

7

RADIOTAAJUISTEN KENTTIEN JA SÄTEILYN VAIKUTUKSET

Jukka Juutilainen, Dariusz Leszczynski, Reetta Nylund,
Päivi Heikkinen, Maila Hietanen, Christian Haarala Björnberg,
Anssi Auvinen, Hannele Huuskonen, Tommi Toivonen

SISÄLLYSLUETTELO

7.1	Johdanto	262
7.2	Syöpä, eläinkokeet	264
7.3	Syöpävaaraa koskevat väestötutkimukset	268
7.4	Hermosto	281
7.5	Lisääntymisterveys	290
7.6	Radiotaajuisten kenttien biologisia vaikutuksia	291
7.7	RF-altistuskokeiden suunnittelun tekniset näkökohdat..	304

Ympäristössämme esiintyy runsaasti erilaisia suhteellisen matalatasoisia sähkö- ja magneettikenttiä taajuusalueella 100 kHz – 300 GHz. Kun kentän voimakkuus ei ylitä nykyisiä altistusrajoja, eivätkä kudokset lämpene merkittävästi, kyseessä on matalatasoinen RF-kenttä (Radio Frequency). Matalatasoisten RF-kenttien mahdollista biologista vaikutusmekanismia ei tunneta, joten vaikutuksen suuruutta kuvaavan annoksen käsitettä ei tällaisille kentille voida määritellä.

RF-kenttiä ja -säteilyä synnyttävä tekniikka on kehittynyt ja sen myötä kenttien ominaisuudet ovat muuttuneet. Tämä on asettanut uusia vaatimuksia altistumisen arvioinnille, sillä erilaisten lähteiden kuten tutkan ja matkapuhelimen synnyttämät kentät poikkeavat toisistaan. On kiinnostava kysymys, vaikuttaako RF-kentän taajuus, pulssimuoto ja spektri altistumiseen muutenkin kuin pelkän kudosten lämpenemisen perusteella voisi päätellä. Tässä luvussa käsitellään laajasti matalatasoisten RF-kenttien biologisia ja terveydellisiä vaikutuksia solutasolta väestötasolle. Valtaosa tutkimuksista painottuu alle 10 GHz taajuuksille. Taulukossa 7.1 on esimerkkejä radiotaajuisten kenttien lähteistä.

Radiotaajuisten kenttien biologisia vaikutuksia on tutkittu useissa eläin- ja solukokeissa. Solukokeissa on mahdollista tutkia useita sellaisia päätekohtia ja vaikutusmekanismeja, joiden tutkiminen eläin- tai ihmiskokeilla on huomattavasti vaikeampaa. Solututkimuksia arvioitaessa on kuitenkin muistettava, että solututkimusten tuloksia on vaikea soveltaa suoraan ihmiseen tai käytettyjen solujen isäntäorganismiin. Solutason tutkimuksia on tehty moneen eri biologiseen prosessiin liittyen. Joissakin tapauksissa on havaittu selkeitä vaikutuksia solussa. Vielä ei ole kuitenkaan selvillä, että näillä olisi jonkinlainen terveydellinen vaikutus. Näin ollen matalantason radiotaajuisilla kentillä ei oleteta olevan terveydellisiä vaikutuksia, vaikka solutasolla kentät mahdollisesti aiheuttavat joitakin muutoksia.

Eläimiä altistamalla on mahdollista saada tietoa tutkittavan tekijän vaikutuksista kokonaisen, monimutkaisemman, organismin tasolla. Jyrsijöillä tehdyillä pitkäaikaisilla altistuskokeilla on, epidemiologisten tutkimusten ohella, tärkeä merkitys mm. syöpäriskin arvioinnissa. Eläimiä on mahdollista altistaa tarkkaan kontrolloidussa ympäristössä, jolloin tutkittavan altisteen ja mahdollisen terveysvaikutuksen mahdollinen syy-seurausyhteys on helpompi havaita. Toisaalta tällainen tarkkaan kontrolloidussa ympäristössä tapahtuva altistuminen ei välttämättä kuvaa ihmisen al-

	Laite
Teollisuus ja työntekijät	Muovinsaamaajat, liimankuivaajat, mikroaaltokuivaimet, suuritehoinen antenni yleisradiomastossa, tutkalähetin
Kuluttajat	Matkapuhelimet, mikroaaltouunit, langaton tiedonsiirto, etätunnistuslaitteet ja kulunvalvontalaitteet
Sairaalat	MRI-kuvaukset, sähkökirurgiset laitteet, lyhytaaltohoito (UKW), hypertermiahoito

Taulukko 7.1 Radiotaajuisten yli 100 kHz kenttien lähteitä

tistumistilannetta, jolle tyypillistä on altistuminen usealle ympäristössä esiintyvälle tekijälle samanaikaisesti. Eläinkokeissa, eli toisessa lajissa melko suurilla altistustasoilla mutta suhteellisen pienillä yksilömäärillä, saatujen tulosten yleistettävyyys ja merkitys ihmisen terveystarvian kannalta on arvioitava aina huolellisesti.

Kokonaisuutena tähän mennessä julkaistut pitkäaikaiset eläinkokeet eivät tue sitä, että matalatasoisella radiotaajuisella säteilyllä olisi vaikutusta syövän kehittymiseen. Muutamissa yksittäisissä tutkimuksissa RF-altistuksen on kuitenkin raportoitu edistäneen syövän kehittymistä koe-eläimissä. Ainakin toistaiseksi nämä ovat olleet yksittäisiä havaintoja, joita muut tutkijaryhmät eivät ole pystyneet toistamaan. Useilla eläinlajeilla tehdyissä tutkimuksissa RF-kenttien ei ole myöskään havaittu aiheuttavan selviä kehitysbiologisia vaikutuksia.

Matkapuhelimet yleistyivät 1900-luvun viimeisen vuosikymmenen aikana erittäin voimakkaasti ja niistä aiheutuvan RF-kentän vaikutusta ihmisen kognitiivisiin ja muihin aivotointoihin on tutkittu jo aika paljon. Raportoidut tulokset ovat vaihtelevia ja löydettyjen tulosten toisintaminen on ollut vaikeaa. Tulosten vaihtelevuuden vuoksi mitään lopullista ei vielä voida sanoa RF-kenttien vaikutuksesta ihmisen aivojen sähköiseen toimintaan, kognitiivisiin toimintoihin tai subjektiivisiin tuntemuksiin.

Matkapuhelimen käyttäjien syöpävaara on tähän mennessä selvitetty 14 epidemiologisessa tutkimuksessa. Yhtä lukuun ottamatta tutkimukset ovat perustuneet tapaus-verrokkiasetelmaan ja useimmissa matkapuhelimen käyttöä koskevat tiedot on kerätty haastattelun avulla. Matkapuhelimen käyttäjillä ei yhdessäkään tutkimuksessa ole raportoitu selvästi suurentunutta aivokasvainvaaraa.

Jatkossa tarvitaan uusia tutkimuksia pitkäkestoisen käytön terveysvaikutuksista, riippumatta tähän mennessä tehtyjen tutkimusten tuloksista.

7.2 | Syöpä, eläinkokeet

Eläimillä tehdyillä karsinogeenisuuskokeilla on tärkeä merkitys syöpäriskin arvioinnissa silloin, kun epidemiologisia tutkimuksia ei ole riittävästi, tai ne ovat ristiriitaisia. Varhaisimmat radiotaajuuksilla tehdyt karsinogeenisuuskokeet keskittyivät mikroaaltouuneissa käytettävän 2,45 GHz taajuuden jatkuvan säteilyn (Continuous Wave, CW) tai pulssimaisen tutkasäteilyn (Pulsed Wave, PW) tutkimukseen taajuuksilla 1–10 GHz. Valtaosassa 1990-luvun puolivälin jälkeen julkaistuissa tutkimuksissa on eläimiä altistettu matkapuhelintyyppiselle säteilylle taajuuksilla 0,8–2 GHz. NMT-puhelimien säteily on jatkuvaa, kun taas GSM-puhelimet tuottavat lievästi pulssimaista säteilyä.

Spontaanit kasvaimet

Tähän mennessä julkaistujen tutkimusten valossa vaikuttaa siltä, ettei matalatasoinen RF-altistus edistäisi spontaanien eli käytetyissä eläinkannoissa luontaisesti esiintyvien kasvainten kehittymistä. Matalatasoinen altistuksesta voidaan puhua silloin, kun altistuksella ei ole lämpövaikutusta. Eräässä laajassa 90-luvun alussa julkaistussa tutkimuksessa, jossa rottia altistettiin 2,45 GHz pulssimaiselle radiotaajuiselle säteilylle, primaarien pahanlaatuisten kasvainten kokonaismäärän havaittiin kuitenkin olevan altistetussa ryhmässä lähes nelinkertainen verrattuna vertailuryhmään. Kokeessa käytetty koko kehon keskimääräinen ominaisabsorptionopeus, SAR_{ave} oli 0,15–0,4 W/kg. Koska selvää samansuuntaista vastetta ei ollut näkyvissä missään yksittäisessä syöpätyypissä, eikä eroa ollut myöskään ryhmien välisessä kuolleisuudessa, tutkijat kyseenalaistivat julkaisussaan tämän yksittäisen löydöksen biologisen merkityksen.

Neljä tutkijaryhmää on selvittänyt pulssimaisen ja jatkuvan matalatasoisen radiotaajuusaltistuksen vaikutusta spontaanien aivokasvainten kehittymiseen rotissa taajuusalueella 836–860 MHz. Altistusten ei havaittu edistävän kasvainten kehittymistä. Kahdessa näistä tutkimuksista tutkittiin aivojen lisäksi myös muita tärkeimpiä kudoksia, eikä altistuksen havaittu edistävän spontaanien kasvainten kehittymistä myöskään niissä.

Karsinogeenisuuskokeen perusasetelmassa eläimiä altistetaan ainoastaan tutkittavalle yhdisteelle tai tekijälle. Kokeen herkkyyttä havaita pieni ero vertailuryhmän ja altistetun ryhmän välillä tilastollisesti merkitsevästi

(tämä kuvaa kokeen voimaa) voidaan lisätä ryhmäkokoja kasvattamalla. Koska karsinogeenisuuskokeet ovat pitkäaikaisia, suurien ryhmäkokojen käyttäminen on sekä työlästä että kallista. Toisaalta on kyseenalaistettu se, kuinka eläinten altistaminen yhdelle tekijälle hyvin tarkkaan kontrolloidussa ympäristössä vastaa ihmisten altistumistilanteita. Ihmiset eivät altistu ainoastaan yhdelle yksittäiselle tekijälle, vaan useammalle ympäristössä esiintyvälle altisteelle samanaikaisesti. Siksi myös tekijä, joka ei ehkä yksinään johtaisi syövän kehittymiseen, saattaa pystyä vaikuttamaan karsinogeneesiin. Näistä syistä johtuen käytetään usein herkistettyjä eläinmalleja – eläimiä, jotka ovat esimerkiksi geneettisesti erityisen herkkiä syövän kehittymiselle, tai joissa syövän kehittyminen on saatettu alkuun eli indusoitu jollakin tunnetulla karsinogeenillä.

Geneettisesti herkäät eläimet

Geneettisesti herkillä eläimillä tehdyistä tutkimuksista on saanut paljon julkisuutta Australiassa transgeenisillä eli siirtogeenisillä lymfoomaherkillä hiirillä tehty, 90-luvun lopulla julkaistu tutkimus. Tässä tutkimuksessa lymfoomien ilmaantuvuuden eli insidenssin raportoitiin yli kaksinkertaistuneen siinä ryhmässä, joka altistettiin GSM-tyyppiselle 900 MHz radiotaajuiselle säteilylle (SAR_{ave} 0,13–1,4 W/kg). Löydöksen varmentamiseksi Australiassa suoritettiin toinen tutkimus, jossa RF-dosimetrian tarkentamiseksi muun muassa rajoitettiin eläinten liikkumista. Tässä tutkimuksessa radiotaajuisen säteilyn ei havaittu vaikuttavan lymfooman kehittymiseen silloinkaan, kun eläimiä altistettiin suurimmalla annosnopeudella (4 W/kg), kuin mitä oli käytetty aiemmassa kokeessa. Myöskään äskettäin julkaistun, toisenlaisella lymfoomaherkällä hiirikannalla tehdyn tutkimuksen tulokset eivät tukeneet australialaisen tutkimuksen havaintoa kohonneesta lymfoomariskistä.

Puolalainen Szmigielskin tutkijaryhmä raportoi 1980-luvun alussa havaintonsa, jossa maitorauhastuumoreiden kehittyminen lisääntyi maitorauhastuumoriherkissä hiirissä altistettaessa niitä RF-säteilylle. Neljä muuta viime vuosina julkaistua maitorauhastuumoriherkillä eläimillä tehtyä tutkimusta eivät ole tukeneet tätä havaintoa. Muutamia vuosia sitten julkaistussa Kuopion yliopiston, Kansanterveyslaitoksen, Kuopion yliopistollisen sairaalan, Tampereen yliopistollisen sairaalan ja Säteilyturvakeskuksen yhteistyönä tekemässä tutkimuksessa pulssimaisen (GSM-puhelimen) 902 MHz ja 849 MHz radiotaajuusaltistuksen (SAR_{ave} 0,5 W/kg) ei havaittu edistävän tilastollisesti merkittävästi ultraviolettisäteilyllä (UV-säteily) indusoitujen ihokasvainten kehittymistä ODC-geenin suhteen tran-

sgeeninisissä hiirissä eikä saman eläinkannan ei-transgeenisissä eläimissä. ODC- eli ornitiinidekarboksylaasigeeni säätelee eräitä solunjakautumisen kannalta keskeisiä solun toimintoja.

Promootiotutkimukset

Valtaosassa karsinogeenisuuskokeita, joissa eläimiä on altistettu tunnetulle fysikaalisille tai kemiallisille genotoksisille (DNA:ta vaurioitavalle) tekijälle, radiotaajuuden altistuksen ei ole havaittu edistävän kasvainten kehittymistä. Iho ja maitorauhanen ovat karsinogeenisuuskokeissa yleisesti käytettyjä kohde-elimiä, sillä näissä kudoksissa kasvainten ilmaantuminen voidaan tunnistaa jo varhain, ja näin on mahdollista arvioida myös tutkittavan tekijän vaikutusta kasvainten kehittymisnopeuteen.

Radiotaajuinen säteily, jonka taajuus oli 2,45 GHz ja SAR_{ave} 2–3 W/kg tai 6–8 W/kg, näytti Puolassa tehdyssä Szmigielskin ryhmän tutkimuksessa lisäävän pahanlaatuisten pintasolukasvainten (karsinoomien) kehittymistä kemiallisella karsinogeenilla (Benzo[*a*]pyreenillä) käsiteltyjen hiirten ihossa. Tämän tutkimuksen raportointia on kritisoitu muun muassa dosimetrian epätarkan kuvauksen takia. Kun ranskalaisten tekemässä tutkimuksessa tätä samaa kemikaalia ruiskutettiin rottien ihon alle, pulssimaisen 900 MHz radiotaajuuden säteilyyn, jonka annosnopeus oli selvästi puolalaisten tutkimuksessa käytettyä pienempi, ei havaittu lisäävän pahanlaatuisten ihon tukikudoskasvainten (sarkoomien) kehittymistä.

Ihon lämpötilaa selvästi kohottavan (termisen) jatkuvan 94 GHz RF-säteilytyksen tai matalampi tasoisen (ei-termisen) pulssimaisen 1,49 GHz RF-altistuksen ei havaittu vaikuttavan eräällä toisella tunnetulla kemiallisella karsinogeenilla (7,12-dimethylbenz[*a*]antraseeni eli DMBA) indusoitujen ihokasvainten kehittymiseen hiirissä. Radiotaajuuden säteilyyn tunkeutumissyvyys muuttuu kuitenkin taajuuden mukaan: 94 GHz taajuuksilla radiotaajuinen säteily tunkeutuu korkeintaan muutaman millimetrin syvyyteen kun taas 1,5 GHz taajuudella tunkeutumissyvyys on yli senttimetri. Pulssimaisen 900 MHz säteilyyn ei myöskään havaittu lisäävän tällä samalla karsinogeenilla indusoitujen maitorauhastuumoreiden kehittymistä rotissa, joskaan tähän liittyvien julkaisujen tulokset eivät ole täysin yksiselitteisiä.

Radiotaajuusaltistus, jonka taajuus oli 2,45 GHz ei vaikuttanut peräsuolisyövän ilmaantuvuuteen kemialliselle karsinogeenille (dimethylhydrat-

siinille) altistetuissa hiirissä, vaikka kokeessa käytetty annosnopeus oli poikkeuksellisen korkea (SAR_{ave} 10–12 W/kg).

Neljässä tutkimuksessa on kartoitettu radiotaajuussäteilyn vaikutuksia n-ethyl-nitrosourealla, ENU:lla indusoitujen aivokasvainten kehittymiseen. Missään näistä tutkimuksista ei radiotaajuusaltistuksella ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta kasvainten kehittymiseen.

Suomessa Kuopion yliopiston, Kansanterveyslaitoksen, Kuopion yliopistollisen sairaalan ja Säteilyturvakeskuksen yhteistyönä tekemässä tutkimuksessa RF-altistuksen ei havaittu vaikuttavan lymfooman tai leukemian kehittymiseen ionisoivalle säteilylle altistetuissa hiirissä. RF-altistuksen taajuus oli 902 MHz ja SAR_{ave} 1,5 W/kg altistettaessa jatkuvalla ja 0,35 W/kg altistettaessa GSM-tyyppiselle radiotaajuiselle säteilylle.

Osassa edellä mainituista tutkimuksista on tutkittu histopatologisesti muutakin tärkeitä kudoksia kuin eläinmallissa herkimmäksi arvioitu elin. Muutamia yksittäisiä poikkeusta lukuun ottamatta tilastollisesti merkitseviä eroja RF-altistetun ryhmän ja vertailuryhmän välillä ei ole ollut havaittavissa näissä muissakaan kudoksissa.

Syövän kehityksen viimevaihe

RF-altistuksen vaikutusta syövän kehityksen viimeisiin vaiheisiin on tutkittu siirtämällä eläimiin pahanlaatuisia (maligneja) tuumorisoluja. Puolalaisessa tutkimuksessa 1980-luvun alussa radiotaajuusaltistus, jonka taajuus oli 2,45 GHz ja SAR_{ave} 2-3 W/kg tai 6-8 W/kg, lisäsi keuhkoihin kehittyvien tuumoripesäkkeiden määrää hiirissä, joihin oli ruiskutettu sarkoomasoluja. Myöhemmissä tutkimuksissa, joissa oli käytetty aivokasvainsoluja ja melanoomasoluja, sekä pienempiä annosnopeuksia, radiotaajuusaltistuksen ei ole havaittu vaikuttavan kasvainsolujen lisääntymiseen.

Merkitys terveydelle

Kokonaisuutena tähän mennessä julkaistut pitkäaikaiset eläinkokeet eivät tue sitä, että matalatasoisella radiotaajuisella säteilyllä olisi vaikutusta syövän kehittymiseen. Muutamissa tutkimuksissa radiotaajuusaltistuksen on kuitenkin raportoitu edistäneen syövän kehittymistä koe-eläimissä. Ainakin toistaiseksi nämä ovat kuitenkin olleet yksittäisiä ha-

vainoja, joita ei ole pystytty varmentamaan toisten tutkijaryhmien toimesta. Käytetty radiotaajuusaltistusaso on ollut joissakin varhaisemmissa tutkimuksissa niin korkea, että se on saattanut nostaa lämpötilaa kudoksessa. Kohonneen lämpötilan on puolestaan raportoitu joissakin tutkimuksissa vaikuttaneen syövän kehittymiseen. Siksi on todennäköistä, etteivät suurilla annosnopeuksilla tehdyt eläinkokeet ole suoraan käyttökelpoisia arvioitaessa matalampiin radiotaajuusaltistusasoihin liittyvää syöpäriskiä. Useita matalaan radiotaajuusaltistustasoon liittyvän syöpäriskin arviointiin tähtääviä karsinogeenisuuskokeita on parhaillaan meneillään eri puolilla maailmaa muun muassa Euroopassa EU:n viidennen puiteohjelman rahoittamana.

