



TEKNIikka JA LIIKENNE

Auto- ja kuljetustekniikka

Autosähkötekniikka

OPINNÄYTETYÖ

**OMAVALMISTEAJONEUVOJEN SÄTEILEVIEN HÄIRIÖIDEN MITTAUS
EY-TYYPPIHYVÄKSYNNÄN MUKAISESTI**

**Työn tekijä: Pekka Laurila
Työn ohjaaja: Esa Häkkinen**

Työ hyväksytty: __. __. 2008

**Esa Häkkinen
yliopettaja, tekn. lis. lehtori**



ALKULAUSE

Tämä insinööriyö on tehty Finnish Hot Rod Association Ry:n toimeksiannosta. Työn valvojana on toiminut tekn. lis. Esa Häkkinen, jota haluan kiittää hyvästä yhteistyöstä, tuesta ja opastuksesta. Haluan kiittää kaikkia projektissa mukana olleita henkilöitä, erityisesti laboratorioinsinööri Matti Korhosta avusta ja opastuksesta. FHRA:ta kiitän mielenkiintoisen ja haastavan aiheen antamisesta.

Helsingissä 17.11.2008

Pekka Laurila

OPINNÄYTETYÖN TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Pekka Laurila	
Työn nimi: Omavalmisteajoneuvojen säteilevien häiriöiden mittaus EY-tyyppihyväksynnän mukaisesti	
Päivämäärä: 17.11.2008	Sivumäärä: 41 s. + 2 liitettä
Koulutusohjelma: Auto- ja kuljetustekniikka	Ammatillinen suuntautuminen: Autosähkötekniikka
Työn ohjaaja: yliopettaja, tekn. lis. Esa Häkkinen	
<p>Tämä insinööri työ on tehty Finnish Hot Rod Associationin toimeksiannosta. Mittaukset suoritettiin Hakuninmaan A-Katsastus Oy:n pihassa huhtikuussa sekä toukokuussa 2008.</p> <p>Insinööri työssä vertailtiin kolmen erilaisen ajoneuvon lähettämää sähkömagneettista häiriötasoa Neuvoston direktiivin 72/245/ETY vaatimusten mukaisesti. Työssä esitellään erilaisten teknisten rakennevaihtoehtojen vaikutus ajoneuvoista peräisin olevaan häiriötason.</p> <p>Työssä on esitelty sähkömagneettisten häiriöiden ja yhteensopivuuden peruskäsitteet, direktiivin 72/245/ETY pääpiirteet, omavalmisteajoneuvojen EMC-vaatimuksia Suomessa ja Isossa-Britanniassa sekä mittauksen järjestelyt ja mittaustulokset. Keskeinen tulos oli, että nykyaikaisella sytytysjärjestelmällä sekä häiriövaimennetuilla sytytysjohtimilla varustetusta ajoneuvosta peräisin oleva säteily alittaa raja-arvot muutamia ylityksiä lukuun ottamatta.</p>	
Avainsanat: EMC, omavalmisteajoneuvo, sähkömagneettinen säteily, 72/245/ETY	



ABSTRACT

Name: Pekka Laurila

Title: Measurement of Radiating-Interference in Amateur-Built Vehicles according to EC-Type-Approval.

Date: 17.11.2008

Number of pages: 41 + 2 appendices

Department:

Study Programme:

Automotive and Transport Engineering Automotive Electronics Engineering

Supervisor: Esa Häkkinen, Tech. Lic.

This graduate study was assigned by the Finnish Hot Rod Association. The measurements were carried out at A-Katsastus Oy in Hakuninmaa in April and May 2008.

In this study electromagnetic interference level in three different vehicles was compared according to the demands of Council directive 72/245/EEC. The study introduces the effects of various technical solutions to interference levels in vehicles.

This study introduces the basic principles of electromagnetic interference and compatibility, the main features of directive 72/245/EEC, EMC demands of amateur-built vehicles in Finland and Great Britain, planning of the measurements and results of the measurements. As a conclusion of this study it was found out that emissions in vehicles equipped with modern ignition system and noise suppression ignition cables will not exceed the limits excluding few exceptions.

Keywords: EMC, amateur built vehicle, electromagnetic interference, 72/245/EEC

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KÄSITTEET

LIITTEET

1	JOHDANTO	1
2	SÄHKÖMAGNEETTISISTA HÄIRIÖISTÄ YLEISESTI	2
2.1	Häiriöiden kytkeytymistavat	2
2.1.1	<i>Sähkömagneettisen kentän kytkeytyminen</i>	2
2.1.2	<i>Kapasitiivinen kytkeytyminen</i>	4
2.1.3	<i>Induktiivinen kytkeytyminen</i>	7
2.1.4	<i>Johtumalla kytkeytyminen</i>	9
2.2	Sähkömagneettinen säteily	10
3	AUTOJA KOSKEVA EMC-DIREKTIIVI JA OMAVALMISTEAJONEUVOJEN EMC-VAATIMUKSIA EUROOPASSA	13
3.1	Mittaustavat	13
3.1.1	<i>Ajoneuvoasennuksen hyväksyntä</i>	13
3.1.2	<i>Ajoneuvotyypin hyväksyntä testaamalla yksittäiset SE-asennelmat</i>	13
3.2	Mittausjärjestelyt	13
3.2.1	<i>Testausolosuhteet</i>	14
3.2.2	<i>Antenni ja sen sijoitus</i>	14
3.2.3	<i>Ajoneuvon kunto testin aikana</i>	14
3.3	Mittaustaajuudet	15
3.3.1	<i>Huippuarvopainotteinen mittaus</i>	15
3.3.2	<i>Keskiarvopainotteinen mittaus</i>	15
3.4	Omavalmisteaajoneuvojen EMC-vaatimukset Suomessa	15
3.5	Omavalmisteaajoneuvojen EMC-vaatimukset Isossa-Britanniassa	16
4	AUTOJEN HÄIRIÖIDEN MITTAUS	17
4.1	Mittalaitteisto	17
4.1.1	<i>Kentänvoimakkuuden mittauslaite</i>	17
4.1.2	<i>Antenni</i>	19
4.1.3	<i>Antennin masto</i>	19
4.1.4	<i>Kytkentäkaapeli</i>	19

4.2	Laitteiden sijoitus ja mittaustila	19
5	AUTOJEN TEKNISET OMINAISUUDET	23
5.1	Moottori	23
5.1.1	Hot Rod 1	23
5.1.2	Hot Rod 2	23
5.1.3	Renault R5 GT	23
5.2	Kori	24
5.2.1	Hot Rod 1	24
5.2.2	Hot Rod 2	25
5.2.3	Renault R5 GT	25
5.3	Jarrut	25
5.4	Sytytys- ja sähköjärjestelmät	26
5.4.1	Hot Rod 1	26
5.4.2	Hot Rod 2	27
5.4.3	Renault R5 GT	28
6	MITTAUSTULOKSET	29
6.1	Kytkenäkaapelin vaimennus	30
6.2	Referenssimittaus	31
6.3	Hot Rod 1:n mittaukset	32
6.4	Hot Rod 2:n mittaukset	34
6.5	Renault R5 GT:n mittaukset	35
6.6	Renault R5 GT:n erikoismittaukset	37
7	POHDINTA	38
7.1	Mittaustilan taustasäteily	38
7.2	Ajoneuvojen tekniset ominaisuudet	38
7.3	Tulokset	39
8	YHTEENVETO	40
	VIITELUETTELO	41
	LIITTEET	

Liite 1. Mittaustulokset

Liite 2. Raja-arvot

KÄSITTEET

CISPR Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques on kansainvälinen radiohäiriöiden erityiskomitea, jonka tehtävänä on kehittää normeja sähkömagneettisten häiriöiden havaitsemiseksi, mittaamiseksi ja vertailemiseksi elektronisissa laitteissa.

EMC Sähkömagneettinen yhteensopivuus

FM Frequency modulation, taajuusmodulaatio on ULA-radiolähetysten modulaatiomuoto, joka ei ole kovin herkkä häiriöille.

GSM Global System for Mobile Communications on digitaalinen matkapuhelinjärjestelmä, jota käytetään maailmanlaajuisesti.

Hot Rod Tyypillisesti amerikkalaisvalmisteinen, isolla moottorilla varustettu auto, jota on modifioitu rakentelutyylinsä mukaisesti.

Paikallaanoloaika

Dwell time, aika, joka kuluu kentänvoimakkuuden mittauslaitteelta ennalta määritellyn taajuuden lukemiseen ennen kuin se voi siirtyä seuraavaan taajuuteen

SE-asennelma

Sähkö/elektroniikka-asennelmalla tarkoitetaan osaksi ajoneuvoa tarkoitettua sähkölaitetta, elektronista laitetta tai laiteryhmittä sähköliitännöineen ja johdotuksineen.

ULA Ultralyhyet aallot on radioaaltojen taajuusalue, jolla lähetetään sekä kaupallista että yleisradio-ohjelmaa taajuusmoduloituna.

1 JOHDANTO

Sähkömagneettisella yhteensopivuudella tarkoitetaan elektronisten laitteiden kykyä toimia luonnollisessa toimintaympäristössä häiriintymättä, tuottamatta kuitenkaan itse liikaa häiriötä ympäristölle. Elektronisten laitteiden määrään ja niiden välisten vuorovaikutuksen jatkuva lisääntyminen on synnyttänyt tarpeen asettaa raja-arvot laitteiden aiheuttamalle sähkömagneettiselle säteilylle.

Euroopan unionissa ajoneuvoja ja niihin asennettavia sähköisiä sekä elektronisia laitteita koskevat vaatimukset on asetettu Neuvoston direktiivissä 72/245/ETY. Direktiivissä on asetettu säännöt ja raja-arvot ajoneuvojen sähkömagneettisille ominaisuuksille, joiden mukaiselle ajoneuvolle voidaan myöntää tyyppihyväksyntä. [8.]

Tässä insinööriyössä tehtyjen mittausten ensisijainen tehtävä oli selvittää kuinka paljon nykyaikaisella sytytyksenohjauksella ja häiriövaimennetuilla sytytysjohtimilla varustettu hot rod -auto emittoi sähkömagneettista säteilyä. Vertailun vuoksi mittauksiin otettiin mukaan myös alkuperäisellä 30-luvun teknologialla varustettu hot rod -auto, jonka sytytysjärjestelmä on varustettu kaksoiskärkisytytyksellä sekä vastuksettomilla metallidien sytytysjohtimilla. Lisäksi mitattiin sytytyksenohjausyksiköllä varustetun, 80-luvun teknologiaa edustavan Renault R5 GT:n lähettämää säteilyä.

2 SÄHKÖMAGNEETTISISTA HÄIRIÖISTÄ YLEISESTI

Sähkömagneettiseksi häiriöiksi kutsutaan ei-toivottua sähkömagneettista vuorovaikutusta sähkölaitteiden sisällä tai niiden välillä. Häiriöt muodostuvat etenkin elektronisten laitteiden tai järjestelmien ympäristöissä. Laitteiden valmistajalle tämänkaltaisten häiriöiden huomioon ottaminen on usein hankalaa, sillä häiriöasetelma voi tuntua hyvin monimutkaiselta. Häiriöiden kytkeytymistavat ovat kuitenkin tunnettuja. Niistä tärkeimmät ovat [1, s. 2]

- sähkömagneettisen kentän kytkeytyminen (etenevät kentät) esimerkiksi radiotaajuuksilla etenkin kaukokentässä
- kapasitiivinen kytkeytyminen (sähkökentät) suuri-impedanssiin piireihin
- induktiivinen kytkeytyminen (magneettikenttä) johdinsilmukoihin
- johtumalla kytkeytyminen maajohtimissa ja piirien yhteisissä impedansseissa.

2.1 Häiriöiden kytkeytymistavat

2.1.1 Sähkömagneettisen kentän kytkeytyminen

Sähkömagneettinen kytkeytyminen on säteilemällä kytkeytyvien häiriöiden etenemistä sähkömagneettisina aaltoina. Kentän ominaisuudet määräytyvät säteilylähteestä, väliaineesta sekä häiriölähteen ja tarkastelupisteen välisestä etäisyydestä. Sähkömagneettisten kenttien ympäristö voidaan jakaa lähijä kaukokenttään riippuen häiriölähteen ja tarkastelupisteen välisestä etäisyydestä [1, s. 2].

Häiriöjännitteen kytkeytyminen mittajohtimiin tai antenniin tapahtuu joko sähkö- tai magneettikentän välityksellä tai molemmilla kytkeytymistavoilla. Kytkeytynyt jännite on kentän sähköisen ja magneettisen komponentin osilta seuraavanlainen [1, s. 3].

Sähköinen komponentti:

$$U_e = E \cdot h_{teh} \quad (1)$$

Magneettinen komponentti:

$$U_h = \mu\omega AH = \mu\omega A \frac{E}{Z} \quad (2)$$

missä:

- h_{teh} = antennin tehollinen korkeus
- A = kehäantennin tai mittauspiirin tehollinen pinta-ala
- E = kentänvoimakkuus (sähköinen komponentti)
- H = kentänvoimakkuus (magneettinen komponentti)
- Z = vapaan tilan aaltoimpedanssi

Enimmäkseen sähkömagneettisen kentän kytkeytymistä aiheuttavat sähkölaitteen johdotukset. Sähkölaitteen johdotukset voivat toimia sekä säteilyn lähetys- että vastaanottoantenneina. Antennivaikutus on erittäin voimakas taajuuksilla, joilla johtimen pituus on tarkasteltavan signaalin aallonpituuden neljäsosan jokin moninkerta eli [1, s. 3]:

$$l = n \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (3)$$

missä:

- l = johtimen pituus [m]
- n = aallonpituuden neljäsosan moninkerta [1, 2, 3...]
- λ = tarkasteltavan signaalin aallonpituus [m]

Signaalin aallonpituus saadaan aaltoliikkeen perusyhtälöstä [4, s. 116]:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4)$$

missä:

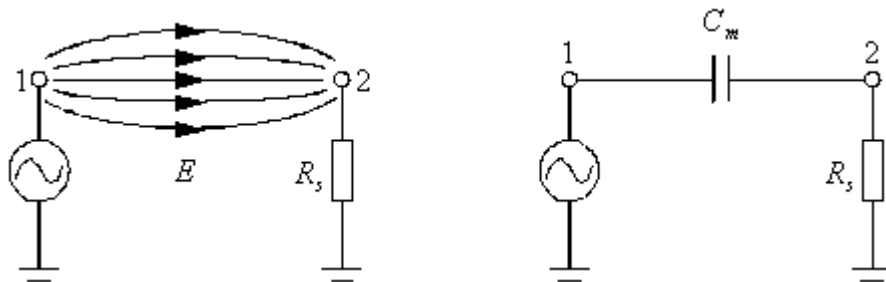
- v = nopeus, tässä valon nopeus tyhjiössä eli n. 300 000 km/s
- f = tarkasteltavan signaalin taajuus [1/f]

Sähkömagneettisen säteilyn vaimentamiseksi voidaan soveltaa muun muassa seuraavia toimenpiteitä [5]:

- hyvät kaapelit, pieni kytkentäimpedanssi
- kaksivaipainen kaapeli
- tiheä maadoittaminen $\lambda/10$ – välein
- suuntavaikutuksen hyväksikäyttö
- tiivis, aukoton metallikotelointi
- läpivientien suodatus läpivientikohdassa

2.1.2 Kapasitiivinen kytkeytyminen

Kapasitiivinen häiriö kytkeytyy sähkökentän välityksellä. Kapasitiivisessa kytkeytymisessä muodostuu kahden vierekkäisen eri potentiaalipisteessä olevan piirin tai johtimen väliin häiriötä aiheuttava sähkökenttä. Tällöin hajakapasitanssin aiheuttama virta kytkee viereiseen johtimeen häiriöjännitteen kuvan 1 mukaisesti.



Kuva 1. Vierekkäisten johtimien väliin syntyy hajakapasitanssi, joka saa kapasitiivisen virran i_c kulkemaan häiriintyvän laitteen, usein suuriohmisen vastuksen R_s , läpi. Kuvassa vasemmalla on fyysikaalinen esitys ja oikealla sitä vastaava kytkentä.

Suurteho- ja kilpamoottoreita varten on kehitelty sytytysjärjestelmiä, joissa energian varaus tapahtuu kapasitiivisesti. Niissä sytytysenergia varataan kondensaattorin sähkökentässä ja siirretään erityisen muuntajan kautta korkeajännitteisinä sytytysimpulsseina sytytystulpille [10, s. 518].

Kapasitiivisen kytkeytymisen avulla syntyvät häiriöt aiheutuvat sinimuotoisista jännitteistä sekä jännitepiikeistä eli transienteista. Näistä kahdesta transientin aiheuttama kapasitiivinen kytkeytyminen on vaarallisempi häiriöaiheuttaja.

Sinimuotoista häiriön kytkeytymistä voidaan kuvata seuraavalla yhtälöllä:

$$i_c = \frac{u_c}{\frac{1}{j\omega C_m} + R_s} \quad (5)$$

missä:

- i_c = keskinäiskapasitanssin aiheuttama virta [A]
- u_c = keskinäiskapasitanssin jännite [V]
- $\frac{1}{j\omega C_m}$ = keskinäiskapasitanssin impedanssi
- R_s = kapasitiivisen virran näkemä, häiriöjännitteen synnyttävä vastus [Ω]

Tällöin häiriöjännite, minkä kapasitanssin kautta piiriin pääsevä virta aiheuttaa, on seuraavanlainen:

$$u_h = i_c R_s \quad (6)$$

missä:

- u_h = häiriöjännite [V]
- i_c = keskinäiskapasitanssin aiheuttama virta [A]
- R_s = kapasitiivisen virran näkemä, häiriöjännitteen synnyttävä vastus [Ω]

Jos häiriötä siirtävän kapasitanssin reaktanssi häiriön taajuudella on huomattavasti suurempi kuin R_s eli $\frac{1}{\omega C_m} \gg R_s$, yksinkertaistuu yhtälö (6) seuraavanlaiseksi:

raavanlaiseksi:

$$|u_h| \approx 2\pi f R_s C_m u_c \quad (7)$$

missä:

- u_h = häiriöjännite [V]
- $2\pi f$ = virran kulmataajuus [1/s]
- R_s = kapasitiivisen virran näkemä, häiriöjännitteen synnyttävä vastus [Ω]
- C_m = keskinäiskapasitanssi [F]
- u_c = keskinäiskapasitanssin jännite [V]

Äkillisen jännitteenmuutoksen eli transientin aiheuttama kapasitiivinen kytkeytyminen voidaan kuvata seuraavalla tavalla:

$$u_h = \left(C_m \frac{\Delta U}{\Delta t} \right) \cdot R_s \quad (8)$$

missä:

- u_h = häiriöjännite [V]
- C_m = keskinäiskapasitanssi [F]
- ΔU = jännitteen muutos [V]
- Δt = jännitteen muutosnopeus [s]
- R_s = kapasitiivisen virran näkemä, häiriöjännitteen synnyttävä vastus [Ω]

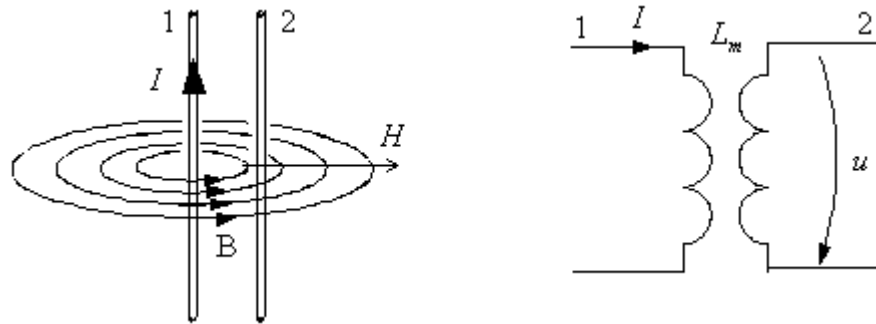
Yhtälön (8) mukaisesti häiriöjännite kasvaa sen mukaan mitä nopeammin ja voimakkaammin transientin jännite muuttuu.

