

TSHERNOBYLIN ONNETTOMUUDEN
AIKAAN KIOVASSA OLLEIDEN
SUOMALAISTEN
SÄTEILYALTISTUMINEN JA
SYÖPÄILMAANTUVUUS

Anna Lahkola

STUKin raporttisarjoissa tekijöiden esittämät johtopäätökset eivät välttämättä edusta Säteilyturvakeskuksen virallista kantaa.

ISBN 951-712-607-7 (nid.)

ISBN 951-712-608-5 (pdf)

ISSN 0781-1705

Dark Oy, Vantaa 2002

Myynti:

STUK – Säteilyturvakeskus

PL 14, 00881 Helsinki

Puh. (09) 759 881

Faksi (09) 759 88 500

LAHKOLA Anna. STUK-A190. Tshernobylin onnettomuuden aikaan Kiovassa olleiden suomalaisten säteilyaltistuminen ja syöpäilmaantuvuus. Helsinki 2002, 49 s.

Avainsanat säteily, syöpä, Tshernobyli

Tiivistelmä

Pro gradu -työssä selvitettiin Kiovassa Tshernobylin onnettomuuden aikaan työskennelleiden suomalaisten rakennustyöntekijöiden ja heidän perheenjäsentensä (n=139) säteilyaltistumista ja syöpäsairastuvuutta. Työn tavoitteena oli arvioida tämän ryhmän säteilyaltistumista yhdistämällä eri menetelmillä saatu ryhmää koskeva altistustieto ja verrata ryhmän syöpäsairastuvuutta muiden suomalaisten syöpäsairastuvuuteen.

Säteilyaltistumisen arviointi perustui takautuvasti kolmeen eri menetelmään, filmidosimetriaan, kokokehomittaukseen ja kromosomianalysiin. Kiivaan onnettomuuden jälkeen takaisin palanneiden työntekijöiden säteilyaltistumista oli kartoitettu filmidosimetreilla vuosina 1986 ja 1987. Kokokehomittaukset oli tehty Säteilyturvakeskuksessa toukokuussa 1986 ja niiden perusteella oli laskettu sekä efektiivinen annos että kilpirauhasannos. Kromosomianalyysit oli tehty tutkittavien henkilöiden verinäytteistä, jotka oli kerätty Työterveyslaitoksella toukokuussa 1986 ja analysoitu Säteilyturvakeskuksessa myöhemmin samana tai seuraavana vuonna. Tutkimusväestön taustatiedot, kuten nykyinen ammatti, nykyinen kotikunta sekä mahdollinen maastamuutto- tai kuolinpäivä saatiin Väestörekisterikeskuksesta. Tutkimusväestössä seuranta-aikana 26.4.1986–31.12.1999 ilmenneet syöpätapaaukset selvitettiin Suomen Syöpärekisteristä.

Altistuksen arviointimenetelmien tuottamien tulosten mukaan tutkimusväestön säteilyannokset olivat pieniä. Filmeillä mitatut ulkoiset annokset olivat tutkimusväestössä keskimäärin 3,31 mSv sekä kokokehomittauksen perusteella määritetyt sisäiset annokset 0,5 mSv ja kilpirauhasannokset 11 mSv. Kromosomianalyyseissä löydettyjen disentrinen kromosomien frekvenssi oli keskimäärin 0,0008 ja kaikkien kromosomiaberraatioiden 0,005.

Väestössä ilmennyt syöpien kokonaismäärä oli odotettua suurempi. Tutkimusväestössä ilmenneiden syöpätapausten absoluuttinen lukumäärä on kuitenkin niin pieni, että tuloksen voidaan ajatella olevan ennemminkin sattumaa kuin todellinen. Lisäksi havaitut syöpätyypit olivat enimmäkseen sellaisia, joita ei yleensä ole pidetty säteilyaltistukseen liittyvinä.

LAHKOLA Anna. STUK-A190. Radiation exposure and cancer incidence among a Finnish group residing in the city of Kiev at the time of the Chernobyl accident. Helsinki 2002, 49 pp.

Keywords radiation, cancer, Chernobyl

Summary

This dissertation is based on a study examining the radiation exposure and cancer incidence among a cohort of Finnish construction workers and their families (n=139) residing in the city of Kiev, Ukraine, at the time of the Chernobyl nuclear power plant accident. The aim of the study was to assess the radiation exposure of the study population by integrating all material considering the cohort and compare the cancer incidence of the cohort with the cancer incidence of the common Finnish population.

The radiation exposure assessment of the cohort was based retrospectively on three different methods: the film dosimetry, the whole body counting and the chromosome analysis. Those who returned to Kiev after the accident and stayed there during years 1986 and 1987 were measured using the film dosimetry. The whole-body counting measurements were performed at the Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK) in May 1986. Both the internal effective dose and the thyroid dose were estimated basing on the measurements. The chromosome analyses were performed during years 1986 and 1987 at STUK based on the blood samples collected at Finnish Institute of Occupational Health in May 1986. The background information of the study population, for example, the present occupation, the present home municipality and the possible date of emigration or death, were collected from the Population Register Centre. All cancer cases in the cohort between April 26, 1986 and December 31, 1999 were collected from the Finnish Cancer Registry.

The radiation doses among the study population were minor. According to the film dosimetry the mean external dose was 3,31 mSv and according to the whole body counting measurements the mean internal dose and the mean thyroid dose were 0,5 mSv and 11 mSv, respectively. The chromosome analyses showed the mean frequency of dicentric chromosomes to be 0,0008, whereas that of total chromosome aberrations was 0,005.

The total observed cancer incidence in the study population was higher than expected. However, the absolute number of the cancer cases is so small that the result is likely to be a coincidence. In addition, the observed cases represent cancer types which are not usually associated to radiation exposure.

Pro gradu -tutkielma
Ympäristötieteen koulutusohjelma
Kuopion yliopiston ympäristötieteiden laitos
Joulukuu 2001

Esipuhe

Tämä pro gradu -tutkielma käsittelee Tshernobylin onnettomuuden aikaan Kiovassa olleiden suomalaisten rakennustyöntekijöiden ja heidän perheidensä säteilyaltistumista ja syöpäseurantaa. Tutkielma perustuu tutkimukseen, johon osallistuivat allekirjoittaneen lisäksi Anssi Auvinen, Päivi Kurttio, Carita Lindholm, Tua Rahola ja Eija Vartiainen Säteilyturvakeskuksesta, Jukka Juutilainen Kuopion yliopistosta sekä Eero Pukkala Suomen Syöpärekisteristä.

Pro gradu -työ tehtiin Säteilyturvakeskuksessa, Tutkimus ja ympäristövalvonta –osaston Säteilybiologian laboratoriossa. Sen ohjaajina toimivat professori Jukka Juutilainen Kuopion yliopistosta ja erikoistutkija Päivi Kurttio Säteilyturvakeskuksesta sekä tarkastajina professori Jukka Juutilainen Kuopion yliopistosta ja tutkimusprofessori Anssi Auvinen Säteilyturvakeskuksesta.

Haluan esittää parhaimmat kiitokseni neuvoista ja tuesta työni ohjaajille sekä kaikille tutkimukseen osallistuneille. Kiitän myös koko Säteilybiologian laboratorion henkilökuntaa hyvästä työtoveruudesta ja mukavista hetkistä. Kiitokset myös perheelleni ja läheisilleni siitä suuresta ymmärryksestä ja tuesta, jota sain osakseni työni tekemisen aikana.

Helsingissä 14.12.2001

Anna Lahkola

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Summary	4
Esipuhe	5
Sanasto	7
1 Johdanto	9
2 Ionisoiva säteily	10
2.1 Ionisoivalle säteilylle altistuminen ja altistuksen arviointi	10
2.2 Säteilyn deterministiset terveysvaikutukset	12
2.3 Säteilyn stokastiset terveysvaikutukset	15
2.3.1 Stokastisten vaikutusten synty	15
2.3.2 Perinnöllinen haitta	15
2.3.3 Syövän synty	15
2.3.4 Säteily ja syöpä	16
3 Tshernobylin onnettomuus ja radioaktiivinen laskeuma	19
3.1 Onnettomuuden syyt ja tapahtumien kulku	19
3.2 Laskeuma	21
3.3 Onnettomuudesta aiheutuneet säteilyannokset	22
4 Tshernobylin onnettomuus ja terveysvaikutusten tutkimus	23
4.1 Onnettomuuden seurausten tutkimus	23
4.2 Puhdistustyöntekijöistä tehdyt tutkimukset	23
4.3 Väestötutkimukset Tshernobylin lähivaltioissa	26
4.3.1 Lasten syöpäriski	26
4.3.2 Koko väestön syöpäriski	28
5 Tutkimuksen tavoitteet	31
6 Aineisto ja menetelmät	32
6.1 Tutkimusväestö	32
6.2 Säteilylle altistumisen arviointi	33
6.3 Syöpäseuranta	36
6.4 Tietosuoja ja eettiset kysymykset	36
7 Tulokset	38
7.1 Säteilylle altistuminen	38
7.2 Syöpäilmaantuvuus	42
8 Tulosten pohdinta	43
9 Kirjallisuusviitteet	46

Sanasto

Absorboitunut annos = säteilystä sen kohteeseen siirtynyt keskimääräinen energia kohteen massayksikköä kohti, yksikkö Gray (Gy). $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

Aktiivisuus = alkuaineessa tapahtuvien ydinmuutosten lukumäärä aikayksikössä, yksikkö Becquerel (Bq). $1 \text{ Bq} = 1 \text{ ydinmuutos sekunnissa}$.

Alfasäteily = tiheään ionisoivaa hiukkassäteilyä, jossa radioaktiivinen alkuaine lähettää heliumatomin ytimen eli alfahiukkaseen

Beetasäteily = ionisoivaa hiukkassäteilyä, jossa radioaktiivinen alkuaine lähettää elektronin tai positronin

Deterministiset terveysvaikutukset = säteilyn aiheuttamia terveysvaikutuksia, jotka ilmenevät pian altistumisen jälkeen ja aiheutuvat suurista annoksista. Näitä ovat esim. säteilysairaus ja ihovaurio.

Dosimetria = säteilyn mittaaminen

EAR = excess absolute risk, absoluuttinen lisäriski

ERR = excess relative risk, suhteellinen lisäriski

Gammasäteily = suurenergistä ionisoivaa sähkömagneettista säteilyä, jossa säteilyenergiaa kuljettavat fotonit

Ekvivalenttiannos = säteilyn laatueroilla painotettu absorboitunut annos, yksikkö Sievert (Sv). $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$. Laatueroilla painotetut annokset ovat erilaisia eri säteilylajeille ja vaihtelevat välillä 1–20.

Efekttiivinen annos = stokastisen riskin painotuskertoimella ja kudoksen laatueroilla painotettu ekvivalenttiannos, yksikkö Sievert (Sv). $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$. Eri kudokset ovat eri tavalla herkkiä säteilylle, joten kudoksen laatueroilla kuvaa sen herkkyyttä suhteessa muihin kudoksiin.

Hiukkassäteily = ionisoivaa säteilyä, jossa energiaa väliaineessa kuljettavat hiukkaset kuten elektronit tai neutronit. Hiukkassäteilyä on esim. beetasäteily.

Ilmaantuvuus = tiettyyn sairauteen sairastuneiden henkilöiden osuus saman sairauden suhteen terveistä henkilöistä tiettyinä ajanjaksona

Ionisoimaton säteily = säteilyä, jonka energia ei riitä ionisaation tapahtumiseen kohteessa. Ionisoimatonta säteilyä on esim. matkapuhelimien lähettämä radiotaajuussäteily.

Ionisoiva säteily = säteilyä, jonka energia on riittävän suuri aiheuttamaan kohteessaan ionisaatiota. Ionisoivaa säteilyä on esim. gammasäteily.

Kollektiivinen annos = säteilystä jollekin väestölle aiheutunut kokonaisannosekvivalentti, joka muodostetaan väestön lukumäärän ja heidän saamansa annoksen perusteella, yksikkö mansievert (manSv).

OR = odds ratio, ristitulosuhte

Puoliintumisaika = aika, jonka kuluessa radionuklidin aktiivisuus pienenee puoleen alkuperäisestä aktiivisuudesta

Radioaktiivinen aine l. radionuklidi = epästabiili eli pysymätön alkuaine, joka muuttuu spontaanisti toiseksi alkuaineeksi radioaktiivisen hajoamisen kautta.

Riski = (epidemiologiassa) todennäköisyys jonkun ilmiön, esim. sairauden, tapahtumiselle tietyn ajanjakson kuluessa

RR = rate ratio, taajuussuhde

SIR = standardised incidence ratio, vakioitu ilmaantuvuussuhde

SMR = standardised mortality ratio, vakioitu kuolleisuussuhde

Stokastiset terveysvaikutukset = säteilyn aiheuttamia terveysvaikutuksia, jotka ilmenevät vuosia altistumisen jälkeen. Näitä ovat syöpä ja perinnöllinen haitta.

Sähkömagneettinen ionisoiva säteily = ionisoivaa säteilyä, jossa energia etenee väliaineessa aaltoliikkeen muodossa. Sähkömagneettista ionisoivaa säteilyä on esim. gammasäteily.

Säteily = tilassa etenevää energiavirtaa, joka on useimmiten lähtöisin radionuklideista (poikkeuksena röntgensäteily). Voidaan jakaa sähkömagneettiseen ja hiukkassäteilyyn tai toisaalta ionisoivaan ja ionisoimattomaan säteilyyn.

1 Johdanto

Entisessä Neuvostoliitossa, nykyisen Ukrainan alueella sijaitsevassa Tshernobylin ydinvoimalassa tapahtui 26.4.1986 historian pahin ydinvoimalaonnettomuus. Onnettomuudessa yksi voimalan neljästä ydinreaktorista tuhoutui täysin ja sen sisällä ollut radioaktiivinen materiaali vapautui ympäristöön. Yhteensä voimalan ympäristöön vapautui arviolta 10^{18} Bq radioaktiivista materiaalia. Pahiten saastuivat voimalan lähialueet, mutta radioaktiivista laskeumaa kulkeutui myös muualle Eurooppaan.

Onnettomuuden aikaan pieni joukko suomalaisia rakennustyöntekijöitä (n=139) oli työkomennuksella Kiovassa, n. 100 km:n päässä Tshernobylin ydinvoimalasta (Kuva 4). Onnettomuuden jälkeen heräsi huoli tämän suomalaisryhmän säteilyaltistumisesta ja sen mahdollisista terveysvaikutuksista. Tämän vuoksi heidän saamaansa säteilyannosta pyrittiin selvittämään. Säteilyaltistuksen arvioinnissa käytettiin kolmea eri mittausmenetelmää; kromosomianalyysiä, kokokehomittaus ja filmidosimetriaa. Mittaukset tehtiin osittain Kiovassa ja osittain Säteilyturvakeskuksessa. Mittaustietoja on yhteensä 135 henkilöstä ja näistä laskettuja annostietoja 116 henkilöstä.