7.3 | Syöpävaaraa koskevat väestötutkimukset

Radiotaajuisten sähkömagneettisten kenttien terveysvaikutusten selvittäminen edellyttää mahdollisuutta

- identifioida suuria väestöryhmiä joilla on erilainen altistushistoria eli vertailtavien ryhmien muodostaminen,
- kerätä näiden ryhmien RF-altistumista koskevia tietoja eli altistuskontrastin muodostaminen ja
- sairaustietojen saamista tutkimukseen valituille ryhmille eli vastetahtuma.

Näiden tietojen pitäisi olla vertailukelpoisia eri altistusryhmissä sekä sairastuneilla ja terveillä. Lisäksi tarvitaan tietoja muista sairastumiseen vaikuttavista, mahdollisesti sekoittavista tekijöistä.

Radiotaajuisten kenttien terveysvaikutusten selvittämisessä suurin vaikeus on ollut altistumistietojen kerääminen. Tähän vaikuttavat useat tekijät. Ensinnäkään ympäristön heikkojen radiotaajuisten kenttien mahdollista biologista vaikutusmekanismia ei tunneta, joten vaikutuksen suuruutta kuvaavan annoksen käsitettä ei ole. Toiseksi väestötutkimuksessa käytettäväksi soveltuvaa henkilökohtaista dosimetriaa ei ole kehitetty tarpeeksi. Kolmanneksi RF-kenttiä aiheuttava tekniikka on kehittynyt ja sen myötä kenttien ominaisuudet ovat muuttuneet, mikä on asettanut uusia vaatimuksia altistumisen arvioinnille. Lisäksi eri lähteiden kuten esimerkiksi tutkien, matkapuhelimien ja tukiasemien synnyttämät RF-kentät poikkeavat toisistaan.

Epidemiologisissa tutkimuksissa on käytetty varsin karkeita altistumismittareita, jotka kuvaavat usein enemmän altistumismahdollisuutta kuin toteutunutta altistumista. Ne antavat yleensä laadullista tai korkeintaan

semikvantitatiivista tietoa RF-altistumisesta, eivätkä yleensä ole riittävän yksityiskohtaisia määrälliseen arviointiin.

Matkapuhelinliittymän omistus kertoo, että sen haltijalla on vastuu liittymästä. Se on mahdollisesti hänen käytössään, mutta se saattaa olla myös alaikäisen lapsen käytössä. Toisaalta ihmisellä voi olla käytössään matkapuhelin ilman, että hänen nimissään olisi liittymää, jos puhelin on esimerkiksi työnantajan omistuksessa. Näin ollen liittymän omistaminen ei ole kovin herkkä (sensiitivinen) matkapuhelimen käytön osoittaja, koska sen avulla löydetään vain osa matkapuhelimen käyttäjistä. Toisaalta se ei myöskään ole kovin tarkka (spesifinen) menetelmä matkapuhelimen käytön arvioinnissa, sillä osa liittymän haltijoista ei itse käytä puhelinta. Vastaavasti ammattinimike tai työskentely-ympäristö on myös varsin epäsuora ammatillisen altistumisen mittari, joka kuvaa altistumismahdollisuutta tai ryhmätason keskimääräistä altistumista.

Käytettyjen karkeiden mittareiden etuja ovat toisaalta tietojen saatavuus ja vakaus (robustness), eli ne kuvaavat useita altistumisen aspekteja ja saattavat siten olla käyttökelpoisia nykyisessä tilanteessa, jossa emme vielä tiedä mitä kentän ominaisuutta altistusarvioinnissa pitäisi mitata.

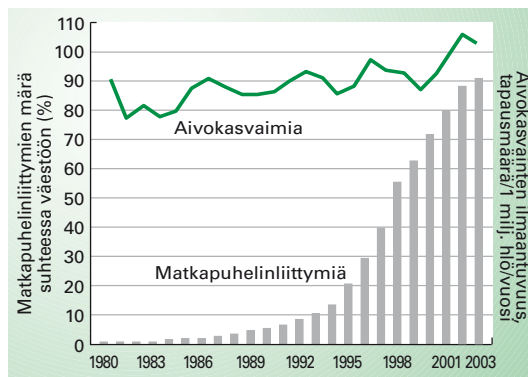
Karkeiden suureiden vaihtoehtona on mitata RF-kentästä kudokseen siirtyneen energian määrää (specific absorption rate, SAR). Se on lähimpänä ionisoivan säteilyn annoksen käsitettä (katso luku 2, 10 ja 11). Sen arviointi väestötutkimuksissa on kuitenkin hyvin työlästä, koska se vaatii yksityiskohtaisia tietoja sekä kentän lähteestä ja ominaisuuksista. Näiden hankkiminen jälkikäteen on usein äärimmäisen vaikeaa tai jopa mahdotonta. Esimerkiksi matkapuhelimen aiheuttaman SAR-arvon arviointi edellyttäisi tietoja puheluiden keston lisäksi tietoa puhelimen tyypistä, sekä tarkasta paikasta ja asennosta pään vierellä, hands free -laitteiden käytöstä sekä puhelimen käyttämästä lähetystehosta. Lähetystehoon vaikuttavia tekijöitä ovat puhelussa käytetyn tukiaseman etäisyys ja verkon muut ominaisuudet, katso luvut 9 ja 10.

RF-kenttien terveysvaikutusten selvittämisen kannalta ihanteellista olisi suuren väestön altistuksen reaaliaikainen seuranta tai toistuvat mittaukset. Käytännössä tällainen on kuitenkin hyvin vaativaa ja kallista. Pienille henkilömäärille tällaista arviointia on käytetty kansainvälisen INTERPHONE-tutkimuksen validaatio-osuudessa eli tutkimusmenetelmien varmentamisessa, jossa vapaaehtoiset käyttivät erikoisvalmisteisia matkapuhelimia, joihin kirjautui tieto kaikista soitetuista puhelusta mukaan lukien niiden kesto ja käytetty lähetysteho.

Karkean riskinarvioinnin apuna voi erittäin yleisen tekijän, kuten matkapuhelinten, vaikutusta arvioida väestötasolla selvittämällä muutoksia syöväen esiintyvyydessä suhteessa altistuksen muutoksiin. Matkapuhelinten käyttö on yleistynyt erittäin nopeasti 1990-luvulla ja liittymien määrä Suomessa oli vuonna 2002 jo 86 prosenttia väestön määrästä. Kuitenkaan aivokasvainten ilmaantuvuus ei ole 1980-luvun jälkeen suurentunut Suomessa, katso kuva 7.1.

Uuseimmissä tapaus-verrokkitutkimuksissa altistumista koskevat tiedot on kerätty tutkittavien henkilöiden haastattelulla. Näin saadaan yksityiskohdasta tietoa monesta RF-kentän voimakkuuteen vaikuttavasta seikasta. Toisaalta kerätyt tiedot ovat riippuvaisia haastateltavan muistista ja arviointikyvystä. Lisäksi haastattelun käyttöön liittyy valikoitumisharhan ja muistiharhan mahdollisuus (katso kirja 4, Säteilyn terveysvaikutukset, luku 6). Yleensä sairastuneet ja paljon altistuneet ovat halukkaampia osallistumaan tutkimuksiin kuin muut. Tämä voi vääristää tuloksia, tyypillisesti siten että vaikutusta yliarvioidaan. Tutkimuksen osallistumiseen vaikuttavat myös henkilön ikä, sukupuoli, koulutus ja asuinpaikka. Jos nämä tekijät liittyvät sekä tutkittavaan altistukseen että sairauden esiintymiseen, tulokset voivat vääristyä.

Syöväen kehittyminen on pitkä prosessi (kirja 4, Säteilyn terveysvaikutukset, kappale 5.1). Alkuvaiheessa (initiaatio) tärkeimmiksi tapahtumiksi



Kuva 7.1 Matkapuhelimien määrä ja aivokasvainten ilmaantuvuus Suomessa 1980–2003

Matkapuhelinliittymien määrä suhteessa väestöön (%), tummat pylväät) ja aivokasvainten ilmaantuvuus (tapausmäärä/1 miljoonaa henkilöä/vuosi) Suomessa 1980–2003. Tietolähteinä ovat liikenne- ja viestintäministeriö sekä Suomen Syöpärekisteri.

ajatellaan mutaatiot, joiden syntymisestä vaikutuksen ilmenemiseen syöpänä saattaa kestää vuosia tai vuosikymmeniä. Klassinen esimerkki tällaisesta vaikutustavasta ovat DNA-vaurioita aiheuttavat kemialliset karsinogeenit. Kasvaimen kehittyessä yksittäinen solu jakautuu ja sen tytärsolujen määrä lisääntyy (promootio), kunnes kasvain on makroskooppisesti havaittavissa ja se aiheuttaa oireita (progressio). Syövän kehityksen myöhempiin vaiheisiin kohdistuva vaikutus ilmenee varhaisvaikutusta nopeammin, mutta voi silti kestää useita vuosia. Tästä esimerkkinä ovat hormonit, jotka vaikuttavat solujen jakautumiseen (proliferaatioon), mutta eivät aiheuta mutaatioita. Radiotaajuisten kenttien energia ei riitä aiheuttamaan DNA-vauriota ainakaan suoralla mekanismilla. Tämän perusteella niiden mahdollisen vaikutuksen ajatellaan perustuvan syövän kehityksen myöhempään vaiheeseen (promootio tai progressio).

Matkapuhelimet ja syöpä

Matkapuhelinten käyttö on yleistynyt voimakkaasti useimmissa maissa vasta 1990-luvulla. Yli kymmenen vuotta matkapuhelinta käyttäneiden määrä on siis toistaiseksi ollut varsin pieni. Tämän vuoksi julkaistuissa tutkimuksissa on voitu periaatteessakin saada tietoa vain promootioon perustuvasta, alle kymmenen vuoden latenssin jälkeen ilmenevistä terveysvaikutuksista. Tämän vuoksi jatkossa tarvitaan uusia tutkimuksia pitkäkestoisen käytön terveysvaikutuksista riippumatta tähän mennessä tehtyjen tutkimusten tuloksista.

Matkapuhelimen käytön yhteyttä syöpävaaraan on selvitetty useissa tutkimuksissa 1990-luvun lopulta alkaen ja uutta tutkimustietoa aiheesta tulee jatkuvasti. Laajoja tapaus-verrokkitutkimuksia on tehty Yhdysvalloissa, Ruotsissa, Tanskassa ja Suomessa, katso taulukko 7.2.

Matkapuhelimen käytön ja syövän yhteyttä selvittäneissä epidemiologisissa tutkimuksissa altistumisen arviointiin on käytetty kahta lähestymistapaa: joissain tutkimuksissa puhelimen käyttöä koskevat tiedot on saatu tutkimushenkilöä haastattelemalla, toisissa taas verkkoa ylläpitävältä puhelinyhtiöltä. Molemmissa lähestymistavoissa on sekä heikkouksia että vahvuuksia.

Haastattelu antaa kohtuullisen luotettavaa tietoa puhelimen käytöstä. Eri tutkimuksissa korrelaatio itse arvioidun ja matkapuhelinoperaattorin antamien tietojen välillä on ollut 0,4–0,7. Hyvin yleisesti omaa matkapu-

helimen käyttömäärää on yliarvioitu 50–100 prosenttia. Suurin käyttäjistä on ilmoittanut käyttävänsä puhelinta useimmiten samalla puolella, mutta käytetty puoli ei liittynyt selvästi oikea- tai vasenkätisyyteen.

Tanskassa ja Yhdysvalloissa tehdyissä kohorttitutkimuksissa ja Suomessa tehdyssä tapaus-verrokkitutkimuksessa puhelutiedot on saatu verkko-operaattorilta. Tiedot ovat kattaneet liittymätyypin sekä liittymän avaus- ja sulkupäivän. Joissain tutkimuksissa on saatu myös yksityiskohteisempaa tietoa soitettujen, tai soitettujen ja vastaanotettujen, puheluiden yhteenlasketusta määrästä ja kestosta. Nämä rekisteritiedot ovat tarkkoja, sillä ne on kerätty etenevästi eivätkä ne perustu henkilön omaan arvioon. Toisaalta ne kyetään liittämään vain liittymän haltijaan, joka ei välttämättä ole puhelimen käyttäjä. Erityisen ongelmallista tämä on työpuhelimien kannalta. Tämä lähestymistapa ei myöskään mahdollista yksityiskohtaisten tietojen saamista kuten tietoa puhelimen asennosta ja lisälaitteiden käytöstä. Matkapuhelinten osalta lisävaikeutena on myös tietosuoja, joka on useissa maissa erityisen tarkasti säädelty puhelinten osalta.

Yhdysvalloissa on tutkittu tietyissä sairaaloissa hoidettuja aivokasvainpotilaita ja verrokeiksi valittiin samoissa sairaaloissa muista syistä hoidettuja potilaita. Potilasmäärä eri tutkimuksissa on ollut 500–800, kuulohieron hyvänlaatuisia kasvaimia (neurinooma) koskevassa tutkimuksessa 90. Sekä matkapuhelimen käyttöä että muita mahdollisesti aivokasvain-ten syntymiseen vaikuttavia tekijöitä koskevat tiedot on saatu haastattelulla. Matkapuhelimen käyttäjiä on ollut 15–30 prosenttia tutkimushenkilöistä ja puhelinta on käytetty tyypillisesti 1–4 vuotta. Puhelimita suuri osa on ollut analogisia AMPS-standardin puhelimia. Tutkimusten tulokset ovat olleet varsin yhdenmukaisia eikä niissä ole havaittu selvää yhteyttä matkapuhelimen käytön ja aivokasvain-ten synnyn välillä. Mikään puhelimen käyttöön liittyvä ominaisuus kuten kauanko matkapuhelin oli ollut tutkittavalla käytössään, puheluiden tiheys tai puheluiden kesto ei ole ollut yhteydessä aivokasvaimiin. Myöskään aivokasvaimen tyyppi tai sijainti toisin sanoen se, onko kasvain samalla puolella päätä, missä henkilö on yleensä puhelinta pitänyt, ei ole liittynyt puhelimen käyttöön.

Näiden tutkimusten vahvuutena on ollut kattavien tietojen kerääminen pian sairauden toteamisen jälkeen. Tapaus-verrokkitutkimuksessa haastattelutietoihin liittyy aina muistiharhan mahdollisuus eli sairastuneet raportoivat usein altistuksensa kattavammin kuin verrokkit. Tämä saattaa aiheuttaa vääriä positiivisia tuloksia eli synnyttää näennäisen yhteyden

tutkittavan tekijän ja sairauden välillä tai suurentaa todellista vaikutusta. Negatiivisen tuloksen tulkintaa sen ei kuitenkaan katsota vaikeuttavan. Tapaus-verrokkitutkimuksessa verrokkit kuvaavat altistusta siinä väestössä, josta sairastuneet tapaukset ovat peräisin. Sairaalapohjaisessa tutkimuksessa väestöpohjan täsmällinen määrittely on usein vaikeaa. Yksi mahdollinen virhelähde on siinä ovatko tutkittavan sairauden ja vertailuryhmän sairauksien potilaat peräisin samasta väestöstä eli ohjataanko potilaat eri diagnooseilla samaan sairaalaan. Jos jokin sairaala on keskittynyt esimerkiksi syöpäsairauksien hoitoon, voivat syöpäpotilaat tulla sinne laajemmasta väestöstä kuin muiden sairauksien vuoksi hoitoon haikutuvat potilaat. Jos kahden eri sairauden vastuuväestöt poikkeavat toisistaan matkapuhelimen käytön suhteen, tämä voi vääristää tuloksia joko suurentaen tai pienentäen todellista vaikutusta.

Ruotsissa on tehty kaksi tapaus-verrokkitutkimusta, joiden tulokset on julkaistu useana eri raporttina. Molemmat tutkimukset olivat väestöpohjaisia eli syöpätapaukset on identifioitu sairaalan sijaan tietyn alueen koko väestön kattavasta syöpärekisteristä. Ensimmäisen tutkimuksen aineisto koostui 209 tapauksesta ja 425 verrokista sekä toisen 588 tapauksesta ja 581 verrokista. Verrokkit oli poimittu väestörekisteristä, mutta heidän osallistumisastettaan ei ole raportoitu. Matkapuhelimen käyttöä ja muita mahdollisesti aivokasvainten vaaran vaikuttavia tekijöitä koskevat tiedot kerättiin haastatteluilla. Matkapuhelimen käyttäjiä oli 37–50 prosenttia tutkimushenkilöistä. Matkapuhelimista suurin osa oli digitaalisen GSM-järjestelmän puhelimia. Tutkimushenkilöt olivat käyttäneet matkapuhelinta 4–7 vuotta ja puhe-aika oli ollut 64–136 tuntia (mediaani).

Ensimmäisen tutkimuksen tulosten mukaan kaiken kaikkiaan tapaukset eivät olleet käyttäneet matkapuhelimia verrokkeja enempää, mutta he olivat pitäneet useammin puhelinta sillä puolella päätä, missä kasvain todettiin. Vastaavasti pään vastakkaisella puolella raportoitiin itse asiassa alentunut riski, mikä viittaa siihen että muistiharha on vaikuttanut tuloksiin. Matkapuhelimeen puhuttu aika ei liittynyt kasvaimen syntyyn. Toisessa tutkimuksessa matkapuhelimen käyttäjillä ei ollut muita suurempaa todennäköisyyttä saada aivokasvainta. Analogisten NMT-puhelimen käyttö oli kuitenkin sairastuneilla hieman yleisempää kuin verrokeilla, erityisesti puhelimen pitäminen samalla puolella päätä jossa kasvain todettiin. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan raportoitu matkapuhelimen puhuttua aikaa tai sen yhteyttä aivokasvainten esiintyvyyteen. Eri kasvaintyypeistä löydös liittyi lähinnä kuulohieron hyvänlaatuisiin

kasvaimiin. Tutkimuksessa raportoitiin suurentuneen aivokasvainten riskin liittyvän myös langattomien puhelimien käyttöön. Löydös on yllättävä, sillä radiotaajuisille kentille altistutaan vain digitaalisia DECT-puhelimia käytettäessä ja silloinkin kentät ovat huomattavasti matkapuhelimia heikompia.

Tutkimusten suurimpana ongelmana on ollut se, että tapaukset on haastateltu vasta jälkikäteen. Kasvaimen toteamisen ja haastattelun välillä kuluutta aikaa ei ole raportoitu, mutta se on voinut olla jopa useita vuosia. Näin ollen mukaan on otettu vain hengissä olleita potilaita, mutta ei nopeasti tautiinsa menehtyneitä. Kaikilta ei saatu myöskään kerättyä kyselytietoja, joten ensimmäisen tutkimuksen tapauksista jäi aineistosta pois yli puolet ja toisessa tutkimuksessa kolmannes.

Suomessa tehdyssä tapaus-verrokkitutkimuksessa aivokasvaimiin vuonna 1996 sairastuneet 398 tapausta identifioitiin syöpärekisteristä ja verrokkit väestörekisteristä. Matkapuhelimen käyttöä koskevat tiedot saatiin matkapuhelinverkkoja ylläpitäviltä teleyhtiöiltä. Lisäksi saatiin aiempaa sädehoitoa koskevat tiedot Syöpärekisteristä sekä ammattia ja asuinpaikkaa koskevat tiedot Tilastokeskuksesta. Hieman yli 10 prosentilla tutkitavista henkilöistä oli ollut matkapuhelinliittymä, useammin analoginen kuin digitaalinen. Kaiken kaikkiaan matkapuhelimen käyttö ei liittynyt selvästi aivokasvainten syntyyn. Analogiset NMT-puhelinliittymät olivat yleisempiä glioomapotilailla kuin verrokeilla, mutta vastaavaa yhteyttä ei havaittu GSM-puhelinten tai meningioomien osalta. Tutkimuksen suurin puute oli matkapuhelimen käyttöä koskevien yksityiskohtaisten tietojen puute ja työnantajan nimissä olevista liittymistä ei saatu lainkaan tietoja.

