

5

HYVIN PIENTAAJUISTEN KENTTIEN VAIKUTUKSIA

Jukka Juutilainen, Jonne Naarala, Pia Verkasalo,
Timo Kumlin, Hannele Huuskonen, Jaakko Kuustonen

SISÄLLYSLUETTELO

5.1	Johdanto	190
5.2	Genotoksiset vaikutukset	191
5.3	Genotoksisuus eläin- ja solukokeissa	192
5.4	Ei-genotoksiset vaikutukset	196
5.5	Karsinogeenisuuskokeet eläimillä	206
5.6	Syöpä ja epidemiologisia tutkimuksia	213
5.7	Hermosto	224
5.8	Lisääntymisterveys	229
5.9	Muita vaikutuksia	236

5.1 | Johdanto

Edellisessä kappaleessa 4 käytiin läpi sähkömagneettisen kenttäteorian ja biofysikaalisen tietämyksen pohjalta kenttien mahdollisia vaikutusmekanismeja, ja esiteltiin voimakkaiden kenttien aiheuttamat hyvin tunnetut vaikutusmekanismit. Tässä luvussa käydään läpi heikkojen pientaajuisten (0–300 Hz) kenttien biologisten ja terveydellisten vaikutusten tutkimustuloksia. Pientaajuisten kenttien lähteitä ovat muun muassa sähkömuuntamot, kiinteistömuuntamot, sähkön tasasuuntaajat, hitsaus, voimalinjat ja sähkökirurgiset laitteet.

Tähänastinen tutkimus on ollut hajanaista, menetelmiltään ja koeasetelmiltaan hyvin vaihtelevaa. Yksittäisten tutkimusten tuloksia on siksi hyvin vaikea verrata keskenään. Vaikka useissa tutkimuksissa on raportoitu erilaisia vaikutuksia, niitä ei yleensä ole vahvistettu uusissa riippumattomissa kokeissa. Toistoyrityksiä joko ei ole tai toiset tutkimusryhmät eivät ole onnistuneet toistamaan havaintoja. Tieteellisesti vakiintuneen tutkimustiedon edellytyksenä on, että tutkimukset olisivat toistettavissa riippumattomissa kokeissa.

Tässä kappaleessa tarkastellaan laajemmin mahdollista syöpäriskiä, hermostoon kohdistuvia vaikutuksia sekä lisääntymisterveydellisiä vaikutuksia, jotka kaikki ovat olleet vilkkaan keskustelun ja tutkimuksen kohteena.

On hyvin tunnettua, että tietyissä geneeissä tapahtuvat mutaatiot voivat johtaa normaalien solujen muuttumiseen syöpäsoluiksi. Niinpä genotoksiset (geneille myrkylliset) kemialliset tai fysikaaliset tekijät ovat yleensä myös karsinogeenisia eli syöpää aiheuttavia. Toisaalta on käynyt ilmeiseksi, että kaikki karsinogeenit eivät kuitenkaan ole genotoksisia. Toistaiseksi tiedetään vain vähän siitä, mihin tällaisten ei-genotoksisten karsinogeenien vaikutus perustuu, eikä niille kaikille edes välttämättä ole yhtä yhteistä mekanismia. Todennäköisesti monet ei-genotoksiset karsi-

	Laite
Teollisuus	Tasasuuntaajat, suuret muuntajat, hitsaus
Kuluttajat	Voimalinjat, sähköjunat, kiinteistömuuntamot, kodin sähkölaitteet
Sairaalat	Sähkökirurgiset laitteet, lääkintälaitteet

Taulukko 5.1 Pientaajuisten kenttien (alle 300 Hz) lähteitä

nogeenit ovat ko-karsinogeenia, eli toimivat yhdessä genotoksisten karsinogeenien kanssa. Ko-karsinogeenit toimivat esimerkiksi lisäämällä epäsuorasti mutaatioiden todennäköisyyttä tai edistämällä potentiaalisten syöpäsolujen kasvua tai eloonjäämistä. Kaiken kaikkiaan syövän synty eli karsinogeneesi on hyvin monimutkainen prosessi, joka ymmärretään vain osittain.

Tässä luvussa tarkastellaan ensin tutkimuksia, joissa on selvitetty hyvin pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien mahdollisia genotoksisia vaikutuksista ja niiden kykyä vaikuttaa muihin syövän syntyä edistäviin biologisiin prosesseihin. Seuraavaksi luodaan katsaus hyvin pientaajuisten kenttien karsinogeenisuutta testanneisiin eläinkokeisiin ja sitten syöpäriskiä ihmisillä selvittäneisiin epidemiologisiin tutkimuksiin. Aivan lopuksi tehdään yhteenveto hyvin pientaajuisten kenttien syöpäriskistä kaiken käytettävissä olevan tutkimustiedon perusteella.

5.2 | Genotoksiset vaikutukset

Genotoksisuustutkimukset altistuneiden ihmisten verinäytteistä

Ihmisiltä otettujen verinäytteiden lymfosyyteistä voidaan tutkia genotoksisia vaikutuksia ilmaisevia muutoksia, kuten kromosomipoikkeavuuksia, mikrotumia ja sisarkromatidin vaihdoksia. Tällaisia tutkimuksia käytetään yleisesti havaitsemaan aiempaa altistumista ionisoivalle säteilylle. Myös monet kemialliset altisteet, muun muassa tupakointi, aiheuttavat tällaisia muutoksia.

Useissa tutkimuksissa on tutkittu genotoksisuutta ilmaisevia muutoksia sellaisten ihmisten verinäytteistä, jotka ovat työssään altistuneet pientaajuisille sähkö- ja magneettikentille. Esimerkiksi Suomessa tehdyssä tutkimuksessa analysoitiin veren lymfosyyttejä 27:ltä, ei tupakoivalta voimajohtotyöntekijältä, sekä yhtä monelta saman maantieteellisen alueen samanikäiseltä, ei tupakoivalta puhelinjohtotyöntekijältä. Ryhmien välillä ei havaittu eroja sisarkromatidivaihdosten eikä mikrotumien määrässä. Kromosomipoikkeavuuksia oli enemmän voimajohtotyöntekijöillä, mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Sellaisten lymfosyyttien määrä, joissa oli kromatidikatkoksia, oli kuitenkin merkitsevästi suurempi voimajohtotyöntekijöillä. Tuloksen tulkintaa vaikeuttaa se, että kromatidikatkosten lisääntyminen painottui sellaisiin työntekijöihin, jotka olivat aiemmin elämässään tupakoineet.

Äskettäin tehdyssä ruotsalais–suomalaisessa tutkimuksessa analysoitiin ruotsalaisten veturinkuljettajien verinäytteitä. Veturinkuljettajat altistuvat varsin voimakkaalle magneetikentille, jotka voivat ajoittain olla yli 100 μ T. Tutkimus tehtiin kahdessa vaiheessa. Esitutkimuksessa analysoitiin 18 veturinkuljettajan, 7 junanlähettäjän ja 16 toimistotyöntekijän lymfosyyttejä. Kromosomityypiset poikkeavuudet olivat tilastollisesti merkitsevästi lisääntyneet ja noin neljä kertaa yleisempiä veturinkuljettajilla kuin kummallakaan vertailuryhmällä. Jatkotutkimuksessa analysoitiin 30 veturinkuljettajan ja 30 poliisin lymfosyyttejä. Kromosomityyppisten poikkeavuuksien määrä oli tälläkin kertaa merkitsevästi suurempi veturimiehillä. Veturinkuljettajista 60 % oli enemmän kuin yksi poikkeava solu sataa solua kohti (esitutkimuksessa 79 %), kun kaikilla vertailuryhmillä tämä luku oli noin 30 %.

Muissa tämän tyyppisissä tutkimuksissa on saatu vaihtelevia tuloksia. Näiden tutkimusten tulkintaa vaikeuttaa epävarmuus siitä, ovatko vertailuryhmät täysin vertailukelpoisia altistuneen ryhmän kanssa; työolosuhteissa ja elämäntavoissa voi olla muitakin eroja kuin magneetikenttäaltistus.

5.3 | Genotoksisuus eläin- ja solukokeissa

Genotoksisuutta on tutkittu myös solukokein siten, että verisolunäytteitä tai viljeltyjä soluja on altistettu sähkö- ja magneetikentille. Tällaisissa tutkimuksissa altistusajat luonnollisesti jäävät lyhemmiksi kuin edellä kuvatuissa tutkimuksissa, joissa tutkittiin ammatissaan magneetikentille altistuneiden verinäytteitä. Toisaalta tällaisella tutkimusasetelmalla saavutetaan se kokeellisen tutkimuksen tyypillinen etu, että koeolosuhteet ovat kontrolloidut, ja sähkö- tai magneetikenttäaltistuksen voidaan tietää olevan ainoa ero vertailtavien ryhmien välillä. Solukokeissa voidaan myös käyttää laajempaa valikoimaa erilaisia genotoksisuutta mittaavia menetelmiä. Solun perimän muutoksia ja niiden havaitsemiseen käytettäviä menetelmiä kuvataan seuraavassa lyhyesti.

DNA-vauriot

Ensimmäinen vaihe solun perimän vaurioiden synnyssä on DNA-molekyylin syntyvä vaurio, esimerkiksi emäksen vaurioituminen, proteiinien ja DNA:n välisten sidosten syntyminen tai DNA-molekyylin katkeaminen. Viimeksi mainitun vauriotyyppin mittaamiseen käytetään yleisesti yksisoluelektroforeesia, josta käytetään yleisesti nimitystä comet assay,

koska siinä DNA-kappaleet näkyvät ikään kuin komeetan pyrstönä. Mikäli elektroforeesi tehdään neutraaleissa olosuhteissa, menetelmä havaitsee lähinnä DNA:n kaksoisjuosteen katkoksia, kun taas menetelmän alkalisella versiolla voidaan havaita myös yhden juosteen katkoksia. Tämä menetelmä on hyvin herkkä havaitsemaan erilaisista syistä aiheutuvaa DNA:n pilkkoutumista; on epäselvää mitä sillä saadut tulokset merkitsevät esimerkiksi mutaatioiden syntymisen todennäköisyyden tai syöpäriskin kannalta.

Solulla on useita mekanismeja erilaisten DNA-vauriotyyppien korjaamiseen (kirja 4, ”Säteilyn terveysvaikutukset” kohta 2.3). Korjausmekanismien toiminnan tutkimiseen on myös kehitetty menetelmiä; esimerkiksi DNA-katkosten korjautumisen tutkimiseen voidaan soveltaa edellä kuvattua comet assay -menetelmää seuraamalla DNA-katkosten häviämistä ajan funktiona aiheutetun vaurion jälkeen.

Kromosomipoikkeavuudet, sisarkromatiidivaihdokset ja mikrotumat

Jos DNA-vaurio korjataan oikein, solu ja sen jälkeläiset jatkavat elämänsä normaalina, terveenä soluna. Jos sen sijaan vaurio jää korjaamatta tai korjataan väärin, syntyy soluun muutoksia, jotka ovat havaittavissa joko DNA:n emäsjärjestyksen muuttumisena (geenimutaationa) tai kromosomitason rakenteellisina muutoksina. Mikroskoopilla havaittavia kromosomitason muutoksia, kuten kromosomipoikkeavuuksia, sisarkromatidivaihdoksia ja mikrotumia käytetään yleisesti biomarkkerina ilmaistamaan altistumista genotoksisille ympäristötekijöille. Kromosomipoikkeavuuksia on useita eri tyyppisiä, ja niitä on kuvattu kirjan 4 luvussa 10 ja erityisesti saman luvun kuvassa 10.1. Sisarkromatidivaihdoksilla tarkoitetaan DNA-jaksojen vaihtumista saman kromosomin sisarkromatidien välillä, minkä uskotaan olevan seurausta kaksoisjuosteen katkosten korjauksesta. Mikrotumat ovat kappaleita jotka ovat peräisin joko katkenneistaromosomeista tai yksittäisistäromosomeista, jotka ovat solunjakautumisessa jääneet tytärsolujen tumien ulkopuolelle.

Mutaatiot

DNA:n emäsjärjestyksen muutoksilla on oleellinen rooli normaalisolun muuttumisessa syöpäsoluksi. Mikä tahansa mutaatio ei kuitenkaan lisää syöpäriskiä, vaan tarvitaan mutaatioita tietyissä solun toiminnan säätelyn kannalta tärkeissä geeneissä, joita ovat syöpägeenit eli onkogeenit ja

syövän estäjägeenit eli tuumorisuppressorigeenit (katso kirja 4, säteily ja syövän synty). Lisäksi syövän kehittymisen edellytys näyttää olevan, että soluihin kasautuu useita geneettisiä muutoksia.

Hyvin pientaajuisten kenttien genotoksisuus

Lukuisissa tutkimuksissa on testattu hyvin pientaajuisten magneettikenttien kykyä aiheuttaa genotoksia vaikutuksia. Joitakin näistä tutkimuksista on kuvattu lyhyesti tietolaatikossa 5.1. Vaikka joissakin yksittäisissä solu- ja eläinkokeissa on raportoitu vaikutuksia suhteellisen heikoillakin magneettikentillä, suurin osa kokeellisesta tutkimustiedosta tukee sitä johtopäätöstä, että hyvin pientaajuisilla magneettikentillä yksinään ei ole suoria genotoksia vaikutuksia pienillä tai keskisuurilla kentänvoimakkuuksilla (< 50 mT). Tätä suuremmilla magneettikentän voimakkuuksilla on raportoitu kromosomipoikkeavuuksien, sisarkromatidivaihdosten ja mutaatioiden lisääntymistä, mutta näin voimakkaita kenttiä ei esiinny elinympäristössä. Magneettikenttien suorien genotoksisten vaikutusten lisäksi on tutkittu myös niiden kykyä vahvistaa tunnetusti DNA:ta vaurioittavien altisteiden, kuten ionisoivan säteilyn, vaikutuksia. Useissa tällaisissa tutkimuksissa on havaittu yhteisvaikutuksia, joita on kuvattu faktalaatikossa 5.1.

FAKTALAATIKKO 5.1

Esimerkkejä hyvin pientaajuisten magneettikenttien genotoksia vaikutuksia selvittäneistä tutkimuksista

DNA-katkokset ja niiden korjaus

- Viljellyillä nisäkässoluilla on tehty paljon kokeita, joissa hyvin pientaajuisten magneettikenttien ($0,2 \mu\text{T} - 10$ mT) ei yleensä ole havaittu aiheuttavan DNA-katkoksia.
- Rotilla tehdyssä kokeessa Lai ja Singh altistivat eläimiä kahden tunnin ajan 60 Hz magneettikentille vuontiheyksillä 0,1, 0,25 ja 0,5 mT. Eläinten aivosoluista mitattiin DNA:n yhden juosteen ja kaksoisjuosteen katkoksia yksisoluelektroforeesilla. Kokeessa havaittiin tilastollisesti merkitsevä DNA-katkosten lisääntyminen kahdella suurimmalla magneettikentän voimakkuudella. Sama tutkimusryhmä on raportoinut samanlaisia vaikutuksia myös myöhemmissä lisäkokeissa. Uusimmissa kokessa he havaitsivat samanlaisia vaikutuksia jo $10 \mu\text{T}$ vuontiheydellä, kun altistus aika pidennettiin 24 tuntiin.

- Kahdessa tutkimuksessa ei havaittu pulssimuotoisella 50 Hz magneettikentällä (2,5 mT) eikä 60 Hz sähkö- ja magneettikentillä vaikutuksia ionisoivalla säteilyllä aiheutetun DNA-vaurion korjaukseen ihmisen lymfosyyteissä.
- Yhdessä tutkimuksessa 60 Hz, 150 μ T magneettikenttä hidasti selvästi vetyperoksidilla aiheutettujen DNA-katkosten korjausta kahdessa ihmisen solulinjassa.

Kromosomipoikkeavuudet ja sisarkromatidivaihdokset

- Ihmisen lymfosyyteillä tehdyissä tutkimuksissa havaittu 50–60 Hz:n magneettikenttien (30 μ T – 7,5 mT) lisäävän sisarkromatidivaihdoksia tai kromosomaalisia aberraatioita.
- Altistettaessa kiinanhamsterin V-79-soluja pulssimuotoiselle 100 Hz magneettikentälle (0,18–2,5 mT), eivät sisarkromatidivaihdokset lisääntyneet.
- Pulssimuotoisen magneettikentän (50 Hz, 1,05 mT) havaittiin aiheuttavan merkittävää kromosomipoikkeavuuksien ja sisarkromatidivaihdosten lisääntymistä miesluovuttajista kerätyissä lymfosyyteissä 72 tunnin yhtäjaksoisen altistuksen jälkeen.
- Hiiren m5S-soluissa on havaittiin merkitsevä sisarkromatidivaihdosten lisääntyminen hyvin voimakkaan magneettikenttäaltistuksen jälkeen (50 Hz, 400 mT, 42 h), ja kromatidityyppisten poikkeavuuksien lisääntyvän yli 50 mT kentänvoimakkuuksilla.

Mikrotumien muodostuminen

- Useissa tutkimuksissa ei ole havaittu sinimuotoisten tai pulssimuotoisten magneettikenttien (30 μ T – 2,5 mT) aiheuttavan mikrotumien muodostumista.
- 50 Hz magneettikenttä (0,8 ja 1,0 mT) 48 ja 72 tunnin ajan aiheutti mikrotumien määrän lisääntymistä ihmisen SCL II -karsinoomasolulinjassa. Mikrotumien määrä ei kuitenkaan lisääntynyt ei-transformoituneissa ihmisen soluissa samanlaisen magneettikenttäaltistuksen jälkeen.
- Mikrotumien määrä lisääntyi, kun ihmisen lymfosyyttejä (luovuttajilla Turnerin oireyhtymä) altistetaan pulssimuotoiselle magneettikentälle (50 Hz, 72 h), mutta samanlaista vaikutusta ei ole havaittu terveiden luovuttajien soluilla eikä altistettaessa soluja sinimuotoiselle magneettikentälle.

Mutaatiot

- Amesin bakteeritestillä ei ole havaittu hyvin pientaajuisten magneettikenttien (60–100 Hz, 0,13–300 μ T) vaikuttavan yksin tai

yhdessä kemiallisten mutageenien kanssa mutaatiofrekvenssiin *Salmonella typhimurium* -bakteereissa.

- CHO- tai CHO-K1-solujen altistaminen magneettikentille (50 tai 60 Hz, 1 μ T tai 5 mT) 1–6 viikon ajan ei aiheuttanut mutaatiofrekvenssin nousua hypoksantiini-guaaniinfosforibosyyli transferaasi-geenissä (*Hprt*-geeni).
- Ihmisen MeWo-melanoomasolujen altistaminen voimakkaalle magneettikentälle (50 Hz, 400 mT) aiheutti mutaatioiden lisääntymisen *Hprt*-geenissä. Jos DNA-synteesi inhiboitiin, ei mutaatioiden lisääntymistä havaittu.
- Voimakkaan magneettikentän (50 Hz, 400 mT) havaittiin aiheuttavan mutaatioita *Hprt*-geenissä ihmisen osteosarkoomasoluissa, joissa on *p53*-geenin puutos.
- Banaanikärpäsen toukissa somaattiset mutaatiot lisääntyvät magneettikenttäaltistuksen (20 mT) seurauksena.

5.4 | Ei-genotoksiset vaikutukset

Ei-genotoksisen karsinogeneesin mekanismeja tunnetaan huonosti. Ei myöskään ole olemassa mitään standarditestejä, joilla ei-genotoksiset karsinogeenit voitaisiin paljastaa. Syöpään johtavan prosessin monimutkaisuuden takia monet erityyppiset, myös ei-genotoksiset vaikutukset voivat periaatteessa voimistaa genotoksisten karsinogeenien vaikutusta tai muuten edistää syövän kehittymistä. Osa tällaisista vaikutuksista voi kohdistua suoraan soluihin edistäen normaalien solujen muuttumista syöpäsoluiksi. Syöpä ei kuitenkaan ole vain solujen vaan koko elimistön sairaus, joten syöpää edistävät mekanismit voivat toimia koko elimistön tasolla esimerkiksi heikentämällä vastustuskykyä. Seuraavassa kuvataan lyhyesti syövän kehittymiseen liittyviä ei-genotoksisia mekanismeja ja hyvin pientaajuisten kenttien vaikutuksia niihin nykyisen tutkimustiedon valossa. Yksittäisten tutkimusten tuloksia on lisäksi kuvattu tietolaatikossa 5.2.

