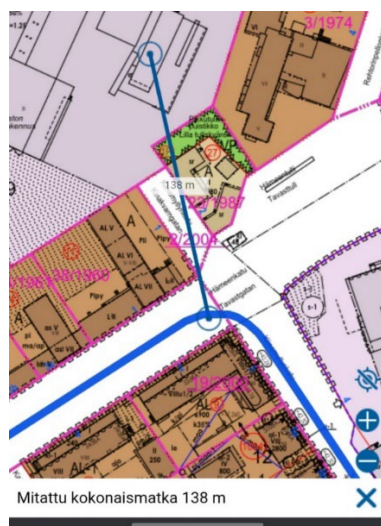
**Kuva 10.** A) DC magneettikentät x, y, ja z suunta ja B-D) AC magneettikentät x, y, ja z suunnat. Kohteessa ei ole ulkopuolisia DC kenttiä ja mittauksissa näkyvät DC kenttää vaihtelut n. 30 nT tulevat NMR laitteistojen automaatio näytteen latausmekanismista? (jos muistin oikein, mutta joka tapauksessa NMR laitteen automaatiosta). AC kentät ovat normaalitasoa, häiriö pääasiassa 50 Hz.

**Johtopäätös:** Kohde on niin kaukana radasta, että raitiotiestä aiheutuvat magneettikenttähäiriöt jäävät olemattomiksi.

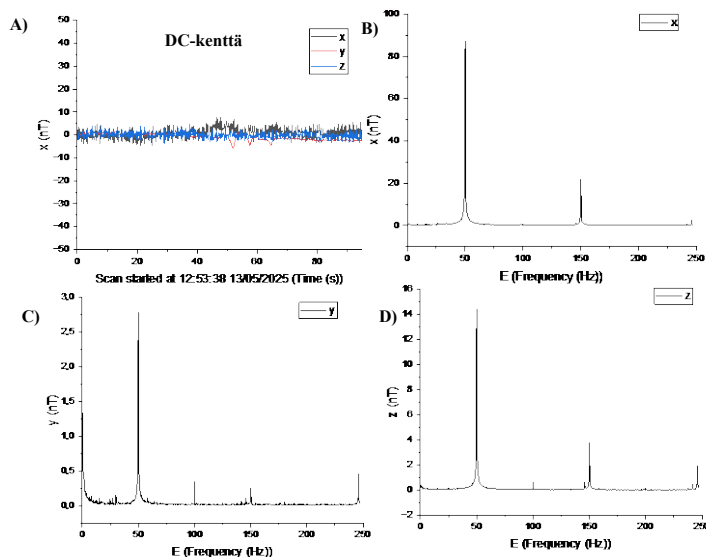
#### 4) Turun yliopisto, Quantum

**Magneettikentälle herkät laitteet:** Pyyhkäiselektronimikroskooppi (SEM). Magneettikentän raja-arvo alle 40 nT. Herkkien laitteiden etäisyys radasta noin 140 m.

Lisäksi on STM mikroskooppeja, jotka eivät ole herkkiä magneettikentille.

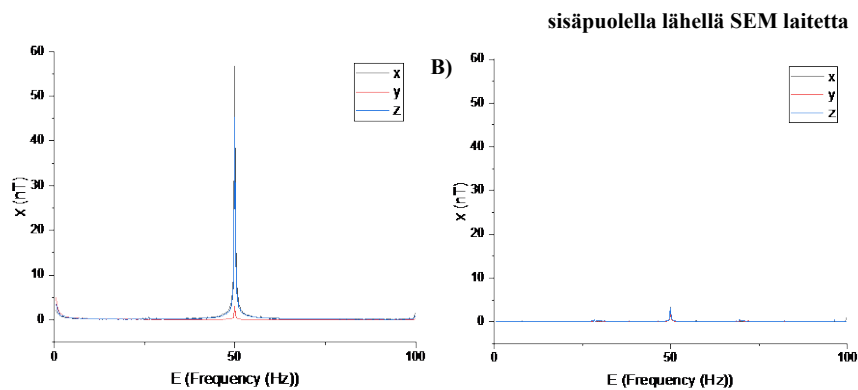


**Kuva 11.** Pyyhkäiselektronimikroskoopin etäisyys radasta noin 140 m. Lisäksi rata tekee 90 asteen mutkan pois päin mikä pienentää huomattavasti kenttiä (50 %- teoriassa) verrattuna laskennalliseen arvioon mikä on 30 nT 450 A ajovirralla.



**Kuva 12.** A) DC magneettikentät x, y, ja z suunta ja **B-D)** AC magneettikentät x, y, ja z suunnat. Kohteen DC häiriöt ovat pienet, koska hissejä ja muita tutkimuslaitteita, jotka aiheuttavat DC kenttiä ei lähellä ole. AC kentät ovat suurempia, ja ilmeisesti yleensä jopa suurempia kuin tässä mitattiin (90 nT). Mutta tilassa on aktiivinen magneettikenttä kompensointi, joka pienentää kentät lähes nollaan.