Matkapuhelinten käytön yhteyttä syöpävaaraan on selvitetty kohorttitutkimuksilla Yhdysvalloissa ja Tanskassa. Yhdysvalloissa tehdyssä tutkimuksessa selvitettiin lähes 300 000 matkapuhelimen käyttäjien kuolinsyitä yhden vuoden ajalta. Tutkimuksessa ei kyetty tekemään mielekkäitä vertailuja, koska niiden henkilöiden joukossa, joiden katsottiin altistuneen matkapuhelimen (kädessä pidettävän puhelimen käyttäjät) aiheuttamalle radiotaajuiselle kentälle, havaittiin vain kaksi aivokasvainta ja neljä leukemiaa. Tanskassa tehdyssä seurantatutkimuksessa yli 400 000 matkapuhelimen käyttäjän joukossa keskimäärin kolmen vuoden seurannan aikana ei havaittu enempää aivokasvaimia, sylkirauhassyöpiä tai leukemioita kuin muussa väestössä. Lisäriskiä ei havaittu minkään hermostokasvaintyyppin osalta (gliooma, meningiooma, kuulohermon kasvaimet). Tutkimuksen puutteita olivat lyhyt seuranta ja työnantajan omistamia puhelimia koskevien tietojen puuttuminen. Myöskään matkapuhelimen käyt-

töä koskevia yksityiskohtaisia tietoja ei ollut saatavilla. Puhelimista hie-
man yli puolet oli digitaalisia GSM-puhelimia.

Matkapuhelimen käyttäjillä ei yhdessäkään tutkimuksessa ole raportoitu
selvästi suurentunutta aivokasvainvaaraa, taulukko 7.2. Kuudessa tutki-
muksessa ei havaittu, että pahanlaatuisilla kasvaimilla (gliooma) olisi
ollut yhteyttä matkapuhelimen käyttöön, ja yhdessä saatiin viite suuren-

Viite	Tiedonkeruu	Kasvaintyyppi	Altistuneita tapauksia	OR (kaikki)	OR (gsm)	OR (sama puoli)
Hardell 1999	Kysely	Gliooma	53	1,0	-	-
		Meningeooma	16	1,1	-	-
		Kuulohermo	5	0,8	-	-
Muscat 2000	Haastattelu	Gliooma	66	0,7	-	1,7
Inskip 2001	Haastattelu	Gliooma	201	1,0	-	0,9
		Meningeooma	67	0,8	-	0,9
		Kuulohermo	40	0,8	-	0,9
Johansen 2001	Puhelinyhtiö	Gliooma	66	0,9	-	-
		Meningeooma	16	0,9	-	-
		Kuulohermo	7	0,6	-	-
Auvinen 2002	Puhelinyhtiö	Gliooma	32	1,5	1,0	-
		Meningeooma	10	1,1	0,7	-
Muscat 2002	Haastattelu	Kuulohermo	18	0,9	-	0,9
Hardell 2002	Kysely	Gliooma	80	1,1	1,1	1,6
		Meningeooma	78	-	0,8	-
Christensen -04	Haastattelu	Kuulohermo	45	0,9	1,1	0,7
Lönn 2004	Haastattelu	Kuulohermo	89	1,0	0,9	1,1
Christensen -05	Haastattelu	Gliooma	106	0,7	-	-
		Meningeooma	67	0,8	-	-
Lönn 2005	Haastattelu	Gliooma	214	0,8	0,8	1,1
		Meningeooma	118	0,7	0,6	0,8
Schoemaker -05	Haastattelu	Kuulohermo	360	0,9	0,9	0,9
Hepworth 2006	Haastattelu	Gliooma	508	0,9	1,0	1,2
Schuz 2006	Haastattelu	Gliooma	138	1,0	-	-
		Meningeooma	104	0,8	-	-

Taulukko 7.2 Yhteenveto matkapuhelimen käyttäjien syöpävaarasta

Aiheesta on tehty 14 epidemiologista tutkimusta. Vaikutus on esitetty ristitulosuhteena (odds ratio, OR) paitsi kohorttitutkimuksen (Johansen) kohdalla ilmaantuvuussuhteena, joilla kuva-
taan matkapuhelimen käytön suhteellista vaikutusta kasvainten vaaraan. Lukuarvo 1 viittaa
siihen, ettei vaikutusta ole. Ykköstä suurempi lukuarvo viittaa kohonneeseen ja pienempi
lukuarvo alentuneeseen riskiin.

tuneesta riskistä. Matkapuhelimen käyttäjillä ei raportoitu muita enemmän aivokalvon hyvänlaatuisia kasvaimia (meningeoomia). Kuulohermon hyvänlaatuisia kasvaimia (neurinoomia) on joissain tutkimuksissa havaittu enemmän matkapuhelimen käyttäjillä, mutta tulokset eivät ole yhdenmukaisia.

Missään tutkimuksessa ei ole havaittu yhteyttä matkapuhelimen käytön tuntimäärän ja aivokasvainten välillä. Aivojen eri osien suhteen ruotsalaisen ryhmän tekemissä kahdessa tutkimuksessa on saatu viite ohimaja/tai takaraivolohkojen kasvainten vaaran suurenemisesta, mutta muissa tutkimuksissa tätä ei ole voitu vahvistaa. Kahdessa ruotsalaisessa tutkimuksessa kasvain on ollut useammin sillä puolella, jossa puhelinta on pidetty. Löydöksen uskottavuutta vähentää se että vastakkaisella puolella on ollut varsinkin ensimmäisessä tutkimuksessa vastaavasti alentunut riski. Tämä saattaa selittyä sillä, että aivokasvaimeen sairastuneet helposti muistelevat pitäneensä puhelinta sillä puolella, jolla kasvain todettiin (muistiharha). Analogisten NMT-puhelimien yhteydestä aivokasvaimiin on saatu viite kahdessa tutkimuksessa. Digitaalisten GSM-puhelinten käyttöön ei ole liittynyt suurentunutta aivokasvainten vaaraa yhdessäkään tutkimuksista.

Kokonaisuutena tähän saakka tehdyt tutkimukset eivät viittaa siihen, että matkapuhelimen käyttö suurentaisi aivokasvainten vaaraa. Kaikkia aivokasvaimia ja kaikkia matkapuhelimia tarkasteltaessa tutkimustulokset riittävät sulkemaan pois pienenkin lisäriskin (riskisuhde $< 1,1$). Paljon vaikeampi on selvittää liittyykö riski vain johonkin yksittäiseen kasvaintyyppiin (solutyyppiin tai sijaintiin), puhelintyyppiin tai käyttötapaan. Eri tutkimusten tuloksia ei kuitenkaan ole raportoitu aivan yhdenmukaisesti, mikä vaikeuttaa tulosten yhdistämistä alaryhmien osalta. Tulokset ovat yhdenmukaisen negatiivisia digitaalisten puhelimien ja aivokalvon kasvainten osalta. Tärkein riskinarvioinnin kriteeri on annos-vastesuhde eikä matkapuhelimen käyttö ole liittynyt aivokasvainten riskiin missään tutkimuksessa.

Matkapuhelimen vaikutuksesta muihin syöpätyyppeihin on saatu tietoa lähinnä tanskalaisesta seurantatutkimuksesta. Siinä matkapuhelimen käyttäjillä ei ollut muuta väestöä suurempaa syöpävaaraa yhdessäkään tutkituista 27 syöpätyypistä.

Tällä hetkellä aivokasvaimia koskevan tutkimusnäytön vahvuus on jo varsin suuri aineisto ja kohtuullisen yhtäpitävät tulokset. Tutkimuksia on tehty eri puolilla maailmaa ja niissä on käytetty erilaisia lähestymistapoja

kuten tutkimusasetelmia ja matkapuhelintietojen keräämistapoja, mikä vahvistaa tulosten uskottavuutta. Tulokset eivät silti ole täysin ristiriidattomia. Ne saavat kuitenkin tukea eläinkokeista, joissa ei ole saatu yhdenmukaista näyttöä syöpävaarasta. Myöskään solutason tutkimuksissa ei ole osoitettu mekanismeita, jolla pienenerginen kenttä voisi vaikuttaa syöpään kehittymiseen.

Matkapuhelinten vaikutuksista syöpävaaraan on julkaistu useita katsauksia. Yhteenvedojen johtopäätös on ollut se, että haitallisista vaikutuksista ei ole näyttöä. Tämä ei kuitenkaan vielä osoita sitä, että ne olisi kiistatta osoitettu turvallisiksi, sillä kaikkien riskien poissulkeminen on hyvin vaikeaa.

Epävarmuutta riskin arviointiin aiheuttavat toistaiseksi melko lyhyet altistus- ja seuranta-ajat. Tutkimuksissa on voitu selvittää pisimmillään noin viiden vuoden käytön vaikutuksia. Radiotaajuisten sähkömagneettisen kentän voimakkuuden mittaaminen henkilötasolla ei myöskään ole ollut mahdollista yhdessäkin epidemiologisessa tutkimuksessa. Lisätietoa on odotettavissa lähivuosina WHO:n syöväntutkimuskeskuksen (IARC) koordinoiman kansainvälisen INTERPHONE-tutkimuksen tulosten myötä. Siihen osallistuu Suomi ja seitsemän muuta Euroopan maata sekä neljä Euroopan ulkopuolista maata. Siihen odotetaan enemmän tapauksia kuin tähän mennessä tehtyihin tutkimuksiin yhteensä.

Ammatillinen altistuminen radiotaajuisille kentille ja syöpä

Useat eri ammattiryhmät saattavat altistua työssään voimakkaillekin radiotaajuisille sähkömagneettisille kentille. Ammatillisessa altistuksessa RF-lähteet ovat usein voimakkaita mutta yleensä altistutaan lähinnä heikolle etäkentälle. Samoin kuin matkapuhelimen käyttäjien kohdalla, myös ammatillista altistumista koskevissa tutkimuksissa suurin haaste on ollut tarkkojen altistumistietojen hankkiminen. Useissa tutkimuksissa ainoa altistumista koskeva tieto on ollut ammattinimike, joka mahdollistaa parhaimmillaankin vain karkean altistusryhmittelyn kuten jaon todennäköiseen ja mahdolliseen RF-altistukseen. RF-kentille altistunut ammattiryhmä saattaa joutua työssään tekemisiin myös muiden syöpää aiheuttavien tekijöiden kanssa, mikä saattaa vääristää tuloksia. Tutkimukset ovat usein myös olleet pieniä, joten sattuma saattaa vaikuttaa tuloksiin.

Motorolan työntekijöiden syöpäkuolleisuutta selvittäneessä tutkimuksessa seurattiin lähes 200 000 työntekijän kohorttia keskimääräisen seuranta-ajan ollessa hieman alle 14 vuotta. Kuolleisuus aivokasvaimiin tai

veri- ja imukudossyöpiin ei ollut yhteydessä ammattinimikkeen perusteella määritettyyn radiotaajusten kenttien tavalliseen tasoon eikä korkeimpaan altistustasoon. Myöskään altistuskertymä eikä altistuksen kesto ole liittynyt näiden syöpien syntyyn. Tutkimuksen puutteet liittyvät altistuksen arviointiin ja pieneen otokseen (altistuneiden joukossa oli vain 21 aivokasvainta ja 55 veri- tai imukudossyöpää).

Yhdysvalloissa tehdyssä kohorttitutkimuksessa seurattiin kuolleisuutta 40 000 Yhdysvaltain laivastossa Korean sodassa palvelleen tutkateknikon joukossa. Altistumista arvioitiin työnimikkeen perusteella. Yli 40 vuoden seurannassa eniten altistuneessa ryhmässä ei esiintynyt enempää syöpäkuolemia kuin muissa ryhmissä tai väestössä keskimäärin. Aivokasvainten vaara ei ollut suurentunut (37 tapausta). Kivessyöpää altistuneella ryhmällä oli hieman altistumatonta enemmän, mutta koko väestöön verrattuna vaara ei ollut suurentunut. Leukemiakuolleisuus oli hieman suurempi tutkan säteille todennäköisesti altistuneessa ryhmässä (69 tapausta), mutta tämä löydös rajoittui yhteen ammattiryhmään eli lentokonesähkötekniikoihin.

Puolalaisen tutkahenkilöstön syöpiä selvittänyt tutkimus kattoi 3 700 altistunutta ja yli 100 000 altistumatonta sotilasta. Useiden syöpätyyppien esiintyvyys oli suurempi tutkan kanssa työskennelleillä. Tutkimuksen raportoinnissa oli kuitenkin selviä puutteita: sotilaallisten tietojen arkaluontoisuuden vedoten tutkimuksessa ei raportoitu esimerkiksi tapausmääriä eikä ikäjakaumia. Yhdysvaltain ilmavoimissa tehdyssä tapaus-verrokkitutkimuksessa verrattiin aivokasvaimen sairastuneiden ja vertailuhenkilöiden altistumista tutkan aiheuttamalle mikroaaltosäteilylle ja muille tekijöille. Altistumista arvioitiin ammattinimikkeen perusteella. Niillä, jotka olivat joutuneet työssään tekemisiin tutkien kanssa, havaittiin muita enemmän aivokasvaimia. Riski ei kuitenkaan liittynyt altistuksen määrään tai todennäköisyyteen.

Italialaisessa tutkimuksessa seurattiin noin 500 muovisaumaajan (laitteiden taajuus 27 MHz) syöpäkuolleisuutta yli 20 vuoden ajan. Heillä havaittiin kuusi syöpätapausta, mikä oli odotettua enemmän. Muilla tehtaan työntekijöillä ei ollut suurentunutta syöpävaaraa. Ero ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevä ja tutkijat varoittivat joko sattuman tai viinyylikloridialtistuksen voivan vaikuttaa tuloksiin.

Yhdysvalloissa tehdyssä kivessyöpien tapaus-verrokkitutkimuksessa tapaukset raportoivat verrokkeja useammin altistuksen radiotaajuisille

kentille, mutta ammattinimikkeen perusteella tehdyssä analyysissä ei havaittu vastaavaa eroa.

Kanadalaisilla poliiseilla on raportoitu muuta väestöä suurempi kives-syövän ilmaantuvuus, jonka mahdolliseksi syyksi on epäilty tutkan käyttöä. Ero muuhun väestöön ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevä ja yhteys tutkan käyttöön jäi epäselväksi.

Yhdysvalloissa on seurattu radioamatöörien syöpäkuolleisuutta. Kattavimmassa tutkimuksessa yli 60 000 radioamatöörin syöpäkuolleisuus oli muuta väestöä alhaisempi. Kaiken kaikkiaan leukemiakuolleisuus ei poikennut muusta väestöstä, mutta yhden alatyyppin osalta kuolleisuus oli hieman suurentunut. Riski ei kuitenkaan liittynyt amatööriluvan tyyppiin, jonka ajateltiin kuvaavan lähettimen käytön määrää. Kahdessa Yhdysvalloissa ja yhdessä Englannissa tehdyssä tutkimuksessa on havaittu suurentunut leukemian vaara niillä, jotka käyttävät ammatissaan lennättimiä ja radiolähtimiä. Toisaalta radio- ja tutkamekaanikoilla ei neljässä tutkimuksessa ole raportoitu vastaavaa riskiä.

Silmänpohjan melanooman yhteydestä ammatilliseen altistukseen radiotaajuisille sähkömagneettikentille on saatu viitteitä kahdessa tutkimuksessa. Saksassa tehdyssä tapaus-verrokkitutkimuksessa suurempi osuus tapauksista (16/118) kuin verrokeista (46/475) oli työskennellyt lähellä radiolähetintä tai matkapuhelinta. Tutkan osalta ei havaittu vastaavia eroja. Yhdysvalloissa tehdyssä tutkimuksessa suurempi osuus tapauksista (21/221) kuin verrokeista (22/447) oli työssään altistunut tutkan tai muun lähteen mikroaalloille. Näiden kahden pienehkön tutkimuksen perusteella on vaikea tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä, mutta lisätutkimukset ovat tarpeen.

Useita tutkimuksia yhdistäneessä meta-analyysissä ammatillinen altistuminen sähkömagneettisille kentille ei ollut yhteydessä leukemiaan. Arvioissa oli mukana sekä radiotaajuisia että matalataajuisia kenttiä. Radiotaajuisille kentille altistuneilla radiokorjaajilla ei ollut selvästi suurentunutta leukemiavaaraa.

Ammatillisen RF-altistumisen yhteyttä syöpään selvittäneet tutkimukset eivät ole antaneet yhdenmukaisia tuloksia. Jatkotutkimukset ovat aiheellisia esimerkiksi silmänpohjan melanooman osalta, mutta luotettavampien tuloksien saaminen edellyttäisi altistusmittauksia, sillä pelkät kyselyt eivät anna riittävän tarkkaa tietoa riskin arvioimiseksi.

Ympäristöperäinen altistus ja syöpä

Ympäristöperäiset RF-kentät, jotka liittyvät matkapuhelinverkkojen tukiasemiin ja TV/radiolähttimiin, ovat herättäneet huolestuneisuutta useissa maissa. Näiden ympäristöön aiheuttamat kentät ovat kuitenkin useita kertaluokkia heikompia kuin matkapuhelimen käyttäjään kohdistuva kenttä.

Englannissa tehdyssä tutkimuksessa ei havaittu syöpäilmaantuvuuden kohoamista suurtehoisten radio- ja televisiolähttimien ympäristössä. Myöskään San Franciscossa tehdyssä analyysissä lasten leukemian, imukudossyövän eikä aivokasvainten riskillä ollut yhteyttä kodin etäisyyteen lähettimestä. Australiassa tehdyssä tutkimuksessa leukemiaa, etenkin lasten leukemiaa esiintyi kolmen televisiolähttimen ympäristössä muita alueita enemmän. Aivokasvaimilla ei vastaavaa yhteyttä havaittu. Tekijät itse varoittavat liian suoraviivaisista johtopäätöksistä ja painottavat lisätutkimusten tarvetta muun muassa annos-vasteen selvittämiseksi. Myöhemmin tehdyssä tarkemmassa analyysissä osoittautui, että suurentunut riski rajoittui vain yhdelle alueelle lähettimen ympäristössä.

Leukemian ilmaantuvuutta on tutkittu myös Vatikaanissa olevan suurteholähttimen ympäristössä Roomassa. Lasten leukemian ilmaantuvuus oli suurempaa lähettimen läheisyydessä, mutta löydös perustui vain kahdeksaan havaittuun tapaukseen. Aikuisten leukemian osalta saatiin viite suurentuneesta ilmaantuvuudesta, mutta tulos ei ollut tilastollisesti merkitsevä.

Yhteenveto

Kaiken kaikkiaan radiotaajuisten sähkömagneettisten kenttien vaikutuksista syöpävaaraan on niukasti näyttöä. Lähes kaikki matkapuhelimen käytön vaikutuksia koskeneet tutkimukset ovat keskittyneet ainoastaan keskushermoston kasvaimiin, muista syöpätyypeistä on niukalti tutkimustietoa. Myös altistumisen alusta kulunut aika on ollut varsin lyhyt, yleensä alle viisi vuotta. Voimakkaille kentille työssään altistuneiden ryhmien tutkimukset eivät ole antaneet yhdenmukaisia tuloksia. Suurimmat epävarmuuden lähteet liittyvät altistumista koskevien tietojen puutteisiin. Syy-suhteen osoittamisen kannalta keskeiseen annos-vastearviointiin on päästy vain harvassa tutkimuksessa. Vaikka solutason tutkimuksissa ei ole löydetty selvää mekanismia mahdollisille terveysvaikutuksille, suoraa väestötason tutkimustietoa kaivataan, sillä uuden teknologian myötä huo-

Asiantuntijakomiteoiden arvioita radiotaajuisien kenttien terveysvaikutuksista:

Riippumaton asiantuntijakomitea (Stewartin raportti, Englanti): Kokonaisuudessaan näyttö viittaa siihen että raja-arvot alittava altistuminen RF-kentille ei aiheuta haitallisia terveysvaikutuksia. Biologisia vaikutuksia saattaa kuitenkin ilmetä. Tietämyksessä on merkittäviä puutteita. Ei voida varmuudella sanoa ettei RF-kentillä olisi lainkaan haitallisia terveysvaikutuksia.

WHO:

Tämänhetkinen tietämys ei osoita heikkojen sähkömagneettisten kenttien terveysvaikutuksia. Biologisia vaikutuksia koskeva tietämys on kuitenkin puutteellista ja lisätutkimuksia tarvitaan.