Tämän pro gradu -työn tavoitteena oli arvioida Kiovassa Tshernobylin onnettomuuden aikaan olleiden suomalaisten rakennustyöntekijöiden ja heidän perheidensä säteilyaltistumista yhdistämällä eri menetelmillä saatu säteilyaltistukseen liittyvä tieto sekä verrata heidän syöpäsairastuvuuttaan vastaavanlaiseen suomalaisväestöön.

2 Ionisoiva säteily

2.1 Ionisoivalle säteilylle altistuminen ja altistuksen arviointi

Säteilyä voidaan kuvata pieninä energiapaketteina, jotka etenevät tilassa suurella nopeudella. Riippuen energiapakettien energiasisällöstä säteily tunkeutuu eri tavalla kiinteisiin aineisiin ja luovuttaa niihin energiaa. Säteilylajeja on erilaisia, mutta koska tämä tutkielma käsittelee yksinomaan ionisoivaa säteilyä, tässä sanalla säteily tarkoitetaan yleisesti ionisoivaa säteilyä.

Säteily on useimmiten lähtöisin epästabiileista alkuaineista, radionuklideista, jotka muuttuvat spontaanisti toisiksi alkuaineiksi radioaktiivisen hajoamisen kautta. Radionuklidin ominaisuuksia kuvataan erilaisilla suureilla, joita ovat aktiivisuus ja puoliintumisaika. Suuri aktiivisuus ja esimerkiksi kymmeniä vuosia pitkä puoliintumisaika ovat yhteydessä radionuklidin haitallisuuteen.

Kun halutaan tietoa säteilyn vaikutuksista sen kohteessa, kuten ihmisessä, käytetään dosimetrisia suureita. Absorboitunut annos on dosimetrian fysikaalinen perussuure, josta muut suureet, kuten säteilyn laadun huomioiva ekvivalenttiannos ja kudoksen herkkyyden huomioiva efektiivinen annos, on johdettu erilaisten painotuskertoimien (ICRP 1991) avulla. Kertoimia on olemassa eri säteilylajeille sekä eri kudoksille ja niillä pyritään kuvaamaan eri terveysvaikutusten riskiä. Koska kertoimet on määritelty pitkälti suurten altistusten perusteella, ne eivät välttämättä anna oikeanlaista kuvaa sellaisissa tapauksissa, joissa säteilystä aiheutunut annos on hyvin pieni.

Ihminen voi altistua säteilylle kahdella eri tavalla, ulkoisesti ja sisäisesti. Näin ollen myös annos voi olla joko ulkoinen tai sisäinen. Elimistön ulkopuolella vaikuttava säteilylähde aiheuttaa ulkoisen annoksen ja elimistöön sisään joutunut säteilylähde sisäisen annoksen. Säteilylähde eli radionuklidi voi kulkeutua elimistöön ravinnon, juomaveden, hengitysilman tai ihon, erityisesti haavojen, kautta. Saatu säteilyannos, altistumistapa ja säteilyn laatu vaikuttavat merkittävästi säteilyn mahdollisiin seurauksiin. Näistä seikoista johtuen esimerkiksi ihmisen saaman säteilyannoksen arvioiminen on erilaista eri altistumistapauksissa.

Säteilyannoksen arvioinnissa käytettäviä menetelmiä on useita. Kun halutaan selvittää ihmisen saamaa ulkoista annosta, voidaan käyttää mittarina esimerkiksi filmiä. Tämän lisäksi ulkoista säteilyannosta voidaan selvittää biologisen dosimetrian menetelmillä. Sisäisestä annoksesta saadaan tietoa tekemällä kokokehomittauksia.

Filmidosimetrin toiminta perustuu säteilyn siinä aiheuttamaan mustumaan, joka on määrällisesti verrannollinen säteilyannokseen. Filmi luetaan jälkikäteen. Se on yksi vanhimmista, tunnetuimmista ja käytetyimmistä säteilyn ilmaisimista ja sitä käytetään paljon henkilökohtaisen säteilyannoksen mittaamiseen, sillä se on menetelmänä halpa ja sillä pysytään analysoimaan myös säteilyn laatua. Filmi soveltuu useimpien säteilylajien mittaamiseen.

Biologinen dosimetria on fysikaalista annosmittausta täydentävä menetelmä, joka kertoo kudokseen absorboituneen annoksen biologisista vaikutuksista. Se on käyttökelpoinen kaikille säteilylajeille ja myös sellaisissa tapauksissa, joissa epäillään annosylitystä tai kun annosmittaria ei ole käytetty ollenkaan. Biologisessa dosimetriassa käytetään menetelmänä esimerkiksi kromosomianalyysiä, joka tehdään veren valkosoluista. Kromosomianalyysissä etsitään lähinnä disentrisiä ja rengaskromosomeja. Disentrisissä kromosomeissa on kaksi sentromeeria eli yhtymiskohtaa, kun normaaleissa kromosomeissa niitä on vain yksi (Kuva 1). Rengaskromosomit ovat nimensä mukaan renkaan muotoisia, kun normaalin kromosomin päät ovat vapaina. Näitä kahta kromosomimuutosta, erityisesti disentrisiä kromosomeja, pidetään säteilyn merkkivaurioina (Lindholm 2000). Disentriset kromosomit häviävät verenkierrosta muutamien kuukausien kuluessa, joten kromosomianalyysi on yleensä syytä tehdä mahdollisimman pian säteilylle altistumisen jälkeen.

Kromosomianalyysin avulla voidaan määrittää ulkoisesta altistuksesta aiheutunut annos luotettavammin kuin sisäisestä altistuksesta aiheutunut annos. Kehoon joutunut radionuklidi eli sisäinen säteilijä aiheuttaa myös kromosomivaurioita, mutta niiden määrää ei kaikissa tapauksissa voida käyttää annosmääritykseen. Jos säteilijä lisäksi hakeutuu vain tiettyyn elimeen tai kehon osaan, ei koko kehossa kiertävien lymfosyyttien kromosomianalyysin perusteella tehty annosarvio ole luotettava. Vain niissä tapauksissa, joissa säteilijä on tasaisesti jakautunut kehoon, voidaan annosarvio suorittaa luotettavasti. Esim. tritiumista, joka absorboituu tritioituna vetenä, voidaan kokokehoannos määrittää. Muutoin kromosomianalyysiä käytetään ulkoisen annoksen mittarina. (IAEA 1986)

Kokokehomittaus soveltuu sisäisen säteilyaltistumisen arviointimenetelmäksi silloin, kun mitattava radionuklidi lähettää gammasäteilyä. Kokokehomittauslaitteistossa säteilynlmaisimena on yleensä NaI(Tl)-kide. Laitteistolla havaitaan kehossa olevien radioaktiivisten aineiden hajoaminen ja tulokseksi saadaan radionuklidien aktiivisuusjakauma. Pelkkä aktiivisuus ei kuitenkaan kerro varsinaista säteilyannosta, vaan se pitää arvioida erikseen



Kuva 1. Kromosomeja. Kuvassa vasemmalla alhaalla nähdään disentriininen kromosomi (Kuva: Carita Lindholm)

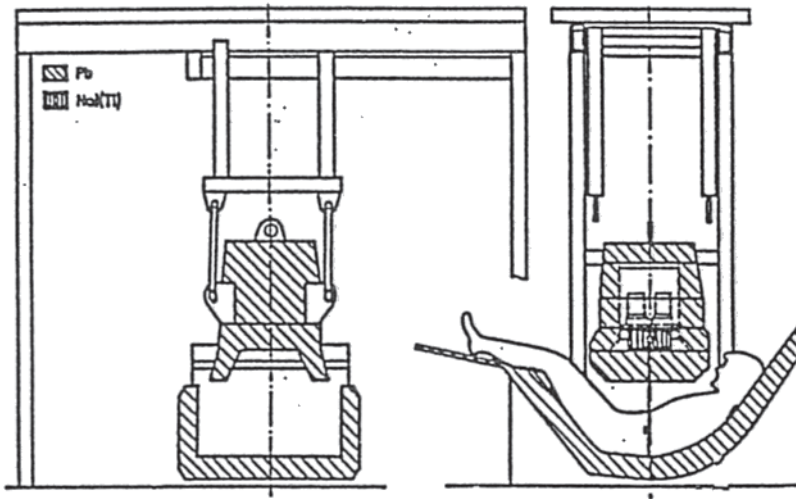
kullekin mitatulle henkilölle. Koska mittauksella pystytään määrittämään vain mittaushetkellä kehossa jäljellä oleva aktiivisuus, on annosarviota tehtäessä tärkeää saada tietoa myös altistumistapahtumasta ja radioaktiivisen aineen saannon määrästä. Kokokehomittauksen ajoittaminen oikeaan ajankohtaan onkin totuudenmukaisen annoksen saamiseksi hyvin tärkeää.

Kokokehomittauksessa käytetään pääasiassa kahta erilaista geometriaa, joko tuolin tai sängyn muotoon rakennettua laitteistoa (Kuvat 2 ja 3).

2.2 Säteilyn deterministiset terveysvaikutukset

Säteilyn deterministiset eli suorat vaikutukset aiheutuvat suurista annoksista ja niitä ovat mm. säteilytauti, ihovaurio ja kilpirauhasvaurio. Deterministiset vaikutukset johtuvat laajamittaisesta solutuhosta, jonka syynä on säteilyn soluissa aiheuttamat lukuisat, vakavat DNA-vauriot. Determinististen vaikutusten vakavuus riippuu saadusta säteilyannoksesta. Ne tulevat esiin melko pian altistumisen jälkeen ja niille voidaan yleensä asettaa jonkinlainen kynnyisarvo.

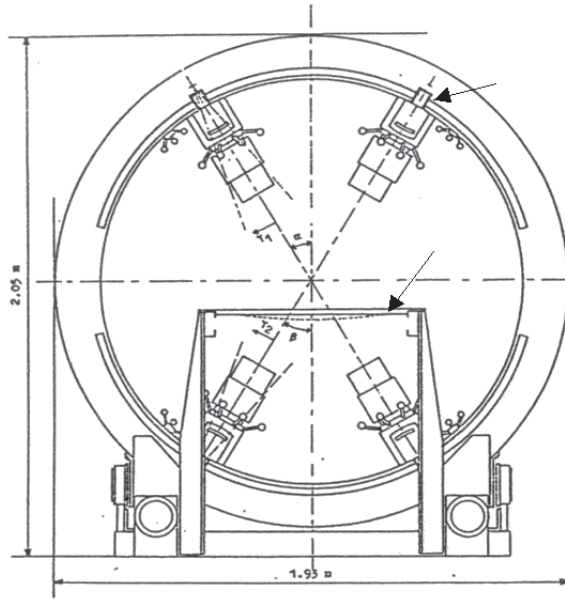
Säteilytauti ilmenee yleensä sellaisessa tapauksessa, jos ihminen on saanut vuorokaudessa yli yhden Gy:n kokokehoannoksen. Säteilytaudin



Kuva 2. Tuoligeometrian muotoon rakennettu kokokehomittauslaitteisto. (Kuva: Rahola, Suomela, Illukka, Puhakainen ja Pusa, 1987)

ensioireita ovat ruokahaluttomuus, pahoinvointi, väsymys ja lämmön nousu. Alkuoireiden jälkeen seuraa viikkojenkin mittainen oireeton kausi, jonka jälkeen kehittyy varsinainen säteily sairaus, jonka vakavuus riippuu saadusta annoksesta. Lievimmät myöhäisoreet liittyvät luuytimen vähäisiin vaurioihin, kun taas pahimmassa tapauksessa voi säteily sairaus johtaa vakavan luuydin vaurion ja suoliston limakalvon tuhoutumisen kautta kuolemaan.

Ionisoivan säteilyn aiheuttamat ihovauriot ovat palovamman kaltaisia. Erityisesti iholle on haitallista voimakas beetasäteily, sillä se absorboituu ihoon tehokkaasti. Ensioireena säteilyn aiheuttamasta ihovauriosta on punoitus, jonka kynnsarvo on n. 6–8 Gy. Punoitus ilmenee yleensä muutamien tuntien kuluttua altistuksesta ja häviää vuorokaudessa. Sitä voi seurata viikkojen ja jopa kuukausien kuluttua myöhemmät punoitusaallot. Lievimmässä tapauksessa myöhempi punoitusaalto voi päättyä kuivaan hilseilyyn, mutta pahimmillaan se voi johtaa jopa altistuneen ihoalueen kuolioon. Varsin usein vaurioalue saattaa vielä laajentua alkuperäisestään. Ihoon syntyneet haavaumat myös paranevat erittäin huonosti ja näistä teki-joistä johtuen ihovaurion ollessa esimerkiksi raajojen alueella on amputaatio usein välttämätön toimenpide.



Kuva 3. Sänkygeometrian muotoon rakennettu kokokehomittauslaitteisto. Kuvassa ylempi nuoli osoittaa yhtä laitteen kehukseen asetetusta neljästä ilmaisimesta. Mittauksen aikana kehys liikkuu hitaasti pituussuunnassa mitattavaan nähden, jotta saadaan mitatuksi tasaisesti kehossa oleva aktiivisuus. Kuvassa alempi nuoli osoittaa sänkytasoa, jolle tutkittava henkilö asettuu makaamaan mittauksen ajaksi pää katsojaan päin. (Kuva: Rahola ym. 1987)

Säteilyn aiheuttama kilpirauhasvaurio johtuu kilpirauhasen verisuonien vaurioitumisesta ja voi johtaa kilpirauhasen pysyvään vajaatoimintaan. Useimmiten kilpirauhaseseen vaikuttaa radioaktiivinen jodi, joka elimistöön joutuessaan hakeutuu sinne aktiivisesti. Hakeutuminen johtuu siitä, että suurin osa elimistön stabiilistakin jodista sijaitsee kilpirauhasessa. Radioaktiivisen jodin lisäksi myös ulkoinen gamma- tai röntgensäteily voi tuhota kilpirauhaskudosta.

2.3 Säteilyn stokastiset terveysvaikutukset

2.3.1 Stokastisten vaikutusten synty

Stokastiset terveysvaikutukset ilmenevät usein ilman säteilyannoksen kynnysarvoa ja niitä kutsutaan pitkäaikaisiksi haittavaikutuksiksi. Stokastisia terveysvaikutuksia ovat perinnöllinen haitta ja syöpä. Ne saavat alkunsa perimältään vaurioituneesta, mutta henkiin jääneestä solusta, eivätkä siis perustu solukuolemaan kuten deterministiset vaikutukset. Ne tulevat ilmi vasta vuosien kuluttua altistuksesta, eikä niille voida asettaa annoksen suhteen minkäänlaista turvarajaa, jonka alapuolella haittaa ei esiintyisi.