Kapasitiivisen kytkeytymisen vaimentamiseksi voidaan soveltaa muun muassa seuraavia toimenpiteitä [5]:

- suojattua johtoa
- metallista kotelointia tai muunlaista metallista suojaa (*guard*), jona voi olla esim. pelkkä toisesta päästä maadoitettu johto (muuntajan staattinen suoja) tai folio
- etäisyyden lisäämistä häiriölähteestä

2.1.3 Induktiivinen kytkeytyminen

Induktiivinen häiriö kytkeytyy magneettikentän välityksellä. Induktiivisessa kytkeytymisessä häiriölähteen johtimissa kulkeva sähkövirta muodostaa muuttuessaan ympärilleen muuttuvan magneettikentän. Tällöin magneettikenttä indusoi lähellä olevien piirien johdinsilmukoihin häiriöjännitteen lävis-täessään ne. Kuva 2 selventää induktiivista kytkeytymistä [1, 2]:



Kuva 2. Vierekkäisten johtimien väliin syntyy keskinäisinduktanssi, jonka kautta häiriöjännite pääsee kulkemaan. Kuvassa vasemmalla on fysikaalinen esitys ja oikealla sitä vastaava kytkentä.

Valtaosassa autojen sytytysjärjestelmiä energian varaus tapahtuu induktiivisesti. Autojen sytytysjärjestelmissä puolan ensiökäämissä tapahtuva virran äkillinen katkaisu indusoi toisiokäämiin korkean jännitteen, joka johdetaan sytytystulpalle.

Virran aiheuttama magneettikenttä voidaan laskea kaavasta [6]:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (9)$$

missä:

- H = magneettikentän voimakkuus [A/m]
- I = häiriötä tuottavassa johtimessa kulkeva virta [A]
- r = häiriölähteen ja häiriintyvän piirin välinen etäisyys [m]

Magneettivuo saadaan yhtälöstä 10. Sen mukaisesti magneettivuo muuttuu etäisyyden funktiona, jolloin magneettivuon tiheys pitää integroida virtasil-mukan alan yli [6]:

$$\phi = \int_A B \cdot dA \quad (10)$$

missä:

- ϕ = magneettivuo [Wb]
- B = magneettivuon tiheys [T]
- A = virtasilmukan tehollinen pinta-ala [m²]

Yhtälön 11 mukaisesti magneettivuon tiheys on suoraan verrannollinen magneettikenttään [6]:

$$B = \mu H \quad (11)$$

missä:

- B = magneettivuon tiheys [T]
- μ = ympäröivän aineen permeabiliteetti [H/m]
- H = magneettikentän voimakkuus [A/m]

Jos häiriintyvä johdin pysyy paikoillaan sekä magneettivuon tiheys on vakio ja sen oletetaan olevan kohtisuorassa silmukan pintaa vastaan, voidaan laskea johtimeen indusoituva häiriöjännite kaavasta 12 [1, 6]:

$$u = -\frac{d\phi}{dt} = -\mu A \frac{dH}{dt} = -\frac{d(BA)}{dt} = -\frac{\mu A}{2\pi r} \cdot \frac{dI}{dt} \quad (12)$$

missä:

- u = häiriintyneeseen johtimeen indusoitunut jännite [V]
- ϕ = magneettivuo [Wb]
- μ = tyhjiön permeabiliteetti $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$
- A = virtasilmukan tehollinen pinta-ala [m²]
- H = magneettikentän voimakkuus [A/m]
- B = magneettivuon tiheys [T]
- $\frac{dI}{dt}$ = häiritsevän virran muutosnopeus

Virtasilmukkaan indusoitunut jännite voidaan ilmaista myös käyttämällä keskinäisinduktanssia [6]:

$$|u| = \frac{\mu A}{2\pi r} \cdot \frac{dI}{dt} = L_m \cdot \frac{dI}{dt} \quad (13)$$

missä:

- $L_m =$ keskinäisinduktanssi [H]

Kaavoista 12 ja 13 voidaan havaita, että häiritsevän virran muutosnopeudella on suuri vaikutus induktiivisesti kytkeytyviin häiriöihin [6].

Induktiivisen kytkeytymisen vaimentamiseksi voidaan soveltaa muun muassa seuraavia toimenpiteitä [5]:

- johdinten parikiertoa
- metallista koteloitua
- häiriytyvän laitteen ja sen johdotusten kääntelemistä
- etäisyyden lisäämistä häiritsevän ja häiriytyvän kohteen välillä

2.1.4 Johtumalla kytkeytyminen

Yleensä johtumalla kytkeytyviin häiriöihin on pääsyyinä paluuvirtareitillä huono reititys eli ns. heikko maadoitus. Maadoittamalla pyritään laitteiden virtapiireistä muodostamaan silmukoita. Jos häiritsevällä ja häiriytyvällä virtapiirillä on yhteinen virran kulkutie, tapahtuu yhteisen impedanssin välityksellä häiriöiden kytkeytymistä. Tällöin nopeat virranmuutokset aiheuttavat virtapiirien välillä potentiaalieroja. Suorasta ja galvaanisesta yhteydestä johtuen yhteisen impedanssin kautta kytkeytyvät häiriöt ovat voimakkaita ja laajakais-
taisia. Resistiivistä kytkeytymistä tapahtuu myös silloin, kun järjestelmässä on useita maadoituspisteitä. Jos maadoituspisteiden välillä on potentiaalieroja, syntyy näiden pisteiden välille häiriötä aiheuttava virtasilmukka [5; 6].

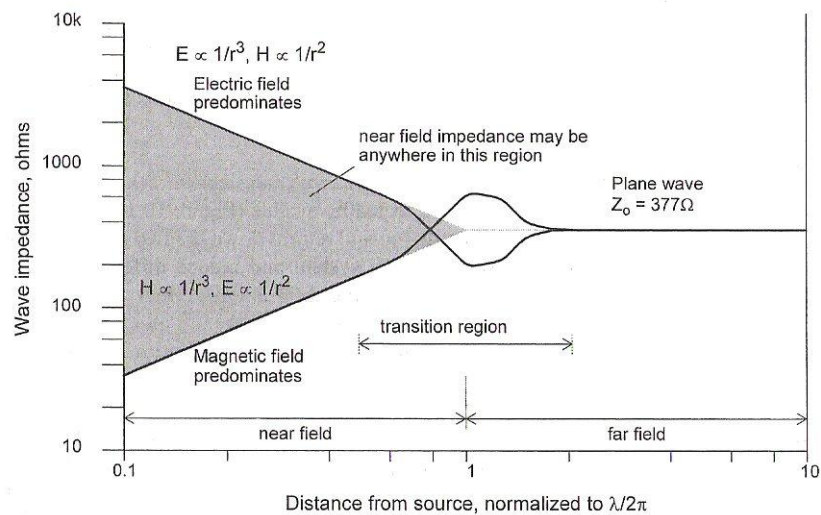
Johtumalla kytkeytymisen vaimentamiseksi voidaan soveltaa muun muassa seuraavia toimenpiteitä [5]:

- häiriövirran kulkureitti katkaistaan esimerkiksi galvaanisella erotuksella
- poistetaan potentiaaliero häiritsevän ja häiriytyvän pisteen välillä

2.2 Sähkömagneettinen säteily

Sähkömagneettisen säteilyn muodostamasta kentästä käytetään usein kolme eri nimitystä, jotka ovat sähkökenttä, magneettikenttä ja tasoaaltojen (plane waves) muodostama kenttä. Kuvassa 3 on havainnollistettu sähkö- ja magneettikentästä koostuvan lähikentän sekä tasoaaltojen muodostaman kentän eli kaukokentän välinen asetelma. Kentästä kulloinkin käytettävän nimityksen määräävät seuraavat ominaisuudet [2]:

- tarkasteltavan säteilylähteen mitat
- tarkasteluetaisyys
- säteilyn aallonpituus



Kuva 3. Sähkö- ja magneettikentästä koostuva aaltoimpedanssi esitettyä etäisyyden funktiona. Kuvasta on helppo nähdä miksi EMC-mittaukset suoritetaan kaukokentässä. Kuvan tapauksessa säteilyn lähde on mitoiltaan paljon pienempi kuin aallonpituus.

Kun säteilyn aallonpituus sekä säteilylähteen koko ovat pieniä verrattuna tarkasteluetaisyyteen, syntyy tasoaalto eli kaukokenttätilanne. Tällöin täytyy toteuttaa Rayleighin yhtälön [6]:

$$r > 2 \cdot \frac{D^2}{\lambda} \quad (14)$$

missä:

- r = etäisyys säteilylähteestä [m]
- D = antennin maksimihalkaisija [m]
- λ = säteilyn aallonpituus [m]

Kaukokentän rajaetäisyys pistemäiselle häiriölähteelle määräytyy oheisen yhtälön mukaan [1]:

$$r > \frac{\lambda}{2\pi} \approx 0,16 \cdot \lambda \quad (15)$$

missä:

- r = etäisyys säteilylähteestä [m]
- λ = säteilyn aallonpituus [m]

Tällöin sähkö- ja magneettikenttien suhde eli avaruuden aaltoimpedanssi on vakio [6].

$$Z_0 = \frac{E}{H} \approx 377\Omega \quad (16)$$

missä:

- Z_0 = sähkö- ja magneettikentän suhde [Ω]
- E = sähkökentän voimakkuus [V/m]
- H = magneettikentän voimakkuus [A/m]

EMC-direktiivien mukaiset mittaukset on suunniteltu tehtäviksi juuri kaukokentässä, jossa vallitsee avaruuden aaltoimpedanssi. Tällöin mittaukset ovat helposti toistettavissa ja useiden mittausten välinen vertailu on mahdollista.

Lähikentästä voidaan puhua silloin, kun tarkasteluetaisyys säteilylähteestä on pienempi kuin aallonpituuden kuudesosa eli [2]:

$$r < \frac{\lambda}{2\pi}$$

Sähkökenttä-nimitystä käytetään silloin kun sähkökentän voimakkuus on dominoiva eli sähkö- ja magneettikentän voimakkuuksien suhde Z_0 on $> 377 \Omega$. Vastaavasti magneettikenttä-nimitystä käytetään silloin, kun magneettikentän voimakkuus on dominoiva eli sähkö- ja magneettikentän voimakkuuksien suhde Z_0 on $< 377 \Omega$ [7].

3 AUTOJA KOSKEVA EMC-DIREKTIIVI JA OMAVALMISTE AJONEUVOJEN EMC-VAATIMUKSIA EUROOPASSA

Direktiivissä 72/245/ETY on määritelty autojen sähkömagneettisten häiriöiden tuottamista ja niiden sietämistä koskevat raja-arvot sekä mittaustavat. Direktiivin raja-arvojen sisään sopivalle ajoneuvolle pitää myöntää EY-tyyppihyväksyntä ja se on täten katsastettavissa EMC:n osalta.

3.1 Mittaustavat

Sähkömagneettista yhteensopivuutta koskevan tyyppihyväksyntätestin suorittamiseen on olemassa kaksi erilaista tapaa. Ajoneuvo voidaan hyväksyä testaamalla koko ajoneuvo asennuksineen tai testaamalla ajoneuvon yksittäiset SE-asennelmat. [8, s. 9.] Näistä testustavoista käytettiin koko ajoneuvoasennuksen hyväksyntää.

3.1.1 Ajoneuvoasennuksen hyväksyntä

Ajoneuvo voidaan tyyppihyväksyä suoraan, jos se täyttää mittauksissa direktiivin mukaiset raja-arvot sekä menettelytavat. Jos ajoneuvon hyväksymiseksi valitaan tämä tapa, sähkö/elektroniikkajärjestelmiä tai SE-asennelmia ei tarvitse testata erikseen.

3.1.2 Ajoneuvotyyppin hyväksyntä testaamalla yksittäiset SE-asennelmat

Ajoneuvolle voidaan hankkia hyväksyntä osoittamalla, että kaikki sähkö/elektroniikkajärjestelmät tai SE-asennelmat on testattu erikseen direktiivin mukaisesti ja asennettu siihen mahdollisesti liittyvien ehtojen mukaisesti.

3.2 Mittausjärjestelyt

Mittaukset on suoritettu testaamalla koko ajoneuvo asennuksineen, joten standardin analysoinnissa käydään läpi vain kyseinen mittaustapa. SE-asennelmia koskeva säännös löytyy direktiivin sivuilta 38 – 47. Direktiivissä on määritelty, että mittaukset tehdään CISPR 12 -standardin mukaisesti, jollei direktiivissä toisin ilmoiteta.

Direktiivissä on asetettu rajat ajoneuvon laaja- ja kapeakaistaiselle säteilylle, sekä sähkömagneettiselle häiriönsiedolle [8, s. 33].

Laaja- ja kapeakaistaisen säteilyn raja-arvot on esitetty liitteessä 2.

3.2.1 Testausolosuhteet

Direktiivin mukaiset mittaukset voidaan tehdä joko puolikaiuttomassa kammiassa tai avoimella testipaikalla. Mittauksissa päädyttiin käyttämään avointa testipaikkaa.

3.2.2 Antenni ja sen sijoitus

CISPR 12 -standardin mukaan mittaukset voidaan suorittaa millä tahansa lineaaripolarisaatiotyypisellä antennilla, jos se vain voidaan normalisoida vertailuantennin kanssa [9, s. 16].

Antennin sijoittamiseen mittauskohteesta on kaksi erilaista vaihtoehtoa. Ensimmäisessä vaihtoehdossa antennin ja mitattavan auton välinen etäisyys on $10 \pm 0,2$ metriä sekä antennin korkeus maasta $3 \pm 0,2$ metriä. Toisessa vaihtoehdossa antennin ja mittauskohteen välinen etäisyys on $3 \pm 0,05$ metriä sekä antennin korkeus maasta $1,8 \pm 0,05$ metriä.

Testit suoritetaan auton kummallekin puolelle ajoneuvon pituusakselin suhteen, pystypolarisoituneen sekä vaakapolarisoituneen säteilyn osalta. Tällöin antennin keskikohta asetetaan kohtisuoraan ajoneuvon moottorin puoliväliä kohti. Pystypolarisoituneen säteilyn mittauksissa antennin elementit asetetaan pystyasentoon, jolloin mitattavasta kohteesta peräisin olevan säteilyn pystysuunnassa värähtelevän komponentin vaikutus on voimakkaimmillaan. Vaakapolarisoituneen säteilyn mittauksissa antennin elementit asetetaan vaakasentoon, jolloin mitattavasta kohteesta peräisin olevan säteilyn vaakasuunnassa värähtelevän komponentin vaikutus on voimakkaimmillaan.

3.2.3 Ajoneuvon kunto testin aikana

Laajakaistaisen säteilyn mittauksessa moottorin on oltava käynnissä sekä vaihteen vapaalla. Tällöin kaikkien laitteiden, jotka voivat synnyttää laajakaistasäteilyä, ja jotka kuljettaja tai matkustaja voi kytkeä pysyvästi toimintaan, olisi oltava toiminnassa enimmäiskuormalla; näitä ovat esimerkiksi tuulilasinyyhkijöiden moottorit tai tuulettimet. Äänimerkki, ikkunoiden sähkömoottorit jne. eivät kuulu mukaan, koska niitä ei käytetä yhtäjaksoisesti.

Standardissa on määrätty laajakaistasäteilymittauksessa moottorin käyntinopeuden osalta käytettävän $2500 \text{ 1/min} \pm 10 \%$ silloin, kun ajoneuvon moottorissa on yksi sylinteri ja $1500 \text{ 1/min} \pm 10 \%$ silloin, kun ajoneuvossa on enemmän kuin yksi sylinteri.

Kapeakaistaisen säteilyn mittauksessa sytytysvirran on oltava päällä, mutta moottori ei saa olla käynnissä. Ajoneuvon kaikkien elektronisten laitteiden on toimittava normaalisti ja ajoneuvon on oltava paikallaan. Kaikkien laitteiden, jotka kuljettaja tai matkustaja voi kytkeä pysyvästi toimintaan ja joissa on sisäinen oskillaattori > 9 kHz tai toistuvia signaaleja, olisi oltava tavanomaisessa toiminnassa.

3.3 Mittaustaajuudet

Direktiivissä on laaja- sekä kapeakaistaisen säteilyn havaitsemiseksi määriteltä mittaustaajuuksiksi 30 MHz - 1000 MHz. Kummankin säteilytyypin rajat arvot on esitetty taajuuden funktiona liitteessä 2.

Määräysten mukaan laajakaistasäteilyn mittaukset voi suorittaa joko huippu- tai kvasihuippuilmaisimella. Ajankäytön säästämiseksi valittiin huippuarvopainotteinen mittaus tapa. Kapeakaistasäteilyn mittaamiseen oli direktiivissä määrätty keskiarvoilmaisoin.

3.3.1 *Huippuarvopainotteinen mittaus*

Huippuarvoilmaisoin mittaa nimensä mukaisesti signaalin tuottaman huippuarvon. Paikallaanoloajaksi asetettiin CISPR 12 -standardin suosituksen mukaisesti 5 ms [9, 11].

3.3.2 *Keskiarvopainotteinen mittaus*

Keskiarvoilmaisoin mittaa signaalin tuottaman keskiarvon. Keskiarvopainotteisessa mittauksessa oli paikallaanoloajaksi suositeltu myös 5 ms [9, 11].

3.4 Omavalmisteajoneuvojen EMC-vaatimukset Suomessa

Suomessa M₁-luokan omavalmisteajoneuvot kuuluvat piensarjatyypin hyväksynnän pariin. Piensarjatyypin hyväksynnän osalta valmistajan on osoitettava hyväksyntäviranomaisia tai katsastustoimipaikkaa tyydyttävällä tavalla, että direktiivin yleiset vaatimukset täytetään.

3.5 Omavalmisteajoneuvojen EMC-vaatimukset Isossa-Britanniassa

Omavalmisteajoneuvon ei tarvitse suoraan noudattaa direktiivin 72/245/ETY vaatimuksia, vaan se kuuluu erillisen yksittäishyväksyntäohjelman piiriin. Kyseinen ”The Single Vehicle Approval Scheme” on ennen rekisteröintiä tapahtuva katsastustapahtuma, jossa varmistetaan, että ajoneuvo täyttää modernit turvallisuus- ja ympäristövaatimukset. Yksittäishyväksynnän vaativien ajoneuvojen katsastus suoritetaan hyväksytyillä testausasemilla.

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden osalta on asetettu vaatimuksia ainoastaan kipinäsytytteisen ajoneuvon tuottamien radiohäiriöiden vaimentamiseksi. Katsastustapahtumassa todetaan visuaalisesti, että ajoneuvon sytytysjärjestelmä on varustettu radiohäiriöiden vaimennusjärjestelmällä, joka noudattaa direktiivin 72/245/ETY teknisiä vaatimuksia. Tämä todetaan tarkastamalla, että sytytysjohtimista löytyy vaatimusten mukaiset merkinnät, ja että sytytysjärjestelmästä ei löydy paljaita sytytyshäiriön lähteitä.

4 AUTOJEN HÄIRIÖIDEN MITTAUS

Mittausten ensisijainen tarkoitus oli selvittää, kuinka paljon nykyaikaisella sytyksenohjauksella sekä häiriövaimennetuilla sytytysjohtimilla varustettu hot rod -auto säteilee sähkömagneettista säteilyä. Tämän insinöörityön perusteella yritettiin todeta, että ko. ajoneuvotyyppi täyttää direktiivin yleiset vaatimukset hyväksyntäviranomaista sekä katsastustoimipaikkaa tyydyttävällä tavalla. Vertailun vuoksi otettiin mittauksiin mukaan myös alkuperäisellä 30-luvun teknologialla varustettu hot rod -auto, jonka sytytysjärjestelmä on varustettu kaksoiskärkisytytyksellä sekä vastuksettomilla metalliydinsytytysjohtimilla. Lisäksi mitattiin 80-luvun teknologiaa edustavan Renault R5 GT:n lähettämää säteilyä, joka on varustettu sytytyksenohjausyksiköllä.

