



FI9700114

STUK-A141

KESÄKUU 1997

Matkapuhelimien ja tukiasemien säteilyturvallisuus

**Kari Jokela, Dariusz Leszczynski, Wendla Paile,
Sisko Salomaa, Lauri Puranen, Petri Hyysalo**

SÄTEILYTURVAKESKUS
PL 14
00881 Helsinki
puh. (09) 759 881

VOL 28 № 20

ISBN 951-712-207-1
ISSN 0781-1705

Oy Edita Ab
Helsinki 1997

Myynti:
Säteilyturvakeskus
PL 14, 00881 Helsinki
Puh. (09) 759 881

Kari Jokela, Dariusz Leszczynski, Wendla Paile, Sisko Salomaa, Lauri Puranen, Petri Hyysalo. Matkapuhelimien ja tukiasemien säteilyturvallisuus. Helsinki 1997, 73 s.

ISBN 951-712-207-1

ISSN 0781-1705

Avainsanat matkapuhelimet, radiotaajuinen säteily, mikroaallot, ominaisabsorptionopeus, terveystaitat

TIIVISTELMÄ

Henkilökohtaisten matkapuhelimien viimeaikainen yleistymisen on lisännyt merkittävästi väestön altistumista radiotaajuiselle säteilylle. Vaikkakin matkapuhelimien säteilyteho on suhteellisen pieni, antenni on niin lähellä päätä, että koko väestöön sovellettava paikallisen ominaisabsorptionopeuden SAR:n raja 2 W/kg voi joissakin tapauksissa hieman ylittyä. Säteilyn aiheuttama lämpötilan nousu päässä on kuitenkin niin pieni, että sillä ei ole mitään fysiologista merkitystä. Soluviljelmillä tehdyt kokeet viittaavat siihen, että myös muita kuin lämmöstä johtuvia vaikutuksia voisi esiintyä, mutta toistaiseksi ei ole minkäänlaisia vakuuttavia todisteita siitä, että lämmitystason alapuolella radiotaajuinen säteily aiheuttaisi sairauksia tai haitallisia fysiologisia muutoksia elimistössä.

Sähkömagneettisen häiriön johdosta matkapuhelimen käyttöä ei suositella sydämentahdistimen kantajalle, jos tahdistimen häiriösietoisuutta ei ole varmistettu.

Väestön altistuminen tukiasemien säteilylle jää lähes aina huomattavasti väestöä koskevien tehotiheysrajojen alapuolelle.

Kari Jokela, Dariusz Leszczynski, Wendla Paile, Sisko Salomaa, Lauri Puranen, Petri Hyysalo. Radiation safety of mobile phones and base stations. Helsinki 1997, 73 pp.

ISBN 951-712-207-1

ISSN 0781-1705

Key words mobile phones, radio-frequency radiation, microwaves, specific absorption rate, health risks

SUMMARY

The recent expansion of personal telecommunications has led to a rapid increase in the exposure of people to the radio-frequency (RF) radiation. Although the mobile phones are low power devices, the antenna is so close to the head that the local exposure may slightly exceed 2 W/kg, the current exposure limit for the local specific absorption rate SAR for the general public. The increase in the temperature is, however, too small to have any physiological significance. On the basis of experiments with cell cultures it is possible that other biological effects caused by some unknown non-thermal mechanism exist, but thus far there is no conclusive biological or epidemiological evidence to suggest any diseases or adverse physiological changes below the thermal threshold.

The use of a mobile phone by a person wearing a pace-maker, the immunity of which against the electromagnetic interference from the mobile phone has not been assured, is not recommended.

The exposure caused by the base stations is in almost all practical cases well below the power density limits for general public.

SISÄLLYSLUETTELO

	Sivu
1 JOHDANTO	7
2 MATKAPUHELIMIEN TEKNIikka JA KÄYTTÖ	10
2.1 Matkapuhelinverkot	10
2.2 Matkapuhelimien rakenne ja tyypit	12
3 SÄTEILYN ABSORBOITUMINEN PÄÄHÄN	16
3.1 Ominaisabsorptionopeus SAR	16
3.2 SAR:n määrittäminen	18
3.3 Dosimetristen tutkimusten tuloksia	19
4 BIOLOGISET VAIKUTUKSET	26
4.1 Yleistä	26
4.2 Lämmön nousu päässä ja sen fysiologiset vaikutukset	26
4.3 Keskushermostovaikutukset <i>in vivo</i>	29
4.4 Silmävaikutukset	32
4.5 Säteilyn vaikutukset solukalvon fysiologiaan	34
4.5.1 Yleistä	34
4.5.2 Ionikanavat	35
4.5.3 Solukalvon läpäisevyys molekyyleille	36
4.5.4 Solukalvon juoksevuus	37
4.5.5 Muutokset solun morfologiassa	37
4.6 Säteilyn vaikutukset entsyymien aktiivisuuteen ja ekspressioon	38
4.6.1 Koliiniesteraasi ja asetyylikoliiniesteraasi	38
4.6.2 β -galaktosidaasi	39
4.6.3 Ornitiniidekarboksylaasi	39
4.7 Radiotaajuisen säteilyn mahdollinen osuus syövän syntyyn	39
4.7.1 Genotoksiset vaikutukset	39
4.7.2 Vaikutukset solunjakautumiseen ja syövän promootioon <i>in vitro</i>	43
4.7.3 Eläinkokeet syövän synnyn tutkimiseksi <i>in vivo</i>	43
4.8 Epidemiologiset tutkimukset	46

5	SÄTEILYTURVALLISUUSSTANDARDIT	48
5.1	Yleistä	48
5.2	Altistumisrajat	49
5.2.1	IRPA ja ICNIRP	49
5.2.2	CENELEC	52
5.2.3	EU:n komissio	52
5.2.4	FCC	53
5.2.5	STM	54
6	TUKIASEMIEN SÄTEILYTURVALLISUUS	55
6.1	Tukiasemien sijoituspaikat	55
6.2	Turvaetäisyydet	56
7	SYDÄMENTAHDISTIMIEN HÄIRIINTYMINEN	58
8	YHTEENVETO JA SUOSITUKSIA	61
8.1	Yhteenveto	61
8.2	Säteilyturvallisuuksuosituksia	62
	KIRJALLISUUSVIITTEET	63

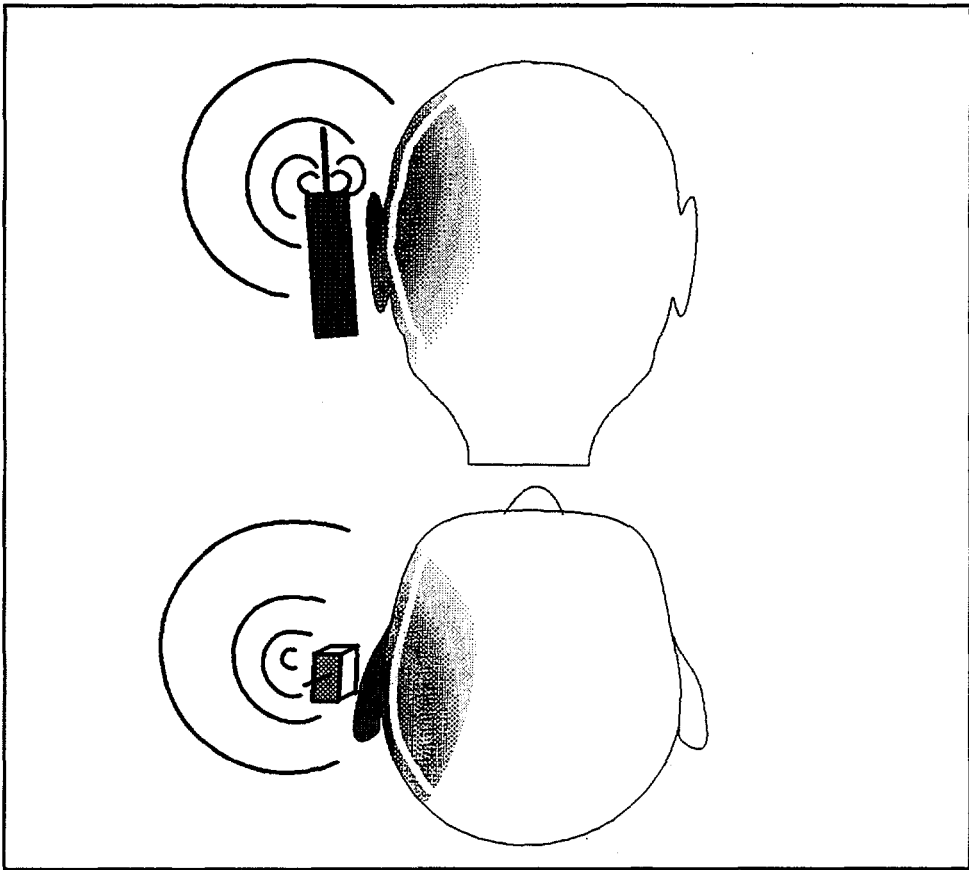
1 JOHDANTO

Matkapuhelimet säteilevät radioaaltoja, joiden taajuudet ovat yleisimmin välillä 100...2000 MHz. Jopa yli puolet matkapuhelimien säteilemästä tehosta voi absorboitua päähän, minkä seurauksena ihon ja aivojen pintaosien lämpötila voi hieman nousta (Kuva 1). Vaikka kudosten lämpeneminen on niin vähäistä, että sillä ei ole fysiologista merkitystä, soluihin kohdistuva sähkökenttä voi teoriassa häiritä solujen toimintaa jollain muulla kuin lämmöstä johtuvalla mekanismilla. Matkapuhelin voi myös häiritä sydäntahdistinta.

Ensimmäiset matkapuhelinjärjestelmät tulivat Suomessa käyttöön 1970-luvun alussa. Matkapuhelimien määrä ja käyttö alkoivat kuitenkin vasta 80- ja 90-luvun vaihteessa voimakkaasti lisääntyä seurauksena laitteiden hinnan halpenemisesta ja teknisestä kehittämisestä nykyiseen taskuun sopivaan kokoon. Samalla myös altistumistaso lisääntyi jonkin verran, koska nykyisissä pienikokoisissa käsipuhelimissa antenni on kauempana päästä, kuin vanhemmissa suurikokoisemmissa malleissa. Vuoden 1996 lopulla Suomen matkapuhelinverkoissa oli yhteensä hieman yli 1,5 miljoonaa tilaajaa.

Uudentyyppisillä käsipuhelimilla tehdyt ensimmäiset dosimetriset mittaukset (Cleveland ja Athey 1989) osoittivat, että vastoin aiempaa käsitystä jo 1 W säteilyteholla päähän kohdistuva absorptio voi ylittää koko väestölle esitetyt kansainväliset ohjearvot (CENELEC 1995, ICNIRP 1996). Väestörajan ylittyminen on myöhemmissä tutkimuksissa vahvistunut (Dimbylow ja Mann 1994, Meier ym. 1994, Kuster ja Balzano 1996) ja samalla on myös selvinnyt, että biologisiin tutkimuksiin perustuvat altistumisrajat valvotuissa oloissa työskenteleville henkilöille (IEEE 1992, IRPA/INIRC 1988) eivät ylity.

Vaikkakaan radiotaajuuden säteilyn biologisten vaikutusten tutkimus ei ole yleisesti tuottanut hälyttävää tietoa matkapuhelimien terveyshaitoista (ICNIRP 1996, WHO 1993), on matkapuhelimien mahdollisiin terveyshaittoihin kohdistuva mielenkiinto perusteltua. Yhä suurempi osa väestöstä altistuu matkapuhelimien säteilylle, altistumistaso on suhteellisen lähellä lämpövaikutusten kynnystasoa ja myös muut kuin lämmöstä aiheutuvat vaikutukset saattavat olla mahdollisia. Lisäksi on huomioitava, että kyseessä on Suomen kansantaloudelle tärkeä teollisuuden ala, jonka tuotteiden aiheuttamat potentiaaliset terveyshaitat on tunnettava mahdollisimman hyvin, jotta ne voidaan ehkäistä ennakoilta uusia teknologioita kehitettäessä.



Kuva 1. Matkapuhelimen säteilyn absorboituminen päähän kaavamaisesti esitettynä.

Vuonna 1985 julkaistiin Säteilyturvakeskuksen raportti radiotaajuiseen säteilyyn liittyvistä turvallisuuskysymyksistä (Jokela 1985), jossa mm. suositeltiin, että Suomessa otettaisiin käyttöön kansainvälisen säteilysuojausjärjestön IRPA:n suosittamat ohjearvot radiotaajuiselle säteilylle (IRPA/ INIRC 1988). Vuonna 1990 sosiaali- ja terveysministeriö vahvisti ohjearvot kansallisiksi määräyksiksi ionisoimattoman säteilyn altistumisrajoista annetulla päätöksellä (STMp 200/90), jota on myöhemmin hieman muutettu säteilysuojauslainsäädännön uudistuksen yhteydessä (STMp 1474/91).

Tämän raportin päätarkoituksena on käydä läpi ja arvioida keskeisimmät noin 10 vuoden aikana julkaistut tutkimukset radiotaajuisen säteilyn absorboitumisesta päähän ja sen aiheuttamista biologisista vaikutuksista. Raportin valmistumisvai-

heessa saatiin päätökseen myös Eurooppalaiseen COST 244 tutkimusohjelmaan liittyvä kotimainen tutkimusohjelma "Sähkömagneettisten kenttien biologiset vaikutukset", jonka tuloksia on mahdollisuuksien mukaan pyritty otamaan huomioon.

Erityistä huomiota kiinnitetään sellaisiin tutkimustuloksiin, jotka viittaavat mahdolliseen keskushermostosyöpään, silmävaurioihin sekä aivotoiminnan häiriintymiseen sellaisella altistumistasolla, jossa kudosten lämpötila ei merkittävästi nouse. Digitaalisten matkapuhelinjärjestelmien johdosta pulssi- ja amplitudi-moduloidun säteilyn mahdolliset erityisvaikutukset ovat myös esillä. Biologisen katsauksen sekä kansainvälisten suositusten (CENELEC 1995, CENELEC 1997, ICNIRP 1996) perusteella esitetään matkapuhelimien säteilyturvallisuuksiin koskevia suosituksia. Muina aiheina käsitellään vielä matkapuhelimien aiheuttamia häiriöitä sydäntahdistimille sekä tukiasemien säteilyturvallisuuksiin. Kehon ulkopuolella olevien elektronisten laitteiden häiriintymisestä aiheutuvat vaarat (Bassen 1996) eivät kuulu tämän raportin aihepiiriin.

2 MATKAPUHELIMIEN TEKNIikka JA KÄYTTÖ

2.1 Matkapuhelinverkot

Ensimmäisenä matkapuhelinverkkona käsivälitteinen AutoRadioPuhelin (ARP)-verkko aloitti Suomessa toimintansa vuonna 1971. Tilaajamäärä kasvoi hitaasti ylittäen 10 000 vuonna 1976 ja 20 000 vuonna 1980 sekä 30 000 vuonna 1982 (kuva 2). Nykyään Mobinet-nimisenä se kattaa 322 tukiasemapaikkoineen ja 800 kanavineen koko maan. Verkon käyttäjämäärä oli suurimmillaan noin 36 000 vuonna 1986, mistä lähtien se on pienentynyt käyttäjien siirtyessä uudempiin järjestelmiin.

Nordisk Mobil Telefon (NMT)-verkko alkoi toimia 450 MHz taajuusalueella vuonna 1982. NMT450-verkon kapasiteetti oli 180 kanavaa, mikä kävi riittämättömäksi taajama-alueilla muutamassa vuodessa. NMT450-verkon tilaajamäärä kuitenkin kasvoi tasaisesti vuoteen 1995 asti, jolloin se pysähtyi noin 200 000 tilaajan tasolle. NMT450-verkko kattaa lähes koko maan joitakin harvaanasuttuja alueita lukuunottamatta.

NMT900-verkko perustettiin vuonna 1986 korvaamaan NMT450-verkon riittämättömää kapasiteettia varsinkin taajama-alueilla. Verkon tilaajamäärä kasvoi 1990-luvun alussa hyvin nopeasti. Vuonna 1995 käyttäjiä oli noin 440 000 eikä niiden määrä ole enää merkittävästi kasvanut. NMT900-verkon kattavuus on pienempi kuin NMT450-verkon. Esimerkiksi maaseudulla voi olla vaikeuksia saada luotettavia yhteyksiä.

Global System for Mobile communications (GSM)-verkko aloitti toimintansa vuonna 1992. Verkon tarkoituksena oli tarjota uutta palvelua taajama-alueilla tukkeutuneiden matkapuhelinverkkojen käyttäjille. Tilaajamäärä on kasvanut muihin järjestelmiin verrattuna kaikkein nopeimmin vuodesta 1994 lähtien sekä kasvaa edelleen. Vuoden 1996 lopulla käyttäjiä oli noin 860 000.

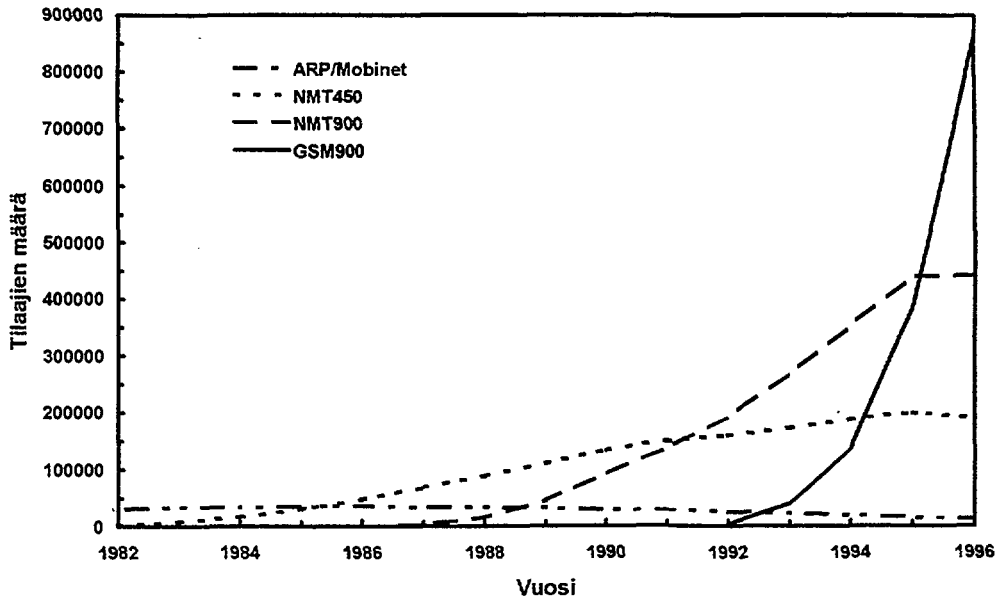
Taulukko I. Suomessa käytettävien matkapuhelinverkkojen teknisiä tietoja.

Järjestelmä	ARP/ Mobinet	NMT450	NMT900	GSM	DCS1800
Lähetystaajuus (MHz) puhelin tukiasema	152,9-154,9 147,9-149,9	453-457,5 463-467,5	890-915 935-960	890-915 935-960	1710-1785 1805-1880
Modulaatio	analoginen	analoginen	analogi- nen	digitaali- nen	digitaali- nen
Käsi puhelimen suurin teho ¹⁾ (W)	5	1,5	1	2	1
Käsi puhelimen suurin keski- määräinen teho (W)	5	1,5	1	0,25	0,125

¹⁾ GSM:llä ja DCS:lla pulssiteho

Matkapuhelimien suuren suosion vuoksi nykyisetkin matkapuhelinverkot ovat saattaneet ajoittain ylikuormittua taajama-alueilla, ja sen vuoksi vuodesta 1997 lähtien otetaan käyttöön uusia DCS1800-verkkoja. Näiden käyttöönoton mahdollistaa tarvittavan taajuusalueen vapautuminen aikaisemmasta radiolinkkikäytöstä. Suomessa käytettävien matkapuhelinverkkojen toimintataajuudet, modulaatiot ja käsimatkapuhelimien suurimmat tehot on esitetty taulukossa I.

Matkapuhelinverkkojen tilaajamäärien kehitys vuosina 1970 - 1997 on esitetty kuvassa 2. Kunkin vuoden kohdalla on vuoden lopussa ollut tilaajamäärä. Vuoden 1996 lopussa Suomessa oli yli 1,5 miljoonaa matkapuhelinliittymää, mikä merkitsee 29 liittymää 100 asukasta kohti. Matkapuhelimien käyttäjätiheys oli v. 1996 lopussa maailman suurin. Matkapuhelinverkkojen ylläpitäjiltä saatujen tietojen mukaan matkapuhelimella soitetun puhelun keskimääräinen kestoaika on 1 - 2 minuuttia. Puhelujen kestoaika ja henkilökohtainen lukumäärä voi kuitenkin jatkossa lisääntyä tavanomaisten puhelimien korvautuessa matkapuhelimilla.



Kuva 2. Matkapuhelinverkkojen tilaajamäärien kehitys vuosina 1982-1996 Suomessa.

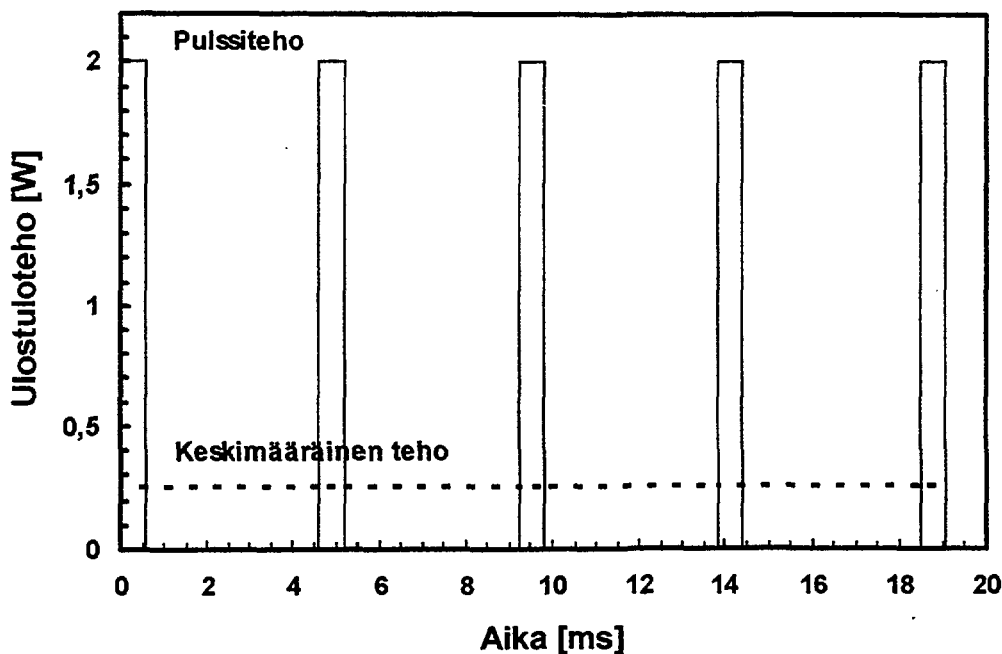
2.2 Matkapuhelimien rakenne ja tyypit

Vanhemmissa matkapuhelinverkoissa käytetään analogista ja uudemmissa GSM- ja DCS-verkoissa digitaalista modulaatiota. Analogisessa modulaatiossa puhe muuttuu puhelimen mikrofonissa analogiseksi signaaliksi, jolla moduloidaan puhelimen lähettämää radiotaajuuden kantoaallon taajuutta (ARP/Mobinet) tai vaihetta (NMT). Puhelin lähettää puhuttaessa jatkuvaa signaalia, jonka amplitudi ei muutu.

Digitaalisessa modulaatiossa mikrofonin analogisesta signaalista otetaan aluksi sekunnissa 8000 näytettä, joista kukin koostuu 13 bitistä (nollia ja ykkösiä). Näin syntyvä bittijono tiivistetään ensin puhekooderilla, minkä jälkeen siihen lisätään siirtotiellä mahdollisia syntyviä virheitä korjaavat koodit. Muokatulla bittijonolla moduloidaan puhelimen kantoaaltoa siten, että nolla muuttaa kantoaallon vaihetta -90° ja ykkönen $+90^\circ$ (minimum shift keying, MSK). Kantoaallon amplitudi ei muutu vielä tässä vaiheessa. Moduloitu signaali menee vielä suodattimen (ns. Gaussin muotoinen suodatin) läpi signaalin kaistanleveyden pienentämiseksi. Puhelin lähettää moduloidusta signaalista näytteitä lyhyinä pulseina, joiden kesto-aika on 0,577 ms (1 aikaväli) ja toistoväli 4,615 ms (8 aikaväliä). GSM-

puhelimesta lähtevä teho on esitetty ajan funktiona kuvassa 3. Keskimääräinen teho on 1/8 pulssitehosta. Muiden matkapuhelinverkkojen puhelimien lähettäessä signaalia vain puhuttaessa, GSM-puhelin lähettää myös muulloin yhteydenpitosignaalin voimakkaimpaan tukiasemaan. Akkujen säästämiseksi puhelin siirtyy ns. DTX (discontinuous transmission mode)-tilaan, jolloin keskimääräinen teho on 1/16 pulssitehosta.