2.3.2 Perinnöllinen haitta

Säteilyn perinnöllinen haitta tarkoittaa sitä, että vanhemman sukusoluun säteilystä syntynyt mutaatio periytyy jälkeläiselle ja aiheuttaa tässä jonkin muutoksen tai sairauden. Jos mutatoituneita sukusoluja, esim. miehen siittiöitä, on vain muutama monien joukossa, on erittäin sattumanvaraista, että juuri vaurioitunut sukusolu valikoituu hedelmöitykseen ja siirtää mutaation seuraavaan sukupolveen. Viitteitä perinnöllisistä haitoista on havaittu säteilylle altistuneiden lapsissa, mutta niiden lisääntymistä on ollut vaikeaa todentaa epidemiologisella tutkimuksella. Tämä johtuu siitä, että perinnölliset haitat aiheutuvat perinnöllisten sairauksien tapaan yleensä useiden eri geenien mutaatioista ja ovat täten luonteeltaan varsin moninaisia.

2.3.3 Syövän synty

Syövän synty eli karsinogeneesi on monimutkainen ja osin vielä tuntematon prosessi. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation eli UNSCEAR jakaa säteilyn aiheuttaman syövän synnyn kuuteen vaiheeseen; vaurion syntyyn, vaurion epäonnistuneeseen korjaukseen, initiaatioon, promotioon, neoplastiseen konversioon ja progressioon (UNSCEAR 2000, vol. II).

Syövän syntymisen ensimmäisessä vaiheessa soluun syntyy DNA-vaurio. Toisessa vaiheessa vaurio jää korjaamatta tai sen korjaus epäonnistuu, mikä johtaa initiaatioon, jossa DNA:ssa ilmenee mutaatio ja solu muuttuu potentiaalisesti syöpäsoluksi. Promotiovaiheessa tämä solu alkaa ympäristöstään välittämättä jakaantua nopeasti osin syntyneen mutaation ja osin solujen välisen säätelyn peittämisen takia. Solukon vilkkaan jakautumisen vuok-

si syntyy lisää mutaatioita, jotka edistävät sen normaalista poikkeavaa toimintaa. Nämä mutaatiot johtavat syövän synnyn seuraavaan vaiheeseen, neoplastiseen konversioon, jossa solut ilmentävät yhä enemmän syöpäsoluille ominaisia piirteitä. Niiden jakautuminen kiihtyy entisestään ja niistä alkaa muodostua syöpäkasvain. Syövän synnyn viimeisessä vaiheessa, progressiossa, syntynyt pahanlaatuinen kasvain levittäytyy ympäristöönsä. Kasvain voi levittäytyä invasoimalla eli tunkeutumalla ympäröivään kudokseen tai lähettämällä metastaaseja eli etäispesäkkeitä elimistön nestekiertojen mukana muualle elimistöön.

Syövän synty on pitkä ja monivaiheinen prosessi, jossa jokaisessa vaiheessa kasvainsolukkoon syntyy uusia mutaatioita, jotka edistävät kasvaimen kasvua ja muuttumista pahanlaatuiseksi. Syöpä ei johdu vain yhdestä mutaatiosta, vaan sen syntymiseen vaaditaan pitkällä aikavälillä useita peräkkäisiä mutaatioita ja niiden aiheuttamia muutoksia solujen toiminnassa ja tasapainossa. Mutaatioiden lisäksi syövän syntyä voivat edistää useat epigeneettiset tapahtumat, joissa tiettyjen geenien ilmentyminen ja toiminta muuttuu ilman genomiin syntynyttä mutaatiota. Epigeneettisissä tapahtumisissa muutos lähtee solun toiminnan tasolta. Esimerkiksi tällainen tapahtuma on DNA:n metylaatio, jossa normaalisti säädellään geenien aktiivisuutta. Sääteilyssä tapahtuvat virheet voivat johtaa toisten geenien toiminnan vahvistumiseen tai toisten heikentymiseen, mikä voi edistää syövän syntyä.

2.3.4 Säteily ja syöpä

Syöpä on määrällisesti merkittävin säteilyn aiheuttama terveyshaitta (Paile ym. 1996). Säteilystä aiheutuneen syövän syntyyn vaikuttavat kuitenkin muutkin tekijät. Iän lisääntyessä mm. solujen DNA:n korjausmekanismit heikkenevät, jolloin syöpä on vanhemmilla todennäköisempää; toisaalta myös vielä kehittyvä yksilö, sikiö, on erityisen herkkä saamaan säteilystä syövän. On myös olemassa normaaliväestöä säteilyherkempiä henkilöitä, jotka voivat sairastua säteilyaltistuksen takia syöpään herkemmin. Säteilyherkkyys voi johtua esimerkiksi DNA:n korjausmekanismien toiminnan häiriöistä. Myös tiettyihin perinnöllisiin sairauksiin liittyy erityinen syöpäriski, joka voi ilmetä sekä itse sairailta että ilmiasultaan terveillä sairauden kantajilla. Säteily voi aiheuttaa syöpää myös yhdessä jonkin toisen aineen, vaikkapa kemikaalin kanssa. Esimerkkinä tästä ovat radon ja tupakointi, joiden yhteisvaikutuksen aiheuttama syöpäriski on suurempi kuin radonin yksinään aiheuttama syöpäriski (Lubin ym. 1990).

Tärkeää tietoa säteilyaltistuksen ja syövän yhteyksistä on saatu eri-

tyisesti Hiroshiman ja Nagasakin atomipommitusten eloonjääneiden seurantatutkimuksista (Preston ym. 1994, Thompson ym. 1994, Pierce ym. 1996, Pierce ja Mendelsohn 1999). Annosten sekä syöpäilmaantuvuus- ja kuolleisuuslukujen perusteella on tutkimuksissa määritetty eri syöpälaaduille annosvastekäyrät, joiden avulla on saatu paljon lisätietoa säteilyn yhteydestä syövän ilmaantuvuuteen. Esimerkiksi kiinteiden kasvainten kohdalla annosvastekäyrä on lineaarinen. Atomipommitusten eloonjääneiden tutkimusten erityisiä vahvuuksia ovat altistuneiden suuri määrä, laaja ikäjakauma, annosten moninaisuus, yksilöllinen annostieto sekä pitkä, vuosikymmenien pituinen seuranta-aika.

Atomipommitusten eloonjääneiden seurantatutkimuksissa on havaittu, että säteily voidaan liittää useisiin syöpälaatuihin, kuten esimerkiksi leukemiaan, ruuansulatus- ja hengityselimistön syöpään, mahasyöpään, naisten rintasyöpään, keuhkosityöpään, kilpirauhassyöpään, paksusuolen syöpään, lymfoomaan ja myeloomaan (Preston ym. 1994, Thompson ym. 1994, Pierce ym. 1996). Tärkeinä näistä voidaan pitää leukemiaa ja kilpirauhassyöpää. Leukemian riskin on laskettu olevan suurempi, sillä atomipommitusten eloonjääneiden suhteellinen lisäriski sairastua leukemiaan oli keskimäärin 3,9/Sv (Preston ym. 1994). Leukemia myös ilmenee muita syöpiä nopeammin altistuksen jälkeen eli sen latenssiaika on lyhyempi kuin muiden syöpien (UNSCEAR 2000, vol. II). Kilpirauhassyövän riskin havaittiin taas suurenevan eniten lapsuuden aikana saadusta altistuksesta. Atomipommitusten eloonjääneiden tutkimuksissa 0–9-vuotiaina altistuneiden suhteellinen lisäriski sairastua kilpi-rauhas- ja syöpään oli huomattavasti suurempi, 9,46/Sv, kuin 20–39-vuotiaina altistuneiden, 0,34/Sv (Thompson ym. 1994).

Leukemian ilmaantuvuus on Suomessa vuosittain n. kuusi tapausta 100 000 henkilövuotta kohti. Ilmaantuvuus on erilainen eri ikäryhmissä ja aikuisilla ilmeneekin 5/6 osaa kaikista leukemiatapauksista vuosittain. Leukemiaa esiintyy monia alatyyppejä, mutta karkeasti ne voidaan jakaa akuutteihin ja kroonisiin muotoihin. Leukemian etiologisia tekijöitä tunnetaan puutteellisesti, mutta esimerkiksi se voi aiheutua sädehoidosta tai muusta suuresta säteilyaltistuksesta, solusalpaajahoidosta tai kemikaaleista kuten bentseenistä. Näistä erityisesti sädehoitoon ja muuhun suureen säteilyaltistukseen on yhdistetty leukemian akuutit muodot (IARC 2000).

Kilpirauhassyövän ilmaantuvuus on vuosittain n. 5 tapausta 100 000 henkilövuotta kohti. Kilpirauhassyövän ilmaantuvuus on erilaista eri sukupuolilla; naisilla syöpä on 3–4 kertaa yleisempi kuin miehillä. Kilpirauhassyövän syntymiseen säteilyllä on kiistaton vaikutus, mikä on havaittu myös

muussa yhteydessä kuin atomipommitusten eloonjääneiden tutkimuksissa (Thompson ym. 1994). Esimerkiksi 1900-luvun alkupuolella annettiin lapsille usein sädehoitoa nielurisoihin ja muualle kaulan alueelle, ja tämän seurauksena väestössä lisääntyivätkin sekä hyvän- että pahanlaatuiset kilpirauhaskasvaimet (Ron ym. 1995). Lapsille kilpirauhassyöpä kehittyi esimerkiksi säteilystä aikuisia todennäköisemmin, sillä lasten vielä kasvava kilpirauhanen on erityisen herkkä säteilylle.

Syöpä on väestötasolla hyvin yleinen sairaus ja esimerkiksi suomalaisista yksi neljäsosa sairastuu elinaikanaan johonkin syöpään. Koska säteilyn aiheuttama syöpä ei poikkea millään tavalla muiden tekijöiden aiheuttamasta syövästä, on yksittäistapauksissa hankalaa osoittaa tietyn henkilön saaman syövän johtuvan nimenomaan säteilyaltistuksesta. Väestötasolla säteilylle altistutaan kuitenkin pieninä annoksina jatkuvasti. Tällaisella altistumisella saattaa olla suuri merkitys syöpien kehittämisessä, minkä vuoksi pienten säteilyannosten vaikutusten tutkiminen on hyvin tärkeää.

3 Tshernobylin onnettomuus ja radioaktiivinen laskeuma

3.1 Onnettomuuden syyt ja tapahtumien kulku

Historian pahin ydinvoimalaonnettomuus tapahtui 26.4.1986 Tshernobylin ydinvoimalassa entisessä Neuvostoliitossa. Nykyisin Tshernobyl kuuluu Ukrainaan ja sijaitsee lähellä nykyisen Valko-Venäjän rajaa (Kuva 4). Voimalan neljästä reaktorista yksi tuhoutui räjähdyksessä, jota seuranneessa useita vuorokausia kestäneessä tulipalossa ympäristöön levisi suuri määrä radioaktiivisia aineita (UNSCEAR 2000, vol. I).

Onnettomuuden aikana Tshernobylistä tuuli heikosti ja suunnaltaan vaihtelevasti, mutta n. 1500 metrin korkeudella vallitsi kaakkoistuuli, jonka voimakkuus oli 8–10 m/s. Onnettomuudessa tapahtuneen räjähdysen ja tulipalon vapauttaman lämmön vaikutuksesta radioaktiiviset aineet nousivat korkealle ja kulkeutuivat muihin valtioihin. Laskeuma levittyi laajalle alueelle voimalan ympäristöön, jossa pahiten saastuivat eteläinen Valko-Venäjä, pohjoinen Ukraina ja läntinen Venäjä. Laskeumaa kulkeutui myös Suomeen ja muualle Eurooppaan.

Onnettomuuden tapahtumiseen vaikutti paljon reaktorityyppi, jonka turvallista käyttäytymistä kaikissa tilanteissa ei voitu varmistaa puutteellisten takaisinkytkentöjen vuoksi. Täydellisten takaisinkytkentöjen sijasta luotettiin ydinvoimalan työntekijöiden noudattavan määräyksiä, joiden mukaan reaktoria ei saisi päästää sellaiseen käyttötilaan, jossa sen tiedettiin olevan vaarallinen. Onnettomuuden tapahtumiseen vaikutti myös henkilökunnan puutteellinen tietämys reaktorifysiikasta ja piittaamaton suhtautuminen turvallisuusmääräyksiin. Piittaamattomiin asenteisiin vaikuttivat mahdollisesti Tshernobylin ydinvoimalan hyvä maine maan parhaana oman tyyppinsä laitoksena sekä toistuvat vakuuttelut tämän laitostyyppin turvallisuudesta. Saman tyyppisissä laitoksissa ei myöskään oltu ennen havaittu reaktorin tehon kasvavan hallitsemattomasti. (Laaksonen 1986)

Onnettomuus tapahtui, kun voimalan nelosreaktoria ajettiin alas normaalin lakisääteisen huoltoseisokin pitämiseksi. Alasajon aikana oli tarkoitus tehdä tiettyjen sähkölaitteiden toimintakuntoa testaava koe. Koetta valmisteltaessa ydinreaktoria käytettiin määräysten vastaisissa olosuhteissa. Tämän lisäksi kaikki automaattiset turvalaitteet oli kytketty pois päältä, sillä niiden arveltiin haittaavan kokeen suoritusta. Nämä laitteet olisivat toiminnassa ollessaan voineet estää onnettomuuden pysäyttämällä reaktorin kokeen alkaessa. Koeolosuhteissa



Kuva 4. Tshernobylin sijainti maantieteellisesti. Kuvassa Kiev = Kiova. (Kuva: UNSCEAR 2000, vol. II)

reaktorin tehon säätely oli turvalaitteiden toiminnan estämisestä johtuen lähes mahdotonta.

Kokeen yhteydessä reaktorin teho alkoi kasvaa kiihtyvällä nopeudella turvajärjestelmien toimimattomuuden vuoksi. Äkillinen tehonnousu aiheutti ydinpolttoaineen hajoamisen pieniksi hiukkasiksi, jotka sekoittuivat jäähdytteeseen. Jäähdytvesi höyrystyi räjähdysmäisesti, jonka seurauksena syntyi paineisku, joka hajotti jäähdytyspiirin ja sitä ympäröiviä rakenteita. Ensimmäistä räjähdystä seurasi vielä muutaman sekunnin kuluttua toinen räjähdys.

Räjähdyksen seurauksena reaktorin katto irtosi ja osa sen rakenteista sinkoutui ympäristöön, jolloin reaktorijäänteet ja sen sydän olivat avoimina ulkoilmassa. Reaktorijäänteet muodostivat valtavan säteilylähteen ja onnettomuuden tuhotessa niiden suojauksen niiden suora säteilyvaikutus ulottui useiden satojen metrien etäisyydelle. Myös muutama prosentti reaktorin polttoaineesta sinkoutui ympäristöön. Ulkoilman aiheuttamien ilmavirtausten mukana radioaktiivinen pöly levisi tehokkaasti voimalan ympäristöön. Ilmavirtausten vuoksi myös räjähdyksissä syttynyt grafiittipalo jatkui lähes viikon ajan. Kymmenen päivän aikana tuhoutuneesta reaktorista vapautui ilmaan radioaktiivisia aineita, joiden päästö loppui vasta kun reaktorisydän oli saatu sammutettua ja jäähdytettyä. Vuoden 1986 lopulla tuhoutuneen reaktorin päälle rakennettiin kaasutiivis sarkofagi, joka sulki reaktorijäänteet sisäänsä.

