

# 7

## SÄTEILYEPIDEMIOLOGIA

Anssi Auvinen

### SISÄLLYSLUETTELO

7.1	Säteily ja syöpä .....	94
7.2	Säteily ja muut sairaudet kuin syöpä .....	114
7.3	Yhteenveto .....	114

Säteilyepidemiologia tutkii säteilyn terveysvaikutuksia ihmisissä. Kokeellisesta tutkimuksesta poiketen säteilyepidemiologia antaa suoraa tietoa säteilyn stokastisista vaikutuksista eli pitkäaikaisvaikutuksista ihmisiin ilman ekstrapolointia annoksista, lajista tai ilmiöstä toiseen. Toisaalta sen rajoituksina ovat usein vaikeudet altistuksen ja sairauksien esiintymisen arvioinnissa sekä säteilyn vaikutuksen erottaminen muista tekijöistä. Riskiarvioita ei sovelleta erillään muiden tekijöiden vaikutuksesta, vaan säteilylle altistuneissa väestöissä on myös muita syöpävaaraan vaikuttavia tekijöitä. Tutkimusta hankaloittavat tekijät siis toisaalta takaavat sen sovellettavuuden. Tässä luvussa esitetään lyhyt katsaus säteilyepidemiologian keskeisistä tuloksista. Laajempia yhteenvetoja säteilyepidemiologiasta ovat julkaisseet muun muassa YK:n säteilyn vaikutusten asiantuntijakomitea (UNSCEAR), WHO:n syövätutkimuskeskus (IARC) ja Yhdysvaltain tiedeakatemia (BEIR). Säteilyn perinnöllisiä vaikutuksia käsitellään luvussa 8.

## 7.1 | Säteily ja syöpä

Säteilyn terveysvaikutuksista tärkein ja pisimpään tunnettu on suurten säteilyannosten syöpävaaraa suurentava vaikutus. Jo 1500-luvulla raportoitii Schneebergin kaivostyöntekijöillä poikkeuksellisen suuri kuolleisuus keuhkosairauksiin. Tämä löydös on myöhemmin tulkittu kaivosten radonin aiheuttamaksi keuhkosyöväksi (katso myös kirja 2, luku 4). Ensimmäiset röntgensäteiden käyttöön liittyvät ihosyövät ja leukemiat raportoitiin jo 1900-luvun alkuvuosina. Laajemmin tutkimustietoa säteilyn aiheuttamasta syöpävaarasta on kertynyt 1900-luvun puolivälistä alkaen. 1950-luvulla saatiin ensimmäiset tulokset suurentuneesta syöpävaarasta muun muassa Hiroshiman ja Nagasakin eloonjääneillä, röntgenlääkäreillä, selkärankareumaan sädehoitoa saaneilla potilailta ja sikiöaikana röntgensäteille altistuneilla lapsilla. Koska säteilyn kyky aiheuttaa syöpää on tunnettu jo pitkään, säteilyepidemiologian keskeisenä tehtävänä on jo pitkään ollut tarkempien riskiarvioiden tuottaminen ja syöpävaaraa muovaavien tekijöiden selvittäminen.

### Säteilyn sotilaallinen käyttö

#### **Hiroshiman ja Nagasakin atomipommituksissa eloonjääneet**

Tärkein säteilyn terveysvaikutuksia koskeva tietolähde on Hiroshiman ja Nagasakin atomipommien eloonjääneiden seurantatutkimus. Tutkimus

aloitettiin vuonna 1950, viisi vuotta pommitusten jälkeen, ja siinä on seurattu noin 120 000 henkilön kohorttia jo 50 vuoden ajan. Tutkimuskohorttiin kuuluvat vain pommitetuissa kaupungeissa vielä vuonna 1950 asuneet, joista oli seurantaan tarvittavat tiedot. Kaupungeissa pommitushetkellä olleiden ihmisten tarkkaa määrää ei tiedetä. Altistuneet olivat 2,5 kilometrin säteellä räjähdyspaikasta, ja vertailuryhmä koostuu 2,5–10 kilometrin etäisyydellä olleista ihmisistä. Pommien rakenteessa olleiden erojen vuoksi Nagasakissa säteily oli lähes yksinomaan gammasäteilyä, kun taas Hiroshimassa oli myös jonkin verran (alle prosentti) neutronisäteilyä. Neutronisäteilyn osuudesta on esitetty erilaisia arvioita ja nykyisissä annosarvioissa (niin sanottu DS86-arvio) neutronien osuus on pienempi kuin aiemmissa (TD65). Arviointi jatkuu edelleen. Tutkimushenkilöille on laskettu elinkohtaiset annokset. Näissä annoksissa otetaan huomioon tiedot haastateltavien olinpaikan etäisyydestä räjähdyspaikkaan ja suojaavista rakenteista. Altistuneiden joukossa säteilyannos oli keskimäärin noin 200 millisievertiä. Vertailuryhmä koostuu niistä, joiden annos oli alle viisi millisievertiä. Epidemiologiselta kannalta on ollut hyvin keskeistä, että annosjakauma on laaja, sillä se mahdollistaa eri annostasojen vertailun ja annos-vasteen selvittämisen. Pitkä seuranta mahdollistaa riskin ajallisen jakautuman tarkastelun, joskin leukemian osalta tätä vaikeuttaa viiden ensimmäisen vuoden tietojen puuttuminen. Altistuneessa väestössä on erikäisiä miehiä ja naisia, mikä mahdollistaa vertailut eri väestön osien välillä. Japanin kotipaikkarekisteri (niin sanottu koseki-järjestelmä) on mahdollistanut korkeatasoisen seurannan kuolemantapausten osalta. Lisäksi Hiroshimaan ja Nagasakiin on perustettu syöpärekisterit, jotta saataisiin tiedot kaikista uusista syöpätapauksista. Syöpärekisteriaineisto perustuu kuolintodistuksia laajempaan informaatioon, ja sitä pidetään sen vuoksi luotettavampana. Syöpärekisteröinti on kuitenkin toiminut vasta vuodesta 1958, eikä se kata kaupungeista pois muuttaneita.

	Säteilyannos, Sv <sup>1</sup>							Yhteensä
	<0,005	-0,1	-0,2	-0,5	-1,0	-2,0	>2,0	
<b>Henkilöitä</b>	33652	30524	4775	5862	3048	1570	470	79901
<b>Syöpiä</b>	4531	4119	739	982	582	376	126	11455
<b>Arvioitu ylimäärä</b>	1	77	60	164	177	165	80	724

<sup>1</sup> paksusuoliannos, DS 86

**TAULUKKO 7.1** Kiinteiden kasvainten määrä eri annosryhmissä Hiroshiman ja Nagasakin pommitusten eloonjääneillä. Säteilyn aiheuttamien kasvainten määrä on arvioitu vertaamalla havaittuja tapauksia Japanin muuhun väestöön (Pierce ja Preston 2000).

Viimeisimmät syöpäilmaantuvuutta koskevat tulokset kattavat vuodet 1958–1994 ja yli 11 400 syöpätapausta (taulukko 7.1). Kuolleisuutta koskevia tietoja on tähän mennessä julkaistu vuosilta 1950–1990. Syöpäkuolemia on yli 7 500, ja puolet kohortin jäsenistä on yhä elossa. Nuumeristen tulosten tulkinnassa tulee ottaa huomioon se että ne perustuvat aineistoon, jossa on muun muassa tietty annos-, ikä- ja sukupuoli-jakauma. Kun tarkastellaan kaikkia kiinteitä kasvaimia yhdessä, suhteelliseksi lisäriskiksi on arvioitu ilmaantuvuuden perusteella 0,63 (90 % luottamusväli 0,52–0,74) yhtä sievertiä kohti. Kuolleisuuteen perustuvissa analyyseissä vastaava arvio on 0,45 (0,3–0,6). Naisten suhteellinen riski annosyksikköä kohti on kaksinkertainen miesten suhteelliseen riskiin verrattuna. Erot miesten ja naisten absoluuttisessa riskissä ovat pienempiä.

Ryhmässä, jonka altistus oli yli 5 mSv, säteilyn on laskettu aiheuttaneen kymmenen prosenttia kaikista kiinteistä kasvaimista (723/6 924). Lisäriski on pysynyt suurentuneena 50 vuotta altistuksesta. Hiroshiman ja Nagasakin aineiston perusteella säteilyn aiheuttaman syöpäkuoleman elinikäisriskiksi on laskettu kiinteiden kasvaimien osalta 3–25 prosenttia sievertiä kohti sukupuolesta, altistusiästä ja riskimallista riippuen. Altistumattomien joukossa elinikäisriski on 15–28 prosenttia.

Kiinteiden kasvaimien osalta suhteellisen riskin annosvaste on lineaarinen sekä kuolleisuus- että ilmaantuvuusanalyysissä. Kuvista tarkasteltuna riski ei näytä suurenevan enää 3–4 sievertiä ylittävillä annoksilla, mutta poikkeama lineaarisuudesta ei ole tilastollisesti merkitsevä. Vaikka riskikertoimen suuruus määräytyy pääosin 0,5–2,0 sievertin annosten perusteella, lineaarinen annosvaste jatkuu pienempiin annoksiin ainakin 0,05 sievertin (50 mSv) tasolle. Mahdollisen kynnyksarvon, jonka alapuolella vaikutuksia ei havaita, olemassaolo voidaan sulkea pois ainakin 0,06 sievertin (60 mSv) annostason yläpuolella. Lisäksi kynnyksarvoa vastaan puhuu se, että viimeisimmässä seurannassa syöpäilmaantuvuus on tilastollisesti merkitsevästi suurentunut myös annosalueella 0–0,1 sievertiä. Annosvastetta on analysoitu myös ottaen huomioon puutteellisten annosarvioiden eli mittausvirheen vääristävä vaikutus ja päädytty hieman korkeampiin riskiarvioihin.