Solujen proliferaatio

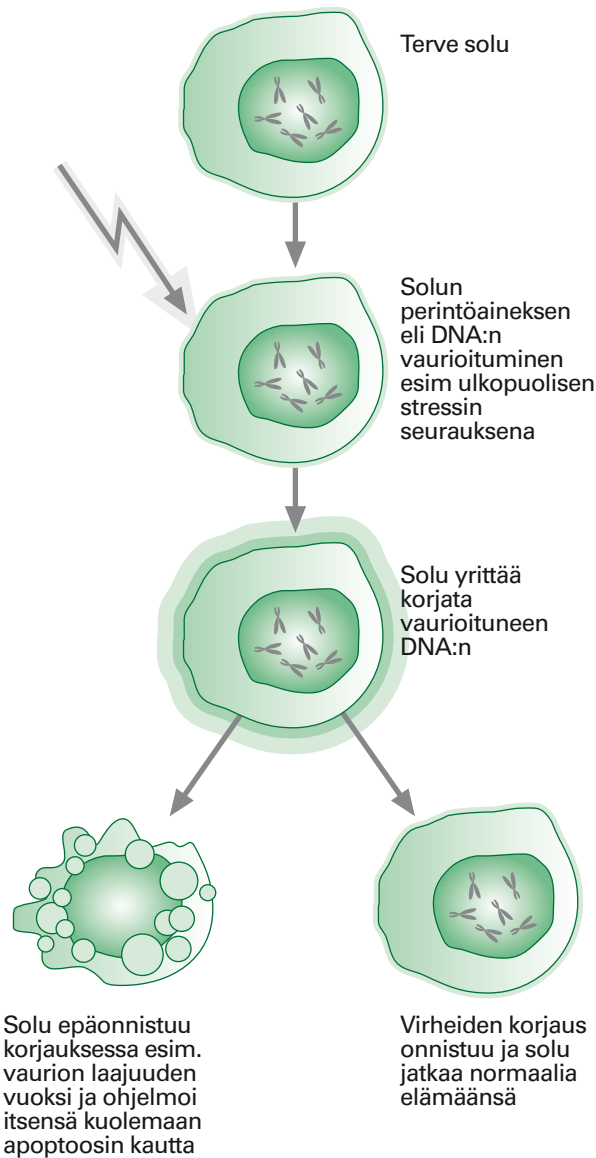
Solujen jakautumisen eli proliferaation kiihtyminen liittyy syövän edistämiseen ainakin kahdella tavalla: se nopeuttaa pahanlaatuisiksi muuttuneiden solujen kehittymistä kasvaimeksi ja lisää mutaatioiden todennäköisyyttä (jokaisessa DNA:n kahdentumisessa syntyy virheitä eli mutaa-

tioita). Monien tunnettujen ei-genotoksisten karsinogeenien tiedetäänkin kiihdyttävän proliferaatioita. Hyvin pientaajuisten kenttien vaikutukset solujen proliferaatioon ovat eri tutkimuksissa vaihdelleet hidastamisesta nopeuttamiseen, ja monissa tutkimuksissa vaikutuksia ei ole havaittu lainkaan. Kiistatonta osoitusta vaikutuksista ei ole.

Proliferaatioon liittyvät myös ne tutkimukset, joissa on mitattu polyamiinien biosynteesiin ja solunjakautumisen säätelyyn liittyvän ornitiinidekarboksylaasientsyymin (ODC) aktiivisuutta. ODC:a voidaan pitää solukasvun osoittimena; se on yleensä koholla nopeasti kasvavissa soluissa kuten esimerkiksi syöpäsolukossa. Monissa yksittäisissä tutkimuksissa on todettu ODC-aktiivisuuden nousseen sähkö- ja magneettikenttäaltistuksen (60 Hz sähkökenttä, 50–60 Hz magneettikenttä, 1–100 μT , 3 h – 3 päivää) seurauksena. Toisissa laboratorioissa ei kuitenkaan ole saatu samanlaisia tuloksia. ODC-aktiivisuutta on mitattu myös magneettikentille altistettujen eläinten kudospäätteistä. Saksalainen tutkimusryhmä raportoi pitkäaikaisen magneettikenttäaltistuksen (50 Hz, 100 μT) lisäävän rotan maitorauhasten ODC-aktiivisuutta. Sama tutkimusryhmä raportoi myöhemmin myös proliferaatiomarkkereiden (BrdU ja Ki-67) avulla mitatun solunjakautumisen lisääntyvän magneettikentille altistettujen rottien maitorauhasissa. Kuopion yliopistossa tehdyissä kokeissa hiirten pitkäaikainen (10,5 kk) magneettikenttäaltistus (50 Hz, tasainen 100 μT tai vaihteleva 0–126 μT) ei vaikuttanut ihon ODC-aktiivisuuteen tai polyamiinien pitoisuuksiin, mutta lyhytaikaisen (1 vrk) altistuksen jälkeen niissä havaittiin pieniä muutoksia.

Solukuolema

Solun kykyä tappaa itse itsensä kutsutaan ohjelmoiduksi solukuolemaksi eli apoptoosiksi. Apoptoottinen solu voidaan erottaa sen rakenteessa ja toiminnassa tapahtuvien muutosten perusteella toisesta solukuoleman tavasta, nekroosista, jossa solun kalvot hajoavat ja solun sisältö vuotaa ympäristöön saaden aikaan tulehdusreaktion. Tämänhetkinen tietämys osoittaa, etteivät hyvin pientaajuiset kentät aiheuta nekroottista solukuolemaa (solujen passiivista tuhoutumista). Magneettikentillä on sen sijaan havaittu olevan vaikutusta ohjelmoidun solukuoleman eli apoptoosin käynnistymiseen. Apoptoosi on syövän kannalta tärkeä ilmiö, sillä se on monisoluisien eliöiden puolustuskeino, jolla haitallisiksi muuttuneet solut voidaan poistaa elimistöstä, (katso kuva 5.1). Apoptoosin estämisen voidaan siis katsoa edistävän syöpää. Useiden tunnettujen syöpää edistävien ei-genotoksisten aineiden (promoottoreiden) tiedetäänkin vähentävän



Kuva 5.1 Apoptoosi

apoptoosia. Sen sijaan magneettikentän raportoidut vaikutukset altistettaessa soluja pelkälle magneettikentälle ovat yleensä olleet apoptoosia lisääviä. Näiden havaintojen käytännön merkitystä syöpäriskin kannalta on toistaiseksi vaikea arvioida. Yhteisvaikutustutkimuksissa, joita on kuvattu kohdan 5.5 lopussa, magneettikenttäaltistuksen on havaittu vähentävän muilla tekijöillä aiheutettua apoptoosia.

Geenien ilmentyminen

Geenien ilmentymistä eli geeniekspressiota mittaamalla voidaan tutkia solujen reaktioita erilaisiin haittatekijöihin ja ympäristöärsykkeisiin. Syövän kehittymisen kannalta tärkeitä ovat muutokset niin sanottujen syöpägeenien (proto-onkogeneenien) ja syövältä suojaavien geenien (tuumorisuppressorigeenien) sekä solun stressivasteisiin liittyvien lämpöshokki-geenien (stressigeenien) ilmentymisessä. Hyvin pientaajuisilla kentillä on eräissä tutkimuksissa kuvattu vaikutuksia geenien ilmentymiseen. Riippumattomat tutkimusryhmät ovat yrittäneet toistaa eräitä näistä havainnoista; nämä toistoyritykset eivät ole vahvistaneet alkuperäisiä havaintoja. Tämän hetkinen tutkimustieto ei siis ole kiistattomasti osoittanut hyvin pientaajuisilla kentillä olevan vaikutuksia geenien ilmentymiseen.

Solunsisäinen viestinvälitys

Solunsisäinen viestinvälitys on tärkeää solun kaikkein toimintojen kannalta. Useat siihen liittyvät tutkimukset ovat keskittyneet solunsisäisen kalsiumin tasoihin tai siihen välillisesti liittyviin signaalinvälitysreitteihin. Ensimmäisiä havaintoja hyvin pientaajuisien kenttien vaikutuksista kalsiumtasoihin julkaistiin jo 1970-luvulla. Tutkimuksia on sen jälkeen tehty paljon, mutta havainnot ovat ristiriitaisia, ja vaikutusten olemassaolo on edelleen kiistanalaista.

Solujenvälinen viestintä

Solujen välinen viestintä tapahtuu muun muassa solukalvon aukkoliitosten kautta. Viestinvaihto viereisten solujen kanssa on tärkeää solukasvun säätelyssä - syöpäsolulle ominaiset viestinnän häiriöt johtavat helposti kontrolloimattomaan solukasvuun. Useiden ei-genotoksisten karsinogeenien (promootoreiden) onkin havaittu estävän solujen välistä viestintää. Hyvin pientaajuisien sähkömagneettisten kenttien mahdollista vaikutusta solujenväliseen viestintään on tutkittu vain vähän, eikä tuloksista voi vetää johtopäätöksiä.

Kasvutekijät ja erilaistuminen

Elimistön solut ovat erilaistuneet erilaisiin tehtäviin – hermosoluiksi, lihassoluiksi, verisoluiksi jne. Kasvutekijöiksi kutsutut molekyylit osallis-

tuvat erilaistumisen säätelyyn. Syöpäsolujen erilaistumisaste matalampi kuin normaalien solujen, ja eräiden syöpää edistävien aineiden on havaittu vähentävän solujen erilaistumista. Muutamissa tutkimuksissa on raportoitu hyvin pientaajuisten magneettikenttien vaikuttavan solujen erilaistumiseen. Nämä tulokset ovat yksittäisiä hajanaisia löydöksiä kokeista, jotka on tehty erilaisilla menetelmillä ja solutyypeillä, eikä niiden merkitystä syöpärisikin arvioinnin voi toistaiseksi arvioida. Tulosten toistettavuutta ei myöskään ole varmistettu riippumattomissa kokeissa.

Solutransformaatio

Solutransformaatiolla tarkoitetaan sitä, että solut muuttuvat pahanlaatuisempaan suuntaan, eli saavat syöpäsolulle tyypillisiä ominaisuuksia. Yleensä solutransformaatiota mitataan soluviljelmissä niiden kyvyllä muodostaa pesäkkeitä, mikä ilmaisee normaalin kasvun säätelyn häviämistä. Monien karsinogeenien (myös ei-genotoksisten) on osoitettu aiheuttavan transformaatiota soluviljelmissä. Hyvin pientaajuisilla kentillä tehdyissä tutkimuksissa ei yleensä ole havaittu solutransformaation lisääntymistä.

FAKTALAATIKKO 5.2

Esimerkkejä tutkimuksista, joissa on testattu hyvin pientaajuisten magneettikenttien vaikutuksia syövän ei-genotoksiin solutason mekanismeihin

Proliferaatio

- CHO-solujen proliferaatio ei muuttunut altistettaessa soluja $220 \mu\text{T}$ tai 5 mT kentänvoimakkuuksille.
- Pulssimuotoinen magneettikenttä ei vaikuttanut kontrollilymfosyyttien proliferaatioon, mutta lisäsi fytohemagglutiniini-indusoitua proliferaatiota vanhojen luovuttajien lymfosyyteissä.
- Nopeasti vaihtelevilla magneettikentillä ei todettu olevan vaikutusta ihmisen sikiön keuhkofibroblastien solusyklinkinetikkaan eikä proliferaatioon.
- Magneettikentän (60 Hz , $1,2 \mu\text{T}$) on raportoitu ehkäisevän melatoniinin ja tamoksifeenin proliferaatiota estävää vaikutusta

ihmisen MCF-7-rintasyöpäsolulinjassa. Nämä tutkimukset on pystytty toistamaan eri laboratorioissa käyttämällä juuri samoja soluja kuin alkuperäisessä tutkimuksessa. Toisessa toistoyrityksessä, jossa on käytetty eri lähteestä hankittuja MCF-7-soluja, ei havaittu edellä mainittuja vaikutuksia.

- Tutkimuksista, joissa on käytetty tymidiinin ottoa soluihin DNA-synteesin ja solujen proliferaation mittarina, on saatu ristiriitaisia tuloksia. Ihmisen fibroblasteissa ja kiinanhamsterin V79-soluissa magneettikenttäaltistus (15–4 000 Hz, 2,3 μT – 2,5 mT) aiheutti DNA-synteesin lisääntymistä. Toisaalta 1–200 Hz taajuiset kentät (230–650 μT) inhiboivat DNA-synteesiä ihmisen lymfosyyteissä, eikä magneettikentillä ollut vaikutuksia ihmisen HL-19-fibroblastien DNA-synteesiin.

- Altistettaessa ihmisen 132-1N1-astroytoomasolulinjaa 60 Hz magneettikentälle (30–120 μT , 3–72 h), solujen proliferaatio lisääntyi merkittävästi.

- 50 Hz pulssimuotoinen magneettikenttä (3 mT) ei aiheuttanut ihmisen U-373 MG -astroytoomasoluissa proliferaation eikä nekroottisen solukuoleman lisääntymistä. Tässä tutkimuksessa solunsisäisen kalsiumin tasot nousivat kuitenkin selvästi magneettikenttäaltistuksen seurauksena.

Apoptoosi

- Ihmisen HL60-solulinjassa 50 Hz magneettikenttä (45 mT) aiheutti apoptoosin lisääntymistä tunnin altistuksen jälkeen. Toisaalta samanlainen koejärjestely ei aiheuttanut apoptoosia ihmisen verestä eristetyissä lymfosyyteissä. Myöskään hiiren hematopoieettisissa kantasoluissa ei havaittu apoptoosin lisääntymistä magneettikenttäaltistuksen seurauksena.

- Rotan fibroblasteissa ja ihmisen karsinoomasolulinjassa havaittiin apoptoosin käynnistyminen magneettikentän (50–60 Hz, 0,25–1 mT) vaikutuksesta.

- 1 mT 50 Hz kenttä ei aiheuttanut apoptoosia ihmisen lapsiveden soluissa.

Geenien ilmentyminen

- *C-myc* -onkogeenin ekspressio lisääntyi ihmisen HL60 -solulinjassa 20 minuutin magneettikenttäaltistuksen (15–150 Hz, 200 μT – 2,3 mT) seurauksena. Ilmentymisen lisääntyminen oli riippuvaista altistusajasta sekä soluviljelmien solutiheydestä. Monissa tutkimuksissa ei kuitenkaan ole todettu magneettikentillä vai-

kutuksia *c-myc*:n ilmentymiseen soluissa.

- Joissain tutkimuksissa on myös todettu *c-fos* ja *c-jun* -proto-onkogeenin sekä proteiinikinaasi C-geenin ilmentymisen lisääntyneen magneettikenttäaltistuksen seurauksena, mutta tältäkin osin tutkimustulokset ovat ristiriitaisia. Ihmisen glioblastooma T98G-soluissa 60 Hz elliptisesti polarisoitu magneettikenttä (1–500 μ T) ei aiheuttanut muutoksia *c-fos*-, *c-jun*-, eikä *c-myc* -geenin transkriptio- tai translaatiotasossa.
- Eräissä tutkimuksissa lämpöshokkigeenin (*HSP70* ja *SSA1*) ilmentyminen lisääntyi ihmisen HL60-soluissa ja *Saccharomyces cerevisiae* -hiivasoluissa lyhytaikaisen magneettikenttäaltistuksen (60 Hz, 8 μ T) jälkeen.
- Toisissa tutkimuksissa magneettikenttäaltistuksella (50 Hz, 1,5–50 mT, 20 min – 20 h) ei ollut vaikutusta *HSP70*:n ja *HSP90*:n ilmentymiseen, mutta lämpöshokilla aikaansaatu *HSP70*-induktio väheni magneettikenttäaltistuksen jälkeen.
- Hyvin voimakas magneettikenttä (50 Hz, 400 mT) sai aikaan β -galaktosidaasigeenillä transfektoiduissa, forskoliinilla stimuloituissa PC-12VG-soluissa lisääntyneen β -galaktosidaasiekspression. Tämä vaikutus voitiin estää osittain kalsiumkanavaestäjillä ja lähes kokonaan proteiinikinaasi C:n inhibiittorilla.

Solunsisäinen viestinvälitys

- Ihmisen Jurkat-soluissa solunsisäisen kalsiumin värähtelyt lisääntyivät magneettikenttäaltistuksen (50 Hz, 0,04–0,15 mT) seurauksena.
- Samassa solulinjassa todettiin myös inositolitrisfosfaatin konsentraation nousevan, kun soluja altistettiin 50 Hz 0,1 mT magneettikentälle.
- Magneettikenttien vaikutusta hermosolujen synaptiseen aktiivisuuteen tutkittiin etanalla (*Helix aspersa*). Tulokset viittasivat siihen, että kalsiumioni välittää magneettikentän (50 Hz, 1–15 mT) ja hermosolun solukalvon vuorovaikutuksen solun sisään. Magneettikentän aiheuttama vaikutus muistutti paljon hermovälittäjäaine glutamaatin vaikutusta synaptiseen aktiivisuuteen.
- Useissa tutkimuksissa ei ole havaittu magneettikenttien vaikutuksen suoraan tai välillisesti solunsisäisiin kalsiumtasoihin.
- Useita tutkimuksia on tehty ihmisen B-linjan lymfoidisilla soluilla ja kanan DT40-lymfomasoluilla. On esimerkiksi todettu tyrosiini-kinaasien (Lyn-kinaasi) ja fosfolipaasi C:n aktivoituvan magneettikenttäaltistuksen (60 Hz, 0,1 mT) seurauksena. Yritettäessä tois-

taa näitä tutkimuksia toisissa laboratorioissa, ei kyseisiä vasteita ole kuitenkaan havaittu.

- β -galaktosidaasigeenillä transfektoituissa PC-12VG-soluissa hyvin voimakas magneettikenttä (50 Hz, 400 mT) sai aikaan lisääntyneen β -galaktosidaasiekspression forskoliinilla stimuloituissa soluissa. Tämä vaikutus voitiin estää osittain kalsiumkanavaestäjillä ja lähes kokonaan proteiinkinaasi C:n inhibiittorilla.

Solujenvälinen viestintä

- Melatoniinilla indusoidun aukkoliitosviestinnän havaittiin estyvän hiiren embryonaalisissa soluissa, kun solut altistettiin 50 Hz (1,6 mT) magneettikentälle.
- Clone 9 -soluissa magneettikenttä (45 Hz, 23,8 μ T + staattinen kenttä) ei aiheuttanut mitään vaikutuksia aukkoliitosviestintään.

Kasvutekijät ja erilaistuminen

- Iäkkäiden luovuttajien (keski-ikä 88 vuotta) lymfosyyteillä tehdyssä tutkimuksessa pulssimuotoinen magneettikenttä (50 Hz, 2,5 mT) aiheutti tymidiinin sisäänoton nousua, interleukiini-2-tuotannon laskua sekä interleukiini-2-reseptoriposiitivisten solujen ja T-aktivoituneiden lymfosyyttien määrän lisääntymistä.

- Rotan PC-12-soluilla on tutkittu neuriittien eli viejä/tuoja-haarakeiden muodostumista magneettikenttäaltistuksen seurauksena. Hermokasvutekijällä stimuloituissa PC-12-soluissa magneettikenttä (15–70 Hz, 3,5–10 μ T) aiheutti taajuudesta riippuvaa neuriittikasvun vähenemistä. Alennetussa seerumipitoisuudessa kasvatetuilla PC-12-soluilla havaittiin, että magneettikenttäaltistus (50 Hz, 4–8 μ T) aiheutti heikosti erilaistavissa olosuhteissa (solujen viljely 15 % seerumipitoisuudessa) neuriittien kasvun vähenemistä, ja voimakkaasti erilaistavissa olosuhteissa (solujen viljely 4 % seerumipitoisuudessa) neuriittien kasvun lisääntymistä. Suuremmilla kentänvoimakkuuksilla (8,5–15,8 μ T) ei kuitenkaan ollut vaikutusta neuriittien kasvuun.

- Myös rotan kromaffinisoluissa tapahtui solujen erilaistumista hermosolutyyppisiksi magneettikenttäaltistuksen seurauksena. Tämä magneettikentän aiheuttama kromaffinisolujen erilaistuminen voitiin estää L-tyypin kalsiumkanavien inhibiittorilla.

- Friend-erytroleukemiasolulinjalla tehdyissä tutkimuksissa havaittiin, että 60 Hz magneettikenttä (1–4 μ T) aiheutti solujen erilaistumisen estymistä, kun taas suuremmat kentänvoimakkuudet (0,1–1 mT) lisäsivät solujen proliferaatiota. Tämä tulos on saman-

suuntainen kuin eräillä kemiallisilla kasvainpromootoreilla saadut tulokset.