Matkapuhelimet voidaan rakenteensa mukaan jakaa käsipuhelimiin sekä ajoneuvo- ja kannettaviin puhelimiin. Käsipuhelimessa kuuloke, mikrofoni ja antenni ovat kiinteästi samassa kotelossa, jolloin antenni on käyttötilanteessa muutaman sentin etäisyydellä päästä ja joissakin tilanteissa saattaa jopa koskettaa korvalehteä. Kannettavissa puhelimeissa mikrofoni ja kuuloke ovat perinteisen langallisen puhelimen tapaan erillisessä osassa, joka on välijohdon kautta yhteydessä lähetin/vastaanotinosaan. Puhelimen käyttäjän etäisyys lähetin/vastaanotinosan antennista voi välijohdon ansiosta olla yli puoli metriä. Ajoneuvopuhelin on ajoneuvoon kiinteästi asennettu kannettava puhelin, jonka antenni on auton ulkopuolella.

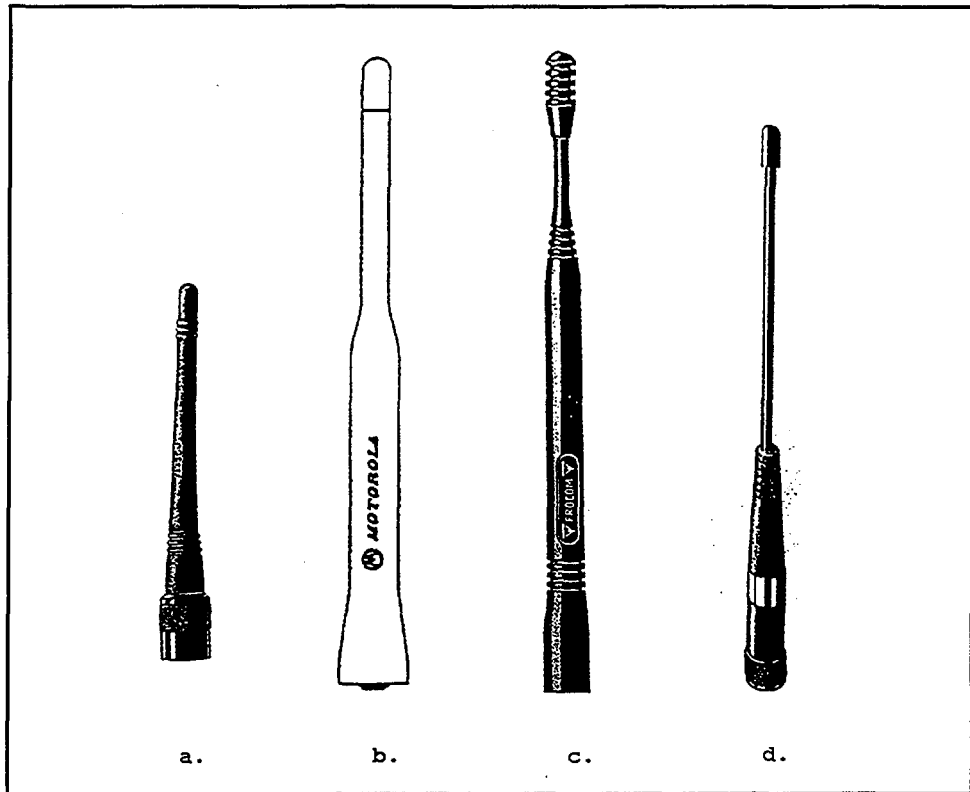


Kuva 3. GSM-puhelimen ulostuloteho ajan funktiona.

Käytetyin käsimatkapuhelimen antenni on piiska-antenni, jonka pituus voi olla tyypillisesti $\lambda/4$, $3\lambda/8$ tai $\lambda/2$ (λ on aallonpituus). Piiska-antenni on helppo ja halpa valmistaa ja sen taajuuskaista on laaja sekä säteilykuvio matkapuhelimeen sopiva. Esimerkkejä 900 MHz taajuusalueen piiska-antenneista on kuvassa 4. Antennin virtajakauma muuttuu antennin pidetessä siten, että virtamaksimi siirtyy antennin tyvestä keskikohtaan päin. $\lambda/4$ -antennin virtamaksimi sijoittuu puhelimen käyttäjän päähän lähelle ja lisäksi puhelimen koteloon syntyy suurehkoja virtoja, koska kotelo toimii antennin maatasona. $3\lambda/8$ ja $\lambda/2$ -antenneilla kotelon virrat ovat pienempiä ja antennin virtamaksimi on kauempana päästä.

Piiska-antennien lisäksi matkapuhelimissa käytetään myös heliksiantennia, joka koostuu kelaksi kierretystä langasta. Etuna on antennin pieni koko. Esimerkiksi 900 MHz taajuusalueella käytettävän $\lambda/4$ -antennin pituus on 100 mm ja heliksiantennin pituus vain 26 mm. Nykyisissä matkapuhelimissa käytetään usein myös antenniratkaisua, jossa ulosvedettynä toimii $\lambda/4$ -antenni ja sisään työnnettynä piiska-antennin tyvässä sijaitseva heliksiantenni. Piiska- ja heliksiantennit rikkoutuvat kuitenkin helposti, jos puhelinta kolhitaan esimerkiksi pudottamalla. Siksi on kehitetty myös koteloon integroituja liuskamaisia antennirakenteita: tasomainen käännetty F-antenni (PIFA), kaksois-L-antenni ja mikroliuska-antenni (Haapala 1996). Nämä antennit ovat erityisen käyttökelpoisia 1800 MHz taajuusalueella, jolloin ne voidaan tehdä riittävän pienikokoisiksi ja asentaa puhelimen koteloon ilman ulokkeita.

Vuosituhanen vaihteessa maanpäälliset verkot täydentyvät satelliittipohjaisilla matkapuhelinverkoilla. Niissä käytettävät käsipuhelimet voivat toimia samoilla tai hieman suuremmilla tehoilla kuin maanpäällisiin tukiasemiin yhteydessä olevat laitteet. Toistaiseksi ei ole käytettävissä tarkempia tietoja satelliittipuhelimien teknisistä ominaisuuksista.



Kuva 4. Esimerkkejä 900 MHz taajuusalueen piiska-antenneista. a) $\lambda/4$ -antenni, pituus 100 mm, b) $3\lambda/8$ -antenni, pituus 150 mm, c) $\lambda/2$ -antenni, korotetty syöttöpiste, pituus 210 mm, d) $\lambda/2$ -antenni, päästä syötetty, pituus 200 mm (Laukkanen 1993).

3 SÄTEILYN ABSORBOITUMINEN PÄÄHÄN

3.1 Ominaisabsorptionopeus SAR

Matkapuhelimien anteeniin ja koteloon syntyy radiotaajuisia virtoja, jotka aiheuttavat kudoksiin radiotaajuisen sähkökentän. Sen vaikutuksesta osa laitteen säteilemästä tehosta absorboituu kudoksiin, mikä ilmenee lämpötilan nousuna. Absorptio on seurausta dielektrisestä polarisaatiosta ja siihen liittyvästä tehohäviöstä. Biologisessa materiaalissa vesimolekyylien kiertyminen, vapaiden ionien siirtyminen sekä makromolekyyliin sitoutuneiden varausten liikkuminen vaikuttavat eniten dielektriseen polarisaatioon radiotaajuuksilla.

Tehohäviötä kuvataan ominaisabsorptionopeudella SAR (specific absorption rate), joka ilmoittaa tiettyyn tilavuuteen absorboituneen tehon jaettuna massalla. Mielivaltaisessa äärettömän pienessä kudospisteessä esiintyvä SAR saadaan kaavasta

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho}, \quad (1)$$

missä σ on johtavuus ja ρ on tiheys. Kudospisteessä esiintyvä tehollinen sähkökenttä E on

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}, \quad (2)$$

missä E_x , E_y and E_z ovat xyz suuntaisten sähkökentän komponenttien tehollisarvoja. Käytännössä SAR määritetään aina tietyn äärellisen kudostilavuuden (pienimmillään noin 1 mm) keskiarvona. Koko kehon keskiarvo eli SAR_{wba} (whole body average) ilmoittaa yksinkertaisesti kehoon absorboituneen säteilytehon jaettuna ihmisen painolla.

Kaavasta 1 huomataan, että SAR on suoraan verrannollinen kudosten johtavuuteen. Johtavuus taas kasvaa kudosten vesipitoisuuden kasvaessa. Siten vesipitoiset kudokset kuten lihas, veri, iho ja hermokudos lämpenevät enemmän kuin kuivemmat rasva- ja luukudokset. Taulukossa II on esitetty tärkeimpien kudostyyppien johtavuuksia matkapuhelintaajuuksilla (Gabriel ym. 1996).

SAR soveltuu parhaiten lämmönnoususta aiheutuvien biologisten vaikutusten dosimetriseksi yksiköksi, mutta muiden vaikutusten osalta myös sähkökentän voimakkuus on käyttökelpoinen. Kaavan (1) perusteella 1 W/kg vastaa karkeasti sähkökentän voimakkuutta 30 V/m tärkeimmillä matkapuhelintaajuuksilla. Tällöin on oletettu, että johtavuus on 1 S/m (taulukko II) ja kudosten tiheys on sama kuin veden tiheys 1000 kg/m³, mikä on hyvä oletus useimmille kudostyypeille. Luukudos on poikkeus, koska se on keskimääräistä tiheämpää.

Taulukko II. Tyypillisiä kudosten johtavuuksia eri taajuuksilla.

Kudostyyppi	J o h t a v u u s (S / m)			
	150 MHz	450 MHz	900 MHz	1800 MHz
Lihás	0,73	0,81	0,94	1,3
Iho (kosteá)	0,56	0,69	0,85	1,2
Veri	1,2	1,4	1,5	2,0
Aivokudos (harmaa)	0,60	0,76	0,94	1,4
Aivokudos (valkoinen)	0,35	0,46	0,59	0,92
Rasva	0,07	0,083	0,11	0,19
Luu (kuori)	0,070	0,096	0,14	0,28
Maksa	0,53	0,68	0,86	1,3

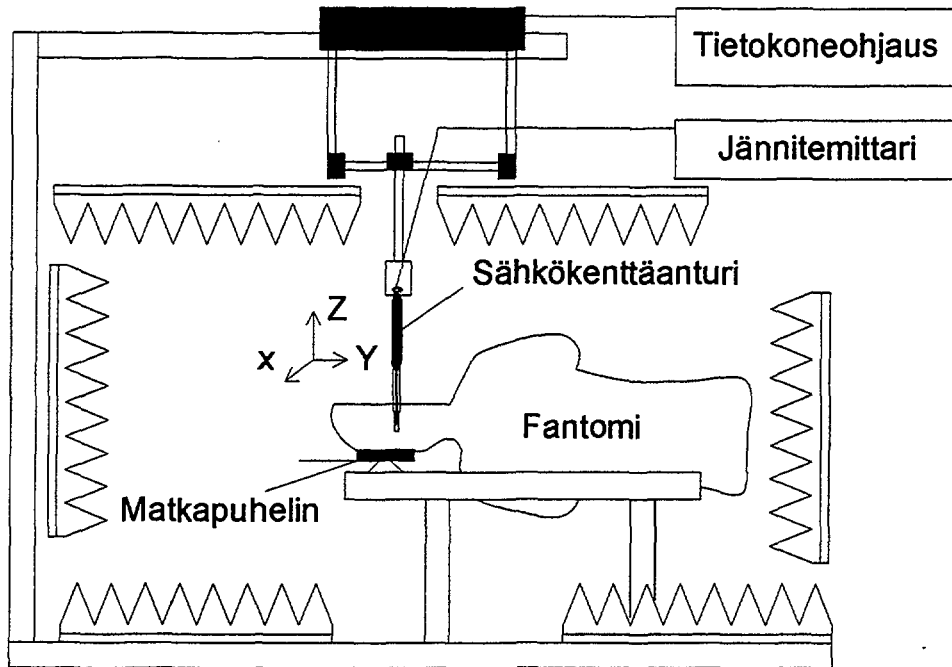
3.2 SAR:n määrittäminen

Käsi puhelimen aiheuttama SAR voidaan määrittää tarkasti vain mittaamalla tai laskemalla suoraan kudoksiin indusoitunut sähkökenttä. Laitteen ympärilleen vapaaseen tilaan säteilemiin sähkö- ja magneettikenttiin perustuvat määrittämenetelmät soveltuvat vain yksinkertaisiin seulontatestauksiin, joiden perusteella pienitehoiset laitteet voidaan vapauttaa hankalista SAR-testauksista (luku 5.2.2.).

SAR-laskut suoritetaan useimmiten FDTD (Finite Difference Time Domain) menetelmällä. Tarvittavat numeeriset mallit saadaan magneettikuvista tai anatomisista leikekuvista. Parhaimmillaan FDTD-mallien erottelukyky on 2 mm, minkä pienentämistä vaikeuttaa anatomisen datan puute, tietokoneiden keskusmuistin täytyminen ja laskenta-ajan venyminen pitkäksi.

Mittauksissa käytetään ihmisen pään ja ylävartalon muotoja sekä sähköisiä ominaisuuksia simuloivia heterogeenisiä tai homogeenisiä fantomeja. SAR määritetään useimmiten kudoksesta mitatusta sähkökentästä (kaava 1), mutta myös lämpömittaukseen perustuva menetelmä on ainakin periaatteessa mahdollinen (luku 4.2). Heterogeeniset fantomit muodostuvat puolikiinteistä materiaaleista, kun taas homogeenisissa fantomeissa voidaan käyttää nestemäisiä seoksia (kuva 5). Nestemäisten fantomien huomattavana etuna on mahdollisuus liikutella esteettä absorptiota mittaavaa sähkökentän anturia; heterogeenisissa fantomeissa joudutaan mittaamaan fantomiin tehdyissä kiinteissä rei'issä, jotka lisäksi vääristävät sähkökenttää. Teoreettisten tarkastelujen perusteella homogeenisilla fantomeilla saatu maksimi SAR on lähellä heterogeenisilla fantomeilla saatuja arvoja (Watanabe ym. 1996, Hombach ym. 1996) tai korkeintaan tekijällä 1,5 suurempi (Lazzi ja Gandhi 1996). On todennäköistä, että standardisoidut SAR-testaukset tulevat ensisijaisesti perustumaan homogeenisilla nestefantomeilla tehtyihin mittauksiin, joskin myös mittauksin varmennetut laskut ovat mahdollinen vaihtoehto (CENELEC 1997, FCC 1996).

Jotta SAR-arvoja voisi verrata säteilyturvallisuusstandardeissa esitettyihin altistumisrajoihin, on ne määritettävä keskiarvona joko 1 g (IEEE 1992, FCC 1996) tai 10 g (CENELEC 1995, CENELEC 1997) painoisen kuution yli. Keskiarvoistaminen tasoittaa huippuarvoja. Homogeenisissa fantomissa 1 g ja 10 g massaa vastaavat kuution särmät ovat 1 cm ja 2,2 cm, koska kudosten tiheys on lähellä veden tiheyttä. Kudoksen tulee täyttää kokonaan kuutio, mistä seuraa, että sen keskipisteen tulee olla vähintään puolen sivun pituuden verran ihon pinnasta. Toistaiseksi on epäselvää, miten korvalehdet ja pään sisäiset ilmaontelot kuten korvakäytävät huomioidaan.



Kuva 5. Säteilyturvakeskuksen COST 244 projektissa kehitetty SAR-mittausjärjestelmä (Puranen ym. 1997). SAR määritetään mittaamalla sähkökenttä pienikokoisella isotrooppisella sähkökentän anturilla (SPEAG ET 3DV5) liikutteleamalla anturia tietokoneen ohjaamana realistisen muotoisessa homogeenisessä nestefantomissa.

3.3 Dosimetrinen tutkimusten tuloksia

Käsi puhelimen aiheuttama absorptio päässä riippuu monesta eri tekijästä: Etäisyys antennista, säteilyteho ja taajuus vaikuttavat eniten, mutta antennin tyypillä, kotelon muodolla ja materiaalilla, puhelimen asennolla, pään anatomialla sekä kudosten sähköisillä ominaisuuksilla on merkitystä. Lisäksi pää vaikuttaa matkapuhelimen säteilyominaisuuksiin muuttamalla antennin impedanssia ja säteilykuviota.

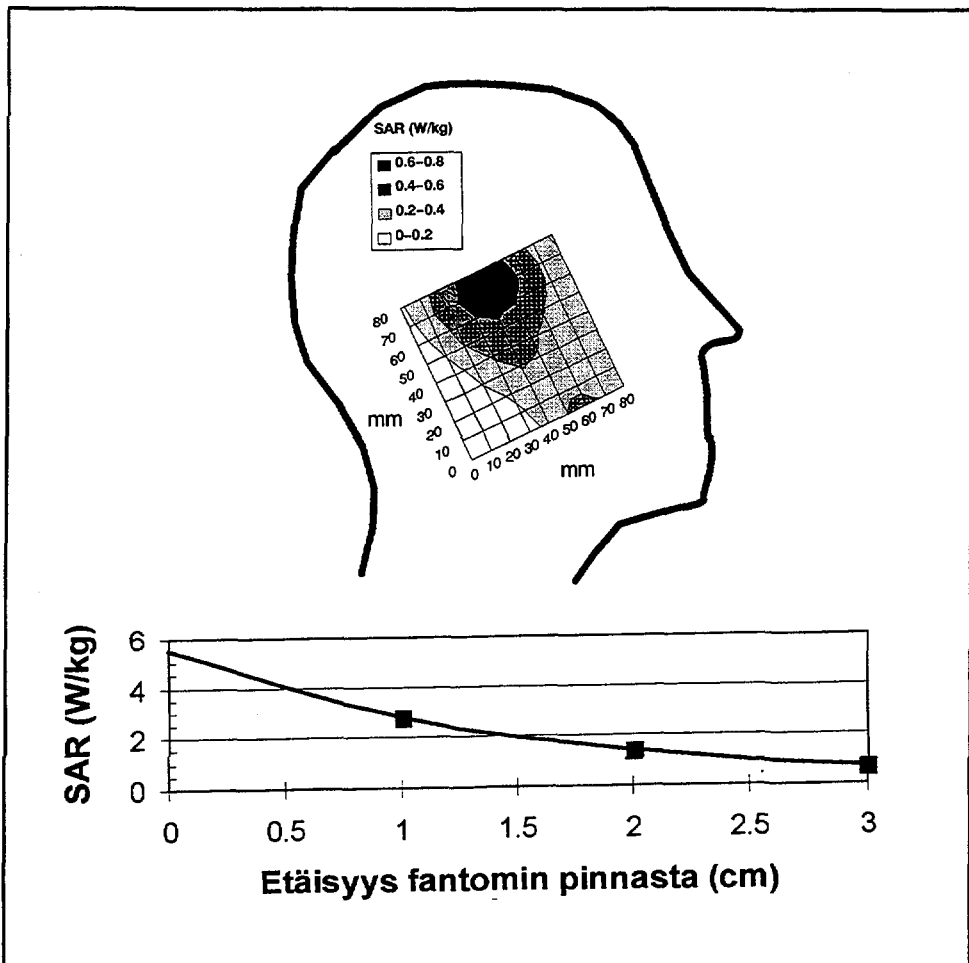
Taulukossa III on yhteenveto eri laboratorioissa mitatuista tai lasketuista maksimi SAR-arvoista, jotka on normalisoitu 1 W säteilyteholle. Koska käsi puhelimen kotelon muoto, antennin tyyppi ja asento sekä fantomit vaihtelevat eri tutkimuksissa, eivät tulokset ole täysin vertailukelpoisia. Esitetyt SAR-arvot ovat numeeristen tai kokeellisten fantomien pinnalla saatuja maksimi arvoja, jotka ovat ihossa ja aivojen pinnalla esiintyvien SAR-arvojen välissä.

Taulukosta III huomataan, että eri tutkimusryhmien saamat SAR-arvot vaihtelevat huomattavasti. Käsipuhelimien välillä on todellisia eroja, mutta vaihtelua aiheuttavat myös SAR-määritysmenetelmien epävarmuus ja standardoimattomuus. COST 244 projektin yhteydessä on järjestetty vertailuja, joissa eri laboratorioissa määritetään laskemalla ja mittaamalla SAR homogeenisessa pallossa ja kuutiossa, joka on asetettu mahdollisimman yksinkertaisen (dipoli) säteilijän kenttään. Mittausvertailuista ei ole vielä tuloksia käytettävissä, mutta alustavat tulokset laskentavertailusta viittaavat siihen, että suurin SAR voi 900 MHz taajuudella vaihdella jopa kertoimella 4. Lasketuissa SAR-arvoissa on havaittavissa viime vuosien aikana nousua, mikä voi johtua resoluution parantumisesta. Luotettavimmat laskentatulokset saavutetaan alle 3 mm erottelukyvällä.

Käsipuhelimien säteilystä absorboituu suurimmillaan noin puolet päähän ja puhelinta pitävään käteen. Absorptio on suurimmillaan kädessä, pään iholla, korvaledessä ja aivojen pinnalla (kuvat 1 ja 6). Luu absorboi huonosti, mikä johtuu sen pienestä johtavuudesta (taulukko II). Kuster ja Balzano (1992) ovat osoittaneet, että absorptio on suurimmillaan siellä, missä käsipuhelin on lähimpänä päätä ja pintavirran tiheys on suurimmillaan. Maksimiabsorptio löytyy usein, mutta ei aina, antennin syötön kohdalta. Aallonpituuteen nähden lyhimmillä antennilla kotelon virta voi olla merkittävä, jolloin kotelon läheisyydestä johtuen maksimiabsorptio voi olla kotelon kohdalla. Toisaalta antennin sähköisen pituuden ollessa yli neljännesaallonpituuden virtamaksimi voi siirtyä syöttöpisteestä ylemmäksi. Useimmiten SAR pienenee suoraan verrannollisesti tekijään $1/d^p$, missä d on pään ja antennin välinen etäisyys ja p vaihtelee välillä $3/2 \dots 2$ (Watanabe ym. 1996, Kuster ja Balzano 1992).

Cleveland ja Athey (1989) mittasivat käsipuhelimien aiheuttaman absorption päätä kuvaavassa heterogeenisessä fantomissa, jossa käytettiin kolmea erilaista materiaalia simuloimaan aivojen, lihasten ja silmien kudoksia. Kaksi analogista 900 MHz taajuusalueella toimivaa matkapuhelinta testattiin. Puhelimien ollessa normaalissa käyttöasennossa suurin mitattu SAR oli 3,5 W/kg noin 1 g keskiarvona. Kun antenni oli asetettuna silmän eteen, silmässä mitattu SAR oli 3,5 W/kg.

Anderson ja Joyner (1995) käyttivät samantyyppistä fantomia kuin Cleveland ja Athey mitatessaan kolmen 900 MHz käsipuhelimen aiheuttaman absorption. Matkapuhelimen ollessa normaalissa käyttöasennossa aivojen pinnalta mitattu suurin SAR oli 1,4 W/kg ja silmän kohdalla 0,35 W/kg, mitkä ovat likimain 1 g keskiarvoja. Normaalissa käyttöasennossa silmän absorptio on suhteellisen vähäistä.



Kuva 6. NMT-900 puhelimen aiheuttama ominaisabsorptionopeus a) 3 cm syvyydellä fantomin sisäpinnasta, b) maksimikohdassa etäisyyden funktiona sisäpinnasta. Mittaus suoritettiin Säteilyturvakeskuksen SAR-mittausjärjestelmällä (Puranen ym. 1997).

Taulukko III. Eri tutkimuksissa saatuja paikallisia maksimi SAR-arvoja noin 900 MHz taajuudella ja 1 W teholla säteileville analogisille käsipuhelimille.