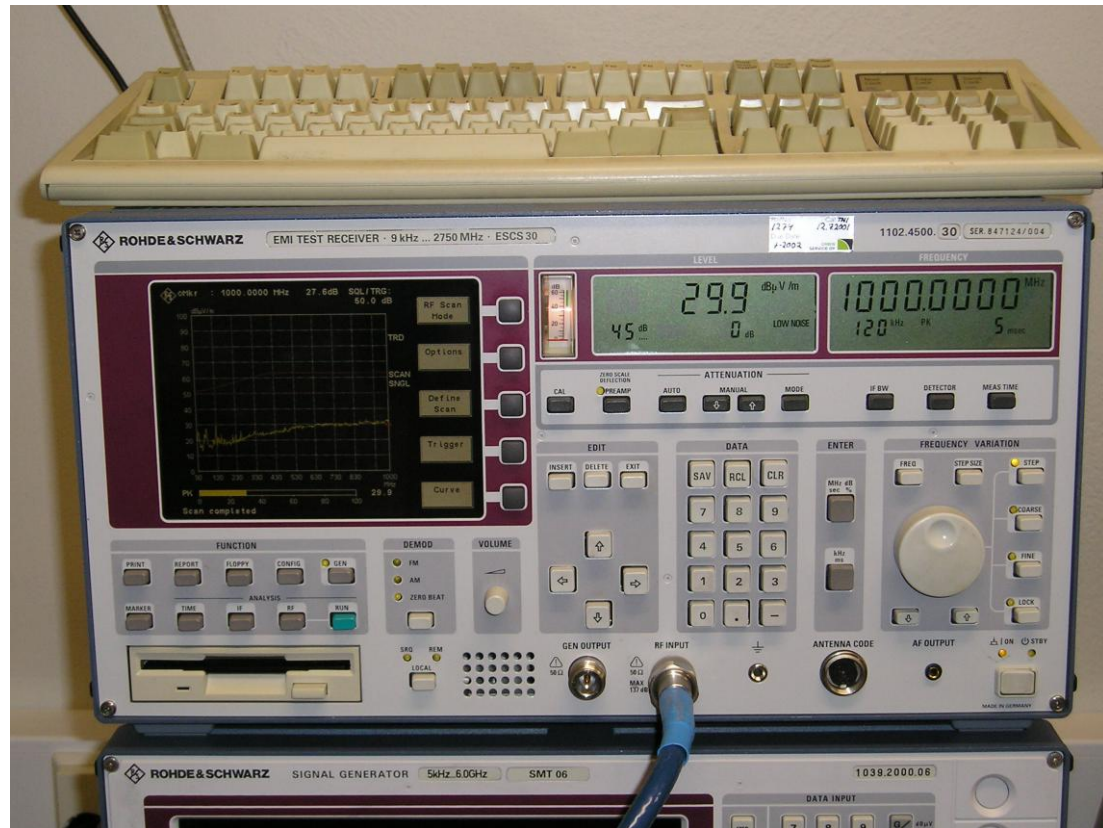
Mittaukset järjestettiin kahtena erillisenä päivänä. Ensimmäisellä kerralla mitattiin Renault R5 GT:stä peräisin oleva sähkömagneettinen säteily ja seuraavalla kerralla tehtiin varsinaiset omavalmisteajoneuvojen mittaukset, joissa mitattiin kahden erilaisen hot rod -auton lähettämä säteily. Mittaukset suoritettiin Hakuninmaan A-Katsastus Oy:n pihassa.

4.1 Mittalaitteisto

Mittalaitteisto koostui kentänvoimakkuuden mittauslaitteesta, antennista, antennin mastosta ja antennin sekä mittausvastaanottimen yhdistävästä koaksiaalikaapelista.

4.1.1 Kentänvoimakkuuden mittauslaite

Mittauksissa käytettiin kuvassa 4 esitettyä taajuuskaistan 9 kHz - 2780 MHz kattavaa Rohde & Schwarzin EMI Test Receiver ESCS30 -laitetta.



Kuva 4. Rohde & Schwarz EMI Test Receiver ESCS30. Kuvassa näkyy laitteen etupaneeli, josta näkee laitteen käyttökytkimet, signaalin graafisen kuvaajan ja signaalinvoimakkuus- sekä taajuusnäytöt.

Laitteeseen oli tallennettu etukäteen EMCO:n antennin antennikertoimet, joiden avulla mittausvastaanotin osasi muuttaa mitatun kentänvoimakkuuden suoraan direktiivissä vaadittuun $\frac{dB\mu V}{m}$ -muotoon.

Laajakaistaisen säteilyn mittauksessa käytetyn laitteen asetukset:

- Mitattavaksi taajuuskaistaksi asetettiin 30 MHz - 1000 MHz taajuusalueen ollessa 50 kHz.
- HavaitSIMena käytettiin huippuarvoilmaisinta ja paikallaanoloaika asetettiin suositusten mukaisesti 5 ms:iin.
- Kaistanleveys asetettiin direktiivin mukaisesti 120 kHz:iin
- Vaimennus asetettiin minimiin ja operointimoodiksi asetettiin low noise.

Kapeakaistaisen säteilyn mittauksessa käytetyt laitteen asetukset:

- Mitattavaksi taajuuskaistaksi asetettiin 30 MHz - 1000 MHz taajuusalueen ollessa 50 kHz.
- Havaitsimena käytettiin keskiarvoilmaisinta ja paikallaanoloaika asetettiin suositusten mukaisesti 5 ms:iin.
- Kaistanleveys asetettiin direktiivin mukaisesti 120 kHz:iin
- Vaimennus asetettiin minimiin ja operointimoodiksi asetettiin low noise.

4.1.2 Antenni

Mittauksissa käytettiin EMCO:n valmistamaa 3143 biconilog-logaritmi-periodista antennia, joka kattaa taajuusalueen 20 MHz - 1300 MHz. Mittauksissa käytettiin antennikohtaisia antennikertoimia, jotka asetettiin kentänvoimakkuuden mittauslaitteeseen. Antennikertoimet ovat valmistajan valtuuttaman tahon kalibroimia vahvistaen signaalia tietyillä taajuuksilla. Mitattu jännite muutetaan mittausvastaanottimessa kentänvoimakkuudeksi.

4.1.3 Antennin masto

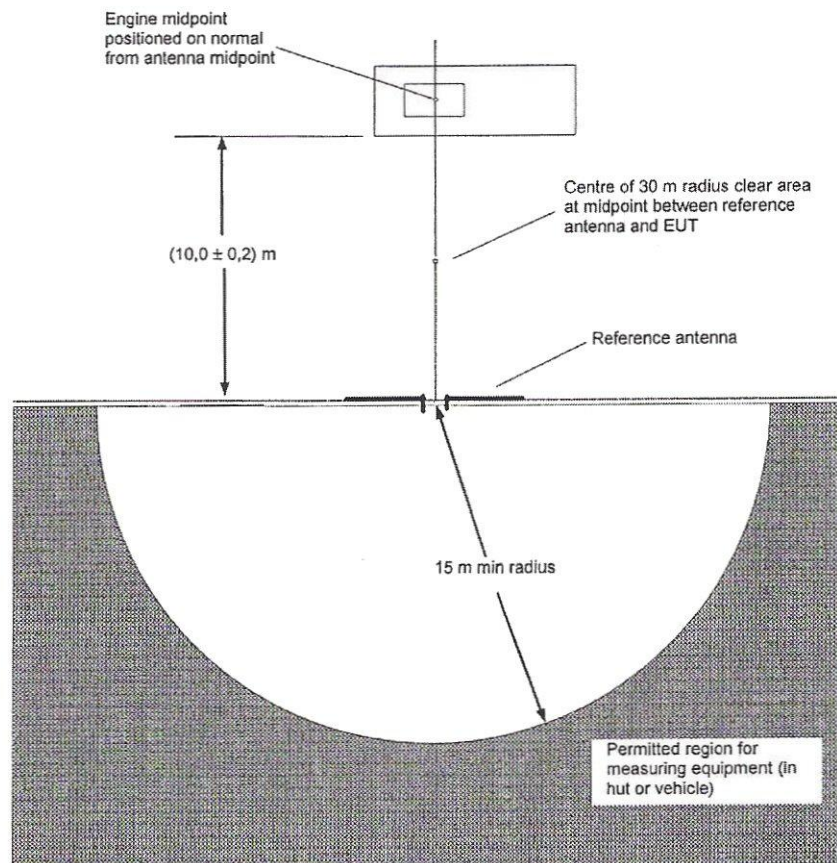
Antennin mastona käytettiin koulun lasikuidusta valmistettua mastoa, jolla antenni saatiin nostetuksi kolmen metrin korkeuteen. Koska lasikuitu ei johda sähköä, jää maston vaikutus mittauksiin olemattomaksi.

4.1.4 KytKentäkaapeli

KytKentäkaapelina käytettiin Suhnerin valmistamaa erittäin laadukasta koaksiaalikaapelia, joka kytkettiin antennin ja mittausvastaanottimen välille. Kyseisestä kaapelikokoonpanosta mitattiin kaapelin aiheuttama vaimennus, joka lisättiin mittaustuloksiin.

4.2 Laitteiden sijoitus ja mittaustila

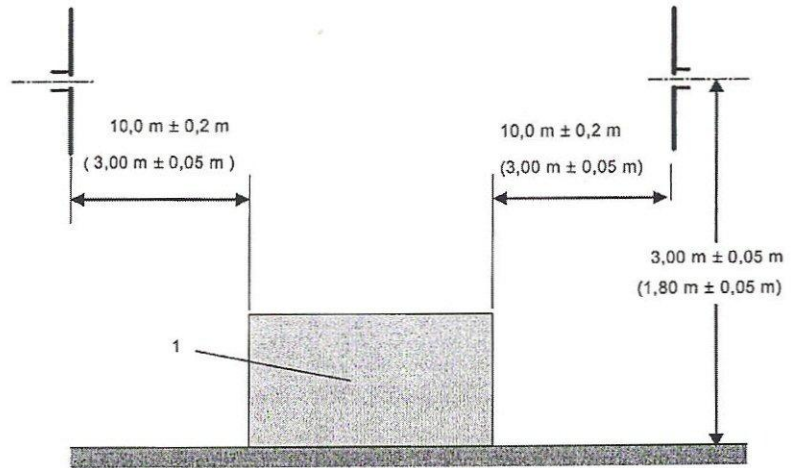
Mittauslaitteisto ja ajoneuvo sijoitettiin mittaustilaan CISPR 12 -standardin vaatimusten mukaisesti. Kuvat 5, 6 sekä 7 selventää mittaustaikaa, mittauslaitteiston ja mitattavan ajoneuvon välistä geometriaa.



NOTE The 10,0 m ± 0,2 m dimension may be changed to 3,00 m ± 0,05 m in accordance with 5.2.3.2 and 5.2.3.4.

Kuva 5. Mittaustilan vaatimukset [9, s. 18] Kuvassa on esitelty mittaustilan, mittauslaitteiston ja mitattavan ajoneuvon välistä geometriaa sekä niiden vaatimia etäisyyksiä suhteessa toisiinsa.

Antennin ja ajoneuvon väliseksi etäisyydeksi mittauksissa valittiin 10 metriä. Tällöin voitiin olla varmoja siitä, että antennin säteilykeilan leveys riittäisi mitaamaan koko ajoneuvon yhdellä kertaa. Standardissa vaadittiin käytännössä halkaisijaltaan 60 metriä oleva tasainen alue, joka on vapaa sähkömagneettisesti johtavista pinnoista. Mittaustilan vaatimukset asettivat jonkin verran rajoituksia mittaustilan valitsemiselle, mutta sopiva mittaustila löytyi Hakuninmaan A-Katsastus Oy:n tiloista.



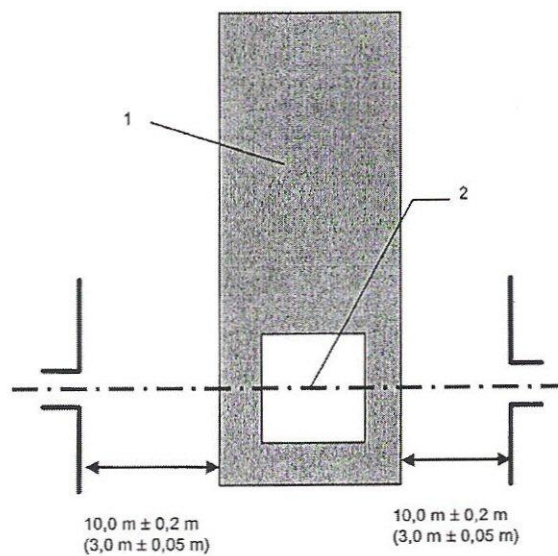
(Dimensions in brackets for 3 m antenna distance testing)

Drawing not to scale

Key

1 Equipment under test

Kuva 6. Antennin sijoitus suhteessa ajoneuvoon [9, s. 20]. Kuvassa on määritelty ajoneuvon ja antennin välinen etäisyys sekä antennin sijoituskorkeus.



(Dimensions in brackets for 3 m antenna distance testing)

Drawing not to scale

Key

1 Equipment under test

2 Engine midpoint positioned on normal from antenna midpoint

Kuva 7. Antennin sijoitus suhteessa ajoneuvoon [9, s. 21]. Kuvassa on esitelty ajoneuvon ja antennin välinen etäisyys sekä ajoneuvon moottorin sijoitus suhteessa antenniin.

Ajoneuvon ja antennin välinen etäisyys mitataan CISPR 12 -standardin mukaan antennin referenssipisteen sekä ajoneuvon lähimmän metallipinnan väliltä. Antennin referenssipisteeksi on standardissa määritelty logaritmi-periodisten antennien tapauksessa antennin kärki. Koska antennin ja mitattavan ajoneuvon väliseksi etäisyydeksi valittiin 10 metriä, oli antenni nostettava 3 metrin korkeuteen.

5 AUTOJEN TEKNISET OMINAISUUDET

5.1 Moottori

5.1.1 Hot Rod 1

Hot Rod 1:ssä käytetään Chevroletin valmistamaa 350-kuutiotuumaista V8-moottoria. Moottorin tekniset tiedot:

- Sylinterilukumäärä: 8
- Moottorityyppi: 4-tahti, nestejäähdytteinen
- Sylinterimitat: halkaisija 101,6 mm, iskunpituus 88,4 mm
- Sylinteritilavuus: 350 in³, (5,7 l)
- Puristussuhde: 9,1 : 1
- Polttoainejärjestelmä: kaasutin

Polttoaineen syöttö ajoneuvossa on toteutettu vaijeriohjatulla kaasuttimella, joka ei sisällä elektronisia osia. Polttoainepumppu on ajoneuvossa mekaaninen.

5.1.2 Hot Rod 2

Hot Rod 2:ssa käytetään Fordin valmistamaa 239-kuutiotuumaista sivuventtiilistä V8-moottoria. Moottorin tekniset tiedot:

- Sylinterimäärä: 8
- Moottorityyppi: 4-tahti, nestejäähdytteinen
- Sylinterimitat: halkaisija 81,0 mm, iskunpituus 95,3 mm
- Sylinteritilavuus: 239 in³, (3,9 l)
- Puristussuhde: 7,5 : 1
- Polttoainejärjestelmä: kaasutin

Polttoaineen syöttö ajoneuvossa on toteutettu vaijeriohjatulla kaasuttimella, joka ei sisällä elektronisia osia. Polttoainepumppu on ajoneuvossa mekaaninen.

5.1.3 Renault R5 GT

Autossa käytetään Renaultin valmistamaa kaasuttimella ja kärjettömällä sytytyksellä varustettua 1,4 litran 4-sylinteristä turbomoottoria.

- Sylinterimäärä: 4
- Moottorityyppi: 4-tahti, nestejäähdytteinen
- Sylinterimitat: halkaisija 76,0 mm, iskunpituus 77,0 mm
- Sylinteritilavuus: 1397 cm³, (1,4 l)
- Puristussuhde: 7,9 : 1
- Polttoainejärjestelmä: kaasutin

Polttoaineen syöttö ajoneuvossa on toteutettu vaijeriohjatulla kaasuttimella, joka ei sisällä elektronisia osia. Polttoainepumppu on ajoneuvossa sähköinen.

5.2 Kori

5.2.1 Hot Rod 1

Kuvassa 8 näkyvän ajoneuvon aihiona on käytetty vuoden 1932 Ford Model B Roadsterin alkuperäistä erillisrunkoista peltikoria, joka vastaa pääosin tuotantomallia.



Kuva 8. Hot Rod 1 kuvattuna vasemmalta.

5.2.2 Hot Rod 2

Ajoneuvo on rakennettu käyttäen vuoden 1932 Ford Model B Roadsterin alkuperäistä erillisrunkoista peltikoria. Kuvassa 9 esitelty Hot rod 2 vastaa pääosin tuotantomallia sillä muutoksella, että konepellit puuttuvat.



Kuva 9. Hot Rod 2 kuvattuna oikealta.

5.2.3 Renault R5 GT

Ajoneuvossa on käytetty Renault R5 GT:n alkuperäistä itsekantavaa peltikoria, joka vastaa täysin tuotantomallia.

5.3 Jarrut

Hot rod -autot oli varustettu yksipiirisillä mekaanishydraulisilla rumpujarruilla. Renault R5 GT oli varustettu kaksipiirisillä mekaanishydraulisilla levyjarruilla. Kyseisten ajoneuvojen jarrujärjestelmät eivät sisällä mitään häiriöille alttiita sähköisiä toimintoja, kuten sähköistä jarrutehostinta tai ABS:ää.

5.4 Sytytys- ja sähköjärjestelmät

5.4.1 Hot Rod 1

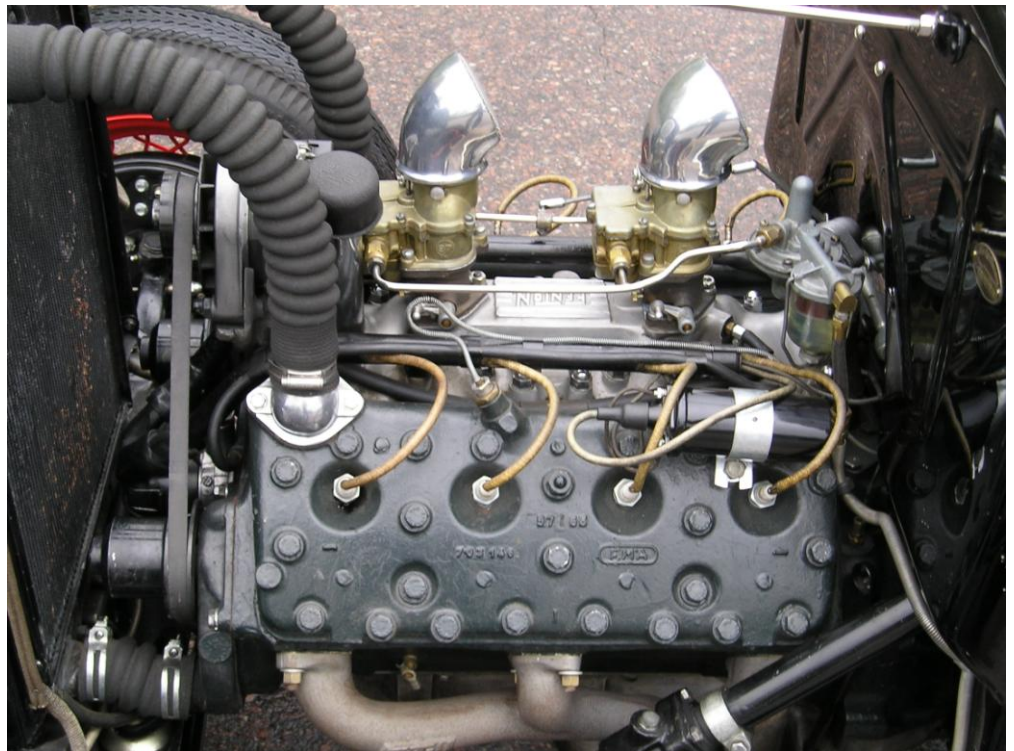
Hot Rod 1:ssä on 12 V:n sähköjärjestelmä, jota lataa ACDelcon valmistama 63 A:n vaihtovirtalaturi sisäänrakennetulla jännitteensäätimellä. Sytytysmuuntajana toimii esivastuksellinen MSD:n Blaster 1 -sytytyspuola, joka on suunniteltu korvaamaan ajoneuvon alkuperäinen sytytyspuola vahvistaen sytytysjännitettä. Sytytyksenohjaus on toteutettu vanhanaikaiset katkojan kärjet korvaavalla Crane Camsin valmistamalla kärjettömällä XR-i-sytytysmoduulilla. Kyseinen sytytysmoduuli on tarkoitettu asennettavaksi alkupe-
räisten katkojan kärkien tilalle virranjakajan sisälle. Sytytysjohtimet ovat 8 mm silikonipäällysteiset, ja niiden alla on lasikuitupunoksella päällystetty EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) -eristekerros. Eristekerroksen alla on sähköä johtava ja häiriöitä vaimentava hiiligrafiittikerros lasikuitu-
sekä kevlarsäikeistä valmistetulla ytimellä. Ajoneuvon sytytys- ja sähköjärjestelmien välinen geometria on esitelty kuvassa 10.



Kuva 10. Kuvassa on Hot Rod 1:n Chevroletin 350-kuutiotuuminen V8-moottori. Sytytyspuola sijaitsee oikealla yläkulmassa ja vasemmalla on laturi. Kuvassa olevat siniset sytytysjohtimet päätyvät virranjakajaan, jonka sisälle on asennettu sytytysmoduuli.