Solutransformaatio

- Suurimmassa osassa hyvin pientaajuisilla kentillä tehdyistä tutkimuksista ei ole havaittu solutransformaation lisääntymistä. Kokeissa on käytetty syyrianhamsterin dermaalisia ja embryonaalisia soluja, C3H10T1/2-soluja, hiiren epidermaalisia JB6-soluja sekä BALB/3T3-fibroblasteja. Magneettikenttäaltistus on ollut 50–60 Hz, 10 μ T – 400 mT, ja sekä sinusoidaalisia että pulssimuotoisia kenttiä on käytetty.
- Hiiren epidermaalisten JB6-solujen transformaatiofrekvenssin todettiin kasvavan, kun soluja altistettiin 60 Hz magneettikentälle (1–100 μ T) 8–14 päivän ajan.

Immunivaste

Sähkömagneettisten kenttien voisi periaatteessa ajatella lisäävän syöpäriskiä myös heikentämällä systeemitason (koko elimistön) puolustusjärjestelmiä. Monissa eläin- ja solukokeissa onkin testattu hyvin pientaajuisten kenttien mahdollisia vaikutuksia immunijärjestelmän toimintaan. Vaikka joissakin tutkimuksissa onkin raportoitu vaikutuksia T-solujen proliferaatiokykyyn, havainnot eivät ole johdonmukaisia, ja useimmissa eläinkokeissa ei ole havaittu mitään vaikutuksia erilaisiin immunijärjestelmän toimintaa kuvaaviin muuttujiin tai eläinten vastustuskykyyn. Hyvin pientaajuisilla kentillä ei ole selviä vaikutuksia myöskään viljeltyihin immunijärjestelmän soluihin.

Melatoniinin tuotto

Käpyrauhan tuottama melatoniinihormoni osallistuu elimistön vuorokautisten rytmien säätelyyn, ja sen pitoisuus veressä on suuri yöllä mutta pieni päivällä. Alentuneen melatoniinituotannon uskotaan lisäävän rintasyöpäriskiä estrogeenitasoa säätelevän vaikutuksen kautta. Lisäksi melatoniinilla saattaa olla yleisemminkin syöpää torjuvia vaikutuksia, sillä se näyttää alentavan vapaiden radikaalien määrää soluissa. Hyvin pientaajuisten sähkömagneettisten kenttien on esitetty alentavan melatoniinituotantoa ja siten johtavan suurentuneeseen syöpäriskiin. Tämä hypoteesi sai alkunsa eläinkokeista, joissa magneettikenttäaltistuksen raportoi-

tiin alentavan käpyrauhanen tai veren yöllisiä melatoniinipitoisuuksia. Myöhemmin on tehty paljon lisää tutkimuksia magneettikenttien vaikutuksista melatoniinituotantoon hiirillä, rotilla ja hamstereilla. Nämä kokeet eivät ole selvästi vahvistaneet aiempien kokeiden tuloksia – useimmissa niistä ei ole havaittu mitään vaikutuksia. Myöskään Suomessa Kuopion yliopistossa ja Kansanterveyslaitoksessa tehdyissä tutkimuksissa 50 Hz magneettikentällä (10–100 μT) ei ollut vaikutuksia melatoniinin kokonaistuottoon hiirillä tai rotilla.

Magneettikenttien vaikutusta ihmisen melatoniinieritykseen on tutkittu sekä kokeellisesti laboratoriossa että epidemiologisesti, mittaamalla melatoniinin aineenvaihduntatuotteen pitoisuutta ammatissaan tai kotiympäristössä magneettikentille altistuneiden henkilöiden virtsanäytteistä. Kokeellisissa tutkimuksissa 50–60 Hz, 1–28 μT magneettikentät eivät vaikuttaneet koehenkilöiden veren melatoniinipitoisuuksiin tai virtsaan erittyneen 6-hydroksimelatoniinisulfaatin (6-OHMS; melatoniinin pääasiallinen aineenvaihduntatuote, jota mittaamalla voidaan arvioida melatoniinituotantoa) määrään. Sen sijaan kaikissa koti- tai työympäristössä altistuneita havainnoineissa tutkimuksissa havaittiin muutoksia 6-OHMS:n eritymisessä virtsaan. Esimerkiksi Kuopion yliopiston tekemässä tutkimuksessa kerättiin 39 vaatetehtaassa työskentelevän henkilön ja 21 toimistotyöntekijän aamuvirtsanäytteitä kolmen viikon ajan maanantaisin ja perjantaisin. Pääasiassa ompelukoneiden käytöstä aiheutuva magneettikenttäaltistus oli suurimmillaan yli 1 μT (aika-keskiarvo käpyrauhanen kohdalla; esimerkiksi jalkojen kohdalla ja lyhytaikaiset huiput paljon suurempia). Magneettikenttäaltistukseen (kuten myös tupakointiin ja korkeaan ikään) näytti liittyvän pienentynyt 6-OHMS:n erityys, joskaan se ei alentunut johdonmukaisesti magneettikenttäaltistuksen kasvaessa.

Ei ole selvää miksi magneettikenttäaltistukseen liittyviä melatoniinierityksen muutoksia havaittiin epidemiologisissa, mutta ei kokeellisissa laboratoriotutkimuksissa. Laboratoriotutkimusten heikkoutena on se, että niillä voidaan tutkia vain lyhytaikaisen magneettikenttäaltistuksen vaikutusta, kun taas työssä tai kotiympäristössä altistuneita tutkimalla saadaan esille myös pitkäaikaiset vaikutukset. Toisaalta epidemiologisten tutkimusten tulkintaa vaikeuttaa se, että vertailtavien ryhmien työolosuhteissa ja elämäntavoissa saattaa olla muita (melatoniinitasoon vaikuttavia) eroja kuin magneettikenttäaltistus. Lisäksi epidemiologisten tutkimusten tulokset vaihtelivat hyvin paljon sen suhteen, minkälaisia 6-OHMS-erityksen muutoksia havaittiin ja minkälaiseen magneettikenttäaltistukseen muutokset näyttivät liittyvän.

Yhteisvaikutukset karsinogeenien kanssa

Osassa edellä kuvatuista solu- ja eläinkokeista on tutkittu hyvin pientaajuisten magneettikenttien yhteisvaikutuksia tunnettujen DNA-vaurioita aiheuttavien karsinogeenien (kuten ionisoiva säteily tai UV-säteily), kasvainpromootoreiden tai muiden haitallisten ympäristötekijöiden kanssa. Monissa näistä tutkimuksista on havaittu yhteisvaikutuksia, katso taulukko 5.2. Hyvin suurilla magneettikentän voimakkuuksilla (5 mT ja sitä suuremmilla) tällaisia vaikutuksia on havaittu säännönmukaisesti kaikissa kokeissa. Melko yleisesti vaikutuksia on havaittu myös 100 μ T ja 5 mT välillä. Useimmat yhteisvaikutuksia koskevat havainnot ovat tätä kirjoitettaessa uusia, ja kokonaiskuvaa saattaa vääristää julkaisuharha (positiivisia havaintoja julkaistaan enemmän kuin niitä, joissa vaikutuksia ei ole löydetty). Juutilaisen vuonna 2006 julkaiseman tutkimusten yhteisvaikutuksia selvittäneen systemaattisen analyysin perusteella julkaisuharha ei kuitenkaan näytä selittävän kaikkia havaintoja ja magneettikentällä oli yhteisvaikutuksia muiden ympäristötekijöiden kanssa 65 prosenttia tehdyistä tutkimuksista. Näyttääkin ilmeiseltä, että hyvin pientaajuisten magneettikenttien yhteisvaikutukset tunnettujen karsinogeenien kanssa vaativat lisätutkimuksia.

5.5 | Karsinogeenisuuskokeet eläimillä

Ympäristötekijöiden vaikutusta syövän syntyyn tai kehittymiseen eläimissä tutkitaan altistamalla pääasiassa pieniä jyrjsijöitä, useimmiten hiiriä tai rottia. Pientaajuisten kenttien hyvin heikoista vuorovaikutusenergiosta johtuen niiden ei uskota voivan aiheuttaa geenimutaatioita, jotka myöhemmin johtaisivat syövän kehittymiseen. Tästä syystä eläimiä altistetaan pientaajuisten sähkömagneettisten kenttien lisäksi usein myös jollekin tunnetulle syöpää aiheuttavalle tekijälle (karsinogeenille). Näissä niin sanottua kokarsinogeneesiä tutkivissa eläinkokeissa tarkoituksena on havaita kentän mahdollinen syövän kehittymistä edistävä vaikutus. Edistäminen tässä yhteydessä voi ilmetä esimerkiksi siten, että syöpäkasvaimet ilmaantuvat nopeammin, kasvaimia on useammalla eläimellä tai kasvainten lukumäärä on suurempi kasvaimia saaneilla eläimillä verrattuna altistamattomiin eläimiin.

Sähkökentillä tehtyjen kokeiden tulokset eivät ole viitanneet vaikutuksiin, joilla olisi yhteyttä syöpään. Pääosa syövän ja hyvin pientaajuisten kenttien yhteyttä selvittäneistä eläinkokeista onkin tehty altistamalla eläimiä magneettikentille.

Magneettikenttä- altistus	Muu altistus	Altistettu organismi	Altistusten yhteisvaikutus
1. Genotoksiset vaikutukset			
50 Hz, 0,2–200 μ T	UV säteily, metyyli-metaanisulfonaatti tai kromaatti	Kolme nisäkässolulinjaa	Ei vaikutusta DNA:n yksijuoste- vaurioiden korjaukseen
50 Hz, 62,8 μ T – 2,5 mT	Ionisoiva säteily tai mitomysiini C	Ihmisen lymfosyytit	Ei vaikutusta kromosomi- aberraatioiden tai sisarkromatidi- vaihdojen määrään
60 Hz, 100T	Ionisoiva säteily tai MNNG	Ihmisen ja hamsterin hybridisolut	Ei vaikutusta solujen elävyyteen tai mutaatioihin
50 Hz, 100 μ T	Ionisoiva säteily	Rotan trakean epiteelisolut	Kaksitumaisten mikrotomia sisältävien solujen lisääntyminen
60 Hz, 150 μ T	Vetyperoksidi	Kolme ihmisen solulinjaa	DNA-korjauksen heikkeneminen HL-60 ja HL-60R-soluissa, mutta ei Raji-soluissa
60 Hz, 700 μ T	Ionisoiva säteily	Hamsterin ovarisolut	Mutaatioiden lisääntyminen HPRT-geenissä
60 Hz, 1 mT	Ionisoiva säteily	Ihmisen lymfosyytit	Ei vaikutusta DNA:n yksijuoste- vaurioiden korjaukseen
50 Hz, 1 mT	Bentso(a)pyreeni ja/tai TPA	Syyrianhamsterin alkiosolut	Mikrotomien lisääntyminen kun yhtäaikainen altistus BP kanssa
50 Hz, 1 mT	Asbesti	Ihmisen amniionnestesolut	Magneettikenttä ja asbesti lisäävät mikrotomia, mutta ei yhteisvaikutusta
60 Hz, 1 mT	UV-säteily	Hiivasolut	Ei vaikutusta mutaatioiden määrään eikä mitoottiseen rekombinaatioon
60 Hz, \leq 1,4 mT	Ionisoiva säteily	Ihmisen lymfosyytit	Lähes tetraploidisten kromosomi- komplementtien lukumäärän lisääntyminen
60 Hz, 3 mT	Menadioni tai MNU	Transgeeninen rotan fibroblastisolulinja	Ei mutageenista tai ko-mutageenista vaikutusta
60 Hz, 5 mT	Ionisoiva säteily	Ihmisen gliomasolut	Mutaatioiden lisääntyminen HPRT- geenissä, kun tyrosiinifosforylaatio on inhiboitu
60 Hz, 5 mT	Ionisoiva säteily	Hamsterin ovarisolut	Mutaatioiden lisääntyminen HPRT-geenissä
50 Hz, 7 mT	FeCl ₂	Rotan lymfosyytit	DNA-katkosten lisääntyminen
50 Hz, 7 mT	FeCl ₂	Rotan lymfosyytit	DNA-katkosten lisääntyminen
60 Hz, 50 mT tai 50 Hz, 400 mT	Ionisoiva säteily, mitomysiini C	Hiiren solut	Kromosomiaberraatioiden lisääntyminen
50 Hz, 50 tai 400 mT	Ionisoiva säteily	Ihmisen gliomasolut	DNA-katkosten lisääntyminen
50 Hz, 400 mT	Ionisoiva säteily	Ihmisen melanoomasolut	Mutaatioiden lisääntyminen HPRT-geenissä

→

Magneettikenttä- altistus	Muu altistus	Altistettu organismi	Altistusten yhteisvaikutus
2. Ei-genotoksiset vaikutukset			
60 Hz, 0,4–1,0 μ T	Deksametasoni	Hiiren kateenkorvan solut	Apoptoosin lisääntyminen
60 Hz, 8 μ T	UV-säteily	Kananalkiot	Alkioiden eloonjäämistä suojaava vaikutus, kun akuutti magneettikenttäaltistus ennen UV-säteilyä
60 Hz, 10 μ T, 100 μ T, 1,0 mT, 1,1 mT	TPA	Hiiren epidermisen solut	Ei vaikutusta solutransformaatioon
50 Hz, 22 μ T	Ionisoiva säteily	Hiiri	Magneettikentällä säteilyltä suojaava vaikutus luuytimen soluntuotto-kykyyn (mitattuna solukolonioiden määrällä pernassa)
50 Hz, 10 μ T, 100 μ T tai 1 mT	Ionisoiva säteily	Hamsterin dermisen solut	Ei vaikutusta säteilyn aiheuttamaan immortalisaatioon
60 Hz, 30–120 μ T	PMA tai karbakoliini	Ihmisen astrocytoomasolut	Proliferaation (DNA-synteesin) lisääntyminen
60 Hz, 30–120 μ T	PMA tai karbakoliini	Rotan astrocytytit	Ei vaikutusta proliferaatioon (DNA-synteesiin)
50 Hz, 50 μ T	DMPA	Rotta	ODC-aktiivisuuden lisääntyminen maksassa
50 Hz, 100 μ T	Ionisoiva säteily	Rotan trakean epiteelisolut	Säteily ja magneettikenttä vaikuttivat c-fos ja c-jun ekspressioon, mutta yhteisvaikutus ei synergistinen
50 Hz, 100 μ T	UV-säteily	Hiiri	Apoptoosin väheneminen ihosoluissa
60 Hz, 100 μ T	TPA	Transformoituneiden ja normaalien hiiren fibroblastien yhteisviljely	Pesäkkeiden muodostumisen lisääntyminen
60 Hz, 100 tai 960 μ T	TPA	Hiiren epidermissolut	Ei vaikutusta solutransformaatioon
50 Hz, 120 μ T	UV-säteily	Hiivasolut	UV-säteilyn aiheuttaman kasvuihinkin pidentyminen, muutoksia solusyklissä
60 Hz, 150 μ T	Lämpökäsittely	3 ihmisen solulinjaa	Apoptoosin väheneminen
50 Hz, 200, 400 tai 800 μ T	TPA	Kiinanhamsterin keuhkosolut	Solujenvälisen kommunikaation väheneminen
50 Hz, 500 μ T – 1,5 mT	TPA	Hiiren luuytimen makrofagit	Magneettikenttä ja TPA lisäävät fagosytoosia, mutta ei yhteisvaikutusta. Magneettikenttä lisää superoksidituotantoa
50 Hz, 800 μ T	TPA	NIH3T3-solut	Solujenvälisen kommunikaation väheneminen
50 Hz, 1 mT	TPA	Ihmisen sikiönesteen solut	PKC-aktiivisuuden lisääntyminen matalilla TPA-pitoisuuksilla. Ei vaikutusta solusykliin

Magneettikenttä- altistus	Muu altistus	Altistettu organismi	Altistusten yhteisvaikutus
2. Ei-genotoksiset vaikutukset			
100 Hz, 1 mT	UV-säteily	Ihmisen T-lymfosyytit	DNA-synteesin väheneminen
60 Hz, 1 mT	Mitomysiini C tai streptonigriini	Ihmisen ataksia telangiectasia- ja normaalit lymfoblastisolut	Ei lisääntynyttä solukuolemaa
60 Hz, 1,1 mT	PMA	HL60-solut	Suuremmat PKC-aktiivisuuden muutokset sytosolissa ja solukalvossa
60 Hz, 2 mT	DMBA+TPA	Hiiri	Ei vaikutusta epidermiksen paksuuteen, ODC- tai PKC-aktiivisuuteen ihossa
60 Hz, 5 mT	Ionisoiva säteily	Rintasyöpäsolut	Apoptoosin ja Bax-ekspression hetkellinen väheneminen sekä Bcl2-ekspression lisääntyminen
60 Hz, 5 mT	Ionisoiva säteily	Xrs5-solut	Apoptoosin hetkellinen väheneminen ja solusyklin pysähdyksen esto
60 Hz, 5–400 mT	Ionisoiva säteily	C3H10T1/2-solut	Solutransformaation väheneminen
50 Hz, 10 mT	Ionisoiva säteily	Kananalkio	Vaurioilta ja kuolemalta suojaava vaikutus kun MK ennen ionisoivaa säteilyä
50 Hz, 10 mT	Insuliini tai tetrasykliini	Kananalkiot	Vaurioilta ja kuolemalta suojaava vaikutus, kun MK altistus ennen kemikaaleja
60 Hz, 50 mT	Lämpökäsittely	HL60RG-solut	Lämpökäsittelyn aiheuttaman hsp70-geenin ekspression väheneminen
50 Hz, 400 mT	Forskoliini tai TPA	Kiinanhamsterin ovariosolut	NOR-1-ekspression nopeutuminen ja voimistuminen

Taulukko 5.2 Pientaajuisten (50–60 Hz) magneettikenttien yhteisvaikutukset fyysikaalisten ja kemiallisten häiritteiden kanssa solukokeissa ja lyhytaikaisissa eläinkokeissa

Taulukossa koko ruudun varjostus ilmaisee, että on havaittu yhteisvaikutus. Joissakin näistä magneettikentällä on havaittu vaikutus, mutta ei yhteisvaikutusta tutkitun muun altistuksen kanssa.

Vaikka hyvin pientaajuisten magneettikenttien ei yleisesti uskotakaan voivan toimia täydellisenä karsinogeenina, eli pystyvän yksinään aiheuttamaan syöpää, on jonkin verran suoritettu myös pitkäaikaiskokeita, joissa ainoana altisteena on käytetty magneettikenttää. Näissä jopa kaksi vuotta kestävässä kokeissa eläimet ovat olleet altistettuina hyvin pientaa-

juiselle magneettikentälle suurimman osan elämästään. Kokeen lopussa eläinten kudokset on tutkittu systemaattisesti mahdollisten pahanlaatuisien muutosten havaitsemiseksi. Julkaistujen tutkimusten tulokset ovat pääsääntöisesti olleet negatiivisia, vaikka yhdessä kokeessa urosrotilla havaittiinkin kilpirauhaskasvainten lisääntyneen. Vaikutukset eivät lisääntyneet altistuksen lisääntyessä, eikä niitä havaittu lainkaan naaraissa. Todennäköinen selitys havainnolle on normaali biologinen vaihtelu suuressa määrässä eläimiä, joille luonnostaankin kehitty monenlaisia kasvaimia ja muita muutoksia elämänsä aikana.

Kokarsinogeneesi

Syövän syntyminen on monivaiheinen tapahtumaketju, mutta yleensä sen ymmärretään vaativan jonkin laukaisevan (initiaattorin) ja edistävän tekijän (promootori/kopromootori) läsnä-olon. Kokarsinogeneesiä tutkivissa eläinkokeissa syöpä aiheutetaan usein jollakin vaikutuksiltaan hyvin tunnetulla tekijällä. Kemiallisia karsinogeneeneja voidaan käyttää mm. maitorauhas-, maksa- ja ihokasvainten aikaansaamiseen. Ihokasvaimia voidaan aiheuttaa myös ultraviolettisäteilyllä. Ionisoivaa säteilyä voidaan käyttää muun muassa leukemian ja lymfooman (imusolmuke-syöpä) indusoimiseen.

Magneettikentän mahdollista kokarsinogeenistä vaikutusta voidaan tutkia esimerkiksi altistamalla eläimiä ensin jollekin tunnetulle syövän initiaattorille, kuten muun muassa maitorauhas- ja ihokasvaimia aiheuttavalle 7,12-dimetyylibents[a]antraseenille (DMBA) ja sen jälkeen magneettikentälle. Jos magneettikentällä ilmeni syövän kehittymistä edistävä vaikutus, viittaisi se magneettikentän toimimiseen syövän promootorina. Jos kasvainten aikaansaamiseksi käytetään initiaattorin lisäksi jotain tunnettua syöpäpromootoria, kuten esimerkiksi 12-*O*-tetradekanoyyli-forboli-13-asetaattia (TPA), voidaan selvittää magneettikentän mahdollista initiaation jälkeistä kopromootiovaikutusta yhdessä tunnetun promootorin kanssa. Näissä kahdessa esimerkissä kyse on kokeista, jotka perustuvat perinteiseen initiaatio-promootio-ajatteluun, eli eri tekijät vaikuttavat ajallisesti eri aikoina.