Lähde	SAR [W/kg]		Etäisyys ¹⁾ [cm]	Huom.
	1 g	10 g		
Cleveland & Athey	3,5	-	1,0	mitattu, $\lambda/2^2)$, laite 1
Cleveland & Athey	1,7	1,0		mitattu, $\lambda/2$, laite 2
Dimbylow & Mann	4,7	3,1	1,4	laskettu, $\lambda/4$
Anderson & Joyner	1,4	-	1,5	mitattu, $\lambda/2$, laite 1
Anderson & Joyner	1,1	-	3,3	mitattu, $\lambda/4$, laite 2
Anderson & Joyner	0,7	-	3,0	mitattu, $\lambda/4$, laite 3
Meier ym.	4,0	2,7	-	mitattu ³⁾
Meier ym.	10	5,0	-	mitattu ⁴⁾
Hombach ym.	8,0	6,3	1,5	laskettu, $\lambda/2^5)$
Watanabe ym.	4,3	-	3,0	laskettu, $\lambda/4$
Watanabe ym.	2,0	-	3,0	laskettu, $\lambda/2$
Jensen ym.	2,0	-	2,0	laskettu, $\lambda/2$
Jensen ym.	1,3	-	2,0	laskettu, PIFA ⁶⁾
Jensen ym.	3,8	-	2,0	laskettu, PIFA ⁷⁾
Gandhi & Lazzi	4,8	-	n. 3,0	laskettu, $\lambda/4$
Gandhi & Lazzi	2,7	-	n. 3,0	laskettu, $3\lambda/8$
Balzano ym.	1,2	-	-	mitattu ⁸⁾ , $\lambda/2$
Balzano ym.	2,1	-	-	mitattu ⁸⁾ , heliksi
Pitkäaho ym.	4,0	2,5	1,5	laskettu, $\lambda/4$, pysty
Pitkäaho ym.	2,6	1,7	1,5	laskettu, $\lambda/4$, vaaka

1) antennin etäisyys päästä (usein syöttöpisteestä)

2) antennin pituus aallonpituuksina

3) normaalissa käyttöasennossa saatu maksimiarvo yhdeksän erityyppisen käsipuhelimen joukosta

4) pahimmassa mahdollisessa asennossa saatu maksimiarvo yhdeksän erityyppisen käsipuhelimen ryhmästä

5) dipoliantenni

6) takasivulla

7) sivulla

8) eri tyyppisille ja eri asennoissa oleville analogisille käsipuhelimille mitattu keskiarvo

Dimbylow ja Mann (1994) laskivat 900 ja 1800 MHz taajuuksilla lapsen päähän kohdistuvan absorptioon käyttämällä magneettikuvaukseen perustuvaa hienojakoista (2 mm) anatomista mallia. Taajuudella 900 MHz suurimmat SAR-arvot olivat normaalissa käyttöasennossa 4,7 W/kg (1 g) ja 3,1 W/kg (10 g). Vastaavat SAR-arvot 1800 MHz taajuudella olivat 6,7 ja 4,6 W/kg, mikä kuvastaa pinta-absorptioon lisääntymistä ja tunkeutumissyvyyden pienenemistä taajuuden kasvaessa. Graafisesti esitetyistä SAR-jakaumista voidaan päätellä, että hyvin pienellä muutamien mm läpimittaisella alueella voi esiintyä edellä mainittua suurempiakin SAR-arvoja. Esimerkiksi taajuudella 900 MHz laskettiin 14 W/kg korvalehdessä ja 4...8 W/kg aivojen pinnalla. Normaaliasennossa silmän absorptio on vähäistä, mutta kun antenni oli silmän edessä, silmän yli laskettu keskimääräinen SAR oli samaa luokkaa kuin 1...10 g maksimiarvo normaaliasennossa. Maksimiabsorptio lapsen päässä on noin 1,5-kertainen verrattuna aikuisen pään absorptioon (Lazzi ja Gandhi 1996).

Hombach ym. (1996) säteilyttivät erilaisia kokeellisia ja numeerisia fantomeja pystysuuntaisesta puolialtodialipolista muodostuvalla säteilijällä 900 MHz taajuudella. Monimutkaisimmassa numeerisessa fantomissa suurin SAR oli 8 W/kg (1 g) ja 6,3 W/kg (10 g), mutta muutamien mm:n erotelukyvyllä saatu huippuarvo oli 12 W/kg ihossa ja aivojen pinnalla.

Meier ym. (1995) mittasivat yhdeksän erityyppistä 900 MHz käsipuhelinta normaalissa käyttöasennossa ja suurimman absorptioon tuottavassa asennossa. Testauksissa käytettiin homogeenista nestefantomia. Normaaliasennossa suurimmat paikalliset SAR:t olivat 4 W/kg (1 g) ja 2,7 W/kg (10 g); pahimmassa mahdollisessa asennossa saatiin likimain kaksinkertaiset lukemat. Vähäisimmän altistumisen aiheuttavalla laitteella 1 g maksimit olivat alle 0,4 W/kg normaaliasennossa ja alle 1 W/kg pahimmassa mahdollisessa asennossa.

Watanabe ym. (1996) ovat tutkineet teoreettisesti 900 ja 1500 MHz taajuuksilla etäisyyden, antennin pituuden, korvien ja käsien vaikutusta käsipuhelimen aiheuttamaan absorptioon: Puolenaallon pituisilla antennilla varustettujen puhelimien SAR on taajuudella 900 MHz likimain puolet neljännesaallon pituisilla antennilla varustettujen laitteiden aiheuttamasta SAR:sta, koska edellisillä virtamaksimi on kauempana päästä kuin jälkimmäisillä. Korvalehtien lisääminen malliin kasvattaa absorptiota antennityypistä riippuen 20...60 %. Tällöin suurin absorptio esiintyy usein korvalehdessä. Kädet eivät merkittävästi vaikuta pään absorptioon, mutta kädessä voi esiintyä suurempia absorptiohuippuja kuin päässä kuten myös Okoniewskin ja Stuchlyn (1996) tutkimuksessa havaittiin. Taajuudella 1500 MHz SAR-maksimi on kaksin-kolminkertainen taajuudella 900 MHz esiintyvään SAR-maksimiin verrattuna.

Gandhi ja Lazzi (1996) tutkivat hienorakenteisella numeerisella mallilla käsipuhelimien aiheuttaman absorptioon riippuvuutta mallin koosta, koostumuksesta sekä taajuudesta. Taulukossa III on esitetty 835 MHz taajuudella saatuja normalisoituja tuloksia, joita voidaan verrata 1900 MHz taajuudella saatuihin SAR-arvoihin. Taajuudella 1900 MHz pinta SAR (1 g) oli 9 W/kg $\lambda/4$ antennille ja 5,5 W/kg $3\lambda/8$ antennille eli selvästi suurempi kuin 835 MHz:lla (4,8 ja 2,7 W/kg). Toisaalta maksimiarvo aivoissa on 1900 MHz:lla vain noin 20 % ihoarvosta, kun taas alemmalla taajuudella se kasvaa 40 prosenttiin. Kallon koon pienentyessä säteily tunkeutuu suhteellisesti syvemmälle päähän ja maksimiabsorptio kasvaa jonkin verran.

Balzano ym. (1995) ovat mitanneet homogeenisella fantomilla suuren joukon erityyppisiä käsipuhelimia, joista taulukossa III on esitetty pari keskiarvoa. Kyseessä on NMT-puhelinta muistuttava amerikkalainen analoginen puhelin, jonka säteilyteho (0,6 W) on taulukossa skaalattu 1 W tehoksi vertailun helpottamiseksi. Ulosvedetty antenni toimii $\lambda/2$ -säteilijänä, kun taas sisälle työnnetty antenni toimii heliksisäteilijänä. Taulukosta huomataan, että heliksiantennin aiheuttama SAR on suurempi kuin pitkän antennin SAR, mikä johtuu siitä, että magneettikenttä on suhteellisen suuri heliksin lähellä. Toisaalta monissa tutkimuksissa on saatu päinvastaisiakin tuloksia, mikä voi johtua siitä, että heliksiantennien säteilyteho pienenee, koska niitä on vaikeampi saada vireeseen kuin pitkiä antennejä. Sisääntyönnettyillä antennilla mitatut SAR-arvot vaihtelivat välillä 1,5...3 W/kg ja ulosvedetyillä välillä 1...1,3 W/kg. Jälkimmäisiä tuloksia on kiinnostavaa verrata vanhemman tyyppisten matkapuhelimien SAR-arvoihin, jotka olivat huomattavasti pienempiä (0,3...0,7 W/kg). Suuremmasta kotelosta johtuen ensimmäisten käsipuhelimien antennit olivat huomattavasti kauempana päästä kuin nykyisissä laitteissa, mikä on syytä huomioida matkapuhelimien käyttäjien sairastuvuutta koskevilla epidemiologisilla tutkimuksilla.

Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa (VTT) Pitkäaho ym. (1997) ovat suorittaneet numeerisia SAR määrittämiä osana COST 244 projektia. Laskuissa käytettiin kaupallista XFDTD ohjelmaa (Remcom, inc., Pennsylvania), jossa ihmistä simuloitiin magneettikuvausmallilla sekä sitä tarkemmalla ns. "Visible man" mallilla. Taulukossa III on esitetty Visible man-mallilla saatuja maksimi SAR-arvoja piiska-antennin ollessa vaaka- ja pystysuunnassa. Yhden gramman keskiarvona lasketut SAR-arvot ovat kertoimella 2,3 (pysty) ja 2,9 (vaaka) pienempiä kuin 3 mm laskentasolussa saatu huippuarvo. VTT:n tulokset sopivat hyvin yhteen muiden tutkimusryhmien saamien tulosten kanssa.

Taulukon III perusteella voidaan tehdä yleisiä päätelmiä 900 MHz taajuudella ja 1 W teholla toimivien käsipuhelimien aiheuttamasta altistumisesta: NMT 900 käsipuhelimien aiheuttama maksimi SAR ylittää yleisesti 2 W/kg 10 g keskiarvona, mutta 10 W/kg ei käytännössä ylity. Jos keskiarvoistusmassa on 1 g, SAR

kasvaa kertoimella 1,5, mutta 10 W/kg raja ei tällöinkään todennäköisesti ylity ainakaan normaaliasennossa. Paikallinen SAR-huippu voi olla aivojen pinnalla muutamien millimetrien syvyyteen asti suurimmillaan noin 10 W/kg. Koska GSM-puhelimen keskimääräinen teho on suurimmillaan vain neljäsosa NMT puhelimen tehosta, on SAR-maksimi vastaavasti pienempi jääden 10 g keskiarvona useimmiten alle 2 W/kg. Eri antennityyppien välillä on merkittävää vaihtelua. Jotkut uudet PIFA-antennit (Jensen ja Rahmat-Samii 1995) näyttävät tuottavan pienemmän absorptio kuin $\lambda/4$... $\lambda/2$ antennit.

1800 MHz taajuudella pistemäinen SAR voi kasvaa noin kaksinkertaiseksi verrattuna 900 MHz taajuudella toimivaan samantehoiseen laitteeseen, minkä johdosta DCS 1800 laitteiden aiheuttama SAR-maksimi voi olla muutamien millimetrien läpimittaisella alueella samaa luokkaa kuin 900 MHz taajuudella toimivien GSM laitteiden aiheuttama SAR, vaikka teho on puolta pienempi, ks. taulukko I. Suurilla taajuuksilla SAR vaimenee kuitenkin jyrkemmin kuin pienemmillä taajuuksilla, mikä pienentää keskiarvoistettuja SAR-arvoja. Mittausten mukaan (Kuster ja Balzano 1996) DCS 1800 puhelinten aiheuttama SAR on suurimmillaankin vain noin 1 W/kg (10 g)...2 W/kg (1 g).

NMT450-käsi puhelimista ei ole toistaiseksi tiedossa testaustuloksia. SAR-maksimi jää kuitenkin suurella todennäköisyydellä pienemmäksi kuin vastaavan NMT900 laitteen, koska pinta-absorptio on pienempi. Toisaalta tunkeutumissyvyyden kasvaminen lisää aivojen sisäosien absorptiota.

Käsi puhelimien aiheuttama absorptio ei todennäköisesti lisäänty tulevaisuudessa, koska turvallisuusstandardien ja markkinoiden paineessa laitevalmistajat pyrkivät suunnittelemaan antenni- ja kotelarakenteet siten, että yleisörajat eivät ylity. Uusien antennirakenteiden, kuten PIFA-antennien, kehittämisessä pyritään minimoimaan päähän absorboituvaa tehoa, mikä on myös puhelimen tehokkaan toiminnan kannalta edullista (Jensen ja Rahmat-Samii 1995, Stuchly 1996). Tukiasemien määrän lisääntyessä myös puhelimet toimivat aiempaa pienemmällä teholla. Kehitteillä olevissa satelliittipuhelinjärjestelmissä voi joidenkin käsi puhelimien teho hieman lisääntyä, mutta järkevällä antennisuunnittelulla saadaan lisäteho suunnattua taivaalle ilman, että absorptio lisääntyy.

4 BIOLOGISET VAIKUTUKSET

4.1 Yleistä

Radiotaajuisen säteilyn biologiset vaikutukset voidaan jaotella lämpö-, isotermissiin ja ei-lämpövaikutuksiin. Radiotaajuisesta kentästä absorboituvan lämpöenergian vaikutuksesta aktivoituvat kudosten normaalit systeemiset ja/tai paikalliset lämmönsäätelymekanismit. Sen tarkoituksena on pitää erityisesti vartalon ja pään alueella ihonalaisten kudosten lämpötila mahdollisimman lähellä 37° astetta, jotta kudokset eivät vaurioituisi. Normaali fysiologinen vaihteluväli on noin ± 1 °C, mutta rasittavassa liikunnassa vielä kahden asteen lämpötilannousu on tavanomaista (Adair 1994). Liiallinen lämpöenergia poistuu kehosta lisääntyneen pintaverenkierron sekä hikoilun kautta. Paikallisen lämpötilan ylittäessä 40 °C verisuonet laajenevat myös syvemmillä kehossa, mikä tehostaa kuumien pisteiden jäähtytystä. Solujen vahingoittuminen alkaa noin 42 °C lämpötilassa (Sapareto ym. 1982).

Sellaisella tehoalueella, jossa lämmönsiirtomekanismit toimivat tehokkaasti siten, että yksittäisten solujen kannalta merkittävää lämpötilannousua ei tapahdu, voi silti syntyä kokeellisestikin todettavia lieveilmiöitä, jotka liittyvät muutoksiin lämmönsäätelyjärjestelmässä. Tällöin voidaan puhua isotermissistä vaikutuksista. Ne ovat täysin fysiologisia eivätkä ole välittömästi liitettävissä terveydelliseen haittaan. Pitkään kestävässä tällainen altistus voi kuitenkin merkitä lievää epäspesifistä, fyysistä stressiä. Vain riittävän alhaisella tehoalueella (SAR < 0,4 W/kg), jossa minkäänlaiset lämmönsäätelyjärjestelmät eivät aktivoitu, voidaan mahdollisia vaikutuksia pitää varmuudella spesifisinä lämmönsiirrosta riippumattomina ei-lämpövaikutuksina. Niiden esiintymistä koe-eläimissä tai ihmisissä ei kuitenkaan ole täysin kiistattomasti pystytty osoittamaan.

4.2 Lämmönnousu päässä ja sen fysiologiset vaikutukset

Radiotaajuisen säteilyn aiheuttama paikallinen lämpötilannousu voidaan karkeasti arvioida käyttämällä tunnettua Pennesin biolämpöyhtälöä (Bowman 1982). Aivokudoksen tapauksessa yhtälö voidaan esittää yksinkertaisessa muodossa (Lyons ym. 1989, Samulski ym. 1989)

$$\frac{dT'}{dt} = \frac{SAR}{c} - \lambda T', \quad (3)$$

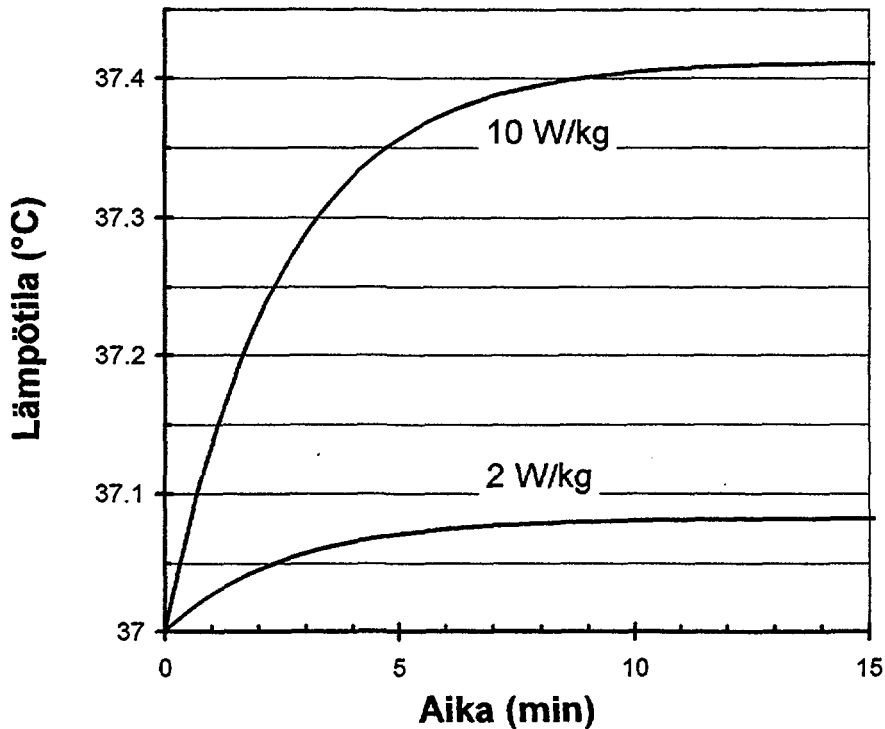
missä T' on lämpötilan nousu, t on aika, SAR on paikallinen ominaisabsorptionopeus noin 10 g keskiarvona, c on aivokudoksen ominaislämpö (3,64 kJ/kg °C), λ on tehollinen lämmönpoistumiskerroin, joka kuvaa kudoksen paikallista jäädytyskykyä. Aivokudoksessa verenkierto jäädyttää yhtä paljon kuin lämmönjohtuminen. Lämpenemisen ollessa vähäistä (alle 3 °C) voidaan olettaa, että λ kerroin pysyy vakiona, jolloin yhtälölle (3) saadaan analyttinen ratkaisu

$$T' = \frac{SAR}{\lambda c} (1 - e^{-\lambda t}). \quad (4)$$

Koirilla suoritettujen mikroaaltohypertermiakokeiden (Samulski ym. 1989; Lyons ym. 1989) perusteella voidaan päätellä, että lämmönpoistumiskerroin on aivoissa suuruusluokkaa 0,4 1/min eli eksponentiaalinen lämpöaikavakio ($1/\lambda$) on noin 2,5 min.

Yhtälöä (3) johdettaessa on oletettu, että veri ehtii lämmitä kudoksen lämpötilaan. NRPB:n (1993) mukaan tämä vaatimus on voimassa, jos SAR määritetään vähintään 10 g keskiarvona. Verenkierto tasoittaa lämpöhuippuja siten, että alle 1 cm³ tilavuudessa ei todennäköisesti esiinny yli 1 °C vaihtelua. Lämmönjohtumisen vaikutuksen kuvaaminen yhtälön (4) mukaisella mallilla on likimääräistys, joka ei kuitenkaan aiheuta suurta virhettä silloin kun verenkierto jäädyttää vähintään yhtä tehokkaasti kuin lämmönjohtuminen.

Kuvassa 7 on esitetty yhtälön 4 avulla laskettu lämmön nousu 2 W/kg ja 10 W/kg lämmitystasolla. Edellinen on väestöön sovellettava SAR-raja ja jälkimmäinen valvottuihin työntekijöihin sovellettava raja. Käytännössä suurin mahdollinen paikallinen SAR on 900 MHz taajuudella ja 1 W säteilyteholla toimivalla NMT-puhelimella alle 5 W/kg.



Kuva 7. Radiotaajuuden säteilyyn aiheuttama laskettu lämpötilannousu aivoissa ajan funktiona.

Esitetyllä mallilla laskettu maksimaalinen lämmönousu on noin 0,4 °C silloin kun paikallinen SAR on 10 W/kg ja $\lambda = 0,4$ 1/min (Anderson ja Joyner 1995). NRPB (1993) esittää raportissaan samansuuntaisia tuloksia: aivoissa olevan kuuman pisteen lämpötila nousee 0,6 °C, jos SAR on 10 W/kg. Lämpötila saavuttaa noin 6 minuutissa 90 % maksimiarvostaan ja kasvaa samassa suhteessa kuin SAR aina 40 °C tasolle asti. Tätä suuremmissa lämpötiloissa lämmönkuljetus tehostuu aluksi verisuonien laajetessa, mutta voi myöhemmin heiketä, jos lämmönousu vaurioittaa verisuonia. Edellä olevan perusteella on ilmeistä, että kolmen asteen lämpötilannousu on mahdollista, jos paikallinen SAR on noin 50 W/kg. Tällainenkaan lämpeneminen ei todennäköisesti aiheuta lämpövaurioita, koska verisuonten paikallinen laajeneminen ehkäisee vaarallisen lämpenemisen. Altistumistasolla 100 W/kg soluvauriot ovat mahdollisia. Jos lähdetään siitä, että 1 W tehoisen NMT 900 puhelimen aiheuttama maksimi SAR päässä on pahimmassa mahdollisessa tapauksessa 5 W/kg 10 g keskiarvona (Meier ym. 1995, Kuster ja Balzano 1996), nousisi aivojen lämpötila enimmillään noin 0,2...0,3 °C. Vasta yli 10 W säteilyteholla aivojen paikallinen lämpeneminen voi olla fysiologisesti merkittävää.

Silmän mykiö on hieman muita kudoksia herkempi lämmölle, koska siinä ei ole jäädyttäviä verisuonia. Mykiön solut eivät myöskään uusiudu ja pienetkin mykiön proteiinivauriot voivat kumuloitua ajan mukana. Silmässä lämmönjohtumisen merkitys on suurempi kuin veripitoisissa kudoksissa. Lämmönjohtumisen tarkasti huomioivan numeerisen mallin (Scott 1988) avulla arvioituna silmän maksimilämpötilan nousu on noin 1 °C silloin kun keskimääräinen SAR silmässä on 10 W/kg (Anderson ja Joyner 1995).

4.3 Keskushermostovaikutukset in vivo

Mikroaaltpulssi, jonka energiatiheys ylittää 100 mJ/m² ja jonka kesto on alle 30 µs, aiheuttaa päähän osuessaan kuuloaistimuksen (Puranen ja Jokela 1996). Sen katsotaan aiheutuvan minimaalisesta mutta nopeasta paikallisesta lämmön noususta. Siihen liittyvä äkillinen mikroskooppinen lämpölaajentuma aiheuttaa mekaanisia värähtelyjä, jotka etenevät suoraan sisäkorvaan ja ärsyttävät kuulo-reseptorisoluja. Kuuloaistimus voi syntyä jo muutamasta yksittäisestä pulssista eikä pulssitaajuudella ole suurta merkitystä. Keskimääräinen tehotiheys voi olla hyvin pieni, alle 1 W/m². Kuuloaistimus ei sinänsä ole kovin haitallinen mutta voi kuitenkin olla stressitekijä. Sitä voi myös pitää merkinä termoelastisesta prosessista kudoksessa, joka voisi selittää muitakin pulssimuotoisella säteilyllä kokeellisesti todettuja ilmiöitä. Digitaalisen matkapuhelimen pulssimuotoisessa signaalissa pulssin kestoaika on kuitenkin niin pitkä (577 µs), ettei kuuloaistimusta pääse syntymään.

Etenkin pulssimuotoisella säteilyllä on kokeellisesti todettu erilaisia vaikutuksia keskushermostoon subtermisilla altistustasoilla. Lai ym. on laajassa koesarjassa tutkinut 2450 MHz:n säteilyn vaikutuksia rotan aivoihin (Lai ym. 1987, 1988, 1989a, 1989b, 1991). Suurimmassa osassa kokeita säteily on ollut pulssimuotoista pulssin pituuden ollessa 2 µs ja pulssitaajuuden 500 Hz, jolloin toimintasuhte on 1:1000. Kalorimetrisesti mitattu keskimääräinen kokokehon SAR on useimmissa kokeissa ollut 0,6 W/kg. Alhaisimmillaan vaste on saatu SAR-arvolla 0,45 W/kg.

Tutkitut parametrit liittyvät kolinergiseen hermoaktiiviteettiin aivoissa. Aivojen kolinergisellä systeemillä oletetaan olevan tärkeä rooli, kun olio sopeuttaa käyttäytymisensä ympäristön muutoksiin.

Koliinin otto muuttui säteilyaltistuksen vaikutuksesta etenkin hippokampuksessa (aivojen osa) mutta myös otsalohkon kuoressa. 20 min kerta-altistus aiheutti koliinin oton nousun, kun taas 45 min altistus aiheutti laskun. Muutokset olivat melko pieniä (n. 30 %). Tehon nostaminen tasolle 1,2 W/kg ei nostanut vastetta.

Vaikutus hippokampuksessa oli estettävissä antamalla ennen altistusta naltreksonia, joka estää elimistön omien opiaattien (morfiinin kaltaisten aineiden) vaikutusta. Tämä osoittaa, että säteilyn vaikutus välittyi näiden aineiden kautta. Hippokampuksessa koliinin oton lasku 45 min altistuksen jälkeen osoitti toleranssin kehittymistä: jos altistus toistettiin 10 peräkkäisenä päivänä, vastetta ei enää todettu 11. altistuksen jälkeen. Sen sijaan toleranssia ei kehittynyt lyhyemmän altistuksen vastakkaisen vasteen eli koliinin oton nousun suhteen.