5.4.2 Hot Rod 2

Hot Rod 2:n sytytys- ja sähköjärjestelmät ovat alkuperäisiä edustaen 30-luvun teknologiaa. Ajoneuvossa on 12 V:n sähköjärjestelmä, jota lataa AC-Delcon valmistama vaihtovirtalaturi. Autossa on kahdella katkojankärjellä varustettu virranjakaja, joka ohjaa sytytyspuolan antaman suurjännitepulssein sytytystulpalle. Sytytysjohtimet ovat alkuperäistyyppiset metallidyinjohdot lakatulla kangasvaipalla. Johtimissa ei ole minkäänlaisia häiriöpoistoelementtejä. Ajoneuvon sytytys- ja sähköjärjestelmien välinen geometria on esitelty kuvassa 11.



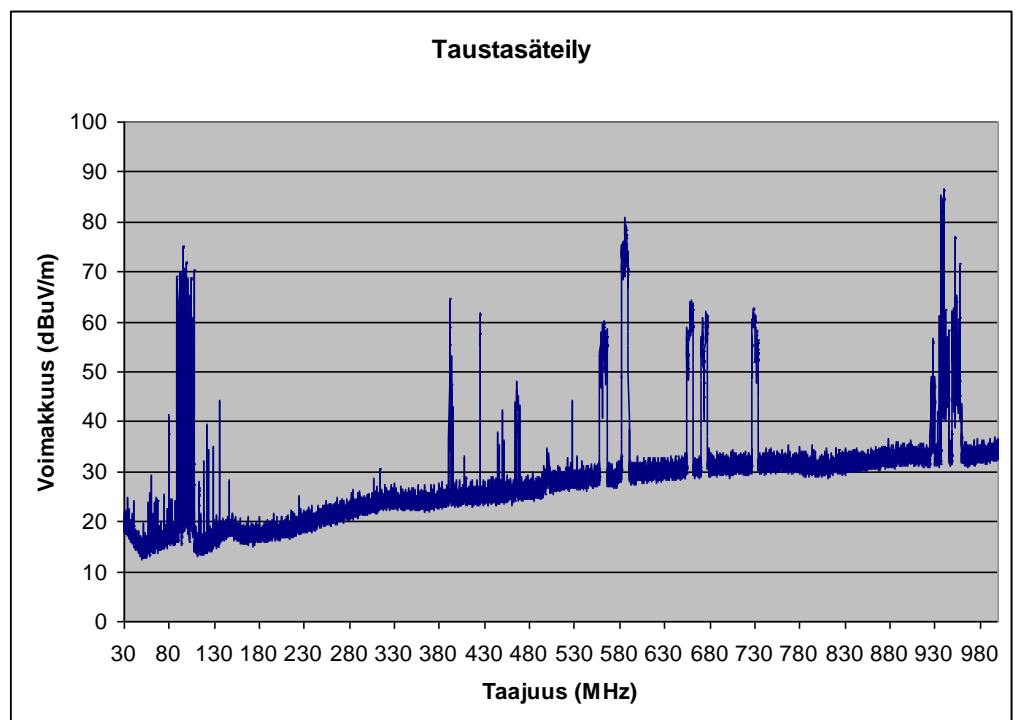
Kuva 11. Kuvassa on Hot Rod 2:n Fordin valmistama 239 kuutiotuuman sivuventtiilinen V8-moottori. Sytytyspuola sijaitsee oikealla keskellä ja vasemmalla on laturi. Kuvasta näkee myös kangaspäällysteiset sytytysjohtimet.

5.4.3 Renault R5 GT

Renault R5 GT:n sytytys- ja sähköjärjestelmä ovat alkuperäisiä. Autossa on 12 V:n sähköjärjestelmä, jota lataa vaihtovirtalaturi. Ajoneuvossa on transistorisytytysjärjestelmä, jossa ohjausyksikkö saa moottorin pyörintänopeustiedon virranjakajassa sijaitsevalta induktiiviselta impulssianturilta. Sytytyspuola tuottaa sytytystapahtumaan tarvittavan korkeajännitteen, joka johdetaan keskipako- ja alipainesäätimillä varustetun virranjakajan kautta sytytystulpille. Lisäksi autossa on sähköinen polttoainepumppu ja nakutusanturi, joka antaa ohjausyksikölle tiedon moottorin nakuttaessa.

6 MITTAUSTULOKSET

Mittaukset suoritettiin direktiivin mukaisesti ns. avoimella testipaikalla. Tämä tarkoittaa, että ympäristöstä johtuva taustasäteily piti ottaa huomioon mittaustulosten analysoinnissa. Direktiivi antaa mahdollisuuden suorittaa mittaukset myös puolikaiuttomassa kammiossa, mutta ko. mittaustilaa ei pystytty toteuttamaan sen vaatimien suunnattomien resurssien takia. Tämän tyyppisessä ympäristöltä eristetyssä mittaustaikassa taustasäteilyn vaikutus mittauksiin olisi ollut minimaalinen. Kuvassa 12 on esitetty taustasäteilyn taso mittaustaikalla.

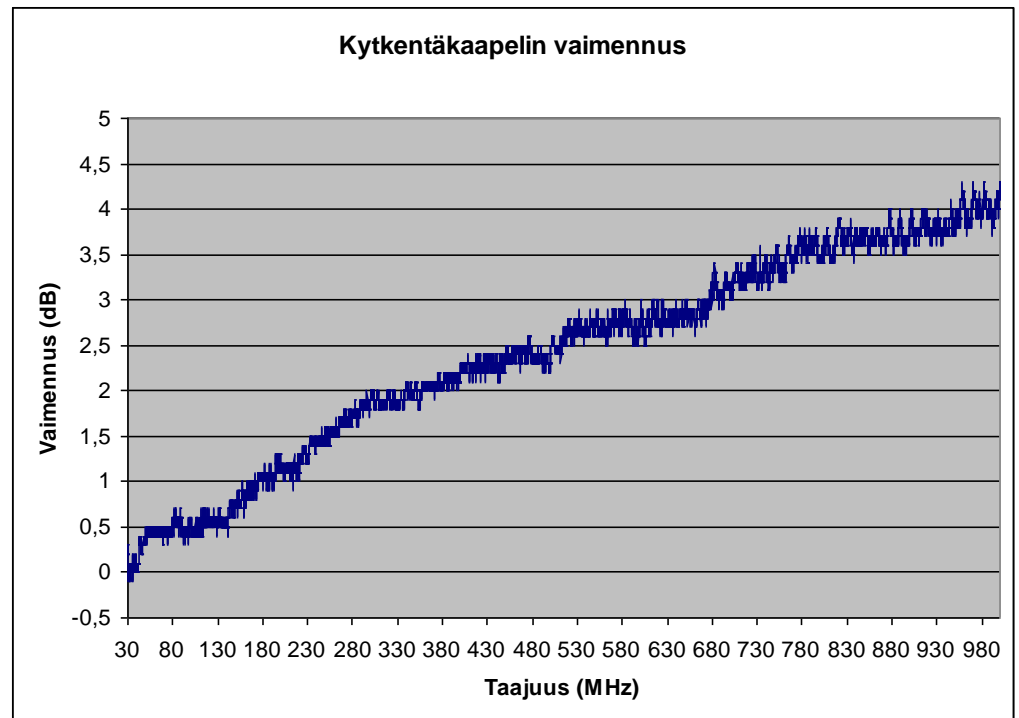


Kuva 12. Hakuninmaan katsastusaseman pihalla mitattu taustasäteily mitattuna huippuarvoilmaisimella pystypolarisoituneesta säteilystä. Kuvasta voidaan havaita, että taustakohinan lisäksi mittaustilassa esiintyy kiinteitä signaalilähteitä, joista merkittävimpiä ovat analogiset radiolähetykset (ULA-/FM-alue), digitaalisen televisioverkon lähetykset sekä GSM-verkon säteilylähteet n. 940 MHz:n taajuudella.

Direktiivissä vaaditaan että laaja- ja kapeakaistaisten sähkömagneettisten säteilyiden mittaukset suoritetaan ajoneuvon kummaltakin puolelta sekä pysty- että vaakasuuntaisella antennilla.

6.1 Kytentäkaapelin vaimennus

Direktiivissä edellytetään, että mittausvastaanottimen ja antennin välisestä kytkentäkaapelista peräisin oleva signaalin vaimennus otetaan huomioon mittaustulosten analysoinnissa. Kuvassa 13 esitetty kytkentäkaapelin aiheuttama vaimennus lisättiin jokaisen mittauksen päälle mittausten analysoinnin yhteydessä.

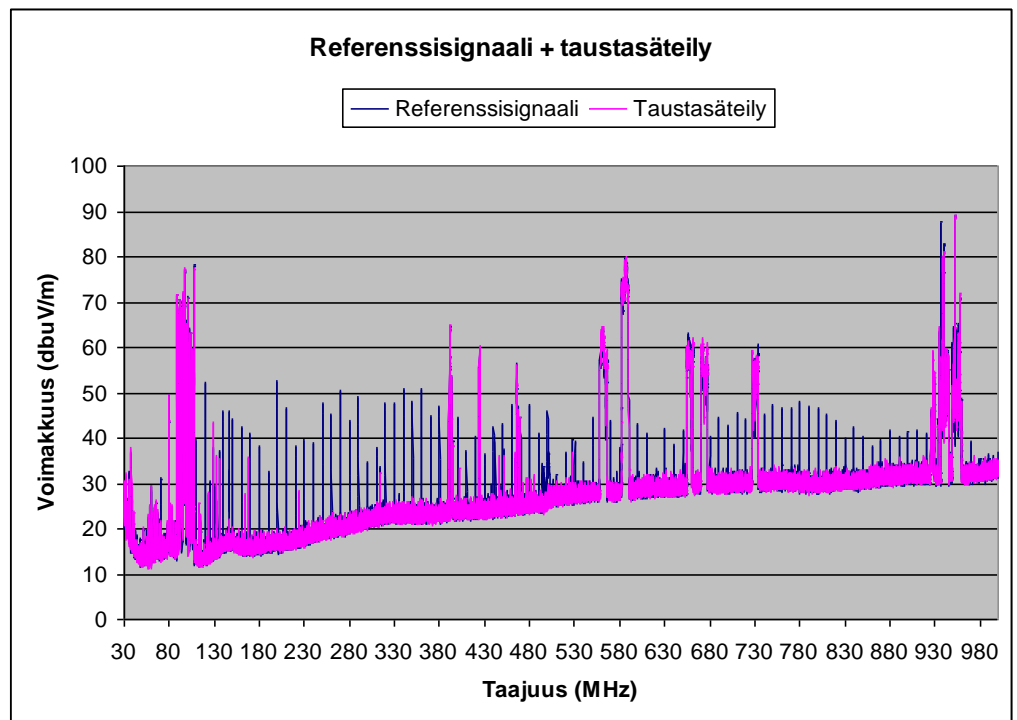


Kuva 13. Kuvassa on esitetty kytkentäkaapelin vaimennus taajuuden funktiona. Kuvasta voidaan havaita, että vaimennus kasvaa taajuuden kasvaessa.

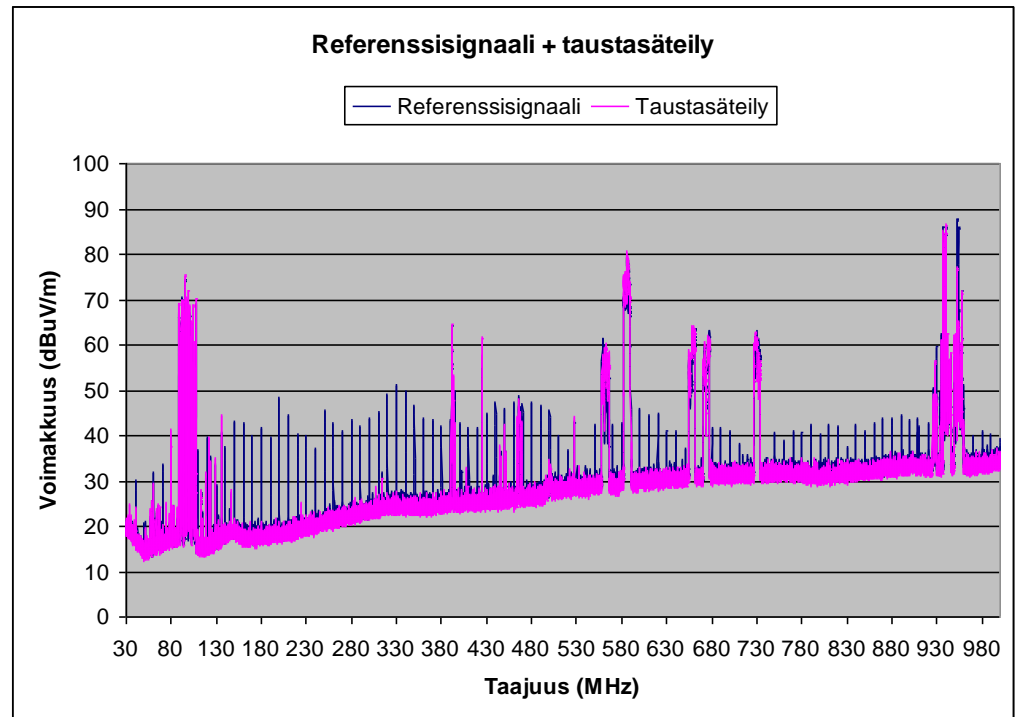
Kytentäkaapelin vaimennus mitattiin kytkemällä mittausvastaanottimen RF INPUTiin 30 dB:n vaimennin-elementti, jonka perään kytkettiin kytkentäkaapelin toinen pää. Kaapelin toinen pää kytkettiin mittausvastaanottimen GEN OUTPUTiin, jonka jälkeen skannattiin koko taajuusalue.

6.2 Referenssimittaus

Jotta voidaan arvioida eri mittauskertoina tehtyjen mittausten luotettavuutta, mitattiin Hakuninmaan katsastusaseman pihassa referenssiantennin tuottama säteily. Kuvissa 14 ja 15 esitetyistä mittaustuloksista käy ilmi, että referenssimittaukset eroavat vain hieman toisistaan. Pienet erot selittyvät esim. antennin paristojen kunnolla sekä antennin asennon ja sijainnin pienillä eroilla.



Kuva 14. Referenssiantennin tuottama signaali sekä taustasäteily ensimmäisellä kerralla mitattuna, jolloin suoritettiin Renaultin mittaukset.



Kuva 15. Referenssiantennin tuottama signaali sekä taustasäteily toisella kerralla mitattuna, jolloin suoritettiin hot rod -autojen mittaukset.

6.3 Hot Rod 1:n mittaukset

Hot rod -autoista ensimmäisenä oli vuorossa modernimmalla teknologialla varustettu Hot Rod 1. Ennen varsinaisia mittauksia suoritettiin direktiivin mukaisesti taustasäteilyn mittaukset, jotka toistettiin Hot Rod 1:n mittausten jälkeen. Kuvassa 16 on esitelty Hot Rod 1:n eräs mittaustilanne.



Kuva 16. Kuvassa suoritetaan Hot Rod 1:n laajakaistaisen pystypolarisoituneen säteilyn mittausta pystyantennilla auton vasemmalta puolelta.

Mittaustuloksista voidaan havaita, että direktiivissä säädetyt raja-arvot eivät täysin täyty laajakaistaisen säteilyn mittauksessa, suurimman ylityksen ollessa 1,6 dB. Hot Rod 1:n mittaustulokset on esitelty liitteessä 1 sivuilla 1 - 5.

Laajakaistamittauksissa raja-arvot eivät ylity mitattaessa vaakapolarisoitunutta säteilyä auton oikealta ja vasemmalta puolelta. Pystypolarisoituneen säteilyn mittauksissa raja-arvot ylittyvät auton oikealta puolelta mitattuna taajuusalueilla 80 - 100 MHz 0,3 dB:llä, 100 - 130 MHz 0,3 dB:llä ja 170 - 225 MHz 0,6 dB:llä sekä vasemmalta puolelta mitattuna taajuusalueilla 100 - 130 MHz 0,4 dB:llä, 130 - 170 0,6 dB:llä, 170 - 225 MHz 1,6 dB:llä ja 225 - 300 MHz 0,7 dB:llä.

Ajoneuvolle suoritettiin vain yksi keskiarvoilmaisimella tehty mittaus, koska kapeakaistaisia säteilylähteitä ajoneuvossa oli vain Crane Camsin sytytysmoduuli. Tämän tarkistusmittauksen tuloksista voi havaita, että ajoneuvo ei ylitä taustasäteilyn tasoa missään kohdassa.

6.4 Hot Rod 2:n mittaukset

Seuraavana oli vuorossa vanhemmalla 30-luvun teknologialla varustettu Hot Rod 2. Ennen varsinaisia mittauksia suoritettiin direktiivin mukaisesti taustasäteilyn mittaukset, jotka toistettiin Hot Rod 2:n mittausten jälkeen. Kuvassa 17 on esitelty Hot Rod 2:n eräs mittaustilanne.



Kuva 17. Kuvassa suoritetaan Hot Rod 2:n laajakaistaisen pystypolarisoituneen säteilyn mittausta pystyantennilla auton vasemmalta puolelta.

Mittaustuloksista voidaan havaita, että direktiivissä säädetyt raja-arvot ylittyvät kauttaaltaan koko taajuusalueella suurimman ylityksen ollessa 22,5 dB. Säteily oli todellisuudessa vieläkin voimakkaampaa, mutta suurimpia ylityksiä ei saatu tallennettua mittausvastaanottimen ajoittaisen ylikuormittumisen takia. Hot Rod 2:n mittaustulokset on esitelty liitteessä 1 sivuilla 5 - 6.

Hot Rod 2:lle tehtiin vain yksi laajakaistamittaus, jossa mitattiin ajoneuvon lähettämää pystypolarisoitunutta säteilyä vasemmalta puolelta. Mittausarvoja ei saatu luotettavasti viimeiseltä alueelta johtuen auton moottorin ylikuumentumisesta ja siitä aiheutuneesta moottorin sammuttamisesta. Hot Rod 2:n kierroksia jouduttiin laskemaan hieman 800 MHz:n kohdalla ja moottori sammutettiin n. 900 MHz:n kohdalla, jolloin säteily laski taustasäteilyn tasolle. Tämän voi havaita selkeästi kuvaajasta, joka on liitteen 1 sivulla 5.

Raja-arvot ylittyvät taajuusalueilla 30 - 34 MHz 10,8 dB:llä, 34 - 45 MHz 20,0 dB:llä, 45 - 60 MHz 22,5 dB:llä, 60 - 80 MHz 20,3 dB:llä, 80 - 100 MHz 16,6 dB:llä, 100 - 130 MHz 11,5 dB:llä, 130 - 170 MHz 18,0 dB:llä, 170 - 225 MHz 20,3 dB:llä, 225 - 300 MHz 19,9 MHz:llä, 300 - 400 MHz 20,5 dB:llä, 400 - 525 MHz 18,8 dB:llä, 525 - 700 MHz 20,0 dB:llä ja 700 - 850 MHz 19,2 dB:llä.

Kapeakaista mittauksia ajoneuvolle ei suoritettu, koska ajoneuvossa ei ollut yhtään kapeakaistalähdettä.

6.5 Renault R5 GT:n mittaukset

Ensimmäisellä kerralla mitattiin 80-luvun teknologiaa edustavan Renault R5 GT:n lähettämää sähkömagneettista säteilyä. Ennen varsinaisia mittauksia suoritettiin direktiivin mukaisesti taustasäteilyn mittaukset, jotka toistettiin Renaultin mittausten jälkeen. Kuvassa 18 on esitelty Renaultin eräs mittaus-tilanne.



Kuva 18. Kuvassa suoritetaan Renault R5 GT:n laajakaistaisen pystypolarisoituneen säteilyn mittausta pystyantennilla auton oikealta puolelta.