On myös mahdollista altistaa eläimiä magneettikentälle yhtäaikaaisesti jonkin täydellisen karsinogeenin (esimerkiksi laajakaistainen UV-säteily) kanssa, jolloin eri tekijät voivat vaikuttaa yhtä aikaa, tai vähintäänkin pitkän ajan kuluessa vuorotellen.

Edellä kuvattujen tutkimusten lisäksi on tehty myös kokeita, joissa pientaajuisten magneettikenttien mahdollista vaikutusta muun muassa leukemian ja lymfooman kehittymiseen on tutkittu istuttamalla rottiin syöpäsoluja. Näissä kokeissa ei tutkita magneettikentän vaikutusta yksinään, eivätkä ne ole myöskään kokarsinogeenisuuskokeita, koska eläinten elimistöön siirretään valmiita syöpäsoluja. Magneettikentän on mahdollista vaikuttaa siis vain edistämällä syöpäsolujen lisääntymistä joko stimuloimalla niiden kasvua ja kypsymistä, tai heikentämällä immunivastetta. Yhdestäkään tämällyypisistä kokeista ei ole toistaiseksi raportoitu magneettikentän syöpää edistävää vaikutusta.

Maitorauhaskasvaintutkimukset

Useita tutkimuksia on tehty käyttämällä maitorauhaskarsinoomamallia, jossa naarasrotille aiheutetaan maitorauhaskasvaimia kemiallisella karsinogeenilla. Verkkotaajuisen (50 Hz) magneettikenttäaltistuksen on useassa kokeessa havaittu edistävän maitorauhaskasvainten muodostumista. Kaikki positiiviset, eli vaikutuksen olemassaoloa tukevat havainnot ovat kuitenkin peräisin kahdesta tutkimusryhmästä, joiden koejärjestelyt poikkeavat sen verran paljon toisistaan, että ne eivät ole vertailukelpoisia keskenään.

Alun perin havainnot magneettikenttien vaikutuksesta teki Georgian tasavallassa toimiva Beniashvilin tutkimusryhmä altistettuaan rottia N-metyyli-N-nitrosourealle (MNU) ja 50 Hz magneettikentälle, jonka voimakkuus oli 20 μT . Tutkijat eivät kuitenkaan pystyneet itse toistamaan tulosta. Myöhemmin Saksassa Löscherin ryhmä on tehty sarja kokeita, joissa naarasrottia on altistettu DMBA:lle ja 50 Hz magneettikentille. Altistus 100 μT suuruiselle magneettikentälle lisäsi useissa kokeissa kasvainten ilmaantuvuutta pelkälle kemikaalille altistettuihin rottiin verrattuna.

Saksalaisen ryhmän havainnot ei ole kuitenkaan pystytty toistamaan Yhdysvalloissa. Yhdysvaltalaisen käyttämässä eläinkannassa kasvainten ilmaantuvuus DMBA:lla käsitellyillä rotilla oli huomattavasti korkeampi kuin saksalaisten käyttämällä rotilla, jolloin magneettikenttäaltistuksen mahdollinen vaikutus on saattanut peittyä. Myös muita tulosten erilaisuutta mahdollisesti selittäviä tekijöitä on tutkimusten väliltä löydetty.

Ihokasvaintutkimukset

Ihokasvaintutkimuksissa on saatu pääosin negatiivisia, mutta myös joi-takin positiivisia tuloksia. Yhdessä kokeessa kasvainten indusoijana käy-tettiin auringonsäteilyä simuloivaa ultraviolettisäteilyä ja muissa käy-tettiin DMBA/TPA-kopromootiomallia. Kanadassa McLeanin ryhmä on suorittanut kolmen samalla tavalla suoritettua kokeen sarja, jossa hiir-ten selän ihoa käsiteltiin aluksi kertaalleen kemiallisella initiaattorilla (DMBA) ja sen jälkeen useita kertoja promootorilla (TPA). Hiiriä altistettiin DMBA-käsittelyn jälkeen 21 viikon ajan kuusi tuntia päi-vässä 60 Hz magneettikentälle, jonka voimakkuus oli 2 000 μT . Tulok-set olivat pääosin negatiivisia, eli magneettikenttä ei lisännyt ihokas-vaimien määrää tai esiintyvyyttä. Yhdessä kokeessa tosin havaittiin, että kasvaimet muuttuivat nopeammin pahanlaatuisiksi, mutta tutkijat itse tulkitsivat kirjoittamassaan yhteenvedossa tämän havainnon sattumalöydöksenä. Myöhemmin tehdyssä samantapaisessa kokeessa ha-vaintoaikaa oli jatkettu edellisiin verrattuna ja tässä kokeessa mag-neettikentän havaittiin edistävän ihokasvainten muodostumista. Yhdys-valloissa Sasserin ryhmä suoritti myöhemmin McLeanin ryhmän kokeita vastaavan 23 viikkoa kestäneen kokeen, jossa hiiriä altistettiin 60 Hz magneettikentän (2 000 μT) lisäksi DMBA:lla ja TPA:lla. Tutkimuksen tulokset eivät viitanneet magneettikentän promootio- tai kopromootio-vaikutukseen.

Ruotsissa Rannugin ryhmä altisti hiiriä ensin DMBA:lle ja sen jälkeen 50 Hz (50 μT tai 500 μT) magneettikentälle 104 viikon ajan. Altistus oli päällä joko jatkuvasti tai jaksottaisesti (15 sekuntia päällä/15 sekun-tia pois). Positiivisena kontrollina käytettiin TPA-käsittelyä. Ainoa tilastollisesti merkitsevä ero oli se, että jaksottaiselle kentälle altiste-tuissa hiirissä oli enemmän ihokasvaimia kuin jatkuvalla kentälle altiste-tuissa eläimissä. Ero pelkälle DMBA:lle altistettuihin verokiryhmän eläimiin ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevä, joten tuloksen merkitys jää epäselväksi. Kuopion yliopistossa Kumlinin ryhmä altisti hiiriä 10,5 kuukauden ajan kolmena päivänä viikossa auringon säteilyä jäljittelevälle UV-säteilylle sekä jatkuvasti 50 Hz magneettikentälle, joka oli joko jatkuvaa (100 μT) tai jaksottaista ja voimakkuudeltaan vaihtelevaa (1,3–130 μT). Kokeen aikana iholle ilmestyneet kasvaimet kirjattiin ja lopussa kaikkien eläinten ihonäytteet tutkittiin histopatologisin mene-telmin. Magneettikenttäaltistus nopeutti ihokasvainten kehittymistä tilastollisesti merkitsevästi verrattuna pelkästään UV-säteilylle altistettuihin eläimiin. Jaksottaisen ja jatkuvan magneettikenttäaltistuksen vaikutuksil-la ei ollut eroa.

Muut kokarsinogeneesitutkimukset

Hyvin pientaajuisten magneettikenttien mahdollista vaikutusta aivokasvainien, leukemian tai lymfooman syntymiseen ja kehittymiseen on tutkittu altistamalla hiiriä tai rottia N-etyyli-N-nitrosourealla (ENU) tai, kuten Heikkisen ryhmä Kuopion yliopistossa, käyttämällä initiaattorina ionisoivaa säteilyä. Yhdessäkään tällaisessa rotta- tai hiirikokeessa ei magneettikenttäaltistuksella havaittu olevan vaikutusta aivokasvainien, leukemian tai lymfooman esiintyvyyteen. Magneettikenttien (0,5–500 μT) mahdollista promootio- tai kopromootiovaikutusta kemiallisesti indusoitujen maksakasvainien kehittymiseen rotassa on tutkittu Ruotsissa kahdessa tutkimuksessa, mutta tilastollisesti merkittäviä vaikutuksia ei ole havaittu.

Yhteenveto

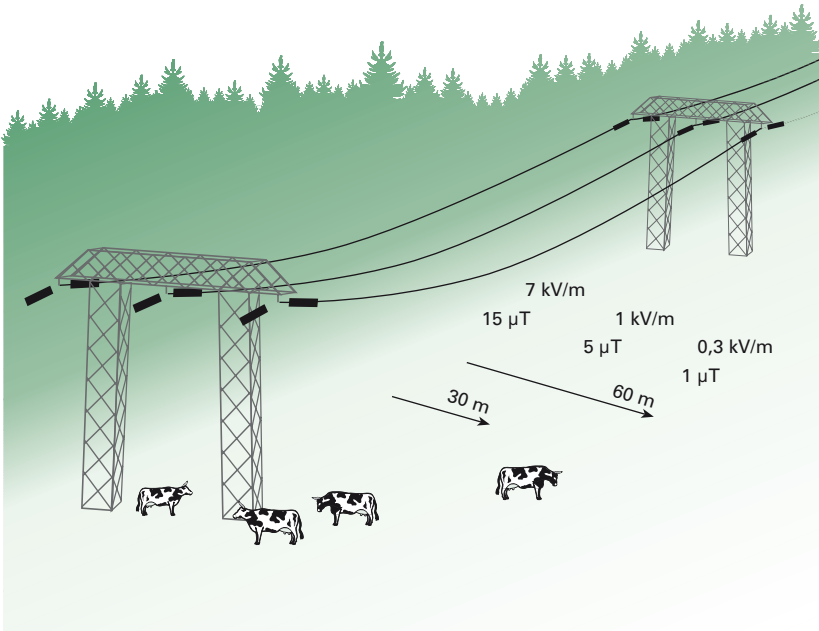
Ongelmana tähänastisten eläinkokeiden tulosten merkityksen arvioinnissa voidaan pitää karsinogeenisiä vaikutuksia raportoineiden tutkimusten ja etenkin niiden pohjalta suoritettujen onnistuneiden toistokokeiden vähäistä määrää. Kokeet joissa vaikutuksia on todettu, on saatettu toistaa onnistuneesti saman ryhmän toimesta, mutta ulkopuoliset toistoyritykset eivät ole onnistuneet. Näin ollen on vaikea saada varmuutta siitä, onko magneettikentän syöpää edistävä vaikutus todellinen, vai onko kenties paikallisissa olosuhteissa jokin tuloksia selittävä tekijä. Vaikutukset voivat esimerkiksi tulla esille vain jotain tiettyä rotta- tai hiirikantaa käytettäessä. Valtaosassa tehdyistä eläinkokeista hyvin pientaajuisten magneettikentän ei ole todettu vaikuttavan syövän syntyyn tai kehittymiseen. Joukossa on kuitenkin myös huolellisesti suoritettuja kokeita, joissa vaikutuksia on havaittu. Mikäli koe-eläimissä havaitut vaikutukset ovat todellisia, niillä saattaisi olla merkitystä myös ihmisen terveyden kannalta.

5.6 | Syöpä ja epidemiologisia tutkimuksia

Epidemiologia määritellään yleisesti (lääketieteen) oppialaksi, joka selvittää sairauksien tai muiden terveyteen liittyvien tilojen tai tapahtumien esiintyvyyttä ja niiden määreitä väestössä. Tässä luvussa keskitytään voimajohtojen ja lasten leukemian (verisyövän) välisen yhteyden selvittämiseen ja ymmärtämiseen, mikä onkin toistaiseksi ollut painoarvoltaan merkittävin osa hyvin pientaajuisten magneettikenttien terveysvaikutuksia selvittäneestä epidemiologisesta tutkimuksesta.

Voimajohtojen magneettikentät

Hyvin pientaajuisia 50 hertsin (Hz) magneettikenttiä syntyy ympäristöömme kaiken sähkön siirron, jakelun ja käytön yhteydessä. Asuin ympäristön magneettikentät (siltoin kun voimajohtoja ei ole lähellä) ovat yleensä voimakkuudeltaan alle 0,1 mikroteslaa (μT), mutta sähkölaitteiden käyttöön voi hetkellisesti liittyä voimakkuudeltaan monikymmenkertaisiakin kenttiä. Monet voimajohtojen lähellä asuvat ihmiset altistuvat tavanomaista suuremmille magneettikentille. Suurjännitejohtojen aiheuttama $0,2 \mu\text{T}$ kenttä voi ulottua enimmillään noin 150 metrin etäisyydelle 400 kV ja 70 metrin etäisyydelle 220 kV johdosta. Vastaava etäisyys 110 kV suurjännitejohdosta on 60 metriä. Voimajohtojen kentistä kerrotaan lisää kappaleessa 9 Säteilylähteet ja altistuminen. Magneettikenttä aiheutuu johdolla kulkevasta sähkövirrasta, ja vaihtelee kuormituksen eli sähkökulutuksen mukaan. Monien johtojen lähietäisyydellä magneettikentät voivat olla hieman edellä esitettyjä pienempiä, katso kuva 5.2



Kuva 5.2 Suurjännitejohtojen alla olevat magneettikentät

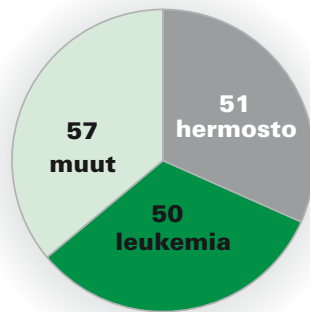
Kuvassa on esitetty, kuinka 400 kV suurjännitejohdon alla esiintyvä magneettikenttä vaihtelee etäisyyden funktiona.

Vaikka voimajohtot ovat siis vain yksi ympäristömme magneettikenttien lähteistä, niiden avulla on ollut mahdollista tunnistaa asuin ympäristösään pientaajuisille kentille tavanomaista enemmän altistunut väestöryhmä. Voimajohtot ovat siten tarjonneet epidemiologisille tutkimuksille oivallisen keinon arvioida takautuvasti väestön altistumista magneettikentille.

Epidemiologisissa tutkimuksissa on tyypillisesti katsottu yli $0,2 \mu\text{T}$ keskimääräisissä kentissä asuneiden olevan voimajohtojen magneettikentille altistuneita. Näiden henkilöiden sairastuvuutta syöpään on sitten verrattu vähemmän altistuneiden vertailuhenkilöiden syöpäsairastuvuuteen.

Lasten leukemia

Lasten leukemia on harvinainen tauti, jossa elimistöön kertyy pahanlaatuisia verisoluja. Lasten leukemiatyypeistä yleisin on akuutti lymfoblastileukemia, jossa solut muistuttavat imukudosperäisiä verisoluja, mutta ovat rakenteeltaan epäkypsiä ja primitiivisiä. Suomessa todettiin vuonna 1998 yhteensä 50 uutta leukemiaa alle 15-vuotiailla lapsilla; samana vuonna todettiin pahanlaatuisia lasten syöpiä kaikkiaan 158 (Suomen Syöpärekisterin tilastot). Kuvassa 5.3 on esitetty Suomessa alle 15-vuotiailla lapsilla vuonna 1998 todetut uudet syövä. Vähintään kolme neljästä leukemiaan sairastuneesta lapsesta on kehittyneiden hoitojen ansiosta elossa 5 vuoden kuluttua sairastumisesta. Leukemian ennaltaehkäisy ei ole mahdollista.



Kuva 5.3 Suomessa alle 15-vuotiailla lapsilla vuonna 1998 todetut uudet syövä

Suomessa todettiin vuonna 1998 yhteensä 50 uutta leukemiaa alle 15-vuotiailla lapsilla; samana vuonna todettiin pahanlaatuisia lasten syöpiä kaikkiaan 158.

Lasten leukemian syitä tunnetaan yleisesti ottaen huonosti. Ionisoivan säteilyn tiedetään aiheuttavan leukemiaa. Myös perintötekijöillä näyttää olevan merkitystä, sillä joihinkin periytyviin sairauksiin (esimerkiksi Dow-

nin syndroomaan) liittyy suurentunut leukemiavaara. Lasten leukemia ei kuitenkaan ole periytyvä sairaus. Uudet leukemiatapaukset esiintyvät usein ajallisina ja paikallisina kasautumina, ja viime vuosina onkin saatu lisää viitteitä infektioautien - tai elimistön puolustusmekanismien kehittymättömyyden - merkityksestä lasten leukemian kehittymiselle. Myös voimajohtojen ympäristönsä aiheuttamien pientaajuisten kenttien ja lasten leukemian yhteyden selvittely on ollut keskeinen osa leukemian epidemiologista tutkimusta.

Voimajohtot ja lasten leukemia – erillistutkimukset

Vuonna 1979 Wertheimer ja Leeper raportoivat tavanomaista useamman lapsen sairastuneen syöpään Denverin kaupungin alueella Yhdysvalloissa. Syöpäkertymän syitä selvittelleet tutkijat totesivat lasten syöpävaaran olevan yhteydessä kotien lähellä oleviin voimajohtoihin: mitä lähempänä johdot olivat ja mitä suurempi sähkövirta niissä kulki, sitä suurempi oli lasten suhteellinen syöpävaara.

Seuraavien kahden vuosikymmenen aikana voimajohtojen ja lasten syövän yhteyttä selvitettiin ainakin 24:ssä eri puolella maailmaa tehdyssä epidemiologisessa tutkimuksessa. Suomalainen valtakunnanlaajuinen Verkasalon ryhmän tutkimus valmistui syksyllä 1993. Tutkimukseen osallistui 135 000 lasta ja nuorta, jotka olivat asuneet alle puolen kilometrin päässä 110 kV, 220 kV ja 400 kV suurjännitejohdoista vuosina 1970–1989. Tutkimushenkilöillä todettiin seuranta-aikana kaikkiaan 140 syöpää. Koko aineistossa syöpäsairastuvuus ei poikennut tavanomaisesta, mutta tavallista voimakkaammille magneettikentille altistuneiden lasten syöpävaara oli lievästi, muttei tilastollisesti merkittävästi suurentunut. Erityisen mielenkiintoista oli, että kaksi tavanomaista voimakkaammassa magneettikentässä pitkän aikaa asunutta lasta oli sairastunut leukemiaan.

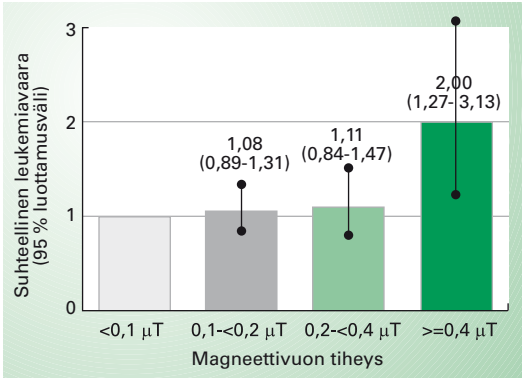
Monet muut eri puolella maailmaa tehnyt tutkimukset antoivat samansuuntaisia tuloksia. Altistuneiden syöpätapausten määrät jäivät kuitenkin kaikkialla vähäisiksi, mikä on epidemiologiassa yleinen tutkimustulosten tulkintaa haaittava ongelma. Käytännössä tämä johti siihen, että voimajohtojen ja lasten syövän yhteyttä selvittäneiden yksittäisten epidemiologisten tutkimusten tulokset vaikuttivat ristiriitaisilta. Tutkimustulosten ymmärtämiseksi ja riskiarvioiden täsmentämiseksi käynnistettiin 1990-luvun puolivälissä kaksi maailmanlaajuista yhteistutkimusta voimajohtojen ja lasten leukemian yhteydestä.

Voimajohtodot ja lasten leukemia – yhteistutkimukset

Ensimmäisessä yhteistutkimuksessa, jonka teki Ahlbomin ryhmä, olivat mukana kaikki eurooppalaiset tutkimukset, joissa magneettikentille altistumista arvioitiin joko pitkäkestoisilla (24 tuntia tai 48 tuntia kestäneillä) magneettikenttämittauksilla (Saksa, Iso-Britannia) tai laskemalla voimajohtojen lähiympäristöönsä aiheuttamat magneettikentät takautuvasti (Suomi, Ruotsi, Tanska, Norja). Yhteistutkimuksen ajankohtaisuuden säilyttämiseksi mukaan otettiin myös kolme uusinta Euroopan ulkopuolella tehtyä tutkimusta, joiden altistuksen arvioinnissa oli käytetty vertailukelpoisia menetelmiä (Yhdysvallat, Kanada, Uusi-Seelanti). Kahdeksan mukana olevista töistä oli alun perinkin tapaus–verrokkitutkimuksia ja yhdeksänestä (eli suomalaisesta) muodostettiin tapaus–verrokkiaineisto yhteisanalyseja varten. Kaikki tutkimushenkilöt olivat alle 15-vuotiaita. Heistä 3 247:lla oli todettu leukemia, ja loput 10 400 olivat syöpään sairastumattomia vertailuhenkilöitä (verrokkeja). Altistuksen arvioinnissa keskityttiin leukemiadiagnosia edeltäneen vuoden magneettikenttään.