SSI (Ruotsi):

Matkapuhelinten aiheuttamaan RF-altistukseen liittyvää syöpävaaraa koskeva näyttö on riittämätön.

mattava osa väestöä altistuu radiotaajuisille sähkömagneettisille kentille. Tutkimusten motivaationa onkin ollut väestön huoli ja epävarmuus – tätä taustaa vasten olisi tärkeää välttää matalataajuisien (ELF) magneetikenttien osalta syntynyt tilanne, jossa lukuisten pienten tutkimusten keskenään ristiriitaiset tutkimustulokset ruokkivat ennemmin kuin vähensivät huolestuneisuutta. Tämä vaatii panostamista riittävän suurien ja korkeatasoisten tutkimusten toteuttamiseen. Yksi tapa parantaa altistuksen arviointia ja selvittää yhteyksiä eri sairauksiin olisi seurantatutkimus, jossa kerättäisiin tietoa matkapuhelimen käytöstä usean vuoden ajalta. Tällaisen tutkimuksen pitäisi kuitenkin olla huomattavan suuri ja näin ollen kustannukset olisivat mittavat.

7.4 | Hermosto

Vaikutukset aivojen sähköiseen toimintaan

Matkapuhelinten ja erityisesti GSM-puhelinten käytön nopea kasvu on synnyttänyt keskustelua niiden aiheuttaman sähkömagneettisen kentän

mahdollisista terveysvaikutuksista. Julkisessa ja ammattimaisessa käytössä olevien puhelinten RF-kentät ovat taajuusalueella 400–2 000 MHz. Puhelinta käytettäessä osa säteilevästä energiasta imeytyy käyttäjän päähän johtaen ihon, ja ehkä myös aivojen, lämpötilan lievään paikalliseen nousuun. Vaikka mahdollinen lämpötilan nousu aivoissa on luultavasti liian vähäistä saadakseen aikaan pysyviä terveysvaikutuksia, on periaatteessa mahdollista, että RF-kenttä voisi vaikuttaa jonkin vielä tuntemattoman mekanismin kautta aivojen toimintaan.

Tässä luvussa luodaan katsaus ihmisillä tehtyihin tutkimuksiin, joissa on selvitetty matkapuhelinten RF-kenttien vaikutusta aivotoimintaan, tiedonkäsittelyyn eli kognitioon, ja subjektiivisiin tuntemuksiin. Erityisesti keskitymme Turun yliopiston kognitiivisen neurotieteen tutkimuskeskuksessa (KNT) suoritettuihin kokeisiin, joissa on selvitetty tavallisen GSM-puhelimen tuottaman 902 MHz kentän mahdollisia vaikutuksia kaikille edellä mainituille aivotoiminnan alueille.

Kognitiiviset toiminnot

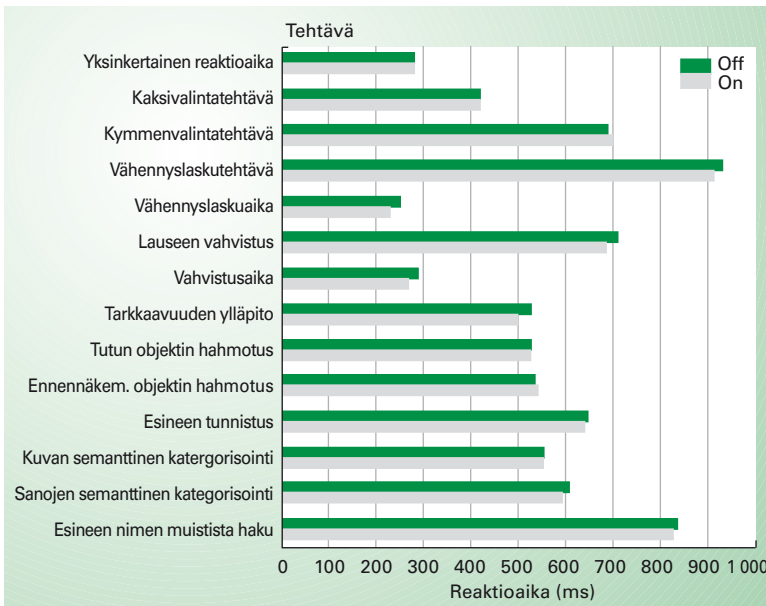
RF-kenttien vaikutusta ihmisen kognitiivisiin toimintoihin on tutkittu kohtuullisen vähän. Matkapuhelimien yleistymisen vuoksi on tärkeää tutkia löytyykö niiden käytön yhteydessä vaikutuksia kognitiiviseen suoritukseen käyttäytymisen tasolla. Toisin sanoen, häiriintyykö vai kohentuuko ihmisen suoritus kognitiivisten tehtävien aikana RF-kenttien vaikutuksesta, tai näkyykö ylipäättänsä suoriutumisen mitattavissa olevia vaikutuksia.

Precen ryhmä Englannissa tutki analogisen (NMT) ja digitaalisen (GSM), 915 MHz taajuisen RF-kentän vaikutusta kognitiiviseen suoritukseen. Heidän kokeessaan 36 vapaaehtoista suoritti muistia ja tarkkaavaisuutta vaativia tehtäviä. He olivat vuoroin altistettuina analogiselle kentälle, digitaaliselle kentälle ja ilman altistusta. Tulosten mukaan yhden tarkkaavaisuutta vaativan tehtävän (monivalintatehtävä) reaktioajat nopeutuivat koehenkilöiden ollessa altistettuina analogiselle kentälle, mutta digitaalisella kentällä vastaavaa vaikutusta ei havaittu. Koehenkilöiden vastausten tarkkuudessa ei ollut eroja altistuksen suhteen, mikä osoittaa, että koehenkilöt eivät pyrkineet nopeuttamaan suoritustaan tarkkuuden kustannuksella.

Myös Turun Yliopiston KNT:ssä suoritetuissa tutkimuksissa on tutkittu RF-kentän vaikutusta kognitiivisiin toimintoihin. Kokeissa koehenkilöt

suorittivat joko tarkkaavaisuutta ja lyhytkestoista muistia rasittavia tehtäviä, tai erityisesti lyhytkestoista muistia eri voimakkuudella rasittavaa tehtävää. He olivat vuoroin sekä altistettuna RF-kentälle, että ilman altistusta. Koehenkilöt eivät olleet tietoisia kentän tilasta. Altistus annettiin joko tavallisella GSM-puhelimella, joka kiinnitettiin koehenkilön pään vasemmalle puolelle, tai signaaligeneraattorilla, mikä simuloi GSM-puhelimen aikaansaamaa kenttää. Signaaligeneraattorin käytön etuna on parametrien helpompi ja tarkempi säätely.

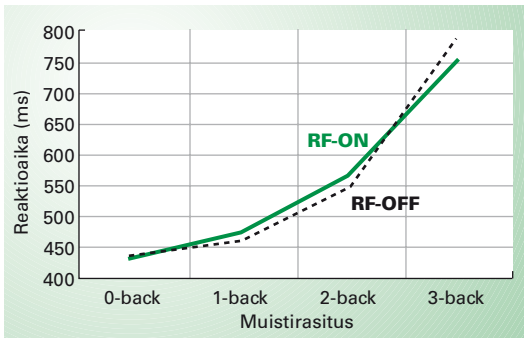
Tulosten mukaan yksinkertaisessa reaktioaikatehtävässä ja tarkkaavuuden ylläpitoa vaativassa tehtävässä koehenkilöiden suoritus nopeutui RF-kentän vaikutuksesta. Lisäksi vähennyslaskutehtävään vaadittava aika lyheni kentän vaikutuksesta. RF-kentän vaikutusta erityisesti lyhytkestoiseen muistiin tutkivan kokeen tulokset puolestaan osoittivat, että RF-kenttä nopeutti koehenkilöiden suoritusta kaikkein suurimman muistirasituksen alaisena, mutta ei pienemmällä rasituksilla.



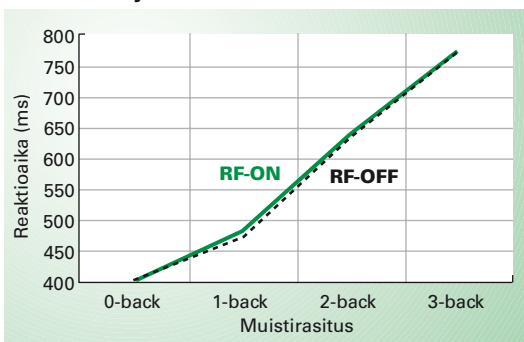
Kuva 7.2 Kognitiivisia toimintoja rasittavien tehtävien tuloksia

Tutkimuksissa koehenkilöt suorittivat erillisiä testejä kahteen otteeseen matkapuhelimen ollessa kiinnitettynä vasemmalle puolelle päätä. Testeissä mitattiin vastausten nopeutta (reaktioaika = vasen pystyakseli) erilaisten tehtävien suorituksen aikana. Kuvasta voidaan havaita keskimääräiset reaktioajat eri tehtävissä (vaaka-akseli) puhelimen ollessa päällä (harmaat pylväät) ja pois päältä (vihreät pylväät).

Kohdekirjaimet



Ei-kohdekirjaimet



Kuva 7.3 Lyhytkestoista muistia rasittavat testit

Tutkimuksissa koehenkilöt suorittivat neljä eriasteisesti työmuistia (= lyhytkestoinen muisti) rasittavaa testiä matkapuhelimen ollessa kiinnitettynä vasemmalle puolelle päätä. Testi toistettiin kahteen otteeseen, ja toisella kerralla puhelin oli päällä ja toisella kerralla pois päältä. Testeissä koehenkilöiden tuli muistaa oliko yksitellen esitetyt kirjaimet samoja kuin yksi, kaksi tai kolme kirjainta aiemmin esitetty kirjain (n-back-tehtävä). 0-backissa tehtävä oli muuten sama kuin muissa tehtävissä, mutta siinä koehenkilön ei tarvinnut muistaa kirjaimia, ainoastaan eritellä kohdekirjain ei-kohdekirjaimista. Kuvasta näkyy keskiarvoiset reaktioajat (vasen pystyakseli) kullekin muistirasituksen asteelle puhelimen ollessa päällä (vihreä viiva), sekä pois päältä (musta katkoviiva).

Näitä tuloksia tarkasteltaessa on huomattava, että havaitut erot, vaikka ovat tilastollisesti merkitseviä, ovat silti hyvin pieniä. Käytännön kannalta havaitun kaltaiset alle 40 millisekunnin kokoiset erot ovat merkityksettömiä.

Jatkotutkimuksissa näitä tuloksia ei ole pystytty toistamaan. Niissä RF-kenttä ei aiheuttanut merkittävää eroa suoriutumiseen missään tehtä-

vässä. Vastaavaa tutkimusprotokollaa hyväksikäyttäen tutkittiin myös GSM-puhelimen vaikutuksia lasten (10–14-vuotiaiden) kognitiivisiin toimintoihin. Myöskään näissä tutkimuksissa ei puhelimen havaittu aiheuttavan mitään muutoksia nuorten koehenkilöiden suoriutumisessa.

Ensinnä mainittujen tutkimusten keskeiset tulokset on esitetty kuvissa 7.2 ja 7.3. Viimeisimmissä tutkimuksissa on tarkkailtu myös kentän modulaation vaikutuksia, toisin sanoen jatkuvan signaalin (Continuous Wave, CW) ja purskeisen (normaali GSM) signaalin eroja. Näissäkään tutkimuksissa kentän ei havaittu aiheuttavan eroja koehenkilöiden suoriutumisessa.

Edellä mainitut tutkimukset ovat siis tarkastelleet RF-kenttien välitöntä vaikutusta kognitiivisiin toimintoihin. Pitkäaikaisvaikutusta on erityisen vaikea tutkia häiritsevien muuttujien vuoksi. Siitä huolimatta Leen ryhmä on raportoinut vuonna 2001, että matkapuhelimia käyttävien nuorten ryhmä (15–16-vuotta) suoriutui nopeammin tarkkaavaisuutta vaativassa tehtävässä, kuin ikä- ja sukupuolivertaisettu verrokkiryhmä, joka ei käyttä matkapuhelinta.

Subjektiiiset tuntemukset

Kognitiivisten vaikutusten ohella toinen tärkeä kysymys on, aiheuttavatko RF-kentät käyttäjille subjektiiivisiä tuntemuksia tai oireita. Osa käyttäjistä tuntee saavansa matkapuhelinten käytöstä päänsärkyä, iho-oireita, tai huimausta. Lisäksi on esitetty miten koehenkilöt alkoivat kärsiä päänsärystä mikroaaltojen kuulemista tutkivassa kokeessa, jossa käytettiin matkapuhelinten kenttää läheisesti vastaavia taajuuksia ja modulaatioita. On arvioitu, että muutokset aivoveriasteessa tai dopamiini-opiaattijärjestelmässä saattaisivat selittää mahdollisesti RF-kenttien aiheuttamat päänsäryt.

On huomattava, että toistaiseksi ei ole vakuuttavaa kokeelliseen tutkimukseen viittaavaa näyttöä matkapuhelinten vaikutuksista subjektiiivisiin tuntemuksiin tai oireisiin. Vaikka käyttäjät todella tunsivatkin jotain käytön yhteydessä tai sen jälkeen, voitaisiin tuntemukset yhtä hyvin selittää esimerkiksi puhelun sisällön kuin RF-kentän vaikutuksilla.

KNT:ssä mittattiin edellä kuvattujen kognitiivisia toimintoja ja EEG:tä tutkivien kokeiden yhteydessä systemaattisesti myös koehenkilöiden subjektiiivisiä tuntemuksia itsearviointiasteikoilla silloin, kun RF-kenttä oli

koehenkilöiden tietämättä päällä tai pois päältä. Arvioitavat tuntemukset olivat päänsärky, huimaus, väsymys, kutina, ihon kuumotus, ja ihon punoitus. Koehenkilöt arvioivat tuntemustensa voimakkuuden neljä- tai yhdeksänportaisella asteikolla koeistuntojen alussa, puolivälissä, ja lopussa. RF-altistuksella, jonka pituus oli 30–60 minuuttia kokeesta riippuen, ei ollut vaikutusta arvioituihin tuntemuksiin minkään kokeen yhteydessä. Sen sijaan oli tyypillistä, että koehenkilöiden kokema päänsärky, huimaus ja väsymys lisääntyivät koeistunnon kuluessa ja testejä suoritettaessa, mikä viittaa siihen, että käytetty menetelmä todella oli herkkä tuntemusten vaihtelulle. Lyhykestoinen RF-altistus ei siis näyttäisi aiheuttavan päänsärkyä tai muita oireita. Muutkin tutkimusryhmät ovat raportoineet samantapaisia tuloksia. Sen sijaan jää vielä selvitettäväksi, voiko pidempiaikainen, vuosia kestävä käyttö aiheuttaa niitä.

Työterveyslaitoksessa vuonna 2002 toteutetussa tutkimuksessa pyrittiin selvittämään liittyvätkö koehenkilöiden kokemat subjektiiviset terveyshaitat matkapuhelinten RF-kentille altistumiseen. Lisäksi arvioitiin pysyvätkö koehenkilöt aistimaan puhelimen kentät tietämättä onko puhelin aktiivivilassa vai suljettu. Tutkimukseen osallistui 20 koehenkilöä, jotka ilmoittivat kokevansa terveysongelmia erityisesti altistuessaan matka-



Kuva 7.4 Subjektiivisten terveyshaittojen koeasetelma

Puhelimet olivat kangaspusseissa pään kummallakin puolella. Koehenkilöt eivät tieneet oliko puhelin toiminnassa vai suljettu kunkin testin aikana.

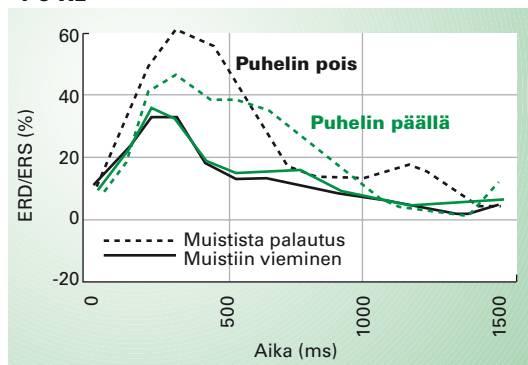
puhelin kentille. Koetilanteissa altistuslähteinä oli kolme matkapuhelinta: analoginen NMT puhelin (900 MHz) ja kaksi digitaalista GSM puhelinta (900 MHz tai 1 800 MHz). Koehenkilöt eivät tienneet oliko puhelin toiminnassa vai suljettu kunkin testin aikana. Kokeet suoritettiin taajamien ulkopuolella olevissa tiloissa, joiden lähellä ei ollut asuintaloja, voimalinjoja eikä tukiasemia. Testien aikana koetiloissa ei käytetty sähköä valaistukseen eikä lämmitykseen. Jokaiselle henkilölle tehtiin yhden päivän aikana satunnaisessa järjestyksessä 3 tai 4 enintään puoli tuntia kestävää testiä, joista yksi oli valealtistustilanne. Tutkimuksen aikana koehenkilö istui nojatuolissa ja hänen kummankin korvansa viereen sijoitettiin matkapuhelimet. Puhelimet olivat kangaspusseissa, joten puhelintyyppiä ei voitu tunnistaa, kuva 7.4. Testin aikana koehenkilöä pyydettiin kuvaamaan oireet ja tuntemukset, joiden hän koki olevan matkapuhelimen aiheuttamia.

Tutkituista 20 koehenkilöstä 19 ilmoitti kokevansa subjektiivisia oireita lähes jokaisen testin kuluessa. Sekä naiset että miehet oireilivat eniten valealtistustilanteissa. Naiset ilmoittivat kokevansa huomattavasti enemmän ja useamman tyyppisiä oireita kuin miehet. Eniten oireita esiintyi pään alueella, tyypillisesti päänsärkyä, kuumotuksen tai pistelyn tunnetta. Useimmilla koehenkilöillä verenpaine ja sydämen lyöntitiheys olivat ensimmäisen testin alussa korkeampia kuin testin edetessä ja myöhempien testien aikana, mikä viittaa koetilanteen aiheuttamaan jännitykseen. Tutkimuksessa ei voitu osoittaa yhteyttä koehenkilöiden subjektiivisten oireiden ja matkapuhelinten sähkömagneettisten kenttien välillä eikä kukaan koehenkilöistä pystynyt tunnistamaan oliko matkapuhelin toiminnassa vai ei.

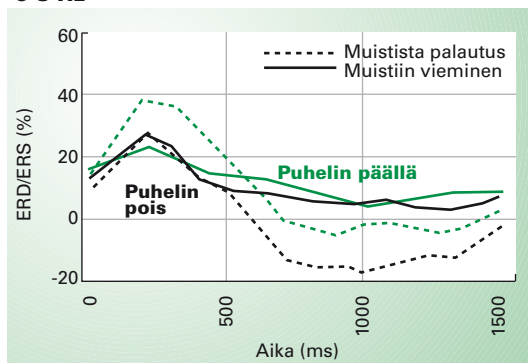
Aivojen sähköinen toiminta

Elektroenkefalografia (EEG) eli aivosähkökäyrä on yleisin menetelmä, jolla RF-kentän mahdollisia vaikutuksia ihmisen aivotoimintaan on yritetty mitata. EEG:n aaltomuotoja rekisteröidään kahden elektrodin jännite-eroina. Yleensä, kun on mitattu spontaania aivotoimintaa, eli kun koehenkilö ei suorita mitään erityistä motorista tai kognitiivista tehtävää, RF-altistuksella ei ole todettu olevan vaikutuksia valvetilassa olevan koehenkilön EEG:hen. Mannin ja Röschen tutkimuksessa vuodelta 1996 todettiin altistuksen vaikuttavan nukkuvan ihmisen aivojen sähkötoimintaan, mutta tätä tulosta ei ole pystytty myöhemmin toistamaan. Myös unta edeltävän RF-altistuksen on raportoitu vaikuttavan unen aikaiseen EEG:hen.