Eri syöpämuodoista suurin suhteellinen riski annosyksikköä kohti on sekä ilmaantuvuus- että kuolleisuusanalyysissä liittynyt leukemiaan, sylkirauhas-, rinta- ja virtsarakkosyöpään. Erittäin hyvän ennusteen omaavien kilpirauhassyövän ja ihosyövän osalta suurentunut riski on havaittu ilmaantuvuus-analyyseissä, mutta ei kuolleisuuden osalta. Säteilyllä ei ole tässä aineistossa havaittu selvää yhteyttä suunontelon syöpiin, peräsuoli-, sappirakko-, haima-, kohtu-, eturauhas- eikä hermostosyöpiin. Veri- ja imuku-

dossyöivistä myös myelooman ja non-Hodgkinin lymfooman yhteys säteilyyn on epävarma.

Syövän suhteellinen riski annosyksikköä kohti on suurin lapsuudessa altistuneilla. Riskin ikäriippuvuus on voimakasta rintasyövässä. Selvästi suurentunut kilpirauhassyövän riski on havaittu vain alle 20 vuoden iässä altistuneilla. Lapsuudessa altistuneilla suhteellinen riski on pienentynyt seurannassa, mutta absoluuttinen riski on suurentunut. Aikuisiällä altistuneilla suhteellinen riski on pysynyt seurannan aikana muuttumattomana, mutta absoluuttinen riski on suurentunut. Vaihtoehtoinen tapa kuvata ikäriippuvuutta on tarkastella ikää seurantahetkellä. Tämä malli selittää havainnot yhtä hyvin, mutta johtaa hieman erilaiseen tulkintaan. Sen mukaan syöpävaara altistuneilla on tiettyssä iässä (annoksesta riippuva) vakio altistusiästä riippumatta, kun ensin mainitun mallin mukaan syöpävaara riippuu altistusiästä, mutta ei iästä seuranta-ajankohtana.

Syöpätyyppi	Suhteellinen lisäriski (1 Sv)	95 % luottamusväli	Tapausmäärä
Ruokatorvisyöpä	0,28	-0,21 – 1,0	84
Mahasyöpä	0,32	0,16 – 0,50	1 305
Paksusuolisyöpä	0,72	0,29 – 1,3	223
Peräsuolisyöpä	0,21	-0,17 – 0,75	179
Haimasyöpä	0,18	-0,25 – 0,82	122
Keuhkosyöpä	0,95	0,60 – 1,4	449
Ihosyöpä <sup>1</sup>	1,0	0,41 – 1,9	91
Rintasyöpä <sup>2</sup>	1,6	1,1 – 2,2	289
Kohtusyöpä	-0,15	-0,29 – 0,10	349
Munasarjasyöpä	0,99	0,12 – 2,3	66
Eturauhassyöpä	0,29	-0,21 – 1,2	61
Virtsarakkasyöpä	1,0	0,27 – 2,1	115
Munuaissyöpä	0,71	-0,11 – 2,2	34
Hermostosyövä	0,26	-0,23 – 1,3	69
Kilpirauhassyöpä	1,2	0,48 – 2,1	129
Kaikki kiinteät kasvaimet	0,63	0,52 – 0,74	4 327
Leukemia	4,4	3,2 – 5,6	141

<sup>1</sup>Poislukien melanooma. <sup>2</sup>Vain naiset

**TAULUKKO 7.2** Ilmaantuvuusanalyysiin perustuva suhteellinen lisäriski yhtä sievertiä kohti eri syöpätyypeille Hiroshiman ja Nagasakin atomipommien eloonjääneillä. Analyysi perustuu vuosina 1958–1987 ilmenneisiin tapauksiin.

Altistusikä	Sukupuoli	Suhteellinen lisäriski ERR/Sv (90 % luottamusväli)
10	Mies	0,81 (0,48 – 1,23)
	Nainen	1,76 (1,17 – 2,30)
30	Mies	0,38 (0,23 – 0,53)
	Nainen	0,77 (0,60 – 0,97)
50	Mies	0,17 (0,09 – 0,28)
	Nainen	0,36 (0,22 – 0,53)

**TAULUKKO 7.3 Kiinteiden kasvainten suhteellinen lisäriski sukupuolen ja altistusian mukaan, kuolleisuusaineisto 1950–1990 (Pierce ym. 1996).**

Leukemian riskikerroin on muita syöpämuotoja suurempi. Ilmaantuvuusaineistossa suhteellinen lisäriski yhden sievertin kohdalla on 4,4 (95 % lv 3,2–5,6). Lineaaris-kvadraattinen annosvastemalli kuvaa annos-vastetta paremmin kuin lineaarinen. Kvadraattisen termin kerroin suhteessa lineaarisen termin kertoimeen on suuruusluokkaa 0,4–0,8 (katso luku 6). Tämä vastaa korjauskerrointa kaksi suurista annoksista pieniin ekstrapoloitaessa. Näin ollen esimerkiksi yhden sievertin annokseen liittyvä riski on yli 20-kertainen 0,1 sievertin annokseen verrattuna. Lineaarinen ja kvadraattinen termi ovat yhtä suuria noin yhden sievertin annoksilla, lineaarisen termin dominoidessa pienemmillä ja kvadraattisen suuremmilla annoksilla. Kaikista leukemiakuolemista atomipommituksista eloonjääneillä 44 prosenttia on laskettu johtuvan säteilystä. Yhden sievertin annoksen on laskettu aiheuttavan 1–2 prosentin suuruisen leukemian elinikäisriskin ja hieman pienemmän leukemiakuoleman riskin. Leukemia oli myös ensimmäinen syöpämuoto, jonka esiintyvyyden havaittiin suurentuneen eloonjääneillä. Riski oli suurimmillaan 5–10 vuotta altistuksesta (aiemmalta ajanjaksolta tiedot puuttuvat), jonka jälkeen riski pieneni tasaisesti. Selvää lisäriskiä ei havaittu enää 25 vuoden jälkeen, varsinkaan nuorella iällä altistuneilla. Suhteellinen lisäriski ei oleellisesti poikennut sukupuolten välillä. Säteilyn aiheuttama suhteellinen riski oli suurin alle kymmenen vuoden iässä altistuneilla. Eri leukemiamuodoista suurin riski liittyi akuuttiin lymfoblastiseen leukemiaan (suhteellinen lisäriski eli ERR = 9,1/Gy) ja krooniseen myelooiseen leukemiaan (ERR=6,2/Gy). Myös akuutin myeloblastisen leukemian vaara suureni annoksen myötä. Sen sijaan kroonisella lymfaattisella leukemiaalla ja T-soluleukemiaalla ei havaittu yhteyttä annokseen.

Säteilyn vaikutusta on selvitetty myös 1 400 sikiökaudella altistuneen joukossa. Heillä on havaittu 34 vuoden aikana 18 syöpää, joista kaksi on leukemioita. Syövän suhteelliseksi lisäriskiksi on arvioitu 2,8/Gy, mikä on

hieman suurempi kuin alle kymmenen vuoden iässä altistuneilla. Suhteellinen lisäriski on tässä joukossa ilmeisesti ollut suurentunut kolme vuosikymmentä säteilyaltistuksesta, mutta ei enää 40 vuoden jälkeen.

Eräiden muiden syövän riskitekijöiden on todettu muovaavan säteilyn vaikutusta. Säteilyyn liittyvä keuhkosityövän suhteellinen riski on tupakojilla tupakoimattomia pienempi, mutta absoluuttinen riski on suurempi. Säteilyn aiheuttama rintasyövän suhteellinen riski taas on pienempi niillä, jotka olivat synnyttäneet ensimmäisen lapsensa nuorella iällä.

Hiroshiman ja Nagasakin eloonjääneiden tutkimukset tuovat luonnollisesti tietoa vain äkillisen kerta-annoksen, eivät pitkäaikaisen tai toistuvan säteilyaltistuksen vaikutuksista. Japanilaisen väestön syöpäsiintyvyyks poikkeaa monista muista väestöistä, japanilaisilla on muun muassa enemmän mahasyöpää ja vähemmän rinta- ja paksusuolisyöpää. Myös kroonisen lymfaattisen leukemian ilmaantuvuus Japanissa on alhainen. Tämän vuoksi riskikerrointen sovellettavuus muihin väestöihin on joiltain osin epävarmaa.

Tieteellisessä keskustelussa on ollut esillä Hiroshiman ja Nagasakin eloonjääneiden mahdollinen valikoitumisharha. Pommituksissa kuoli noin 200 000 ihmistä ja kuolleisuus 900 metrin säteellä oli yli 90 prosenttia. On mahdollista, että eloonjääneet olivat vähemmän herkkiä säteilyn deterministisille varhaisvaikutuksille. Tämä saattaisi johtaa liian pieniin riskiarvioihin. Tätä ei kuitenkaan ole voitu pitävästi selvittää. Toisaalta suurten annosten ryhmässä mittausvirhe voi aiheuttaa valikoitumisen kautta virhettä vastakkaiseen suuntaan. Yksi mahdollinen harhanlähde on myös siinä, että altistumattomien ryhmässä on enemmän kaupungin ulkopuolilla asuneita kuin suurempia annoksia saaneissa. Elintapojen kuten tupakoinnin ei ole havaittu vaihtelevan annoksen tai etäisyyden suhteen. Kuitenkin altistumattomassa ryhmässä yli kolmen kilometrin päässä räjähdyspaikasta olleilla on hieman suurempi syöpäilmaantuvuus (RR 1,05) kuin lähempänä olleilla.