Suhteellisen syöpävaaran määrittämiseksi laskettiin logistisia regressiomalleja käyttäen niin sanotut vakioidut vedonlyöntisuhteet tai ristitulohuhte (odds ratio). Suhteellinen syöpävaara on siten yksi, jollei eri altistusryhmien syöpäsairastuvuudessa ole eroja. Jos altistuneilla on enemmän (tai vähemmän) syöpää, havaittu vaarasuhde on suurempi (tai pienempi) kuin yksi. Sattuman vaikutusta vaarasuhteisiin arvioitiin laskeamalla vaarasuhteille 95 % luottamusväli. Mitä leveämpi luottamusväli on, sitä enemmän sattuma on voinut vaikuttaa tuloksiin. Jos luottamusväli sisältää vaarasuhteen yksi, sattuma on saattanut kokonaankin aiheuttaa havaitun suurentuneen (tai pienentyneen) vaarasuhteen.

Leukemiaa vaarassa ei havaittu muutosta niillä 99 % lapsista (3 203 leukemiatapausta ja 10 338 verrokkia), jotka olivat asuneet alle 0,4 μT suuruisissa magneettikentissä, katso kuva 5.4. Sitä vastoin voimakkuudeltaan yli 0,4 μT suuruisissa magneettikentissä asuneiden lasten (44 tapausta ja 62 verrokkia) suhteellinen leukemiaa vaara oli 2,00 (95 % luottamusväli = 1,27–3,13, P-arvo = 0,002). Mahdollisten tuloksia sekoittavien tekijöiden kuten sosioekonomisen aseman, asuinympäristön kaupungistumisasteen, yksilöllisen muuttohistorian, erillistalossa asuminen ja liikenteen saasteiden suhteen vakioiminen ei vaikuttanut tuloksiin. Suhteellisen syöpävaaran todettiin siis kaksinkertaistuneen niillä lapsilla, jotka olivat asuneet tavanomaista hieman voimakkaammissa magneettikentissä.

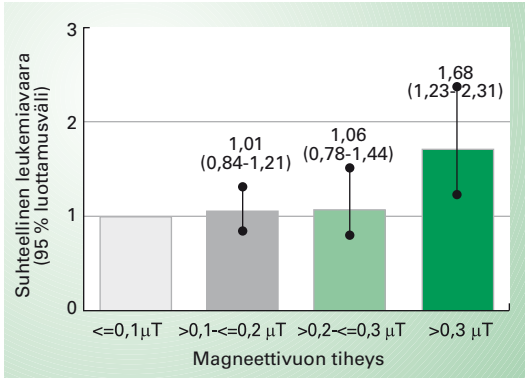


Kuva 5.4 Lasten suhteellinen leukemiavaara eri magneettikenttaluokissa (Ahlbom yms. 2000)

Altistuneilla on enemmän syöpää, kun vaarasuhde on suurempi kuin yksi. Jos luottamusväli sisältää vaarasuhteen yksi, on sattuma saattanut kokonaan aiheuttaa havaitun vaarasuhteen. Kuvasta nähdään, että alle 0,4 μT tasolla leukemiavaarassa ei havaittu muutosta. Yli 0,4 μT kentässä suhteellinen leukemiavaara oli koholla.

Toinen Greenlandin ryhmän tekemä yhteistutkimus kattoi lähes kaikki voimajohtojen ja lasten leukemian yhteyttä selvittelleet alkuperäistutkimukset, joissa on käytetty kvantitatiivisia menetelmiä magneettikentän voimakkuuden arvioinnissa. Vain yhden alkuperäistutkimuksen tekijät kieltäytyivät osallistumasta yhteistyöhön. Magneettikentän vaikutuksia selvitelleissä tilastoanalyysissä käytettiin kaikkiaan 12 alkuperäisaineistoa, joista kahdeksan oli mukana myös ensimmäisessä yhteistutkimuksessa, yhdeksäs oli liian tuore ehtiäkseen mukaan. Loput tutkimuksista olivat jo ensimmäisessä yhteistutkimuksessa mukana olleita vanhempia tutkimuksia, eikä niiden altistuksen arvioinnissa ollut käytetty yhtä korkealaatuisia menetelmiä. Esimerkiksi pitkäkestoisten magneettikenttämittausten sijasta oli käytetty vain pari minuuttia kestäviä suuntaa antavia mittauksia. Yhteistutkimuksen altistuksenarvioinnissa keskityttiin elin-aikaisen magneettikentälle altistumisen arviointiin. Tutkimushenkilöistä yhteensä 2 656:lla oli diagnosoitu leukemia ja 7 084 oli verrokkeja.

Tässäkään tutkimuksessa ei leukemiavaarassa havaittu muutosta matalissa magneettikentissä asuneilla lapsilla, mutta tavanomaista korkeammassa > 0,3 μT magneettikentissä asuneiden lasten suhteellinen syöpävaara oli lievästi ja tilastollisesti merkitsevästi suurentunut (suhteellinen syöpävaara = 1,68,95 % luottamusväli = 1,23–2,31), katso kuva 5.5. Eri tilastomenetelmiä käyttäen saatiin samanlaisia tuloksia, eikä muiden



Kuva 5.5 Lasten suhteellinen leukemiavaara eri magneettikenttäluokissa (Greenland yms. 2000)

mahdollisesti leukemiavaaraan vaikuttavien tekijöiden vakiointi muuttanut arviota syöpävaaran suuruudesta. Yhdenkään alkuperäistutkimuksen tulokset eivät poikenneet tilastollisesti merkitsevästi muiden alkuperäistutkimusten tuloksista – toisin sanoen niiden tulokset eivät sittenkään olleet keskenään ristiriitaisia. Magneettikenttien laskettiin selittävän noin 3 % kaikista Yhdysvalloissa havaittavista lasten leukemioista (95 % luottamusväli -2 % - 8 %).

Tutkimusharha vai syövän syy?

Erillistutkimukset voimajohdoista ja lasten leukemiasta eivät antaneet pitävää näyttöä suurentuneesta syöpävaarasta. Altistuneilla lapsilla oli määrällisesti vähän syöpiä. Havaitut riskinlisät olivat ainakin teoriassa selitettävissä sattuman vaikutuksella, sillä pelkästään sattuma aiheuttaa tilastollisesti merkitsevän positiivisen löydöksen joka 20. kokeellisessa työssä tai epidemiologisten muuttujien yhteyttä arvioivassa testissä. Tässä luvussa kuvatut kaksi yhteistutkimusta ovat kuitenkin osoittaneet, että sattuma ei selitä voimajohtojen lähellä asumisen ja lasten leukemiavaaran välillä havaittua yhteyttä.

Epidemiologisten tutkimustulosten merkitystä arvioitaessa on otettava huomioon monia eri tekijöitä, katso kuva 5.6. Tilastollisesti merkitsevästi suurentunut syöpävaara voi periaatteessa aiheutua sattumasta, tutkittavasta altisteesta tai tutkimusharhasta. Tutkimusharha voi olla esim. virhe tutkimusasetelmassa tai se voi syntyä sekoittavasta tekijästä. Epidemio-

logisten tutkimusten virhelähteitä kuvataan myös tämän kirjasarjan osassa 4, luku 6.

Monet erilaiset tutkimusasetelman virheet voivat johtaa virhepäätelmiin esimerkiksi lasten leukemian syistä. Tutkittava altiste saattaa tapaus-verrokkitutkimuksessa päästä vaikuttamaan siihen, valitaanko henkilö tapaukseksi tai verrokiksi (valikoitumisharha); altistustiedon laatu voi olla erilaista eri tutkimusryhmissä (informaatioharha); tai tutkimusryhmät eivät jostain muusta syystä ole tutkittavan sairauden suhteen vertailukelpoisia (vertailuharha). Vain yhden alkuperäisistä voimajohtotutkimuksista on osoitettu merkittävästi kärsineen tutkimuksen suunnittelun aiheuttamasta harhasta; harhan korjaamisen jälkeen kyseisessä tutkimuksessa todettiin alkuperäistä korkeampi vaarasuhde leukemiassa.

Väestöpohjaisissa voimajohtotutkimuksissa sairastuminen/altiste ei ole vaikuttanut tutkimukseen osallistumiseen. Voimajohtotutkimukset ovat yleensä olleet hyvin suunniteltuja ja huolellisesti tehtyjä. Altistumisen



Kuva 5.6 Altisteen ja sairauden välillä havaitun yhteyden tulkintaan vaikuttavia tekijöitä

Tämä päättelyketju kuvaa tutkimusasetelman, erilaisten virheiden ja sekoittavien tekijöiden vaikutusta kokonaisarvioon.

arviointi on toteutettu sokkona, joten tiedon laatu on ollut sama sekä tapauksilla ja vertailuhenkilöillä. Kaikkien tutkimusten tulokset on joko julkaistu tai ne ovat muuten yleisesti tiedossa.

Tutkimusharhan syynä voi olla myös niin sanottu sekoittava tekijä, millä tarkoitetaan tutkimushypoteesiin nähden ulkoista tekijää, joka häiritsee tutkimusta ja sekoittaa tai hämärtää tutkimustuloksia. Sekoittava tekijä on aina tarkasteltavan sairauden riskitekijä, minkä lisäksi sen tulee kyseisessä tutkimuksessa liittyä altisteeseen. Kahdessa kansainvälisessä yhteistutkimuksessa eivät esimerkiksi sosioekonominen asema, yksilöllinen muuttohistoria tai liikenteen päästöt vaikuttaneet tutkimusryhmien vertailukelpoisuuteen ja sekoittaneet tutkimustuloksia. Lasten leukemian oletetut riskitekijät eivät siis näytä selittävän voimajohtojen ja lasten leukemian välillä havaittua yhteyttä.

Tutkimusharhan vaikutusta ei nykyisellään voi kuitenkaan pitää täysin mahdottomana. Koska kaikki epidemiologiset tutkimukset ovat antaneet varsin yhteneväisiä tuloksia, pitäisi kyseisen harhan kuitenkin vaikuttaa samalla tavoin varsin erilaisissa olosuhteissa eri puolilla maailmaa. Viime vuosina on saatu viitteitä infektioautien (tai elimistön puolustusmekanismien kehittymättömyyden) merkityksestä lasten leukemian kehittymiselle. Teoriassa voidaankin ajatella, että esimerkiksi jokin infektioautteihin liittyvä tutkimusharha voisi selittää voimajohtotutkimusten tulokset. Käytännössä tällaisesta vaikutuksesta ei kuitenkaan ole olemassa minikäänlaista tutkimuksellista näyttöä.

Pientaajuisia magneetikenttiä voidaan nykyisellään pitää todennäköisimpänä syynä voimajohtojen lähellä asuvien lasten lievästi suurentuneeseen leukemiaavaaraan. Epidemiologiset tutkimukset voimajohtojen ja lasten leukemian yhteydestä onkin tulkittu rajalliseksi näytöksi pientaajuisien kenttien syöpää aiheuttavan vaikutuksen puolesta. Lisäksi tulee huomioida se, että magneetikenttien mahdollista syöpää aiheuttavaa mekanismeja ei tunneta. Biofysikaalisia vaikutusmekanismeja käsitellään toisaalla tässä kirjassa, katso kappale 4.

Merkitys terveydelle

Epidemiologisten tutkimusten perusteella yli $0,4 \mu\text{T}$ magneetikentät saattavat siis kaksinkertaistaa lasten suhteellisen leukemiaavaaraan. Koska lasten leukemia on kuitenkin harvinainen sairaus (Suomen Syöpärekisterin tilastot) ja koska asuinympäristössä tapahtuva yli $0,4 \mu\text{T}$

magneetikentille altistuminenkin on harvinaista, eivät pientaajuiset kentät aiheuta montaa ylimääräistä lasten syöpää. Voidaan arvioida, että kaikista eri lähteistä peräisin olevat pientaajuiset kentät voivat aiheuttaa muutaman lasten leukemiatapauksen koko Suomessa vuosittain, suurjännitejohtojen aiheuttamien lasten leukemioiden lukumäärän jäädessä ehkä muutamaan tapaukseen kymmenessä vuodessa. EU:n komission ympäristöaltistuksia käsittelevän tieteellisen komitean käsityksen mukaan alle prosentti lasten leukemioista voisi aiheutua voimajohdoista. Nämä arviot ovat siis melko yhteneviä.

Myös muista lähteistä peräisin olevien pientaajuisien magneetikenttien terveysvaikutuksia on lähestytty tarkastelemalla eri ammateissa toimivien sairastuvuutta, tutkimalla työympäristössä esiintyvien kenttien vaikutuksia ja selvittämällä yksittäisissä tutkimuksissa kodin sähkölaitteiden käytön vaikutuksia. Tarkastelun kohteena ovat lasten leukemian lisäksi olleet myös monet muut lasten ja aikuisten syövä, lisääntymisterveydeliset riskit (katso kohta 5.8 Lisääntymisterveys) sekä viime aikoina myös erilaiset hermoston toimintaan vaikuttavat, neurodegeneratiiviset sairaudet. Missään näistä tutkimuksista ei ole pitävästi osoitettu yhteyttä tutkitavan altisteen ja sairauden välillä.

Yhteenveto

Käytävissä olevan tutkimustiedon perusteella näyttää ilmeiseltä, että hyvin pientaajuisilla sähkökentillä ei ole syöpää aiheuttavia vaikutuksia. Suurin osa tutkimuksista onkin keskittynyt magneetikenttien mahdollisiin vaikutuksiin.

Solu- ja eläinkokeista saatu kokeellinen tutkimustieto tukee sitä johtopäätöstä, että hyvin pientaajuisilla magneetikentillä yksinään ei ole suoria genotoksisia vaikutuksia pienillä tai keskisuurilla kentänvoimakkuuksilla (< 50 mT). Hyvin voimakkailla magneetikentillä on joissakin tutkimuksissa raportoitu kromosomipoikkeavuuksien, sisarkromatidivaihdosten, DNA-katkosten ja mutaatioiden lisääntymistä. Näin voimakkaita kenttiä ei esiinny elinympäristössä. Myös yhteisvaikutuksia tunnettujen DNA:ta vaurioittavien tekijöiden (esimerkiksi ionisoivan säteilyn) kanssa on tutkittu, ja monissa kokeissa hyvin pientaajuisien magneetikenttien on raportoitu vahvistavan tällaisten tekijöiden vaikutusta. Yhteisvaikutukset ovat johdonmukaisia hyvin voimakkailla magneetikentillä, mutta jonkin verran niitä on raportoitu myös keskisuurilla kentänvoimakkuuksilla.

Syövän ei-genotoksiin mekanismeihin liittyvistä biologisista vaikutuksista on saatu vaihtelevia tuloksia. Hyvin pientaajuisen kenttien on raportoitu joissakin tutkimuksissa vaikuttavan muun muassa eräiden geenien ilmentymiseen, soluproliferaatioon, apoptoosiin, solujenväliseen viestintään, solutransformaatioon ja elimistön melatoniini tuotantoon. Vaikutusten suunta (stimulaatio vai inhibitio) on kuitenkin vaihdellut eri tutkimuksissa, ja usein havaintoja on ollut vaikea toistaa. Myös ei-genotoksisten vaikutusten kohdalla on viitteitä siitä, että hyvin pientaajuiset magneettikentät voisivat vahvistaa muiden haitallisten tekijöiden (kuten ionisoivan säteilyn, UV-säteilyn, kemikaalien) vaikutuksia.

Eläinkokeiden perusteella vaikuttaa todennäköiseltä, että hyvin pientaajuiset magneettikentät eivät yksinään pysty aiheuttamaan syöpää. Useimmissa kokeissa magneettikenttäaltistus ei ole myöskään edistänyt muilla karsinogeenillä aiheutettujen kasvainten kehittymistä, mutta muutamassa kokeessa on saatu viitteitä siitä, että magneettikenttäaltistus voisi joissakin olosuhteissa vahvistaa säteilyjen ja karsinogeenisten kemikaalien vaikutusta.

Epidemiologisten tutkimusten tulokset viittaavat siihen suuntaan, että altistuminen hyvin pientaajuisille magneettikentille lisää voimajohtojen lähellä asuvien lasten riskiä sairastua leukemiaan. Magneettikenttien kyvystä aiheuttaa lasten muita syöpiä tai aikuisten syöpiä on vähemmän näyttöä.

Kansainvälinen syöväntutkimuslaitos IARC (International Agency for Research on Cancer) julkaisi vuonna 2002 arvionsa staattisten ja hyvin pientaajuisen sähkö- ja magneettikenttien karsinogeenisuudesta. IARC:n arvioissa epidemiologiset tutkimukset voimajohtojen ja lasten leukemian yhteydestä tulkittiin rajalliseksi näytöksi pientaajuisen kenttien syöpää aiheuttavan vaikutuksen puolesta. Epidemiologinen näyttö muista syöivistä arvioitiin riittämättömäksi, samoin kuin näyttö kyvystä aiheuttaa syöpää eläinkokeissa. Kokonaisarviossaan IARC ottaa kantaa eri altisteiden syöpää aiheuttavaan ominaisuuteen sijoittamalla ne viiteen eri luokkaan: 1 - karsinogeeninen ihmisille; 2A - todennäköisesti karsinogeeninen ihmisille; 2B - mahdollisesti karsinogeeninen ihmisille; 3 - ei luokiteltavissa; 4 - todennäköisesti ei karsinogeeninen ihmisille. Pientaajuiset magneettikentät IARC sijoitti luokkaan 2B, eli ne saattavat mahdollisesti aiheuttaa ihmisille syöpää. Samaan luokkaan kuuluvat esimerkiksi aflatoksiini, progestiini, kahvi (virtсарakon syövän suhteen) ja bensiini. Pientaajuiset sähkökentät samoin kuin staattiset sähkö- ja magneettikentät sijoitettiin luokkaan 3.

5.7 | Hermosto

Välittömät, lyhytaikaisen altistuksen vaikutukset aivoihin ja muuhun hermostoon ovat todettavissa muun muassa aistimuksina sekä muutoksina aivojen sähköisissä toiminnoissa (EEG:ssä), muistissa ja oppimisessa. Tämänäyttöisiä hyvin pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien vaikutuksia hermoston toimintaan on tutkittu sekä koe-eläimillä että vapaaehtoisilla koehenkilöillä. Epidemiologisissa tutkimuksissa puolestaan on tutkittu pitkäaikaiseen altistukseen mahdollisesti liittyviä vaikutuksia, esimerkiksi riskiä saada Alzheimerin tauti.

Kenttien aistiminen

Sekä ihmiset että eläimet aistivat riittävän voimakkaan sähkökentän. On ilmeistä, että aistiminen perustuu ihokarvojen värähtelyyn vaihto-sähkökentässä. Ihmisillä aistimiskynnys on 10 kV/m luokkaa. Kynnys on kuitenkin yksilöllinen, ja pieni osa ihmisistä pystyy havaitsemaan jo 5 kV/m kentänvoimakkuuden. Kynnysarvo riippuu myös olosuhteista: voimalinjan alla eräässä kokeessa 90 % koehenkilöistä aisti 20 kV/m kentän, kun taas laboratorioissa tehdyssä toisessa tutkimuksessa 90 % aisti jo 9 kV/m kentän. Sähkökentän aiheuttamaa tuntemusta kuvataan kutinaksi tai pistelyksi. Suurilla kentänvoimakkuuksilla ilmiö saattaa olla kiusallisen voimakas; voimajohdon alla 10 % koehenkilöistä koki 20 kV/m kentänvoimakkuuden kiusalliseksi. Koe-eläimillä havaitsemisen kynnysarvo on samaa luokkaa kuin ihmisillä. Eläimillä on myös havaittu käyttäytymismuutoksia, jotka ilmeisesti liittyvät kentän aistimiseen: esimerkiksi rottien on havaittu välttelevän 75–100 kV/m kenttää, mutta pienemmällä kentänvoimakkuudella (25 kV/m) ne hakeutuivat sähkökenttään.

Myös riittävän voimakas magneettikenttä on aistittavissa heikkona värähtömänä värähtelynä näkökentässä. Tätä ilmiötä kutsutaan magnetofosfeeneiksi. Fosfeeneilla tarkoitetaan näköaistimuksia, jotka ovat jonkin muun ärsyksen kuin valon aiheuttamia. Magnetofosfeeneja esiintyy vain tietyllä taajuusalueella ja kynnysarvo riippuu taajuudesta, katso kuva 4.18. Suurin herkkyys on välillä 20–30 Hz. Kynnys vaihtelee myös yksilöllisesti ja olosuhteista (muun muassa valaistuksesta) riippuen. Magnetofosfeenien uskotaan perustuvan siihen, että kentän indusoima sähkövirta stimuloi verkkokalvon soluja. Fosfeeneja saadaan aikaan myös suoraan päähän kytketyillä heikoilla sähkövirroilla. Tarvittavan virrantiheyden kynnysarvoksi verkkokalvolla on arvioitu noin 10 mA/m².