3.2 Laskeuma

Onnettomuudessa vapautui valtava määrä radioaktiivisia aineita, joiden aktiivisuus oli yhteensä n. 10^{18} Bq. Pääosa näistä päästöistä koostui I-131:sta, Cs-134:sta ja Cs-137:sta, mutta seassa oli myös pieni määrä polttoainehiukkasia, joita kutsutaan kuumiksi hiukkasiksi niiden suuren aktiivisuuden takia. Suurimmat ja samalla raskaimmat kuumat hiukkaset putosivat reaktorin lähimaastoon, mutta pienempiä löydettiin Suomesta asti (Saari ym. 1989). Kuumia hiukkasia on pidetty merkittävänä juuri niiden suuren aktiivisuuden takia, sillä ne voivat aiheuttaa pieniä palovammoja joutuessaan iholle tai hengityselimiin. On kuitenkin todennäköisempää, että väestölle enemmän haittaa aiheutuu radioaktiivisesta jodista ja cesiumista.

Radioaktiivinen jodi on helposti haihtuva yhdiste ja sen puoliintumisaika on verraten lyhyt, 8 vuorokautta. Sen vaikutusaika ajoittuukin tästä syystä onnettomuuden jälkeisiin lähimpiin vuorokausiin alueilla. Jodi hakeutuu elimistössä kilpirauhaseen ja on haitallisempaa lapsille kuin aikuisille, johtuen lasten kilpirauhasen pienemmästä koosta ja vielä kehittyvästä solukosta. Ihmiset altistuivat onnettomuuden jälkeen radioaktiiviselle jodille pääasiassa hengitysilman välityksellä sekä nauttimalla saastuneita lehtivihanneksia ja maitoa. I-131 hajoaa beetahajoamisen avulla, jossa hajoava ydin lähettää myös gammasäteilyä.

Cesiumin radioaktiivisten isotooppien puoliintumisaikat ovat jodiin verrattuna pitkiä. Cs-134:n puoliintumisaika on 2 vuotta ja Cs-137:n 30 vuotta. Cesium aiheuttaa sekä ulkoista että sisäistä altistumista. Ulkoinen säteily johtuu ympäristön ja maaperän cesiumlaskeumasta ja sisäinen säteily laskeumaa sisältävien elintarvikkeiden nauttimisesta. Molemmat cesiumin radioaktiiviset isotoopit hajoavat beetahajoamisen avulla, jossa hajoavat ytimet lähettävät myös gammasäteilyä.

Voimalaitoksen välittömässä ympäristössä, 30 km:n etäisyydellä maaperä saastui pahiten. Näillä alueilla esimerkiksi maaperän Cs-137-pitoisuus oli jopa yli 3700 kBq/m^2 ja I-131-pitoisuus yli $37\,000 \text{ kBq/m}^2$. Maaperän saastuminen oli hyvin vaihtelevaa myös pahiten saastuneimmissa valtioissa johtuen sekä tuulen suunnasta että sateesta. Valko-Venäjällä ja Ukrainassa maaperän Cs-137-kontaminaatio oli pahiten saastuneilla alueilla jopa $1480\text{--}3700 \text{ kBq/m}^2$, mutta useimmilla alueilla se oli alle 37 kBq/m^2 . Esimerkiksi Kiovassa maaperän Cs-137-pitoisuus onnettomuuden jälkeen oli pääasiassa alle 37 kBq , mutta joillakin alueilla Kiovan lähetyvillä se oli 37 kBq:n ja 185 kBq:n välillä. Maaperän pitoisuudet ovat vertailussa suurempia kuin Suomessa, jossa maaperän Cs-137-pitoisuus onnettomuuden jälkeen oli enimmillään Keski-Suomessa $37\text{--}185 \text{ kBq/m}^2$, mutta muualla maassa se vaihteli $2\text{--}40 \text{ kBq/m}^2$:n välillä. (UNSCEAR 2000, vol. II).

3.3 Onnettomuudesta aiheutuneet säteilyannokset

Onnettomuus aiheutti radioaktiivisten aineiden leviämisen ympäristöön. Pahtien saastui 30 kilometrin säteellä voimalaitoksesta sijaitseva alue, jossa asui yhteensä 116 000 ihmistä. Näille ihmisille onnettomuudesta aiheutui keskimäärin n. 30 mSv:n suuruinen efektiivinen annos (UNSCEAR 2000, vol. II). Alueen väestö evakuoitiin melko pian onnettomuuden jälkeen, eikä siellä ole ollut asutusta onnettomuuden jälkeen. Saastuneimman lähivyöhykkeen ulkopuolella sijaitsee vähemmän saastuneita alueita, joita valvotaan tarkasti ja joille tuodaan elintarvikkeita sisäisen altistumisen vähentämiseksi.

Onnettomuudessa suurille säteilyannoksille altistuivat lähinnä voimalan työntekijät ja pelastustöihin osallistuneet henkilöt, kuten ensimmäisiä räjähdysten jälkeisiä tulipaloja sammuttaneet palomiehet. Akutteja säteily-sairausten oireita ilmeni yhteensä 134 ihmisellä, joista 28 kuoli neljän kuukauden kuluessa onnettomuudesta. Kuolemat johtuivat keskimäärin yli 4 Gy:n kokokohoannoksista ja liittyivät pääasiassa ihon palovammoihin ja suoliston komplikaatioihin. (UNSCEAR 2000, vol. II)

Nykyisen Valko-Venäjän saastuneimmilla alueilla ihmisten ulkoinen efektiivinen annos oli 12–19 mSv ja Venäjän saastuneimmilla alueilla 11–15 mSv ensimmäisen onnettomuuden jälkeisen vuoden aikana. Ukrainassa väestön efektiiviset ulkoiset annokset olivat ensimmäisenä onnettomuuden jälkeisenä vuotena 17–24 mSv. Annokset olivat maaseudulla asuvilla ihmisillä noin 1,5 kertaa suurempia kuin kaupunkialueilla asuvilla. Vuosien 1986–1995 välisenä aikana onnettomuudesta aiheutui edellä mainituilla alueilla asuville valkovenäläisille ja venäläisille kullekin keskimäärin 2–3 mSv:n efektiivinen kokonaisannos ja ukrainalaisille keskimäärin 5–10 mSv:n efektiivinen kokonaisannos. Kilpirauhasannokset olivat valkovenäläisillä keskimäärin 300 mGy, venäläisillä 10 mGy ja ukrainalaisilla aikuisilla 0–50 mGy. (UNSCEAR 2000, vol. II)

Onnettomuuden puhdistustöihin osallistuneet työntekijät altistuivat huomattavasti enemmän kuin saastuneiden alueiden tavallinen väestö ja saivat onnettomuuden seurauksena keskimäärin 100 mSv:n annoksen. Suomalainen väestö sai ensimmäisenä onnettomuuden jälkeisenä vuotena laskeumasta johtuen keskimäärin 0,3 mSv:n kokonaisannoksen. Vertailun vuoksi mainittakoon, että Suomessa keskimääräinen väestölle elinympäristöstä aiheutuva säteilyannos on vuodessa 3,7 mSv, josta yli puolet aiheutuu sisäilman radonista.

4 Tshernobylin onnettomuus ja terveysvaikutusten tutkimus

4.1 Onnettomuuden seurausten tutkimus

Tshernobylin onnettomuuden jälkeen on tehty hyvin paljon sen aiheuttamaan radioaktiiviseen altistumiseen liittyvää tutkimusta. Tutkimuksissa on selvitetty mm. syöpää ja sen lisäksi myös joitakin muita somaattisia sairauksia, kuten kilpirauhasen epämuodostumia ja immunologisia vaikutuksia. Lisäksi on kartoitettu onnettomuuden psykologisia vaikutuksia sekä vaikutuksia syntyytyteen. Epidemiologisia tutkimuksia on tehty eniten Valko-Venäjän, Venäjän ja Ukrainan väestöissä, joissa altistuminen oli kaikkein suurinta. (UNSCEAR 2000, vol. II)

Käsittelen tässä onnettomuuden jälkeisiä syöpätutkimuksia, joita on tehty sekä puhdistustyöntekijöiden että Tshernobylin lähivaltioiden tavallisen väestön keskuudessa.

4.2 Puhdistustyöntekijöistä tehdyt tutkimukset

Tshernobylin ydinvoimalan puhdistustöihin osallistui yhteensä 600 000 henkilöä, joista 240 000 oli sotilaita. Puhdistustyöt käsittivät lähinnä reaktorin ja sen jänteiden dekontaminaatiota sekä teiden, sarkofagin ja reaktorihenkilökunnalle suunnitellun kaupungin rakentamista (UNSCEAR 2000, vol. II). Puhdistustöiden aikana työntekijöiden saamaa säteilyannosta tarkkailtiin jatkuvasti ja turvatoimenpiteitä pidettiin valmiudessa. Tshernobylin puhdistustyöt saatiin päätökseen vuonna 1990.

Pääasiassa puhdistustyöntekijät olivat 20–45-vuotiaita miehiä ja kotoisin entisen Neuvostoliiton alueelta. He saivat huomattavasti suurempia säteilyannoksia kuin normaaliväestö. Heidän ulkoiset efektiiviset annoksensa saattoivat olla esimerkiksi vuosien 1986–1987 aikana yli sata mSv, kun voimalan lähivaltioiden tavallisella väestöllä esiintyi pääasiassa muutamien mSv:ien suuruisia annoksia (UNSCEAR 2000, vol. II). Erityisen mielenkiinnon kohteena puhdistustyöntekijöistä ovat olleet ne 226 000 henkilöä, jotka työskentelivät 30 kilometrin säteellä voimalasta olleen, pahiten saastuneen vyöhykkeen sisäpuolella vuosina 1986–1987, jolloin säteilyn aiheuttamat annokset olivat suurimpia.

Yhteensä 167 862 venäläisen puhdistustyöntekijän joukossa tehdyissä kohorttitutkimuksissa havaittiin, että näillä puhdistustyöntekijöillä oli tilastollisesti merkitsevä lisäriski sairastua kilpirauhassyöpään ja leukemiaan verrattuna

tavalliseen väestöön (Ivanov ym. 1997a ja Ivanov ym. 1997b) (Taulukko 1). Molemmissa tutkimuksissa vertailuväestö koostui samanikäisistä venäläismiehistä. Toisessa venäläisten puhdistustyöntekijöiden kohorttitutkimuksessa (n=114 504) havaittiin myös enemmän sekä kaikkia kiinteitä syöpäkasvaimia että ruuansulatuskanavan pahanlaatuisia muutoksia kuin normaalilla venäläisväestöllä (Ivanov VK ym. 1998) (Taulukko 1). Puhdistustyöntekijöiden syöpäilmaantuvuuslukuja verrattiin tässä tutkimuksessa koko Venäjän väestön syöpäilmaantuvuuslukuihin.

Virolaisten puhdistustyöntekijöiden (n=1984) väestössä tehdyssä kohorttitutkimuksessa ei havaittu kilpirauhasmuutosten ja –syövän lisääntyneen tilastollisesti merkitsevästi suhteessa saatuun säteilyannokseen (Inskip ym. 1997) (Taulukko 1). Niin ikään virolaisia puhdistustyöntekijöiden kohorttia (n=4742) käsittelevässä tutkimuksessa ei havaittu Tshernobylin onnettomuudesta aiheutuneen säteilyaltistuksen yhteyttä kaikkiin syöpiin yhteensä, eikä myöskään leukemiaan erikseen (Rahu ym. 1997) (Taulukko 1). Samassa tutkimuksessa havaittiin kuitenkin tutkimusväestössä esiintyvän tilastollisesti merkitsevästi enemmän itsemurhia (Taulukko 1).

Virolaisten puhdistustyöntekijöiden (n=118) kromosomiaberraatioita käsittelevässä kohorttitutkimuksessa havaittiin, ettei heillä esiintynyt tilastollisesti enempää kromosomiaberraatioita kuin vertailuväestöllä, joka koostui osaksi virolaisista ja osaksi amerikkalaisista henkilöistä (Taulukko 1). Kromosomipoikkeavuuksien määrä ei myöskään ollut yhteydessä puhdistustyöntekijöille aiemmin määritettyihin fysikaalisiin annosarvioihin. Tämän perusteella tutkijat arvelivatkin, että puhdistustyöntekijöiden todelliset annokset olivat paljon pienempiä kuin aiemmin oli arvioitu. (Littlefield ym. 1998)

Liettualaisten puhdistustyöntekijöiden kohortissa (n=183) tutkittiin myös kromosomiaberraatioiden yhteyttä Tshernobylin onnettomuudesta aiheutuneeseen säteilyyn sekä lisäksi alkoholinkäyttöön, monivitamiinivalmisteiden käyttöön ja influenssainfektioihin. Puhdistustyöntekijöiden lisäksi tutkittiin 27 kontrollihenkilöä, jotka olivat puhdistustyöntekijöiden kaltaisia ikänsä, terveydentilansa ja ammattinsa suhteen. Tutkimuksessa havaittiin kromosomiaberraatioiden lisääntyneen puhdistustyöntekijöillä säteilyn vaikutuksesta tilastollisesti merkitsevästi (Lazutka 1996) (Taulukko 1).