## **Ydinkokeet**

Ydinkokeisiin osallistuneiden sotilaiden syöpävaaraa on seurattu eri maisissa. Annokset ovat kuitenkin olleet hyvin pieniä (yleensä alle kymmenen millisieverttiä) eikä selvää osoitusta suurentuneesta syöpävaarasta ole saatu. Yli 46 000 Yhdysvaltain pommikokeisiin osallistuneiden sotilaiden kuolleisuutta on seurattu yli 20 vuoden ajan. Leukemiakuolleisuus ei poikennut muusta väestöstä. Suurentunutta leukemiavaaraa ei ole havaittu

myöskään Marshall-saarilla tehtyihin kokeisiin osallistuneilla 40 000 yhdysvaltalaisella sotilalla. Iso-Britannian kokeisiin osallistuneilla sotilailta on raportoitu muita sotilaita hieman suurempi leukemiakuolleisuus, joka kuitenkin on samaa tasoa kuin muulla väestöllä Iso-Britanniassa.

Yhdysvaltain Marshall-saarilla vuonna 1954 tekemä atomipommikoe Bravo johti yli 200 asukkaan altistumiseen jodi-isotoopeille ja ulkoiselle säteilylle. Kilpirauhasannokset olivat osalla lapsista useita kymmeniä graytä ja aikuisillakin useita graytä. Yli 30 vuoden aikana altistuneilla on todettu yhdeksän kilpirauhassyöpää, mikä vastaa absoluuttista riskiä 1,4/10 000 henkilövuotta/Gy.

Yhdysvaltain maan päällä tekemät atomipommikokeet vuosina 1951–1962 aiheuttivat pieniä (1–10 millisievertin) säteilyannoksia Utahin asukkaille. Tapaus-verrokkitutkimuksessa verrattiin leukemiaan ja muihin syihin kuolleiden altistumista laskeumalle. Annostiedot perustuivat asuinpaikkaan ja keskimääräinen luuydinannos oli kolme milligraytä, joskin annosarvioon liittyi huomattavia epävarmuuksia. Akuutin leukemian riski oli lievästi suurentunut suurimman annoksen (6–30 mGy) ryhmässä (OR 2,1; 95 % lv 1,0–4,4). Tulos on varsin yllättävä ottaen huomioon sen, että arvioidut annokset ovat hyvin pieniä.

Neuvostoliitto teki maanpäällisiä ydinkokeita Semipalatinskissa nykyisen Kazakstanin alueella vuosina 1949–1962 ja 1965. Tyypillisten annosten on arvioitu olevan 100 millisievertin luokkaa seudun 350 000 asukkaalle. Lasten syöpien, erityisesti leukemian ilmaantuvuuden on havaittu olevan suurempi testialueen lähistöllä kuin muualla Kazakstanissa. Myös muut alueelliset tekijät kuin säteily saattavat kuitenkin vaikuttaa tuloksiin.

## Säteilyn lääketieteellinen käyttö

Säteilyä hyödynnetään lääketieteessä sekä diagnostiikkaan että sairauksien hoitoon. Koko väestön säteilyaltistuksesta huomattava osa on peräisin säteilyn lääketieteellisestä käytöstä. Valtaosa kokonaisannoksesta on peräisin diagnostisten tutkimusten pienistä kerta-annoksista ja vain pieni osa väestöstä saa suuria säteilyannoksia hoitotarkoituksessa.

### Sädehoito

Sädehoitoa on käytetty sekä syöpätautien että muiden sairauksien hoidossa 1900-luvun alkupuolelta saakka. Muita kuin syöpätauteja hoidettiin yleis-

sesti sädehoidolla 1950–1960-luvuille saakka ennen kuin sen havaittiin suurentavan syöpävaaraa. Sädehoidossa käytetyt annokset ovat yleensä varsin suuria, tyypillisesti kymmeniä tai satoja graytä. Yleisimmin sädehoidossa on käytetty ulkoista gammasäteilyä. Sädehoidon vaikutusta syöpävaaraan on selvitetty lukuisissa epidemiologisissa tutkimuksissa. Niiden etuna on yleensä varsin tarkat annostiedot, sillä sekä kohdekudoksen että muiden elinten sädeannos on suunniteltu etukäteen hoidon vaikuttavuuden parantamiseksi ja haittojen vähentämiseksi.

### Hyvänlaatuisten sairauksien sädehoito

Lähes 15 000 selkärankareuman vuoksi sädehoitoa saaneen potilaan syöpäkuolleisuutta on seurattu englantilaisessa kohorttitutkimuksessa keskimäärin 18 vuoden ajan. Potilaat saivat sädehoitoa 1930–1950-luvuilla ja luuydinannos oli keskimäärin 4,4 graytä. Hoidetuilla potilailla on havaittu muuta väestöä korkeampi syöpäkuolleisuus (SMR 1,3 ja 95 % lv 1,2–1,4). Suurimmat riskit ovat liittyneet virtsarakkosyöpään, leukemiaan ja myeloomaan. Myös ruokatorvi-, keuhko- ja paksusuolisyöpäkuolleisuus ovat suurentuneet. Mahasyöpäkuolleisuus taas ei ole suurentunut. Leukemia-kuolleisuus on muuta väestöä korkeampi, mutta selvää annos-vastetta ei ole kyetty osoittamaan. Koska yksilökohtaisia elinannoksia ei ole arvioitu, annos-vasteanalyysijä ei ole muiden syöpien osalta kyetty tekemään. Selkärankareumaan liittyy ilman hoitoakin suurentunut paksusuolisyövän ja mahdollisesti muidenkin syöpien vaara, mikä saattaa vaikuttaa tuloksiin hoitamattoman vertailuryhmän puuttuessa.

Myös Ruotsissa on tutkittu tuki- ja liikuntaelimestön sairauksien vuoksi sädehoitoa saaneiden potilaiden syöpävaaraa. Leukemiavaara oli 25 vuoden seurannassa sädehoitoa saaneilla 20 000 potilaalla muuta väestöä suurempi (SIR 1,2 ja 95 % lv 1,0–1,4), mutta lymfooman ja myelooman vaara ei ollut suurentunut.

Yhdysvalloissa havaittiin mahahaavan vuoksi sädehoitoa saaneilla noin 1 800 potilaalla suurempi syöpäkuolleisuus kuin muulla tavoin hoidetulla vertailuryhmällä. Selvin lisäriski liittyi mahasyöpään (RR 2,8; 95 % lv 1,6–4,8). Tutkimus kattoi 22 vuoden seurannan, ja keskimääräinen annos mahalaukulle oli 22 graytä.

Sädehoitoa käytettiin aiemmin myös päänahan sienitulehduksen (silsan) hoitoon. Päänahan iholle sädeannos oli keskimäärin 6–7 graytä, ja kilpirauhasannokset olivat 0,1–0,5 graytä. Israelissa seurattiin syöpäilmaantuvuutta yli 10 000 sädehoitoa saaneen lapsen joukossa 26 vuoden aikana.

Sädehoitoa saaneilla lapsilla oli nelinkertainen kilpirauhassyövän riski; suhteelliseksi lisäriskiksi arvioitiin 30 graytä kohti. Myös päänahan ihosyövän ilmaantuvuus oli suurentunut.

1920–1950-luvuilla arveltiin suurentunutta kateenkorvaa pikkulasten hengitysvaikeuksien syyksi. Yhdysvalloissa seurattiin 2 657 alle vuoden iässä sädehoitoa saanutta lasta yli 30 vuoden ajan. Kilpirauhaseen kohdistunut sädeannos oli keskimäärin 1,4 graytä. Hoidetuilla lapsilla havaittiin lähes kymmenkertainen kilpirauhassyövän riski sisaruksista koostuvaan vertailuryhmään nähden. Myös ihosyövän ja rintasyövän ilmaantuvuus oli 2–4-kertainen sisaruksiin verrattuna.

Lapsuudessa suurentuneiden kitarisoiden vuoksi 1940–1960-luvuilla sädehoitoa saaneita 2 634 potilasta on seurattu 33 vuoden ajan. Kilpirauhassannos oli keskimäärin 0,6 graytä ja seulonnalla on löydetty 309 kilpirauhassyöpää. Kilpirauhassyövän riski on suurentunut suhteessa sädeannokseen (ERR 3,0/Gy; lv 2,6–3,5).

Hyvänlaatuisten rintasairauksien vuoksi 5–6 grayn annoksin sädehoitoa saaneiden 1 216 ruotsalaisen naisen seurannassa havaittiin 183 rintasyöpää 27 vuoden aikana. Riski oli 3,6-kertainen muulla tavalla hoidettuihin nähden ja kasvoi annoksen myötä. Suurin riski havaittiin nuorella iällä sädehoitoa saaneilla.

Yhdysvalloissa rintatulehduksen vuoksi 3–4 grayn annoksin ulkoista sädehoitoa saaneilla 601 naisella havaittiin 29 vuoden seurannassa 56 rintasyöpää, mikä on kolminkertainen määrä muulla tavoin hoidettuihin potilaisiin nähden. Riski lisääntyi annoksen myötä ja oli annosyksikköä kohti samaa suuruusluokkaa kuin atomipommituksista eloonjääneillä.

Sädehoidon aihe	Vaikutus
Selkärankareuma	Leukemia, keuhko-, ruokatorvi-, rakkosyöpä
Gynekologiset sairaudet	Leukemia, rakkosyöpä
Mahahaava	Mahasyöpä, keuhkosyöpä
Rintatulehdus	Rintasyöpä
Päänahan sienitulehdus	Ihosyöpä, kilpirauhassyöpä
Suurentuneet kitarisat lapsilla	Kilpirauhassyöpä
Suurentunut kateenkorva lapsilla	Kilpirauhassyöpä

**TAULUKKO 7.4. Hyvänlaatuisten sairauksien sädehoidon aiheuttama syöpävaara**

1950-luvulle asti erilaisia tulehdussairauksia hoidettiin radium-injekti-  
oilla. Myöhemmin Yhdysvalloissa ja Saksassa on radiumin osoitettu nos-  
taneen potilailla luusyöpien vaaran monikymmenkertaiseksi.