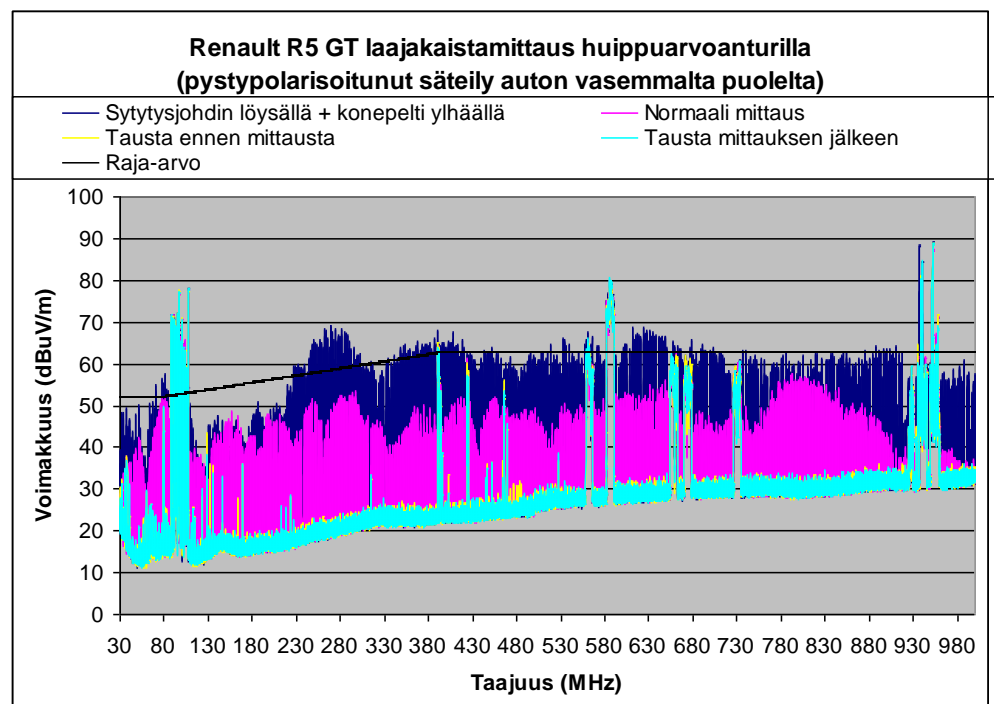
Mittaustuloksista voidaan havaita, että direktiivissä säädetyt raja-arvot eivät täysin täyty laajakaistaisen säteilyn mittauksessa. Renault R5 GT:n mittauksien tulokset on esitelty liitteessä 1 sivuilla 6 - 12.

Laajakaistamittauksissa raja-arvot eivät ylity mitattaessa vaakapolarisoitunutta säteilyä auton oikealta ja vasemmalta puolelta sekä pystypolarisoitunutta säteilyä mitattaessa auton vasemmalta puolelta. Pystypolarisoituneen säteilyn mittauksissa raja-arvot ylittyvät auton oikealta puolelta mitattuna taajuusalueella 525 - 700 MHz 0,7 dB:llä. Saman mittauksen yhteydessä ilmeni raja-arvon ylittävä voimakas signaalipiikki 135,55 MHz:n kohdalla. Sen epäiltiin olevan ilmailualan taajuus, joka saattoi olla peräisin esim. lentokoneen ja lennonjohdon välisistä keskusteluista. Hot rod -autojen mittauksen yhteydessä suoritettiin uudestaan kyseinen mittaus, jossa varmistui että signaalipiikki ei ollut peräisin mitatusta ajoneuvosta.

Ajoneuvolle suoritetuista keskiarvoilmaisimella tehdyistä kapeakaistamittauksista ilmenee, että Renault R5 GT ei ylittänyt taustasäteilyn tasoa yhdesäkään neljästä suoritetusta kapeakaistamittauksessa.

6.6 Renault R5 GT:n erikoismittaukset

Renaultin mittausten yhteydessä päätettiin kokeilla, minkälainen vaikutus syntyy, kun sytytysvirta pääsee karkaamaan huonosti ympäristöstä eristetyn sytytysjärjestelmän takia. Tämän mittauksen tarkoitus oli osoittaa kauttaaltaan tiiviin sytytysjärjestelmän tärkeys. Mittausta varten Renaultin ykkössylinterin sytytysjohdinta löysättiin hieman, jolloin sähkömagneettisen säteilyn aiheuttamat häiriöt pääsivät karkaamaan ympäristöön. Lisäksi vaikutusta tehostettiin pitämällä konepelti auki mittauksen ajan. Muutoksien vaikutus on esitelty kuvassa 19.



Kuva 19. Kaaviosta ilmenee, minkälainen vaikutus on sillä, että sähkömagneettinen säteily pääsee karkaamaan sytytysjärjestelmästä.

7 POHDINTA

7.1 Mittaustilan taustasäteily

Direktiivissä on annettu mahdollisuus suorittaa mittaukset puolikaiuttomassa kammiossa. Tällaisen huoneen etuna verrattuna avoimen tilan mittauspaikkaan on se, että ympäristöstä tulevat häiriöt jäävät pois. Puolikaiuton mittaus-tila on ympäristöstä eristetty stabiili mittausalue, jolloin esim. ulkona vallitseva säätila tai satunnaiset häiriösignaalit eivät rajoita mittauksen suorittamista. Eräessä Renaultin mittauksista esiintyi voimakas signaalipiikki 135,55 MHz:n kohdalla. Ajoneuvolle tehdyssä uusintamittauksessa varmistui, että kyseinen signaalipiikki ei ollut peräisin ajoneuvosta. Koska käytettävissä ei ollut ajoneuvomittauksiin soveltuvaa puolikaiutonta mittausaluetta, jouduttiin mittaukset suorittamaan avoimen tilan mittauspaikassa, jolloin ympäristöstä peräisin olevat häiriöt otettiin huomioon mittauksista tarkasteltaessa. Avoimen tilan mittauspaikalla suoritetaan taustasäteilyn mittaukset, joita verrataan varsinaisiin ajoneuvon mittauksiin. Tällöin ympäristössä vaikuttavat pysyvät häiriösignaalit, kuten radiotaajuudet, eivät vääristä oikeita mittauksia. Satunnaisesti ilmaantuvia häiriösignaaleja sen sijaan ei voida sulkea pois taustamittauksilla.

7.2 Ajoneuvojen tekniset ominaisuudet

Testattujen ajoneuvojen jarru- ja ohjausjärjestelmät eivät sisältäneet mitään sähköisiä toimintoja, jotka häiriintyessään voisivat vaikuttaa ajoneuvon hallittavuuteen. Hot Rod 1:n ja Renaultin sytytyksenohjaus oli toteutettu elektronisella ohjausyksiköllä, joka altistuessaan voimakkaalle sähkömagneettiselle häiriölle saattaa aiheuttaa sytytyskatkoksia. Ajoneuvoille ei kuitenkaan suoritettu niiden sietämisen häiriön testaamista, koska ajoneuvon suoraan hallintaan ei sytytyskatkoksilla ole vaikutusta. Ajoneuvojen sietämisen häiriöiden testaaminen vaatii käytännössä erittäin kalliita, juuri kyseiseen tehtävään suunniteltuja mittausiloja sekä -välineitä. Lisäksi direktiivin häiriöiden testaamisessa vaatimat kentänvoimakkuudet saattaisivat aiheuttaa mitattaville ajoneuvoille pysyviä vaurioita.

7.3 Tulokset

Vähäisen mikroprosessoripohjaisen elektroniikkamäärän vuoksi voitiin todeta, että Hot Rod 1 sekä Renault R5 GT eivät säteile lainkaan kapeakaistaisen säteilyn mittauksissa. Sama pätee myös Hot Rod 2:n kohdalla, jossa ei ollut mitään kapeakaistaista lähdettä.

Laajakaistaisen säteilyn osalta Hot Rod 1 sekä Renault ylittivät hieman direktiivissä asetetut raja-arvot muutamassa kohdassa. Suurin raja-arvon ylitys oli Hot Rod 1:stä peräisin ollut 1,6 dB:ä, jonka ei katsota vaikuttavan ympäristöön haitallisesti. Tätä päätelmää tukee CISPR 12 -standardi, johon myös direktiivi suurimmaksi osaksi perustuu. Kyseisessä standardissa raja-arvot on asetettu sekä kapea- että laajakaistaisen säteilyn osalta 2 dB:ä EU:n direktiiviä korkeammaksi. Lisäksi omavalmisteajoneuvojen kohdalla täyttä direktiivin mukaisuutta ei vaadita, vaan ajoneuvon valmistajan on osittettava hyväksyntäviranomaisia tai katsastustoimipaikkaa tyydyttävällä tavalla, että direktiivin yleiset vaatimukset täytetään.

Hot Rod 2:n tarkoitus laajakaistamittauksissa oli osoittaa, kuinka suuri vaikutus on ajoneuvon varustamisella nykyaikaisilla häiriönsuojausmenetelmillä. Tuloksista pystyttiin havaitsemaan, että 30-luvun teknologialla varustettu ajoneuvo emitti sähkömagneettista säteilyä erittäin voimakkaasti ympäristöön, suurimman mitatun ylityksen ollessa 22,5 dB raja-arvosta. Ajoneuvo säteili todellisuudessa vieläkin voimakkaammin, mutta suurimpia ylityksiä ei saatu tallennettua mittausvastaanottimen ajoittaisen ylikuormituksen takia.

Renault R5 GT:n kohdalla kokeiltiin, millainen vaikutus huonosti ympäristöstä eristetyllä sytytysjärjestelmällä on tiiviiseen järjestelmään verrattuna. Mittausta varten Renaultin yhtä sytytysjohdinta löysätettiin sekä konepelti nostettiin ylös mittausten ajaksi. Erot verrattuna normaaliin tiiviiseen järjestelmään olivat paikoitellen reilusti yli 20 dB.

8 YHTEENVETO

Elektronisella sytytyksenohjausyksiköllä sekä häiriövaimennetuilla sytytysjohtimilla varustetut Hot Rod 1 ja sekä Renault R5 GT eivät täysin täyttäneet direktiivin vaatimuksia. Raja-arvojen ylitykset tapahtuivat kuitenkin sen verran pienellä taajuusalueella ja olivat niin pieniä, ettei niistä uskota olevan haittaa ympäristölle. Lisäksi omavalmisteaajoneuvojen kohdalla täyttää direktiivin mukaisuutta ei vaadita, vaan valmistajan on osoitettava ajoneuvon täyttävän direktiivin yleiset vaatimukset hyväksyntäviranomaisia tai katsastustoimipaikkaa tyydyttävällä tavalla.

Mittauksissa kävi selkeästi ilmi, että varustamalla ajoneuvo nykyaikaisella sytytysjärjestelmällä sekä häiriövaimennetuilla sytytysjohtimilla saavutetaan huomattava parannus ajoneuvon lähettämään sähkömagneettiseen säteilyyn.

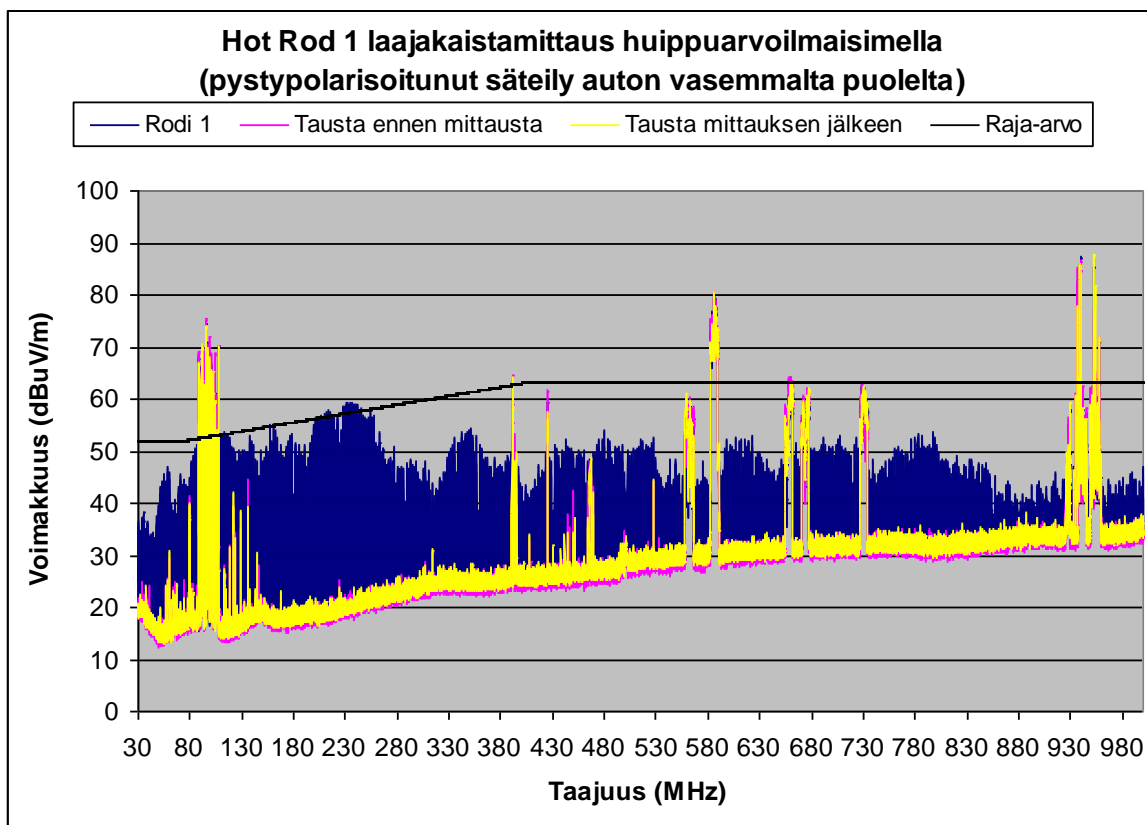
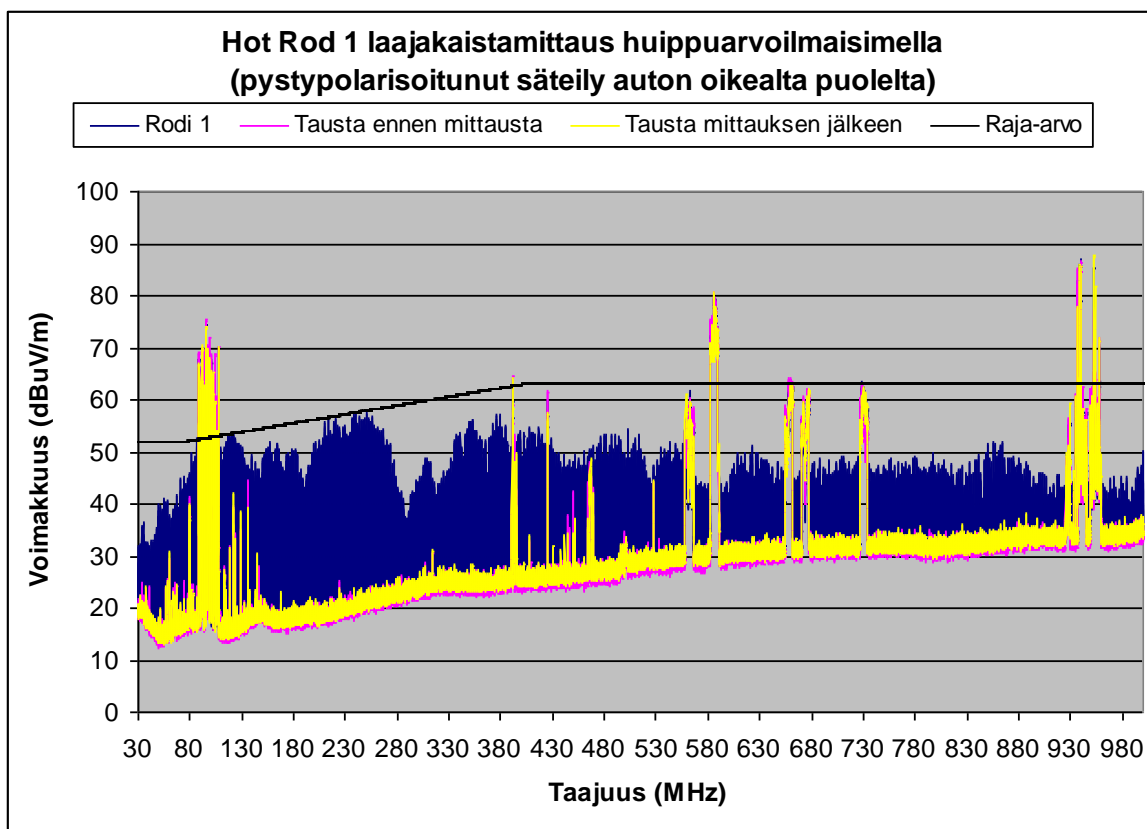
Mittaukset tukevat käsitystä, jonka mukaan suurimmat häiriöt ovat peräisin ajoneuvojen sytytysjärjestelmästä. Tämän perusteella voidaan todeta, että direktiivin vaatimukset täyttyvät suoraan tilanteissa, joissa omavalmisteaajoneuvo varustetaan EY-tyyppihyväksytyllä moottorilla alkuperäistä sytytysjärjestelmää muuttamatta. Tällä tavalla toimitaan ainakin Isossa-Britanniassa.

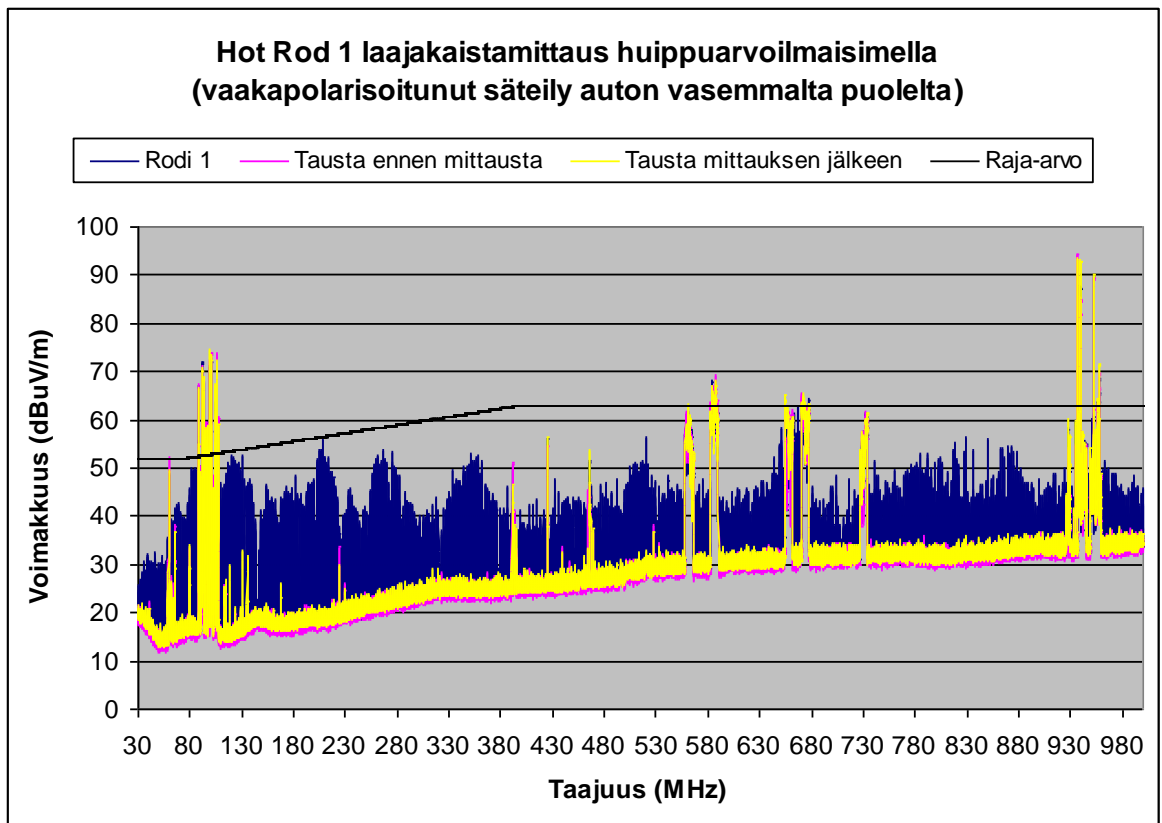
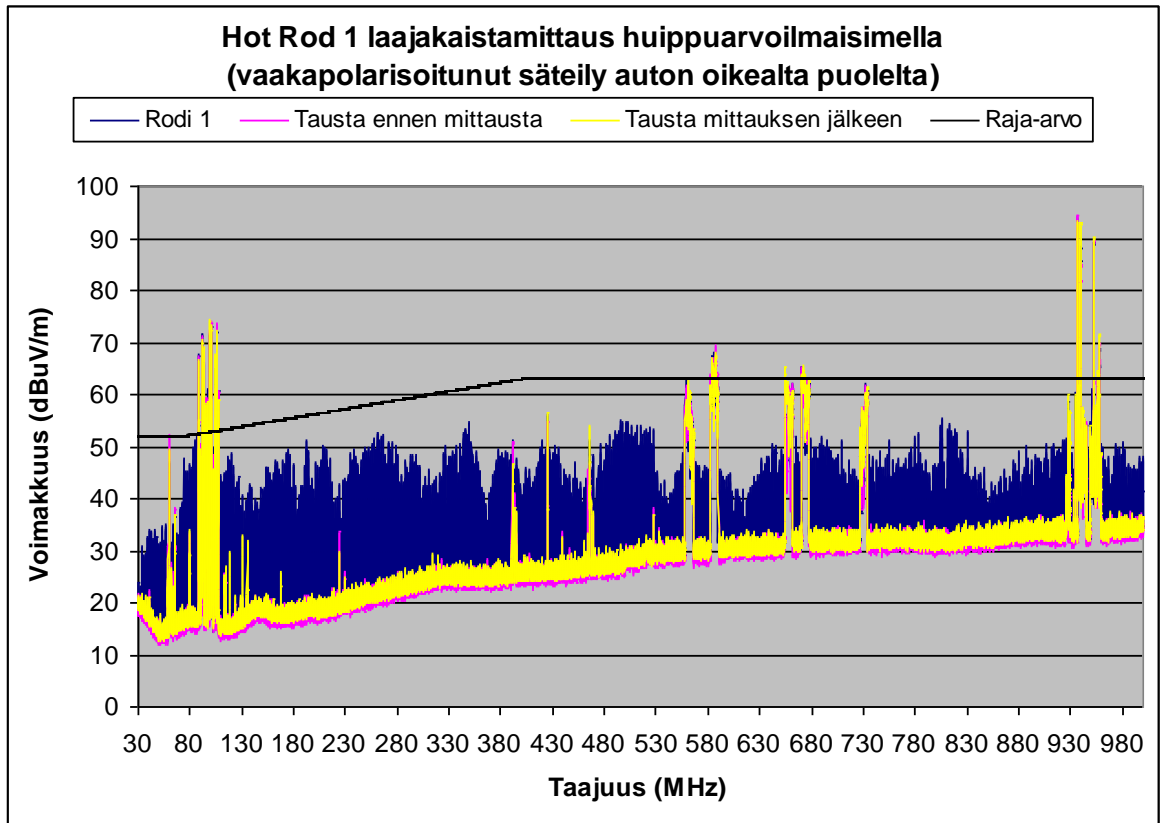
Tämän insinööriyön valmistumisvaiheessa syksyllä 2008 ei vielä ollut tietoa siitä, vaikuttaako työ omavalmisteaajoneuvojen vaatimuksenmukaisuuden todistamiseen Suomessa.