Taulukko 1. Tshernobylin puhdistustyöntekijöistä tehtyjen tutkimusten tulokset

Viite ja tutkimusasetelma	Tutkimuskohde	Tulos
Lazutka 1996 Kohorttitutkimus	Kromosomiaberraatiot liettualaisten puhdistustyöntekijöiden väestössä (n=183) ja kontrolleilla (n=27)	Kromosomiaberraatioita kontrolleilla keskimäärin $2,41 \pm 0,29^a$ /100 solua ja altistuneilla $3,61 \pm 0,16/100$, $p < 0,05$
Inskip ym. 1997 Kohorttitutkimus	Kilpirauhasmuutokset ja -syöpä virolaisilla puhdistustyöntekijöillä (n=1984)	ERR pahanlaatuisille kilpirauhasmuutoksille $-0,01/cGy$ [$-0,02-0,01$]
Rahu ym. 1997 Kohorttitutkimus	Kaikki syövät (1), itsemurhat (2) virolaisilla puhdistustyöntekijöillä (n=4742)	1) SIR 0,94 [0,61–1,39] 2) SMR 1,52 [1,01–2,19]
Ivanov ym. 1997a ja Ivanov ym. 1997b Kohorttitutkimus	Kilpirauhassyöpä (1) ja leukemia (2) venäläisillä puhdistustyöntekijöillä (n= 167 862)	1) ERR 5,31/Gy [0,04–10,58], EAR $1,15/10^4$ henkilöv./Gy [0,08–2,22] 2) ERR 4,30/Gy [0,83–7,75], EAR $1.31/10^4$ henkilöv./Gy [0,23–2,39]
Ivanov VK ym. 1998 Kohorttitutkimus	Kiinteät kasvaimet (1) ja rskanavan pahanlaatuiset muutokset (2) venäläisillä puhdistustyöntekijöillä (n= 114 504)	1) SIR 1,23 [1,15–1,31] 2) SIR 1,11 [1,01–1,24]
Littlefield ym. 1998 Kohorttitutkimus	Disentriset kromosomit (1) ja translokaatiot (2) virolaisilla puhdistustyöntekijöillä (n= 118), virolaisilla kontrolleilla (n=29) ja amerikkalaisilla kontrolleilla (n=21)	1) Määrä 1000 solua kohden puhdistustyöntekijöillä 1,18, virolaisilla kontrolleilla 1,33 ja amerikkalaisilla kontrolleilla 0,52 2) Määrä 1000 solua kohden puhdistustyöntekijöillä 6,99, virolaisilla kontrolleilla 7,03 ja amerikkalaisilla kontrolleilla 6,84

ERR= suhteellinen lisäriski, EAR= absoluuttinen lisäriski, SIR= vakioitu ilmaantuvuussuhde, SMR= vakioitu kuolleisuussuhde. Hakasulkeissa 95%:n luottamusväli

a) keskiarvon keskivirhe

4.3 Väestötutkimukset Tshernobylin lähivaltioissa

4.3.1 Lasten syöpäriski

Tshernobylin ydinvoimalan ympärillä sijaitsevien valtioiden lapset ovat olleet vilkkaan tutkimuksen kohteena. Erityinen tutkimusmielenkiinto on kohdistunut lapsuusiän leukemiaan ja kilpirauhassyöpään mm. Valko-Venäjän, Ukrainan ja Venäjän alueilla.

Lapsuusiän leukemian ilmaantuvuutta tutkittiin muutamilla Valko-Venäjän alueilla ennen Tshernobylin onnettomuutta vuosina 1979–1985 ja sen jälkeen vuosina 1986–1992. Tutkimuksessa ei havaittu Tshernobylin onnettomuuden aiheuttaman säteilyaltistuksen olevan yhteydessä lapsuusiän leukemiaan (Ivanov ym. 1995) (Taulukko 2). Osin samoista tutkijoista koostunut tutkimusryhmä selvitti sikiöaikaisen altistumisen yhteyttä leukemian ilmaantuvuuteen valkovenäläisillä lapsilla ensimmäisen elinvuoden aikana. Tutkimuksessa havaittiin, että leukemian ilmaantuvuus oli hieman korkeampi onnettomuuden jälkeen, mutta ero ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevä, eikä yhdistettävissä onnettomuudesta aiheutuneeseen säteilyyn (Ivanov EP ym. 1998) (Taulukko 2). Ukrainassa, Kiovan alueella, tutkittiin kaikki vuosien 1993 ja 1997 välisenä aikana ilmenneet lasten leukemiatapaukset (n=247) ja havaittiin, että tietyt leukemiatyypit olivat lisääntyneet kiovalaisilla lapsilla onnettomuuden jälkeen verrattuna mm. ranskalaisiin ja saksalaisiin lapsiin (Gluzman ym. 1999) (Taulukko 2).

Valko-Venäjällä tutkittiin tapaus-verrokki-tutkimuksessa Tshernobylin onnettomuuden aiheuttaman säteilyn yhteyttä lasten kilpirauhassyöpään. Tutkimuksessa oli yhteensä 107 tapaus ja 214 verrokkia, jotka oli jaettu kahteen samankokoiseen ryhmään. Ensimmäiseen verrokkiryhmään valittiin henkilöitä tutkimukseen kuuluvien eri alueiden sairaalarekistereistä suhteuttaen verrokkien määrä kunkin alueen väkilukuun. Toisen ryhmän verrokkit taas valittiin sen perusteella, että heille oli tehty samanlaisia tutkimustoimenpiteitä kuin tapauksille, kuten esimerkiksi kaulan alueen ultraäänitutkimuksia. Tutkimus osoitti lasten kilpirauhassyövän selvästi lisääntyneen Tshernobylin onnettomuuden jälkeen enemmän altistuneessa ryhmässä verrattuna vähemmän altistuneeseen ryhmään (Astakhova ym. 1998) (Taulukko 2). Lasten altistumista Tshernobylin laskeumalle ja sen yhteyttä kilpirauhassyöpään tutkittiin myös Valko-Venäjän ja Venäjän saastuneimmilla alueilla. Kohorttitutkimuksessa havaittiin, että lasten kilpirauhassyövän riski lisääntyi lineaarisesti suhteessa saatuun säteilyannokseen (Jakob ym. 1999) (Taulukko 2).

Taulukko 2. Lasten syöivistä Tshernobylin lähivaltioissa tehtyjen tutkimusten tulokset.

Viite ja tutkimus-asetelma	Tutkimuskohde	Tulos
Abelin ym. 1994 Kohorttitutkimus	Kilpirauhassyövän ilmaantuvuus Valko-Venäjällä	1986 ilmaantuvuus 0,041/100 000 henkilöä. [0,019–0,078] 1992 ilmaantuvuus 2,5/100 000 henkilöä. [1,94–3,28]
Ivanov ym. 1995 Kohorttitutkimus	Leukemia muutamilla Valko-Venäjän laskeuma-alueilla	1979–1985 ilmaantuvuus-suhde 4,20 1986–1992 ilmaantuvuus-suhde 4,33, $p > 0,1$
Ivanov EP ym. 1998 Kohorttitutkimus	Sikiöaikainen altistuminen ja leukemia Valko-Venäjällä	RR 1,26 [0,76–2,10]
Astakhova ym. 1998 Tapaus-verrokkitutkimus	Kilpirauhassyöpä valko-venäläisillä (tapaukset $n = 107$, verrokki $n = 214$)	OR 5,8 [1,96–17,3]
Gluzman ym. 1999 Kohorttitutkimus	Leukemiatapaukset ($n = 247$) Ukrainassa Kiovan alueella 1993–1997	Tiettyä leukemiatyypit lisääntyneet, T1-tyypin määrä 52%, kontrolleissa 21%, $p < 0,05$
Jakob ym. 1999 Kohorttitutkimus	Kilpirauhassyöpä Venäjän ja Valko-Venäjän saastuneimmilla alueilla	ERR 23/Gy [8,6–82] EAR 2,1/10 ⁴ henkilöä./Gy [1,0–4,5]
Tronko ym. 1999 Kohorttitutkimus	Lapsuus- ja nuoruusiän kilpirauhassyöpätapaukset ($n = 577$) ja niiden määrä suhteessa 100000 henkilöön Ukrainassa	1981–1985 ilmaantuvuus 0,04–0,06/100 000 lasta 1991–1997 ilmaantuvuus 0,45/100 000 lasta
Heidenreich ym. 1999 Kohorttitutkimus	Kilpirauhassyöpä (tapaukset $n = 657$) Valko-Venäjällä 1968–1986 syntyneiden joukossa ($n = 3100000$)	Riski sairastua kolminkertainen alle 10-vuotiailla, yli 10-vuotiaat tytöt sairastuivat herkemmin kuin pojat

Lasten ja nuorten kilpirauhassyöpää on tutkittu myös Ukrainassa ja tutkimuksissa on saatu samansuuntaisia tuloksia kuin edellä esitellyissä tutkimuksissa. Ukrainassa tutkittiin 577 kilpirauhassyöpään 1986–1997 välisenä aikana sairastunutta potilasta. Suhteutettaessa potilaiden määrä 100 000 lapseen, havaittiin, että syöpä oli lisääntynyt Tshernobylin onnettomuuden jälkeen (Tronko ym. 1999) (Taulukko 2).

Tutkimuksissa osoitettu lasten kilpirauhassyövän lisääntyminen on herättänyt myös epäilyjä siitä, että todellisena syynä siihen ei olisikaan Tshernobylin laskeuma vaan vain parantunut syöpätapausten rekisteröinti ja tutkimus. Tämän vuoksi Valko-Venäjällä tehtiin kohorttitutkimus, jossa selvitettiin siellä vuosien 1986 ja 1992 välisenä aikana ilmenneiden lasten kilpirauhassyöpätapausten histologia, aikariippuvuus onnettomuudesta sekä kilpirauhassyövän ilmaantuvuuden suhde laskeumaan maantieteellisesti. Tutkimuksen tulokset ilmaantuvuuden osalta tukivat aiemmin saatuja tutkimuksia ja osoittivat Tshernobyl-laskeuman olevan selvästi yhteydessä kilpirauhassyöpään (Abelin ym. 1994) (Taulukko 2).

Valko-Venäjällä tehtiin myös toinen samantyyppinen altistumisen ja kilpirauhassyövän ilmaantumisen yhteyksiä selvittävä kohorttitutkimus, jossa tutkittiin kilpirauhassyöpätapauksia vuosien 1968 ja 1986 välisenä aikana syntyneiden lasten (n=310000) joukossa. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös sukupuolen merkitystä syövän ilmaantumiseen. Tulokset osoittivat, että kilpirauhassyövän riski oli lähes kolminkertainen alle 10-vuotiaana altistuneilla verrattuna vanhempiin lapsiin ja että yli 10-vuotiaat tytöt sairastuivat herkemmin syöpään kuin vastaavan ikäiset pojat (Heidenreich ym. 1999) (Taulukko 2).

4.3.2 Koko väestön syöpäriski

Venäjän saastuneimmilla alueilla tehdyssä kohorttitutkimuksessa (n=5 298 000) selvitettiin kilpirauhassyövän ilmaantuvuuden kehittymistä vuosien 1982 ja 1995 välisenä aikana ottaen huomioon tutkimusväestön ikä sekä altistumishetkellä että syövän diagnoosihetkellä. Tutkimuksessa havaittiin, että kilpirauhassyöpä oli lisääntynyt tilastollisesti merkitsevästi onnettomuuden jälkeen (Taulukko 3). Lisäksi havaittiin, että aikainen altistumisajankohta oli yhteydessä syövän ilmenemiseen eli lapsuus- ja nuoruusiässä altistuneet sairastuivat syöpään herkimmin. (Ivanov ym. 1999)

Ukrainassa tutkittiin Kiovan alueen väestön pahanlaatuisia kilpirauhasmuutoksia ja niiden morfologiaa sekä histologiaa. Kohorttitutkimuksessa käytiin läpi 16 340 kilpirauhasta, jotka oli poistettu ihmisiltä vuosina 1982–1986 ja 1987–1995. Pääosa tutkimusväestöstä oli 30–60-vuotiaita naisia. Tutkimuksessa havaittiin pahanlaatuisten kilpirauhasmuutosten selvä lisääntyminen onnettomuuden jälkeen verrattaessa sitä edeltävään aikaan (Taulukko 3). Erityisesti havaittiin pienten, vielä oireita aiheuttamattomien kilpirauhaskasvainten eli papillaaristen mikrokarsinoomien lisääntyneen vanhemmassa ikäluokassa. Tämän tutkimuk-

Taulukko 3. Koko väestön syövästä Tshernobylin lähialtioissa tehtyjen tutkimusten tulokset

Viite ja tutkimusasetelma	Tutkimuskohde	Tulos
Prisyazhniuk ym. 1995 Kohorttitutkimus	Kaikki syövät paitsi leukemia ja kilpirauhassyöpä (1), leukemia ja lymfooma (2) sekä kilpirauhassyöpä (3) Ukrainan saastuneimpien alueiden asukkailla (n=274 000)	1) Ilmaantuvuus vanhimmassa ikäryhmässä vuonna 1985 700/100 000 henkilöv. ja vuonna 1993 800/100 000 2) Ilmaantuvuus vanhimmassa ikäryhmässä vuonna 1985 12/100 000 henkilöv. ja vuonna 1993 28/100 000 3) Ilmaantuvuus kaikissa ikäryhmissä vuonna 1985 0,6/100 000 henkilöv. ja 3,8/100 000
Avetisian ym. 1996 Kohorttitutkimus	Kilpirauhasen pahanlaatuiset muutokset (1) ja papillaariset mikrokarzinoomat (2) Kiovan alueen väestöllä (n=16 340)	1) Ilmaantuvuus vuonna 1986 5% ja vuonna 1994 10% 2) Ilmaantuvuus vanhimmassa ikäluokassa vuonna 1986 0,2% ja vuonna 1994 6%
Ivanov ym. 1999 Kohorttitutkimus	Kilpirauhassyöpä venäläisillä miehillä (1), naisilla (2) ja eri ikäisinä altistuneilla miehillä (3) ja naisilla (4) (n=5298 000)	1) SIR 1985 0,8 [0,5–1,3] ja 1995 3,25 [2,5–4,25] 2) SIR 1985 0,75 [0,6–0,9] ja 1995 2,8 [2,6–3,25] 3) SIR 1991–1995 0–4-v. 10 [3,8–19,0] ja 30–34-v. 1,6 [1,0–2,0] 4) SIR 1991–1995 0–4-v. 6,2 [2,6–12,5] ja 30–34-v. 1,2 [0,9–1,5]

SIR= vakioitu ilmaantuvuussuhde. Hakasulkeissa 95%:n luottamusväli.

sen tuloksen mukaan Tshernobylin aiheuttama laskeuma on lisännyt myös aikuisväestön kilpirauhaskasvainten ilmaantuvuutta. (Avetisian ym. 1996)

Ukrainassa on tutkittu Tshernobylin onnettomuuden vaikutusta myös kaikkien syöpien ilmaantuvuuteen neljällä saastuneella ja myöhemmin tarkasti valvotulla voimalan lähialueella. Tutkimuksessa huomioitiin kaikki alueiden asukkailla (n=274 000) diagnosoidut syövät vuosien 1980 ja 1993 välisenä aikana sekä laskettiin niille ikävakioidut ilmaantuvuussuhteet. Erityisen tarkastelun kohteena tutkimuksessa olivat tutkijoiden mielestä perinteisesti säteilyaltistukseen yhdistetyt syövät, kuten kilpirauhassyöpä, leukemia ja lymfooma.