## Syövän sädehoito

Kerran syöpään sairastuneella potilailla on suurentunut riski sairastua myös uuteen syöpään, mikä liittyy ensimmäisen syövän aiheuttaneisiin tekijöihin (kuten elintapoihin), mutta myös syövän hoitoon. Syövän hoi-  
dossa käytetyt sädeannokset ovat yleensä suurempia kuin muiden sai-  
rauksien hoidossa. Syövän hoidossa käytetään yleisesti sekä sädehoitoa  
että solusalpajia, jotka molemmat suurentavat syöpävaaraa. Sädehoidon  
aiheuttamaa syöpävaaraa on selvitetty vertaamalla sädehoitoa ja muita  
hoitoja saaneiden potilaiden uuden syövän riskiä. Näiden tutkimusten  
vahvuutena on tarkat annostiedot, mutta muiden tekijöiden, kuten so-  
lusalpajahoidon, vaikutuksen vakiointi on tärkeää. Useissa tutkimuksis-  
sa solusalpajiin (erityisesti alkyloiviin aineisiin) on liittynyt sädehoitoa  
suurempi leukemian vaara, mutta sädehoito on suurentanut enemmän  
muiden syöpien riskiä. Sädehoito suurentaa luusyövän vaaraa, ja rinta-  
kehän alueelle annettuun sädehoitoon on liittynyt suurentunut keuhko-  
ja rintasyövän vaara. Riskiarviot ovat usein olleet pienempiä kuin atomi-  
pommituksista elonjääneillä, mikä liittyy osin siihen, että altistus ta-  
pahtuu pienempiin annoksiin jaettuna (fraktiointi), ja osin siihen, että  
syöpäpotilaat ovat tyypillisesti melko iäkkäitä. Lisäksi sädehoidossa käy-  
tetyt annokset ovat usein niin korkeita, että niiden aiheuttama solukuole-  
ma vähentää syöpävaaraa.

Kansainvälisessä yhteistutkimuksessa selvitettiin sädehoidon vaikutusta  
kohdunkaulasyöpäpotilaiden syöpävaaraan. Sädehoito annettiin joko ul-  
koisesti (gamma- tai röntgensäteet) tai tyköhoitona (radium). Potilaat sai-  
vat huomattavan luuydinannoksen (keskimäärin 7,5 Gy) sekä pienet an-  
nokset kilpirauhaseen (0,15 Gy) ja rintaan (0,2 Gy). Leukemian ilmaan-  
tuvuus sädehoitoa saaneilla ei ollut selvästi suurempaa kuin muuten  
hoidetuilla potilailla (SIR 1,2). Leukemian vaara suureni luuydinannok-  
sen myötä neljän grayn tasolle, mutta laski sen jälkeen. Myös kilpirau-  
hassyövän ja rintasyövän vaaran suurenemisesta saatiin viite, mutta vai-  
kutukset ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Rintasyövän osalta munasarjojen  
sädeannos pienensi riskiä.

Lymfoomien (imukudossyöpien) hoitoon liittyy suurentunut leukemian  
vaara. Sekä Hodgkinin taudin että muiden lymfoomien osalta sädehoidon  
on osoitettu suurentavan leukemian vaaraa, mutta sädehoitoakin voimak-

kaampi vaikutus on todettu solusalpaajahoidolla. Kiinteiden kasvaimien osalta taas sädehoitoon on usein liittynyt suurempi riski. Sädehoidon ja solusalpaajien yhdistäminen suurentaa syöpävaaraa enemmän kuin niiden käyttö erikseen (toisin sanoen niiden yhteisvaikutus on lähempänä multiplikatiivista kuin additiivista, katso edellinen luku). Esimerkiksi lasten syövän sädehoidon jälkeinen luusyövän vaara on 30-kertainen muuhun väestöön nähden, solusalpaajahoidon saaneiden vaara on 25-kertainen ja molempia hoitoja saaneiden vaara on 200-kertainen. Retinoblastooman (lapsilla esiintyvän silmäsyövän) vuoksi sädehoitoa saaneilla on havaittu perinnöllisten tekijöiden muovaavan sädehoitoon liittyvää riskiä. Periytyvää retinoblastoomaa sairastavilla lapsilla sädehoitoon liittyi viisinkertainen syöpävaara, kun ei-periytyvää muotoa sairastavilla riski oli vain kaksinkertainen.

### **Röntgentutkimukset**

Lääketieteellisessä sädediagnostiikassa (muun muassa röntgenkuvat ja isotooppitutkimukset) käytetään useita kertaluokkia pienempiä annoksia kuin sädehoidossa. Jos tutkimuksia tehdään huomattavan paljon, kokonaisannos voi kuitenkin kasvaa suureksi. Diagnostiikassa säteilylle altistuneiden ihmisten määrä on myös paljon suurempi kuin sädehoitoa saavien.

Tuberkuloosin hoidossa käytettiin 1930–1950-luvuilla ilmarintahoittoa, johon kuului keuhkon seuraaminen toistuvilla läpivalaisuilla. Läpivalaisu saatettiin toistaa kymmeniä tai jopa satoja kertoja hoidon aikana. Keuhkoannos muodostui usein yhden grayn suuruiseksi ja rintaan kohdistui myös huomattava säteilyannos (tyypillisesti 0,7–0,8 Gy). Kanadalaisessa tutkimuksessa seurattiin 25 000 tuberkuloosin vuoksi ilmarintahoittoa saanutta naista 37 vuoden ajan. Ilmarintahoittoa saaneilla potilailla oli muuhun väestöön nähden 1,5-kertainen rintasyöpäkuolleisuus (349 kuolemaa). Rintasyövän vaara suureni sädeannoksen myötä (ERR 0,8/Gy; lv 0,5–1,2). Riski oli suurin alle 20 vuoden iässä säteilylle altistuneilla. Keuhkosityövän vaara ei ollut suurentunut. Yhdysvalloissa tehdyssä pienemmässä tutkimuksessa saatiin vastaavia tuloksia.

Lantion röntgentutkimukset raskauden aikana olivat varsin yleisiä vielä 1950–60-luvuilla ja ne aiheuttivat 2–20 millisievertin annoksen sikiölle. Laajassa englantilaisessa tutkimuksessa havaittiin raskauden aikaisen lantion röntgentutkimusten suurentavan lasten leukemian ja muiden syöpien suhteellista riskiä noin 40 prosentilla. Riski suureni röntgenkuvien määrän mukana ja oli suurempi raskauden ensimmäisen kolmanneksen aikana kuin myöhemmin. Myöhemmin tehdyissä noin kymme-

nessä tapaus-verrokkitutkimuksessa on saatu leukemian osalta saman suuntaisia tuloksia, mutta kahdessa kohorttitutkimuksessa ei lisäriskiä ole havaittu.

## Radiojodi

Samoin kuin röntgensäteilyä, radioaktiivista jodia on käytetty lääketieteessä sekä hoitomuotona että kilpirauhassairauksien diagnostiikassa. Suurimpia annoksia on käytetty kilpirauhassyövän hoidossa, kilpirauhasen liikatoiminnan hoitoon on käytetty yksi kymmenesosa ja diagnostiikkaan yksi tuhannesosa kilpirauhassyövän hoitoon tarvittavista annoksista.

Ruotsissa tehdyssä kohorttitutkimuksessa 834 radiojodilla hoidettua kilpirauhassyöpöpotilasta seurattiin keskimäärin 14 vuoden ajan. Yli yhden grayn saaneiden elinten (sylkirauhaset, maha, ohutsuoli ja virtsarakko) syöpäriski oli 2,6-kertainen muuhun väestöön verrattuna. Kuitenkin syöpävaara oli suurentunut myös niillä potilailla, joita ei ollut hoidettu radiojodilla.

Kilpirauhasen liikatoiminnan hoitoon käytettyjen pienempien radiojodiannoston vaikutuksia selvitettiin yli 10 000 ruotsalaista potilasta kattaneessa tutkimuksessa. 15 vuoden seurannassa havaittiin 18 kilpirauhassyöpää, mikä oli lähellä odotettua tapausmäärää. Yhdysvalloissa on seurattu yli 35 000 potilasta keskimäärin 21 vuoden ajan. Kilpirauhassyöpää oli enemmän radiojodia saaneilla potilailla. Kilpirauhassyövän vaara ei kuitenkaan ollut yhteydessä saatuun radiojodiannokseen. Näissä tutkimuksissa ei havaittu suurentunutta leukemian vaaraa.

Radiojodin diagnostiseen käyttöön liittyvien pienten annosten vaikutusta syöpävaaraan selvitettiin 35 000 potilasta kattaneessa ruotsalaisessa tutkimuksessa. Potilaita seurattiin 20 vuoden ajan ja ensimmäisinä tutkimusta seuranneina vuosina kilpirauhassyöpiä todettiin muuta väestöä enemmän. Koska riski ei jatkunut enää 10 vuotta altistuksen jälkeen, tutkijat päättelivät sen liittyvän lähinnä niihin sairauksiin, joiden vuoksi tutkimukset tehtiin, tai tarkempaan lääketieteelliseen seurantaan. Lapsille aiheutuvaa riskiä ei tästä aineistosta voi arvioida lasten pienen määrän vuoksi.

## Thorotrast

1930–1940-luvuilla käytettiin useissa maissa verisuonikuvauksissa röntgenvarjoaineena kolloidaalista toriumdioksidia, joka tunnettiin kauppanimellä Thorotrast. Siinä oleva torium-232 on pitkäikäinen alfasäteilijä, joka

kertyy pääosin maksaan ja pernaan aiheuttaen elinikäisen säteilyaltistuksen. Tanskassa, Saksassa ja Yhdysvalloissa on osoitettu maksasyövän vaaran suurentuneen näillä potilailta ainakin 100-kertaiseksi ja leukemiavaaran kymmenkertaiseksi. Sekä maksasyövän että leukemian vaara lisääntyi säteilyannoksen myötä.