Toistetun altistuksen jälkeen osoitettiin myös, että kolinergisten hermoreseptoreiden määrä kudoksessa oli kompensatoorisesti muuttunut, esim. hippokampuksessa 45 min altistus 10 päivää peräkkäin johti reseptoreiden määrän nousuun. Vaikutus oli estettävissä naltreksonilla.

Otsalohkon kuoressa vaste oli osittain samanlainen, osittain erilainen kuin hippokampuksessa. Jatkuvuotoinen säteily (CW) 2450 MHz taajuudella ja 0,6 W/kg keskimääräisellä koko kehon SAR:lla aiheutti koliinin oton alenemisen otsalohkon kuoressa. Hippokampuksessa sen sijaan ei todettu mitään vaikutusta. Naltreksonilla ei ollut vaikutusta tähän vasteeseen. Yleensäkin otsalohkon kuoressa todetut vaikutukset eivät olleet estettävissä naltreksonilla, päin vastoin kuin hippokampuksessa.

Lain ryhmä on myös tutkinut yllä kuvatuunlaisen pulssimuotoisen altistuksen vaikutusta rottien lyhytaikaiseen muistiin (Lai ym. 1989a; Lai ym. 1994). Sitä testattiin laitteessa, jossa on 12 haaraa ja haarojen päissä ruokaa. Rotan tulee muistaa missä haarassa se on jo käynyt ja missä voi vielä olla ruokaa. Virheellisten käyntien lukumäärä rekisteröidään. Kymmenen päivän koesarjassa rotta selvästi oppi muistamaan, ja virheiden määrä aleni. Kun koe tehtiin 45 min säteilytyksen jälkeen, tulos oli ensimmäisestä päivästä lähtien vähän huonompi, ja oppiminen päivästä toiseen oli lisäksi selvästi hitaampaa. Tämä vaikutus oli kuitenkin täysin estettävissä sekä fysostigmiinillä, joka on antikolinerginen aine, että myös naltreksonilla.

Jos sama koe tehtiin vain 20 min altistuksen jälkeen, tulos oli toisenlainen. Kahtena ensimmäisenä päivänä suoritus oli altistuksen jälkeen vähän parempi kuin ilman altistusta, mutta oppimiskäyrä kymmenen päivän aikana oli jonkin verran laakeampi. Kaikenkaikkiaan merkittävää vaikutusta oppimiseen ei ollut.

Eri aivonosien vasteet osoittavat, että kyse ei ole paikallinen vaurio, vaan fysiologinen vaste systeemiseen altistukseen. Sama tutkimusryhmä on raportoinut aivan samantlaisia vaikutuksia aivojen kolinergiseen systeemiin esim. melusta (Lai 1987; Lai ym. 1989c). 100 dB melu 45 min aikana aiheutti samanlaisen vaikutuksen hippokampuksessa kuin 45 min altistus pulssimuotoiselle radiotaajuiselle säteilylle. Myös vaste melulle oli estettävissä naltreksonilla. 70 dB melu sen sijaan aiheutti vastakkaisen vaikutuksen eli koliini otton nousun. Rotan liikkumisen estämi-

nen raajoja sitomalla aiheutti 45 min jälkeen koliinin oton laskun hippokampuksessa sekä otsalohkon kuoressa (Lai ym. 1986). Vaikutus hippokampuksessa oli estettävissä naltreksonilla, otsalohkossa taas ei.

Toisessa tutkimuksessa raportoitiin, että rotan liikkumisen estäminen aiheutti 10 min jälkeen hippokampuksessa koliinin oton nousun mutta kahden tunnin jälkeen laskun (Finkelstein ym. 1985). Vaste oli siis kaksivaiheinen. Tämä sopii Lain havaintoon, että sitomisen jälkeen rotta ensin pyristelee vastaan muutaman minuutin ajan mutta sitten rauhoittuu ja pysyy täysin paikallaan.

Kaikki nämä havainnot tukevat käsitystä, että hippokampuksen kolinergisen toiminnan aleneminen endogeenisten opiaattien välityksellä liittyy elimistön sopeutumiseen stressitilanteeseen.

Lain tutkimusryhmä on myös todennut muutoksia bentsodiatsepiinireseptoreiden määrässä samanlaisen pulssimuotoisen altistuksen jälkeen (Lai ym. 1992). 45 min kerta-altistus johti reseptoreiden määrän 13 % nousuun aivokuoressa mutta ei hippokampuksessa eikä pikkuaivoissa. Jos sen sijaan altistus toistettiin 10 peräkkäisenä päivänä, nousua ei enää todettu. Oli siis tapahtunut sopeutuminen. Myös muunlaisen stressin, kuten 100 dB melu tai uinti kylmässä vedessä, on todettu aiheuttavan vastaavaa nousua (Lai ja Carino 1990). Bentsodiatsepiineillä onkin tärkeä rooli elimistön stressivasteen välittäjinä.

Yllä kuvatut vaikutukset aivoihin viittaavat siihen, että pulssimuotoinen radiotaajuinen säteily teholla, joka ei merkittävästi nosta ruumiin lämpötilaa, voi laukaista lievän, fysiologisen stressivasteen. Stressin syynä eläimillä voi olla pulssin aiheuttama kuuloaistimus. Merkitys terveydelle rajoittuisi tällöin epäspesifisen stressin vaikutukseen ja olisi verrattavissa esim. toistuvan melun vaikutukseen. Tällaisen vaikutuksen käytännön merkitys lienee vähäinen, jollei altistus ole hyvin pitkä tai tiheään toistuva.

Jatkuvamuotoisen säteilyn osalta vaikutus oli Lain ryhmän tutkimustulosten mukaan rajallisempi ja epäspesifisempi, ja sen syy ja merkitys jää epäselväksi. Mahdollisesti kyseessä voisi olla minimaalinen isoterminen vaikutus, joka liittyisi lämmönsäätelyyn.

Matkapuhelinten säteilyn vaikutus hereillä olevien vapaaehtoisten koehenkilöiden aivosähkökäyrään on vastikään tutkittu Suomessa (Hietanen ym. 1997). Vaikutusta ei todettu. Samaan tulokseen ovat hiljattain tulleet myös saksalaiset tutkijat (Röschke ja Mann 1997). Samat tutkijat totesivat sen sijaan vähäisiä, joskin merkitseviä, vaikutuksia terveiden koehenkilöiden uneen (Mann ja Röschke 1996). Altistuslähteenä oli 900 MHz:n digitaalinen matkapuhelin, jonka pulssinleveys on 580 μ s ja -taajuus 217 Hz. Unensaanti nopeutui keskimäärin 2,5 minuuttia, ja

REM-unen osuus (Rapid eye movement) koko unesta väheni 17 %:sta 14 %:iin. Kirjoittajien mielestä tulosten perusteella voidaan luoda hypoteesi, jonka mukaan altistus edistää unensaantia ja vähentää REM-unta.

4.4 Silmävaikutukset

Tavallisten matkapuhelimien aiheuttama radiotaajuinen kenttä on silmässä normaalisti huomattavasti pienempi kuin aivojen pinnalla korvan lähellä esiintyvä kenttä. Jos laitetta pidetään silmän edellä, kuten monia ammaattikäytössä olevia radiopuhelimia, silmän SAR voi olla merkittävä. Jos silmä altistuu voimakkaalle radiotaajuiselle säteilylle, siten että mykiön lämpötila nousee huomattavasti, mykiö voi samentua eli syntyä harmaakaihi. Paikallisen SAR:n kynnsarvo jatkuvamuotoiselle säteilylle on kokeellisesti todettu olevan yli 100 W/kg. Pulssimuotoisella säteilyllä kynnsarvo voi olla alhaisempi. Rotan mykiössä todettiin vaurioita *in vitro* vakioidussa lämpötilassa pulssitukatyypisellä säteilyllä jo SAR:n ollessa 10 W/kg aikakeskiarvona, kun pulssin kesto oli 20 μ s ja altistuksen kesto 1 tunti (Stewart-DeHaan ym. 1985).

Edellä mainittua alhaisemmilla altistustasoilla on raportoitu ohimeneviä vaurioita muihin silmän osiin. Keskustelua on viime aikoina herättänyt Kuesin ryhmän tekemät kokeet apinalla, jonka silmä muistuttaa ihmisen silmää (Kues ym. 1985 ja 1992). Apinoita altistettiin joko jatkuvamuotoiselle (CW) tai pulssimuotoiselle, 2,45 GHz säteilylle. Pulssin kesto-aika oli 10 μ s ja pulssitaajuus 100 Hz. Apinat olivat nukutettuja. Kerta-altistus kesti 4 tuntia. Säteilytys aiheutti reikämäisiä vaurioita sarveiskalvon sisäpinnan solukerroksessa (endoteelissä). Vaurio oli selvimmillään havaittavissa 24 tuntia altistuksesta. Muutos korjaantui noin neljässä päivässä. Tehotiheyden kynnsarvo vaurion esiintymiselle oli CW-säteilyllä kerta-altistuksella 300 W/m², mikä vastasi arviolta SAR-arvoa 7,8 W/kg silmässä. Altistuksen toistaminen viikoittain ei alentanut kynnyksiä. Sen sijaan altistuksen toistaminen neljänä peräkkäisenä päivänä alensi kynnyksen tasolle 200 W/m² ja 5,2 W/kg. Tällainen altistus aiheutti silmän etukammiossa 0,77 °C nousun.

Pulssimuotoisella säteilyllä tehotiheyden kynnsarvo oli alhaisempi. Selvä vaste todettiin, jos keskimääräinen tehotiheys oli 100 W/m² ja vastaava paikallinen SAR silmässä 2,6 W/kg neljän tunnin ajan, erityisesti jos altistus toistettiin neljänä peräkkäisenä päivänä. Yhden pulssin energiatiheys oli tällöin 1 J/m² ja ominaisabsorptio (SA) 26 mJ/kg.

Samalla koejärjestelyllä todettiin pulssimuotoisella säteilyllä myös vaikutusta värikalvon verisuonien läpäisevyyteen. Fluoresoivaa väriainetta vuosi silmän etukammioon osoituksena verisuonien läpäisevyydestä. Neljän tunnin altistuksella

toistettuna kolmena peräkkäisenä päivänä keskimääräisen tehoiheyden kynnsarvo oli 100 W/m^2 ($2,6 \text{ W/kg}$). Vaurio oli todettavissa heti altistuksen jälkeen mutta korjaantui viikon sisällä.

Kun pulssimuotoiseen säteilyyn yhdistettiin kaksi viherkaihin hoitoon käytettyä lääkettä, timololi tai pilokarpiini, silmätippoina normaalina hoitoannoksena, kumpikin vaikutus (sarveiskalvon endoteelivaurio sekä värikanalon verisuonien seinämän vuoto) voimistui ja kynnsarvo aleni. Timololiin yhdistettynä vahvistettiin kynnsarvon olevan jopa alle 10 W/m^2 eli $0,26 \text{ W/kg}$.

Tekijät arvelevat, että kumpikin vaikutus voisi liittyä vapaiden radikaalien muodostukseen, minkä e.m. lääkkeet voisivat heidän mukansa voimistaa.

Toinen tutkimusryhmä (Kamimura ym. 1994) yritti toistaa kokeen jatkuvamuotoisella säteilyllä ja tutki vaikutusta sarveiskalvon endoteeliin. Heidän kokeensa aikana apinat olivat hereillä, mikä vastaa paremmin todellisia altistusolosuhteita. Altistus kesti neljä tuntia, mutta sitä ei toistettu peräkkäisinä päivinä. Korkein heidän käyttämänsä altistustaso oli 430 W/m^2 , mikä vastaa noin 11 W/kg silmässä. Vaurioita ei kuitenkaan todettu.

Tähän negatiiviseen tulokseen on usein viitattu, ja sitä on pidetty osoituksena siitä, että Kuesin tulokset eivät olisi luotettavia. Kuitenkin on huomattava, että vastaavalla koejärjestelyllä (kerta-altistus jatkuvamuotoiselle säteilylle) Kuesin toteama kynnsarvo oli $7,8 \text{ W/kg}$. Ero ei siis ole kovin suuri, ja se saattaa hyvin selittyä sillä, että apinat tässä kokeessa olivat hereillä, mikä mahdollistaa lämmön poiston avoimen silmän kautta tai räpyttelemällä.

Kuesin ryhmä on myös tutkinut pulssimaisen mikroaaltosäteilyn vaikutusta apinan verkkokalvoon. Kokouksissa raportoituja alustavia tuloksia ei ole kuitenkaan toistaiseksi julkaistu tieteellisissä lehdissä (Kues ym. 1991 ja 1990). Neljän tunnin altistus seitsemän kertaa toistettuna aiheutti $3,5 - 4,0 \text{ W/kg}$ SAR-tasolla muutoksia verkkokalvon sähkökäyrässä. (Taajuus, pulssin kesto, pulssitaajuus ja ominaisabsorptio olivat $1,25 \text{ GHz}$, $0,5 \text{ ns}$, 16 Hz ja 250 mJ/kg .) Viikon kuluttua altistuksesta muutokset olivat palautuneet. Alhaisemmilla altistustasoilla raportoitiin alustavasti jo vuonna 1990 Bioelectromagnetics Society'n vuosikokouksessa muita verkkokalvovaikutuksia, mutta näitäkään tuloksia ei ole vahvistettu tieteellisen julkaisun muodossa.

Koska todetut silmämuutokset ovat nopeasti palautuvia, niiden merkitys terveydelle lienee vähäinen, jos ei altistus ole äärimmäisen pitkä ja tiheästi toistuva. Kuitenkin vaikutusten kynnsarvo pulssimuotoisella säteilyllä, erityisesti yhdistettynä viherkaihilääkitykseen, on huomattavan alhainen.

On varottava yleistämistä hyvin kapeilla pulsseilla saatuja tuloksia digitaalisten matkapuhelimien aiheuttamaan altistukseen. Pulssin kesto on niissä tyypillisesti yli kymmenkertainen ja pulssin SAR:n hetkellinen huippuarvo vastaavasti korkeintaan kymmenesosa edellä mainituissa pulssikokeissa käytettyyn altistukseen verrattuna.

4.5 Säteilyn vaikutukset solukalvon fysiologiaan

4.5.1 Yleistä

Solukalvo on merkittävä tekijä ulkoisten signaalien eli kemiallisten viestien välittämisessä solujen sisälle ja myös solujen välisten signaalien välittämisessä. Ulkoiset ja sisäiset signaalit voivat vaikuttaa lipideistä, proteiineista ja hiilihydraateista rakentuvaan solukalvoon muuttamalla solukalvon molekyylien keskinäistä sijaintia ja järjestystä ja aiheuttamalla muutoksia niiden vuorovaikutukseen muiden molekyylien kanssa. Lopulta solutasapaino ja solun vaste ulkoisiin ja sisäisiin signaaleihin voi muuttua. Radiotaajuisen säteilyn on arveltu vaikuttavan solukalvon rakenteeseen ja solukalvon molekyylien vuorovaikutukseen.

Radiotaajuisen säteilyn vaikutusmekanismeja solukalvon toimintaan ei vielä varmuudella tunneta. Havaitut vaikutukset voivat olla lämpö- (vesimolekyylien lisääntynyt värähtely) tai ei-lämpövaikutuksia (esim. muutokset varattujen molekyylien jakautumisessa tai vapaiden happiradikaalien syntyminen) tai molempia. Tämän hetkisen tiedon perusteella ei voida sulkea pois mahdollisuutta, että säteilytys suhteellisen alhaisellakin SAR-tasolla voisi aiheuttaa lämpövaikutuksia, koska solun osien lämpötiloja ei ole mahdollista mitata. On mahdollista, että yksittäisissä organelleissa ja makromolekyyleissä on voinut esiintyä fysiologisesti merkittävää lämpötilan nousua jopa huolellisesti lämpötilakontrolloiduissa koejärjestelyissä. On esitetty, että jotkut makromolekyylit voisivat absorboida selektiivisesti energiaa mikroaaltokentässä (ns. resonanssi-ilmiö). 1980-luvun puolessa välissä amerikkalainen tutkimusryhmä ilmoitti havainneensa DNA-molekyyleissä katkoksia resonanssityyppisen absorption seurauksena (Sagripanti ym. 1987), mutta resonanssien esiintymistä ei voitu vahvistaa toisessa riippumattomassa tutkimuksessa (Gabriel ym. 1987). Tällaiset organelli- ja makromolekyyllitasolla tapahtuvat lämpötilan nousut voivat olla riittäviä aiheuttamaan muutoksia solun fysiologiassa. Kuitenkin, riippumatta siitä, ovatko radiotaajuisen säteilyn solukalvovaikutukset termisiä vai eivät, vaikuttaa siltä että säteily voisi saada aikaan muutoksia solukalvon ominaisuuksissa aiheuttaen siten fysiologisesti merkittäviä seurauksia sekä *in vitro* että *in vivo*.

Radiotaajuisen säteilyn aiheuttaman solukalvovaurion mekanismi ja luonne riippuvat muun muassa säteilyn voimakkuudesta, taajuudesta, modulaatiosta ja

säteilytysajasta. Tiedetään, että säteily, jonka tehotiheys on suurempi kuin 100 - 150 W/m² aiheuttaa sekä suoria että epäsuoria lämpövaikutuksia. Alle 100 W/m² tehotiheystasolla ei-lämpövaikutukset ovat keskeisiä. Jo 1970-luvun puolesta välistä on esitetty havaintoja, että jatkuvan radiotaajuuden säteilyn amplitudimodulointi vaikuttaisi solukalvoon. Kun soluja säteilytetään heikolla matalataajuisesti (alle 100 Hz) moduloidulla säteilyllä, solukalvon toiminnassa ilmenee muutoksia, kuten kationien kulkeutumisessa, solukalvon permeabiliteetissa, ligandin kiinnittymisessä reseptoreihin, signaalin välittymisessä ja solujen välisessä kommunikaatiossa. Moduloidun säteilyn aiheuta lainkaan muutoksia. Mahdollinen selitys näille muutoksille solukalvon toiminnassa voisivat olla spesifiset vuorovaikutukset heikkojen matalataajuisesti moduloitujen sähkömagneettisten kenttien ja solukalvolla liikkuvien varattujen makromolekyylien ja ionien sekä solukalvojen staattisen sähköpotentiaalinsa kanssa. Hyvin voimakkaassa kentässä solukalvot ovat sähköisesti epälineaarisia rakenteita, mikä mahdollistaa sen, että kalvot toimivat ilmaisimina eli suodattavat mikroaaltokentästä pientaajuuden komponentin. Siten amplitudimoduloitujen mikroaaltokenttien ja pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien vaikutuksilla voi olla yhteyttä. Toistaiseksi ei kuitenkaan ole oleellisesti pystytty osoittamaan, että käytännössä esiintyvillä altistustasoilla esiintyisi epälineaarisia ilmiöitä.

Radiotaajuuden säteilyn vaikutuksia solukalvon rakenteeseen ja fysiologiaan on osittain onnistuttu selvittämään. Solujen altistaminen mikroaalloille voi muuttaa (i) solukalvon juoksevuutta ja permeabiliteettiä, (ii) entsyymien aktiivisuutta, (iii) solujen signaalien välittymismekanismia ja (iv) solumorfologiaa. Nämä muutokset solukalvon fysiologiassa voivat heikentää kudosten normaalia toimintaa ja aiheuttaa kasvainten promootiovaikutusta mutatoituneissa soluissa. Kuitenkin, kuten seuraavissa kohdissa esitetään, eri laboratorioissa saadut tulokset ovat erilaisista koejärjestelyistä ja malleista johtuen usein ristiriitaisia ja kaipaavat selvennystä. Lisäksi useista tutkimuksista puuttuvat kokeet, joiden perusteella voitaisiin päätellä, pystyvätkö havaitut mikroaaltovaikutukset solun komponentteihin aiheuttamaan todellisia fysiologisia vaikutuksia kudoksissa.

4.5.2 Ionikanavat

Na⁺/K⁺-ATP-aasi on yleisin malli, jota on käytetty tutkittaessa mikroaaltojen vaikutuksia solukalvon kationien permeabiliteettiin ja entsyymien aktiivisuuteen. Tsong ja Astumian (1988) ovat raportoineet, että solujen altistaminen 1 MHz kentälle (2 kV/m) on aiheuttanut Na⁺-ionien pumppauksen ulos solusta. Toisaalta altistamisen mikroaaltokentille (2,45 GHz, SAR 6 W/kg) on osoitettu estävän Na⁺/K⁺-ATP-aasin aktiivisuutta koejärjestelyissä, joissa muiden ATP-aasien aktiivisuus oli estetty ouabainilla. Vaikka kokeessa havaittiin merkittävä, yli 30 %, entsyymien aktiivisuuden estyminen, on tuloksen fysiologinen merkittävyys

epäselvä, koska merkittävä tulos saatiin vain fysiologisesti liian alhaisessa lämpötilassa (25 °C).

Amplitudimoduloidun radiotaajuussäteilyn on osoitettu vaikuttavan myös kalsium-ionien kulkeutumiseen. Dutta ym. (1989) raportoi, että 147 MHz kentät (SAR 0,05 - 0,005 W/kg) aiheutti Ca^{++} -ionien ulosvirtausta ihmisen neuroblastoomasoluista modulointitaajuuksilla 13 - 16 Hz ja 57,5 - 60 Hz. 16 Hz amplitudimoduloidun 915 MHz kentän aiheuttamasta vastaavanlaisesta Ca^{++} -ionien ulosvirtauksesta sama tutkimusryhmä oli raportoinut jo aiemmin (Dutta ym. 1984). Radiotaajuinen säteilyn aiheuttama stimulaatiovaikutus Ca^{++} -ionien ulosvirtaukseen hermosoluista vaikuttaa olevan ilmiönä yleinen, koska sitä on havaittu myös normaaleissa (transformoitumattomissa) lintujen ja kissojen aivosoluissa (Bawin ym. 1978, Blackman ym. 1981). Jos ilmiö esiintyisi myös *in vivo*, saattaisi Ca^{++} -ionien ulosvirtauksen häiriintyminen aivosoluissa vaikuttaa edellämainittujen tutkimusten valossa normaaliin aivojen fysiologiaan, koska Ca^{++} -ionit ovat välttämättömiä aivokudoksen normaalin toiminnan kannalta.

Ca^{++} -ioneilla on keskeinen vaikutus myös sydänlihaksen fysiologiaan. Schwartz ym. (1990) ovat raportoineet, että altistaminen 16 Hz amplitudimoduloidulle 240 MHz kentille (SAR 0,3 - 0,15 mW/kg) aiheutti 18 - 21 % lisäyksen Ca^{++} -ionien ulosvirtaukseen sammakon sydänekudoksessa. Sen sijaan altistaminen jatkuvamuotoiselle säteilylle tai 0,5 Hz (sammakon sydämen lyöntitiheys) amplitudimoduloidulle säteilylle ei vaikuttanut Ca^{++} -ionien ulosvirtaukseen. Myöskään Schwartzin ja Mealingin (1993) seuraavaksi raportoidussa tutkimuksessa, jossa sammakoita altistettiin joko jatkuvamuotoiselle tai 0,5 ja 16 Hz amplitudimoduloidulle 1 GHz kentälle (SAR $3,2 \cdot 10^{-6}$ - 1,6 W/kg) ei havaittu vaikutuksia sammakon sydänekudoksen Ca^{++} -ionien ulosvirtaukseen eikä myöskään sydämen eteisen lihasten supistumiseen. Kuten aivokudoksessa myös sydänekudoksessa havaitut muutokset Ca^{++} -ionien ulosvirtauksessa voivat aiheuttaa häiriöitä sen normaaliin toimintaan.

4.5.3 Solukalvon läpäisevyys molekyyleille

Lange ym. (1993) ovat tutkineet mikroaaltojen (2,45 GHz, jatkuvamuotoinen säteily, tehoitiheys 800 W/m², altistusaika 30 min, SAR 72 W/kg) tai vastaavan lämpökuorman (kummatkin kohottivat rotan peräsuolen lämpötilaa 3°C) vaikutusta rotan maksan tiehytkalvon läpäisevyyteen käyttäen tritium-merkittyä sukroosia ja manniittia. Radiotaajuisesta säteilyaltistuksesta aiheutuvan kalvon sukroosin läpäisevyyden heikentymisen havaittiin aiheutuvan lämpövaikutuksesta. Kuitenkin manniitin läpäisevyyden heikentyminen osoittautui spesifiseksi radiotaajuisen säteilyn vaikutukseksi, koska pelkkä lämpö ei aiheuttanut vastaavaa vaikutusta.