Tutkimuksessa ei havaittu ilmaantuvuuden lisääntyneen koko väestös-

sä tilastollisesti merkitsevästi onnettomuuden jälkeen, kun tarkastelussa olivat kaikki muut syövät paitsi leukemia ja kilpirauhassyöpä. Kuitenkin havaittiin, että ilmaantuvuus lisääntyi onnettomuuden jälkeen kaikkein vanhimmissa ikäryhmissä (Taulukko 3), mutta tämän vaikutuksen ei arveltu johtuvan säteilystä. Tarkasteltaessa leukemian ja lymfooman ilmaantuvuutta naisilla ja miehillä yhteensä, niiden ei havaittu lisääntyneen onnettomuuden jälkeen. Eri ikäryhmien vertailussa kuitenkin leukemian ilmaantuvuus oli selvästi kohonnut onnettomuuden jälkeen, kaikkein eniten vanhimmissa ikäryhmissä (Taulukko 3). Tämän kuitenkin epäiltiin johtuvan muista tekijöistä kuin säteilystä. Kilpirauhassyövän ilmaantuvuuden havaittiin lisääntyneen selvästi onnettomuuden jälkeen kaikissa ikäryhmissä. Kaikista saamistaan tuloksista tutkijat kuitenkin päättelivät, että ainoastaan kilpirauhassyövän lisääntyminen on todellisessa yhteydessä Tshernobylin laskeumaan. (Prisyazhniuk ym. 1995)

5 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli

- Arvioida Kiovassa Tshernobylin onnettomuuden aikaan olleiden suomalaisten säteilyaltistumista yhdistämällä eri menetelmillä saatu ryhmän säteilyaltistusta koskeva tieto
- Selvittää tässä suomalaisväestössä ilmenneet syöpätapaukset 26.4.1986–31.12.1999 välisenä aikana
- Verrata Kiovassa olleen suomalaisväestön syöpäsairastuvuutta vastaavanlaisen suomalaisväestön syöpäsairastuvuuteen.

6 Aineisto ja menetelmät

6.1 Tutkimusväestö

Tässä tutkimuksessa tutkimusväestöön kuului 139 suomalaista rakennustyöntekijää ja heidän perheenjäsentään, jotka olivat yhtymän Kiovan työmaalla Tshernobylin onnettomuuden tapahtuessa huhtikuussa vuonna 1986 (arvioitu n=57) tai myöhemmin saman vuoden aikana (arvioitu n=82). Työntekijät, jotka olivat Kiovassa onnettomuuden tapahtuessa, evakuoitiin Suomeen lentokoneella 1.5.1986 ja heille tehtiin sisäisen annoksen arvioimiseksi kokokehomittauksia Säteilyturvakeskuksessa. Kiovassa olleiden työntekijöiden ulkoisen annoksen selvittämiseksi osalta otettiin myös verinäyte kromosomianalyysiä varten. Halukkaat saivat lähteä takaisin Kiovaan ja sinne palasikin enemmistö evakuoituista työntekijöistä. Kiovaan palanneiden myöhempää säteilyaltistusta seurattiin filmidosimetreillä. Enemmistö Kiovan takaisin lähteneistä rakennustyöntekijöistä ja heidän perheistään palasi takaisin Suomeen syksyn 1986 aikana ja viimeisetkin heistä tulivat kokonaan takaisin helmikuussa 1987.

Tutkimusta aloitettaessa tutkimusväestöön kuului 173 henkilöä, mutta siitä jouduttiin sulkemaan pois yhteensä 34 henkilöä, joiden henkilötiedot olivat joko virheellisiä tai puutteellisia.

Tiedot Kiovassa olleista ja tutkimusväestöön kuuluvista saatiin osittain Lemminkäinen Oy: lta ja osittain Säteilyturvakeskuksen kokokehomittaus-, kromosomianalyysi- ja henkilödosimetriatiedoista. Tutkimusväestön taustatiedot, kuten nykyinen ammatti, nykyinen asuinpaikka, mahdollinen maastamuutto- tai kuolinpäivä, saatiin Väestörekisterikeskuksesta. Väestörekisterikeskuksen ammattitiedot perustuvat ensisijaisesti vuonna 1985 tehtyyn henkikirjoitukseen, mutta ne ovat voineet tulla päivitettyiksi mahdollisen muuton yhteydessä muuttoilmoituksella, jos muuttaja on sellaisen tehnyt. Tupakointitiedot oli saatavissa 25 henkilöstä, joilta oli tiedusteltu tupakointitottumuksia Säteilyturvakeskuksen Säteilybiologian laboratoriossa tehdyn kromosomianalyysin yhteydessä (Taulukko 4).

Pääasiassa tutkimusväestö koostui onnettomuushetkellä keski-ikäisistä, n. 30–40-vuotiaista, miehistä, mutta joukossa oli myös kaksitoista naista ja seitsemän lasta (Taulukko 4). Nykyisiltä ammanteiltaan tutkimushenkilöt voitiin luokitella pääasiassa rakennustyöntekijöihin, joista esimerkki-ammatteja ovat mm. asentaja, raudoittaja, kirvesmies, metallimies ja maalari (Taulukko 4). Seurannan päättyessä 31.12.1999 yhdeksän henkilöä oli kuollut ja viisi henkilöä muuttanut pois Suomesta. Henkilöiden asuinpaikkakunnat

Suomessa vaihtelivat melko paljon, mutta joitakin asumiskeskittymiä voitiin havaita esimerkiksi pääkaupunkiseudulla, Oulussa ja Turussa.

Taulukko 4. Tutkimusväestö

		Miehet	Naiset	Yhteensä
Lukumäärä		123	16	139
Ikä vuonna 1986	<20 v.	4	4	8
	20–40 v.	90	8	98
	>40 v.	29	4	33
	Minimi-maksimi	1–49	2–41	1–49
Tupakointi a)	Keskiarvo	29	24	28
	Mediaani	30	27	29
	25%–75% persentiili	23–37	19–32	23–37
	Ei tupakoi	15	2	17
	Tupakoi	8	0	8
	Puuttuva tieto	100	14	114
Ammatti b)	Rakennustyö c)	74	2	76
	Toimistotyö d)	4	5	9
	Muu työ e)	18	4	22
	Puuttuva tieto	27	5	32

a) tiedot kromosomianalyysin (vuonna 1986) yhteydessä tehdystä kyselystä

b) ammattitiedot Väestörekisterikeskuksesta, perustuvat ensisijaisesti vuonna 1985 tehtyyn henkilökirjoitukseen ja toissijaisesti mahdollisen muuton yhteydessä tehtyyn muuttoilmoitukseen

c) ammatit ajoneuvonosturinkuljettaja, ilmastointiasentaja, maalarina, sähköasentaja, asfalttimies, autonkuljettaja, rakennuspeltiseppä, asentaja, rakennusmies, rakennusmestari, rakennusinsinööri, työmies, hitsari, koneteknikko, kirvesmies, raudoittaja, mittamies, nosturinkuljettaja, putkiasentaja, betonimies, autopeltiseppä, metallimies, hitsausasentaja, sementtimies, peltiseppä, levyseppä, kaivurinkuljettaja, muurari, konetekninen työnjohtaja, työmaainsinööri, eristäjä, maanmittaus-tekniikka, laattamies, rakennuslaborantti ja tekniikka

d) ammatit kanslisti, kielenkääntäjä, työsuunnittelija, vanhempi suunnittelija, tietoliikennetekniikka, työterveyshoitaja, toimistotyöntekijä

e) ammatit yrittäjä, maanviljelijä, ravintolatyöntekijä, varastomies, kustannusinsinööri, työnjohtaja, opiskelija, ravintoloitsija, postimies, konsultti, vahtimestari, vartioinnin valvoja, aluepäällikkö, kirjaltaja, huolitsija, liikunnanopettaja, pyykkäri, aluejohtaja, osastopäällikkö

6.2 Säteilylle altistumisen arviointi

Tutkimusväestöön kuuluvien henkilöiden saamaa säteilyaltistusta arvioitiin kolmella eri menetelmällä. Käytössä olivat filmidosimetria, kokokehmittaus ja kromosomianalyysi (Taulukko 5). Menetelmien periaatteet on kuvattu luvussa 2.1. Tässä tutkimuksessa altistusta kuvattiin yhdistämällä ja vertailemalla eri menetelmien tuloksia.

Tutkimusväestön ulkoista altistumista selvitettiin Kiovaan palanneiden työntekijöiden keskuudessa filmidosimetreilla, joilla mitattiin heidän henkilökohtaista säteilyannostaan pääasiassa muutaman viikon jaksoissa. Ajan kuluessa osa tutkimusväestöstä poistui Kiovan työmaalta lopullisesti, mutta niille, jotka oleskelivät siellä pidemmän aikaa, lähetettiin postitse uudet filmidosimetrit

palautettujen tilalle. Dosimetrien käyttöjaksot vaihtelivat kesäkuusta 1986 huhtikuuhun 1987, kuitenkin keskittyen jakson alkuosaan. Filmien toimittaminen sekä tutkimusväestön annosten kirjaaminen tapahtui Säteilyturvakeskuksen henkilökohtaiseen dosimetriaan keskittyneessä Annosvalvonta-yksikössä.

Yhteensä filmeillä oli mitattu 108 henkilön saamaa säteilyannosta ja useimmilla heistä mittauksia oli monta. Yleisimmin filmin tuloksia oli kolme henkilöä kohden ja enimmillään kuusi. Ulkoiset annokset kullekin tutkimushenkilölle määritettiin laskemalla yhteen eri filmien antamat annoslukemat.

Kokokehomittaukset ja niihin perustuvat annosarviot tehtiin Säteilyturvakeskuksen Säteilyhygienian laboratoriossa. Kokokehomittaus kertoo sisäisestä säteilyaltistuksesta ja yhteensä niitä tehtiin 117 henkilölle. Osalle tutkimushenkilöistä (n=57) ne tehtiin melko pian Suomeen evakuoinnin jälkeen toukokuussa 1986, jolloin työntekijät olivat muutaman viikon mittaisella lomalla Suomessa ennen lähtöä takaisin Kiovaan. Muutamille henkilöille kokokehomittauksia tehtiin uudelleen myöhemmin samana vuonna tai seuraavan vuoden alkupuolella, mutta annosten arvioinnissa käytettiin kuitenkin vain ensimmäisen mittauksen tulosta. Kokokehomittauksen perusteella henkilöille laskettiin sekä sisäiset efektiiviset annokset että kilpirauhasannokset. Tarkat sisäiset annokset arvioitiin vain toukokuussa 1986 mitatuille 57 henkilölle ja jätettiin huomiotta myöhemmin mitatut 60 henkilöä, joiden annoksia ei ollut myöhemmän mittausajankohdan vuoksi järkevää laskea. Toukokuussa 1986 mitatuille henkilöille laskettiin myös kilpirauhasannos, joka pystyttiin arvioimaan yhteensä 55 henkilölle (Taulukko 5). Alle määritysrajan (0.1 mSv) olleiden sisäisten annosten kohdalla merkittiin annokseksi 0,1 mSv.

Toukokuussa 1986 tehdyissä kokokehomittauksissa havaittiin niiden ajankohdan vuoksi pääasiassa lyhytikäisiä radionuklideja, joista määritetyt sisäiset efektiiviset annokset koostuvat. Näitä olivat mm. Zr-Nb-95, Ru-103, I-131, Te-132, I-132, La-140 ja Ce-141. Pitkäikäisiä Cs-134:a ja Cs-137:a ei voitu havaita toukokuussa 1986 tehdyissä kokokehomittauksessa ollenkaan, sillä niiden aiheuttama aktiivisuus olisi näkynyt mittauksissa vasta myöhemmin samana vuonna. Myöhemmin mitattujen henkilöiden saaman annoksen arviointi ei ollut kuitenkaan mielekäästä, sillä annoksen määrittämiseksi olisi täytynyt tietää tarkasti myöhemmin mitattujen henkilöiden syömän ravinnon koostumus tai oleskelu (Suomessa/ulkomailla) kesän 1986 aikana ja sen jälkeen. Koska enemmistö tutkittavista oli palannut kokonaan Kiovasta Suomeen jo syksyn 1986 aikana, voitiin arvioida Cs-134:n ja Cs-137:n tutkimusväestölle aiheuttaman annoksen vastaavan muun suomalaisen väestön radioaktiivisesta cesiumista Suomessa saamaa sisäistä annosta (keskimäärin 0,06 mSv) (Rahola ym. 1987).

Kromosomianalyysit tehtiin vuosien 1986 ja 1987 aikana. Tutkittavien antamat verinäytteet otettiin ja viljeltiin toukokuussa 1986 Työterveyslaitoksella, josta ne tulivat myöhemmin analysoitavaksi Säteilyturvakeskuksen Säteilybiologian laboratorioon (silloinen Biologisen dosimetrian laboratorio). Kromosomianalyysi tehtiin yhteensä 25 henkilöstä (Taulukko 5). Pääasiassa analyysit tehtiin yhden verinäytteen perusteella kerran, mutta yhdestä henkilöstä analyysi tehtiin kahdesti. Näistä kahdesta analyysistä otettiin tässä tutkimuksessa vain ensimmäinen huomioon.

Kromosomianalyysissä veren lymfosyyteistä etsittiin disentrisiä kromosomeja ja lisäksi huomioitiin myös kaikki kromosomityyppiset aberratiot eli poikkeavuudet. Analyysien perusteella määritettiin frekvenssi kummallekin poikkeavuudelle eli laskettiin sekä disentristen kromosomien että kaikkien kromosomityyppisten aberratioiden määrä erikseen yhteen ja jaettiin analysoitujen solujen lukumäärällä (tyypillisimmin 500 analysoitua solua/analyysi).

Yleensä lymfosyyteissä esiintyvien disentristen kromosomien perusteella arvioidaan säteilyannos, mutta Kiovassa olleiden henkilöiden verinäytteistä löytyi niin vähän disentrisiä kromosomeja, että annosarvion tekeminen ei ollut mahdollista. Annosarvio tehdään säteilyn laatu huomioden seuraavan yhtälön mukaisesti: $Y = C + \alpha D + \beta D^2$, jossa Y on disentristen kromosomien määrä, C disentristen kromosomien taustataso, D absorboitunut annos, α lineaarinen kerroin ja β kvadraattinen kerroin (Lindholm 2000).

Taulukko 5. Säteilyaltistuksen arviointimenetelmillä saatujen mittaustietojen lukumäärä tutkimusväestössä

		Annostietoja yhteensä
Filmi		108
	+ sisäinen efektiivinen annos	49
	+ kilpirauhasannos	48
	+ kromosomianalyysi	21
Sisäinen efektiivinen annos a)		57
	+ kilpirauhasannos	55
	+ kromosomianalyysi	22
Kilpirauhasannos a)		55
	+ kromosomianalyysi	20
Kaikki annokset		17

a) Annokset arvioitu kokokehomittauksen perusteella

6.3 Syöpäseuranta

Tutkimusväestössä 26.4.1986–31.12.1999 ilmenneet syöpätapaukset (n=8) selvitettiin Suomen Syöpärekisteristä. Tutkimusväestön syöpäsairastavuutta seurattiin onnettomuuspäivästä viimeiseen mahdolliseen päivämäärään, johon asti syöpäilmaantuvuustiedot olivat kattavia. Henkilövuosien seurannan päättymispäivämäärä oli 31.12.1999 tai ennen tätä ollut syövän diagnoosipäivämäärä tai mahdollinen kuolin- tai maastamuuttopäivämäärä. Syöpäanalyysistä jouduttiin jättämään kaksi henkilöä pois, sillä heillä ei ollut osoitetta Suomessa, eikä heistä ollut näin ollen saatavissa myöskään sairastumistietoja.