## Luonnonsäteily ja syöpä

Väestön keskimääräisestä annoksesta suurin osa on peräisin luonnonsäteilystä. Saadut annokset ovat kuitenkin niin pieniä, että niiden vaikutuksen erottaminen muista tekijöistä on äärimmäisen vaikeaa, sillä vähäinenkin harha tai sekoittuneisuus voi vääristää riskiarviota huomattavasti. Lisäksi pieniin annoksiin liittyvän syöpävaaran selvittämistä vaikeuttaa useimmissa tapauksissa puutteellinen tilastollinen voima. Esimerkiksi 50 millisievertin säteilyannos saattaa suurentaa syövän suhteellista riskiä kolmella prosentilla, eli syöpävaara on 1,03-kertainen. Jos syöpäilmaantuvuus ilman säteilyaltistusta on 250 tapusta 100 000 henkilövuotta kohti, niin säteilyn aiheuttaman ylimääräisen riskin havaitseminen vaatisi vähintään 500 000 altistuneen ja yhtä monen altistumattoman ihmisen seuraamista 20 vuoden ajan. Seuranta edellyttäisi, että käytettävissä olisi tarkat ja vertailukelpoiset tiedot sekä altistuksesta että syöpäilmaantuvuudesta. Lisäksi altistuneiden ja altistumattomien tulisi olla muuten vertailtavissa, eli he muistuttaisivat toisiaan muiden syöpävaaraan vaikuttavien tekijöiden suhteen mukaan lukien muut säteilyaltistukset.

Luonnonsäteilyn tärkeimmät lähteet ovat huoneilman radon, maaperän sisältämät radioaktiiviset aineet ja avaruudesta peräisin oleva kosminen säteily. Joissain väestöissä juomaveden radioaktiiviset aineet aiheuttavat myös huomattavan säteilyaltistuksen.

Maaperän gammasäteilyn vaikutuksia selvittäneet tutkimukset perustuvat alueiden väliseen vertailuun, ja ekologisen harhan mahdollisuus vaikeuttaa niiden tulkintaa. Eri maissa on tehty yhteensä kahdeksan ekologista tutkimusta leukemiasta, mutta niissä ei ole voitu osoittaa yhteyttä leukemian esiintyvyyteen. Kiinassa Yangjianin alueella taustasäteily on hyvin voimakasta maaperän korkean toriumpitoisuuden vuoksi. Leukemian ilmaantuvuus alueella ei kuitenkaan ole korkeampaa kuin läheisellä normaalien taustasäteilyn alueella. Iso-Britanniassa tehdyissä kahdessa tutkimuksessa ei havaittu yhteyttä lasten leukemian ilmaantuvuuden ja taustasäteilyn välillä. Myöskään Yhdysvalloissa ei havaittu yhteyttä taustasäteilyn ja leukemiakuolleisuuden välillä.

Yksilötason tutkimusten rajoituksena on puolestaan ollut puutteellinen tilastollinen voima. Pienessä ruotsalaisessa tutkimuksessa 86 leukemia-tapauksesta suurempi osuus asui ”korkean säteilyriskin” taloissa kuin 172 verrokista. Tutkimuksessa ei kuitenkaan tehty annosmittauksia, vaan asunnot luokiteltiin rakennusmateriaalien perusteella. Italiassa tehdyssä pienessä tutkimuksessa ei havaittu eroja luonnollisessa gammasäteilyssä 44 akuuttia myeloista leukemiaa sairastavan tapauksen ja 211 verrokin kotona.

## Radon

Huoneilman radonpitoisuus Suomessa on poikkeuksellisen korkea, ja radon on suomalaisten suurin säteilyn lähde. Radonin aiheuttamaa keuhkosityöpävaaraa on selvitetty kaivostyöntekijöillä ja huoneilman radonin vaikutusta koskevissa tapaus-verrokkitutkimuksissa. Asiasta on tehty myös useita ekologisia tutkimuksia, joissa ei ole havaittu yhteyttä huoneilman radonin ja keuhkosityöpävaaran välillä. Tämä on odotettavissa, kun tiedetään tupakoinnin vahva yhteys keuhkosityöpään ja radonpitoisuuden suuri vaihtelu alueiden sisällä. Näiden tutkimusten merkitys onkin hyvin vähäinen niiden puutteiden vuoksi.

### Radon ja keuhkosityöpä kaivostyöntekijöillä

Kaivostyöntekijät voivat altistua hyvin korkeille radonpitoisuuksille. Kaivoksissa pitoisuudet ovat olleet yleisesti tuhansia tai kymmeniä tuhansia becquereljä kuutiometrissä eli kymmeniä tai satoja kertoja korkeampia kuin tyypilliset huoneilman radonpitoisuudet. Kaivostyöntekijöiden epidemiologiset tutkimukset ovat antaneet paljon uutta tietoa radonin terveysvaikutuksista. Tutkimusten vahvuus on tilastollinen voima, sillä niissä on seurattu korkeille radonpitoisuuksille altistunutta tuhansien työntekijöiden tutkimusväestöä vuosikymmenien ajan. Näillä tutkimuksilla on kuitenkin myös eräitä rajoituksia, kuten tupakointitietojen puutteellisuus. Tupakoinnin ja radonin lisäksi muut kaivoksissa esiintyvät altisteet kuten arseeni ja piipöly suurentavat myös keuhkosityöpän vaaraa. Näiden vakioiminen on useissa tutkimuksissa pienentänyt radoniin liittyvää riskiä, mutta kaikissa tutkimuksissa niistä ei ole ollut tietoja, joten niiden vaikutuksen ottaminen huomioon ei ole ollut mahdollista. Radonaltistusta koskevat tiedot ovat usein puutteellisia, sillä radonmittauksia on tehty kattavasti vasta 1950–60-luvuilta, eikä silloinkaan aina kaivosten kaikissa osissa. Kaivoskuilujen rakenteiden ja ilmanvaihtojärjestelmien muutokset vaikeuttavat vanhojen altistumisten takautuvaa arviointia. Lisäksi kaivostyöntekijätutkimusten

tulosten soveltamista rajoittaa se, että ne käsittävät vain työikäisten miesten altistuksia.

Yhdentoista kaivotyöntekijätutkimuksen yhteisanalyyssissä keuhkosityövän vaara suureni suhteessa radonaltistukseen. Aineisto perustui eri maista kerättyyn 68 000 kaivosmiehen kohorttiin, jota oli seurattu keskimäärin 18 vuoden ajan. Tutkimusväestössä havaittiin yhteensä yli 2 700 keuhkosityöpäkuolemaa, ja keuhkosityöpäkuolleisuutta verrattiin eri altistusrhymissä. Radoniin liittyvä keuhkosityövän suhteellinen riski suureni 0,5 prosentilla yhtä WLM-yksikköä<sup>1</sup> kohti (95 % lv 0,2–1 %). Pieniin pitoisuuksiin liittyi altistusyksikköä kohti suurempi vaara kuin korkeisiin pitoisuuksiin, ja vastaavasti pitkän ajan kuluessa saatu altistus aiheutti suuremman vaaran kuin saman suuruinen lyhyen ajan kuluessa saatu annos. Niistä kaivosmiehistä, joiden tupakointitiedot olivat käytettävissä, tupakoimattomilla keuhkosityövän vaara oli pienempi kuin tupakoivilla, mutta radonin aiheuttama suhteellinen riski oli tupakoimattomilla suurempi. Kun analyysit on rajattu pienempiin altistuksiin, keuhkosityövän suhteellinen riski annosyksikköä kohti on ollut suurempi kuin koko aineistosta saatu tulos.

Muiden syöpien kuin keuhkosityövän vaara ei ole kaivosmiehillä suurentunut. Samojen 11 tutkimuksen yhteisanalyysi osoitti että kaikkien syöpien vaara oli saman suuruinen kuin muulla väestöllä (SMR = 1,01; 95 % lv 0,95–1,07). Eri syöpätyypeistä ainoastaan maha- ja maksasyövän vaara oli suurentunut eikä niillä ollut yhteyttä radonaltistuksen määrään.

## **Huoneilman radon ja keuhkosityöpävaara**

Huoneilman radonin aiheuttamaa keuhkosityövän vaaraa on selvitetty useissa tutkimuksissa. Suomessa ja Ruotsissa on kummassakin tehty kaksi suurta tapaus-verrokkitutkimusta. Lisäksi vastaavia tutkimuksia on tehty muissa Euroopan maissa, Yhdysvalloissa, Kiinassa ja Kanadassa. Kahdeksan tutkimuksen tulokset yhdistäneessä analyysissä arvioitiin suhteelliseksi lisäriskiksi 9 %/100 Bq/m<sup>3</sup> (95 % lv 0–20 %) Tämä on lähellä kaivostyöntekijöillä saatuja tuloksia ja Suomeen sovellettuna merkitsee sitä, että huoneilman radon aiheuttaisi noin yhden kymmenesosan kaikista keuhkosityövistä eli noin 200 tapaus vuodessa. Tarkempia riskiarvioita on luvassa yhdistetyistä analyyseistä, joissa ei käytetä ainoastaan eri tutkimusten hieman eri lailla laskettuja tuloksia, vaan analysoidaan kaikki aineistot uudestaan samalla tavalla.

---

<sup>1</sup>WLM, working level month on radonin altistuskertymän yksikkö, joka vastaa 170 tunnin oleskelua 4 700 Bq/m<sup>3</sup> radonpitoisuudessa.

Taulukossa 7.5 esitetään yhteenveto huoneilman radonia ja keuhkosyöpää koskevista tutkimuksista.