Kognitio, oppiminen, muisti, suorituskyky

Jyrsijöiden oppimista ja muistia testataan yleisesti labyrintissä suoriutumisen avulla. Tällaisissa kokeissa on havaittu suorituskyvyn lievää heikentymistä rotilla ja hiirillä, joita on altistettu ennen labyrinttikoea 0,75–1 mT 50–60 Hz magneettikentille. Heikommilla magneettikentillä ja muunlaisilla testeillä saadut tulokset ovat vaihtelevia, selviä vaikutuksia ei ole havaittu. Sähkökenttien vaikutuksista eläinten oppimiseen, muistiin tai suorituskykyyn ei ole saatu selviä viitteitä.

Myös vapaaehtoisilla koehenkilöillä on tutkittu lyhytaikaisten sähkö- ja magneettikenttäältistusten vaikutuksia erilaisilla kognitiota ja aivojen suorituskykyä mittaavilla testeillä. Englannissa tehdyssä tutkimuksessa altistettiin 18 koehenkilöä 0,6 mT magneettikentille ja tehtiin altistuksen aikana useita erilaisia suorituskykyä mittaavia testejä. Kokeessa oli kolme erilaista altistustilannetta:

- ei kenttää (paitsi normaali maan magneettikenttä ja huoneessa vallitseva 50 Hz taustamagneettikenttä, jonka voimakkuus oli 0,03 μT)
- 0,6 mT vaihtomagneettikenttä (50 Hz)
- 0,6 mT staattinen magneettikenttä.

Kukin koehenkilö altistettiin jokaiselle käsittelylle, ja altistusjärjestys oli tasapainotettu. Koe tehtiin sokkona, eli koehenkilöillä ei ollut tietoa altistusjärjestyksestä. Tarkkaavaisuutta ja työmuistin toimintaa testaavissa tehtävissä havaittiin suorituskyvyn heikkenemistä silloin, kun koehenkilö altistui 50 Hz magneettikentälle. Staattisella magneettikentällä ei ollut samanlaista vaikutusta. Tutkijoiden mukaan tulos sopii yhteen niiden eläinkokeiden kanssa, joissa on havaittu labyrintissä suoriutumisen heikkenemistä.

Eräässä toisessa tutkimuksessa 20 koehenkilöä altistettiin tunnin ajan 1,3 mT, 45 Hz magneettikentälle. Puolella koehenkilöistä magneettikenttäältistus oli jaksoittainen (1 s päällä, 1 s poissa). Kukin koehenkilö altistettiin sekä oikealle magneettikentälle että valekentälle (pää magneettikenttäään sisällä mutta virta ei kytkettynä), ja altistusjärjestys oli tasapainotettu. Tutkimus tehtiin kaksoissokkona, eli tietoa altistuksesta ei ollut koehenkilöllä eikä paikalla olleella tutkijalla. Koehenkilöt suorittivat yksinkertaisen reaktioaikatestin ennen kutakin altistusta ja sen jälkeen. Reaktioaikatestissä oli painettava nappia merkkiäänänen kuuluessa. Magneettikenttäältistus ei sinänsä muuttanut koehenkilöiden reaktioaikaa kuten ei edellä kuvatussa englantilaisessa tutkimuksessakaan, mutta näytti vaikuttavan testisuorituksen paranemiseen harjoituksen seurauk-

sena. Koejärjestelystä johtuen, jossa oli kaksi altistusta ja reaktioaikatesti ennen ja jälkeen, kukin koehenkilö suoritti reaktioaikatestin neljä kertaa. Testin suoritus parani kaikilla harjoituksen seurauksena siten, että viimeisellä kerralla reaktioaika oli lyhin, mutta suorituksen paraneminen oli tilastollisesti merkitsevästi heikompi niillä koehenkilöillä, jotka altistuivat ensimmäisellä kerralla oikealle magneettikentälle. Tulos oli samansuuntainen sekä jaksoittaisella että jatkuvalla magneettikentällä, ja toistui myös toisessa tutkimuksessa, jossa altistusaika lyhennettiin 15 minuuttiin.

Melko voimakkaat (0,6–1,3 mT) magneettikentät siis saattavat heikentää suorituskykyä, mutta tutkimustulokset ovat alustavia ja vaativat varmistamista. Heikommilla magneettikentillä saadut tulokset ovat ristiriitaisia. Sähkökenttien vaikutuksista ei ole selviä viitteitä. Joissakin tutkimuksissa koehenkilöitä on altistettu samanaikaisesti sekä magneetti- että sähkökentälle.

Aivojen sähköinen toiminta

Edellisessä osassa kuvatussa Kuopion yliopiston tutkimuksessa koehenkilöiltä mitattiin myös aivojen sähköistä toimintaa (EEG) ennen magneettikenttäaltistusta (45 Hz, 1,3 mT, 1 tunti) ja sen jälkeen. EEG:n taajuusjakaumassa havaittiin muutoksia, jotka olivat selvempiä jaksoittaisen kuin jatkuvan magneettikenttä-altistuksen jälkeen. Samantapaisia tuloksia saatiin lyhyemmällä magneettikenttäaltistuksella (15 min), ja tässä tutkimuksessa havaittiin muutoksia myös ääniärsykeellä aikaansaaduissa herätepotentiaaleissa. Myös rotilla tehdyssä kokeessa samanlainen 45 Hz magneettikenttä muutti EEG:n taajuuspektriä.

Heikommilla magneettikentillä tehdyissä kokeissa ei ole saatu selviä viitteitä lyhyen päivällä tapahtuvan altistuksen vaikutuksista ihmisten tai eläinten aivojen sähköiseen toimintaan. Harvat positiiviset löydökset ovat vaihtelevia, ja selittyvät todennäköisesti sattumalla.

Kahdessa tutkimuksessa on raportoitu yönaikaisen heikon magneettikentän (50 Hz, 1 μ T tai 60 Hz, 28 μ T) aiheuttavan muutoksia koehenkilöiden unen aikana mitatussa EEG:ssä (muun muassa univaiheiden suhteellisissa osuuksissa) sekä koetussa unen laadussa. Nämä tutkimukset ovat alustavia ja tulokset osittain ristiriitaisia. Johtopäätöksiä niistä on vaikea vetää ilman lisätutkimuksia.

Muut lyhytaikaisen altistuksen hermostovaikutukset

Useissa kaksoissokkotutkimuksissa on selvitetty 1–30 μT magneettikenttien ja 0–12 kV/m sähkökenttien sekä niiden yhdistelmien vaikutusta koehenkilöiden mielialaan kyselyn avulla. Vaikutuksia mielialaan ei ole havaittu.

Eläinkokeissa on tutkittu sähkö- ja magneettikenttäaltistusten vaikutusta hermoston välittäjäaineisiin. Tulokset ovat hajanaisia ja ristiriitaisia. Muutamassa eläinkokeessa on raportoitu magneettikenttäaltistuksen estävän tai vähentävän opioidien (ooppiumin tapaan vaikuttavien aineiden) vaikutuksia, mutta nämäkin tulokset ovat vaihtelevia ja niiden merkitys on epäselvä.

Kolmella erilaisella eläinmallilla on havaittu pientaajuisten magneettikentän osittain estävän epileptistyyppisiä kohtauksia tai vähentävän niiden vakavuutta. Kohtaukset aiheutettiin eri kokeissa sähköllä, kemiallisesti pentyleenitetratsolilla tai voimakkaalla äänellä. Magneettikentät olivat taajuudeltaan 60 Hz tai 100 Hz ja voimakkuudeltaan 1–185 μT . Nämä erilaisilla menetelmillä saadut tulokset tukevat toisiaan, mutta niiden käytännön merkitystä (esimerkiksi magneettikenttien terapeuttisessa käytössä) on vaikea arvioida ilman lisätutkimuksia.

Neurodegeneratiiviset sairaudet, itsemurhat ja depressiiviset oireet

Epidemiologisissa tutkimuksissa on selvitetty ammatti- tai asuinympäristössä tapahtuvan altistumisen suhdetta erilaisiin hermoston toimintaan vaikuttaviin neurodegeneratiivisiin sairauksiin, itsemurhiin ja depressiivisiin oireisiin. Hyvin pientaajuisten magneettikenttien vaikutusten tutkiminen on vaikeampaa näissä sairauksissa kuin syövässä, koska niitä ei rekisteröidä kattavasti sairauden toteamisvaiheessa ja koska käytettävissä olevien kuolinsyyrekistereiden tiedot ovat epäluotettavampia kuin sairausrekistereiden tiedot.

Erittäin harvinainen motoristen hermosolujen progressiivinen sairaus (amyotrofinen lateraaliskleroosi, ALS) näyttää olevan yhteydessä sähköalan työhön. Ei kuitenkaan ole selvää, liittyykö lisääntynyt riski nimenomaan hyvin pientaajuisiin magneettikenttiin vai esimerkiksi kipinäpurkauksiin. Ensimmäisissä Alzheimerin tautia, yleistä aivojen palautumattomaa degeneratiivista sairautta, selvitelleissä tutkimuksissa havaittiin yhteys hyvin pientaajuisiin magneettikenttiin, mutta uudemmat tutkimuk-

set eivät ole vahvistaneet ensimmäisiä havaintoja. Myöskään itsemurhi-
en tai depressiivisten oireiden liittymisestä hyvin pientaajuisiin magneet-
tikenttiin ei ole olemassa selvää näyttöä.

Yhteenveto vaikutuksista hermostoon

Hyvin pientaajuisten sähkökenttien vaikutukset näyttävät rajoittuvat siihen, että riittävän suuret kentänvoimakkuudet pystytään aistimaan. Hyvin voimakkailla magneettikentillä kudoksiin indusoituneet sähkövirrat aiheuttavat selkeitä hermosolujen toimintaan kohdistuvia vaikutuksia, joita on käsitelty kappaleessa 4. Lisäksi hyvin pientaajuiset magneettikentät aiheuttavat magnetofosfeeneiksi kutsuttuja näköaistimuksia, jotka perustunevat sähköisesti ärtyvien solujen stimulaatioon kuten kappaleessa 4 esitellyt vaikutuksetkin. Näyttää myös mahdolliselta, että havaittavissa olevia vaikutuksia kognitioon, muistiin, oppimiseen ja EEG:hen alkaa ilmetä silloin, kun magneettivuon tiheys ylittää noin 0,5 mT (kokeet tehty 45–60 Hz:n taajuuksilla; kynnys todennäköisesti riippuu taajuudesta). Alle 0,5 mT kentillä ei ole selvää osoitusta vaikutuksista, vaikka hajanaisia positiivisia havaintoja onkin raportoitu, katso taulukko 5.3. Epidemiologisissa tutkimuksissa ei ole saatu selvää näyttöä hyvin pientaajuisten sähkö- tai magneettikenttien yhteydestä Alzheimerin tautiin.

Magneettivuon tiheys	Sähkökentän voimakkuus	Vaikutus	Kommentteja
	≥ 10 kV/m	Sähkökentän aistiminen, aistimiseen liittyviä käyttäytymismuutoksia eläimillä	Yleisesti hyväksytty vaikutus, dokumentoitu hyvin sekä ihmisillä että eläimillä
≥ 2 - 3 mT		Magnetofosfeenit (magneettikentän aistiminen, kappale 4.3)	Hyvin dokumentoitu, tunnettu vaikutus. Kynnys alimmillaan 20-30 Hz taajuuksilla
0,6 - 1,3 mT		Vaikutuksia kognitioon, muistiin ja suorituskykyyn pieniä muutoksia EEG:ssä	Havaittu sekä ihmisillä että eläimillä. Käytettävissä olevat havainnot ovat samansuuntaisia, mutta niitä on vähän
1μT - 0,5 mT		Joissakin tutkimuksissa raportoitu vaikutuksia ihmisiin, eläimiin ja hermosoluihin	Suurella osalla tutkimuksista ei mitään vaikutuksia. Positiiviset havainnot hajanaisia, varmistamattomia ja ristiriitaisia*

* johdonmukainen havainto on magneettikenttä-altistuksen epileptistyyppisiä kohtauksia lieventävä vaikutus eläimillä. Tämän on havainnut kolme toisistaan riippumatonta tutkimusryhmää kolmella erilaisella kokeellisella mallilla.

Taulukko 5.3 Yhteenveto hyvin pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien vaikutuksista hermostoon

merin tautiin, depression tai itsemurhiin. Sähköalan ammateissa näyttää olevan suurentunut riski sairastua amyotrofiseen lateraalisklerosiin. Ei kuitenkaan tiedetä johtuuko tämä suurentunut riski altistumisesta sähkö- tai magneetikentille.

5.8 | Lisääntymisterveys

Lisääntyminen on monivaiheinen ja häiriöille altis tapahtuma. Tärkeimpinä kriittisinä vaiheina voidaan erottaa:

- sukusolujen muodostuminen ja kypsyminen
- hedelmöittyminen
- alkion kulkeutuminen ja kiinnittyminen kohtuun
- alkion ja sikiön kehittyminen
- raskauden ylläpito
- synnytys
- syntymän jälkeinen kehitys
- sukukypsyys, käyttäytyminen.

Lisääntymisterveyden häiriintyessä vaikutus voi kohdistua mihin tahansa näistä kriittisistä vaiheista tai useaan yhtäaikaaisesti. Hyvinkin varhaisessa vaiheessa tapahtuneet muutokset alkionkehityksessä ja jopa sukusoluisa voivat ilmetä vasta myöhemmässä kehityksen vaiheessa, jopa vasta aikuisiässä.

Tutkimus magneetikenttien mahdollisesta vaikutuksesta lisäänty voimakkaasti 1980-luvulla tehtyjen ensimmäisten havaintojen jälkeen. Magneetikenttien havaittiin häiritsevän kananalkion kehitystä ja ensimmäinen epidemiologinen tutkimus sähköhuopien ja lämmitettävien vesisäilyjen mahdollisesta vaikutuksesta sikiön kehitykseen julkaistiin. Samaan aikaan lehdistössä oli esillä yllättävä uutinen, jossa väitettiin keskenmenojen lisääntyneen näyttöpäätetyötä tekevien naisten joukossa. Tämän jälkeen käynnistyi kokeellinen ja epidemiologinen tutkimus magneetikenttien mahdollista vaikutusta lisääntymisterveyteen.

Vaikutukset sikiöön

Koe-eläintutkimuksissa ei ole löytynyt vahvaa näyttöä siitä, että hyvin pientaajuinen magneetikenttä aiheuttaisi epämuodostumia tai lisääntymishäiriöitä. Useissa tutkimuksissa on havaittu joitakin vaikutuksia, mutta tulokset ovat olleet ristiriitaisia. Tärkeimmät havainnot ovat liittyneet

luustomuutoksiin ja epämuodostumien lisääntymiseen, taulukko 5.4.

Hyvin pientaajuisten magneettikenttien vaikutuksia nisäkässikiöiden kehitykseen on tutkittu lähinnä hiirillä ja rotilla; useimmissa tutkimuksissa

Eläinlaji ja kanta	Altistus- ajanjakso	Taajuus (Hz)	Aalto- muoto	Kentän voi- makkuus (μ T)	Havainnot	Viitteet
1. Hiiri						
Swiss		50	Pulssi- mainen	83, 2300	Elävien määrä ↓ syntymäpaine ↓	Rivas ym, 1985
C3H	Rpv 0–14	100	Kolmio- mainen	1 tai 15 (p-p)	-	Tribukait ym, 1987
CD-1	Rpv 0–17	50	Sini	20 000	Epämuodostumien määrä ↓ Luustomuutosten määrä ↑ Sikiöiden paino ja pituus ↑	Kowalczuk ym, 1994
CBA/Ca	Rpv 0–18	50	Sini	13 tai 130	Luustomuutokset ↑ (vähentynyt luutuminen)	Huuskonen ym, 1998b
2. Rotta						
SD	Rpv 6–15	50	Pulssi- mainen	5 800	Ei vaikutusta [pieni eläinmäärä] (alkioiden kuolleisuus ↑)	Zecca ym, 1985
Wistar	Rpv 0–20	50	Sini	13	Luustomuutokset ↑ Implantaatiot ↑	Huuskonen ym, 1993
Wistar	Rpv 0–19	50	Sini	30 000	Luustomuutokset ↑ [pieni eläinmäärä] [lisääntynyt luutuminen]	Mevissen ym, 1994
SD	Rpv 6–19	60	Sini	2, 200 tai 1 000	Ei vaikutusta	Ryan ym, 1996
	Rpv 6–19	60	Jaksot- tainen	1 000	Ei vaikutusta	Ryan ym, 1996
SD	Rpv 0–20	60	Aalto- mainen	0,6 tai 1 000	Ei vaikutusta	Rommereim ym, 1996
SD	Rpv 6–19	60, 180, 60+180	Sini	200	Luustomuutokset ↑	Ryan ym, 2000
Wistar	Rpv 0–2...7	50	Sini	13 tai 130	Lieviä muutoksia alkiokehityksessä Muutoksia kohdun reseptoripitoisuuksissa	Huuskonen ym, 2000
SD	Usean sukupolven koe	60	Sini	2, 200 tai 1 000	Ei vaikutusta lisääntymiskykyyn	Ryan ym, 1999
SD	Usean sukupolven koe	60	Jaksot- tainen	1 000	Ei vaikutusta lisääntymiskykyyn	Ryan ym, 1999

Taulukko 5.4 Nisäkässikiöiden kehityksessä havaittuja muutoksia altistettaessa emoja raskauden aikana hyvin pientaajuiselle magneettikentälle (rpv =raskauspäivät).

epämuodostumien määrä ei ole lisääntynyt. Yhdessä tutkimuksessa epämuodostumien määrä oli pienempi niillä sikiöillä, joita oli altistettu magneettikentälle kuin kontrollisikiöillä. Samassa tutkimuksessa altistettut sikiöt olivat myös kookkaampia kuin altistamattomat sikiöt.

Hiiren ja rotan sikiöiden luustomuutosten, lievien luustoepämuodostumien ja luustopoikkeamien määrä on lisääntynyt useissa tutkimuksissa raskauden aikaisen magneettikenttäaltistuksen seurauksena. Luustomuutokset ovat liittyneet luutumisen hidastumiseen, vähenemiseen tai sen lisääntymiseen tutkimuksesta riippuen. Saatuun tulokseen vaikuttaa todennäköisesti eläinkanta ja mahdollisesti myös magneettikentän aaltomuoto ja kentän voimakkuus. Pienin kentänvoimakkuus, jolla luustomuutoksia on havaittu, on ollut $13 \mu\text{T}$ (50 Hz sinimuotoinen kenttä). Havaittujen luustomuutosten ei tiedetä aiheuttavan ongelmia myöhemmässä luustonkehityksessä. Luustomuutokset ovat yleisimpiä magneettikenttäaltistuksen aiheuttamia muutoksia, joita on havaittu sikiönkehityksen aikana.

Raskauden aikaisen hyvin pientaajuisen magneettikenttäaltistuksen vaikutuksia syntymän jälkeiseen kehitykseen on kuvattu jyräjillä, taulukko 5.5. Havaitut vaikutukset ovat usein liittyneet kehityksen viivästy-miseen.

Magneettikenttien vaikutuksia alkionkehitykseen on tutkittu myös käyttäen mallina rotan tai hiiren alkioviljelmiä *in vitro*. Tutkimuksia on julkaistu vain muutama, mutta näissä on havaittu alkioiden kehityksen viivästy-mistä, pysähtymistä tai epämuodostumien lisääntymistä. Keskimäärin yhdessä tutkimuksessa kolmesta ei ole havaittu mitään vaikutusta.

Nisäkäsalkioiden lisäksi magneettikenttien vaikutusta alkion kehitykseen on tutkittu karpäsillä, sekä kanan, kalan ja merisiilin alkioilla. Karpäsillä muniminen väheni, kehityksen aikainen elinkyky heikkeni, paino laski ja kehityksen epävakaus lisääntyi. Kehityksen epävakautta arvioitiin muun muassa siitä, jos siiven epäsymmetria lisääntyi. Epäsymmetria lisääntyi karpäsillä $80 \mu\text{T}$ altistustasolla, mutta ei alhaisemmalla $1,5 \mu\text{T}$ altistustasolla. Magneettikenttäaltistus ei häirinnyt solujen kasvua karpäsen alkiosoluviljelmissä eikä muuttanut kolmen tutkitun sikiövaurioita aiheuttavan yhdisteen aiheuttamia haittavaikutuksia.