Suomen Syöpärekisterissä määritettiin odotetut syöpätapaukset ja laskettiin väestön henkilövuodet. Odotettujen syöpätapausten määrä laskettiin koko maan ilmaantuvuuslukujen perusteella aineiston ikä- ja sukupuoli-jakauman mukaisesti. Odotettujen ja havaittujen tapausmäärien perusteella aineistosta määritettiin vakioidut ilmaantuvuussuhteet kaikille syöville yhteensä sekä säteilyaltistukseen liitetuille leukemialle ja kilpirauhassyövälle erikseen.

Kaikkien syöpien odotetun ilmaantuvuuden sekä tutkimushenkilöiden keskimääräisen kokonaisannoksen perusteella laskettiin säteilyaltistuksen tutkimusväestölle aiheuttama syövän lisäriski. Keskimääräinen kokonaisannos muodostettiin laskemalla yhteen filmidosimetrialla saatu keskimääräinen ulkoinen annos ja kokokehomittauksesta saatu keskimääräinen sisäinen efektiivinen annos. Säteilyaltistuksen aiheuttaman syövän lisäriskin arvioinnissa käytettiin kaavaa $\lambda_1 = \lambda_0 + \beta \times \lambda_0$, jossa λ_1 on ilmaantuvuus, λ_0 odotettu ilmaantuvuus tutkimusväestössä, β kaikkien kiinteiden kasvainten suhteellinen lisäriski eli ERR (Thompson ym. 1994) ja x keskimääräinen kokonaisannos (Sv).

6.4 Tietosuoja ja eettiset kysymykset

Tutkimuksesta laadittiin 15.2.2001 henkilötietolain (523/1999) 10 §:n mukainen henkilörekisteriseloste, jossa kuvattiin mm. rekisteröidyistä eli tutkimushenkilöistä kerättyjen tietojen laatu, tietojen suojaukset ja henkilötietojen käsittelyn perusteet. Henkilörekisteriseloste on saatavissa Säteilyturvakeskuksen kirjaamosta.

Tutkimusaineiston siirtämiseksi tutkijalle tehtiin 22.3.2001 tietojenluovutuspyyntö Säteilyturvakeskuksessa sijaitsevien Säteilybiologian laboratorion, Säteilyhygienian laboratorion ja Annosvalvonta-yksikön kesken. Tietojenluovutuspyynnössä määriteltiin tietojen käyttötarkoitus, tutkimuksen aihe ja työryhmä sekä tutkimuksen tietosuoja-asiat.

Tutkimuksen eettisen hyväksyttävyyden varmistamiseksi sille pyydettiin 7.3.2001 lausuntoa Säteilyturvaneuvottelukunnalta. Tutkimuksen tekemistä puoltava lausunto (1/01) Säteilyturvaneuvottelukunnalta saatiin 21.5.2001.

Lupaa Suomen Syöpärekisterin tietojen käyttämiseen tutkimuksessa haettiin 14.3.2001 Sosiaali- ja terveysalan tutkimus- ja kehittämiskeskuselta eli STAKES:lta. Lupa tähän saatiin 18.5.2001.

Tutkimushenkilöiden nykyisten ammatti-, kuolin-, maastamuutto- ja asuintietojen saamiseksi tehtiin 8.3.2001 tietolupapyyntö Väestörekisterikeskukselle. Väestörekisterikeskuksen myöntämä Väestötietolain (507/1993) mukainen tietolupa tutkimusväestöön kuuluvien henkilöiden taustatietojen selvittämiseksi saatiin 2.5.2001.

Tutkimuksen aloittamisesta tehtiin 4.5.2001 henkilötietolain (523/1999) 36 §:n mukainen ilmoitus tietosuojavaltuutetulle. Tietosuojavaltuutetun lausunto tutkimuksesta saatiin 4.6.2001.

Tutkimuksen aloittamisesta tiedotettiin 2.4.2001 Lemminkäinen Oy:n työterveyshuoltoon. Tutkimuksen tuloksista tiedotetaan vielä erikseen tammi-kuussa 2002.

7 Tulokset

7.1 Säteilyle altistuminen

Filmidosimetrialla saatiin kattavimmat tiedot tutkimusväestön altistumisesta. Filmiannot vaihtelivat 0.05:n ja 19.6:n mSv:n välillä, keskittyen kuitenkin vaihteluvälin ensimmäiseen neljännekseen (Taulukko 6).

Taulukko 6. Filmidosimetreilla mitattujen kokonaisannosten (n=108) jakauma (mSv)

Minimi	Maksimi	Keskiarvo	Mediaani	25% persentiili	75% persentiili
0,05	19,6	3,31	2,23	1,09	4,00

Mittauksen perusteella lasketut sisäiset efektiiviset annokset vaihtelivat tutkimusväestössä alle 0,1 ja 1,3 mSv:n välillä, keskimäärin tutkimusväestö oli saanut 0,6 mSv:n suuruisen annoksen (Taulukko 7). Kilpirauhasannokset vaihtelivat 0,2 ja 31 mSv:n välillä ja keskimääräinen annos oli suuruudeltaan 10,7 mSv (Taulukko 7).

Taulukko 7. Kokokehomittauksen perusteella arvioidut sisäiset efektiiviset (n=57) ja kilpirauhasannokset (n=55) (mSv)

	Minimi	Maksimi	Keskiarvo	Mediaani	25% persentiili	75% persentiili
Sisäinen efektiivinen annos	0,1	1,3	0,5	0,5	0,2	0,8
Kilpirauhasannos	0,2	31	11	11	6,5	15

Kokokehomittauksissa havaittiin pääasiassa lyhytikäisiä radionuklideja (luku 6.2), jotka muodostivat mittauksen perusteella arvioidut sisäiset efektiiviset annokset. Kilpirauhasannoksista huomattava osa muodostui I-131:sta. Radioaktiivisesta cesiumista (Cs-134 ja Cs-137) aiheutunutta efektiivistä annosta ei kokokehomittauksen perusteella ollut mahdollista laskea. Tutkimusväestön altistumisen cesiumin radioaktiivisille isotoopeille oletettiin olevan jokseenkin samanlaista kuin muulla suomalaisväestöllä vuoden 1986 aikana (keskimäärin 0,06 mSv).

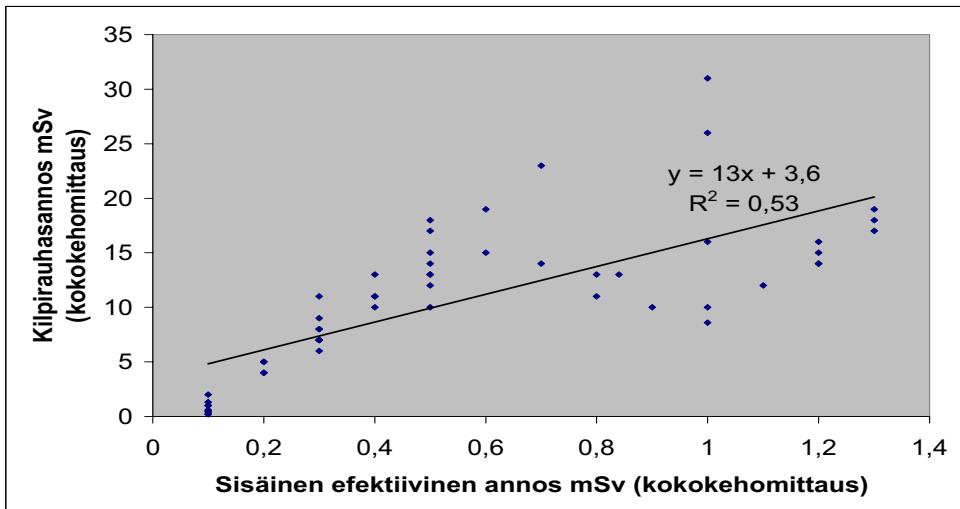
Kromosomianalyysyjä tehtiin tutkimuksessa vähiten, yhteensä 25 henkilöstä. Disentristen kromosomien esiintymisfrekvenssi oli tutkimusväestössä

keskimäärin 0,0008 ja kaikkien aberraatioiden keskimäärin 0,005 (Taulukko 8). Normaalina taustailmaantuvuutena voidaan disentristen kromosomien kohdalla pitää frekvenssiä 0,001, mutta kromosomiaberraatioiden kokonaisesiintyvyydelle ei ole olemassa yksiselitteistä vertailuarvoa (Carita Lindholm, henkilökohtainen tiedonanto 24.9.2001). Asiantuntijoiden mukaan tässä tutkimusväestössä havaitut kaikkien kromosomiaberraatioiden määrät ovat normaalin esiintyvyyden rajoissa (Carita Lindholm, henkilökohtainen tiedonanto 24.9.2001). Koska löydettyjen kromosomipoikkeavuuksien määrä oli tutkimusväestössä niin pieni, ei niiden perusteella tehty lainkaan varsinaista annosarviota.

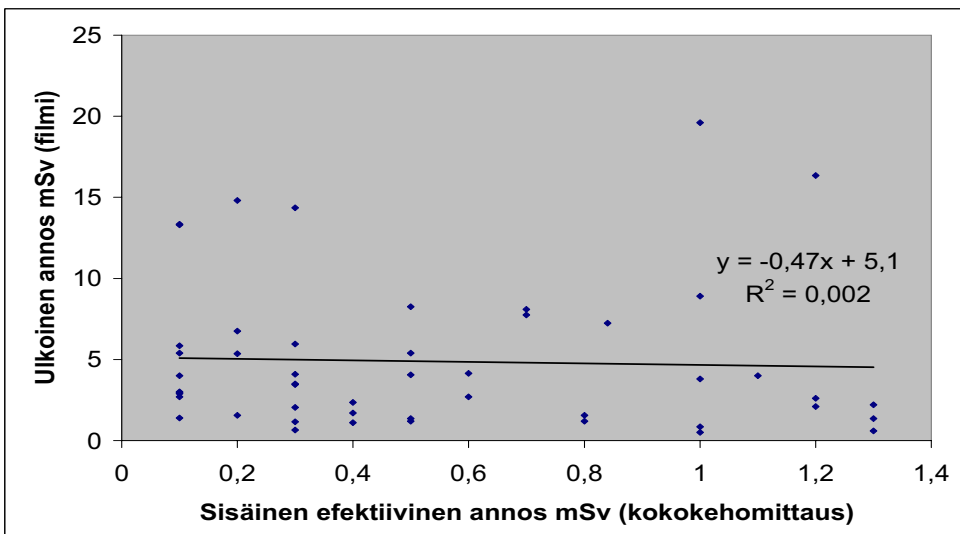
Eri menetelmien tuottamien annos- ja mittaustietojen yhteydet on esitetty kuvissa (Kuvat 5, 6 ja 7). Sisäinen efektiivinen annos ja kilpirauhasannos korreloivat verrattain hyvin (Kuva 6). Sisäinen efektiivinen annos ei korreloinut ulkoiseen annokseen (Kuva 5), eikä disentristen frekvenssiin (Kuva 7).

Taulukko 8. Kromosomianalyysissä löydettyjen disentristen kromosomien ja kokonaisaberraatioiden frekvenssien jakauma kaikilla analysoiduilla (n=25) ja tupakoi-villa (n=8)

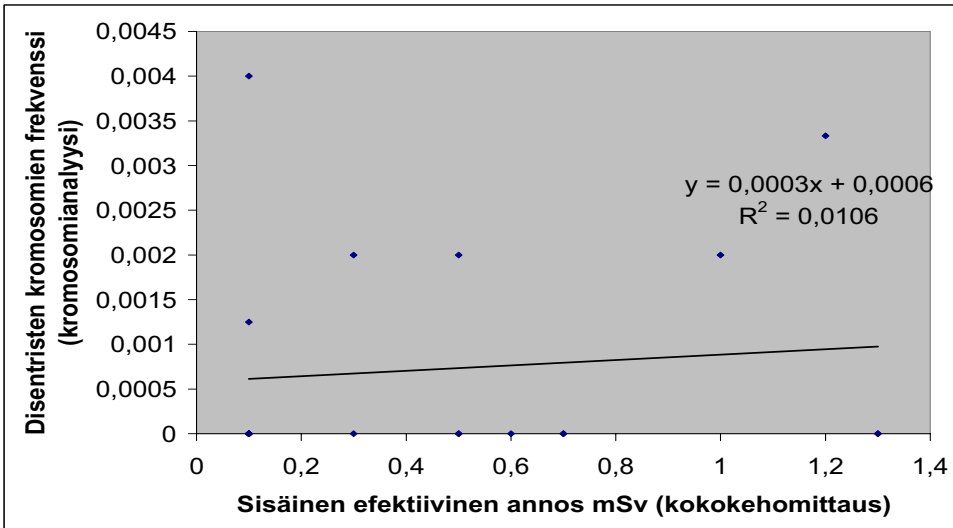
		Minimi	Mak-simi	Keski-arvo	Medi-aani	25 % per-sentiili	75 % per-sentiili
Disentristet kromosomit	Kaikilla	0	0,004	0,0008	0	0	0,002
	Tupakoi-villa	0	0,004	0,002	0,002	0,001	0,003
Kaikki kromosomi-aberraatiot	Kaikilla	0	0,045	0,005	0,003	0	0,007
	Tupakoi-villa	0,003	0,016	0,007	0,006	0,005	0,008



Kuva 5. Sisäinen efektiivinen annos ja kilpirauhasannos tutkimusväestössä.



Kuva 6. Sisäinen efektiivinen annos ja ulkoinen annos tutkimusväestössä.



Kuva 7. Sisäinen efektiivinen annos ja disentristen kromosomien määrä tutkimusväestössä

Taulukko 9. Tutkimusväestössä havaitut ja odotetut syöpätapausmäärät sekä niiden ilmaantuvuussuhteet ja luottamusvälit

		Miehet	Naiset	Yhteensä
Kaikki syövät	havaitut	8	0	8
	odotetut	2,48	0,49	2,97
	SIR	3,22 [1,39–6,34]	0,00 [0,00–7,55]	2,69 [1,16–5,30]
Leukemia	havaitut	1	0	1
	odotetut	0,07	0,01	0,08
	SIR	13,75 [0,35–76,63]	0,00 [0,00–474]	12,43 [0,31–69,22]
Kilpirauhassyöpä	havaitut	0	0	0
	odotetut	0,05	0,02	0,07
	SIR	0,00 [0,00–77,32]	0,00 [0,00–166]	0,00 [0,00–52,78]

SIR= vakioitu ilmaantuvuussuhde, hakasulkeissa 95%:n luottamusväli

7.2 Syöpäilmaantuvuus

Tutkimusväestössä tehdyssä syöpäanalyysissä havaittiin yhteensä kahdeksan syöpää; keuhkosyöpä, ohutsuolen syöpä, munuaissyöpä, paksusuolen syöpä, peräsuolen syöpä, leukemia, myelooma ja sappirakon syöpä. Kaikki syövät ilmenivät miehillä.