Viite	Tapausten + verrokkien määrä	Keskimääräinen radonpitoisuus*	Tulos
Pershagen ym. 1994	1360 + 2847	107	ERR 0,10/100 Bq m <sup>-3</sup> (0,01 – 0,22)
Darby ym. 1999	982 + 3185	58/55	ERR 0,08/100 Bq m <sup>-3</sup> (<0, 0,20)
Auvinen ym. 1996	517 + 517	103/96	ERR 0,11/100 Bq m <sup>-3</sup> (<0, 0,31)
Field ym. 2000	413 + 614	100/89	ERR 0,16/100 Bq m <sup>-3</sup> (<0, 0,62)
Ruosteenoja ym.	219 + 495	207/223	Ei tilastollisesti merkitsevää yhteyttä
Alavanja ym. 1994	538 + 1183	67	Ei tilastollisesti merkitsevää yhteyttä
Letourneau ym. 1994	738 + 738	116/126	Ei selvää yhteyttä
Pershagen ym. 1992	210 + 400	128	Keuhkosyöpävaara suureni radonpitoisuuden myötä
Schoenberg ym. 1990	433 + 402	26	Keuhkosyöpävaara suureni radonpitoisuuden myötä
Blot ym. 1990	308 + 362	118	Ei yhteyttä radonin ja keuhkosyövän välillä
* tapauksilla/verrokeilla, jos ilmoitettu			

**TAULUKKO 7.5 Yhteenveto huoneilman radonia ja keuhkosyöpää koskevista tutkimuksista**

## Ammattialtistus

Säteilylle altistuu ammatissaan huomattava määrä ihmisiä. Säteilytyöntekijöiden annokset olivat vielä joitain vuosikymmeniä sitten huomattavasti nykyisiä suurempia. Nykyisin 1–5 millisievertiä suuremmat vuosannokset ovat harvinaisia, joten ammatissa saadut annokset ovat samaa suuruusluokkaa kuin koko väestön annokset muista lähteistä, lähinnä luonnonsäteilystä ja säteilyn lääketieteellisestä käytöstä. Säteilytyötä tekevien altistus ei siis suuruudeltaan enää oleellisesti poikkea muusta väestöstä. Ammattialtistuksia koskevat tutkimukset ovat olleet hyödyllisiä, sillä niistä on saatu tietoa pienten, toistuvien annosten vaikutuksesta syöpävaaraan. 1900-luvun alkupuolen nykyisiä suuremmista annoksista ei kuitenkaan ole saatavissa tarkkoja henkilökohtaisia altistustietoja. Nykyisin henkilökohtaisessa annos seurannassa kerättävät varsin tarkat tiedot voivat sen sijaan osoittautua hyödyllisiksi tutkimustarkoituksessa. Tarkka riskiarvio edellyttää kuitenkin suurempaa aineistoa kuin missään yksittäisessä maassa on mahdollista kerätä, joten kansainvälinen yhteistyö on tarpeen.

Vuosisadan alkupuolella toimineilla röntgenlääkäreillä on ollut suurentunut syöpävaara, joka ilmeisesti liittyy säteilyaltistukseen. Britanniassa seurattiin kuolleisuutta 1 338 röntgenlääkäriin kohortissa. Ennen vuotta 1921 sikkäläiseen radiologiyhdistykseen liittyneillä havaittiin kuusinkertainen leukemian ja seitsenkertainen ihosyövän riski muihin korkean sosiaaliluokan miehiin verrattuna. Myös haima- ja keuhkosyövän vaara oli suurentunut, mutta näiden arveltiin liittyvän elintapoihin eikä säteilyyn. Nämä löydökset perustuvat kuitenkin pieniin, alle kymmenen tapauksen määrään. Vastaavasti Yhdysvalloissa on havaittu ennen vuotta 1940 radiologiseen seuraan liittyneillä 6 500 röntgenlääkärillä muihin lääketieteen erikoisaloihin verrattuna kaksinkertainen leukemian ja kolminkertainen ihosyövän riski. Myös Kiinassa on havaittu ennen vuotta 1969 toimineilla röntgentyöntekijöillä 2–3-kertainen leukemian vaara muuhun terveydenhuoltohenkilöstöön verrattuna. Yhdysvalloissa on laajassa kohorttitutkimuksessa havaittu röntgentyöntekijöiden rintasyöpäkuolleisuuden olevan suurentunut ennen vuotta 1940 työt aloittaneilla. Rintasyöpävaara kasvoi suhteessa työvuosiin.

Ehkä luotettavinta tietoa pienten säteilyannosten vaikutuksesta syöpävaaraan on saatu 95 000 Yhdysvaltain, Kanadan ja Englannin ydinlaitosten työntekijää kattavassa seurantatutkimuksessa. Kohortin jäsenet olivat työskennelleet vähintään kuuden kuukauden ajan ydinvoimalassa, polttoainekiertoa liittyvässä laitoksessa tai ydinaseiden tuotantolaitoksessa. Heidän säteilyaltistustaan oli seurattu henkilökohtaisella annosmittarilla ja keskimääräinen annoskertymä oli noin 40 millisievertiä. Keskimääräinen seuranta-aika oli noin 20 vuotta ja tutkimuksessa havaittiin lähes 4 000 syöpäkuolemaa, joista 119 leukemiaa. Leukemian (poislukien krooninen lymfaattinen leukemia) vaara liittyi tilastollisesti merkitsevästi säteilyannokseen. Säteilyn aiheuttamien leukemiakuolemien määräksi arvioitiin 10–20. Riskiarvio oli pienempi kuin Hiroshimassa ja Nagasakissa havaittu, mutta luottamusväli kattoi sekä hyvin pienen riskin että atomipommituksissa eloonjääneiden arvion (suhteellinen lisäriski yhtä sievertiä kohti 2,2 ja 90 % lv 0,1–5,7). Muiden syöpien vaara ei liittynyt säteilyannokseen. Tutkimuksessa oli rajoituksena tietojen puuttuminen syövän muista riskitekijöistä kuten tupakoinnista. Leukemian kohdalla tämän vaikutus oli vähäinen, sillä muita tunnettuja riskitekijöitä kuin säteily ei juuri ole. Pienten annosten vaikutuksia selvitetäessä muista lähteistä kuten lääketieteellisistä tutkimuksista saadut säteilyaltistukset voivat myös olla tärkeitä.

Mayakin laitoksissa entisessä Neuvostoliitossa tuotettiin plutoniumia ydinaseiden valmistukseen. 1950-luvulla laitoksissa toimineet 5 000 työntekijää saivat usean sievertin suuruisia säteilyannoksia. Mayakin työnteki-

jöiden joukossa säteilyannoksella ei ole havaittu selvää yhteyttä kaikkien syöpien tai leukemian aiheuttamaan kuolleisuuteen. Sen sijaan keuhkosyöpäkuolleisuus on suurentunut suhteessa plutonium-altistuksen määrään (ERR 12,2/Gy; lv 6,4–18).

Radiumista valmistettiin vuosisadan alkupuolella itsevalaisevaa maalia, jolla maalattiin muun muassa kellonviisareita. Maalajaajat saattoivat kostuttaa pensselinkärkeä suussa, jolloin luustoon ja pehmytkudokseen kertyi radiumia. Yhdysvalloissa tehdyssä kohorttitutkimuksessa noin 600 työntekijän joukossa havaittiin 22 luusyöpää, mikä oli 80 kertaa enemmän kuin esiintyvyys väestössä keskimäärin.

Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuuden jälkeen alueelle komennettiin satoja tuhansia miehiä puhdistustyöhön. He altistuivat keskimäärin 0,1 grayn suuruisille säteilyannoksille. Noin 160 000 venäläistä työntekijää käsitävästä kohortista on raportoitu muuta väestöä suurempi syöpäilmaantuvuus niin kaikkien syöpien, leukemian kuin kilpirauhassyövänkin osalta. Tulokseen vaikuttaa ilmeisesti syöpätapausten kattavampi raportointi puhdistustyöntekijöillä kuin muulla väestöllä (informaatioharha), sillä tapausverrokianalyyseissä leukemian riski ei liittynyt säteilyannokseen. Myöskään pienessä virolaisessa puhdistustyöntekijäkohortissa ei ole havaittu viitteitä suurentuneesta syöpävaarasta.

Lentohenkilöstö altistuu työssään pienille kosmisen säteilyn annoksille (2–6 millisievertiä vuodessa). Lentokorkeuksissa kosminen säteily koostuu lähinnä gamma- ja neutronisäteilystä. Annosnopeus riippuu ensisijaisesti lentokorkeudesta ja suuri osa altistumisesta tapahtuu pitkän matkan lennoilla. Maan magneettikentän suojavaikutuksen vuoksi napojen lähellä annosnopeus on suurempaa kuin päiväntasaajan seudulla.

Suomalaisessa kohorttitutkimuksessa 1 500 Finnairin lentoemännän joukossa havaittiin hieman muuta väestöä suurempi syöpävaara, joka liittyi lähinnä rintasyöpään. Rintasyövän ilmaantuvuus oli kaksinkertainen muuhun väestöön verrattuna. Leukemiavaaraa ei pystytty arvioimaan tarkasti pienen tapausmäärän takia. Toistaiseksi on epäselvää missä määrin rintasyövän riski liittyi ammatillisiin altistuksiin ja kuinka paljon muihin tekijöihin kuten pieneen lapsilukuun ja myöhäiseen ensisynnytyksikään. Käynnissä olevien laajojen yhteistutkimusten toivotaan selventävän tilannetta.

Ensimmäiset tutkimukset lentäjien syöpävaarasta tehtiin Kanadassa. Kohorttitutkimuksessa seurattiin syöpäilmaantuvuutta 2 740:n lentäjän joukossa yli 20 vuoden ajan. Syöpäilmaantuvuus kokonaisuudessaan oli muu-

ta väestöä alhaisempi (SIR 0,7; lv 0,6–0,8). Eturauhassyöpää lentäjillä esiintyi muuta väestöä enemmän, ja tutkimuksessa saatiin viite myös suurentuneesta leukemian vaarasta (SIR 1,9; lv 0,8–3,5). Säteilyn vaikutusta ei kuitenkaan pystytty suoraan arvioimaan.