Alla esitetty mittaustulokset magneettikentistä, kun aktiivinen kompensointijärjestelmä oli päällä –  
Toinen anturi mikroskoopin lähellä ja toinen kompensatiokelojen ulkopuolella:

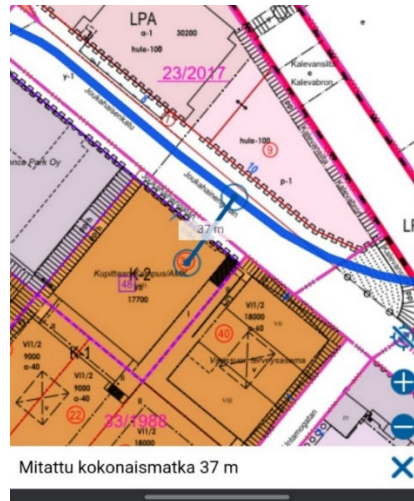


**Kuva 13.** A) Magneettikenttä anturissa, joka oli kompensatiokelojen ulkopuolella B) magneettikenttä toisesta anturista, joka oli kompensatioalueella lähellä mikroskooppia.

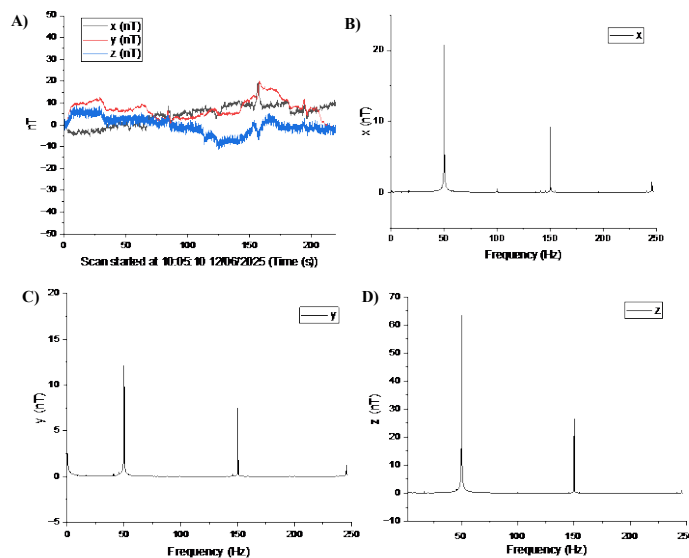
**Johtopäätös:** Kohde on niin kaukana radasta, että raitiotiestä aiheutuvat magneettikenttähäiriöt eivät häiritse SEM laitteistoa. Lisäksi huoneessa on aktiivinen magneettikenttä kompensointijärjestelmä, mikä pudottaa kentän alle 3 nT arvoon mikroskoopin läheisyydessä.

## 5) Turun AMK, Edu-City, Akustiikkalaboratoriot

Akustiikkalaboratoriossa on 5 kaiuntahuonetta, joista lähimmän etäisyys radasta on noin 35 metriä. Tutkimuslaitteet ja huoneet eivät ole herkkiä magneettikentille, mutta ovat herkkiä värinälle/runkomelulle yli 50 Hz taajuuksilla.



**Kuva 14.** Lähimmän kaiuntahuoneen etäisyys radasta on noin 35 metriä. Laskennallinen magneettikentän suuruus tällä etäisyydellä on noin 400 nT 450 A ajovirralla.

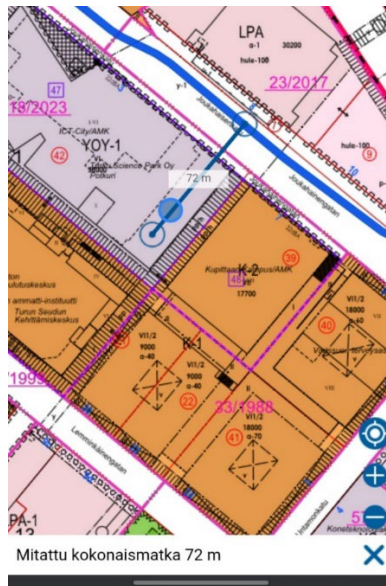


**Kuva 15.** A) DC magneettikentät x, y, ja z suunta ja B-D) AC magneettikentät x, y, ja z suunnat. Kohteessa ei ole DC kenttiä, koska on kaukana hisseistä etc. AC kentissä nähdään normaali 50 Hz häiriö.