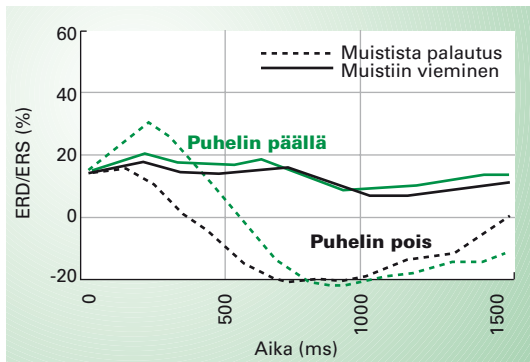
4-6 Hz



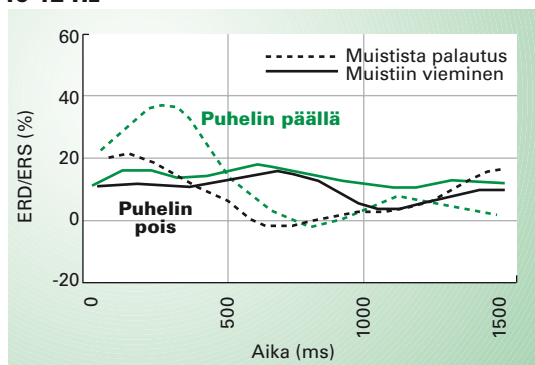
6-8 Hz



8-10 Hz



10-12 Hz



Kuva 7.5 EEG:n suhteellisen voimakkuuden muutokset RF-kentän vaikutuksesta Sternbergin muistitehtävän aikana (Krause ym., 2000a)

Kuvasta voidaan havaita keskimääräisen (N = 16) EEG:n suhteellisen voimakkuuden muutokset ärsykkeen vaikutuksesta 1,5 sekuntia eteenpäin puhelimen ollessa päällä (vihreä katkoviiva) ja pois päältä (musta katkoviiva). Rekisteröinti tehtiin erikseen muistiin viemisen aikana (yhtenäinen viiva) sekä muistista palauttamisen aikana (katkoviiva).

Spontaanin EEG:n tutkiminen ei paljasta RF-kentän mahdollisia vaikutuksia tapahtumasidonnaiseen aivotoimintaan. Tapahtumasidonnaisessa aivotoiminnassa aivot suorittavat tiettyä kognitiivista tehtävää. Aikaisemmissa tutkimuksissa on todettu radiotaajuisen kentän voivan vaikuttaa tapahtumasidonnaiseen aivotoimintaan. Turun yliopiston KNT:ssa suoritetuissa kokeissa on tutkittu RF-kentän vaikutusta aivosähkötoiminnan tapahtumasidonnaiseen desynkronisaatioon (Event-Related Desynchronization, ERD) eli vaimenemiseen, ja vastakkaiseen ilmiöön eli synkronisaatioon (ERS) eli tahdistumiseen.

Kokeissa koehenkilöt suorittivat lyhytkestoista muistia vaativan auditorisen tai visuaalisen tehtäväsarjan RF-altistuksen ollessa heidän tietämättään joko päällä tai pois päältä. Auditorisessa tehtäväsarjassa koehenkilöille esitettiin korvakuulokkeista viisi suomenkielistä sanaa ja pienen tauon jälkeen kuudes sana. Tämän jälkeen koehenkilön tuli osoittaa, oliko kuudes sana viiden ensimmäisen joukossa (Sternberg-tehtävä). Visuaalisena tehtävänä toimi n-back tehtävä (selostus kuvan 7.3 tekstissä). Altistus annettiin tavallisella GSM-puhelimella, jota pidettiin koko ajan pään oikealla puolella. ERD/ERS-vasteet analysoitiin eri taajuusalueilla (4–6 Hz, 6–8 Hz, 8–10 Hz, 10–12 Hz), katso kuva 7.5. Tulosten mukaan altistus aiheutti aivotoiminnan tehon voimistumista erityisesti 8–10 Hz taajuusalueella. Myös muilla taajuusalueilla havaittiin erilaisia altistuksen ja muiden muuttujien yhdysvaikutuksia.

Jatkotutkimuksessa GSM-puhelin oli pään vasemmalla puolella, jolloin todettiin altistuksen muuttavan ERD/ERS-vasteiden muotoa 4–6 Hz ja 6–8 Hz alueilla. Nyt altistusvaikutukset olivat huomattavasti heikompia kuin aikaisemmin.

Myös Työterveyslaitoksessa on Hietasen ryhmä tutkinut valveilla olevien koehenkilöiden aivosähkökäyrässä mahdollisesti tapahtuvia epänormaaleja muutoksia matkapuhelinten käytön aikana. Tutkimuksessa käytettiin altistuslähteinä 900 MHz taajuudella toimivia NMT- ja GSM-puhelimia. Tutkimukseen osallistui 19 vapaaehtoista tervettä aikuista. Tutkimuksessa jokaiselle koehenkilölle tehtiin seitsemän EEG-rekisteröintiä, joista kuusi oli varsinaista altistusta ja yksi valealtistus, jolloin puhelin ei ollut aktivoitu lähetystilaan. Koehenkilö istui rekisteröinnin ajan nojatuolissa rentoutuneena lähes makuuasennossa hereillä silmät suljettuina. Puhelin oli aktiivitoiminnassa 20 minuuttia, ja jokaista altistusta edelsi ja seurasi viiden minuutin valealtistus jolloin puhelin ei ollut toiminnassa. Kukin rekisteröinti kesti siten yhteensä 30 minuuttia. Puhelimia ohjattiin mikro-tietokoneella, joten koehenkilöt eivät tienneet oliko puhelin toiminnassa

vai ei. Tutkimuksen tulokset osoittivat, että koehenkilöiden altistuminen matkapuhelinten RF-kentille ei aiheuttanut EEG-rekisteröinnissä havaittavia neurofysiologisia vaikutuksia. Tutkimuksessa havaittu ainoa merkitsevä poikkeavuus oli delta-aaltomuodossa esiintynyt ero absoluuttisessa tehossa yhden puhelimen altistus- ja valealtistustilanteen välillä, mikä johtui todennäköisesti tilastollisesta sattumasta.

Yhteenveto

Vaikka matkapuhelimet yleistyivät 1990-luvulla erittäin voimakkaasti, on niistä aiheutuvan RF-kentän vaikutusta ihmisen kognitiivisiin- ja aivotointoihin tutkittu jokseenkin vähän. Raportoidut tulokset ovat vaihtelevia ja löydettyjen tulosten toisintaminen on ollut vaikeaa. Havaittujen erojen kokoluokka antaisi viitteitä siitä, että mahdolliset vaikutukset ovat joko äärimmäisen pieniä, niitä ei ole, tai käytetyt tutkimusmenetelmät eivät ole vielä tarpeeksi kehittyneitä niiden havaitsemiseksi. Tutkimusten vähyyden ja tulosten vaihtelevuuden vuoksi mitään lopullista ei vielä voida sanoa RF-kenttien vaikutuksesta ihmisen aivojen sähköiseen toimintaan, kognitiivisiin toimintoihin tai subjektiivisiin tunteuksiin.

Useita aiheeseen liittyviä kysymyksiä on vielä osittain avoinna, kuten altistuksen keston ja voimakkuuden vaikutukset, RF-kentän parametrien (taajuus, voimakkuus, modulaatio) vaikutukset, kuinka nopeasti altistuksen mahdolliset vaikutukset alkavat ja kuinka pitkään ne jatkuvat, vaikuttaako RF-kenttä eri tavoin eri-ikäisten ihmisten aivoihin ja -toimintoihin. Ei tunneta, ovatko altistuksen mahdolliset vaikutukset suhteessa altistuksen keston ja voimakkuuteen, vai saavuttavatko ne kyllästyspisteen. Myöskään mahdollisten vaikutusten mekanismeista ei vielä voida sanoa mitään varmaa, toisin sanoen miten RF-kenttä aiheuttaa mahdolliset vaikutukset. Erityisen tärkeätä on myös huomata, että tässä luvussa mainittujen tulosten ja menetelmien perusteella ei voida tehdä mitään suoria kannanottoja matkapuhelinten mahdollisiin terveysvaikutuksiin.

7.5 | Lisääntymisterveys

Useilla eläinlajeilla tehdyissä tutkimuksissa RF-kenttien ei ole havaittu aiheuttavan selviä kehitysbiologisia vaikutuksia. Sikiökuolemat, epämuodostumat ja poikasten painon aleneminen alkavat yhtäpitävästi lisääntyä vasta kun kentän voimakkuus aiheuttaa emoille pitkäaikaisesti huomatta-

vaa - lähes kuolettavaa - lämpörasitusta. Joissakin tutkimuksissa RF-kenttien on havaittu lisäävän kemiallisten teratogeenien vaikutuksia, mutta sekin johtuu luultavimmin sikiöiden lämpötilan noususta.

Varhaisissa tutkimuksissa todettiin urosrottien hedelmällisyyden heikentyneen RF-kenttien vaikutuksesta. Todennäköisesti tämäkin on ollut lämpövaikutuksesta johtuva havainto. Myöhemmin on havaittu myös urosten hedelmällisyyden heikentyvän matalammalla kentän voimakkuudella, mutta silloinkin pitkäaikainen altistus on voinut aiheuttaa kohtalaista lämpövaikutusta. Usean asteen lämpötilannousu kiveksissä aiheuttaa ihmisellä selvää laskua siittiöiden tuotannossa.

Radiotaajuisten kenttien vaikutuksesta työntekijöiden raskauteen on vähän tietoa. Useissa tapaus-verrokkitutkimuksissa on tutkittu työssään RF-kenttiä käyttävien fysioterapeuttien raskauden onnistumista. Vain yhdessä Ouellet-Hellstromin ja Stewardin tutkimuksessa on havaittu raskauden keskeytymisen riskin lisääntyneen usein altistuneiden ryhmässä.

Yhteenvetona voidaan sanoa, että eläinkokeista saatujen tulosten perusteella RF-kentät eivät aiheuta riskiä sikiölle tai urosten hedelmällisyydelle. RF-kentille työssään altistuneilla henkilöillä ei ole havaittu kohonutta lisääntymisterveydellistä riskiä.

7.6 | Radiotaajuisten kenttien biologisia vaikutuksia

Radiotaajuisten kenttien biologisia vaikutuksia on tutkittu useissa in vitro- eli solukokeissa. Solukokeissa on mahdollista tutkia useita sellaisia päätekohtia ja vaikutusmekanismeja, joiden tutkiminen eläin- tai ihmiskokeilla on huomattavasti vaikeampaa. Solututkimuksia arvioitaessa on kuitenkin muistettava, että solututkimusten tuloksia on vaikea soveltaa suoraan ihmiseen tai edes käytettyjen solujen isäntäorganismiin. Lisäksi käytetyt solulinjat sisältävät usein mutaatioita, jotka saattavat vaikuttaa lopputulokseen. Solukokeiden etuna on niiden muunneltavuus, nopeus ja edullisuus, mikä lisää niiden toistettavuutta. Yleisesti solusta ja sen ominaisuuksista on kerrottu enemmän tämän kirjasarjan kirjassa 4 ”Säteilyn terveysvaikutukset” kappaleessa 1 ja 2 sekä tässä kirjassa kappaleessa 4.

Tutkittaessa radiotaajuisten sähkömagneettisten kenttien vaikutuksia biologisilla kokeilla on erityisen tärkeää ottaa huomioon käytettävä altistus-

dosimetria eli millaiselle kentälle soluviljelmä altistuu ja miten energia absorboituu sähkökentästä soluviljelmään. Useita tutkimuksia on arvoiteltu altistuksen dosimetrian puutteellisuuden perusteella. Sen lisäksi, että altistuksessa on tärkeää ottaa huomioon SAR-taso, on myös tärkeää huomioida lämpötila altistuksen aikana. Jos lämpötila nousee korkealle altistuksen aikana, tämä aiheuttaa soluissa lämpövasteen, mikä puolestaan saattaa helposti peittää alleen muut kentän mahdolliset vaikutukset. Näin ollen viime aikoina on keskitytty tutkimaan erityisesti lämpötilasta riippumattomia vaikutuksia niin, että kentän SAR-taso on ollut tutkimuksissa niin pieni, että merkittävää lämpövastetta ei pitäisi aiheutua (matalantason altistus).

Radiotaajuisten sähkömagneettisten kenttien biologisia vaikutuksia on tutkittu solutasolla jo yli kolmekymmentä vuotta. Aluksi tutkimukset keskittyivät mikroaaltouuneissa ja tutkissa käytettyihin 2 450 MHz kenttiin. Viimeisen vuosikymmenen aikana tutkimus on painottunut matkapuhelimissa käytettäviin 900 ja 1 800 MHz kenttiin.

Stressivaste soluissa

Radiotaajuisten sähkömagneettisten kenttien fotonien energia on hyvin pieni ja näin ollen onkin kiistanalaista, onko ylipäättään mahdollista, että solut voisivat tunnistaa radiotaajuisten sähkömagneettisen kentän ja reagoida jotenkin siihen, kappale 4. Tätä on yritetty selvittää viime vuosina tutkimalla aiheuttavatko radiotaajuiset kentät soluissa vastaavanlaisen stressivasteen kuin moni muu ympäristötekijä kuten esimerkiksi lämpötila, ionisoiva säteily, hapettuminen, tietyt kemikaalit. Jos solu reagoi radiotaajuisiin kenttiin stressivasteella, tämä tarkoittaisi, että solu tunnistaa kentän, vaikka sen energia olisikin alhainen. Tämä puolestaan mahdollistaa sen, että solu voisi reagoida myös muulla tavoin radiotaajuisiin kenttiin ja niissä saattaisi tapahtua fysiologisia muutoksia. Solujen stressivastetta tutkitaan yleensä etsimällä muutoksia stressiproteiinien (eli lämpöshokkiproteiinien) ilmentymisessä. Tällaisia proteiineja ovat esimerkiksi Hsp70 ja Hsp27. Nämä proteiinit liittyvät muiden proteiinien laskostumiseen ja estävät väärinlaskostuneita proteiineja muodostamasta suuria yhteenliittymiä, jotka voisivat häiritä solun toimintaa.

Solujen stressivasteesta radiotaajuisille kentille ei ole tehty vielä paljon tutkimuksia, ja tehtyjen tutkimusten tulokset riippuvat käytetystä solulinjasta, altistuksesta ja tutkimusmenetelmästä. Tuloksissa on sekä havaittu että ei ole havaittu muutoksia solujen stressivasteessa. Muutamassa tut-

kimuksessa on havaittu muutoksia tiettyjen stressiproteiinien ilmentymisessä tai aktivoitumisessa, mutta useimpia näistä tutkimuksia ei ole toistettu tai ei ole pystytty toistamaan muissa laboratorioissa.

Clearyn ryhmä tutki vuonna 1997 solujen stressivastetta altistamalla HeLa-soluja ("Henrietta Lax", human cervix carcinoma) ja CHO-soluja (Chinese hamster ovary) radiotaajuisille kentille. HeLa-solut altistettiin 27 MHz sekä 2 450 MHz jatkuvalla kentälle SAR-arvolla 25 W/kg. CHO-solut altistettiin 27 MHz jatkuvamuotoiselle aallolle SAR-arvolla 100 W/kg. Kaikki altistukset kestivät kaksi tuntia, minkä jälkeen solut olivat normaaliolosuhteissa vuorokauden ennen kokeita. Kummasakaan solulinjassa ei havaittu selkeitä muutoksia stressivasteessa altistettaessa niitä radiotaajuiselle kentälle, vaikka testattavana oli useita erikokoisia proteiineja.

- + Käytetyllä tutkimusmenetelmällä on mahdollista tutkia useita erikoisia proteiineja.
- Menetelmä on epätarkka yksittäisen Hsp-proteiinin kohdalla.

de Pomerain ryhmä tutki vuonna 2000 radiotaajuisien kenttien vaikutusta *C. elegans* -sukkulamatoon. Mato altistettiin 750 MHz jatkuvamuotoiselle kentälle (0,5 W; 0,001 W/kg) yön yli. Tutkimuksissa havaittiin stressiproteiini Hsp16 nousu vasteena altistukselle. Myöhemmin samat tutkijat ovat havainneet myös yhteyden madon hedelmällisyyteen ja sukupuoleen.

- + Tutkimuskohteena kokonainen organismi.
- Altistusdosimetria kiistanalainen, myöhemmin on epäilty lämpötilan aiheuttaneen muutokset.

Leszczynskin ryhmä tutki vuonna 2002 radiotaajuisien kenttien vaikutuksia altistamalla ihmisen endoteelisoluja (EA.hy926) 900 MHz GSM kentälle keskimääräisellä SAR-arvolla 2,8 W/kg. Soluja altistettiin tunnin ajan. Tutkimuksissa havaittiin stressiproteiini Hsp27:n ilmentymisen ja aktivoitumisen (fosforylaatio) nousu. Myös muissa fosforyloituissa proteiineissa havaittiin muutoksia. Myöhemmin samat tutkijat ovat myös havainneet muutoksia solun tukirangan proteiinien ilmentymisessä.

- + Muutokset hsp27:n proteiinissa on osoitettu usealla eri menetelmällä.
- + Useita toistoja tehtiin tutkimusryhmän sisällä.
- Altistuslaitteistolla osa soluista saa huomattavasti suuremman annok-

- sen (~ 5 W/kg), mikä voi vaikuttaa tuloksiin.
- Käytetty solulinja oli epästabiili, joka saattaa aiheuttaa muutoksia ajan kuluessa.

DNA- ja kromosomivauriot

Tutkittaessa syöpää ja etsittäessä mahdollisia syöpään johtavia muutoksia biologisessa organismissa tutkitaan usein solujen DNA- ja kromosomivaurioita. Tyypillisimmät tutkimuskohteet ovat DNA-katkokset, kromosomipoikkeavuudet, mikrotumat sekä sisarkromatidin vaihdokset. Esimerkiksi ionisoivan säteilyn on havaittu aiheuttavan soluissa DNA- ja kromosomivaurioita (kirja 4 luku 10). Näin ollen näitä vaurioita on myös tutkittu ionisoimattoman säteilyn ja radiotaajuisten kenttien tapauksissa.

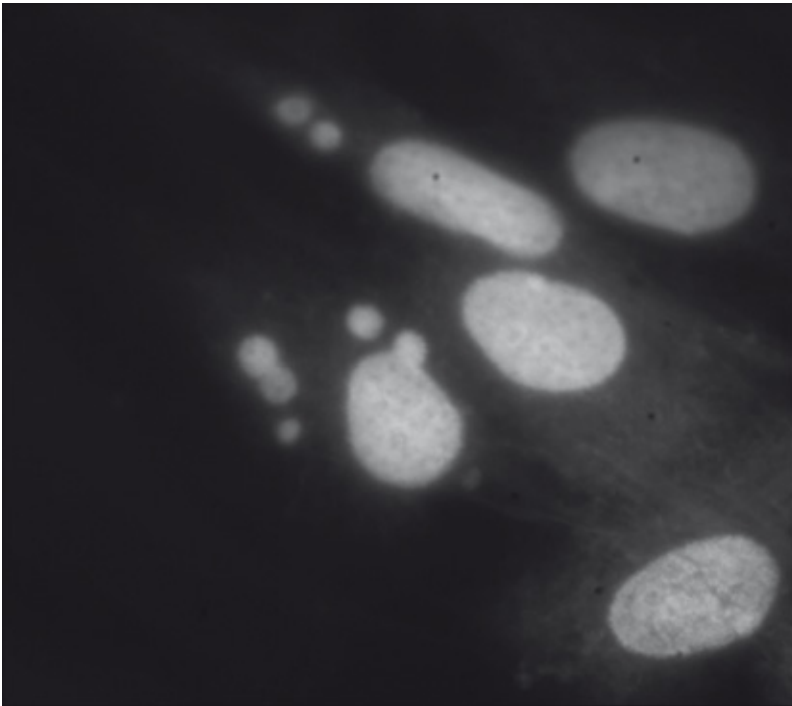
Radiotaajuisten kenttien aiheuttamia DNA-katkoksia on tutkittu sekä solu- että eläinkokeilla. Tyypillisiä DNA-vaurioita ovat yksöis- ja kaksoisjuosteen katkokset, joista jälkimmäiset ovat monimutkaisempia korjata. Korjaamattomana DNA-juosteen vauriot voivat aiheuttaa mutaation siirtyessään eteenpäin solun jakautuessa. 1980-luvun alussa julkaistiin joitakin tutkimuksia, joissa havaittiin, että radiotaajuiset kentät voisivat aiheuttaa DNA-vaurioita ja tämän jälkeen aluetta onkin tutkittu melko laajasti erityisesti 2 450 MHz kentillä. Mahdollisia muutoksia on etsitty sekä ihmisluovuttajilta saaduista verinäytteistä että käyttämällä solulinjoja tutkimuksissa. Useimmissa näistä tutkimuksista ei ole havaittu merkittäviä poikkeamia DNA-katkoksten määrässä, kun on verrattu säteilytettyjä ja kontrollinäytteitä keskenään. 2000-luvun alkupuolella on tehty joitakin tutkimuksia, joissa on havaittu DNA-katkoksia, kun on käytetty ihmisistä peräisin olevia solulinjoja ja 1 800 MHz GSM kenttää kohtuullisen pienillä altistustasoilla. Nämä tulokset vaativat kuitenkin vielä lisätutkimuksia, jotta voidaan varmistaa niiden todenperäisyys.