4.5.4 Solukalvon juoksevuus

Phelan ym.:n 1992 julkaisemat tulokset tukevat yllä kuvattua Lange ym.:n (1993) havaintoa radiotaajuisen säteilyn aiheuttamasta solukalvon läpäisevyyden heikentymisestä. He havaitsivat, että B-16 melanosyyttisolulinjan altistaminen radiotaajuiselle säteilylle (SAR 0,2 W/kg, tehotiheys 100 W/m² ja pulssintoistotaajuus 100 Hz) aiheutti solukalvon jähmettymistä. Koska superoksididismutaasi heikensi vaikutusta, pääteltiin, että hapettuneet vapaat radikaalit aiheuttivat jähmettymisvaikutuksen. Phelan ym. eivät kuitenkaan todenneet, että altistaminen radiotaajuiselle säteilylle lisäisi vapaiden radikaalien tuotantoa vaan he ehdottivat, että altistuminen aiheuttaisi joitain häiriöitä normaaliin vapaiden radikaalien tuotantoon. Ristiriidassa edellä esitetyn 'jähmettymisvaikutuksen' kanssa ovat tutkimukset, joissa mikroaaltojen on raportoitu lisäävän solukalvon juoksevuutta ja sen seurauksena muuttavan solun pintavarausta. Ismailov (1978) on osoittanut, että radiotaajuinen säteily voi aiheuttaa erytrosyyttien lisääntynyttä elektroforeettista liikkuvuutta 30 minuuttia säteilytyksen jälkeen SAR:n ollessa suurempi kuin 10 W/kg. Todennäköisin syy ilmiöön on solukalvon kasvanut negatiivinen varaus. Samoin Somosy ym.:n (1991) tutkimuksessa havaittiin, että altistaminen matalataajuisesti moduloidulle radiotaajuiselle säteilylle (24 W/kg) aiheutti muutoksen ferritiini-kationien kiinnittymisessä solun pintaan. Sen sijaan jatkuva mikroaaltokenttä ei aiheuttanut muutosta.

4.5.5 Muutokset solun morfologiassa

Chang (1989) havaitsi, että lyhyet altistukset heikolle jatkuvamuotoiselle radiotaajuiselle säteilylle *in vitro* (100 W/m², SAR 0,2418 W/kg) aiheuttivat merkittäviä morfologisia muutoksia maksasoluihin. Somosy ym. (1991) havaitsivat samankaltaisia muutoksia fibroblastien hienorakenteessa samalla tehotiheysalueella. Moduloidut mikroaaltokentät olivat tehokkaampia kuin jatkuvamuotoiset kentät. Matalataajuisesti moduloidulle radiotaajuiselle säteilylle (0,024 W/kg) altistaminen aiheutti solujen rypistymistä ja niiden osittaista irtoamista substraatista. Kuitenkin sekä jatkuvamuotoinen että moduloitu radiotaajuinen säteily aiheuttivat samanlaisia morfologisia muutoksia solujen organelleihin, kuten solulimakalvoston ja Golgin laitteen venymistä, lysosomien ja autofagosytoosirakkuloiden määrän lisääntymistä, sisemmän mitokondriokalvon hajoamista, myeliinirakkuloiden ilmaantumista, syvien kuroumien ilmaantumista tumakalvoon. Tarvitaan vielä lisätutkimuksia, jotta voitaisiin arvioida näiden morfologisten muutosten fysiologista merkittävyyttä.

4.6 Säteilyn vaikutukset entsyymien aktiivisuuteen ja ekspressioon

4.6.1 Koliiniesteraasi ja asetyylikoliiniesteraasi

Hermosolujen välittäjäaineita säätelevä koliiniesteraasi ja asetyylikoliiniesteraasientsyymi ChE/AChE on yleinen malli, jota käytetään tutkittaessa mikroaaltosen vaikutusta entsyymien aktiivisuuteen. Varhaiset Nikogosyanin (1962), Revutsyn ja Edelmanin (1964) ja Baranskin (1972) tutkimukset antoivat viitteitä siitä, että mikroaaltoaltistus voi muuttaa koliiniesteraasin aktiivisuutta. Näiden tutkimusten välillä oli kuitenkin ristiriitaisuuksia. Nikogosyan (1962) havaitsi ChE-aktiivisuuden kasvavan veressä, jota oli altistettu 3 GHz radiotaajuinen säteilylle tehottiheydellä 400 W/m^2 1,5 h ajan. Revutsky ja Edelman (1964) raportoivat samanlaisista havainnoista 2,45 GHz taajuudella. Baranski (1972) havaitsi mikroaaltoaltistusta seuranneiden ChE-aktiivisuusmuutosten olevan erilaisia eri lajeille. Marsujen aivojen altistus yli kolmen kuukauden ajan kerran päivässä pulssimaiselle säteilylle, jonka tehottiheys oli 250 W/m^2 , aiheutti muutoksia ChE-aktiivisuuteen. Samassa tutkimuksessa havaittiin myös, että marsun aivojen säteilyttäminen kolmen tunnin ajan 2,45 GHz kentille tehottiheyden ollessa 35 W/m^2 ja 250 W/m^2 aiheutti tehottiheydestä riippuvia muutoksia ChE-aktiivisuuteen. Vaikutti myös siltä, että pulssimainen säteily oli tehokkaampaa kuin jatkuva säteily.

Edellisiä myöhäisemmissä tutkimuksissa Olcerst ja Rabinowitz (1978) sekä Galvin ym. (1981) raportoivat, ettei mikroaalloilla ollut minkäänlaisia vaikutuksia ChE/AChE-aktiivisuuteen. Olcerst ja Rabinovitz (1978) raportoivat, että altistettaessa puhdistettua entsyymiä ja jäniksen veressä olevaa entsyymiä lämpökontrolloiduissa olosuhteissa 2,45 GHz kentille tehottiheyden ollessa $100 - 1000 \text{ W/m}^2$, ei ChE-aktiivisuudessa havaittu muutoksia. Sen sijaan lämpökontrolloimattomassa kokeessa entsyymien aktiivisuuden havaittiin laskevan tehottiheyden ollessa $1 - 250 \text{ W/m}^2$. Aktiivisuuden lasku aiheutui todennäköisimmin entsyymien termisestä denaturaatiosta. Myöskään Galvin ym. (1981) eivät havainneet muutoksia entsyymien aktiivisuudessa altistettaessa puhdistettua AChE ja kreatiinifosfokinaasia 2,45 GHz kentille (SAR $1 - 100 \text{ W/kg}$). Dutta ym. (1992) raportoivat, että altistaminen 16 Hz amplitudimoduloituille 147 MHz kentille aiheutti varhaishermokasvainsoluissa (NG108) entsyymien aktiivisuuden lisääntymistä, mikä voitiin havaita aika-ikkunassa 7,0 - 7,5 h säteilytyksen jälkeen. Edellä mainittujen tutkimusten perusteella ei voida vielä sanoa, vaikuttavatko mikroaallot ChE- tai AChE-aktiivisuuteen vai eivät.

4.6.2 β -galaktosidaasi

Saffer ja Profenno (1992) tutkivat taajuudeltaan vaihtelevan (2 - 4 GHz) radiotaajuisten säteilyn vaikutusta β -galaktosidaasin ekspressioon ja aktiivisuuteen *E. coli*:ssa SAR:n ollessa vakio 10 W/kg. He havaitsivat radiotaajuisten säteilyn taajuudesta riippumatonta entsyymien ekspression ja aktiivisuuden lisääntymistä, mikä viittasi siihen, että kyseessä oli lämpövaikutus. Koska lämmittäminen ei kuitenkaan aiheuttanut β -galaktosidaasin aktiivisuuden lisääntymistä, tekijät ehdottivat, että havaitut mikroaaltovaikutukset olisivat aiheutuneet säteilyn aikaan saamista lämpögradieniteista.

4.6.3 Ornitiinidekarboksylaasi

Buys ym. (1988) ovat tutkineet mikroaaltojen vaikutusta ornitiinidekarboksylaasiin (ODC), entsyymiin, joka säätelee niiden polyamiinien synteesiä, jotka ovat välttämättömiä DNA-synteesille solusyklin S-vaiheen aikana. Siten kaikki häiriöt ODC-aktiivisuudessa voivat suoraan vaikuttaa solusyklin edistymiseen ja solujen lisääntymiseen. Buys ym. raportoivat, että altistaminen 10 - 20 MHz amplitudimoduloidulle 450 MHz kentälle johti useiden syöpäsolulinjojen (Reuber H35 hepatooma, CHO, 294T melanooma) tapauksessa aina 50 % lisääntymiseen ODC:n aktiivisuudessa (vaste suurimmillaan 16 Hz modulaatiotaajuudella). Amplitudimodulaatiolla välillä 20 - 100 Hz ei ollut vaikutusta ODC-aktiivisuuteen. Altistettaessa soluja 450 MHz kentälle amplitudimodulaatiotaajuuden ollessa 16 Hz vaikutus tehostui, jos säteilytystä seurasi forboliesterikäsittely (TPA, 1,6 μ M). ODC-aktiivisuuden lisääntymisen fysiologinen merkittävyys jää kuitenkin epäselväksi, koska siihen ei liittynyt mitään muutoksia DNA-synteesissä (3 H-tymidiinin sisäänotto). Litovitz ym. (1993) raportoivat vastaavanlaisia mikroaaltojen ODC-aktiivisuutta lisääviä vaikutuksia. ODC-aktiivisuus kaksinkertaistui kahdeksan tuntia altistuksen (55, 60, 65 Hz amplitudimoduloitu, 915 MHz taajuus, SAR 2,5 W/kg) jälkeen. Mahdollisia ODC-aktivaation lisääntymisestä aiheutuvia fysiologisia seurauksia ei tässä tutkimuksessa pyritty selvittämään.

4.7 Radiotaajuisten säteilyn mahdollinen osuus syövän syntyyn

4.7.1 Genotoksiset vaikutukset

Keskeinen matkapuhelimien käyttöön liittyvä kysymys on, voiko niiden käyttö vaikuttaa syövän syntyyn. Syövän kehittyminen on asteittainen prosessi, jonka

vaihteita ovat initiaatio, promootio ja progressio. Matkapuhelinten säteilyn mahdollista vaikutusta syövän initiaatioon voidaan arvioida genotoksisuustesteillä.

Altiste joka pystyy vaurioittamaan solun perimää voi potentiaalisesti myös aiheuttaa syöpää (ns. initiaattorikarsinogeeni) tai periytyviä haittoja. Perimäaineksen vaurioitumista kuvaavia genotoksisuustestejä on monenlaisia. Eräät testit mittaavat DNA:n hajoamista (esimerkiksi yhden ja kahden DNA juosteen katkokset, kromosomivauriot) ja toiset taas DNA:n emäsjärjestyksen muutoksia (esim. emäsparin lisäys tai poistuminen korjautumisen seurauksena tai depurinaatio). Joissakin genotoksisuustesteissä varsinainen mekanismi voi olla tuntematon ja mitattava muutos voi hyvin olla seurausta sekä genotoksisesta että ei-genotoksisesta prosessista (kromosomimäärän muutos, siittiöpämuodostumat, solutransformaatio).

Yleisesti ottaen pidetään hyvin epätodennäköisenä, että radiotaajuinen säteily tai edes mikroaaltosäteily yli 1 GHz taajuudella pystyisi suoraan aiheuttamaan perimävaurioita, sillä säteilyn energia on aivan liian pieni pystyäkseen rikkomaan kemiallisia siltoja (Léonard ym. 1983). Kun radiotaajuinen säteilyn absorptio kudokseen on niin suurta, että se aiheuttaa selvää lämpenemistä (vrt. mikroaaltouuni), solun rakenteissa alkaa tapahtua muutoksia, mm. proteiinien denaturaatiota. Joissakin altistustilanteissa on mahdollista että radiotaajuinen säteily aiheuttaisi epäsuoria genotoksia vaikutuksia joko lämpövaikutuksen kautta tai vaikutuksina jotka välittyisivät solukalvon läpäisevyyssominaisuuksien muutosten kautta.

Radiotaajuisen säteilyn genotoksisuudesta Brusickin (1995; 1995/1996) tekemä yhteenveto on laajin, käsittäen kaikkiaan 105 tutkimusta. Toistaiseksi tätä yhteenvetoa on esitelty vasta kansainvälisissä kokouksissa, joten täydellistä kirjallisuuskatsausta kaikista näistä tutkimuksista ei ole saatavilla. Brusickin johtaman työryhmän arvioiman tutkimusmateriaalin skaala oli hyvin laaja ja tutkimusten vertailu on hankalaa, koska niissä oli käytetty erilaisia taajuuksia, erilaisia säteilylähteitä ja altistusolosuhteita ja useita erilaisia testisysteemejä. Vain osa tutkimuksista koskee matkapuhelinten taajuuksia. Useissa tapauksissa altistustasot ovat olleet suhteellisen korkeita, jolloin lämpövaikutuksia ei voi sulkea pois. Genotoksisuustestien tuloksia tulkittaessa on syytä pitää mielessä, että etenkin *in vitro* testit ovat suhteellisen herkkiä ja että satunnaisia (sporadisia) positiivisia tuloksia esiintyy kemiallisia aineitakin testattaessa, jolloin satunnaisesti voidaan nähdä marginaalisia vaikutuksia ei-mutageenienkin kohdalla. *In vitro* olosuhteissa tällainen väärä positiivinen tulos voi olla seurausta mm. pH:n tai osmoottisten olosuhteiden muutoksesta. Sekä *in vitro* että *in vivo* marginaalisen vasteen taustalla voi olla myös epänormaali kontrollitulos tai otoksen pieni koko. Testisysteemistä riippuen sporadisten positiivisten tulosten osuus vaihtelee muutamasta prosentista jopa muutama kymmeneen prosenttiin. Taulukossa IV on Brusickin ryhmän yhteenveto kaikkiaan 105 genotoksisuustutkimuksesta.

Perimävauriot on luokiteltu mekanismin mukaan kolmeen luokkaan: DNA:n hajoaminen (yhteensä 55 tutkimusta), nukleotidimuutos ja/tai rekombinaatio (yhteensä 43 tutkimusta) sekä tuntemattomat mekanismit (7 tutkimusta). Kaikkiin tutkimuksista 73 antoi negatiivisen tuloksen ja 32 positiivisen. Mekanismeittain tarkasteltuna nukleotidimuutoksiin (pistemutaatio) ja rekombinaatioon perustuvat testit antoivat lähes aina negatiivisen tuloksen, kun taas DNA:n hajoamista mittavista tutkimuksista lähes puolet olivat positiivisia. Tämä saattaisi osaltaan selittyä lämpövaikutuksilla, joiden nimenomaan voisi odottaa aiheuttavan pikemmin DNA:n katkoksia kuin emäsmuutoksia. Yhteenvetona näistä yli sadasta tutkimuksesta Brusick esittää, että radiotaajuinen säteily ei ole suoraan mutagenista ja että suurilla taajuuksilla ja suurilla kentän voimakkuuksilla havaitut haitalliset vaikutukset ovat seurausta lämpövaikutuksista. Kuitenkin on mahdollista, että joissakin altistusolosuhteissa voi aiheutua epäsuoria vaikutuksia geenien replikaatioon ja transkriptioon.

Taulukko IV. Eri tutkimuksissa saatuja tuloksia radiotaajuisen säteilyn genotoksisista vaikutuksista.

Mekanismi	Vauriotyyppi	Tutkimuksen tulos		
		Tutkimuksia	Negatiivinen	Positiivinen
DNA:n hajoaminen				
	DNA-katkokset	14	9	5*
	Mikrotumat	5	0	5
	Kromosomivauriot	30	17	13
	Domin. letaalimutaatio	6	3	3
Nukleotidisubstituutio ja rekombinaatio				
	Geenimutaatio	26	25	1
	SCE	17	15	2
Tuntematon				
	Kromosomin häviämä	2	2	0
	Siittiöpämuodostumat	2	1	1
	Solutransformaatio	3	1	2

* Kaikki *in vivo*

Erityisen huomionarvoisia ovat tutkimukset, joissa radiotaajuisen säteilyn teho on ollut niin matala, että lämpövaikutuksen mahdollisuus on suljettu pois. Lai ja Singh (1995) altistivat rottia kahden tunnin ajan 2450 MHz mikroaaltosäteilylle ja tutkivat rotan aivosolujen DNA-katkosten määrää yksisoluelektroforeesimenetelmällä (ns. Comet assay). Pulssimaisen säteilyn (2 μ s pulssinkesto, 500 pulssia/s) jälkeen välittömästi elektroforeesiin vietyjen aivosolujen DNA-katkosten määrä oli kontrollitasoa, mutta DNA-katkosten määrä lisääntyi merkittävästi 4 tunnin kuluttua altistuksesta (SAR 1,2 W/kg). Jatkuvamuotoisen 2450 MHz säteilyn jälkeen DNA-katkosten lisäys oli havaittavissa sekä heti altistuksen jälkeen että 4 tuntia myöhemmin (SAR 1,2 W/kg). Sarkar ym. (1994) altistivat hiiriä 2450 MHz säteilylle 10 W/m² tehoiteheydellä (SAR 1,2 W/kg) 2 tunnin ajan päivittäin 120, 150 ja 200 päivän ajan. Altistettujen ja kontrollieläinten kivesten ja aivojen DNA-näytteet pilkottiin restriktioentsyymillä ja hybridisoitiin synteettisen toistuvajaksoisen oligonukleotidikoettimen kanssa. Kontrollieläimiin verrattuna altistettujen eläinten DNA-emäsjaksojen pituus oli muuttunut 7 - 8 kilon emäksen alueella. Koska kyseistä 7,7 kb *Hinf* I fragmenttia ei näkynyt kontrollieläinten DNA:ssa, mutta se ilmaantui altistettujen eläinten DNA:han, tutkijat arvioivat markkerin kopioluvun olevan altistumattomilla eläimillä niin alhainen, ettei se näy elektroforeesissa. Mikroaaltoaltistus saisi aikaan näiden toistuvajaksoisten emäsjaksojen monistumisen. Toistaiseksi ei ole tietoa siitä, aiheuttavatko genotoksiset aineet toistuvajaksoisen DNA:n mutaatioita. Toisaalta kyllä tiedetään, että stressi voi saada aikaan DNA-jaksojen ylimääräistä monistumista toistuvajaksoisessa DNA:ssa ei-koodatuilla (geenien ulkopuolisilla) alueilla (Ramel 1989).

Suorien DNA-vaikutusten puuttuminen ei poista sitä mahdollisuutta, että joissakin olosuhteissa DNA voisi vaurioitua epäsuorien mekanismien kautta. Erityisesti viime aikoina on tutkittu sitä voisivatko sähkömagneettiset kentät herkistää soluja kemiallisten mutageenien ja karsinogeenien vaikutuksille. Tulokset näistä yhteisvaikutustutkimuksista ovat vaihtelevia, osa osoittaa yhteisvaikutuksia ja osa ei (Rosenthal ym. 1989, Kerbacher ym. 1990, Ciaravino ym. 1991, Scarfi ym. 1991, Hintenlang 1993, Damiani ym. 1995, Maes ym. 1996). Em. tutkimuksista vain osa koskee radiotaajuista säteilyä ja nimenomaan matkapuhelintaajuuksia ovat tutkineet vain Damiani ym. (1995) ja Maes ym. (1996). Jälkimmäinen ryhmä havaitsi että GSM tukiaseman antennin 954 MHz kentälle altistuminen lisäsi soluviljelmässä mitomysiini-C:n genotoksista vaikutusta. Mahdollisena mekanismina tällaiselle herkistymiselle kirjoittajat ehdottivat joko solukalvon läpäisevyyden lisääntymistä tai kromatiinin aukenemista, joka helpottaisi kemiallisen mutageenin pääsyä DNA:han.

4.7.2 Vaikutukset solunjakautumiseen ja syövän promootioon *in vitro*

Edellä kohdissa 4.5 ja 4.6 esitetyillä radiotaajuisen säteilyn vaikutuksilla solukalvon fysiologiaan ja entsyymien aktiivisuuteen voi olla edistävää vaikutus kasvainten promootioon ja progressioon. Useissa tutkimuksissa on käsitelty radiotaajuisen säteilyn vaikutusta joko yksinään tai yhdessä muiden tekijöiden kanssa solujen transformaatioon ja solujen lisääntymiseen. Balcer-Kubiczek ja Harrison (1985, 1989, 1991) ovat tutkineet radiotaajuisen säteilyn vaikutusta C3H/10T^{1/2} hiiren sikiön fibroblastien transformaatioon. Heidän ensimmäinen tutkimuksensa (Balcer-Kubiczek ja Harrison 1985), jossa radiotaajuisen säteilyn taajuus oli 2,45 GHz (SAR 4,4 W/kg), osoitti, että radiotaajuiselle säteilylle altistaminen vähensi solujen lisääntymiskykyä 50 % ja etteivät mikroaallot yksinään eivätkä bentso-pyreenikäsittelyyn ja röntgensäteilyaltistukseen yhdistettynä aiheuttaneet solujen transformaatiota. Mikroaaltoaltistus, jota seurasi forboli-esterikäsittely (konsentraatio, joka ei aiheuta solujen transfirmaatiota) aiheutti kuitenkin tilastollisesti merkitsevän 3,5-kertaisen lisäyksen solujen transformaatioon. Myös seuraavassa tutkimuksessaan Balcer-Kubiczek ja Harrison (1989) raportoivat samanlaisesta mikroaaltojen ja forboli-esterin yhteisvaikutuksesta. Tässä tutkimuksessa tekijät eivät kuitenkaan havainneet mikroalloilla olevan mitään vaikutusta solujen lisääntymiskykyyn, mikä on ristiriidassa heidän ensimmäisessä tutkimuksessaan julkaistujen löydösten kanssa (Balcer-Kubiczek ja Harrison 1985).

Samat tekijät ovat myöhemmin raportoineet, että forboli-esterikäsittelyyn yhdistettynä myös 120 Hz pulssimoduloitu 2,45 GHz (SAR 0,1, 1,0 ja 4,4 W/kg) radiotaajuinen säteily aiheutti C3H/10T^{1/2}-solujen transformaatiota. Joistain ristiriitaisuuksista huolimatta kolme edellä referoitua tutkimusta viittaavat siihen, että vaikeivät mikroaallot yksinään mahdollisesti olisikaan riittävän tehokkaita aiheuttamaan solujen transformaatiota, voivat ne johonkin solujen transformaatiota edistäviin tai soluproliferaatiota stimuloiviin tekijöihin yhdistettyinä saada aikaan karsinogeenisia vaikutuksia soluviljelmissä *in vitro*. Päteekö tämä *in vivo*, on vielä selvittämättä.

4.7.3 Eläinkokeet syövän syynyn tutkimiseksi *in vivo*

Eläinkokeissa painopiste on viime vuosina ollut radiotaajuisen säteilyn mahdollisessa syövän promootiovaikutuksessa eli kyvyssä edistää syövän kasvua. Puolalainen tutkimusryhmä (Szmigielski ym. 1982) tutki promootiovaikutusta hiirillä kolmella eri syöpämallilla: 1) sarkoomasoluja siirrettiin toisesta hiirestä sellainen määrä, joka aiheuttaa yleensä kahden viikon kuluttua 1 - 4 syöpäpesäkettä vastaanottavassa hiiressä; 2) hiiren ihoa käsiteltiin viiden kuukauden aikana

benzopyreenillä, mikä aiheuttaa ihosyöpää useimmille hiirille; 3) käytettiin sellaista hiirikantaa, jossa noin 80 % naaraista saa spontaanisti rintasyövän vuoden sisällä. Altistuksena käytettiin 2450 MHz jatkuvamuotoista säteilyä, jonka tehoteho oli joko 50 tai 150 W/m². Niitä vastaava kokokehon SAR on arviolta joko 2 - 3 tai 6 - 8 W/kg. Altistusajat olivat 2 h päivässä ja 6 päivää viikossa. Toisia hiiriryhmiä pidettiin vertailun vuoksi viikkoja tai kuukausia vangittuina hyvin pienissä häikeissä. Tämä aiheuttaa kroonisen stressioireyhtymän ja aggressiivisuutta.

Kaikissa kolmessa koejärjestelyssä tulokset olivat samansuuntaiset. Altistus radiotaajuiselle säteilylle aikaisti syövän kehitystä merkittävästi, samoin myös vangitseminen. Vaikutus alhaisemmalla SAR-tasolla (2 - 3 W/kg) oli hyvin saman suuruinen kuin vangitsemisella; korkeammalla SAR:lla se oli selvästi suurempi.