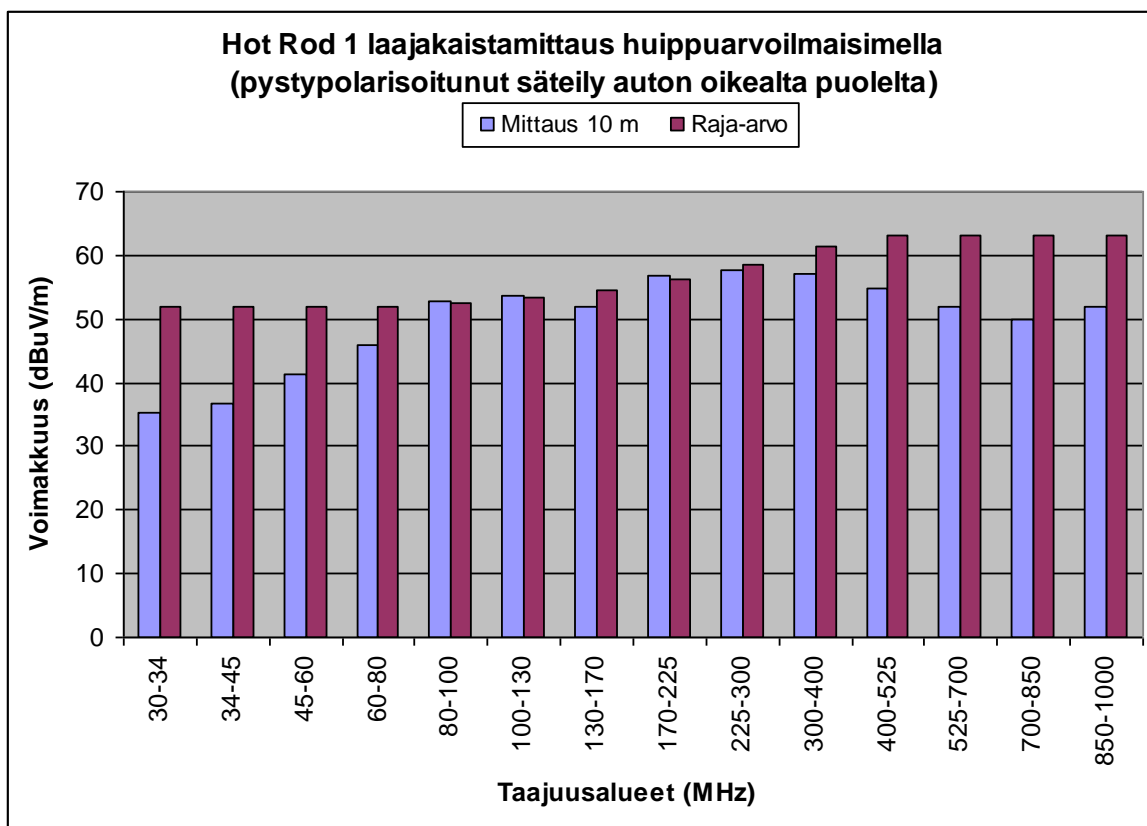
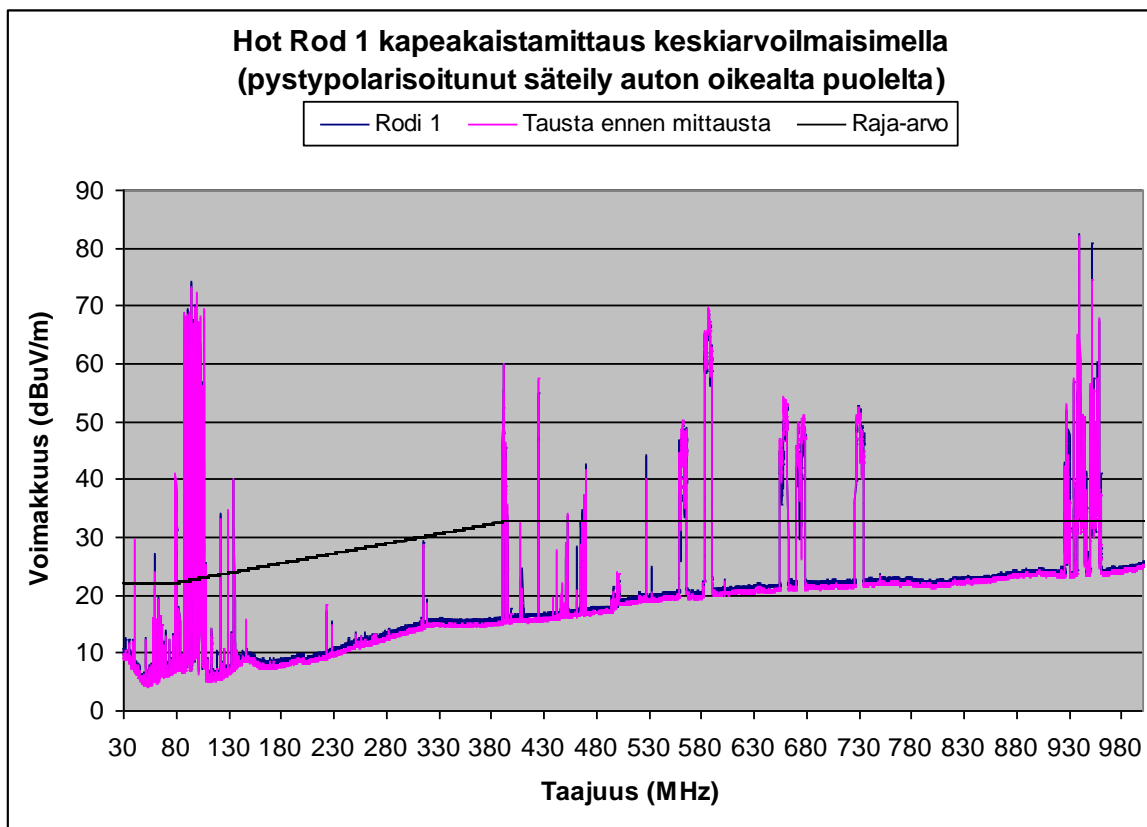
VIITELUETTELO

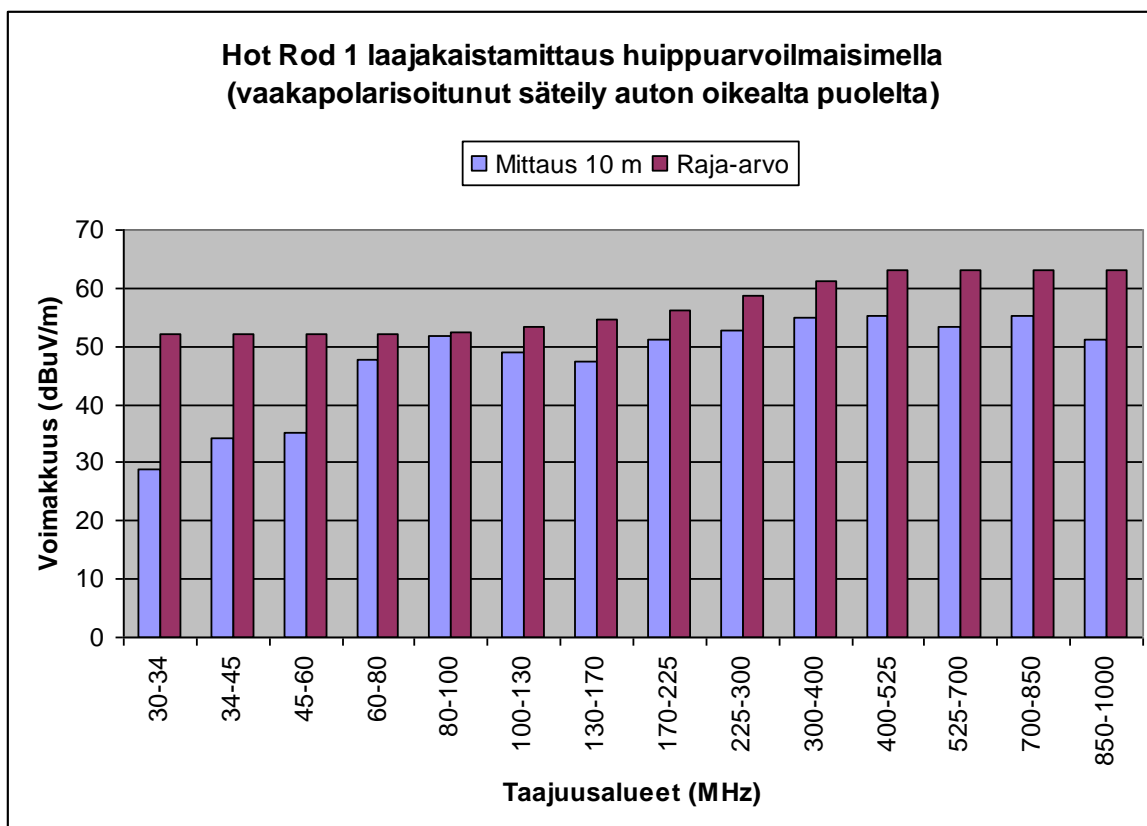
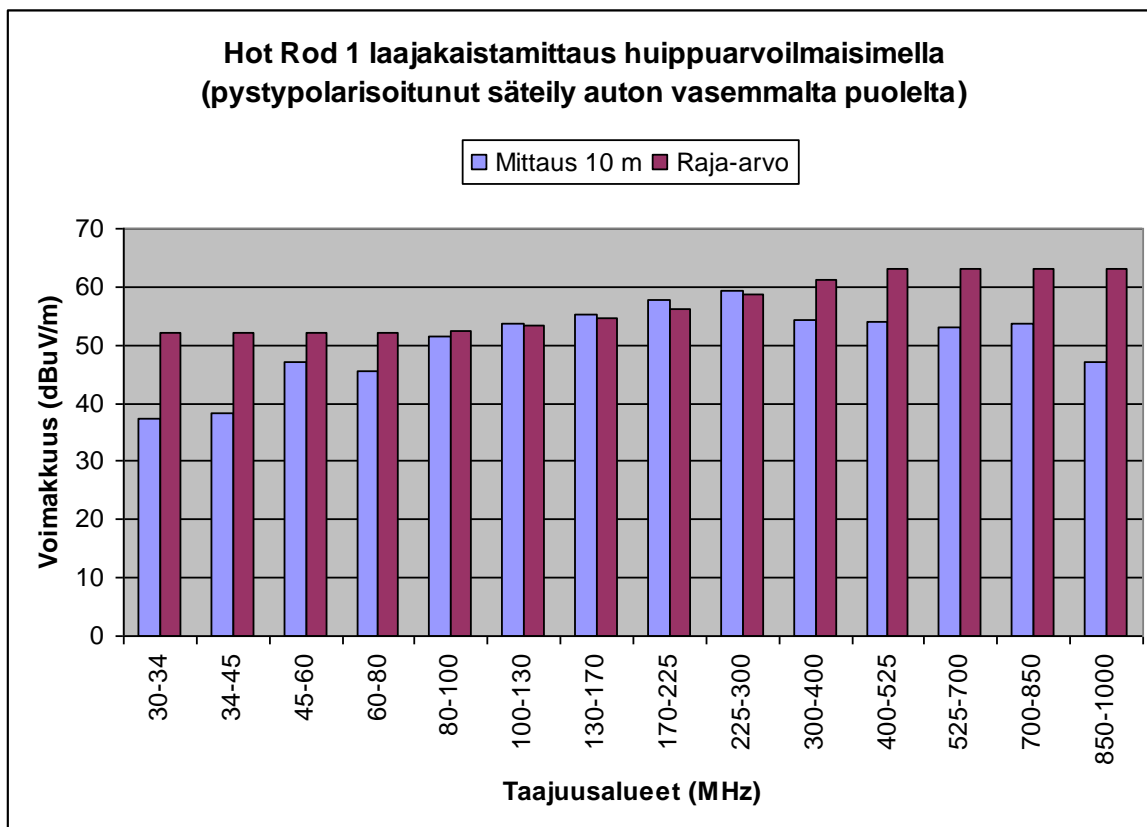
- [1] Kovanen, Pasi, *Moottoripyörän EMC-mittaus ja tyyppihyväksyntä*. Insinööriyö. Helsingin ammattikorkeakoulu. Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma. Helsinki 2007.
- [2] Stirkinen, Panu, *EMC-direktiivin mukainen säteilevien häiriölaitteiden mittaus mikrotietokonepohjaiselle kaukokäyttölaitteelle*. Insinööriyö. Helsingin ammattikorkeakoulu. Automaatiotekniikan koulutusohjelma. Helsinki 1996.
- [3] Juhala, Matti ym., *Moottorialan Sähköoppi*. Helsinki: Edita 2005
- [4] Seppänen, Raimo ym., *MAOL-taulukot*. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Ota-va. 2004.
- [5] Peltola, Pekka, *Sähköisten häiriöiden kytkeytymistavat*. Helsinki: Helsingin ammattikorkeakoulu. Julkaisujankokhta tuntematon. Moniste.
- [6] Salonen, Tero-Tapani, *EMC:n parantaminen kiihtyvyyssanturissa*. Insinööriyö. Helsingin ammattikorkeakoulu. Sähkö- ja tietoliikennetekniikan koulutusohjelma. Helsinki 2000.
- [7] Sarapelto, Juha, *Digitaalisen radiolinkin EMC-mittaukset*. Insinööriyö. Helsingin teknillinen oppilaitos. Automaatiotekniikan opintolinja. Helsinki 1991.
- [8] Neuvoston direktiivi 72/245/ETY. 2006.
- [9] CISPR 12 -standardi.
- [10] Autoteknillinen taskukirja 6. painos
- [11] Williams, Tim, *EMC for Product Designers*. 4. painos. Iso-Britannia: Elsevier Ltd. 2007.

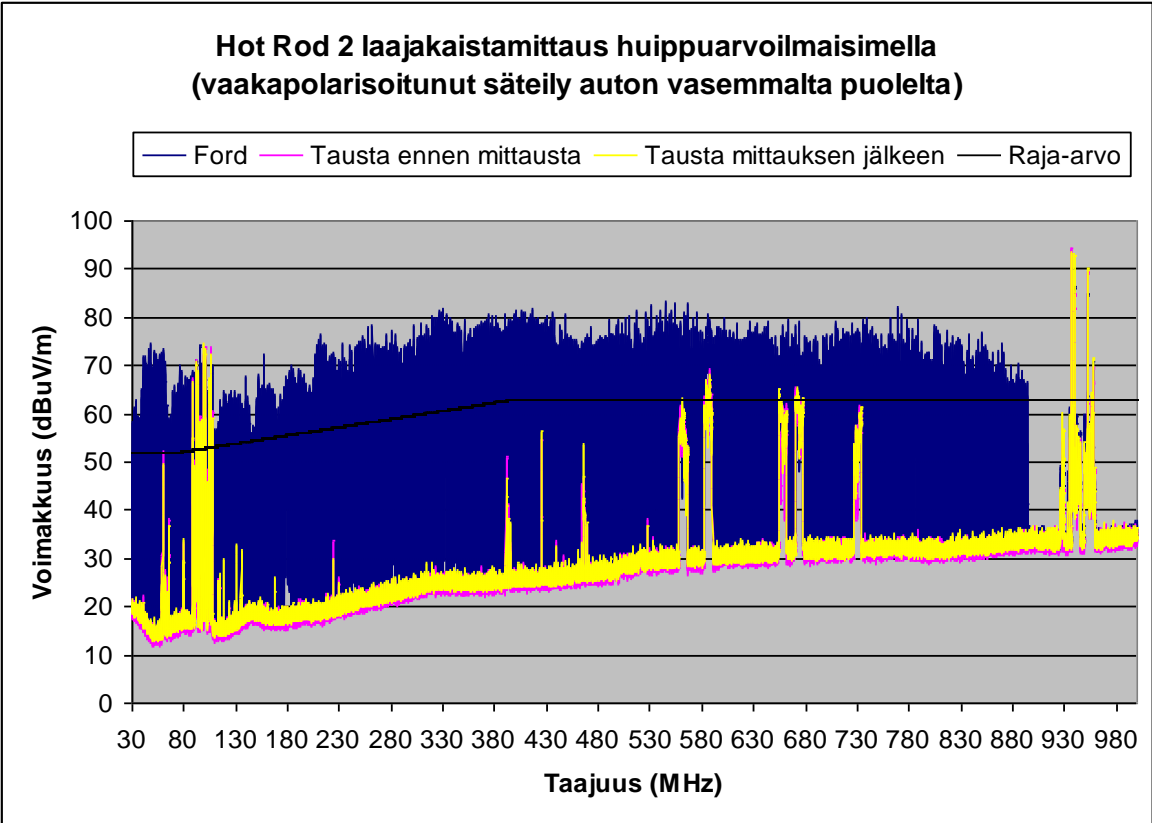
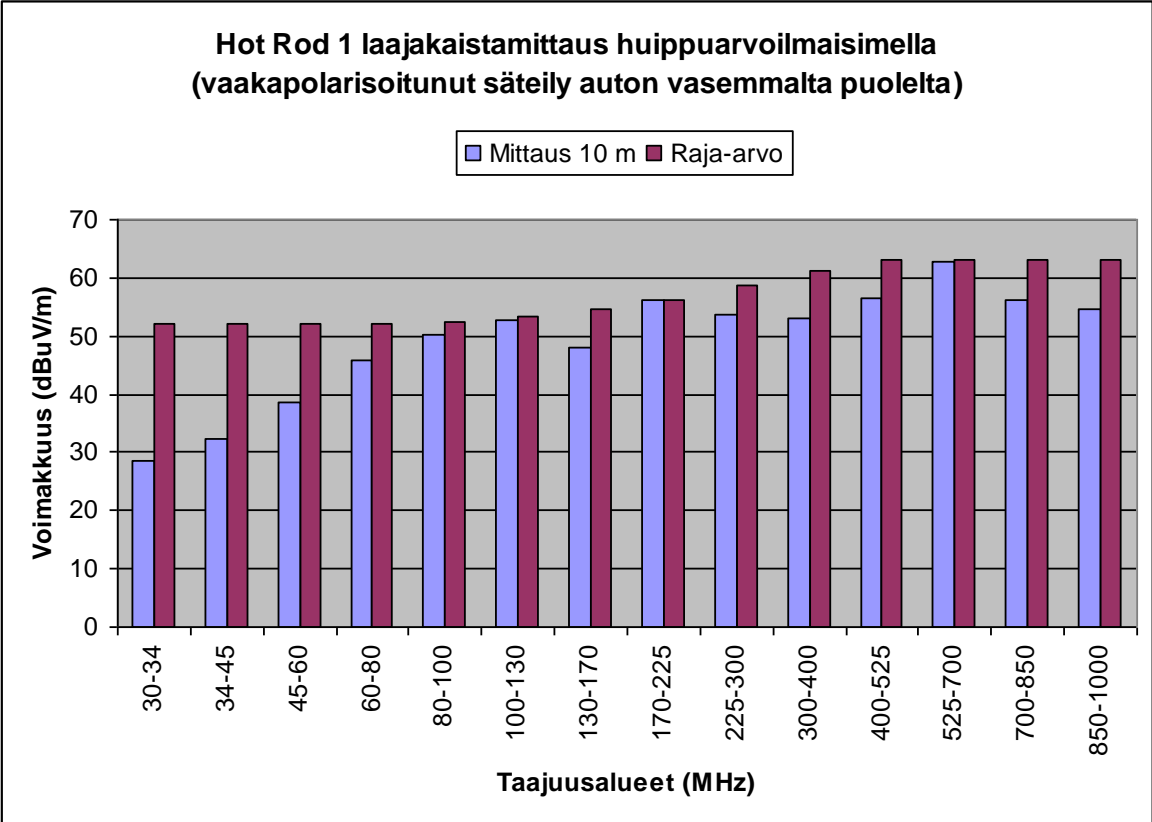
MITTAUSTULOKSET