Useissa kananalkiotutkimuksissa epämuodostumat ovat lisääntyneet altistettaessa alkioita hyvin pientaajuiselle magneettikentälle. Epämuodostumat lisääntyivät jo $1 \mu\text{T}$ kentän voimakkuudella kentän muodon ollessa joko pulssimainen tai sinimuotoinen.

Eläinlaji ja kanta	Altistus-ajanjakso	Taajuus (Hz)	Aalto-muoto	Kentän voimakkuus (μT)	Havainnot	Viitteet
1. Hiiri						
Swiss	Kaksi sukupolvea	50	Pulssi-mainen	83, 2 300	Toinen sukupolvi: muutoksia seerumin kemiassa (elävien poikasten määrä ↓, poikasten paino ↓)	Rivas ym, 1987
CD-1	Raskauden ajan	50	Sini	20 000	Poikasten paino ↓ Muutoksia kehityksessä ja käyttäytymisessä	Sienkiewicz ym, 1994
CD-1	Raskauden ajan	50	Sini	5 000	Ei muutoksia oppimis- tai muistikokeissa	Sienkiewicz ym, 1996
2. Rotta						
SD	Rpv 15–20	15	Pulssi-mainen	800 (p-p)	Käyttäytymismuutos [muuta ei mitattu] Lisäukupuolielinten paino ↑ [eläinmäärä pieni]	McGivern ym, 1990
SD	Raskauden aikana	20, 50, 100	Pulssi-mainen	Ei tiedossa	Poikasten paino ↑↓ Silmän aukeaminen viivästynyt Poikuekoko ↓ [eläinmäärä pieni]	Zusman ym, 1990
SD	Ennen ja jälkeen syntymän	60	Ei tiedossa	100, 30 kV/m	Muutos käyttäytymistestissä	Salzinger ym, 1990
SD	1 kk ennen raskautta aina imetyksen loppuun	60	Sini	50	Ei vaikutusta aivojen koliiniasetyyylitransferaasiin	Sakamoto ym, 1993
SD	Rpv 5–19	60		1 000 + 1 kV/m 100 + 100 kV/m 1000 + 100 kV/m	Aivojen kuoriosan paino ↓ Aivojen kuoriosan paino ↑ RNA, Prot ↓ RNA ↓	Yu ym, 1993

Taulukko 5.5 Raskauden aikaisen altistumisen vaikutukset syntymän jälkeiseen kehitykseen koe-eläimillä

Yhteisvaikutustutkimuksissa suhteellisen voimakas 50 Hz magneettikenttä (10 mT) muutti ionisoivan säteilyn (röntgensäteily) alkioimyrkyllistä vaikutusta kananalkioilla. Altistuminen magneettikentälle ennen altistumista ionisoivalle säteilylle suoja alkioita epämuodostumilta ja vähensi kuolemia. Altistuminen magneettikentälle ionisoivalle säteilylle altistumisen jälkeen lisäsi ionisoivan säteilyn alkioimyrkyllisyyttä. Kananalkioilla on tutkittu myös magneettikentän yhteisvaikutuksia tunnettujen tera-

togeenien, eli epämuodostumia aiheuttavien aineiden kanssa. Kananalkioiden toistuva altistus magneettikentälle ennen kemikaalien annostelua vähensi insuliinin ja tetrasykliinin aiheuttamia epämuodostumia. Käytetyllä magneettikentällä ei yksin ollut vaikutusta rotan tai kanojen alkioiden kehitykseen.

Merisiilillä ja kalanalkiolla tehdyissä tutkimuksissa on todettu alkioiden kehittymisen hidastumista, mutta epämuodostumat eivät lisääntyneet. Merisiilin alkioiden kehitys hidastui vain tietyssä kehityksen ajankohtana ja saattaa liittyä alkion histonisynteesin häiriintymiseen.

Vaikutukset hedelmällisyyteen

Koe-eläintutkimuksia hedelmällisyysvaikutuksista on vain muutama. Magneettikenttä ei vaikuttanut eläinten lisääntymiskykyyn usean sukupolven kokeessa, taulukko 5.4. Tästä poiketen voimakas hedelmällisyyden heikkeneminen todettiin varsin matalalla kentän voimakkuudella (25 μT), kun eräässä tutkimuksessa rottia altistettiin kolme kuukautta ennen paritusta. Sekä urosten että naaraiden altistuksen seurauksena raskaana olevien naaraiden määrä väheni paritettaessa altistamattomien eläinten kanssa. Urosten kohdalla altistuksen vaikutus säilyi myös seuraavassa parituksessa. Naaraiden altistuksen seurauksena myös implantaatioiden määrä ja elävien poikasten lukumäärä laski.

Hirten siittiöiden muodostumisen (spermatogeneesin) on todettu häiriintyvän altistuksessa, mutta vain suhteellisen voimakkaan (1,7 mT) lyhytaikaisen (4 h) altistuksen seurauksena. Sukukypsien hirten kivesten koko ja paino lisääntyi, kun niiden emoja oli altistettu magneettikentälle. Kivesmuutokset olivat yhteydessä kohonneisiin kivestejn testosteronipitoisuuksiin. Siittiöiden muodostuminen oli normaalia. Toisessa tutkimuksessa kuuden viikon yhtenäinen altistus ei vaikuttanut rotan plasman testosteronipitoisuuksiin. Hamstereilla sinimuotoinen tai kolmiomainen magneettikenttä lisäsivät kivesten solujen määriä. Kolmiomuotoiselle kentälle altistuneilla havaittiin lisäksi palautuva kehonpainon aleneminen ja seerumin melatoniinipitoisuus lisääntyi.

Varhaisraskauden aikaisia muutoksia kohdun hormonireseptorien pitoisuuksissa ja alkioiden kulkeutumisessa ja kiinnittymisessä kohtuun on kuvattu rotalla. Muutokset olivat niin lieviä, etteivät ne vaikuttaneet hedelmällisyyteen.

Tutkimus	Tutkimusaineisto	Tutkimustulokset	Altistumistietojen keräystapa
Wertheimer ja Leeper, 1986	Denver: 1 256 syntymää, 692 kaksossyntymää	Lisääntynyt keskenmenojen määrä ja hidastunut sikiöiden kasvu on yhteydessä oletettuun sähkölämmitteisten vuoteiden käyttöön	Puhelinhaastattelu
Wertheimer ja Leeper, 1989	Oregon: 1 879 elävänä syntyneen lapsen ja 142 abortin kohortti	Sikiöiden kuolema oli yhteydessä kodin kattolämmitykseen ja lämmityspäivien lisääntymiseen	Tiedostot
Dlugosz ym, 1992	New York States: 535 tapausta ja 535 kontrollia	Raskaudenaikaisen lämmitettävien vesisänkyjen tai sähköhuopien käytöllä ei ollut yhteyttä lasten hermostoputken epämuodostumien tai suolakihalkioiden esiintyvyyteen	Kyselytutkimus
Milunsky ym, 1992	New England: 23 491 naisen kohortti	Sähköhuovan käytöllä ei ollut yhteyttä hermostoputken epämuodostumien esiintyvyyteen	Puhelinhaastattelu
Lindbohm ym, 1992	Suomi: pankissa ja toimistoissa työskentelevien nuorten naisten kohortti	Keskenmenojen esiintyminen oli lisääntynyt naisilla, jotka altistuivat yli 0,24 μ T ELF-kentälle näyttöpäätetyössä (OR 3,4; 95 % CI 1,4 -8,6) tai joiden kumulatiivinen ELF-kentälle altistuminen oli korkea (OR 3,8; 95 % CI 1,6-8,8)	Kyselytutkimus
Juutilainen ym, 1993	Suomi: 89 tapausta ja 102 kontrollia raskautta yrittävää naista	Varhaisten keskenmenojen määrä oli lisääntynyt yli 0,63 μ T magneettikentälle altistuneilla (OR 5,1; 95 % CI 1,0 -26)	Magneettikentän mittausta
Savitz ja Ananth, 1994	257–396 raskaana olevaa naista	Keskenmenolla tai pienellä syntymäpainolla ei ollut yhteyttä ympäristön sähköjohtotukseen, eikä ennenaikaisella synnytyksellä ollut yhteyttä mitattuun magneettikenttään ($\geq 0,2 \mu$ T)	Haastattelu, mittausta, sähköjohto
Bracken ym, 1995	New Haven: 2 967 prenataalihoitossa olevaa naista	Sähkölämmitteisten vuoteiden aiheuttamalla altistumisella ($\geq 0,2 \mu$ T) ei ollut yhteyttä sikiön kasvun kehittymiseen tai matalaan syntymäpainoon	Haastattelu, mittausta
Li ym, 1995	Washington State: 118 tapausta ja 369 kontrollia, subfertiilejä naisia 37 tapausta ja 85 kontrollia	Sähköhuovan tai vesisängyn käytöllä ei ollut yhteyttä synnyneiden virtsateiden epämuodostumiin	Haastattelu
Swan ym, 1995	Retropektiivinen kohortti puolijohdoteollisuuden työntekijöiden joukossa	Keskenmenojen esiintyvyydellä ei ollut yhteyttä arvioituihin altistumistasoihin	Työtehtävien luokittelu
Robert ym, 1996	Ranska: tapaus-verrokki -tutkimus	Äidin asunnon ja voimalinjojen läheisyydellä ei ollut yhteyttä epämuodostumien määrään	
Belanger ym, 1998	2 967 prenataalihoitoa saavaa naista	Sähköhuopien tai sähkölämmitteisten vesisänkyjen käytöllä tai johdotuksella ei ollut yhteyttä keskenmenojen esiintyvyyteen. Sähköhuopien käytöllä yhteys oli viitteellinen (OR 1,74; 95% CI 0,96-3,15)	Haastattelu

→

Tutkimus	Tutkimusaineisto	Tutkimustulokset	Altistumistietojen keräystapa
Li ym, 2001	969 naisen prospektiivinen kohortti	Keskenmenojen esiintyvyydellä oli heikko yhteys $\geq 0,2 \mu\text{T}$ keskimääräiseen altistumiseen, noin 2-kertainen riski, mikäli suurin hetkellinen altistuminen oli $\geq 1,6 \mu\text{T}$ kentälle. Riski liittyi etenkin varhaisiin, ennen raskauden 10. viikkoa tapahtuviin keskenmenoihin	Dosimetrimittaus
Lee, ym. 2002	155 tapausta ja 509 verrokkiä sekä 219 naisen prospektiivinen tutkimus	Keskenmenoilla oli yhteys suurimpiin hetkellisiin altistustasoihin ja magneettikentän muutosnopeuteen (riskit 2-3 kertaisia). Yhteydet keskimääräiseen henkilökohtaiseen altistukseen eivät olleet merkitseviä (suhteellinen riski 1.7-1.9)	Dosimetrimittaus

Taulukko 5.6 Epidemiologisia tutkimuksia hyvin pientaajuisille magneettikentille altistumisen ja lisääntymiserveysvaikutuksien yhteydestä. OR = odds ratio, 95 % CI = 95 % luottamusväli (confidence interval)

Epidemiologisia tutkimuksia

Äidin altistuminen magneettikentille on liitetty raskauden häiriöihin, kuten raskaudenkeskeytymisien ja epämuodostumien lisääntymiseen. Suurimmassa osassa tutkimuksia yhteyttä ei ole todettu, taulukko 5.6. Tutkimuksissa on keskitytty pääosin sähköhuopien ja sähkölämmitteisten vuoteiden käytön ja muiden asumiseen liittyvien magneettikenttälähteiden aiheuttaman riskin selvittämiseen.

Yhteys sähkölämmitteisten vesisänkyjen ja peitteiden käytön sekä keskenmenojen välillä havaittiin ensimmäisen kerran 80-luvulla tehdyssä kiistellyssä tutkimuksessa. Eräässä myöhemmin tehdyssä tutkimuksessa yhteys oli vain viitteellinen. Suurimmassa osassa tutkimuksia tätä yhteyttä ei ole kuitenkaan kyetty osoittamaan. Niissä tutkimuksissa, joissa magneettikenttien voimakkuus on mitattu altistumisen suuruuden arvioimiseksi, on saatu viitteitä siitä, että raskauden keskeytymisen riski saattaisi kohota yli $0,2\text{--}0,3 \mu\text{T}$ keskimääräisillä kentänvoimakkuuksilla. Vaikka tällaisia kentänvoimakkuuksia on yleisesti sähkölaitteiden välittömässä läheisyydessä, keskimääräinen altistuminen kotiololoissa jää yleensä paljon pienemmäksi (luokkaa $0,05\text{--}0,07 \mu\text{T}$), joten myös epidemiologisissa tutkimuksissa tällaisten tapausten määrä jää vähäiseksi. Kahdessa Kaliforniassa tehdyssä tutkimuksessa yhteys keskimääräisiin kentänvoimakkuuksiin ei ollut tilastollisesti merkitsevä, mutta molemmissa tutkimuksissa havaittiin yhteys lyhytaikaisiin huippualtistuksiin. Ensimmäisen tutkimus oli prospektiivinen kohorttitutkimus, ja siinä huippualtistuksen rajana käytettiin $1,6 \mu\text{T}$. Toinen tutkimus sisälsi sekä tapaus-verrokkitut-

kimuksen että prospektiivisen kohorttitutkimuksen, joissa hetkellisen huippualtistuksen rajoina olivat $3,5 \mu\text{T}$ ja $2,7 \mu\text{T}$. Näiden tulosten tulkinta on ongelmallista, sillä ei ole luontevaa selitystä sille, miksi nimenomaan lyhytaikaiset huippualtistukset aiheuttaisivat keskenmenoja tehokkaammin kuin korkea pitkän ajan keskimääräinen altistus.

Myös isän altistumisen vaikutuksia raskauden onnistumiseen ja erityisesti lapsuuden aikaisten syöpien ilmaantuvuuteen, on tutkittu. Isän altistuminen on yhdistetty muun muassa hedelmättömyyteen, epämuodostumien lisääntymiseen ja normaalin raskauden onnistumisen harvenemiseen. Isän altistumisen yhteys niin raskauden onnistumiseen kuin lapsuudenaikaisten syöpien ilmaantuvuuteenkin on epäselvä; riskin lisääntymistä osoittavien tutkimusten lisäksi on vähintään vastaava määrä tutkimuksia, joissa yhteyttä ei ole havaittavissa.

Yhteenveto

Raskauden aikainen altistuminen ei ole yleensä heikentänyt hedelmällisyyttä tai lisännyt vakavia kehityshäiriöitä eläintutkimuksissa. Havaitut kehityshäiriöt ovat olleet lieviä, etupäässä luostumuutoksia. Eläintutkimuksissa käytetyt kentänvoimakkuudet ja kentän aaltomuodot ovat olleet hyvin erilaisia, mikä voi selittää toisistaan poikkeavia tuloksia. Eläinten geneettinen tausta ja ympäristötekijät vaikuttavat myös herkkyyteen saada erilaisia kehityshäiriöitä.

Epidemiologisissa tutkimuksissa ei myöskään ole selkeästi osoitettu magneettikentälle altistumisen ja lisääntymisriskien haittojen välistä yhteyttä. Muutamassa tutkimuksessa on saatu viitteitä suurentuneesta keskenmenojen riskistä altistuttaessa suhteellisen voimakkailla kentillä.

5.9 | Muita vaikutuksia

Vaikutukset sydämen toimintaan

Useissa tutkimuksissa on toistettavasti havaittu sydämen rytmin hidastumista koehenkilöillä, jotka on altistettu yhdistetylle 60 Hz sähkö- ja magneettikentälle (9 kV/m , $20 \mu\text{T}$). Vaikutusta ei havaittu pienemmillä kentänvoimakkuuksilla, mutta ei myöskään silloin, jos kentänvoimakkuuksia suurennettiin (12 kV/m , $30 \mu\text{T}$). Muutokset olivat melko pieniä. Ilmiön

mekanismia ja sen käytännön merkitystä ei ymmärretä. Nämä kokeet tehtiin laboratorio-olosuhteissa. Sen sijaan Tampereen teknillisen korkeakoulun kokeissa mitattiin sydämen toimintaa kuvaavia parametrejä käytännön olosuhteissa voimajohdon alla. Tutkimuksessa ei havaittu mitään merkittäviä sähkö- ja magneettikenttiin liittyviä muutoksia sydämen sykkeessä, lisälyönneissä tai verenpaineessa.

Toisentyypisissä tutkimuksissa on selvitetty 60 Hz magneettikentän vaikutusta sydämen rytmin vaihteluihin. Sydämen lyöntinopeus vaihtelee jatkuvasti elimistön normaalien säätelyjärjestelmien toiminnan seurauksena, ja näitä vaihteluita analysoimalla voidaan saada hyödyllistä tietoa säätelyjärjestelmien toiminnasta. Kolmessa eri kokeessa altistettiin koehenkilöitä magneettikentälle yön ajan. Sydämen rytmin vaihteluiden pientaajuisten komponenttien havaittiin vähenevän kun käytettiin $20 \mu\text{T}$ jaksoitaista (1 h päällä, 1 h poissa) magneettikenttää. Vaikutusta ei havaittu $1 \mu\text{T}$ kentänvoimakkuudella eikä jatkuvalla $20 \mu\text{T}$ kentällä. Tutkijat raportoivat myöhemmin, että magneettikentän vaikutus oli havaittavissa vain sellaisissa kokeissa, joissa koehenkilöiltä otettiin myös verinäytteitä.

Sähköherkkyys

Sähköherkkydeksi kutsutaan epä mukavuutta ja terveyshaittaa, joita aiheutuu osalle ihmisistä sähkö- ja radiolaitteiden läheisyydessä. Eniten oireita näyttää esiintyvän, kun työskennellään näyttöpäätteen ääressä, käytetään matkapuhelinta tai näköpiirissä on tukiasema. Sähköherkkyys on pidetty oireyhtymää, jossa henkilöt kokevat iho-oireita, kuten kuumotusta, punoitusta ja pistelyä sekä erilaisia toiminnallisia hermoston oireita kuten päänsärkyä, huimausta, huonoa oloa, väsymystä, voimattomuutta, hengitysvaikeuksia ja sydämentykytystä. Iho-oireet näyttävät olevan hieman yleisempiä kuin hermostoperäiset oireet. Yhtenäistä kriteeristöä oireyhtymälle ei ole ja oireet liittyvät moniin muihinkin syihin ollen ei-spesifejä sähköherkkyydelle. Sähköön ja radiolaitteisiin liittyvää oireyhtymää on virheellisesti kutsuttu sähköallergiaksi. Oireissa ei ole kysymys lääketieteellisesti määritellystä allergiasta. Yliherkkyyskään ei ole suositeltava käsite, koska sillä tarkoitetaan niitä allergistyyppisiä reaktioita, joiden immunologista mekanisme ei vielä tunneta.

Kuopion yliopistolla valmistui vuonna 2001 Kuustosen tekemä kyselytutkimus matkapuhelimien sähkömagneettisten kenttien terveysriskien hahmottamisesta Suomessa. Kysely postitettiin 3 000 satunnaisesti valitulle henkilölle ympäri Suomen, ja kyselyyn vastasi 1 341 henkilöä. Heistä

sähköherkkiä oli tai koki olevansa 3,5 prosenttia (47 / 1 341). Vuonna 1999 Suomen sähköyliherkkien Tuki ry -nimisessä yhdistyksessä oli noin 130 jäsentä. Toisaalta Tampereen teknillisessä yliopistossa suoritetussa tutkimuksessa, joka koski matkapuhelimien käyttöä, ilmeni, että noin 1,4 % vastanneista koki saavansa oireita matkapuhelimista. Nämä luvut antavat viitteitä sähköherkkyydestä kärsivien ihmisten lukumäärästä Suomessa.

Sähköherkkyyden ryhmittelyperusteita

Kansainvälisen työryhmän raportissa (International workshop on electromagnetic fields and non-specific health symptoms, 1998) sähköherkkyyttä kokevat ihmiset luokiteltiin kolmeen ryhmään: henkilöt, joilla oireet ovat uusia, henkilöt, joilla on vahvistunut vakaumus sähkön ja oireiden välisestä vuorovaikutuksesta, sekä erakoituneet. Tapausselostusten mukaan välttämiskäyttäytymistä syntyy ihmisten tulkitessa jo lievät oireet merkiksi vakavasta sairaudesta. Hyvin pieni osa oireilevista eristäytyy, jättää työnsä ja elää sähköttömissä olosuhteissa.