Tulokset ovat sinänsä vakuuttavia. Kuitenkin raportoinnissa on puutteita ja epä johdonmukaisuuksia, jotka antavat aiheita suhtautua niihin pienellä varauksella. Tulokset viittaavat siihen, että vaikka altistus ei mitattavasti nostanut peräsuolen lämpötilaa, vaikutus sittenkin johtuu epäspesifisestä, lämpökuormaan liittyvästä fyysisestä stressistä. Jo 2 W/kg ylittää kirjoittajien mukaan huomattavasti hiirien perusaineenvaihdunnan energiantuoton. Aikaisemmassa työssään (Roszkowski ym. 1980) samat tutkijat ovat todenneet, että 18 W/kg absorptio aiheutti hiirillä selvän lämmön nousun (peräsuolen lämpötila $41,5 \pm 0,5$ °C). Toisten tutkimusten mukaan (Gordon 1982) tosin hiiren perusaineenvaihdunta on edellämainittua suurempi ja vasta yli 20 W/kg aiheuttaisi hiirellä selvästi havaittavaa lämpörasitusta.

Toinen ryhmä (Santini ym. 1988) altisti hiiriä 2450 MHz taajuudella sekä jatkuvamuotoiselle että pulssimuotoiselle säteilylle siten, että keskimääräinen koko kehon SAR oli 1.2 W/kg. Kuukausia kestäväällä, päivittäisellä altistuksella ei todettu olevan mitään vaikutusta hiiriin siirretyn melanoman kehittymiseen.

Adey ym. (1996) ovat hiljattain lyhyesti raportoineet Bioelectromagnetics Society'n vuosikokouksessa tutkimuksesta, jossa rotille oli annettu sikiökautena pieni annos etylnitrosurea, joka aiheuttaa hermoston kasvaimia. Rottia altistettiin sen jälkeen matkapuhelinaltistusta matkivalle, pulssimoduloidulle säteilylle 2 h päivässä, 4 päivää viikossa. Keskimääräinen koko kehon SAR oli 0,3-0,75 W/kg rotan koon mukaan. Minkäänlaista keskushermostokasvainten syntyä tai kasvua edistävää vaikutusta ei todettu; itse asiassa kasvaimia oli vähemmän ja ne olivat kooltaan pienempiä säteilytetyssä ryhmässä kuin ilman säteilytystä.

Myös Suomessa on menossa COST 244 projektiin liittyvä tutkimus, jossa selvitetään matkapuhelinaltistusta jäljittelevän säteilyn mahdollista syövän syntyä edistävää vaikutusta (promootiovaikutusta) hiirillä (Heikkinen ym. 1997). Syövän

alulle panevana (initioivana) tekijänä käytettiin ionisoivaa säteilyä. Keskimääräiset koko kehon SAR-arvot ovat jatkuvamuotoisella säteilyllä 1,2 - 1,5 W/kg ja pulssimuotoisella säteilyllä 0,3 - 0,4 W/kg. Alustavien tulosten mukaan radiotaajuisella säteilyllä ei ole todettu selvää syöpää edistävää vaikutusta. Sen sijaan altistusolosuhteet, jotka ovat kummallekin altistustyyppille ja myös valealtistukselle samat (ahtautuminen pieneen tilaan 1,5 h päivässä 5 päivää viikossa koko koejakson ajan) vaikuttivat selvästi vähentävästi hiirien painonkehitykseen. Vasta hiiristä otettujen näytteiden histopatologinen tutkimus osoittaa, onko elinkohtainen syöpäriski noussut.

On myös tutkittu tutkatyyppisen pulssisäteilyn vaikutusta rotan terveyteen elinikäisellä, miltei ympärivuorokautisella altistuksella (Chou ym. 1992). Taajuus oli 2450 MHz, pulssin kesto 10 μ s, pulssitaajuus 800 Hz ja keskimääräinen koko kehon SAR 0,15 - 0,4 W/kg. Vaikutus veriarvoihin ja muihin lukuisiin terveyden osoittimiin oli olematon, kuten myös vaikutus elinikään sekä kasvainten kokonaisuuteen. Primaaristen pahanlaatuisten kasvainten kokonaisuus oli kuitenkin korkeampi altistetussa ryhmässä (18 kpl) kuin kontrolliryhmässä (5 kpl). Silti minkään yksittäisen kasvaintyyppin esiintyvyys altistetuilla rotilla ei eronnut saman rottakannan esiintyvyydestä yleensä. Tämän takia kirjoittajat eivät itse ole vakuuttuneita siitä, että todetulla erolla on biologista merkitystä.

Äskettäin ilmestyneessä tutkimuksessa (Repacholi ym. 1997) tutkittiin matkapuhelinaltistusta jäljittelevän pulssimuotoisen säteilyn vaikutusta hiiriin, joihin on siirretty lymfooman (imusolusyövän) syntyä edistävä kasvaingeeni. Taajuus oli 900 MHz, pulssileveys 600 ms ja pulssitaajuus 217 Hz. Hiiriä altistettiin 30 min kaksi kertaa päivässä (12 tunnin välein) 18 kuukauden ajan. Eläimet olivat altistuksen aikana vapaina häkeissään. Koko kehon SAR vaihteli hiiren sijainnin ja koon mukaan arviolta 0,008 - 4,2 W/kg. Voidaan arvioida, että jokaisen hiiren altistus on ainakin joskus ollut vähintään muutama W/kg. Altistuneista 101:stä hiirestä 43 sai lymfooman; valealtistuneista (100) vastaava luku oli 22. Tutkimus osoittaa vakuuttavasti, että altistus edisti lymfooman kehitystä kasvaingeeniä kantavissa hiirissä. Sen sijaan koejärjestelyistä aiheutuvan altistuksen suuren vaihtelun johdosta ei ole mahdollista arvioida, millä altistustasolla syöpää edistävä vaikutus on syntynyt. Korkeimmat SAR-arvot ovat voineet aiheuttaa lieviä muutoksia lämmönsäätelyjärjestelmässä ilman varsinaista lämpötilan nousua (isoterminen vaikutus). Sinänsä tutkimus tukee yllä mainittuja muutamia positiivisia tuloksia.

Suuri osa heikon radiotaajuisen säteilyn mahdollista syöpää edistävää vaikutusta koskevista eläinkokeista on kuitenkin päätyntä negatiiviseen tulokseen. Mistään voimakkaasta, spesifisestä syöpävaikutuksesta selvästi lämmityskuormitusta alittavalla altistustasolla ei ilmeisestikään voi olla kysymys.

4.8 Epidemiologiset tutkimukset

Epidemiologisia tutkimuksia radiotaajuisen säteilyn terveysvaikutuksista on vähän, ja kaikissa tutkimuksissa on puutteita (Bergqvist 1997). Useimmiten altistustiedot perustuvat pelkästään ammattinimikkeisiin, ja suorat mittaustiedot puuttuvat. Useimmissa tutkimuksissa myös tiedot muista altisteista, kuten kemikaaleista, sekä muista sekoittavista tekijöistä puuttuvat täysin. Useat tutkimukset ovat antaneet täysin negatiivisia tuloksia; harvat positiiviset tulokset eivät yleensä ole toistuneet muissa tutkimuksissa. WHO on raportissaan (WHO 1993) todennut, että epidemiologiset tutkimukset eivät anna selvää näyttöä siitä, että altistus radiotaajuisille kentille vaikuttaisi haitallisesti ihmisten terveyteen.

Hiljattain ilmestynyt puolalainen tutkimus (Szmigielski ym. 1996) tutki syöpäsairastuvuutta sotilashenkilökunnan keskuudessa, joista osa altistuu työssään pulssimuotoiselle tai jatkuvamuotoiselle radiotaajuiselle säteilylle. Työtehtävien mukaan suoritettiin jako altistuneisiin ja ei-altistuneisiin ihmisiin. Tehotiheysmittauksia suoritettiin altistuneiden henkilöiden työpisteissä, mutta muunlaista yksilöllistä selvitystä altistuksen tasosta tai kestosta ei tehty.

Tässä tutkimuksessa todettiin usean syöpälajin olevan selvästi yleisempi altistuneiden kuin ei-altistuneiden keskuudessa. Kokonaissyöpäsairastuvuus oli kaksinkertainen altistuneiden ryhmässä. Kuitenkin on epäselvää miten tieto altistuksesta on saatu, ja on mahdollista, että tieto syövästä on päässyt vaikuttamaan altistusluokitukseen. Lisäksi raportista ei selviä koskeeko altistustilanne samaa vuotta, jolloin syöpädiagnoosi on tehty, vaiko menneitä vuosia. Selvitystä altistuksesta muille syöpää aiheuttaville aineille ei raportissa ole esitetty. Näinollen mahdollisia virhelähteitä ei voi luotettavasti arvioida.

Matkapuhelimien mahdollisia terveyshaittoja koskevat epidemiologiset tutkimukset on aloitettu, mutta yhdestäkään ei ole käytettävissä lopullisia tuloksia. USAssa on meneillään tutkimus, joka perustuu yksityisiin matkapuhelinliittymien tilaajien rekistereihin. Kohortissa on 250000 ihmistä. Kohortissa on mahdollisuuksien mukaan tehty jako käsipuhelimiin ja autopuhelimiin, joista jälkimmäinen aiheuttaa mitättömän pienen altistuksen. Ensimmäinen osatulos on julkaistu (Rothman ym. 1996). Se koskee kokonaiskuolleisuutta yhden vuoden aikana (1994). Kuolleisuus matkapuhelimien käyttäjillä on kokonaisuudessaan huomattavasti pienempi kuin koko väestössä, mikä ilmeisesti liittyy korkeampaan sosioekonomiseen luokkaan. Minkäänlaista eroa autopuhelimien ja käsipuhelimien käyttäjien välillä ei todettu.

Tämä väliaikainen tulos kertoo vain sen, että altistuksella ei ole lyhyellä tähtäimellä suurta vaikutusta kokonaiskuolleisuuteen. Sen sijaan se ei vielä anna minkäänlaista vastausta esim. mahdollisesta aivosyöpäriskistä.

Arvioitaessa matkapuhelimien käyttöön mahdollisesti liittyviä terveysriskejä tähän mennessä julkaistuista epidemiologisista tutkimuksista on vain vähän apua. Niihin liittyvien rajoitusten vuoksi niistä ei voida tällä hetkellä vetää johtopäätöksiä suuntaan eikä toiseen.

5 SÄTEILYTURVALLISUUS- STANDARDIT

5.1 Yleistä

Viime vuosina on julkaistu kansainvälisiä ja kansallisia määräyksiä, standardeja ja suosituksia radiotaajuisen säteilyn aiheuttaman vaaran torjumiseksi. Matkapuhelimien turvallisuuden kannalta tärkeimpiä ovat laitteiden lähettämää säteilyä sekä käyttäjän altistumista rajoittavat standardit, mutta myös testausmenetelmiä yhdenmukaistavat tekniset standardit ja dokumentit vaikuttavat merkittävästi altistumiseen.

Yleisessä myynnissä olevien matkapuhelimien säteilyä rajoitetaan valvomatonta altistumista koskevien rajojen perusteella. Ammattikäyttöön tarkoitettuihin radioverkkoihin liitettyjen radiolaitteiden aiheuttama säteily taas ei saa ylittää valvotulle altistumiselle asetettuja rajoja. Valvottu altistuminen koskee työperäistä säteilynkäyttöä, jossa säteilyn kohteeksi joutunut henkilö on tietoinen altistumisesta ja sitä kyetään tarvittaessa myös rajoittamaan. Kaikki muu altistuminen- myös työperäinen- kuuluu valvomattoman tai rajoittamattoman säteilynkäytön piiriin, joka koskee koko väestöä.

Keskeisin altistumisraja radiotaajuiselle säteilylle on 0,4 W/kg, joka on koko kehon keskimääräisen ominaisabsorptionopeuden keskiarvo kuuden minuutin aikana valvotuissa olosuhteissa (IEEE 1982, IRPA/INIRC 1988, IEEE 1992, CENELEC 1995). Valvomattomissa olosuhteissa koko kehon keskimääräinen SAR saa olla korkeintaan 0,08 W/kg. Lyhytaikaisesti SAR voi olla edellä mainittuja altistumisrajoja suurempikin, kunhan kuuden minuutin keskiarvo ei ylitä annettuja rajoja.

Biologisena perusteena 0,4 W/kg rajalle on pyrkimys rajoittaa koko kehon keskimääräinen SAR niin pieneksi, että kehon lämmönsäätelyjärjestelmä ei kuormitu. Apinoilla tehdyissä eläinkokeissa on havaittu, että pienin SAR-taso, jolla lämmönsäätelyjärjestelmässä on havaittavissa muutoksia on noin 1 W/kg (Adair 1994). Vertailukohteena on ihmisen tuottama lämpöteho massayksikköä kohden, joka on 1...1,4 W/kg levossa ja raskaassa liikunnassa jopa yli 10 W/kg. Väestöä koskeva koko kehon SAR-rajana 0,08 W/kg voi teoriassa ylittyä, jos käsipuhelimen käyttäjän paino on alle 10 kg. Käytännössä on kuitenkin hyvin harvinaista, että näin pienet ihmiset käyttäisivät matkapuhelimia. Sananmukaisesti pääongelma on käsipuhelimen aiheuttama paikallinen SAR päässä, jota myös on rajoitettava liiallisen paikallisen lämmön nousun estämiseksi.

5.2 Altistumisrajat

Taulukkoon V on koottu tärkeimmissä radiotaajuisten säteilyn turvallisuutta koskeissa standardeissa esitetyt altistumisrajat suurimmalle sallitulle paikalliselle ominaisabsorptionopeudelle. Taulukossa esitetyt raja-arvot koskevat päätä ja vartaloa. Raajoille paikallinen huippu-SAR voi olla kaksinkertainen. Taulukosta huomataan, että valvotuissa olosuhteissa maksimiabsorptio vaihtelee 8...10 W/kg välillä. Valvomattoman säteilynkäytön osalta SAR saa olla kansainvälisen (ICNIRP 1996 ja eurooppalaisen suosituksen (CENELEC 1995) mukaisesti korkeintaan 2 W/kg määritettynä 10 g keskiarvona. Tämä on Suomen kannalta keskeisin matkapuhelimien säteilyä rajoittava kansainvälinen turvallisuussuositus. Yhdysvalloissa (IEEE 1992, FCC 1996) sovelletaan hieman tiukempia raja-arvoja: valvomattomissa olosuhteissa raja on 1,6 W/kg määritettynä 1 g keskiarvona.

Silloin, kun säteilevä laite tai antenni on riittävän kaukana, voidaan soveltaa SAR-rajojen pohjalta johdettuja kentänvoimakkuusrajoja tai niitä vastaavia tehotiheysrajoja (taulukko VI). Niiden avulla voidaan testata mm. siirrettävien matkapuhelimien, autopuhelimien ja tukiasemien säteilyturvallisuus. Minimikäyttöetäisyys, jolloin voidaan soveltaa kentänvoimakkuusrajoja, on Yhdysvalloissa 20 cm.

Altistuminen määritetään yleisesti kuuden minuutin SAR- tai tehotiheyskeskiarvona. Matkapuhelimien kohdalla tämä merkitsee käytännössä sitä, että keskiarvo määritetään pulssijakson yli (GSM) tai kantoaallon jakson yli (NMT), koska ei haluta rajoittaa käyttöaikaa.

5.2.1 IRPA ja ICNIRP

Kansainvälisen säteilysuojausjärjestön IRPA:n ionisoimattoman säteilyn komissio INIRC julkaisi vuonna 1988 toistaiseksi voimassa olevat ohjearvot radiotaajuiselle säteilylle yli 100 kHz taajuusalueella (IRPA/NIRC 1988).

IRPA:sta itsenäiseksi säteilysuojeluorganisaatioksi eriytynyt ICNIRP valmistelee uusia ohjearvoja, jotka kattavat kaikki sähkö- ja magneettikentät taajuusalueella 1 Hz...300 GHz. Uudet ohjearvot julkaistaan todennäköisesti vuoden 1997 tai 1998 aikana. Matkapuhelimien säteilyturvallisuuden kannalta merkittävin muutos on 2 W/kg yleisöraja, joka ei sisälly vanhoihin ohjearvoihin. Tehotiheysrajat ovat matkapuhelintaajuuksilla samoja kuin nykyisessä suosituksessa.

Taulukko V. Altistumisrajoja paikalliselle ominaisabsorptiopeudelle (SAR).

Organisaatio	Vuosi	Status	Ominaisabsorptiopeus ^{a)}		Keskiarvoistus		Taajuusalue
			koko väestö [W/kg]	valvotut olosuhteet [W/kg]	aika [min]	massa [g]	
IRPA	1988	ohje	-	10	6	100	10 MHz - 300 GHz
STM	1990	kansallinen määräys	-	10	6	-	10 MHz - 300 GHz
IEEE	1992	kansallinen standardi	1.6 ^{b)}	8 ^{c)}	-	1	100 kHz - 6 GHz
CEC	1994	direktiiviesitys	-	10	6	100	100 kHz - 300 GHz
CENELEC	1995	standardi	2	10	6	10	10 kHz - 300 GHz
ICNIRP	1996	kannanotto	2	10	6	10	ei määritelty
FCC	1996	kansallinen määräys	1.6 ^{d)}	8	-	1	ei määritelty

IRPA: International Radiation Protection Association
STM: Sosiaali- ja terveysministeriö, Suomi
IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA
CEC: Commission of the European Communities
CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization
ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
(aiemmin IRPA:n ionisoimattoman säteilyn komissio INIRC)
FCC: Federal Communications Commission, USA

^{a)} rajoissa sallitaan kaksinkertainen SAR
^{b)} 30 min keskiarvo taajuuksilla 3 - 3000 MHz
^{c)} 6 min keskiarvo
^{d)} keskiarvo pulssijakson yli

Taulukko VI. Tehotiheysrajoja matkapuhelintaajuuksilla.

	Koko väestö					Valvotut olosuhteet				
	Tehotiheys [W/m ²]				Keski- arvo [min]	Tehotiheys [W/m ²]				Keski- arvo [min]
	150 MHz	450 MHz	900 MHz	1800 MHz		150 MHz	450 MHz	900 MHz	1800 MHz	
IRPA	2	2,3	4,5	9	6	10	11,3	22,5	45	6
STM	2	2,3	4,5	9	6	10	11,3	22,5	45	6
IEEE	2	3	6	12	30	10	15	30	60	6
CEC ^{a)}	-	-	-	-	-	10	11,3	22,5	45	6
CENELEC	2	2,3	4,5	9	6	10	11,3	22,5	45	6
FCC	2	3	6	12	30	10	15	30	60	6

^{a)} Toimenpiderajat

5.2.2 CENELEC

Eurooppalainen sähköalan standardisoiomisjärjestö CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardisation) on v. 1995 julkaissut eurooppalaisen esistandardin ENV 501662-2 altistumisesta suurtaajuisille sähkömagneettisille kentille (CENELEC 1995). Yli 100 kHz kenttien osalta ENV-standardin ja ICNIRP:n vanhojen ja uusien ohjeurvojen välillä ei ole merkittävää eroa. Esistandardi on voimassa kolme vuotta, minkä jälkeen se tarkistetaan ja päätetään voidaanko se vahvistaa eurooppalaiseksi standardiksi. ENV-standardi on myös Suomessa vahvistettu kansalliseksi standardiksi, joka ei kuitenkaan ole sitova.

EU:n komission toimeksiannosta CENELECin työryhmä on valmistellut taajuusalueella 30 MHz...6 GHz toimivien matkapuhelimien säteilyturvallisuuksi koskevan teknisen raportin (CENELEC 1997). Raportin tarkoituksena on erityisesti yhtenäistää matkapuhelimien säteilyturvallisuuksia CENELECin SAR-rajojen pohjalta (taulukko V). Vaikka kyseessä on tekninen dokumentti, se voidaan muuntaa myöhemmin eurooppalaiseksi standardiksi. Raportin mukaan SAR-testaukset voidaan suorittaa joko laskemalla tai mittaamalla, mutta kummasakin tapauksessa käytetyn menetelmän oikeellisuus on varmistettava huolellisesti. Mittauksissa voidaan käyttää homogeenisella nesteellä täytettyä anatomisen muotoista fantomia. Käsimatkapuhelimet testataan standardiasennossa (intended position) ja kolmessa lisäasennossa, jotka on tarkasti määritelty. Teho- ja antenniasetusten tulee olla sellaisia, että SAR on suurimmillaan. Menettelytapa johtaa jonkin verran vähemmän rajoittavaan testauskäytäntöön kuin, jos testaus suoritettaisiin pahimmassa mahdollisessa, mutta epärealistisessa käyttöasennossa. Kannettavat matkapuhelimet testatetaan joko valmistajan suosittelemalla minimietäisyydellä tai jos sitä ei ole ilmoitettu 5 cm etäisyydellä. SAR-testauksia ei tarvitse suorittaa, jos käsipuhelimen teho on alle 20 mW tai kotelon ja antennin pinnasta 10 mm etäisyydellä mitattu magneettikenttä jää alle taulukossa VII esitetyn arvon.

5.2.3 EU:n komissio

Ongelmana on se, että pienillä taajuuksilla ENV-standardi sallii hieman korkeampia sähkö- ja magneettikentän voimakkuuksia kuin valmisteilla oleva EU:n direktiiviesitys fyysikaalisista haittekeijöistä työssä (CEC 1994). Direktiiviesitys ei merkittävästi poikkea ICNIRP:n luonnostelemista ohjeurvoista. On todennäköistä, että monissa Euroopan maissa kansalliset määräykset tulevat pohjautumaan ICNIRP:n ohjeurvoihin sekä em. direktiiviesitykseen. Näiden syiden johdosta on mahdollista, että ENV-standardia ei tulla vahvistamaan eurooppalaiseksi standardiksi nykyodossa.

Taulukko VII. Magneettikentän suurin sallittu voimakkuus 10 mm etäisyydellä antennista tai kotelosta (CENELEC 1997).

Taajuus [MHz]	Magneettikentän voimakkuus [A/m]	Magneettikentän ekvivalenttinen Tehotiheys [W/m ²]
450	0,38	55
900	0,27	27
1800	0,19	14

5.2.4 FCC

Yhdysvaltojen telehallintoviranomainen FCC (Federal Communications Commission) julkaisi vuoden 1996 alussa uudet ohjeet radiolähettimien säteilyn aiheuttamien ympäristövaikutusten arvioimiseksi. Määräyksissä matkapuhelimet jaetaan kannettaviin ja käsipuhelimiin: Matkapuhelin luetaan kannettavaksi laitteeksi silloin, kun sen rakenteesta johtuen käyttäjän etäisyys antennista ei normaalisti ole alle 20 cm. Käytännössä kyseessä on tällöin sellainen mukana kuljetettava lähetin/vastaanotin, jossa kuuloke ja mikrofoni ovat erillään lähettimestä. Kannettavan yli 1,5 W teholla säteilevän matkapuhelimen aiheuttama tehotiheys ei saa ylittää taulukossa esitettyjä arvoja, jotka on saatu NCRP:n (National Council on Radiation Protection and Measurements 1986) suosituksesta. Huomattakoon, että vaikka tehotiheysrajojen yhteydessä on mainittu 30 min. keskiarvoistusaika, FCC suosittelee yhdenmukaisesti eurooppalaisen käytännön kanssa, että yleisökäytössä olevien matkapuhelimien säteilyturvallisuustestauksissa keskiarvo määräytyy lähetteen pulssijakson pituudesta sekä SAR- että tehotiheysmäärittelyyn perustuvissa testauksissa.

Käsipuhelimen aiheuttama SAR ei saa ylittää taulukossa V esitettyjä paikallisen SAR:n rajoja. Testausmenetelmästä mainitaan vain, että SAR määritetään normaalissa käyttöasennossa joko laskennallisesti tai mittaamalla. Alhaisemmasta SAR rajasta ja pienemmästä keskiarvoistusmassasta (1 g) johtuen FCC:n määräykset näyttävät rajoittavammilta kuin CENELECin suositukset, mutta maininta normaalista käyttöasennosta voi käytännössä pienentää eroa. CENELECin matkapuhelinraportissa määritellään FCC:n määräyksiä yksityiskohtaisemmin eri testausaseto-ja, jolloin on mahdollista, että matkapuhelimen aiheuttama SAR-maksimi määräytyy jonkun epätavallisen käyttöasennon perusteella.