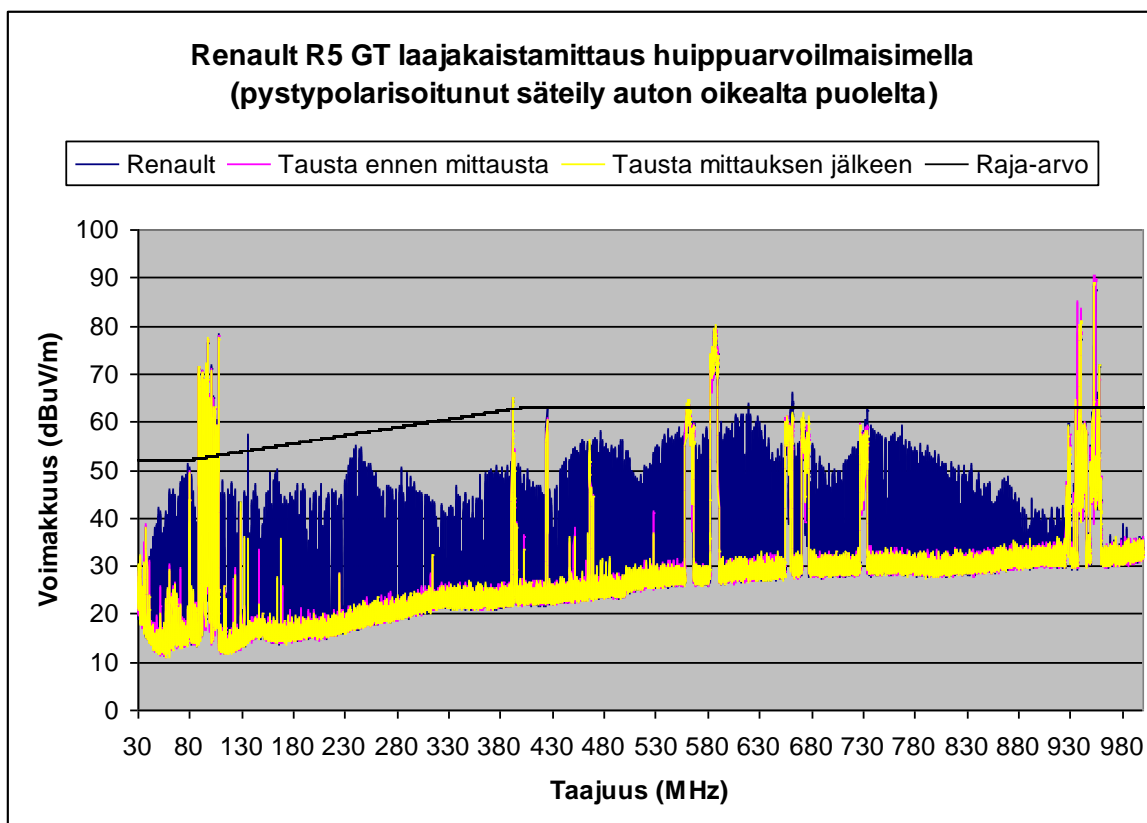
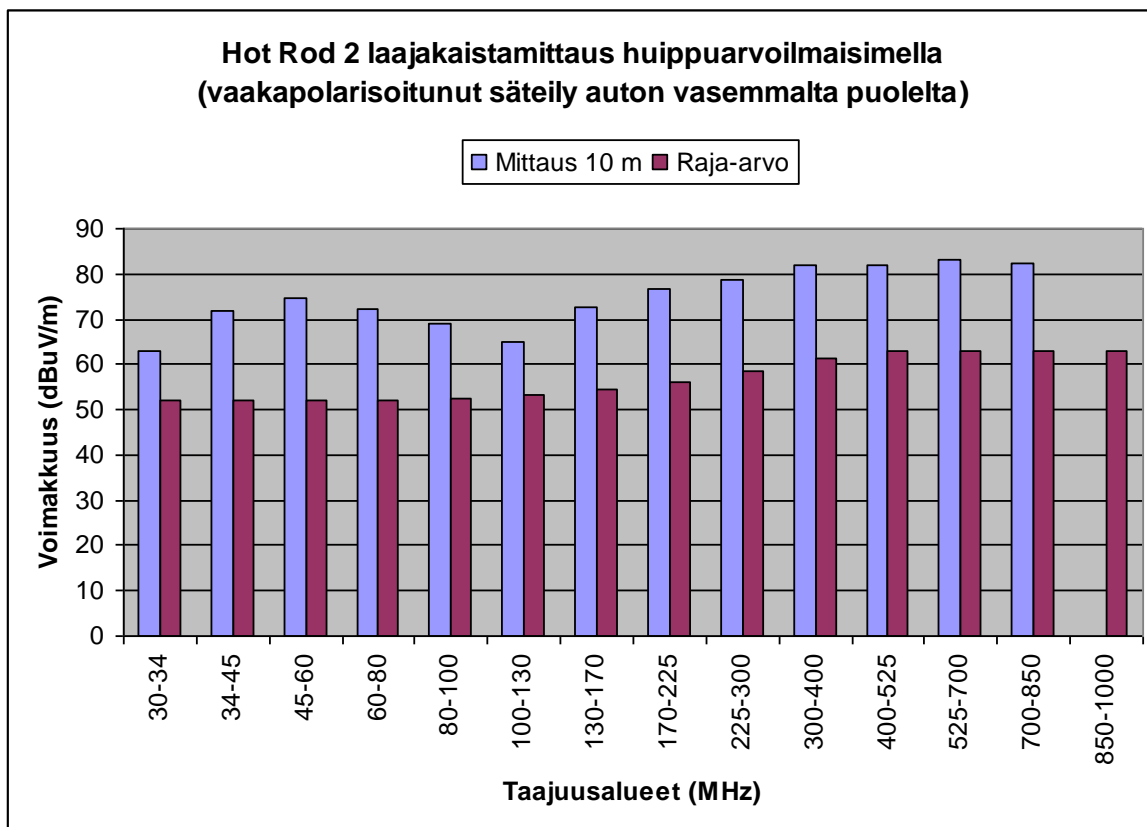


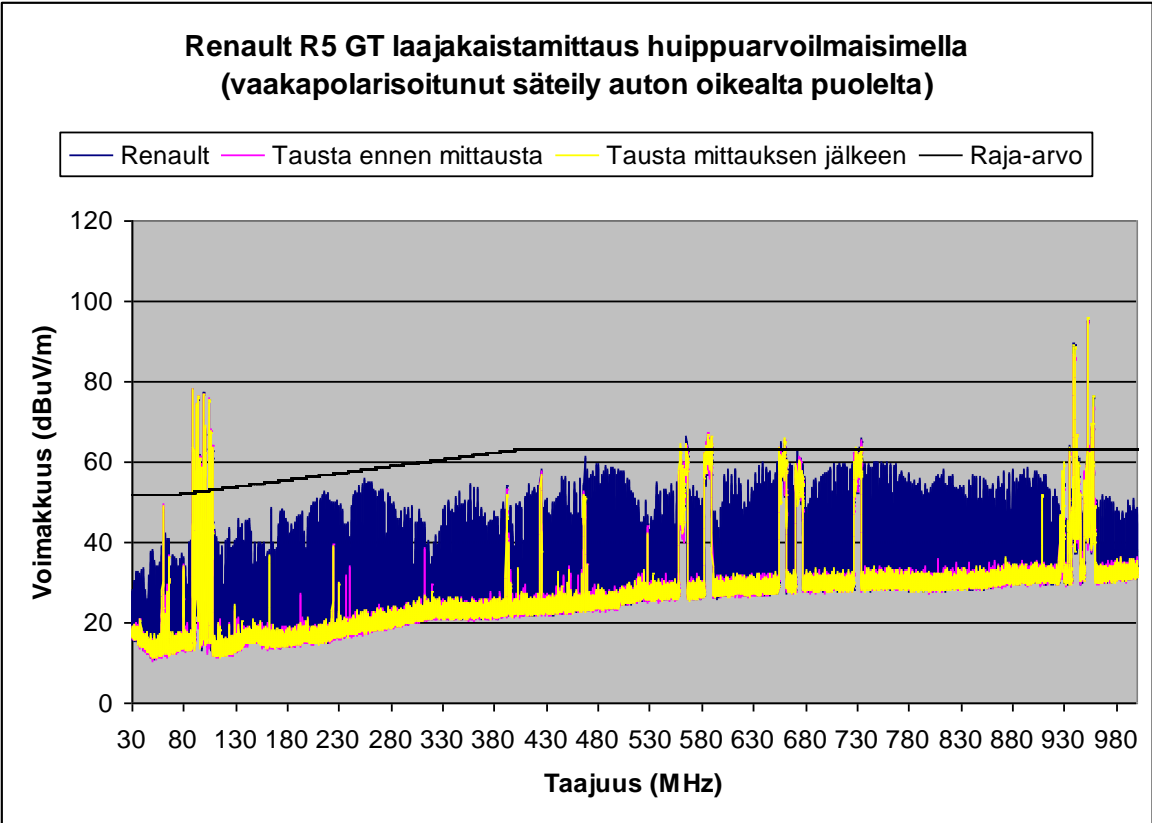
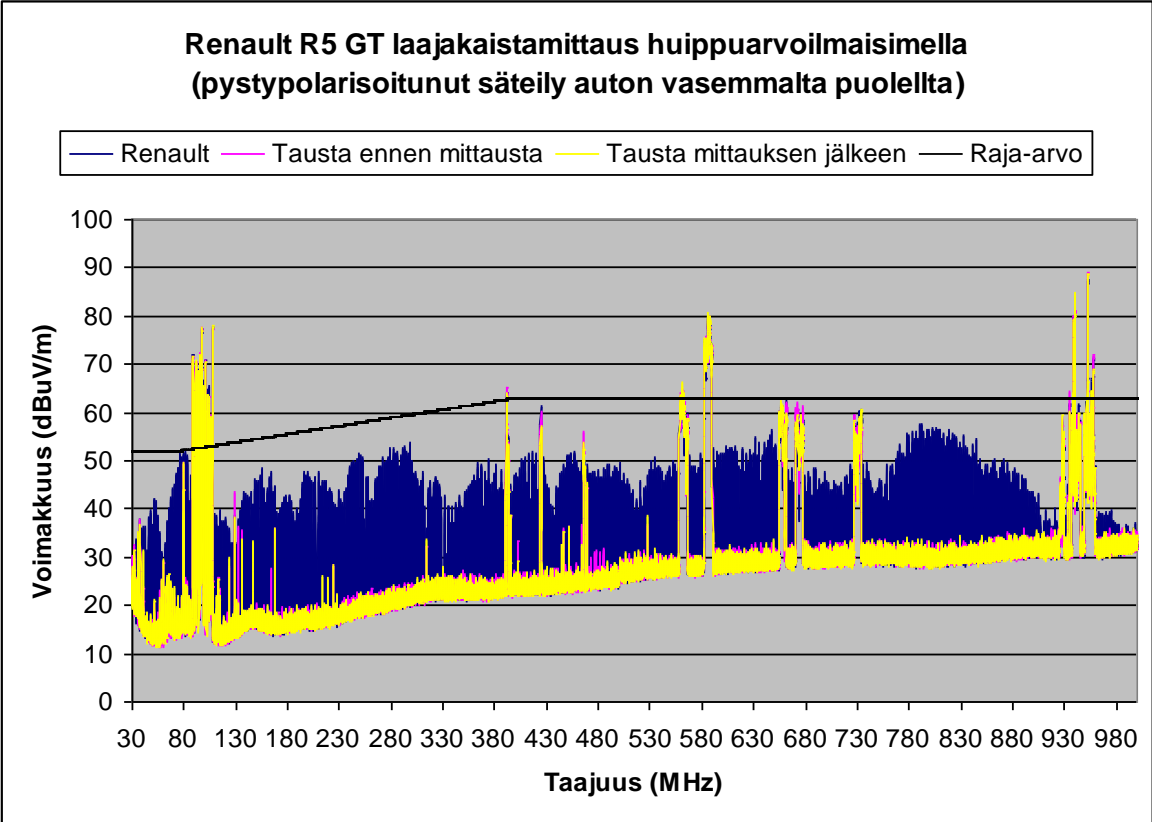


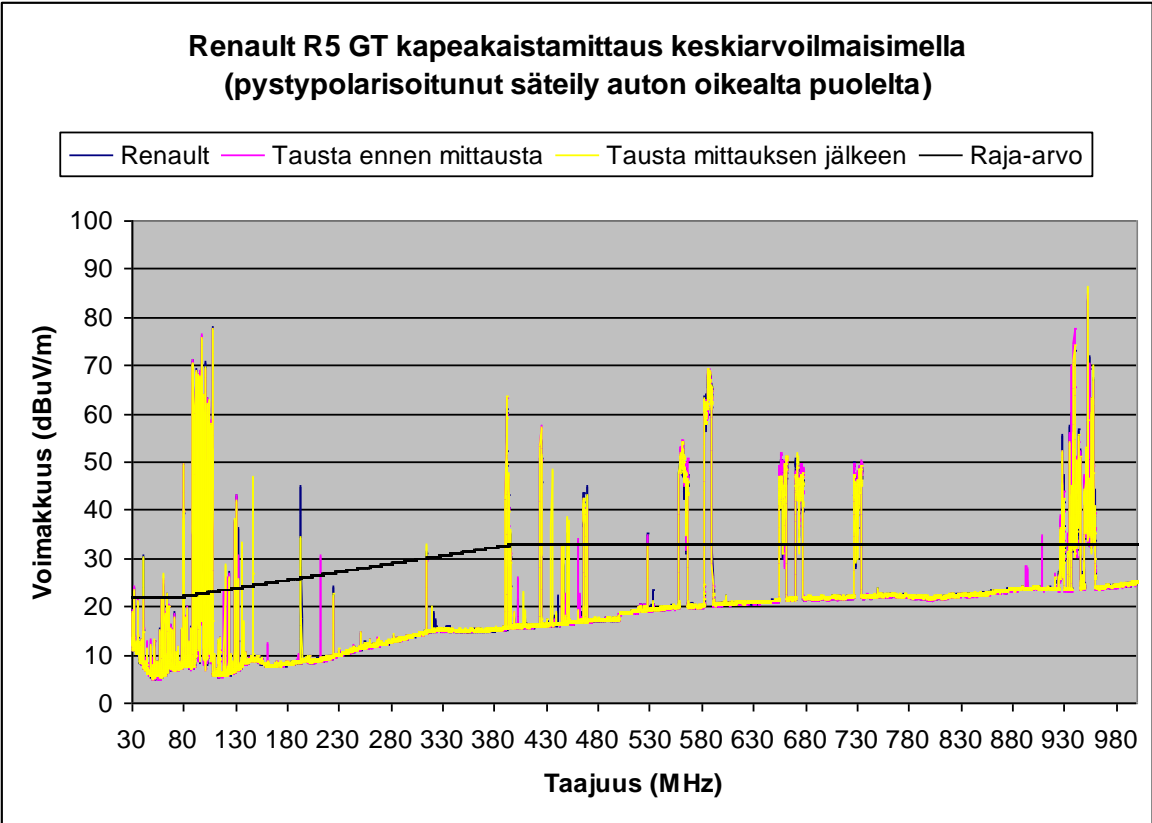
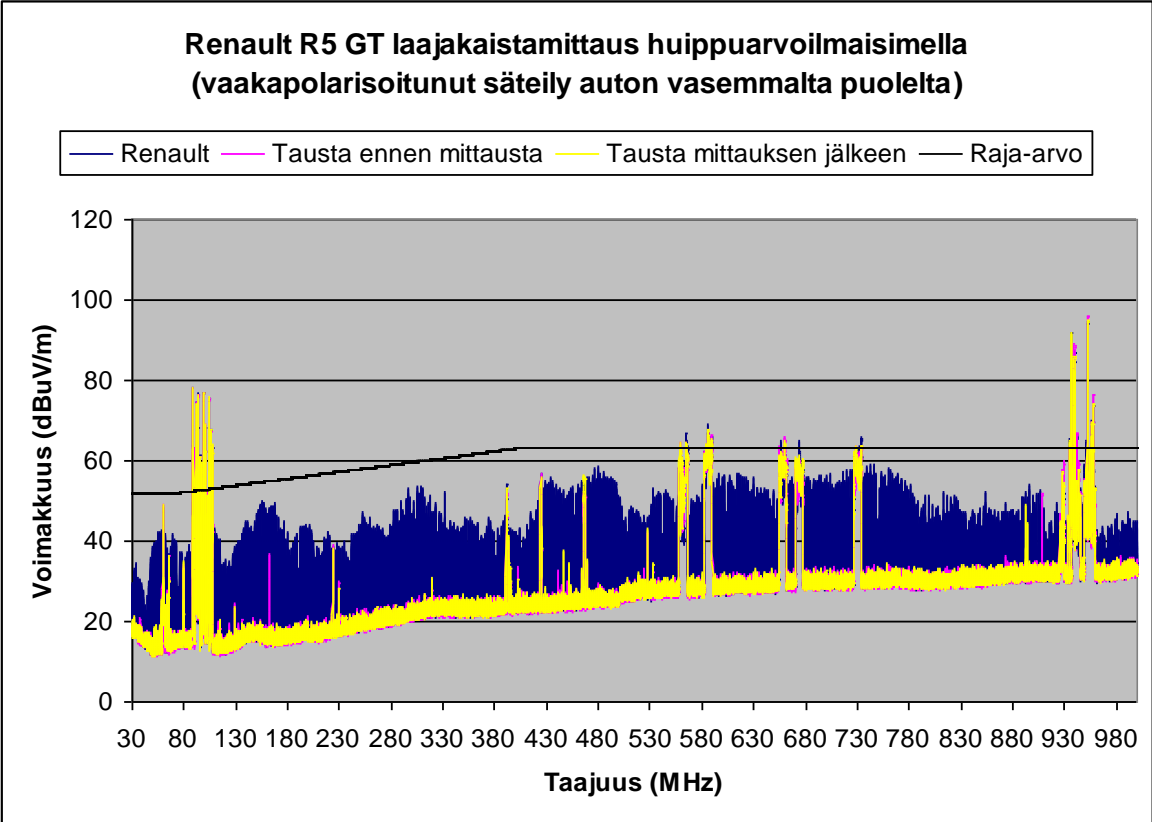