DNA-katkoksten yhteydessä on myös tutkittu radiotaajuisten kenttien mahdollisia vaikutuksia DNA-korjausmekanismeihin, jotka korjaavat DNA:han syntyneet vauriot ja useimmiten estävät mutaatioiden syntymisen, katso kirja 4 kappale 2. Muutokset DNA-korjausmekanismeissa voisivat johtua mahdollisista emäsvaurioista DNA-juosteessa, tai toisaalta on tutkittu mahdollisuutta, että radiotaajuiset kentät estäisivät DNA-korjausmekanismien toimintaa, jolloin spontaanisti tai muulla tavoin syntyneiden vaurioiden korjaaminen hidastuisi tai estyisi. Näitä tutkimuksia ei ole

tehty kovin laajasti, mutta saaduissa tuloksissa ei esiinny muutoksia DNA-korjausmekanismeissa.

Kromosomivauriot syntyvät tyypillisesti DNA-kaksoisjuosteen katkoksesta, jota ei ole korjattu ollenkaan tai korjausmekanismit ovat korjanneet sen väärin. Kromosomivaurioita on useita eri tyyppisiä. Esimerkiksi disentriset ja translokaatio-kromosomit syntyvät, jos korjausmekanismit toimivat väärin. Jos taas korjausta ei tapahdu ollenkaan, voidaan soluissa havaita irrallisia kromosomipalasia, jotka voivat myöhemmin solunjakautumisen yhteydessä muodostaa mikrotumia (kuva 7.6).

Radiotaajuisten kenttien aiheuttamia kromosomivaurioita on tutkittu useilla eri soluilla ja altistuslaitteilla. Useisiin vanhempiin tutkimuksiin, joissa kromosomivaurioita on havaittu, suhtaudutaan nykyisin kriit-



Kuva 7.6 Mikrotuman muodostuminen

Irralliset kromosomipalaset voivat jäädä solunjakautumisen aikana tumän ulkopuolelle, jolloin mikrotuma pääsee muodostumaan. Tällaisia solulimassa olevia mikrotumia voidaan havaita joko kummassakin tytärsolussa tai vain toisessa ja niiden havaitseminen antaa viitteitä kromosomivaurioista. Mikrotuman voi myös muodostaa kokonainen kromosomi, jolloin kyseessä ei ole niinkään kromosomivauriot vaan ennemminkin ongelmat solun jakautumisen aikana.

tisesti. Useissa näistä tutkimuksista altistuslaitteisto on aiheuttanut selkeästi lämpötilan nousua näytteissä, mikä on voinut johtaa kromosomivaurioihin, tai altistuksissa käytettyä laitteistoa ei ole kuvailtu ollenkaan, jolloin altistuksen arvioiminen on hankalaa. Viimeisen vuosikymmen aikana tehdyissä tutkimuksissa ei ole juurikaan havaittu radiotaajuisten kenttien aiheuttamia kromosomivaurioita. Samalla on tutkittu myös radiotaajuisten kenttien mahdollista edistävää vaikutusta muilla genotoksisilla aineilla aiheutettujen kromosomivaurioiden määrään. Tehdyissä tutkimuksissa ei ole havaittu radiotaajuisten kenttien edistävän kromosomivaurioiden syntyä.

Radiotaajuisten kenttien vaikutusta mikrotumien muodostumiseen on selvitetty useissa eri tutkimuksissa. Joissakin tutkimuksissa on havaittu, että radiotaajuiset kentät lisääisivät mikrotumien muodostumista, mutta suurimmassa osassa tutkimuksista ei ole kuitenkaan havaittu minkäänlaisia muutoksia mikrotumien muodostumisessa. Tutkimukset, joissa on havaittu mikrotumien määrän lisääntymistä, on tehty useilla eri kenttien taajuuksilla ja käytetty altistusaika on ollut niissä kohtuullisen pitkä eli vuorokausi tai pidempi. Uusimmat tutkimukset, joissa mikrotumien muodostumista on havaittu solukokeissa, on tehty käyttämällä 1 800 MHz taajuisia GSM-moduloitua kenttää, mutta nämä tutkimukset vaativat vielä lisää toistoja.

Sisarkromatidivaihdoksessa sisarkromatidit vaihtavat palasen käsivarsistaan keskenään, ja tämä tapahtuma voi esiintyä myös normaalin solunjakautumisen aikana. Yleisesti ilmiötä pidetään kuitenkin erilaisten ympäristö- ja muiden haittojen aiheuttamana. Myös radiotaajuisten kenttien kykyä aiheuttaa sisarkromatidin vaihdoksia on tutkittu. Radiotaajuisten kenttien aiheuttamia sisarkromatidin vaihdoksia ei ole löydetty, vaikka on käytetty melko korkeitakin SAR-arvoja. Eräässä tutkimuksessa havaittiin radiotaajuisten kenttien mahdollisesti lisäävän sisarkromatidivaihdoksien määrää, jos mukana oli niitä aiheuttava genotoksinen aine. Myöhemmin kyseiset tutkijat eivät kuitenkaan ole pystyneet vahvistamaan löydöstään, joten vaikuttasi siltä, että radiotaajuiset kentät eivät lisää muilla aineilla aiheutettujen sisarkromatidivaihdoksien lukumäärää.

Vijayalaxmin ryhmä tutki vuosina 2000 ja 2001 kromosomivaurioiden muodostumista radiotaajuisten kenttien seurauksena imusoluissa, jotka on eristetty vapaaehtoisilta koehenkilöiltä. Solut altistettiin 2 450 MHz pulssimuotoiselle kentälle tai 835,62 MHz moduloidulle FDMA kentälle SAR-arvojen vaihdelleessa 0,95–5,0 W/kg välillä.

Soluista määritettiin kromosomivaurioiden ja mikrotumien lukumäärä. Tutkimuksissa ei havaittu eroja altistettujen ja valealtistettujen näytteiden välillä.

- + Näytteet ihmislouvuttajilta, joten solut olivat primäärisoluja.
- Luovuttajien määrä ei ole ollut kovin suuri.

Eurooppalaisessa Reflex-tutkimushankkeessa kolme laboratoriota on tutkinut kromosomivaurioiden muodostumista altistettaessa soluja radiotaajuisille kentille. Kaikissa laboratorioissa altistukseen on käytetty 1 800 MHz kenttää, joka on voinut olla jatkuva tai pulssimoduloitu. Altistus on ollut joko yhtäjaksoista tai jaksottaista (viisi minuuttia päällä ja kymmenen minuuttia pois) ja altistusajat ovat olleet useita tunteja. SAR-arvot ovat vaihdelleet 0,3–3,0 W/kg välillä. DNA-katkoksia ja mikrotumia havaittiin käytettäessä useaa eri altistusolosuhdetta ja neljää eri solulinjaa, mutta erityisesti 1,3 W/kg kohdalla altistettaessa ihmisen promyelosyyttisoluja vuorokauden ajan.

- + Altistusolosuhteet olivat hyvin karakterisoidut.
- Tulosten tulkinta olettaa ikkuna-ilmion vaurioiden muodostumisessa, sillä suuremmilla altistustasoilla vaurioiden muodostumisessa ei havaita niin selkeää eroa altistettujen ja kontrollien välillä.

Kaiken kaikkiaan radiotaajuisien kenttien aiheuttamista DNA- ja kromosomivaurioista tehdyistä tutkimuksista suurimmassa osassa ei ole löydetty minkäänlaisia vaikutuksia. Joissakin uusissa tutkimuksissa on saatu viitteitä DNA-katkoksista ja mikrotumien muodostumisesta, mutta nämä tulokset tarvitsevat vielä lisätutkimuksia. Tämän hetkisen tiedon valossa näyttäisi siltä, että radiotaajuiset kentät eivät aiheuta DNA-katkoksia tai kromosomivaurioita.

Solujen proliferaatio, transformaatio ja kuolema

Mahdollisia RF-kenttien aiheuttamia muutoksia solujen proliferaatiossa, transformaatiossa ja solukuolemassa on tutkittu eri menetelmillä. Mahdolliset muutokset solujen proliferaatiossa eli jakaantumisessa voisivat esimerkiksi edesauttaa pahanlaatuisten solujen lisääntymistä. Transformaatioissa solun geneettinen aines muuntuu ja muutokset solukuolemassa puolestaan saattaisivat johtaa suureen määrään kuolleita soluja tai vastaavasti huonojen solujen selviämiseen.

Solujen proliferaatiokokeissa on saatu monenlaisia tuloksia. Joissakin tutkimuksissa on havaittu soluproliferaation lisääntyvän, kun taas toisissa on havaittu sen vähenevän. Osassa tutkimuksista ei puolestaan ole löydetty minkäänlaisia muutoksia solujen jakaantumiskyvyssä. Kaikki tutkimustulokset ovat riippuneet käytetystä altistuksesta ja solutyypistä, joten kattavaa yhteenvedoa aiheesta on vaikea tehdä, mutta selkeää muutosta solujen proliferaatioissa ei kuitenkaan ole havaittu.

Solujen jakautumista on myös tutkittu mittaamalla ODC-entsyymin aktiivisuutta. ODC-entsyymi (ornitiinidekarboksylaasi) on nisäkkäiden tärkein polyamiinisynteesiä säätelevä entsyymi. Polyamiinit ovat positiivisesti varautuneita pienimolekyylisiä yhdisteitä, jotka sitoutuvat negatiivisesti varautuneisiin solun molekyyliihin, kuten esimerkiksi DNA:han, RNA:han ja proteiineihin. Siten polyamiinit ovat välttämätön osa solun normaali toimintoja ja mittaamalla ODC-entsyymin aktiivisuutta saadaan tietoa soluproliferaatiosta ja sen säätelystä. Solujen ODC-aktiivisuutta on mitattu ainakin kahdessa eri tutkimuksessa, jossa soluja on altistettu radiotaajuisille kentille. Näissä tutkimuksissa on havaittu solujen ODC-aktiivisuuden nousevan altistuksen seurauksena ja riippuvan pulssimoduloinnin taajuudesta. Myöhemmin näitä tutkimuksia on yritetty toistaa muissa laboratorioissa, mutta alustavien tulosten perusteella vastaavaa ODC-aktiivisuuden nousua ei ole havaittu.

Litovitzin ryhmä (1993) on tutkinut radiotaajuisien kenttien vaikutusta ODC-entsyymin aktiivisuuteen. Hiiren fibroblastisoluja L929 altistettiin 835–915 MHz kentille SAR-arvolla 2,5 W/kg. ODC-aktiivisuudessa havaittiin nousu kahdeksan tuntia altistuksen jälkeen, jos altistus tehtiin aallolla, jota oli moduloitu 16–60 Hz taajuudella. ODC-aktiivisuus palasi normaalitasolle vuorokauden kuluttua altistuksesta. Lisäksi havaittiin, että vaste oli riippuvainen modulaation taajuudesta laskien 6 Hz ja 600 Hz modulaation kohdalla.

Transformaatioissa solujen geneettinen aines muuttuu ja solut muuntuvat pahanlaatuisemmaksi, mikä voi lopulta mahdollistaa syöpäsolun syntymisen. Transformoituneet solut muodostavat enemmän pesäkkeitä kasvualustallaan kuin normaalit solut ja määrittelemällä näiden pesäkkeiden määrä voidaan määrittää solun transformaatioitiheys.

Radiotaajuisien kenttien vaikutusta solujen transformatioon on selvitetty muutamassa tutkimuksessa. Näistä missään ei ole havaittu radiotaajuisien kenttien pystyvän aiheuttamaan solujen transformoitumista. Tut-

kittaessa yhteisvaikutusta tunnetun syöpäpromoottorin kanssa on saatu tuloksia, jotka viittaisivat solujen transformaation lisääntymiseen. Näitä tutkimustuloksia ei ole kuitenkaan toistettu muissa tutkimusryhmissä.

Balcer-Kubiczek ja Harrison (1985, 1989, 1991) ovat tutkineet kolmessa tutkimuksessa radiotaajuisten kenttien vaikutusta solujen transformaatioon sekä yhteisvaikutusta tunnetun syöpäpromoottorin kanssa. He altistivat hiiren C3H 10T1/2 fibroblastisoluja 2 450 MHz pulssimoduloidulle kentälle. SAR-arvot olivat 0,1, 1 tai 4,4. W/kg. Tutkimuksissa ei havaittu radiotaajuisten kenttien vaikuttavan yksinään solujen transformaatioon. Kokarsinogeeninä käytettiin ionisoivaa säteilyä (1,5 Gy) tai/ja TPA:a (12-O-tetradekanoyyli-forboli-13-asettaatti). Tutkimuksissa havaittiin, että solujen transformaatioitiheys lisääntyi, jos TPA:a lisättiin solumaljoille radiotaajuisten altistuksen jälkeen.

- + Käytettyjen altistusyhdistelmien määrä oli suuri.
- Käytettyjen toistojen määrä oli altistusolosuhdetta kohden riittämätön perusteellisen statistisen analyysin suorittamiseen.
- Tuloksien perusteella laadittu hypoteesi, että radiotaajuinen altistus toimi initiaattorina on kiistanalainen.

Ohjelmoidussa solukuolemassa eli apoptoosissa solu tappaa itsensä ohjelmoidusti, katso kirja 4 kappale 2. Apoptoosi on hallittu tapahtuma, jonka aiheuttaa solussa tapahtuneet korjaamattomat vauriot. Solujen apoptoottinen kuolema estää haitallisen perintöaineksen periytymisen tytärsoluille ja ehkäisee näin ollen esimerkiksi syövän syntyä. Toisaalta joissakin tilanteissa voi myös esiintyä liiallista apoptoosia, mikä taas voi johtaa esimerkiksi tiettyjen kudosten rappeutumiseen ja autoimmuunisairauksien syntymiseen. Apoptoosia on tutkittu jonkin verran altistettaessa soluja radiotaajuisille kentille. Viime aikoina aiheesta on valmistunut joitakin uusia tutkimuksia. Tutkittaessa apoptoosia soluissa ei ole havaittu minkäänlaisia muutoksia radiotaajuisille kentille altistetuissa soluissa. Yhdessä tutkimuksessa havaittiin, että radiotaajuiset kentät voivat lisätä melko alhaisellakin SAR-tasolla UV-säteilyllä aikaansaatuja apoptoosia käytettäessä mutatoitua hiivasolulinjaa. Ilmiötä ei kuitenkaan havaittu vastaavilla normaaleilla soluilla. Muutamassa tutkimuksessa on selvitetty apoptoosi-prosessiin liittyviä geenejä ja havaittu muutoksia niissä lähinnä niin, että apoptoosi saattaisikin vähentyä. Näitä tutkimustuloksia ei ole kuitenkaan varmistettu solutasolla, jotta tiedettäisiin, vaikuttavatko muutokset geenien ja proteiinien ilmenymisessä itse solufysiologiseen tapahtumaan.

Solujen proliferaation, transformaation ja apoptoosin tutkimukset ovat tuottaneet osittain ristiriitaisia tuloksia. Osassa tutkimuksista on havaittu solujen fysiologisten prosessien tason laskua ja osassa puolestaan nousua radiotaajuisista kentistä johtuen. Tutkimustulokset ovat olleet riippuvaisia solutyypistä ja altistusolosuhteista. Näin ollen ei voida todeta radiotaajuisien kenttien selkeästi vaikuttavan johonkin näistä solun fysiologisista prosesseista ja tällä hetkellä arvioidaankin, että radiotaajuiset kentät eivät vaikuta kyseisiin solutason prosesseihin. Aiheesta tarvitaan kuitenkin vielä lisää tutkimuksia. Muutamassa tutkimuksessa on havaittu radiotaajuisien kenttien edistävän tunnettujen karsinogeenien toimintaa, mutta tämäkin tarvitsee lisätutkimuksia.

Solun morfologia, läpäisevyys ja viestintä

Tutkittaessa solun morfologiaa tutkitaan solun muotoa ja sen mahdollisia muutoksia. Joissakin tutkimuksissa on tutkittu radiotaajuisien kenttien mahdollisuutta vaikuttaa solun morfologiaan esimerkiksi niin, että altistettu solu muuttaisi kokoaan tai muotoaan. Normaaliolosuhteissa solukalvon läpi kulkeutuu erilaisia molekyylejä, jotka ovat välttämättömiä solun elämälle ja sen viestinnälle muiden solujen kanssa. Muutamassa tutkimuksessa onkin tutkittu muutoksia solukalvon läpäisevyydessä ja eri aineiden pitoisuusmuutoksia solun sisällä. Solujen välisen viestinnän avulla solut voivat viestittää toisilleen havaitessaan mahdollisen radiotaajuisen sähkömagneettisen kentän.

Muutamassa tutkimuksessa on havaittu, että altistettaessa soluja radiotaajuisille kentille niiden morfologiassa tapahtuu muutoksia. Tällainen muutos on esimerkiksi solujen kutistuminen. Solujen on huomattu myös irtoavan kasvualustaltaan altistuksen seurauksena. Lisäksi on havaittu muutoksia joidenkin solutukirangan proteiinien ilmentymisessä, millä voi olla lopulta vaikutusta solujen morfologiaan. Morfologisia tutkimuksia ei kuitenkaan ole tehty vielä kovinkaan paljon, joten mahdollisista muutoksista solujen morfologiasta ei voida vielä tehdä selkeitä johtopäätöksiä.

Radiotaajuisien kenttien vaikutusta solujen kalsiumvirtoihin on tutkittu useassa tutkimuksessa. Joissakin tutkimuksissa, joissa on käytetty 147 MHz kenttää, jossa pulssimodulaatio on ollut 16 Hz taajuudella, on havaittu kalsiumvirtojen lisääntymistä solukokeissa. Tämä ilmiö on ollut riippuvainen pulssimodulaation taajuudesta. Vastaavasti monissa tutkimuksissa ei ole havaittu muutoksia kalsiumvirroissa käytettäessä erityyppisiä altisteita.

Radiotaajuisten kenttien vaikutusta solukalvoon ja sen läpäiseviin molekyyleihin on selvitetty useassa eri tutkimuksessa. Tutkimuksissa on saatu viitteitä siitä, että radiotaajuiset kentät voisivat vaikuttaa kationien (esimerkiksi Na^+ ja K^+) kuljetukseen solukalvon läpi. Tällaisia tuloksia on saatu usealla eri taajuudella (27 MHz – 10 GHz) ja SAR-arvolla (0,2–200 W/kg). Kaikkia näitä tuloksia ei ole toistettu tai pystytty toistamaan muissa laboratorioissa eikä niiden biologista merkitystä tiedetä. Näin ollen aiheesta täytyy tehdä vielä lisätutkimuksia, jotta siitä saataisiin selkeämpi kuva.

Radiotaajuisten kentillä on siis havaittu olevan vaikutusta solukalvon läpäisevyyteen ja molekyylien konsentraatioihin solussa. Tutkimuksia on kuitenkin tehty hyvin vähän in vivo -tasolla, joten niiden biologista merkitystä on hankala täysin arvioida. Tällä hetkellä kuitenkin ajatellaan, että ilmiöillä ei kuitenkaan ole terveydellisiä vaikutuksia.