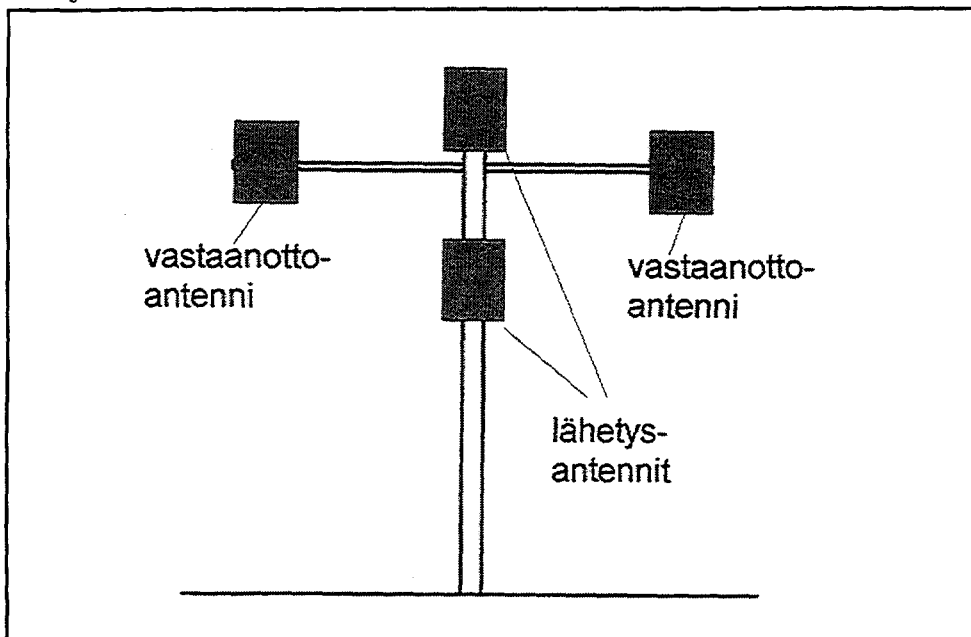
5.2.5 STM

Suomessa sovellettavat altistumisrajat ionisoimattomalle säteilylle on annettu Sosiaali- ja terveysministeriön päätöksellä (STMp 1474/91). Radiotaajuisen säteilyn osalta rajat noudattelevat IRPA:n v. 1988 antamia ohjeita (Taulukot V ja VI), joten ne eivät sisällä 2 W/kg väestörajaa.

6 TUKIASEMIEN SÄTEILY- TURVALLISUUS

6.1 Tukiasemien sijoituspaikat

Matkapuhelimien tukiasemien antennit sijoitetaan maaseudulla yleensä mäelle pystytettyyn mastoon usean kymmenen metrin korkeuteen. Kaupungissa sijoituspaikkoina ovat rakennusten katolle pystytetyt mastot 20 - 45 m korkeudella maasta ja 2 - 4 m korkeudella katosta, rakennusten ulkoseinät 10 - 35 m korkeudelle maasta. Kuvassa 8 on esimerkki kerrostalon katolle sijoitetusta tukiasemamastosta. Lähetysantennit sijoitetaan yleensä mastoon ja vastaanottoantennit mastoon kiinnitetyn vaakaorren päihin. Antennit sijoitetaan siten, että antennin pääkeilan suuntaan on vapaata tilaa vähintään 30 m, tyypillisesti useita satoja metrejä, jotta matkapuhelinverkko toimisi moitteettomasti. Tukiasema-antenneja asennetaan myös sisätiloihin, joko seinään tai kattoon, vähintään kahden metrin korkeuteen lattiasta. Tyypillisesti ne pyritään sijoittamaan siten, että ihmiset eivät oleskele eivätkä työskentele 3 m lähempänä antennia. Suuntaavat antennit muodostuvat yleensä muutamasta pystysuuntaisesta dipolista, joiden takana on heijastin. Ympärisäteilevät antennit ovat pystysuuntaisia dipoli- tai monopolian-tenneja.



Kuva 8. Kerrostalon katolle sijoitettu tukiasemamasto.

6.2 Turvaetäisyydet

Tukiasema-antennin aiheuttama radiotaajuinen säteilyn tehotiheys riippuu monesta eri tekijästä. Näitä ovat etäisyys ja suunta antennista, antennin vahvistus, antennia syöttävien lähettimien teho ja lukumäärä, käytössä olevien kanavien lukumäärä sekä lähettimien ja antennin välillä olevan kaapelin, tehonjakajan tai -yhdistäjän yms. vaimennus. Pääkeilan suuntaan tehotiheys S voidaan laskea etäisyyden r funktiona kaavasta

$$S = \frac{NP \cdot 10^{(G-L)/10}}{\pi r^2} \quad (5)$$

missä N on lähettimien lukumäärä, P on yksittäisen lähettimen teho, G on antennin vahvistus ja L on kaapelin ja tehonjakajan tms. yhteisvaimennus desibeleinä. Sijoittamalla kaavaan (5) tehotiheydeksi altistumisstandardien mukaiset tehotiheyden enimmäisarvot S_{\max} ja voidaan turvaetäisyydet r_{\min} laskea kaavasta

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{NP \cdot 10^{(G-L)/10}}{4\pi S_{\max}}} \quad (6)$$

Taulukossa VIII esitetään matkapuhelinverkkojen ylläpitäjiltä saatujen teknisten tietojen perusteella lasketut maksimiturvaetäisyydet Suomessa käytössä olevista tukiasema-antenneista. Taulukossa esitetään myös sosiaali- ja terveysministeriön päätöksen (1474/91) mukaiset tehotiheyden enimmäisarvot taajuuksilla 450, 900 ja 1800 MHz valvotuissa olosuhteissa ja koko väestölle. Väestörajat eivät ylity yli 10 m etäisyyksillä edes pääkeilassa. Ulos sijoitettujen antennien säteilykeila on yleensä hyvin kapea pystytasossa, mistä johtuen lähelläkin antennia turvaetäisyydet ovat muuhun kuin pääkeilan suuntaan tyypillisesti 1 m tai alle NMT900- ja GSM- tukiasemilla ja muutamia metrejä NMT450-tukiasemilla.

Säteilyturvakeskuksen suorittamien muutamien mittausten mukaan taulukossa VIII esitetyt turvaetäisyydet eivät myöskään käytännössä näytä ylittyvän. Suuntaavan antennin vahvistuksen ollessa yli 10 dB antennien ylä- ja alapuolelta sekä takaa mitatut tehotiheydet ylittivät väestön enimmäisarvot noin 1 m etäisyydellä ja valvottujen olosuhteiden enimmäisarvot noin 0,5 m etäisyydellä.

Taulukko VIII. Suurimmalla lähetysteholla lasketut turvaetäisyydet Suomessa käytössä olevista tukiasema-antenneista.

Tuki- asema- tyyppi	P_{max} W	G dB	L_{min} dB	Valvotut olosuhteet			Väestö		
				S_{max} W/m ²	pää- keila r_{min} m	sivu- keila r_{min} m	S_{max} W/m ²	pää- keila r_{min} m	sivu- keila r_{min} m
NMT450	320	11	3	11,25	3,8	1,4	2,25	8,5	3,0
NMT900									
ulkona	64	18,5	2	22,5	3,2	<0,6	4,5	7,2	1,1
sisällä	10	10	2	22,5	<0,6	<0,6	4,5	1,1	<0,6
GSM									
ulkona	80	18,5	5	22,5	2,6	<0,6	4,5	5,7	0,9
sisällä	30	5,5	5	22,5	0,4	<0,3	4,5	0,8	0,6
DCS1800									
ulkona	50	18	5	45	1,4	<0,3	9	3,0	0,5
sisällä	30	5,5	5	45	0,3	<0,3	9	0,6	0,4

P_{max} = samaan antenniin syöttävien lähettimien suurin yhteenlaskettu teho
 G = antennin vahvistus
 L_{min} = pienin vaimennus lähettimen ja antennin välillä
 S_{max} = altistumisen enimmäisarvo tehotiheytenä
 r_{min} = turvaetäisyys eli suurin etäisyys, jolla altistumisen enimmäisarvo ylittyy

7 SYDÄMENTAHDISTIMIEN HÄIRIINTYMINEN

Suomessa on noin 10 000 henkilöä, joille on vakavien rytmihäiriöiden vuoksi asennettu sydämentahdistin (Toivonen ym. 1991). Tahdistimet asennetaan yleensä sydämen oikealle puolelle ja sydäntä stimuloiva virta johdetaan laskimosuoneen sijoitetun johtimen välityksellä sydämeen. Sydämentahdistimen häiriintyminen on toistaiseksi ainoa matkapuhelimen käyttäjälleen aiheuttama potentiaalisesti vaarallinen terveyshaitta, josta on varmaa tietoa. Tiedossa ei ole kuolintapauksia, mutta kuolemanvaaraa ei voi täysin sulkea pois. Kirjallisuudessa on kuvattu ainakin yksi tapaus, jossa GSM puhelinta käyttänyt Kearns Sayre-oireyhtymästä kärsinyt koehenkilö menetti tajuntansa sydänkatkoksen (complete heart block) johdosta 6,5 sekunniksi (Murat ym. 1995). On arvioitu, että Saksassa 14...27 prosenttia sydämentahdistimien käyttäjistä kantaisi laitetta, joka voi häiriintyä matkapuhelimien säteilystä (Irnich ym 1996, Hofgärtner ym. 1996).

Matkapuhelimen sähkömagneettinen säteily kytkeytyy sydäntahdistimeen todennäköisimmin sydämeen vievien elektrodijohtimien tai niiden liittimien kautta; useimmissa nykyisissä malleissa läpivientisuodattimet eivät suodata riittävästi matkapuhelintaajuuksilla esiintyviä häiriöitä. Tahdistimen elektronisiin piireihin kytkeytyvät mikroaaltotaajuiset häiriöjännitteet tasasuuntautuvat yleensä jo lähellä elektrodia olevissa puolijohteissa. Tasasuuntautuminen ilmenee mikroaaltotehoon verrannollisesti muuttuvina jännitteinä, jotka ovat analogisissa häiriöissä tasajännitteitä ja digitaalisissa häiriöissä modulaation mukaan vaihtelevia pulsseja, joiden taajuus voi vaihdella välillä 2...217 Hz. Tasajännitteet voivat häiritä laitteen toimintaa muuttamalla puolijohteiden toimintapisteitä, mutta se ei ole yhtä haitallista kuin digitaalisten häiriöiden tuottamien pulssien vaikutukset.

Sydämentahdistimissa voi esiintyä useita erilaisia häiriötoimintoja, jotka riippuvat tahdistimen tyypistä, asennussyvyydestä, sydämen omia pulsseja tunnistavan piirin herkkyydestä, häiriösignaalin voimakkuudesta, taajuudesta ja amplitudimodulaatiosta (Barbaro ym. 1995, Irnich ym. 1996, Hofgärtner ym. 1996, Smith ja Aasen 1992). Pahimmassa tapauksessa tahdistin voi vikaantua pysyvästi tai sen ohjelmointi voi muuttua, mutta tällaista ei edellä mainituissa tutkimuksissa kuitenkaan havaittu. Yleinen matkapuhelimen toimiessa esiintyvä virhetoiminta oli häiriöpulsien tunnistus normaaleiksi sydänpulsseiksi, jolloin tahdistin ei toimi. On myös mahdollista, että tahdistin synkronoituu antamaan tarpeettomia pulsseja häiriöpulsien tahdissa, jolloin hengenvaarallisen kammiovärinän vaara on olemassa. Pientaajuinen modulaatio alle 100 Hz taajuuksilla on haitallisinta, koska tällöin häiriöpulssien spektri on lähellä sydämen tuottamien omien pulssien spektriä. Alle 10 Hz taajuuksilla tahdistin voi erehtyä luulemaan häiriöpulsseja sydämen omiksi

pulsseiksi. Suuret pulssitaajuudet eivät ole yhtä haitallisia, koska häiriötunnistuspiiri kytkee laitteen asynkroniseen toimintamuotoon eli laite antaa ennalta laitteen määräämällä taajuudella tahdistuspulseja välittämättä sydämen omasta tahdistustoiminnasta. Häiriintymisherkkyyttä lisää tahdistimen pulssitunnistuspiirin herkkyyden lisääminen. Mitä enemmän kudoksia on tahdistimen ja elektrodijohtimien päällä sitä enemmän häiritsevä signaali vaimenee; vaimennus lisääntyy taajuuden kasvaessa. Bipolaariset tahdistimet ovat jonkin verran häiriöisietoisempia matkapuhelintaajuuksilla kuin unipolaariset laitteet (Hofgärtner ym. 1996).

Sydämentahdistimien häiriintymisetäisyyttä on tutkittu altistamalla erityyppisten matkapuhelinten säteilyllä tahdistinpotilaita *in vivo* tai ihmistä simuloivan yksinkertaisen fantomin sisälle asennettuja laitteita *in vitro*. Saksassa suoritettussa *in vitro* tutkimuksessa testattiin 231 mallin häiriintymisherkkyyttä analogisilla ja digitaalisilla matkapuhelimella (Irnich ym. 1996). Analogisen laitteen taajuus oli 450 MHz ja digitaalisten laitteiden 900 MHz (GSM) ja 1800 MHz (DCS). Tehot olivat 450 MHz ja 900 MHz taajuudella 2 W ja 1800 MHz taajuudella 1 W. Digitaalisten laitteiden kohdalla kyseessä on pulssinaikainen maksimiteho. Maksimihäiriötäisyys oli analogisen puhelimen tapauksessa 45 cm ja GSM-puhelimen tapauksessa 19 cm. GSM-puhelimella häiriöitä esiintyi 79 erityyppisessä tahdistinmallissa, joista seitsemässä maksimi häiriintymisetäisyys oli yli 10 cm. 1800 MHz taajuudella toimiva DCS-puhelin ei aiheuttanut häiriöitä yhdellekään testatuista laitteista. Häiriöherkkyyden pieneneminen johtuu ainakin osittain siitä, että taajuuden kasvaessa kudosten aiheuttama lisääntyvä vaimennus vähentää tahdistimeen kohdistuvaa säteilyä. Tämä ilmiö selittää myös 450 MHz taajuudella toimivien matkapuhelinten häiriöherkkyyden mitattuna häiriötäisyydellä, joskin on huomattava, että analogisen laitteen aiheuttama häiriö oli useimmiten lievempi kuin digitaalisen laitteen aiheuttama. Säteilytehon kasvaessa häiriintymisetäisyys lisääntyy suoraan verrannollisesti tehon kuutiojuureen.

Saksalaisessa *in vivo* tutkimuksessa (Hofgärtner ym. 1996) altistettiin matkapuhelinten säteilylle 104 vapaaehtoista tahdistinpotilasta, joille oli asennettu 58 eri tyyppistä laitetta. Altistuslähteinä olivat 450 MHz taajuinen analoginen käsipuhelin (0,5 W) sekä GSM-käsipuhelin (2 W) ja kannettava GSM-puhelin (8 W). Tahdistin häiriintyi 43 potilaalla, ja maksimi häiriintymisetäisyys oli yhdeksässä tapauksessa yli 10 cm. Suurimmillaan häiriötäisyys oli 120 cm, jolloin ilmeisesti kyseessä oli kannettava GSM-puhelin, vaikka tätä ei erikseen olekaan mainittu. Italiassa suoritetuissa kokeissa (Barbaro ym. 1995) testattiin 101 sydäntahdistinpotilasta GSM-puhelimen säteilyllä. Häiriöitä havaittiin 26:ssa tahdistimessa; maksimi häiriötäisyys oli 10 cm, jolloin tahdistin oli asetettu minimiherkkyydelle.

Yhteenvedona voidaan todeta, että sydämentahdistimen häiriintyminen matkapuhelimen säteilystä on varteenotettava vaaratekijä. Haitallisimpia ovat 900 MHz

taajuudella toimivat GSM-puhelimet, minkä jälkeen laskevassa häiritsevyysjärjestyksessä tulevat NMT450, NMT900 ja DCS1800-laitteet. Maksimihäiriöetäisyys kädessä pidettävälle GSM-puhelimelle on suurella todennäköisyydellä alle 0,5 m ja kannettavalle tai ajoneuvoon asennetulle suuritehoisemmalle GSM-puhelimelle alle 1 m. Vaarallisimpia häiriömuotoja, joita erityisesti digitaalisesti moduloidut laitteet voivat aiheuttaa, ovat tahdistimen toiminnan estyminen ja sydämen toimintaa sotkevien ylimääräisten tahdistuspulssien syntyminen. Kädessä pidettävät matkapuhelimet eivät normaalissa käyttötilanteessa aiheuta vaaraa ulkopuoliselle sydämentahdistimen käyttäjälle. Uusimpien tahdistinmallien suunnittelussa on pyritty huomioimaan matkapuhelimien aiheuttamat häiriöongelmat.

8 YHTEENVETO JA SUOSITUKSIA

8.1 Yhteenveto

Suomessa yleisesti käytettävien analogisten matkapuhelimien aiheuttama paikallinen huippuabsorptio päässä voi joillakin tyypeillä ylittää kansainvälisen ionisoimattoman säteilyn komission ICNIRP:n asettaman väestörajan 2 W/kg, mutta ei 10 W/kg valvotun käytön rajaa. Digitaalisten matkapuhelimien SAR voi olla suurimmillaan noin 2 W/kg. Uusimmat yleisessä käytössä olevat matkapuhelimet pyritään suunnittelemaan siten, että väestöraja ei ylity. Teknisesti tämä ei ole vaikeata, jos säteilytehoa ei nosteta nykyisestä.

Kudoksiin absorboituva radiotaajuinen säteily nostaa hieman kudosten lämpötilaa. Lämpeneminen ei kuitenkaan ole haitallista, jos kudoksen suurin paikallinen SAR on korkeintaan 10 W/kg määritettynä 10 gramman kudospäärän keskiarvona. Tällöin lämmön nousu jää alle yhden asteen säteilyvaikutusten kannalta kriittisimmässä elimissä, joita ovat aivot ja silmät.

Käsi puhelimien aiheuttama altistuminen voi kuitenkin ylittää sellaisen tason, jolla on raportoitu erilaisia vaikutuksia *in vitro* ja *in vivo*. Ainakin osa näistä ei-lämpövaikutuksista saattaa olla todellisia, mutta niiden haitallisuudesta ihmisen terveydelle ei ole varsinaista näyttöä eikä niiden biologisia ja fysikaalisia syntymekanismeja tunneta. Useimmiten kyseessä on tilapäinen muutos, joka häviää lyhyen ajan kuluessa altistumisen päätyttyä. Pysyvistä soluvaurioista ei ole näyttöä silloin kun kudosten lämpeneminen ei ylitä muutamia asteita. Pienillä taajuuksilla (10...100 Hz) amplitudimoduloitujen läheteiden ja pulssimoduloitujen läheteiden biologinen tehokkuus näyttää olevan hieman suurempi kuin vastaavalla teholla lämmittävän jatkuvan säteilyn.

Matkapuhelimen säteily voi häiritä sydämentahdistinta silloin kun tahdistimen kantaja käyttää itse puhelinta. Digitaaliset laitteet ovat haitallisempia kuin analogiset, koska sydämentahdistimet ovat herkkiä GSM-modulaation pientaajuisille komponenteille.

Ulkona olevat tukiasema-antennit eivät käytännössä aiheuta säteilyvaaraa väestölle. Antennien sijoituspaikka on normaalisti sellainen, että kaikilla alueilla, joille yleisöllä on vapaa pääsy, tehotiheys on murto-osa väestöä koskevista altistumisrajoista. Sisätiloihin asennettujen antennien läheisyydessä väestörajat voivat kuitenkin ylittyä antennin lähellä.

8.2 Säteilyturvallisuuksuosituksia

Matkapuhelimista ja niiden tukiasemista lähtevän radiotaajuuden säteilyn aiheuttaman altistumisen rajoittamiseksi seuraavat varotoimenpiteet ovat tarpeellisia:

- 1) Käsikäyttöisten matkapuhelimien aiheuttama paikallinen SAR ei saa valvotuissa olosuhteissa ylittää 10 W/kg eikä valvomattomissa olosuhteissa 2 W/kg määritettynä keskiarvona 10 grammassa kudosta.
- 2) Kannettavien matkapuhelimien säteily ei saa 20 cm:n etäisyydellä ylittää sosiaali- ja terveysministeriön päätöksessä (1474/91) esitettyjä ekvivalenttisen tehotiheyden rajoja. Ammattimaisessa käytössä oleviin erikoispuhelimiin sovelletaan valvotulle käytölle annettuja tehotiheysrajoja kun taas yleisön käytössä oleviin matkapuhelimiin sovelletaan valvomattomalle käytölle annettuja rajoja. Jos rajat ylittyvät em. etäisyydellä, on laitteen käyttöohjeessa esitettävä lyhin sallittu käyttöetäisyys tai laitteen turvallisuus käyttöetäisyydellä on varmistettava SAR-määrittämisellä.
- 3) Jos matkapuhelimen käyttäjälle on asennettu sydämentahdistin, ei hänen tulisi käyttää sellaista matkapuhelinta, jonka häiriösietoisuutta ei ole varmistettu. Matkapuhelinta voidaan käyttää, jos kyseessä olevan tahdistinmallin häiriösietoisuus on todettu riittäväksi käytettävän matkapuhelimen aiheuttamalle säteilylle. On suositeltavaa, että mahdollisuuksien mukaan potilaille asennetaan sellaisia sydämentahdistinmalleja, jotka sietävät mahdollisimman hyvin matkapuhelimien aiheuttamaa säteilyä ja muita normaalissa työ- ja elinympäristössä esiintyviä sähkömagneettisia häiriöitä. Potilasta tulisi myös tarvittaessa opastaa välttämään sellaisia tilanteita ja paikkoja, joissa tahdistimen häiriintyminen on mahdollista.
- 4) Tukiaseman antennia ei saa sijoittaa siten, että valvomattomalle säteilynkäytölle annetut ekvivalenttisen tehotiheyden rajat ylittyvät sellaisilla alueilla, joille yleisöllä on vapaa pääsy. Useimmissa tapauksissa riittävät turvaetäisyydet maksimisäteilyn suuntaan ovat 2 m sisäantenneille ja 10 m ulkoantenneille. Tukiaseman antennin läheisyydessä työskenneltäessä on varmistettava, että valvottua käyttöä koskevat tehotiheysrajat eivät ylity. Useimmissa tapauksissa riittävä turvaetäisyys jatkuvalla työskentelylle ulkoantennin läheisyydessä on 2 m muualla kuin suuntaavan antennin edessä. Mastoon sijoitettu antenni voidaan nopeasti ohittaa, kunhan säteilevää antennielementtiä ei kosketa. Sisäantenneille useimmissa tapauksissa riittävä turvaetäisyys on 1 m.

KIRJALLISUUSVIITTEET

Adair E. Thermal physiology of radiofrequency radiation (RFR) interactions in animals and humans. In: Klauenberg BJ (ed.). Radiofrequency Standards. New York: Plenum Press, 1994.

Adey CV, Byus CV, Cain CD, Haggren W, Higgins RJ, Jones RA, Kean CJ, Kuster N, MacMurray A, Phillips JL, Stagg RB, Zimmerman G. Brain tumor incidence in rats chronically exposed to digital cellular telephone fields in an initiation-promotion model. Abstract Book, Eighteenth Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society. Victoria, June 9-14, 1996.

Anderson V, Joyner KH. Specific absorption rate levels measured in a phantom head exposed to radio frequency transmissions from analog hand-held mobile phones. Bioelectromagnetics 1995; 16:60-69.

Balcer-Kubiczek EK, Harrison GH. Evidence for microwave carcinogenesis *in vitro*. Carcinogenesis 1985; 6(6), 859 - 864.

Balcer-Kubiczek EK, Harrison GH. Induction of neoplastic transformation in C3H/10T $\frac{1}{2}$ cells by 2.45-GHz microwaves and phorbol ester. Radiation Research 1989; 117, 531 - 537.

Balcer-Kubiczek EK, Harrison GH. Neoplastic transformation of C3H/10 T $\frac{1}{2}$ cells following exposure to 120-Hz modulated 2.45 GHz microwaves and phorbol ester tumor promoter. Radiation Research 1991; 126: 65-72.

Balzano Q, Garay O., Manning TJ. Electromagnetic energy exposure of simulated users of portable cellular telephones. IEEE Transactions on Vehicular Technology 1995; 44: 390 - 403.

Barbaro V, Bartolini P, Donato A, Militello C, Altamura G, Ammirati F, Santini M. Do European GSM mobile cellular phones pose a potential risk to pacemaker patients. Pace 1995; 18: 1218-1224.

Bawin SM, Adey WR, Sabbot IM. Ionic factors in release of $^{45}\text{Ca}^{2+}$ from chicken cerebral tissue by electromagnetic fields. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 1978; 75: 6314 - 6318.

Baranski S. Histological and histochemical effects of microwave irradiation on the central nervous system of rabbits and guinea pigs. Am. J. Phys. Med. 1972; 51, 182 - 191.

Bassen HI. RF interference of medical devices. In: Kuster N, Balzano Q, Lin JC, eds. *Mobile Communications Safety*. London: Chapman & Hall, 1996.

Bergqvist U. Review of epidemiological studies. In: Kuster N, Balzano Q ja Lin JC (eds): *Mobile Communications Safety*, Chapman & Hall, 1997.

Blackman CF, Joines WT, Elder JA. Calcium-ion efflux in brain tissue by radiofrequency radiation. In: Illinger KH (ed): *Biological Effects of Nonionizing Radiation*. Washington DC: American Chemical Society, 1981; 299 - 314.