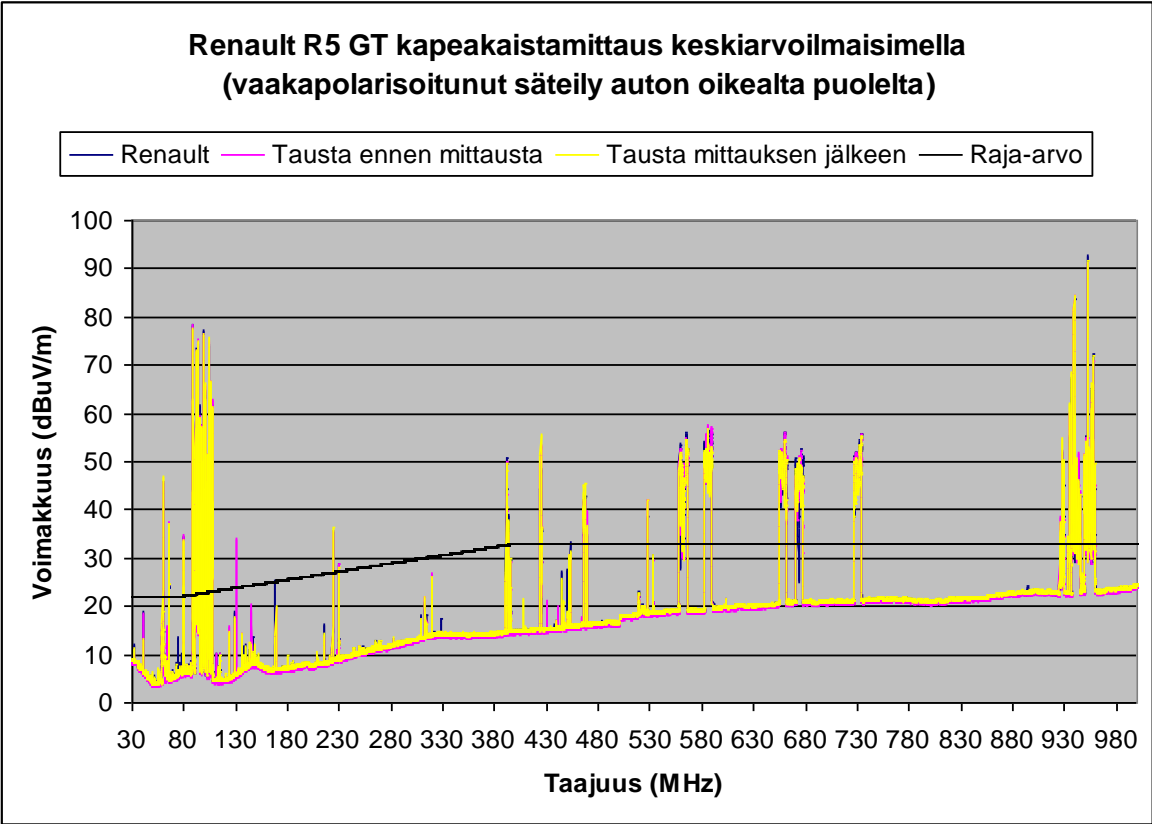
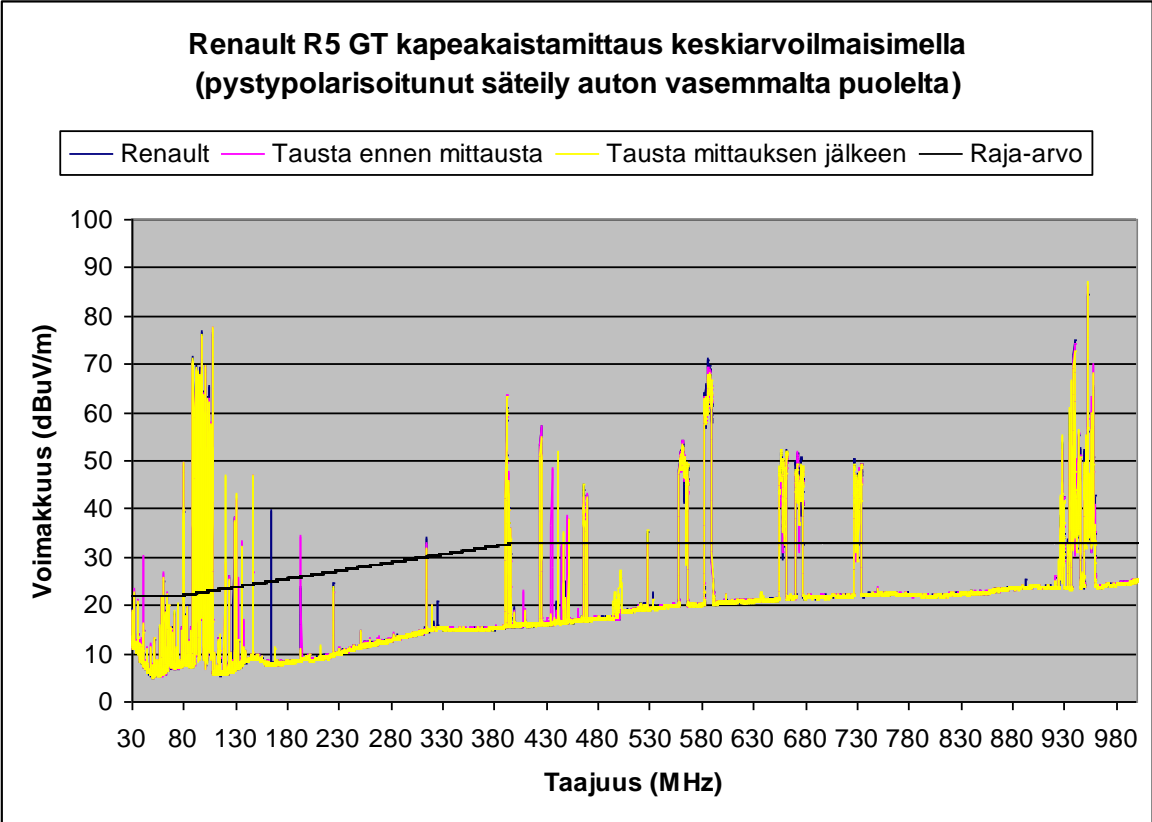


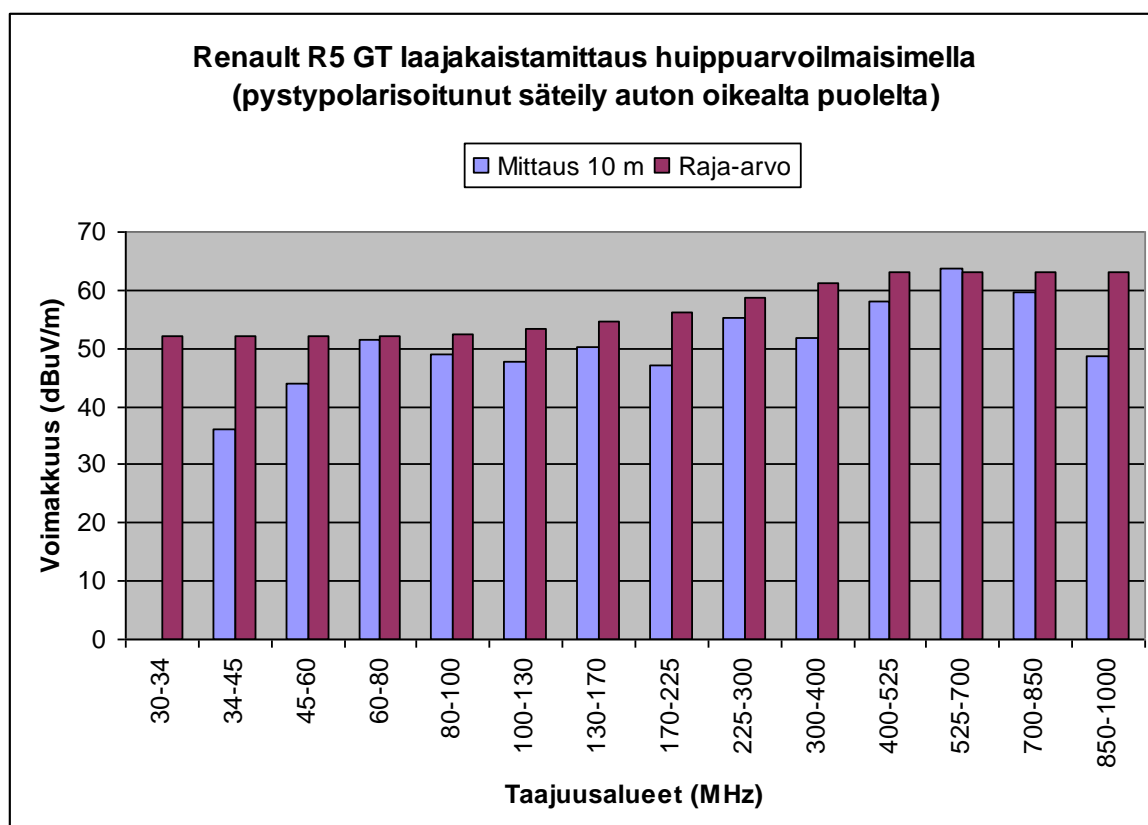
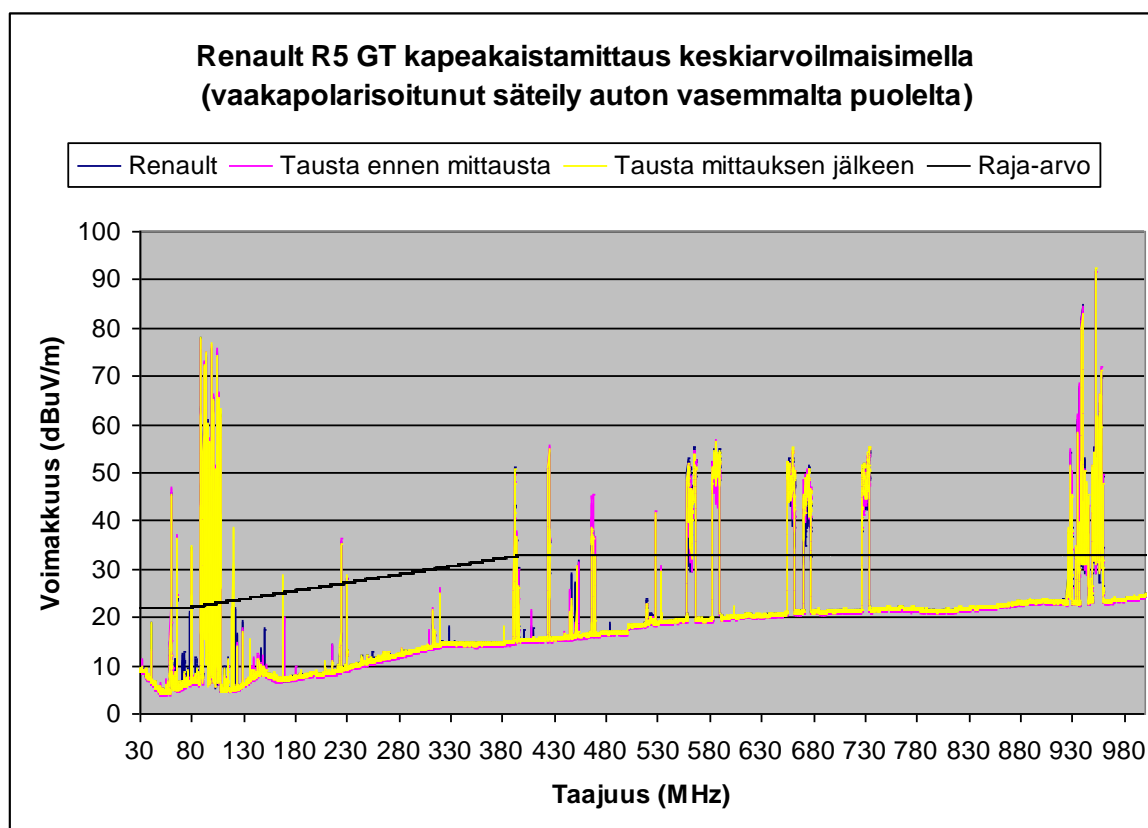


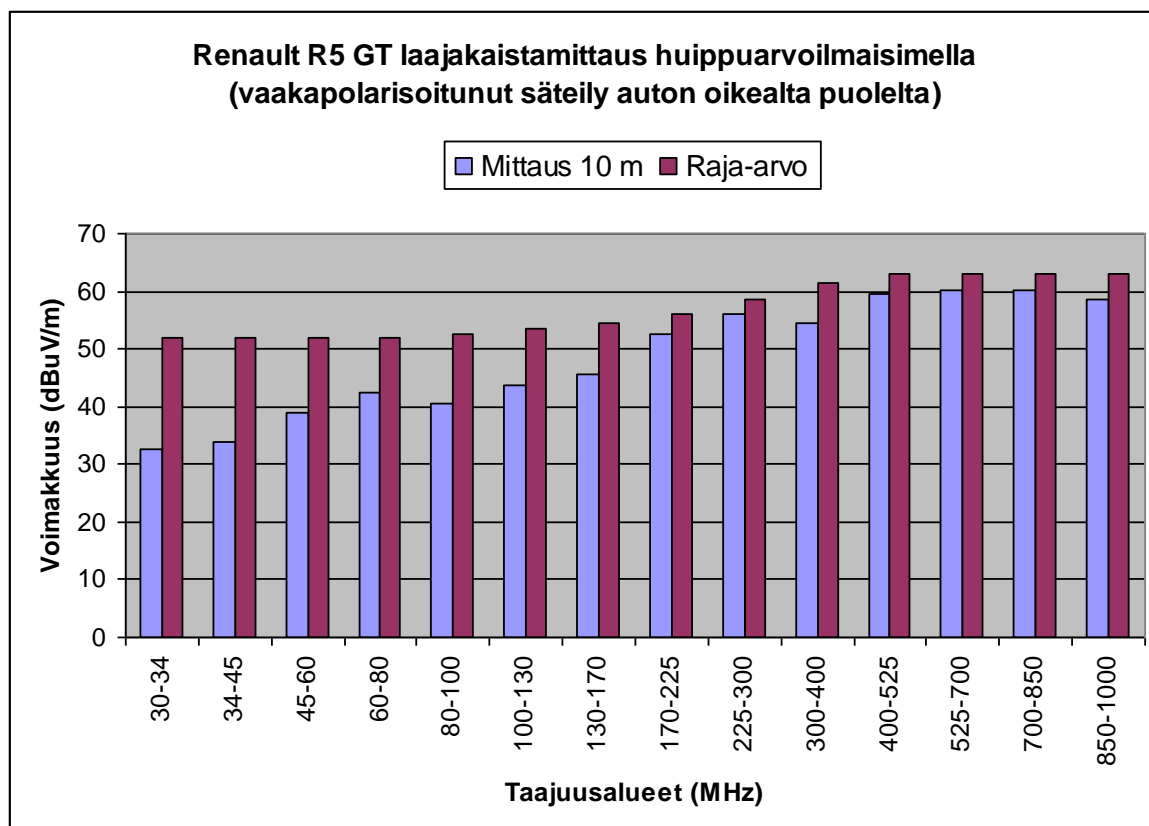
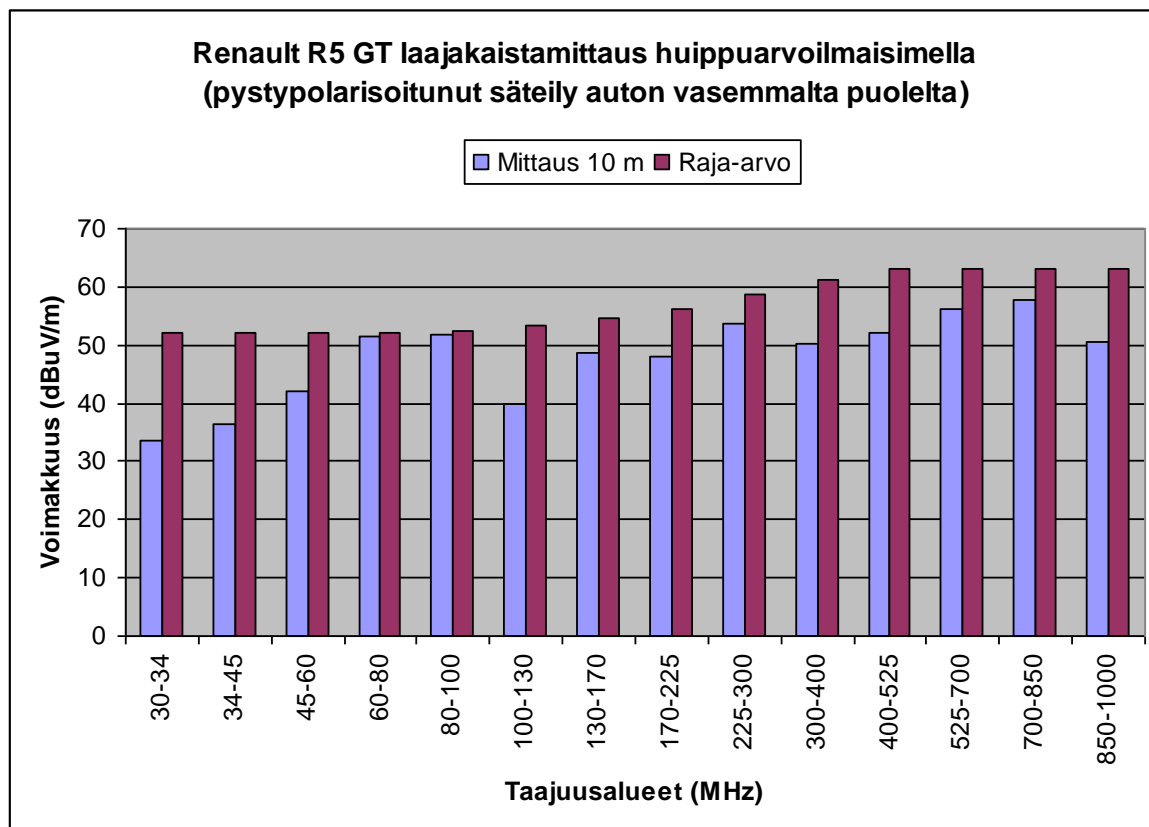


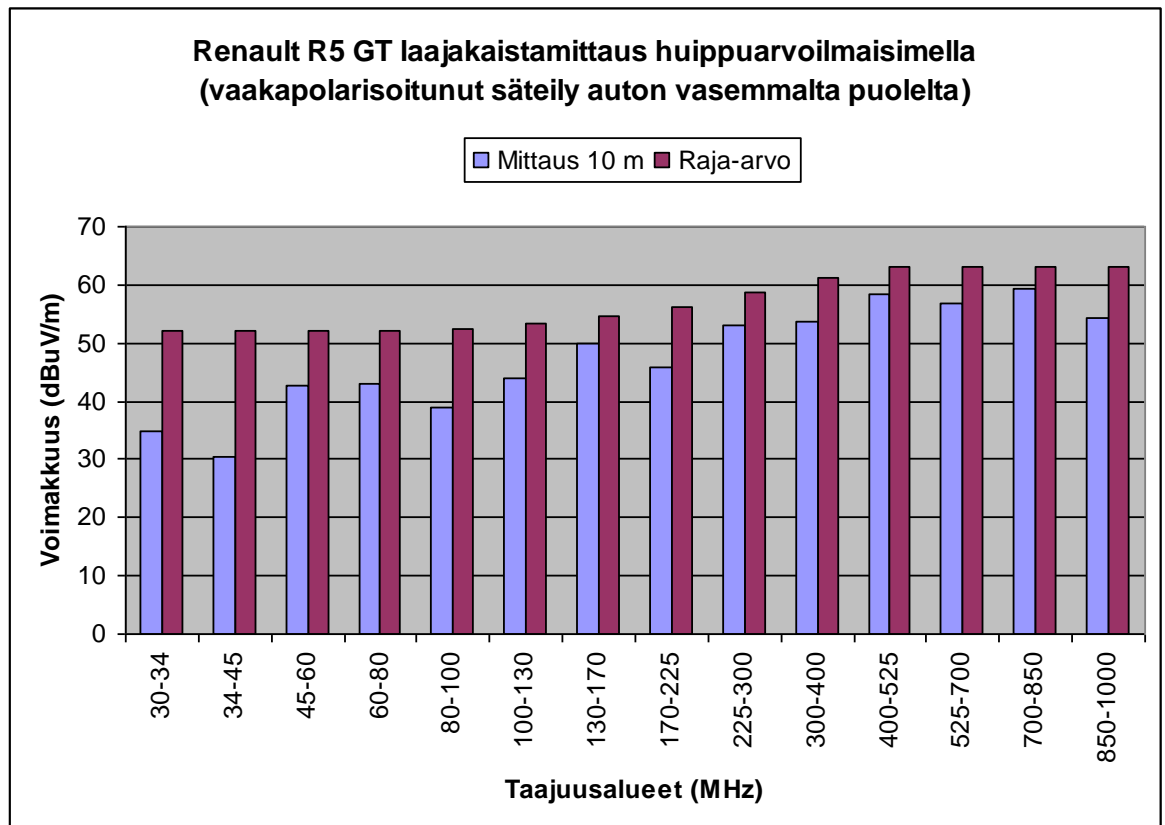












RAJA-ARVOT