Aivoverieste

Aivoverieste on anatominen ja fysiologinen rakenne aivojen verisuonistossa. Se eristää aivosolut verenkierrosta ja säätelee aineiden kulkeutumista verenkierron ja aivosolujen välillä. Aivoveriестeen toiminta perustuu hiussuonten endoteelisolujen välisiin tiiviisiin liitoksiin sekä hermotukidoksen astrosyyttien toimintaan. Aivoverieste on osa luonnollista suojautumisjärjestelmää jonka tarkoituksena on säilyttää aivojen fysikaalis-kemiallinen ympäristö mahdollisimman muuttumattomana. Aivoverieste puuttuu joiltakin aivoalueilta, esimerkiksi aivokammioiden alueelta, kokonaan. Aivoverieste toimii suodattimena päästäten valikoiden läpi tietyt biologiset yhdisteet verenkierrosta aivoihin. Se säätelee mm. aminohappojen, glukoosin ja muiden välttämättömien ravintoaineiden pääsyä aivoihin estäen proteiinien, mikro-organismien sekä monien myrkyllisten aineiden ja lääkeaineiden pääsyn verenkierrosta aivosoluihin. Aivoverieste päästää hiilidioksidin ja muut aineenvaihdunnan lopputuotteina syntyneet yhdisteet ulos aivosoluista. Muutos aivoveriестeen toiminnassa voi vaikuttaa keskushermoston toimintaan ja esimerkiksi altistaa sen mikrobian aiheuttamille infektioille.

Keskustelua on herättänyt ihmisaivojen toistuva altistuminen matkapuhelinten mikroaaltosäteilylle. Mikäli tämä altistus vaikuttaa veriaivoesteen läpäisevyyteen, siitä saattaisi olla seurauksena haitallisten molekyylien pääsy ja kerääntyminen aivosoluihin. Ensimmäiset raportit mikroaaltosäteilyn vaikutuksista aivoveriестeseen koe-eläimillä saatiin jo

1970-luvulla. Tutkimuksissa käytettiin pääasiassa jyrsiöitä, ja RF-altistustasot koko kehossa vaihtelivat muutamasta W/kg useisiin kymmeneen W/kg. Tämän jälkeen monet tutkijat ovat julkaisseet vaihtelevia tutkimustuloksia mikroaaltojen vaikutuksesta aivoveriестeen läpäisevyyteen eläimillä. Viime aikoihin asti on uskottu että mikroaaltojen aiheuttamat muutokset johtuvat lämpötilan noususta. Viime vuosina on kuitenkin saatu joitakin tuloksia sellaisilla säteilytasoilla (1 W/kg), joilla lämpötilan nousu ei ole merkittävä. Viimeisen kymmenen vuoden aikana useat julkaisut ovat raportoineet seerumin albumiinin vuotamisesta verestä aivoihin. Näiden tulosten perusteella on ajateltu, että myös ihmisten toistuva altistuminen matkapuhelinsäteilylle saattaa vaikuttaa aivoveriестeen läpäisevyyteen sellaisilla SAR-arvoilla, jotka ovat matkapuhelinsäteilylle asetettujen sallittujen raja-arvojen alapuolella.

Solu- ja eläinkokeista saatujen tulosten arviointi on ristiriitaisuuksien vuoksi hankalaa. Tulosten soveltaminen todellisten terveystarkkailujen arviointiin ihmisillä on vaikeaa koska tutkimuksissa käytetyt altistusmenetelmät vaihtelevat ja eroavat toisistaan. Tehdyissä tutkimuksissa suuri osa käytetyistä säteilytysmenetelmistä tai altistusolosuhteista eivät ole vertailukelpoisia keskenään. Lisäksi tulosten luotettavuutta haittaa se että tutkimuksia on vähän ja tulokset on saatu käyttämällä vain muutamia koe-eläimiä. Solu- ja eläinkokeiden avulla saadaan arvokasta tietoa, mutta tiedon soveltaminen ihmisiin voi olla ongelmallista.

Lopuksi todettakoon ettei muutoksia veriaivoesteen läpäisevyydessä ole osoitettu ihmisillä suoraan. Tutkimukset koe-eläimillä osoittavat, että aivokudoksen lämpötilaa nostavilla RF-altistustasoilla aivoveriестeen läpäisevyydessä voi tapahtua muutoksia, jotka ovat kuitenkin yleensä palautuvia. Siksi on tarpeen vielä tutkia onko matkapuhelimen käytöllä todella vaikutuksia aivoveriестeen toimintaan ja onko mahdollinen muutos sellainen että sillä olisi vaikutusta ihmisaivojen toimintaan.

Geenien ja proteiinien ilmentyminen

Tiettyjen fysiologisten prosessien lisäksi on tutkittu radiotaajuisten kenttien vaikutuksia geenien ja proteiinien ilmentymiseen (expression). Geenit ja proteiinit säätelevät solujen toimintaa ja muutokset niiden ilmentymisessä saattaisivat johtaa muutoksiin solun toiminnassa pidemmällä

aikavälillä. Useissa radiotaajuisten sähkömagneettisten kenttien biologisiin vaikutuksiin liittyvissä tutkimuksissa onkin selvitetty geenien ja proteiinien ilmentymisen vaihteluita. Geenien ilmentymistä tutkitaan tyypillisesti RNA-tasolla, jolloin selvitetään, onko jonkin tietyn geenin lähetti-RNA (mRNA) tasossa tapahtunut jonkinlaisia muutoksia vastena radiotaajuisille kentille. Proteiinitasolla voidaan tehdä vastaavia tutkimuksia, jolloin seurataan tietyn proteiinin ilmentymistasoa. Ilmentymistason lisäksi proteiineista tutkitaan niiden aktivoitumistasoa, sillä useat proteiinit tulevat toiminnallisiksi vasta kun ne aktivoituvat, esimerkiksi fosforyloitumalla (eli proteiiniin liittyy fosforiryhmä).

Proteiinien ja geenien ilmentymistä voidaan selvittää joko tutkimalla yksittäistä geeniä/proteiinia tai seulomalla useita eri kohteita samanaikaisesti. Laaja-alainen seulonta on tehokasta silloin, kun ei varsinaisesti tiedetä mahdollisia tutkimuskohteita, vaan halutaan selvittää useita potentiaalisia vaikutuskohteita samanaikaisesti. Tällaista seulontaa voidaan tehdä sekä RNA- että proteiinitasolla. Tällaisissa seulontatutkimuksia on havaittu muutoksia usean eri geenin ja proteiinin ilmentymisessä ja aktivoitumisessa. Tällaisia ovat esimerkiksi niin sanotut lämpöshokkiproteiinit, jotka reagoivat stressivasteeseen. Myös yksittäisissä tutkimuksissa on havaittu muutoksia näiden proteiinien ilmentymisessä. Muita tällaisia geenejä, joissa on havaittu muutoksia, ovat esimerkiksi apoptoosireitin geenit. On kuitenkin muistettava, että tällaiset tutkimukset kertovat ainoastaan muutoksista tietyn geenin tai proteiinin ilmentymisessä, mutta eivät vielä paljasta vaikutusta solun fysiologisiin prosesseihin puhumattakaan koko elimistön fysiologisista prosesseista. Näin ollen solutasoisen ilmiöiden olemassaoloa ja niiden biologista merkitystä täytyy vielä tutkia erikseen.

Yhteenveto

Radiotaajuisten kenttien biologisista vaikutuksista on tehty tutkimuksia moneen eri biologiseen prosessiin liittyen. Joissakin tapauksissa on havaittu selkeitä vaikutuksia solussa, esimerkiksi muutoksia kalsiumvirroissa, ODC-aktiivisuudessa sekä tiettyjen proteiinien ilmentymisessä. Kuitenkaan vielä ei ole selvillä, että näillä olisi jonkinlaisia terveydellisiä vaikutuksia. Näin ollen yleisesti uskotaankin, että radiotaajuisilla kentillä ei ole terveydellisiä vaikutuksia, vaikka solutasolla kenttien olemassaolo mahdollisesti tunnistetaankin.

Radiotaajuisten kenttien terveysvaikutuksia on selvitetty lukuisissa tutkimuksissa altistamalla ihmisiä, koe-eläimiä tai soluviljelmiä säteilylle. Koejärjestelyllä pyritään jäljittelemään ihmisten altistumista tietylle säteilylähteelle. Tutkimusten pääpaino on yleensä biologisessa tutkimuksessa. Tutkimustuloksilla ei kuitenkaan ole tieteellistä todistusvoimaa mikäli altistus on tehty huonolla laitteistolla, koska laitteiston tuottama altistus ei vastaa haluttua altistumistilannetta. Tämän vuoksi altistus on suunniteltava huolellisesti. Hyvä altistusjärjestely on suunniteltu siten, että altistuksen suuruus ja laatu tunnetaan tarkoitukseen soveltuvalla tarkkuudella. Laitteisto on kestävä ja helppokäyttöinen ja mahdolliset ympäristön häiriötekijät on eliminoitu. Altistuskokeen suunnittelijan on tärkeä selvittää etukäteen altistukseen liittyvät tekniset ongelmat, jotta aikataulut ja resurssit osataan mitoittaa oikein. Tässä kappaleessa käsitellään tyypillisiä altistuskokeisiin liittyviä teknisiä ongelmia.

Altistuksen suuruus on yleensä kokeen tulosten kannalta merkittävä tekijä. Altistumisen yksikkönä on SAR, katso luku 3, joka voidaan määrittää esimerkiksi paikallisena tai tiettyä kudossmassaa vastaavan tilavuuden keskiarvona, hetkellisenä huippuarvona tai pidemmän ajanjakson keskiarvona. Altistusta suunniteltaessa on päätettävä mitä halutaan tutkia ja miten SAR tässä tapauksessa tulee määritellä. SAR-määrittelyn eli dosimetrian tarkkuusvaatimukset on oltava tiedossa jo laitteistoa suunniteltaessa, koska laitteen rakenne vaikuttaa suuresti dosimetrian tarkkuuteen.

Täysin tasaista SAR-jakaumaa on lähes mahdotonta tuottaa pieneenkään tilavuuteen, joten esimerkiksi solujen sijoittuminen maljassa tai koe-eläimen liikkuminen saattavat aiheuttaa dosimetriaan merkittävän epävarmuuden. Tärkeintä on, että laitteisto on tarkoituksenmukainen. Jos dosimetrian tarkkuus ei ole tutkittavan ilmiön kannalta olennaisen tärkeää, voidaan hyväksyä suuremmat epävarmuudet, jolloin laitteiston muiden ominaisuuksien suunnittelu helpottuu. Mikäli dosimetrian on oltava mahdollisimman tarkkaa, koko laitteisto on suunniteltava tämän ehdon mukaisesti. Tarkkuusvaatimukset on syytä punnita huolellisesti, koska laitteiston mekaanisen toteutuksen ja tarvittavien mittalaitteiden hinta sekä dosimetrisen tutkimukseen kuluva aika kasvavat erittäin voimakkaasti vaatimusten lisääntyessä.

Dosimetria pitäisi ehdottomasti tehdä valmiiksi ennen altistusten aloittamista, jotta suunniteltua rakennetta voidaan parantaa tarvittaessa. Pahin

tilanne syntyy, kun altistukset tehdään ennen dosimetriaa ja jälkikäteen huomataan, että alustavat laskelmat eivät pidä paikkaansa tai vaadittua tarkkuutta ei voida saavuttaa. Tällöin kaikki altistuksen yhteydessä tehty työ ja tulosten analysointi saattavat mennä hukkaan, koska on tutkittu täysin eri asiaa kuin oli tarkoitus. Esimerkiksi matalalla SAR-tasolla havaitut vaikutukset saattavat osoittautua tarkemman SAR-määrittelyn perusteella johtuneen lämpenemisestä.

Altistuslaitteisto perustuu yleensä jonkinlaiseen suljettuun kammioon tai antenniin. Suljettu kammio on helpommin toteutettavissa, mikäli altistettava kohde on kohtuullisen pieni. Suljetussa tilassa teho keskittyy pienemmälle alueelle, jolloin selvittää pienemmällä vahvistimella ja ympäristökijät ei vaikuta altistukseen. Suurempia kohteita altistettaessa on usein käytettävä antenniin perustuvaa ratkaisua. Tällöin on huolehdittava käyttöhenkilökunnan turvallisuudesta ja laitteiston aiheuttamista radiohäiriöistä. Mikäli koetta ei voida tehdä häiriösuojatussa huoneessa, tutkimuksessa käytettävän taajuuden käyttöön on saatava lupa Viestintävirastosta. Lupien saaminen edellyttää yleensä kyseisen taajuuden luvanhaltijan suostumuksen ja lupahakemusten hoitamiseen on syytä varata riittävästi aikaa.

Mekaaninen toteutus vaikuttaa dosimetrian tarkkuuteen ja laitteiston käytettävyyteen. Altistuksessa käytettävät kammiot ovat yleensä suljettuja aaltojohtoja, jotka valmistetaan esimerkiksi alumiinista tai messingistä. Alumiinin hitsaus ja messingin juottaminen ovat vaativia työvaiheita. Etenkin suuria pintoja sisältävissä kokonaisuuksissa saumat vääntävät metallia, jolloin kammion muoto ei vastaa täysin suunniteltua. Tämantyyppisten valmistusepä tarkkuuksien huomioiminen esimerkiksi dosimetriaa varten tehdyissä tietokonesimuloinneissa on lähes mahdotonta, koska vääntymät saattavat siirtyä ympäristön lämpötilan tai kammion asennon muuttuessa. Mekaanisten epätarkkuuksien kompensointi esimerkiksi materiaalivahvuuksia kasvattamalla ei ole yleensä käytännössä mahdollista laitteiston painon ja hinnan vuoksi.

Mekaaniseen toteutukseen liittyvien ongelmien välttämiseksi tutkimuksen biologisen osuuden, dosimetrian ja mekaanisen toteutuksen tekijöiden pitäisi neuvotella etukäteen yhdessä mitkä ratkaisut ovat mahdollisia ja taloudellisesti kannattavia. Huomioitavia asioita ovat esimerkiksi koe-eläinten tapauksessa ilmanvaihto, ruokinta, laitteiston steriiliysvaatimukset ja eläinten liikkumatila. Soluviljelmien tapauksessa pitää huomioida esimerkiksi viljelmän jäähditys altistuksen aikana ja viljelmän vaatimien ympäristöolosuhteiden ylläpito. Ihmiskokeissa koehenkilöi-

den turvallisuus on pystyttävä varmistamaan ja esimerkiksi subjektiivisia tuntemuksia selvittävien tutkimusten tapauksessa laitteiston aiheuttamat äänet ja ulkonäkö on suunniteltava siten, etteivät ne vaikuta tuloksiin.

Altistuslaitteistoon kuuluu varsinaisen altistuskammion lisäksi vähintään signaalilähde, vahvistin, tehonmittauslaitteet ja kaapelointi. Lisäksi tarvitaan yleensä esimerkiksi RF-häiriöitä sietävät lämmönmittauslaitteet, tietokone sopivalla liityntärajapinnalla ja kokeesta riippuen joukko erilaisia RF-komponentteja kuten tehonjakajia, suuntakytkimiä ja adaptereita. Radiotaajuuksilla toimivat laitteet ovat kalliita ja erikoisempien komponenttien toimitusajat voivat olla useita kuukausia. Lisäksi esimerkiksi pelkät kaapelit ja adapterit saattavat muodostaa huomattavan kustannuserän. Tämän vuoksi laitteiston suunnittelu on syytä aloittaa hyvissä ajoin ennen altistusten aloittamista. Altistuksessa käytettävän signaalin valinnassa on huomioitava, että monimutkaisempia signaaleja (matkaviestinsignaalit tai muut vastaavat) tuottavat laitteet ovat käytännössä liian kalliita. Signaalia voidaan yleensä yksinkertaistaa, jolloin se on tuotettavissa peruslaitteilla, mutta ratkaisu vaatii kohtuullisen paljon aikaa ja valmiudet elektroniikan rakenteluun. Pulssimaisen signaalien tuottamiseen tarvitaan huomattavasti suuremmat ja kalliimmat vahvistimet kuin vastaavan keskimääräisen tehon tuottamiseen siniaallolla.

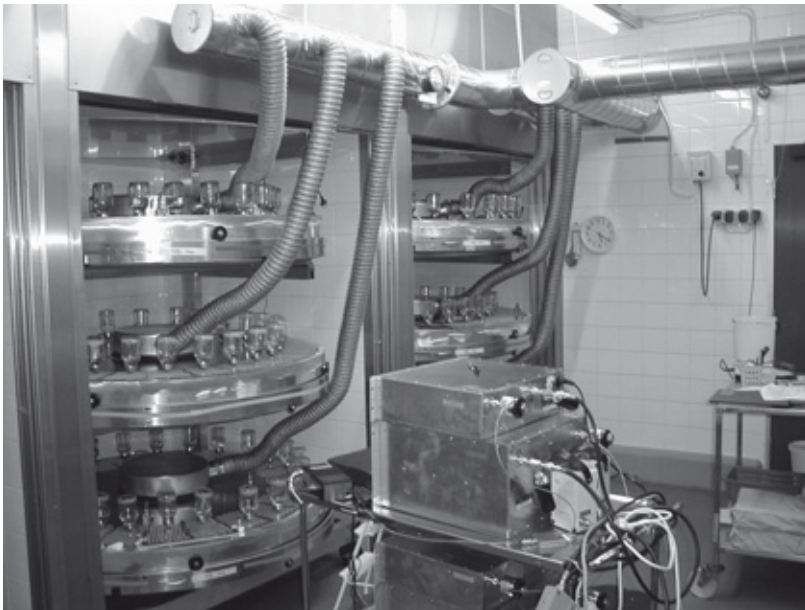
Altistuskokeet sisältävät usein jopa vuosia kestäviä altistussarjoja, joten laitteiston on kestävä kulutusta ja oltava helppokäyttöisiä. Mahdolliset korjaukset on hyväksyttävä laitteiston suunnittelijalla, jotta sähköiset ominaisuudet eivät muutu. Laitteiston käyttö on ohjeistettava yksityiskohtaisesti ja ohjeita on noudatettava. Laitteiston suunnittelussa, käytössä, huollossa ja korjauksissa on huomioitava useita asioita. Tämän vuoksi on tärkeää, että biologisen ja teknisen tutkimuksen tekijät pyrkivät selittämään toisilleen ymmärrettävällä tavalla tutkimukseen vaikuttavien asioiden merkityksen. Altistuslaitteistojen suunnittelu on vaativaa tutkimustyötä, jolle on usein erittäin vaikeata arvioida pitäviä aikatauluja. Tutkimuksia suunniteltaessa on jätettävä reilusti aikaa altistuksen suunnittelulle.

Kuvassa 7.7 esitetään STUKissa suunniteltu ja rakennettu laitteisto rottien altistamiseksi matkapuhelimien säteilylle. Laitteiston rakentaminen ja käyttöönotto osoittautuivat huomattavasti arvioitua suuremmaksi työksi. Altistus saatiin suoritettua mutta laitteistoa jouduttiin alkuvaiheessa korjaamaan useaan otteeseen ja aikatauluja jouduttiin uusimaan.

Rottia altistettiin viitenä päivänä viikossa kaksi vuotta. Kammioita oli yhdeksän, joissa kussakin 24 rottaa. Koe-eläinten suuren määrän vuoksi eläimiä ei voitu ottaa pois kammioista kaikkien altistusten välissä. Eläimille jätettiin tämän vuoksi liikkumatilaa ja kammioihin järjestettiin tehokas ilmanvaihto sekä juomapullo ja ruokaa. Nämä vaatimukset vaikeuttivat huomattavasti rakenteen mekaanista suunnittelua ja dosimetriaa.