Tanskalaisessa kohorttitutkimuksessa havaittiin 3 877 lentäjällä muuta väestöä suurempi ihosyövän vaara (tyvisolusyöpä SIR = 5,1, melanooma SIR = 2,3). Tutkijat arvioivat tämän liittyvän lentäjien etelänmatkoihin ja runsaaseen auringonottoon eikä kosmiseen säteilyyn. Myös leukemian osalta havaittiin viite lisääntyneestä vaarasta, mutta ero muuhun väestöön ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Suurin leukemiariski havaittiin niillä lentäjillä, jotka olivat lentäneet yli 5 000 tuntia suihkukoneella. Kaikkien syöpien osalta ei havaittu selvää lisäriskiä (SIR 1,1; lv 0,9–1,3). Ihosyöpien suhteen vastaavia tuloksia on raportoitu myös norjalaisessa, englantilaisessa ja islantilaisessa lentäjäkohortissa, mutta niissä ei ole havaittu suurentunutta leukemian riskiä.

## Ydinlaitosten päästöt

Ympäristöperäisen altistuksen tutkiminen on vaikeaa, sillä annostiedot joudutaan arvioimaan jälkikäteen ja ne ovat yleensä puutteellisia. Sekoituneisuus on usein huomattava ongelma, sillä altistus riippuu alueesta ja vertailtavien alueiden välillä on yleisesti eroja muissakin syövän esiintyvyyteen vaikuttavissa tekijöissä. Syövän esiintymisen ja sairaustietojen keräämistapojen ajallisia muutoksia voi olla vaikea ottaa huomioon.

Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuudessa huhtikuussa 1986 vapautui suuret määrät radioaktiivisia aineita ympäristöön. Pahiten saastuivat onnettomuuspaikkaa ympäröivät alueet Valko-Venäjällä, Ukrainassa ja pienessä osassa Venäjää. Vapautunut radiojodi aiheutti usean grayn suuruisia kilpirauhasannoksia tuhansille lapsille. Aikuisten kilpirauhasannokset olivat tekijällä 10–20 pienempiä kuin lasten. Pahiten saastuneilla alueilla lasten kilpirauhassyövän ilmaantuvuus on 1990-luvulla suurentunut 10–100-kertaiseksi aiempaan verrattuna. Kilpirauhassyövän suhteelliseksi riskiksi on arvioitu 20–90/Gy ja absoluuttiseksi riskiksi 1–3/10 000 henkilövuotta/Gy. Lasten leukemian tai muiden syöpien ei ole osoitettu lisääntyneen onnettomuuden vaikutuksesta edes Tshernobylin lähialueilla.

Muihin Euroopan maihin Tshernobylin onnettomuus aiheutti enimmäkseen 1–2 millisievertin annoksen ensimmäisen vuoden kuluessa. Lyhy-

en puoliintumisajan vuoksi radiojodin aiheuttama altistus oli Tshernobylin lähialueiden ulkopuolella melko vähäistä. Suomessa ja Ruotsissa on selvitetty lasten leukemian ilmaantuvuutta suhteessa laskeumaan, mutta yhteyttä ei ole havaittu. Myöskään useita Euroopan maita kattavassa tutkimuksessa ei ole havaittu lasten leukemian lisääntyneen onnettomuuden jälkeen.

Three Mile Islandin ydinvoimalassa Yhdysvalloissa sattui huomattavasti Tshernobyliä vähäisempi onnettomuus vuonna 1979. Voimalasta vapautui lähinnä jodia ja ksenonia, ympäristön asukkailla annosten arvioitiin olevan alle yhden millisievertin. Seurannassa ei ole voitu todeta syöpäkuolleisuuden lisääntymistä onnettomuuden jälkeen.

Mayakin plutoniumin tuotantolaitoksilta laskettiin 1950-luvun alussa runsaasti radioaktiivisia aineita läheiseen Tetsha-jokeen. Lisäksi laitoksella räjähti korkea-aktiivista jätettä sisältävä säiliö vuonna 1957, minkä vuoksi jouduttiin evakuoimaan yli 10 000 lähiseudun asukasta. Säteilyaltistus aiheutui sekä ulkoisesta gammasäteilystä että sisäisestä altistuksesta strontiumille ja muille radionuklideille. Yli 100 000:n ihmisen on arvioitu saaneen puolen grayn ylittäviä annoksia, mutta yksilökohtaisia annosarvioita ei ole tehty. Väestön kuolleisuutta on seurattu 30 vuoden ajan ja saatu viitteitä suurentuneesta leukemian ja muiden syöpien vaarasta, mutta tutkimus on vielä kesken.

Lasten leukemian esiintyvyyttä ydinvoimaloiden ympäristössä on selvitetty eri maissa sen jälkeen kun Sellafielдин ydinjätteen jälleenkäsittelylaitoksen ympärillä havaittiin näiden syöpien ryvästymä. Sellafielдин löydös perustui seitsemään tapaukseen 30 vuoden aikana, mikä oli 10-kertainen odotettuun tapausmäärään nähden. Sellafielдин tapausten tarkempi analyysi paljasti, että tapauksia oli vain alueella syntyneillä lapsilla, ei sinne myöhemmin muuttaneilla. Tapaus-verrokkitutkimuksessa saatiin viite siitä, että isän saama säteilyannos saattaisi selittää havainnot. Suuremmissa aineistoissa ei kuitenkaan vahvistettu havaintoa. Viitteitä suurentuneesta lasten veri- ja imukudossyöpien esiintyvyydestä saatiin myös kahden muun Iso-Britannian laitoksen ympäristöstä. Muissa maissa, muun muassa Yhdysvalloissa ja Kanadassa, ei ole havaittu vastaavia ryvästymiä. Lisäksi havaittiin, että lasten leukemian ilmaantuvuus oli muuta maata suurempi myös sellaisissa paikoissa, joihin oli suunniteltu ydinlaitosta, mutta sitä ei ollut koskaan rakennettu. Näin ollen Sellafielдин tapausten ainoaksi selitykseksi on jäänyt maantieteellisten tekijöiden vaikutus, mahdollisesti väestön sekoittumisen ja infektioetijöiden välityksellä.

## 7.2 | Säteily ja muut sairaudet kuin syöpä

Eri tutkimuksissa on saatu viitteitä siitä, että ionisoivan säteilyn suuret annokset saattavat aiheuttaa myös muita sairauksia kuin syöpää. Selvin osoitus on säteilyn yhteydestä kilpirauhassairauksiin Hiroshiman ja Nagasakin elonjääneillä sekä sädehoitoa saaneilla potilailla. Muiden sairauksien osalta näyttö on toistaiseksi puutteellista.

Hiroshiman ja Nagasakin atomipommituksissa elonjääneillä on havaittu 2–3 grayn ryhmässä muita hieman suurempi kuolleisuus myös muihin sairauksiin kuin syöpätauteihin. Lähinnä sydän- ja verisuonitaudit sekä hengitysteiden ja ruoansulatuselimistön sairaudet ovat liittyneet säteilyannokseen. Mikään annos-vastemalli ei ole kuvannut yhteyttä muita paremmin. Säteilyn vaikutus ei ole ollut yhteydessä sukupuoleen tai altistusikään. Lisäksi elonjääneiden terveysseurantaan perustuvassa aineistossa vuosilta 1958–1986 maksasairauksien, kilpirauhassairauksien ja kohdun hyvänlaatuisten lihaskasvainten (myoomien) ilmaantuvuudella on todettu annosriippuvuus. Kilpirauhassairauksien riski on lisääntynyt erityisesti nuorena altistuneilla ja myoomien riski lähinnä ensimmäisinä altistusta seuranneina vuosikymmeninä. Eri kilpirauhassairauksista yhteys on havaittu kyhmyjen, hyvänlaatuisten kasvainten (adenoomien) ja kilpirauhasen vajaatoiminnan osalta. Myös lisäkilpirauhasen liikatoiminnan on havaittu olevan yhteydessä annokseen, erityisesti 0,5 graytä ylittävillä annoksilla.

Tutkimuksissa on todettu sädehoitopotilaiden kilpirauhassairauksien, lähinnä kyhmyjen ja vajaatoiminnan lisääntyneen säteilyannoksen myötä. Kilpirauhassairaudet ovat yleistyneet myös atomipommin radiojodilaskeumalle altistuneilla Marshall-saarten asukkailla.

Vasemman puoleisen rintasyövän sädehoidossa osiin sydäimestä kohdistuu joillain hoitomenetelmillä yli viiden grayn sädeannos. Joissain tutkimuksissa on osoitettu vasemmanpuoleisen rintasyövän vuoksi sädehoitoa saaneilla muita rintasyöpäpotilaita suurempi sydäninfarktin vaara. Eri tutkimusten tulokset ovat kuitenkin jossain määrin ristiriitaisia. Erot saattavat liittyä siihen, että nykyisillä hoitomenetelmillä sydämeen kohdistuvat annokset ovat pienempiä eikä vaikutusta ehkä enää niitä käytettäessä ilmene.

## 7.3 | Yhteenveto

Säteilyn terveysvaikutusten luotettavaan selvittämiseen vaaditaan yksilötason tutkimustietoa. Tutkimusaineiston edellytyksiä ovat tutkimusvä-

estön riittävän suuri koko (henkilömäärä ja seurannan pituus), säteilyaltistusta lukuun ottamatta muilta ominaisuuksiltaan vastaava vertailuryhmä, tarkat yksilökohtaiset (ja elinkohtaiset) annostiedot sekä sairauksia koskevien tietojen saatavuus valikoitumattomasti ja kattavasti riittävän pitkältä ajalta.