Bowman HF. Thermodynamics of tissue heating: Modeling and measurements for temperature distributions. In: Nussbaum GH.(ed.). *Physical Aspects of Hyperthermia*. Medical Physics Monograph No. 8. New York: American Institute of Physics, 1982.

Brusick DJ. Genotoxicity of radiofrequency radiation. 27th meeting of the Environmental Mutagen Society. Victoria, Canada, March 1995. Abstract: *Environmental and Molecular Mutagenesis* 27, Suppl. 27, p. 10, 1996.

Brusick D. Genetic effects associated with RFR. State of the Science Colloquium. University "La Sapienza" of Rome, 13-15 November 1995.

Buys CV, Kartun K, Pieper S, Ross Adey W. Increased ornithine decarboxylase activity in cultured cells exposed to low energy modulated microwave fields and phorbol ester tumor promoters. *Cancer Research* 1988; 48: 4222 - 4226.

CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization): Human exposure to electromagnetic fields: High frequency (10 kHz to 300 GHz). European prestandard ENV 50166-2, Brussels 1995.

CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization): Considerations for human exposure to EMFs from mobile telecommunication equipment (MTE) in the frequency range 30 MHz - 6 GHz". Secretariat SC 211/B, WGMTE, Brussels, February 1997.

Chang DC. Cell poration and cell fusion using an oscillating electric field. *Biophys. J.* 1989; 56: 641 - 652.

Chou CK, Guy AW, Kunz LL, Johnson RB, Crowley JJ, Krupp JH. Long-term, low-level microwave irradiation of rats. *Bioelectromagnetics* 1992; 13: 469 - 496.

Ciaravino V, Meltz ML, Erwin DN. Absence of a synergistic effect between moderate-power radiofrequency electromagnetic radiation and adriamycin on cell-

cycle progression and sister chromatid exchanges. *Bioelectromagnetics* 1991; 12: 289 - 298.

Cleveland RF, Athey TW. Specific absorption rate (SAR) in models of the human head exposed to hand-held UHF portable radios. *Bioelectromagnetics*, 1989; 10:173 - 186.

Commission of the European Communities (CEC): Amended proposal for a council directive on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents. *Official Journal of the European Communities*, No C230/3, 1994.

Damiani G, Laurenti P, Marchetti P, Capelli G, Tofani S, Venini GC. Potential genotoxic effects of ELF-modulated radiofrequency magnetic fields on peripheral lymphocytes. In: Simunic D (ed): *Proceedings of the COST 244 Meeting on Electromagnetic Hypersensitivity*. Brussels: EC, DGXIII/72/95-EN 19-29, 1995.

Dimbylow PJ, Mann SM. SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz. *Phys. Med. Biol.* 1994; 39: 1537 - 1553.

Dutta SK, Subramoniam A, Ghosh P, Parshad R. Microwave radiation-induced calcium efflux from brain tissue, *in vitro*. *Bioelectromagnetics* 1984; 5, 71 - 78.

Dutta SK, Ghosh B, Blackman CF. Radio frequency radiation-induced calcium ion efflux enhancement from human and other neuroblastoma cells in culture. *Bioelectromagnetics* 1989; 10, 197 - 202.

Dutta SK, Das K, Ghosh B, Blackman CF. Dose dependence of acetylcholinesterase activity in neuroblastoma cells exposed to modulated radio-frequency electromagnetic radiation. *Bioelectromagnetics* 1992; 13, 317 - 322.

Federal Communications Commission (FCC): Guidelines for evaluating the environmental effects of radiofrequency radiation. Report and order, ET Docket No. 93-62, FCC 96-326, Washington 1996.

Finkelstein Y, Kofler B, Rabey Dynamics of cholinergic synaptic mechanisms in rat hippocampus after stress. *Brain Research* 1985; 343: 314 - 319.

Gandhi OP, Lazzi G. Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1996; 44: 1884 - 1896.

Gabriel C, Grant EH, Tata R, Brown RP, Gestblom B, Noreland E. Microwave absorption in aqueous solutions of DNA. *Nature*, 1987; 328: 145 - 146.

Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Phys. Med. Biol.* 1996; 41: 2271 - 2293.

Galvin MJ, Parks DL, McRee DI. Influence of 2.45 GHz microwave radiation on enzyme activity. *Radiat. Environ. Biophys.* 1981; 19, 149 - 156.

Gordon CJ. Effects of ambient temperature and exposure to 2450-MHz microwave radiation on evaporative heat loss in the mouse. *J Microwave Power* 1982; 17: 145 - 150.

Haapala P. Käsipuhelinantennit. Helsinki Merito Forum Oy:n kurssi T100016U. Käytännön antennitekniikkaa matkaviestinjärjestelmissä. Helsinki Merito Forum Oy, Helsinki, 1996.

Heikkinen P, Juutilainen J, Puranen L, Hyysalo P. Radiotaajuussäteilyn syöpää edistävät vaikutukset koe-eläimillä. COST 244 projektin loppuraportti, Kuopion yliopisto, 1997.

Hietanen M, Kovala T, Hämäläinen A-M, Velin R, v Nandelstadh P. Matkapuhelinten neurofysiologiset vaikutukset. COST 244 projektin loppuraportti, Työterveyslaitos, 1997.

Hintenlang DE. Synergistic effects of ionizing radiation and 60 Hz magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 1993; 14, 545 - 551.

Hofgärtner F, Müller TH, Sigel H. Können Mobil-Telefone im C-und D-Netz Herzschrittmacher-Patienten gefährden. *Dtsch.med.Wschr*, 1996; 121: 646 - 652.

Hombach V, Meier K, Burkhardt M, Kühn E, Kuster N. The dependence of EM absorption upon human head modeling at 900 MHz. *IEEE Trans. on Microwave Theor. Tech.* 1996; 44(10): 1865 - 1873.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters - ICNIRP Statement. *Health Physics*, 1996; 70(4): 587 - 593.

International Non-ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association (IRPA/INIRC). Guidelines on limits of exposure to

radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. *Health Physics*, 1988; 54(1): 115 - 123.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): American national standard safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 300 kHz to 100 GHz. ANSI C95.1-1982, New York 1982.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. IEEE C95.1-1991 (Revision of ANSI C95.1-1982). New York 1992.

Irnich W, Batz L, Müller TAR, Tobisch R. Störbeeinflussung von Herzschrittmachern durch Mobilfunkgeräte. Newsletter Edition Wissenschaft Nr 7, Forschungsgemeinschaft Funk, Mai 1996.

Ismailov ES. Effects of ultrahigh frequency electromagnetic radiation on the electrophoretic mobility of erythrocytes. *Biophysics* 1978; 21, 961 - 963.

Jensen M, Rahmat-Samii Y. EM interaction of handset antennas and a human in personal communications. *Proc. IEEE*, 1995; 7 - 17.

Jokela K. Radiotaajuiseen säteilyyn liittyviä turvallisuuskysymyksiä. STUK-B63, Säteilyturvakeskus, 1985.

Kamimura Y, Saito K, Saiga T, Amemiya Y. Effect of 2.45 GHz microwave irradiation on monkey eyes. *IEICE Trans. Commun.* 1994; E77-B(6): 762 - 764.

Kerbacher JJ, Meltz ML, Erwin DN. Influence of radiofrequency radiation on chromosome aberrations in CHO cells and its interaction with DNA damaging agents. *Radiat. Res.* 1990; 123, 311 - 319.

Kues HA, Mcleod DS, D'Anna SA, Johnson MA, Perry CR, Monahan JC. Microwave-induced electroretinographic changes in the primate. Abstract Book, Thirteenth Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society. Salt Lake City, Utah, June 23 - 27, 1991.

Kues HA, Hirst LW, Luty GA, D'Anna SA. Effects of 2.45-GHz microwaves on primate corneal endothelium. *Bioelectromagnetics* 1985; 6: 177 - 188.

Kues HA, McLeod DS, Monahan JC, D'Anna SA, Luty GS. Retinal changes in the primate following pulsed 2.45 GHz exposures. Abstract Book, Twelfth Annual

Meeting of the Bioelectromagnetics Society. San Antonio, Texas, June 10 - 14, 1990.

Kues HA, Monahan JC, D'Anna SA, McLeod DS, Luty GA, Koslov S. Increased sensitivity of the non-human primate eye to microwave radiation following ophthalmic drug pretreatment. *Bioelectromagnetics* 1992; 13: 379 - 393.

Kuster N, Balzano Q. Energy absorption mechanism by biological bodies in the near field of dipole antennas above 300 MHz. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 1992; 41; 17 - 23.

Kuster N, Balzano Q. Experimental and numerical dosimetry. In: Kuster N, Balzano Q, Lin JC, eds. *Mobile Communications Safety*. London: Chapman & Hall, 1996.

Lai H, Zabawska J, Horita A. Sodium-dependent, high-affinity choline uptake in hippocampus and frontal cortex of the rat affected by acute restraint stress. *Brain Research* 1986; 372: 366 - 369.

Lai H, Horita A, Chou CK & Guy AW. Low-level microwave irradiations affect central cholinergic activity in the rat. *J. Neurochem.* 1987; 48: 40 - 45.

Lai H. Acute exposure to noise affects sodium-dependent high-affinity choline uptake in the central nervous system of the rat. *Pharmacol. Biochem. Behav.* 1987; 28: 147 - 151.

Lai H, Horita A, Guy AW. Acute low-level microwave exposure and central cholinergic activity: Studies on irradiation parameters. *Bioelectromagnetics* 1988; 9: 355 - 362.

Lai H, Carino MA, Horita A, Guy AW. Low-level microwave irradiation and central cholinergic systems. *Pharmacol. Biochem. Behav.* 1989a; 33: 131 - 138.

Lai H, Carino MA, Horita A, Guy AW. Low-level microwave irradiation and central cholinergic activity: A dose-response study. *Bioelectromagnetics* 1989b; 10: 203 - 208.

Lai H, Carino MA, Wen YF. Repeated noise exposure affects muscarinic cholinergic receptors in the rat brain. *Brain Research* 1989c; 488: 361 - 364.

Lai H, Carino MA. Acute white noise exposure affects the concentration of benzodiazepine receptors in the brain of the rat. *Pharmacol. Biochem. Behav.* 1990; 36: 985 - 987.

Lai H, Carino MA, Wen YF, Horita A, Guy AW. Naltrexone pretreatment blocks microwave-induced changes in central cholinergic receptors. *Bioelectromagnetics* 1991; 12: 27 - 33.

Lai H, Carino MA, Horita A, Guy AW. Single vs. repeated microwave exposure: Effects on benzodiazepine receptors in the brain of the rat. *Bioelectromagnetics* 1992; 13: 57 - 66.

Lai H, Horita A, Guy AW. Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat. *Bioelectromagnetics* 1994; 15: 95 - 104.

Lai H, Singh NP. Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 1995; 16: 207 - 210.

Lange DG, D'Antuono ME, Timm RR, Ishii TK, Fujimoto JM. Differential response of the permeability of the rat liver canalicular membrane to sucrose and mannitol following *in vivo* acute single and multiple exposures to microwave radiation (2.45 GHz) and radiant-energy thermal stress. *Radiation Research* 1993; 134, 54 - 62.

Laukkanen K. Kannettavien matkapuhelimien antennit. AEL-INSKON kurssi S4005L/93. Käytännön antennitekniikkaa. AEL-INSKO, Helsinki, 1993.

Lazzi G, Gandhi Om P. Models of the human head for numerical calculations of the SAR distributions due to wireless telephones. XXVth General Assembly, International Union of Radio science, Lille, August 28 - September 5, 1996.

Leonard A, Berteaud AJ, Bruyère A. An evaluation of the mutagenic, carcinogenic and teratogenic potential of microwaves. *Mutat. Res.* 1983; 123, 31 - 46.

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* 1993; 14, 395 - 403.

Lyons BE, Samulski TS, Cox RS, Fessenden P. Heat loss and blood flow during hyperthermia in normal canine brain In: Empirical study and analysis. *Int. J. Hyperthermia* 1989; 5: 225 - 247.

Maes A, Collier M, Slaets D, Verschaeve L. 954 MHz microwaves enhance the mutagenic properties of mitomycin C. *Environmental and Molecular Mutagenesis* 1996; 28: 26 - 30.

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

Meier K, Egger O, Schmid T, Kuster N. Dosimetric laboratory for mobile communications. Proc. 11th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility. Zurich, March 7 - 9, 1995.

Murat Y, Bayata S, Postaci N, Aydin C. Pacemaker inhibition and asystole in a pacemaker dependent patient. *Pace* 1995; 18: 1963.

National Radiological Protection Board (NRPB): Board statement on restrictions on human exposure to static and time varying electromagnetic fields and radiation. *Ann NRPB* 4(5), Chilton, Didcot, Oxon 1993.

National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP): Biological effects and exposure criteria for radiofrequency electromagnetic fields. NCRP Report No.86. Bethesda 1986.

Nikogosyan SV. Influence of UHF on the cholinesterase activity in the blood serum and organs in animals. In: *The biological action of ultrahigh frequencies*. Letavct AA, Gordon ZV (eds), JPRS 13471, 1962; 83 - 91.

Okoniewski M, Stuchly MA. A study of the handset antenna and human body interaction. *IEEE Trans. on Microwave Theor. Techn.* 1996; 44: 1855 - 1864.

Olcerst RB, Rabinowitz JR. Studies on the interaction of microwave radiation with cholinesterase. *Radiat. Environ. Biophys.* 1978; 15, 289 - 295.

Phelan AM, Lange DG, Kues HA, Luty GA. Modification on membrane fluidity in melanin containing cells following exposure to low level microwave radiation. *J. Bioelectromag.* 1992; 13, 131 - 146.

Pitkäaho R, Laukkanen K, Hujanen A. Radioaaltojen absorboitumisen mallitus. Sähkömagneettisten kenttien biologiset vaikutukset. COST 244 projektin loppuraportti. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1997.

Puranen L, Hyysalo P, Jokela K. Matkapuhelimien aiheuttaman lämpöabsorption määrittäminen päässä. COST 244 projektin loppuraportti, Säteilyturvakeskus, 1997.

Puranen L, Jokela K. Radiation hazard assessment of pulsed microwave radars. *J. Microwave Power and Electromagnetic Energy* 1996; 31: 165 - 177.

Ramel C. The nature of spontaneous mutations. *Mutation Res.* 1989; 212: 33 - 42.

Repacholi MH, Basten A, Gebiski V, Noonan D, Finnie J, Harris AW. Lymphomas in *Eμ-Pim 1* transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiation Research* 1997; 147: 631 - 640.

Revutsky EL, Edelman FM. Effects of centimeter and meter electromagnetic waves on the content of biologically active substances in human blood. *Philos. J. Ukrainian Acad. Sci.* 1964; 10, 379 - 383.

Rosenthal M, Obe G. Effects of 50 Hz electromagnetic fields on proliferation and on chromosomal alterations in human chromosomes untreated or pretreated with chemical mutagens. *Mutat. Res.* 1989; 210, 329 - 335.

Roszkowski W, Wrembel JK, Roszkowski K, Janiak M, Szmigielski S. Does whole body microwave hyperthermia therapy involve participation of the immune system? *Int J Cancer* 1980; 25: 289 - 292.

Rothman KJ, Loughlin JE, Funch DP, Dreyer NA. Overall mortality of cellular telephone customers. *Epidemiology* 1996; 7: 303 - 305.

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

Saffer JD, Profenno LA. Microwave-specific heating affects gene expression. *Bioelectromagnetics* 1992; 13, 75 - 78.

Sagripani JL, Swicord ML, Davis CC. Microwave effects on plasmid DNA. *Radiation Research* 1987; 110: 219 - 231.

Samulski TS, Cox RS, Lyons BE, Fessenden P. Heat loss and blood flow during hyperthermia in normal canine brain II:Mathematical model. *Int. J. Hyperthermia* 1989; 5: 249 - 263.

Santini R, Hosni M, Deschaux P, Pacheco H. B 16 melanoma development in black mice exposed to low-level microwve radiation. *Bioelectromagnetics* 1988; 9: 105 - 107.

Sapareto SA. The biology of hyperthermia in vitro. In: Nussbaum GH.(ed.). *Physical Aspects of Hyperthermia. Medical Physics Monograph No. 8.* New York: American Institute of Physics, 1982.

Sarkar S, Ali S, Behari J. Effect of low power microwave on the mouse genome: A direct DNA analysis. *Mutation Res.* 1994; 320: 141 - 147.

Scarfi MR, Bersani F, Cossarizza A, Monti D, Castellani G, Cadossi R, Franceschetti G, Franceschi C. Spontaneous and mitomycin C-induced micronuclei in human lymphocytes exposed to extremely low frequency pulsed magnetic fields. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 1991; 176, 194 - 200.

Schwartz J-L, House DE, Mealing GAR. Exposure of frog hearts to CW or amplitude-modulated VHF fields: Selective efflux of calcium ions at 16 Hz. *Bioelectromagnetics* 1990; 11: 349 - 358.

Schwartz J-L, Mealing GAR. Calcium-ion movement and contractility in atrial strips of frog heart are not affected by low-frequency-modulated 1 GHz electromagnetic radiation. *Bioelectromagnetics* 1993; 14: 521 - 533.

Scott JA. A finite element model of heat transport in the human eye. *Phys. Med. Biol.* 1988; 33: 227 - 241.

Smith S, Aasen R. The effects of electromagnetic fields on cardiac pacemakers. *IEEE Trans. on Broadcasting* 1992; 38: 136 - 139.

Somosy Z, Thuröczy G, Kubasova T, Kovács J, Szabò LD. Effects of modulated and continuous microwave irradiation on the morphology and cell surface negative charge of 3T3 fibroblasts. *Scanning Microscopy* 1991; 5(4), 1145 - 1155.

Stewart-DeHaan PJ et al. *In vitro* studies of microwave-induced cataract: reciprocity between exposure duration and dose rate for pulsed microwaves. *Exp Eye Res* 1985; 40: 1 - 13.

Stuchly M. Personal communication services-technology and health concerns: Is there a common solution?. In: J. Hamelin (ed.). *Modern Radio Science 1996* (International Union of Radio Science). Oxford: Oxford University Press, 1996.

Szmigielski S, Szudzinski A, Pietraszek A, Bielec M, Janiak M, Wrembel JK. Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2450 MHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics* 1982; 3: 179 - 191.

Szmigielski S. Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation. *Sci Total Environ* 1996; 180: 9 - 17.

Toivonen L, Metso R, Valjus J, Hongisto M. The influence of 50 Hz electric and magnetic fields on cardiac pacemakers. Research Reports IVO-A-04/91, Imatran Voima Oy, Vantaa 1991.

Tsong TY, Astumian RD. Electroconformational coupling: How membrane-bound ATPase transduces energy from dynamic electric fields. *Ann. Rev. Physiol.* 1988; 50, 273 - 290.

Watanabe S, Taki MT, Nojima T, Fukiwara O. Characteristics of the SAR distributions in a head exposed to electromagnetic fields radiated by a Hand-Held Portable Radio. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1996; 44: 1874 - 1882.

World Health Organization (WHO). *Electromagnetic Fields (300 Hz to 300 GHz). Environmental Health Criteria 137*, Geneva 1993.

**STUK-A -sarjan julkaisuja
STUK-A reports****15.5.1997**

STUK-A 142 Auvinen A. Cancer risk from low doses of ionizing radiation. Helsinki 1997.

STUK-A 141 Jokela K, Leszczynski D, Paile W, Salomaa S, Puranen L, Hyy-salo P. Matkapuhelimien ja tukiasemien säteilyturvallisuus. Helsinki 1997.

STUK-A140 Moring M, Markkula M-L. Cleanup techniques for Finnish urban environments and external doses from ¹³⁷Cs - modelling and calculations. Helsinki 1997.

STUK-A139 Tapiovaara M, Lakkisto M, Servomaa A. PCXMC. A PC-based Monte Carlo program for calculating patient doses in medical x-ray examinations. Helsinki 1997.

STUK-A138 Lindell B Boice JD, Sinnaeve J, Rytömaa T. Past and future trends of radiation research. Proceedings of the seminar at STUK in Helsinki 28 February 1997. Helsinki 1997.

STUK-A137 Arvela H, Ravea T. Radonturvallinen rakentaminen Suomessa. Helsinki 1997.

STUK-A136 Pennanen M., Mäkeläinen I. & Voutilainen A. Huoneilman radonmittaukset Kymen läänissä: Tilannekatsaus ja radonennuste. Helsinki 1996.

STUK-A135 Hyvärinen J. On the fundamentals of nuclear reactor safety assessments. Inherent threads and their implications. Helsinki 1996.

STUK-A134 Ylätalo S, Karvonen J, Ilander T, Honkamaa T, Toivonen H. Doserate mapping and search of radioactive sources in Estonia. Helsinki 1996.

STUK-A133 Rantavaara A. Puutavaran radioaktiivisuus. Helsinki 1996.

STUK-A132 French S, Finck R, Hämäläinen RP, Naadland E, Roed J, Salo A, Sinkko K. Nordic Decision Conference: An exercise on clean-up actions in an urban environment after a nuclear accident. Helsinki 1996.

STUK-A131 Mustonen R, Koponen H. Säteilyturvakeskuksen tutkimushankkeet 1996 - 1997. Helsinki 1996.

STUK-A130 Honkamaa T, Toivonen H, Nikkinen M. Monitoring of airborne contamination using mobile units. Helsinki 1996.

STUK-A129 Saxén R, Koskelainen U. Radioactivity of surface water and fresh water fish in Finland in 1991-1994. Helsinki 1995.

STUK-A128 Savolainen S, Kairemo K, Liewendahl K, Rannikko S. Radioimmunoterapia. Hoidon radionuklidit ja annoslaskenta. Helsinki 1995.

STUK-A127 Arvela H. Asuntojen radonkorjauksen menetelmät. Helsinki 1995.

STUK-A126 Pöllänen R, Toivonen H, Lahtinen J, Ilander T. OTUS-reactor inventory management system based on ORIGEN 2. Helsinki 1995.

STUK-A125 Pöllänen R, Toivonen H, Lahtinen J, Ilander T. Transport of large particles released in a nuclear accident. Helsinki 1995.

STUK-A124 Arvela H. Residential radon in Finland: Sources, variation, modelling and dose comparisons. Helsinki 1995.

STUK-A123 Aaltonen H, Laaksonen J, Lahtinen J, Mustonen R, Rantavaara A, Reponen H, Rytömaa T, Suomela M, Toivonen H, Varjoranta T. Ydinuhkat ja varautuminen. Helsinki 1995.

STUK-A122 Rantavaara A, Saxén R, Puhakainen M, Hatva T, Ahoilta P, Tenhunen J. Radioaktiivisen laskeuman vaikutukset vesihuoltoon. Helsinki 1995.

STUK-A121 Ikäheimonen TK, Klemola S, Ilus E, Sjöblom K-L. Monitoring of radionuclides in the vicinities of Finnish nuclear power plants in 1991-1992. Helsinki 1995.

STUK-A120 Puranen L, Jokela K, Hietanen M. Altistumismittaukset suurtaajuuskuumentimien hajasäteilykentässä. Helsinki 1995.

STUK-A119 Voutilainen A, Mäkeläinen I. Huoneilman radonmittaukset Itä-Uudenmaan alueella: Tilannekatsaus ja radonennuste. Askola, Lapinjärvi, Liljendal, Loviisa, Myrskylä, Mäntsälä, Pernaja, Pornainen, Porvoo, Porvoon mlk, Pukkila, Ruotsinpyhtää ja Sipoo. Helsinki 1995.

STUK-A118 Reiman L. Expert judgment in analysis of human and organizational behaviour in nuclear power plants. Helsinki 1994.

STUK-A117 Auvinen A, Castrén O, Hyvönen H, Komppa T, Mustonen R, Paile W, Rytömaa T, Salomaa S, Servomaa A, Servomaa K, Suomela M. Säteilyn lähteet ja vaikutukset. Helsinki 1994.

STUK-A116 Säteilyturvakeskuksen tutkimushankkeet 1994-1995. Mustonen R, Koponen H (toim.). Helsinki 1994.

STUK-A115 Leszczynski K. Assessment and comparison of methods for solar ultraviolet radiation measurements. Helsinki 1995.

STUK-A114 Arvela H, Castrén O. Asuntojen radonkorjauksen kustannukset Suomessa. Helsinki 1994.

STUK-A113 Lahtinen J, Toivonen H, Pöllänen R, Nordlund G. A hypothetical severe reactor accident in Sosnovyy Bor, Russia: Short-term radiological consequences in southern Finland. Helsinki 1993.

The full list of publications is available from
Täydellisen listan STUK-A -sarjan julkaisuista saa

Säteilyturvakeskus
Julkaisutoimikunta/Sihtööri
PL 14
00881 Helsinki
puh. (09) 759 881

Finnish Centre for Radiation and
Nuclear Safety
P.O. BOX 14
FIN-00881 HELSINKI
Finland
Tel. +358 9 759 881