Sähköherkkyyttä voidaan eritellä myös oireiden vakavuuden mukaan: henkilöt, joiden iho-oireet liittyvät näyttöpäätteisiin sekä henkilöt, joilla esiintyy neurasteenistyyppisiä oireita. Neurasteeniset oireet, kuten unettomuus ja masentuneisuus, ovat vaikeampia ja pysyvämpiä liittyen kielentyyppisiin sähkölaitteisiin. Näiden oireiden paranemisenuste on 60-70 prosenttia kahden–viiden vuoden kuluessa. Lievemmat iho-oireet häviävät suurimmalta osalta oireilevia henkilöiltä yhden, kahden vuoden kuluessa ilman altistumisolosuhteiden muuttumista.

Sähköherkkyyden tarkastelussa voidaan myös käyttää alueellista lähtökoh-
taa: Pohjoismaat (Ruotsi, Norja, Tanska ja Suomi) sekä muu Eurooppa. Pohjoismaissa sähköherkkyyden ilmaantuvuus on huomattavasti muuta Eurooppaa suurempaa. Pohjoismaissa sähköherkkien määrä vaihtelee maittain 100 ja 10 000 henkilön välillä. Etelä-Euroopassa, kuten Kreikassa, Portugalissa ja Espanjassa, sähköherkkyys on harvinaisempi ilmiö.

Sähköherkkyyden syntymekanismit

Sähköherkkyyden aiheuttajiksi on epäilty useita eri tekijöitä. Tutkijat eivät ole todenneet rakenteellisia eroja sähköherkkyysoireisten ja oireettomien ihon välillä. Kliinisiin tutkimuksiin lähetetyistä potilaista suu-

rimmalla osalla iho-ongelmat ovat osoittautuneet muista syistä, muun muassa ihosairauksista johtuviksi. Vapaaehtoisilla koehenkilöillä on tehty tutkimuksia, joissa on yritetty provosoida oireita altistamalla henkilöitä näiden tietämättä erilaisille altisteille, kuten matkapuhelimista peräisin oleville sähkömagneettisille kentille. Näiden kaksoissokkokokeiden tulokset ovat olleet pääsääntöisesti negatiivisia; sähkö- ja magneettikentistä tai niiden ominaisuuksista ei ole löytynyt selvää aiheuttajaa oireille. Näyttäisi siltä, että ihmisten uskomukset vaikuttavat enemmän kuin todellinen altistuminen sähkömagneettisille kentille.

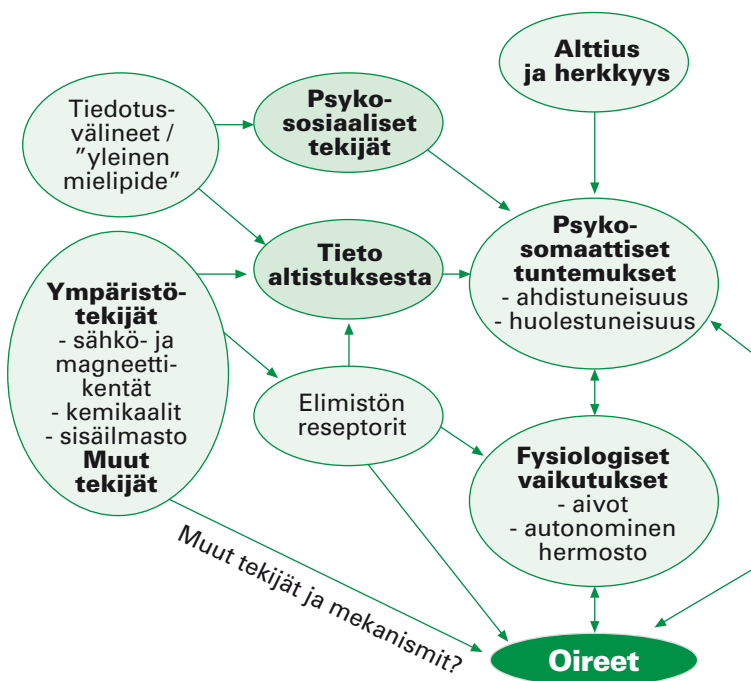
Kenttiin liittyvää vaikutusta vastaan puhuvat monet seikat: solutason tutkimuksissa vaikutuksia on osoitettu vain suhteellisin suurilla kentän voimakkuuksilla, oireyhtymää ei esiinny ryhmätason ilmiönä kaikissa maisissa, eivätkä sähköherkät ole havainneet kenttiä altistuskokeissa. Teoriasa on kuitenkin mahdollista, että löytyy jokin taajuus, aaltomuoto tai kentän voimakkuus, jolla on vaikutusta myös oireisiin.

Sähköherkkyyteen näyttää vaikuttavan fysikaalisten tekijöiden lisäksi joukko stressivälitteisiä mekanismeja. Iho-oireisten toimistotyöntekijöiden stressihormonipitoisuuksien on havaittu kohonneen ja testosteronipitoisuuksien alentuneen vertailuryhmiä enemmän. Vastaavaa ilmiötä ei ole havaittu vapaa-aikana. Psykososiaalisista stressitekijöistä muun muassa työkuorman kasvu, uudet työjärjestelyt, uusien työmenetelmien tai laitteiden nopea käyttöönotto ja perheongelmat voivat laukaista iho-oireet. Stressillä, monotonisella työllä ja työorganisaatorisilla kysymyksillä on rooli sähköherkkyyden synnyssä. Ongelma näyttää esiintyvän kaiken kaikkiaan enemmän naisilla. Oirehtivista kaksi kolmasosaa on naisia.

Sähköherkkyyteen vaikuttaa fysikaalisten tekijöiden lisäksi myös psykosomaattisia mekanismeja. Koska psyykkiset ja psykososiaaliset tekijät muokkaavat aina oireita, eräänä sähköherkkyyden ratkaisuna on esitetty somatisointia. Somatisoinnissa psyykkisten tekijöiden vaikutus näkyy fyysisenä oireiluna. Syy haetaan tiedostamatta ympäristötekijöistä, kuten kemikaaleista, fysikaalisista ja ergonomisista tekijöistä, joita muut ovat epäilleet oireiden aiheuttajiksi, mutta joiden syy-yhteyksistä ei ole tieteellistä näyttöä. Vastaavasti psykologiset ja psykogeeniset tekijät työnnetään taka-alalle. Tätä ilmiötä on kutsuttu ympäristön somatisoitumisoireyhtymäksi. Sähköherkkyydestä kärsivillä näyttäisi olevan vahva taipumus somatisoida. Oireilevat henkilöt alkavat mieltää yleiset oireet oireyhtymiksi ilman, että syy-yhteyksistä on tieteellistä näyttöä. Työolojen ja työtekniikan kehittymisvaiheet luovat edellytyksiä oirei-

den syntymiselle ja suuntaavat huomion tiettyihin tekijöihin niiden pahentajina.

Sähköherkkyys on oletettavasti monen samanaikaisesti vaikuttavan tekijän aiheuttama oireyhtymä, jonka syntyyn vaikuttavat yksilön ominaisuudet ja fysiologinen alttius, työn organisointiin liittyvät syyt sekä ympäristön fysikaaliset ja kemialliset tekijät. Yhteiskunnallisilla ja joukkoviestiin liittyvillä tekijöillä on merkitystä ilmiön saaman huomion ja sen laajuuden kannalta. Ympäristöoireyhtymistä (environmental syndromes) on muitakin esimerkkejä kuin sähköherkkyys. Näihin oireyhtymiin on luettu mm. monikemikaaliherkkyys ja krooninen väsymysoireyhtymä. Ympäristöoireyhtymien tutkimista vaikeuttavat vähäiset tiedot oireita aiheuttavista ja pahentavista tekijöistä, valikoituneet aineistot ja vaihtelevat diagnostiset kriteerit. Kuvassa 5.7 on esitetty ympäristöoireyhtymien mahdollisia syntymekanismeja.



Kuva 5.7 Ympäristöoireyhtymien mahdollisia syntymekanismeja (Uitti ym., 2000).

Kuvaa tarkastelemalla voidaan havaita, että tiedotus ja ympäristötekijät vaikuttavat psykosomaattisten tuntemusten ja ehkä myös mahdollisesti elimistön kautta. Nämä tuntemukset sitten edelleen somatisoidaan fysiologiseksi vaikutukseksi, tai ne syntyvät aidon vuorovaikutuksen tuloksena.

Ongelman ratkaisumahdollisuudet

Sähköherkkyyttä kokevien ihmisten oireet ovat todellisia, vaikka niiden perimmäiset syyt usein voivat jäädä epäselviksi. Suurimmalla osalla oireet ilmenevät näyttöpäätteisiin, loisteputkiin ja matkapuhelimiin liittyvinä iho-oireina, jotka paranevat ajan myötä joko itsestään tai asianmukaisen tiedotuksen ja suhtautumisen avulla. Vain harvalle sähköoireisista kehittyy pitkäkestoisia neurasteenisia oireita, jotka esiintyessään yleensä liittyvät mihin tahansa sähkölaitteeseen.

Ongelman ratkaisussa vaativinta on hallita useiden erityyppisten tekijöiden vaikutuksia sähköherkkyyteen. Ongelman ratkaisemisessa keskeisiä tekijöitä ovat: empaattinen ja asiallinen suhtautuminen, oikea-aikaiset toimenpiteet, joilla voidaan olettaa ehkäistävän vaikeampien oireyhtymien kehittymistä kuten julkisesti käytävä keskustelu ja tiedon jakaminen ja oireistoon vaikuttavien samanaikaisten tekijöiden selvittäminen. Sähköherkkyydestä kärsivien henkilöiden terveydentilan ja työympäristön kartoitus on toimenpidearvioiden lähtökohta. Työterveyshenkilöstön tulisi selvittää yksilön alttiudet ja sairaudet sekä ympäristötekijät (yksilön ominaisuudet, sairaudet, stressitekijät, ergonomia, sisäilmasto). Ruotsissa hoitotoimenpiteissä on käytetty lääkärin, työ- ja ympäristöhygieenikon ja psykoterapeutin muodostamia ryhmiä. Lääkärin tutkimuksen jälkeen ryhmä on keskustellut potilaan kanssa yksilön alttiustekijöistä ja myötävaikuttavista sairauksista, informoinut häntä mahdollisista oirekuvaa selittävistä tekijöistä ja keskustellut hänen kanssaan nykyisestä tietämyksestä, joka liittyy sähkömagneettisten kenttien biologisiin vaikutuksiin. Oireiden jatkuessa on suositeltu kognitiivista terapiaa. Kognitiivisessa terapiassa potilasta autetaan löytämään vaihtoehtoisia, parempia tapoja oireiden hallitsemiseksi. Teknisesti on vaikea löytää ympäristöön kohdistuvia korjaavia toimenpiteitä, koska kunkin tekijän osuutta oireiden syntyyn ei tunneta riittävästi.

KIRJALLISUUTTA

Genotoksisuus eläin - ja solukokeissa

IARC. Non-ionizing Radiation, Part 1. Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 80, Lyon, IARC-Press, 2002.

ICNIRP. Exposure to Static and Low Frequency Electromagnetic Fields, Biological Effects and Health Consequences (0–100 kHz). ICNIRP 13/2003. Munich, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2003.

Juutilainen J, Stevens RG, Anderson LE, Hansen NH, Kilpeläinen M, Kumlin T, Laitinen JT, Sobel E, Wilson BW. Nocturnal 6-hydroxymelatonin sulfate excretion in female workers exposed to magnetic fields. *J Pineal Res* 28:97–104, 2000.

Juutilainen J, Kumlin T, Naarala J. Do extremely low frequency magnetic fields enhance the effects of environmental carcinogens? A meta-analysis of experimental studies. *Int J Radiat Biol*, 2006. (in press)

Kumlin T, Alhonen L, Jänne J, Kosma V-M, Lang S, Juutilainen J. Epidermal levels of ornithine decarboxylase and polyamines in mice exposed to 50 Hz magnetic fields and UV radiation. *Bioelectromagnetics* 19:388–391, 1998.

Kumlin T, Heikkinen P, Kosma V-M, Alhonen L, Jänne J, Juutilainen J. p53-independent apoptosis in UV irradiated mouse skin: Possible inhibition by 50-Hz magnetic fields. *Radiat Environ Biophys* 41:155–158, 2002.

Kumlin T. Studies on cancer-related effects of 50 Hz magnetic fields. *Kuopion yliopiston julkaisuja C. Luonnontieteet ja ympäristötieteet* 176. 2004

Markkanen A, Juutilainen J, Lang S, Pelkonen J, Rytömaa T, Naarala J. Effects of 50 Hz magnetic field on cell cycle kinetics and colony forming ability of budding yeast exposed to ultraviolet radiation. *Bioelectromagnetics* 22:345–350, 2001.

Nordenson I, Hansson Mild K, Järventaus H, Hirvonen A, Sandström M, Wilén J, Blix N, Norppa H: Chromosomal aberrations in peripheral

lymphocytes of train engine drivers. *Bioelectromagnetics* 22:306–315, 2001.

Valjus J, Norppa H, Järventaus H, Sorsa M, Nykyri E, Salomaa S, Järvinen P, Kajander J. Analysis of chromosomal aberrations, sister chromatid exchanges and micronuclei among power linesmen with long-term exposure to 50-Hz electric and magnetic fields. *Radiat Environ Biophys* 32:325–336, 1993.

Karsinogeenisuuskokeet eläimillä

Beniashvili DS, Bilanishvili VG, Menabde MZ: Low-frequency electromagnetic radiation enhances the induction of rat mammary tumors by nitrosomethyl urea. *Cancer Letters* 1991; 61; 75–79.

IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Non-ionizing radiation, Part 1: static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum* 2002;80:1–395.

Heikkinen P, Kosma V-M, Huuskonen H, Komulainen H, Kumlin T, Penttilä I, Väänänen A, Juutilainen J. Effects of 50 Hz magnetic fields on cancer induced by ionising radiation in mice. *Int J Radiat Biol*, 77: 483–495, 2001.

Juutilainen J, Lang S, Rytömaa T. Possible cocarcinogenic effects of ELF electromagnetic fields may require repeated long-term interaction with known carcinogenic factors. *Bioelectromagnetics* 21:122–128, 2000.

Kumlin T, Kosma VM, Alhonen L, Janne J, Komulainen H, Lang S, Rytömaa T, Servomaa K, Juutilainen J. Effects of 50 Hz magnetic fields on UV-induced skin tumourigenesis in ODC-transgenic and non-transgenic mice. *Int J Radiat Biol* 73(1):113–21, 1998.

Kumlin T. Studies on cancer-related effects of 50 Hz magnetic fields. *Kuopion yliopiston julkaisuja C. Luonnontieteet ja ympäristötieteet* 176. 2004.

Löscher W, Mevissen M, Lechmacher W, Stamm A. Tumor promotion in a breast cancer model by exposure to a weak alternating magnetic field. *Cancer Lett*; 71:75–81, 1993.

McCann J, Kavet RI, Rafferty CN. Assessing the potential carcinogenic activity of magnetic fields using animal models. *Environmental Health Perspectives*. 108 (suppl. 1), 2000;79–100.

McLean JR, Thansandote A, Lecuyer D, Goddard M. The effect of 60-Hz magnetic fields on co-promotion of chemically induced skin tumors on SENCAR mice: A discussion of three studies. *Environ Health Perspect*, 1997; 105:94–96.

Rannug A, Holmberg B, Ekström T, Hansson Mild K, Gimenez-Conti I, Slaga T. Intermittent 50 Hz magnetic field and skin tumour promotion in SENCAR mice. *Carcinogenesis*, 1994; 15:153–157.

Sasser LB, Anderson LE, Morris JE, Miller DL, Walborg EF Jr, Kavet R, Johnston DA, DiGiovanni J. Lack of a co-promoting effect of a 60 Hz magnetic field on skin tumorigenesis in SENCAR mice. *Carcinogenesis*, 1998; 19:1617–1621.

Syöpä ja epidemiologia tutkimuksia

Ahlbom A: Neurodegenerative diseases, suicide and depressive symptoms in relation to EMF. *Bioelectromagnetics* 2001; 5:132–143.

Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, Linet M, MacBride M, Michaelis J, Olsen J, Tynes T, Verkasalo PK. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukemia. *Br J Cancer* 2000; 83: 692–698.

Greenland S, Sheppard AR, Kaune WT, Poole C, Kelsh MA for the Childhood Leukemia-EMF Study Group. A pooled analysis of magnetic fields, wire codes and childhood leukemia. *Epidemiology* 2000; 11: 624–634.

International Agency for Research on Cancer:n nettisivut, <http://www.iarc.fr/>

Suomen Syöpärekisterin tilastot, <http://www.cancerregistry.fi/>

Verkasalo PK, Pukkala E, Hongisto M, Valjus J, Järvinen P, Heikkilä K, Koskenvuo M. Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. *Br Med J* 1993; 307: 895–899.

Verkasalo PK, Pukkala E, Kaprio J, Heikkilä KV, Koskenvuo M. Magnetic fields of high voltage power lines and risk of cancer in Finnish adults: nationwide cohort study. *Br Med J* 1996; 313: 1047–1051.

Wertheimer N, Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol* 1979; 109: 273–289.

Syöpä

IARC (2002) IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 80, Non-ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields, Lyon, IARC Press.

ICNIRP. Exposure to Static and Low Frequency Electromagnetic Fields, Biological Effects and Health Consequences (0–100 kHz). ICNIRP 13/2003. Munich, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2003.

NIEHS (1998) NIEHS Working Group Report: Assessment of Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields. National Institutes of Health Publication No. 98-3981, 326–355.

Hermosto

Ahlbom A. Neurodegenerative diseases, suicide and depressive symptoms in relation to EMF. *Bioelectromagnetics* 2001; 5: 132–143.

IARC. Non-ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 80, Lyon, IARC Press, 2002.

ICNIRP. Exposure to Static and Low Frequency Electromagnetic Fields, Biological Effects and Health Consequences (0–100 kHz). ICNIRP 13/2003. Munich, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2003.

Lyskov EB, Juutilainen J, Jousmäki V, Partanen J, Medvedev S, Hänninen O. Effects of 45-Hz magnetic fields on the functional state of the human brain. *Bioelectromagnetics* 14:87–95, 1993.

NIEHS. Assessment of health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields. Working Group Report. NIH Publication No. 98–3 981. Research Triangle Park, National Institute of Environmental Health Sciences, U.S. National Institutes of Health, 1998.

Lisääntymisterveys

Brent RL, Gordon WE, Bennett WR, Beckman DA. Reproductive and teratologic effects of electromagnetic fields. *Reprod Toxicol* 1993; 7:535–580.

Huuskonen H, Lindbohm M–L, Juutilainen J. Teratogenic and reproductive effects of low-frequency magnetic fields. *Mutat Res* 1998; 410:167–183.

ICNIRP (International Commission for Non–Ionizing Radiation Protection) Standing Committee on Epidemiology. Ahlbohm A, Cardis E, Green A, Linet M, Savitz D, Swerdlow A. Review of the Epidemiology on EMF and Health. *Environmental Health Perspectives* 2001; 109 (Suppl.6): 911–933.

Juutilainen J. Developmental effects of electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*, Supplement 7:107–115, 2005.

National Research Council: Possible Health Effects to Residential Electric and Magnetic Fields. National Academy Press, Washington DC, USA, 1997.

NIEHS (National Institute of Environmental Health Sciences). Health Effects from Exposure to Power-line Frequency Electric and Magnetic Fields (NIH Publication No. 99–4 493), Cincinnati, OH, USA, 1999.

Robert E. Intrauterine effects of electromagnetic fields (low frequency, mid frequency RF and microwave): review of epidemiologic studies. *Teratology* 1999; 59:292–298.

Muita vaikutuksia

Berg M, Arnetz B, Liden S, Eneroth P, Kallner A. Techno-stress, a Psychophysiological Study of Employees with VDU-associated Skin Complaints. *J Occup. Med* 1992; 34:698–701.

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

Hillert L, Kolmodin-Hedman B. Hypersensitivity to Electricity: Sense or Sensibility? *J Psychosomatic Res* 1997; 42:427–32.

Hillert L. Hypersensitivity to Electricity; Symptoms, Risk Factors and Therapeutic Interventions. Karolinska institutet, Stockholm, Sweden, 2001.

International Workshop on Electromagnetic Fields and Non-Specific Health Symptoms, Graz, Austria, September 19–20, 1998.

Korpinen L, Partanen J, Uusitalo A. Influence of 50 Hz electric and magnetic fields on the human heart. *Bioelectromagnetics* 14:329–340, 1993.

Kuustonen J: Matkapuhelimien radiotaajuisten sähkömagneettisten kenttien terveysriskien hahmottaminen Suomessa. Kuopion Yliopisto, heinäkuu 2001.

Pääkkönen R, Uitti J. Kirjallisuusselvitys sähköliherkkydestä. Tampereen aluetyöterveyslaitos, 1999.

Uitti J, Pääkkönen R. Sähköallergia ei ole allergiaa, mitä se on? *Duodecim* 2000; 116:941–7.