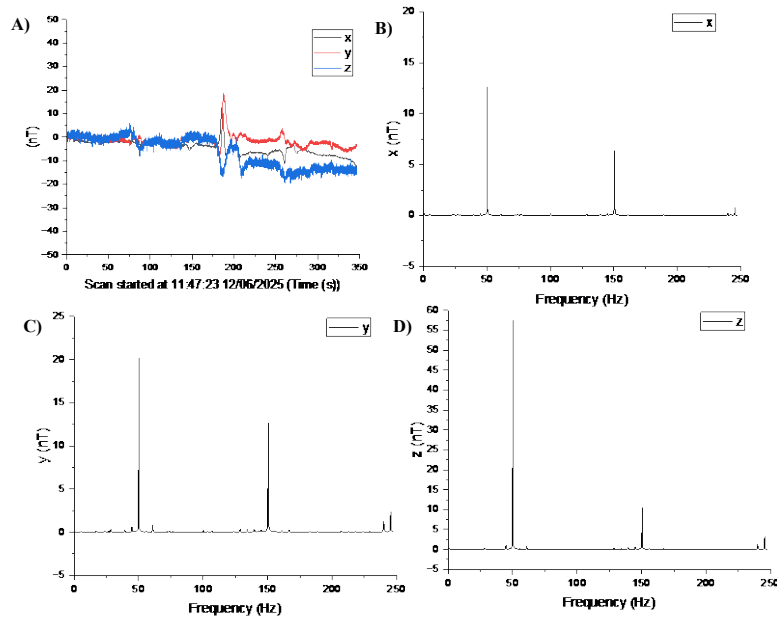
**Johtopäätös:** Tutkimuslaitteet ja huoneet eivät ole herkkiä magneettikentille, mutta koska on todella lähellä rataa niin ovat herkkiä värinälle/runkomelulle yli 50 Hz taajuuksilla.

## 6) Turun AMK, ICT-City, Hammastekniikan laboratorio

**Magneettikentälle herkät laitteet:** Kohteessa ei ole magneettikentille herkkiä laitteita, sillä röntgen kuvantamislaitteet eivät ole herkkiä magneettikentille.



**Kuva 16.** Hammastekniikan laboratorioiden etäisyys radasta on noin 70 - 90 metriä. Laskennallinen magneettikentän suuruus tällä etäisyydellä on noin 100 nT 450 A ajovirralla



**Kuva 17.** A) DC magneettikentät x, y, ja z suunta ja B-D) AC magneettikentät x, y, ja z suunnat. Kohteessa ei ole varsinaisesti DC kenttiä paitsi hissien läheisyydessä ja A) kuvassa näkyvä pieni DC kentän muutos 180 sekunnin kohdalla johtui auton ohiajosta viereisessä parkkihallissa. AC kentissä nähdään normaali 50 Hz häiriö.

**Johtopäätös:** Tutkimuslaitteet eivät ole herkkiä magneettikentille.

### 3. Yhteenveto:

Kohteet, joissa on magneettikentille herkkiä laitteita ovat riittävän kaukana suunnitellusta raitiotie linjauksesta, joten magneettikentän arvot jäävät alle raja-arvojen näissä kohteissa. Radan lähellä olevissa kohteissa (AMK akustiikkalaboratoriot ja AMK hammastekniikan laboratoriot) ei ole magneettikentille herkkiä laitteita.

#### **1) Medisiina C ja D: Turun yliopisto, Biolääketieteenlaitos Medisiina Imaging Centre (Medisiina C) ja 2) Turun AMK (Medisiina D).**

Raitiovaunun aiheuttamat magneettikentät 75 m etäisyydellä jäävät todennäköisesti alle 100 nT (laskennallinen arvo 450 A virralla on 85 nT, ja myös tämä kohde on ulkokaarteessa, jolloin todelliset kentät ovat hieman pienempiä kuin suoralla radalla), lisäksi TEM laitteet toimivat hyvin huomattavasti isoimmissäkin magneettikenttähäiriöissä, ellei haluta alle 2 Å resoluutiota tai tarkkaa EELS spektroskopiaa.

Medisiina D AMK:n tiloissa on pääasiassa bioanalytiikan tutkimuslaitteistoja, jotka eivät ole herkkiä magneettikentille.

#### **3) Åbo Akademi, Aurum**

Kohde on niin kaukana radasta (250 m), että raitiotiestä aiheutuvat magneettikenttähäiriöt jäävät olemattomiksi.

#### **4) Turun yliopisto, Quantum**

Kohde on niin kaukana radasta (140 m), että raitiotiestä aiheutuvat magneettikenttähäiriöt eivät häiritse SEM laitteistoa. Lisäksi huoneessa on aktiivinen magneettikenttä kompensointijärjestelmä, mikä pudottaa kentän alle 3 nT arvoon mikroskoopin läheisyydessä.

#### **5) Turun AMK, Edu-City, Akustiikkalaboratoriot**

Tutkimuslaitteet ja huoneet eivät ole herkkiä magneettikentille, mutta koska on todella lähellä rataa niin ovat herkkiä värinälle/runkomelulle yli 50 Hz taajuuksilla.

#### **6) Turun AMK, ICT-City, Hammastekniikan laboratorio**

Tiloissa on röntgen kuvantamislaitteistoja jotka eivät ole herkkiä magneettikentille.