Säteily on tupakan lisäksi eniten tutkittuja ja parhaiten tunnettuja syövän aiheuttajia. Suurten gamma- ja röntgensäteilyn annosten vaikutuksesta syöpävaaraan on olemassa runsaasti tutkimustietoa. Tärkein yksittäinen tiedon lähde on ollut Hiroshiman ja Nagasakin atomipommituksista elonjääneiden seurantatutkimus. Sädehoitoa saaneiden potilaiden syöpävaaraa selvittäneet tutkimukset ovat myös tuoneet paljon lisätietoa. Paljon huomoin sen sijaan tunnetaan pienten annosten, sisäisen altistuksen (paitsi radonin) ja neutronisäteilyn vaikutuksia. Säteilyn vaikutuksia muihin sairauksiin kuin syöpään tunnetaan huonosti.

Syövän kehittyminen on pitkä ja monivaiheinen prosessi. Eri syöville on lukuisia syytekijöitä ja ne tunnetaan vain osin. Yksittäisessä tapauksessa syövän aiheuttajaa ei yleensä pystytä tunnistamaan. Ionisoivan säteilyn aiheuttaman syövän ei ole todettu poikkeavan milteään ominaisuuksiltaan muiden tekijöiden aiheuttamasta syövästä, eikä tällä perusteella voida tunnistaa säteilyaltistukseen liittyvää syöpää. Syöpä on hyvin yleinen sairaus: se on sydän- ja verisuonitautien jälkeen yleisin kuolinsyy useimmissa teollistuneissa maissa. Syöpätaudit aiheuttavat 20–25 prosenttia kaikista kuolemantapauksista. Noin kolmasosa ihmisistä sairastuu syöpään jossain elämänsä vaiheessa. Täten on ilmeistä, että syöpään sairastuu myös henkilöitä, jotka ovat altistuneet säteilylle esimerkiksi työssään. Silloin voi syntyä tarve arvioida, millä todennäköisyydellä syöpä on aiheutunut työperäisestä säteilyaltistuksesta. Tämä on arvioitavissa, jos säteilyannos tiedetään ja kyseiselle elimelle on olemassa luotettava määrällinen riskiarvio. Vertailuna käytetään samanikäisen, säteilylle altistumattoman henkilön vuosittainen riskiä sairastua samaan syöpälajiin. Vaikka sairastunut henkilö itse usein intuitiivisesti pitää syy-yhteyttä ilmeisenä, todellisuudessa laskennallinen todennäköisyys (syyosuus, ”probability of causation”) on yleensä hyvin pieni.

Säteilyn aiheuttaman syöpävaaran osalta pienten säteilyannosten vaikutusten tutkiminen on keskeisen tärkeää, koska suurin osa väestön säteilyaltistuksesta saadaan jatkuvina tai toistuvina pieninä annoksina. Pienten annosten vaikutusten selvittäminen on kuitenkin huomattavan vaikeaa. Pelkästään pieniä annoksia käsittävissä tutkimuksissa muiden tekijöiden osuus on paljon suurempi kuin säteilyn, minkä vuoksi harhan ja sekoitta-

vien tekijöiden vaikutus on huomattava. Pelkästään suuria annoksia käsittelevistä tutkimuksista saadut arviot ovat sovellettavissa ainoastaan erilaisiin annosvastemalleihin nojautuen.

Säteily pystyy aiheuttamaan useimpia syöpätyyppejä, etenkin leukemiaa ja rintasyöpää. Leukemia poikkeaa muista syövästä monella tärkeällä tavalla: leukemian suhteellinen riski on muita syöpämuotoja suurempi, se ilmenee aiemmin ja annosvaste on lineaaris-kvadraattinen eikä lineaarinen. Joidenkin syöpätyyppien (esimerkiksi lymfoomat, melanooma, eturauhassyöpä, haimasyöpä) yhteys ionisoivaan säteilyyn on edelleen kiistanalainen. Toisten syöpätyyppien riskin, kuten luusyövän, on havaittu suurentuneen lähinnä sädehoitopotilailta. On mahdollista, että nämä syöpätyypit liittyvät joko vain hyvin suuriin elinkohtaisiin annoksiin tai säteilyn ja solusalpajahoidon yhteisvaikutukseen.

Lapsuudessa tapahtuneet altistukset suurentavat syövän suhteellista riskiä enemmän kuin aikuisiällä, jolloin syövän ilmaantuvuus on muutenkin suurempi. Ääriesimerkkinä tästä on kilpirauhassyöpä, jonka vaaraa suurentavat vain lapsuudessa, mutta ei enää aikuisiällä tapahtuneet säteilyaltistukset. Iän riskiä muovaava vaikutus on huomattava myös rintasyövän ja leukemian osalta. Nuorena altistuneilla syöpävaara saattaa vastaavasti pienentyä nopeammin altistuksen jälkeen ainakin suhteellisenä riskinä mitattuna. Tämän ilmiön voidaan tosin ajatella liittyvän myös ikään tarkastelujaksolla (toisin sanoen vaikutuksen ilmenemisaikaan).

Säteilyn aiheuttama syöpävaara ilmenee leukemian osalta 2–5 vuotta altistuksen jälkeen. Kiinteille kasvaimille (kilpirauhassyöpää lukuun ottamatta) vähimmäislatenssiksi on arvioitu 10 vuotta. Leukemian riski pienenee vähitellen ajan myötä, kun taas muiden syöpien riski pysyy suurentuneena useita vuosikymmeniä altistuksen jälkeen. Lyhyessä ajassa saatuihin ulkoisen säteilyn altistuksiin saattaa liittyä annosyksikköä kohti suurempi riski kuin pitkän ajan kuluessa saatuihin (annosnopeusvaikutus). Radonaltistuksen kohdalla taas pienten pitoisuuksien vaikutus annosyksikköä kohti voi olla suuria pitoisuuksia isompi. Säteilyn ja syövän välinen annos-vastekäyrä on todennäköisimmin lineaarinen, alkaen 0,2–0,4 grayn annoksista aina 2–5 grayn tasolle. Suuremmilla annoksilla riski ei enää lisääntynyt. Atomipommien eloonjääneillä lineaarisuus jatkuu suuremmille annoksille kuin sädehoitoa saaneilla potilailta, joilla riski tasaantuu jo pienemmillä annoksilla. Tämä saattaa liittyä annosten epätaasaisen jakaumaan, niiden jakamiseen useaan hoitokertaan (fraktiointiin) tai sädehoitopotilaiden atomipommituksista eloonjääneitä korkeampaan ikään. Tarkan tiedon puuttuessa on perusteltua olettaa lineaarisen an-

nosvasteen jatkuvan myös pienemmille annostasoille. Tällöin vaikutukset ovat kuitenkin niin pieniä, että niitä on äärimmäisen vaikea todentaa (katso luku 5).

Epidemiologisten tutkimusten antamiin riskiarvioihin vaikuttaa muun muassa annosarvioiden luotettavuus. Elinkohtaisen annoksen arviointi ympäristön annosnopeuden tai edes annosmittarin perusteella ei ole helppoa. Annosarvioiden satunnaisvirhe on yleisesti 20–50 prosenttia tai enemmän. Tämä saattaa johtaa todellista 10–50 prosenttia pienempiin riskiarvioihin.

Myös joitain säteilyn vaikutuksille herkkiä erityisryhmiä on kuvattu, esimerkiksi perinnöllistä retinoblastoomaa sairastavat, mutta tähän mennessä löydetty poikkeavat ryhmät ovat olleet niin pieniä, että niillä ei ole merkitystä riskiarvioiden sovellettavuuteen väestötasolla.

On kuitenkin huomattava, että tässä esitetty yleiskuva on yksinkertaistettu. On täysin mahdollista, että vaikutukset voivat olla erilaisia muun muassa eri säteilyn lajeilla, annostasoilla, annosnopeuksilla ja syöpätyypeillä.

Syöpätyyppi	Säteilyaltistus
Leukemia	Atomipommien elonjääneet, syövän tai hyvänlaatuisen sairauden vuoksi sädehoitoa saaneet potilaat, ammattialtistukset
Rintasyöpä	Atomipommien elonjääneet, sädehoitopotilaat, ammattialtistukset, läpivalaisu
Kilpirauhassyöpä	Atomipommien elonjääneet, sädehoitopotilaat, Tsernobylin onnettomuuden laskeuma
Keuhkosyöpä	Atomipommien elonjääneet, sädehoitopotilaat, ammattialtistukset, huoneilman radon
Mahasyöpä	Atomipommien elonjääneet, sädehoitopotilaat
Ruokatorvisyöpä	Atomipommien elonjääneet, sädehoitopotilaat
Paksusuolisyöpä	Atomipommien elonjääneet, sädehoitopotilaat
Virtsarakkosalisyöpä	Atomipommien elonjääneet, sädehoitopotilaat

**TAULUKKO 7.6** Yhteenveto säteilyn aiheuttamasta syöpävaarasta syöpätyypin ja altistuksen mukaan.

## KIRJALLISUUTTA

Boice JD, Land CE, Preston DL. Ionizing Radiation. Kirjassa Schottenfeld D, Fraumeni JF (toim). Cancer Epidemiology and Prevention. New York: Oxford University Press, 1996.

Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. BEIR V. Washington DC: National Academy Press, 1990.

International Agency for Research on Cancer (IARC). Ionizing Radiation, Part 1: X- and gamma ( $\gamma$ ) radiation and neutrons. IARC Monographs Vol 75. Lyon: IARC, 2000.

Pierce DA, Preston DL. Radiation-related cancer risks at low dose among atomic bomb survivors. *Radiat Res* 2000;154:178-186.

Pierce DA, Shimizu Y, Preston DL ym. Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12, Part I. Cancer: 1950–1990. *Radiat Res* 1996; 146:1-27.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1994 Report. New York: United Nations, 1994.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report. Vol II: Effects. New York: United Nations, 2000.