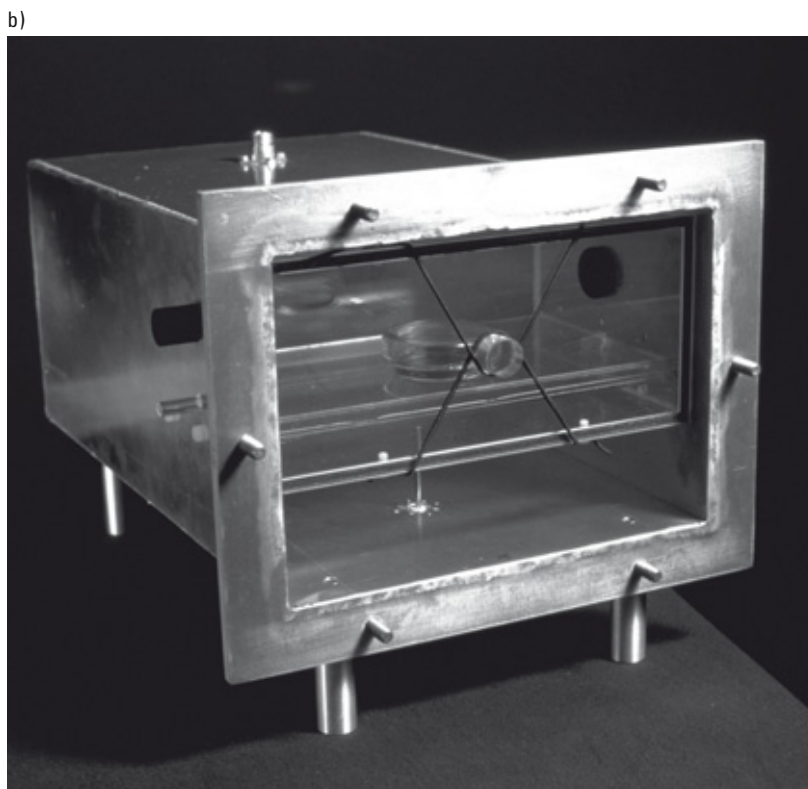
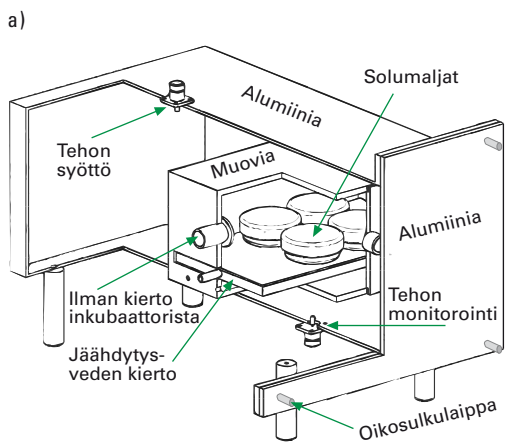
Kammioiden suuri koko aiheutti monia ongelmia. Kammioiden kannet vääntyivät valmistusvaiheessa, koska alumiinilevyn hitsaus on hyvin vaikeaa. Ilmanvaihdon aiheuttama alipaine ja vesipullojen paino väänsivät niitä lisää, mikä vaikeutti kammioiden käyttöä. Kammiot eivät myöskään mahtuneet purkamatta tutkimushuoneen oviaukoista.

Rottiin absorboituva mikroaaltoteho (SAR) määritettiin kalorimetrisillä mittauksilla sekä tietokonesimulaatioilla. Mittaustuloksista on mahdollista määrittää ainoastaan kokokehon keskimääräinen SAR mutta simulaatiotuloksista voidaan arvioida myös SAR-arvon jakauma rotan eri osissa. Rottien liikkumisesta ja kammion epäideaalisuuksista johtuvien



Kuva 7.7 Rottakammio

Kuvassa on Säteilyturvakeskuksessa suunniteltu laitteisto rottien altistamiseen GSM-matkapuhelimen säteilylle 900 MHz taajuudella. Laitteisto muodostuu yhdeksästä altistuskammioista, teholähteistä, tehomittareista ja ilmastointijärjestelmästä.



Kuva 7.8 Soluultistuskammio

a) Säteilyturvakeskuksessa suunniteltu laitteisto solujen altistamiseen GSM-matkapuhelimen säteilylle 900 MHz taajuudella. Kammioon johdetaan ilmaa solujen kasvatuskäpistä sopivien olosuhteiden ylläpitämiseksi. Solujen lämpötilaa säädelään vesikierron avulla.
 b) Valokuva kammioista

epävarmuustekijöiden vuoksi SAR pystyttiin kuitenkin määrittämään vain noin $\pm 50\%$ tarkkuudella kokokehon keskiarvosta rottien ollessa tyypillisissä paikoissa ja asennoissa. Rotan nouseminen pystyyn aiheuttaa yli 400 prosenttia korkeamman SAR:n. Tämän lisäksi SAR-arvo vaihtelee merkittävästi rotan eri osissa. Tarkempi SAR-arvon määrittäminen olisi edellyttänyt rottien liikkumatilan pienentämistä, mikä olisi ollut tutkittavan ilmiön kannalta haitallisempaa kuin suuri epävarmuus SAR-määrittämisessä.

Kuvassa 7.8 on esitetty STUKissa suunniteltu ja rakennettu kammio solujen altistamiseksi matkapuhelimien säteilylle. Solut ovat ohuessa kerroksessa noin 5 cm halkaisijaisen petrimaljan pohjalla. SAR määritettiin mittaamalla lämpötilan nousua paikallisesti pienellä, RF-häiriötä hyvin sietävällä termistorimittapäällä sekä tietokonesimuloinnein. SAR-arvo vaihtelee maljan pohjan alueella noin $\pm 40\%$ ja pystysuunnassa noin $\pm 11\%$. Yksittäisen solun sijaintia altistuksen aikana ei voida käytännössä tietää, joten tämä asettaa minimitason SAR:in epävarmuudelle.

KIRJALLISUUTTA

7.2 Syöpä ja eläinkokeet

AGNIR. Health effects from radiofrequency electromagnetic fields. Report of an Advisory Group on Non-Ionising Radiatio. Doc NRPB, 14(2): 1–177, 2003.

Anderson LE, Sheen DM, Wilson BW, Grumbein SL, Creim JA and Sasser LB. Two-Year Chronic Bioassay Study of Rats Exposed to a 1.6 GHz Radiofrequency Signal. *Radiation research*, 162:201–210, 2004.

Elder JA. Survival and cancer in laboratory mammals exposed to radiofrequency energy. *Bioelectromagnetics Supplement 6*:S101–106, 2003.

IEGMP Mobile phones and health. Report of Independent Expert Group on Mobile Phones (Chairman Sir William Stewart) Chilton, NRPB, 2000.

Repacholi MH, Basten A, Gebiski V, Noonan D, Finnie J and Harris AW. Lymphomas in E μ -*Pim1* transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields *Radiat. Res.* 147:631–640, 1997.

Shirai T, Kawabe M, Ichihara T, Fujiwara O, Taki M, Watanabe S, Wake K, Yamanaka Y, Imaida K, Asamoto M and Tamano S. Chronic Exposure to a 1.439 GHz Electromagnetic Field used for Cellular Phones does Not Promote N-Ethylnitrosourea Induced Central Nervous System Tumors in F344 Rats. *Bioelectromagnetics*, 26:59–68, 2005.

Sommer AM, Streckert J, Bitz AK, Hansen VW and Lerchl A. No Effects of GSM-Modulated 900 MHz Electromagnetic Fields on Survival Rate and Spontaneous Development of Lymphoma in Female AKR/J Mice. *BMC Cancer*, 4: 77, 2004.

SSI's Independent Expert Group on Electromagnetic Fields. Recent research on mobile telephony and cancer and other selected biological effects: First annual report from independent expert group on electromagnetic fields. Swedish Radiation Protection Authority, Dnr 00/1854/02: 1–77, 2003.

Utteridge TD, Gebiski V, Finnie JW, Vernon-Roberts B and Kuchel TR. Long-Term Exposure of E μ -*Pim1* Transgenic Mice to 898.4 MHz Microwaves does not Increase Lymphoma Incidence. *Radiat. Res.* 158, 357–364, 2002.

7.3 Syöpävaaraa koskevat väestötutkimukset

Ahlbom A, Green A, Kheifets L, Savitz D, Swerdlow A. ICNIRP Standing Committee on Epidemiology. Epidemiology of health effects of radio-frequency exposure. *Environ Health Perspect*, 112(17): 1741–54, 2004.

Auvinen A, Hietanen M, Luukkonen R, Koskela R-S. Brain tumors and salivary gland cancers among cellular telephone users. *Epidemiology* 13: 356–359, 2002.

Elwood JM. Epidemiological studies of radio frequency exposures and human cancer. *Bioelectromagnetics*, Suppl 6: 63–73, 2003.

Frumkin H, Jacobson A, Gansler T, Thun MJ. Cellular phones and risk of brain tumors. *CA – Cancer J Clin*, 51: 137–141, 2001.

Health Council of the Netherlands. Mobile telephones; an evaluation of health effects. Publication no 2002/01E. Haag, Health Council of the Netherlands, 2002.

Independent Expert Group on Mobile Phones. www.iegmp.org.uk

Krewski D, Byus CV, Glickman BW ym. Recent advances in research on radiofrequency fields and health. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev*, 4: 145–59, 2001.

National Radiological Protection Board. Health Effects from Radiofrequency Electromagnetic Fields: Report of an independent Advisory Group on Non-ionising Radiation.

www.nrpb.org/publications

Repacholi MH. Health risks from the use of mobile phones. *Toxicol Lett*, 120: 323–31, 2001.

Rothman KJ. Epidemiological evidence on health risks of cellular telephones. *Lancet*, 356: 1837–1840, 2000.

SSI's Independent Expert Group on Electromagnetic fields. Recent research on mobile telephony and cancer and other selected biological effects. http://www.ssi.se/english/EMF_exp_Eng_2003.pdf

Wrensch M, Minn Y, Chew T ym. Epidemiology of primary brain tumors: current concepts and review of the literature. *Neuro-oncology*, 4: 278–299, 2002.

7.4 Hermosto

D’Andrea JA, Chou CK, Johnston SA, Adair ER. Microwave effects on the nervous system. *Bioelectromagnetics Supplement 6*:S107–147, 2003.

Cook CM, Thomas AW, Prato FS. Human electrophysiological and cognitive effects of exposure to ELF magnetic and ELF modulated RF and microwave fields: A review of recent studies. *Bioelectromagnetics* 23:144–157, 2002.

Eulitz C, Ullsperger P, Freude G and Elbert T. Mobile phones modulate response patterns of human brain activity. *NeuroReport*, Vol. 9(14): 3 229–3 232, 1998.

Freude G, Ullsperger P, Eggert S and Ruppe I. Effects of microwaves emitted by cellular phones on human slow brain potentials. *Bioelectromagnetics*, 19: 384–387, 1998.

Frey AH. Headaches from cellular telephones: Are they real and what are the implications? *Environmental Health Perspectives*, 106: 101–103, 1998.

Haarala C, Bergman M, Laine M, Revonsuo A, et al. Electromagnetic field emitted by 902 MHz mobile phones shows no effect on children’s cognitive function. *Bioelectromagnetics* 26, issue S7:S144–150, 2005.

Haarala C, Björnberg L, Ek M, Laine M, Revonsuo A, Koivisto M ja Hämäläinen H. Effect of a 902 MHz Electromagnetic field emitted by mobile phones on human cognitive function: A replication study. *Bioelectromagnetics*, 24: 283–288, 2003.

Haarala C, Ek M, Björnberg L, Laine M, Revonsuo A, Koivisto M and Hämäläinen H. 902 MHz Mobile phone does not affect short term memory in humans. *Bioelectromagnetics*, In Press.

Haarala C, Bergman B, Laine M, Revonsuo A, Koivisto M and Hämäläi-

nen H. The electromagnetic field emitted by 902 MHz mobile phones shows no effects on children's cognitive function. Submitted.

Hamblin DL, Wood AW. Effects of mobile phone emissions on human brain activity and sleep variables. *Int J Radiat Biol* 78:659–669, 2002.

Hietanen M, Kovala T and Hämäläinen A-M. Human exposure to radio-frequency fields emitted by cellular phones. *Scand J Work Environ Health*; 26(2): 87–92, 2000.

Hietanen M, Hämäläinen A-M and Husman T: Hypersensitivity Symptoms Associated with Exposure to Cellular Telephones: No Causal Link; *Bioelectromagnetics*, 23: 264–270, 2002.

Hocking B. Preliminary report: symptoms associated with mobile phone use. *Occupational Medicine*, 48: 357–360, 1998.

Huber R, Graf T, Cote KA, Wittmann L, Gallmann L, Matter D, Schuderer J, Kuster N, Borbély AA and Achermann P. Exposure to pulsed high-frequency electromagnetic field during waking affects human sleep EEG. *NeuroReport*, Vol. 11(15): 3 321–3 325, 2000.

Koivisto M, Revonsuo A, Krause C, Haarala C, Sillanmäki L, Laine M and Hämäläinen H. Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans. *NeuroReport*, Vol. 11(2): 413–415, 2000.

Koivisto M, Krause CM, Revonsuo A, Laine M and Hämäläinen H. The effects of electromagnetic field emitted by GSM phones on working memory. *NeuroReport* Vol. 11(8): 1 641–1 643, 2000.

Koivisto M, Haarala C, Krause CM, Revonsuo A, Laine M and Hämäläinen H. GSM phone signal does not produce subjective symptoms. *Bioelectromagnetics* 22: 212–215, 2001.

Krause C, Sillanmäki L, Koivisto M, Häggqvist A, Saarela C, Revonsuo A, Laine M and Hämäläinen H. Effects of electromagnetic field emitted by cellular phones on the EEG during a memory task. *NeuroReport* Vol. 11(4): 761–764, 2000a.

Krause CM, Sillanmäki L, Koivisto M, Häggqvist A, Saarela C, Revonsuo A, Laine M and Hämäläinen H. Effects of Electromagnetic Field

Emitted by Cellular Phones on the Electroencephalogram During a Visual Working Memory Task. *International Journal of Radiation Biology* 76: 1 659–1 667, 2000b.

Mann K and Röschke J. Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep. *Neuropsychobiology*, 33: 41–47, 1996.

Mann K, Roeschke J, Connemann B and Beta H. No effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on heart rate variability during human sleep. *Neuropsychobiology*, Vol. 38(4): 251–256, 1998.

Preece AW, Goodfellow S, Wright MG, Butler SR, et al. Effect of 902 MHz mobile phone transmission on cognitive function in children. *Bioelectromagnetics* 26, issue S7:S138–143, 2005.

Preece AW, Iwi G, Davies-Smith A, Wesnes K, Butler S, Lim E and Valey A. Effect of a 915-MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man. *International Journal of Radiation Biology*, 75: 447–456, 1999.

Rubin GJ, Das Munshi J, Wessely S. Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. *Psychosom Med.* 67(2): 224–232, 2005

Russo R, Fox E, Cinel C, Boldini A, Defeyter MA, Mirsheker-Syahkal D, Mehta A. Does acute exposure to mobile phones affect human attention? *Bioelectromagnetics* 27(3) : 215–20, 2006.

Röschke J and Mann K. No short-term effects of mobile radio telephone on the awake human electroencephalogram. *Bioelectromagnetics*, 18: 172–176, 1997.

Van Leeuwen GMJ, Lagendijk JJW, Van Leersum BJAM, Zwamborn APM, Hornsleth SN and Kotte ANTJ. Calculation of change in brain temperatures due to exposure to a mobile phone. *Physics in Medicine and Biology*, 44: 2 367–2 379, 1999.

Wagner P, Röschke J, Mann K, Hiller W, Frank C. Human sleep under the influence of pulsed radiofrequency electromagnetic fields: a polysomnographic study using standardized conditions. *Bioelectromagnetics*, 19: 199–202, 1998.

7.5 Lisääntymisterveys

Heynick LN, Merritt JH. Radiofrequency fields and teratogenesis. *Bioelectromagnetics Suppl 6*: 174–186, 2003.

IEGMP. Mobile Phones and Health. Report of an Independent Expert Group on Mobile Phones. UK Minister of Public Health. National Radiological Protection Board, Chilton, Oxon, United Kingdom, 2000. <http://www.iegmp.org.uk>.

Jensh RP. Behavioural teratologic studies using microwave radiation: Is there an increased risk from exposure to cellular phones and microwave ovens. *Reprod Toxicol*, 11: 601–611, 1997.

Knave B. Electromagnetic fields and health outcomes. *Ann Acad Med Singapore* 30: 489–493, 2001.

Magras IN, Xenos TD. RF radiation-induced changes in the prenatal development of mice. *Bioelectromagnetics* 18: 455–461, 1997.

Ouellet-Hellstrom R, Stewart WF. Miscarriages among female physical therapists who report using radio- and microwave-frequency electromagnetic radiation. *Am J Epidem* 15: 775–786, 1993.

Repacholi MH. Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics* 19: 1–19, 1998.

7.6 Radiotaajuisten kenttien biologisia vaikutuksia

Balcer-Kubiczek EK, Harrison GH. Evidence for microwave carcinogenesis in vitro. *Carsinogenesis*, 6: 859–864, 1985.

Balcer-Kubiczek EK, Harrison GH. Induction of Neoplastic Transformation in C3H/10T1/2 cells by 2.45-GHz microwaves and phorbol ester. *Radiat Res*, 117: 531–537, 1989.

Balcer-Kubiczek EK, Harrison GH. Neoplastic transformation of C3H/10T1/2 cells following exposure to 120-Hz modulated 2.45-GHz microwaves and phorbol ester tumor promoter. *Radiat Res*, 126: 65–72, 1991.

Bioelectromagnetics 24, Supplement 6: 1–213, 2003.

Cleary SF, Cao G, Liu L-M, Egle PM, Shelton KR. Stress Proteins Are Not Induced in Mammalian Cells Exposed to Radiofrequency or Microwave Radiation. *Bioelectromagnetics*, 18: 499–505, 1997.

de Pomerai D, Daniells C, David H, Allan J, Duce I, Mutwakil M, Thomas D, Sewell P, Tattersall J, Jones D, Candido P. Non-thermal heat-shock response to microwaves. *Nature*, 405: 417–418, 2000.

Jokela K, Leszczynski D, Paile W, Salomaa S, Puranen L, Hyysalo P. Radiation safety of handheld mobile phones and base stations. STUK-A161 Report. Helsinki: STUK, 1999.

Leszczynski D, Joenväärä S, Reivinen J, Kuokka R. Non-thermal activation of the hsp27/p38MAPK stress pathway by mobile phone radiation in human endothelial cells: Molecular mechanism for cancer- and blood-brain barrier related effects. *Differentiation*, 70: 120–129, 2002.

Litovitz TA, Krause D, Penafiel M, Elson EC, Mullins JM. The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity. *Bioelectromagnetics*, 14: 395–403, 1993.

Meltz M. Radiofrequency exposure and mammalian cell toxicity, genotoxicity, and transformation. *Bioelectromagnetics Supplement 6*:196–213, 2003.

Reflex: Risk Evaluation of Potential Environmental Hazards From Low Frequency Electromagnetic Field Exposure Using Sensitive *in vitro* Methods, Final Report 2004. A project funded by the EU under the programme “Quality of Life and Management of Living Resources”, Key Action 4 “Environment and Health”: QLK4-CT-1999-01574.

The Royal Society of Canada Report. A review of the potential health risks of radiofrequency fields from wireless telecommunications devices. The Royal Society of Canada, Ontario, 1999.

Stewart Report: Mobile Phones and Health. Report of Independent Expert Group on Mobile Phones. London: National Radiation Protection Board NRPB, 2000.

Vijayalaxmi, Leal BZ, Szilagyi M, Prihoda TJ, Meltz ML. Primary DNA damage in human blood lymphocytes exposed in vitro to 2450 MHz radiofrequency radiation. *Radiat Res*, 153: 479–486, 2000.

Vijayalaxmi, Pickard WF, Bisht KS, Leal BZ, Meltz ML, Roti Roti JL, Straube WL, Moros EG. Cytogenetic studies in human blood lymphocytes exposed in vitro to radiofrequency radiation at a cellular telephone frequency (835.62 MHz, FDMA). *Radiat Res*, 155: 113–121, 2001.

7.7 RF-altistuskokeiden suunnittelun tekniset näkökohdat

Kuster N, Schönborn F. Recommended minimal requirements and development guidelines for exposure setups of bio-experiments addressing the health risk concern of wireless communications. *Bioelectromagnetics*, 21: 508–514, 2000.

Kuster N, Schuderer F, Christ A, Futter P, Ebert S. Guidance for exposure design of human studies addressing health risk evaluations of mobile phones. *Bioelectromagnetics*, 25: 524–529, 2004.