Havaittujen syöpien ilmaantuvuus oli n. 2,7-kertainen verrattuna vastaavan ikäiseen suomalaisväestöön, kun tarkasteltiin kaikkia syöpiä yhteensä. Ero on tilastollisesti merkitsevä. Leukemian odotusarvo oli 0,08 ja niitä havaittiin yksi. Kilpirauhassyöpiä ei tutkimusväestössä havaittu yhtään (Taulukko 9). Eri ammattiryhmistä rakennustyöntekijöillä on havaittu olevan 1,2-kertainen riski sairastua kaikkiin syöpiin yhteensä (Pukkala 1995). Myös tähän verrattaessa tutkimusväestön syöpäilmaantuvuus on suurempi, mutta ero ei kuitenkaan ollut enää tilastollisesti merkitsevä.

Tutkimusväestön saaman säteilyaltistuksen arvioitiin aiheuttavan tutkimusväestössä seuranta-aikana 26.4.1986–31.12.1999 kaikkien kiinteiden syöpäkasvainten osalta 0,007 ylimääräistä syöpätapausta, kun tutkimusväestön sisäisen ja ulkoisen annoksen muodostama keskimääräinen kokonaisannos oli 3,81 mSv ja kaikkien kiinteiden kasvainten suhteellinen lisäriski 0,63 (Thompson ym. 1994).

8 Tulosten pohdinta

Filmidosimetreilla kevästä 1986 alkuvuoteen 1987 mitatut ulkoiset annokset tutkimusväestössä ovat melko pieniä. Verrattaessa näitä annoksia lakisääteiseen annosrajaan (Säteilyasetus 1512/91), joka on muulle kuin säteilytyöntekijälle 1 mSv vuodessa, ovat ne tähän nähden keskimäärin kolme kertaa suurempia. Säteilytyöntekijän annosraja on jo huomattavasti suurempi, 20 mSv vuodessa, mutta se ei ole tässä pätevä vertailuarvo, sillä tämän tutkimuksen väestö ei ollut Kiovassa säteilytyössä. Tavallisen suomalaisväestön elinympäristön säteilystä saama kokonaisannos on vuodessa n. 3,7 mSv, josta yli puolet aiheutuu sisäilman radonista. Tshernobylistä suomalaisille aiheutui vuonna 1986 keskimäärin 0,3 mSv:n kokonaisannos.

Kokokehomittausten perusteella Kiovassa onnettomuuden aikaan olleille henkilöille lasketut sisäiset efektiiviset annokset ovat pieniä. Muulle suomalaisväestölle tehdyissä kokokehomittauksissa ei havaittu kuitenkaan lainkaan lyhytikäisiä radionuklideja (T. Rahola, henkilökohtainen tiedonanto 13.9.2001), joista Kiovassa olleille henkilöille sisäinen efektiivinen annos muodostui. Tavallinen Suomessa onnettomuuden tapahtuessa ollut suomalaisväestö ei siis todennäköisesti altistunut lyhytikäisille radionuklideille. Tämän vuoksi voidaankin katsoa, että Kiovassa olleet tutkimushenkilöt ovat altistuneet vuoden 1986 aikana kokokehomittauksen perusteella määritetyn sisäisen efektiivisen annoksen verran, eli keskimäärin 0,5 mSv, enemmän kuin muut suomalaiset.

Kokokehomittausten perusteella arvioidut kilpirauhasannokset ovat tutkimusväestössä kohtuullisen suuria. Muun suomalaisväestön onnettomuuden jälkeisistä kilpirauhasannoksista ei ole kattavaa tietoa, mutta muutamille suomalaisille tehtiin tuolloin kokokehomittaus, jonka perusteella annos pystyttiin arvioimaan. Näiden mitattujen suomalaisten kilpirauhasannokset vaihtelevat 0–0,02 mSv:n välillä (STUK-A-55 1987), joten niihin verrattuna tutkimusväestön annokset ovat tuhatkertaisia.

Kromosomianalyyseissä saadut tulokset kertovat hyvin pienestä altistumisesta. Aberraatioita oli analysoiduissa näytteissä niin vähän, että niiden perusteella ei arvioitu säteilyannosta. Pienin kromosomianalyyseillä arvioitavissa oleva annos on noin 100–200 mGy, joka vastaa disentrinen frekvenssiä 0,004–0,006. Tässä tutkimuksessa havaittu keskimääräinen frekvenssi oli tästä noin kahdeksasosa, joten annosarvion tekeminen ei ollut mielekäästä (Carita Lindholm, henkilökohtainen tiedonanto 6.11.2001). Kromosomianalyyseillä voidaan määrittää ulkoisesta altistuksesta aiheutunut annos luotettavammin

kuin sisäisestä altistuksesta aiheutunut annos. Näytteet otettiin toukokuussa 1986, joten ajankohta oli optimaalinen mahdollisten vaikutusten esiin tulemisen kannalta. Tässä tutkimuksessa vaikutuksia ei voitu kuitenkaan odottaa hyvin pienten aberraatioiden määrän vuoksi.

Tämän tutkimuksen kohteena oleva suomalaisten rakennustyöntekijöiden joukko työskenteli Kiovassa, joka sijaitsee nykyisessä Ukrainassa, n. 100 km:n etelään Tshernobylin ydinvoimalasta (Kuva 4). Ukrainassa väestön ulkoinen efektiivinen annos oli ensimmäisenä onnettomuuden jälkeisenä vuotena 17–24 mSv. Suhteessa muihin ukrainalaisiin kiovalaiset saivat vähemmän laskeumaa, sillä Kiova sijaitsee voimalan eteläpuolella ja tuuli kuljetti laskeumaa enimmäkseen voimalan pohjoispuolelle (UNSCEAR 2000, vol. II). Vaikka erillisiä kiovalaisten annostietoja ei olekaan käytettävissä, voidaan koko Ukrainan väestön annostietoihin nojaten kuitenkin päätellä, että kiovalaisten annokset olivat huomattavasti suurempia, ehkä kymmenkertaisia, verrattuna tässä tutkimuksessa filmeillä mitattuihin tutkimushenkilöiden ulkoisiin annoksiin.

Ukrainalaisille ihmisille lyhytikäisistä radionuklideista aiheutuneesta sisäisestä efektiivisestä annoksesta ei ole olemassa vertailun mahdollistavaa tietoa. Myöskään kilpirauhasannoksia ei voi vertailla, sillä ukrainalaisista on tiedossa absorboitunut annos ja suomalaisista tutkimushenkilöistä efektiivinen annos. Oletettavasti huomattavan paljon enemmän altistuneilla virolaisilla puhdistustyöntekijöillä havaittiin disentristen kromosomien frekvenssin olevan keskimäärin 0,001 (Littlefield ym. 1998), mikä vastaa taustafrekvenssiä ja on samansuuruisen kuin tässä tutkimuksessa havaittu keskimääräinen frekvenssi.

Tutkimusväestön altistuminen Kiovassa välittömästi onnettomuuden jälkeen on tapahtunut todennäköisimmin molempien altistumisreittien kautta. Sisäisesti henkilöt altistuivat sekä hengitysilman että ravinnon kautta, ja ulkoinen altistuminen johdettiin lähinnä saastuneen maaperän säteilystä. Onnettomuuden jälkeen Kiovaan takaisin lähteneet henkilöt altistuivat ulkoisesti maaperän säteilylle, mikä voidaan huomata filmidosimetrian annostiedoista, mutta sisäisesti vain hengitysilman kautta, sillä he eivät nauttineet paikallista ravintoa. Suurin osa sisäisestä altistumisesta on siis tapahtunut välittömästi onnettomuuden jälkeen ennen Suomeen evakuoimista, mikä pystyttiinkin jäljittämään tutkimushenkilöille Suomessa tehdyissä kokokehmittauksissa. Koska ajankohta oli ulkoisessa ja sisäisessä altistumisessa erilainen, eivät ulkoinen ja sisäinen annos korreloineet keskenään. Sisäinen efektiivinen annos ja kilpirauhasannos kuitenkin korreloivat, mikä johtuu todennäköisesti siitä, että ne molemmat perustuvat samaan mittaukseen. Annostietoja vertailtaessa on lisäksi muistettava, että käytössä olleet kolme eri menetelmää eivät mittaa samanlaista altistumista, eivätkä ole vertailukelpoisia keskenään.

Tutkimusväestöllä oli tavalliseen suomalaisväestöön verrattuna lähes kolminkertainen riski sairastua kaikkiin, erittelemättömiin syöpiin. Syövät ovat kuitenkin luonteeltaan yhtä havaittua leukemiaa lukuun ottamatta sellaisia, joita ei voida suoranaisesti yhdistää säteilyaltistumiseen. Lisäksi huolimatta melko suurista kilpirauhasannoksista yleisesti säteilyaltistumiseen liitettyjen syöpälaatuojen, kuten leukemian ja kilpirauhassyövän havaittu tapausmäärä ei ollut tilastollisesti merkitsevästi odotettua suurempi. Kaikkien syöpien ilmaantuvuus tutkimusväestössä ei myöskään eronnut tilastollisesti merkitsevästi muilla rakennustyöntekijöillä havaitusta kaikkien syöpien ilmaantuvuudesta.

Säteilyaltistuksen aiheuttaman kaikkien kiinteiden kasvainten lisäriskin laskettiin olevan pieni. Tämän perusteella voidaan ajatella, että tutkimusväestössä havaittu suurempi syöpäilmaantuvuus saattaa johtua sattumasta, sillä aineisto on pieni ja tulos perustuu vain kahdeksaan syöpätapaukseen. On myös mahdollista, että tutkimuksessa määritettyihin annostietoihin tai kirjallisuudessa kuvattuihin kiinteiden kasvainten riskikertoimiin liittyy epävarmuutta. Säteilyn aiheuttaman lisäriskin laskennassa käytettiin Japanin atomipommitusten elonjääneiden tutkimuksissa havaittua riskikerrointa, joka perustuu äkilliseen ja voimakkaaseen altistumiseen ja on täten erilaista kuin tämän tutkimuksen väestön altistuminen. Näin ollen myös säteilyn aiheuttaman lisäriskin laskentaan liittyy epävarmuustekijöitä.

Tutkimuksen puute on syöpäanalyysin osalta se, että siinä ei ollut käytettävissä tietoja tärkeistä, mahdollisista sekoittavista tekijöistä kuten tupakoinnista. Säteilyaltistumisen määrällistä yhteyttä syövän ilmaantumiseen ei tutkimuksessa selvitetty, vaikka se olisi periaatteessa ollut mahdollista. Tällaista annos-vaste-analyysiä ei kuitenkaan ollut mielekästä tehdä syöpätapausten vähäisen määrän takia.

Yhteenvetona voidaan sanoa, että tutkimusväestön altistuminen oli melko vähäistä, vaikka se ylittikin muun kuin säteilytyön vuotuisen annosrajan. Syöpäilmaantuvuus oli suurempi kuin tavallisessa suomalaisväestössä ja rakennustyöntekijöiden väestössä, mikä saattaa kuitenkin johtua sattumasta. Tshernobylin onnettomuus aiheutti ja aiheuttaa kuitenkin vielä tänäkin päivänä paljon huolta eri maiden väestöjen keskuudessa ja sen vaikutukset kiinnostavat huomattavan suurta yleisöä. Siksi tämäkin tutkimus oli hyvin tarpeellinen.

9 Kirjallisuusviitteet

Abelin T, Averkin JI, Egger M, Egloff B, Furmanchuk AW, Gurtner F, Korotkevich JA, Marx A, Matveyenko II, Okeanov AE, Ruchti C, Schaepfi W. Thyroid cancer in Belarus post-Chernobyl: Improved detection or increased incidence? *Soz Präventimed* 1994; 39: 189-197

Astakhova LN, Anspaugh LR, Beebe GW, Bouville A, Drozdovitch VV, Garber V, Gavrilin YI, Khrouch VT, Kuvshinnikov AV, Kuzmenkov YN, Minenko VP, Moschik KV, Nalivko AS, Robbins J, Shemiakina EV, Shinkarev S, Tochitskaya SI, Waclawiw MA. Chernobyl-related thyroid cancer in children of Belarus: A case- control study. *Radiat Res* 1998; 150: 349-56

Avetisian IL, Gulchiiy NV, Demidiuk AP, Stashuk AV. Thyroid pathology in residents of the Kiev region, Ukraine, during pre- and post-Chernobyl periods. *J Environ Pathol Toxicol Oncol* 1996; 15(2-4): 233-7

Gluzman DF, Abramenko IV, Sklyarenko LM, Nadgornaya VA, Zavelevich MP, Bilous NI, Poludnenko LY. Acute leukemias in children from the city of Kiev and Kiev region after the Chernobyl NPP catastrophe. *Pediatr Hematol Onkol* 1999; 16: 355-60

Heidenreich WF, Kenigsberg J, Jakob P, Buglova E, Goulko G, Paretzke HG, Demidchik EP, Golovneva A. Time trends of thyroid cancer incidence in Belarus after the Chernobyl accident. *Radiat Res* 1999; 151: 617-25

Inskip PD, Hartshorne MF, Tekkel M, Rahu M, Veidebaum T, Auvinen A, Crooks LA, Littlefield LG, McFee AF, Salomaa S, Mäkinen S, Tucker JD, Sorensen KJ, Bigbee WL, Boice JD Jr. Thyroid nodularity and cancer among Chernobyl cleanup workers from Estonia. *Radiat Res* 1997; 147: 225-35

International Agency for Research on Cancer. 2000. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, volume 75. Ionizing radiation, part 1: X- and gamma-radiation, and neutrons. Lyon, IARC.

International Atomic Energy Agency. 1986. Biological dosimetry: Chromosomal aberration analysis for dose assessment. IAEA Technical Report Series no. 260. Vienna: International Atomic Energy Agency.

International Commission on Radiological Protection. 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, volume 21: 1-3. Oxford: Pergamon Press.

Ivanov EP, Tolochko GV, Shuvaeva LP, Ivanov VE, Iaroshevich RF, Becker S, Nekolla E, Kellerer AM. Infant leukemia in Belarus after the Chernobyl accident. *Radiat Environ Biophys* 1998; 37: 53-5

Ivanov EP, Tolochko GV, Shuvaeva LP, Lazarev VS, Ivanov VE. Childhood leukemia in Gomel, Mogilev, Vitebsk and Grodno Oblasts (regions) of Belarus prior and after Chernobyl disaster. *Hematology Reviews* 1995; 9: 169-79

Ivanov VK, Gorsky AI, Tsyb AF, Maksyutov MA, Rastopchin EM. Dynamics of thyroid cancer incidence in Russia following the Chernobyl accident. *J Radiol Prot* 1999; 19(4): 305-18

Ivanov VK, Rastopchin EM, Gorsky AI, Ryvkin VB. Cancer incidence among liquidators of the Chernobyl accident: Solid tumors, 1986-1995. *Health Phys* 1998; 74(3): 309-15

Ivanov VK, Tsyb AF, Gorsky AI, Maksyutov MA, Rastopchin EM, Konogorov AP, Biryukov AP, Matyash VA, Mould RF. Thyroid cancer among "liquidators" of the Chernobyl accident. *Br J Radiol* 1997; 70: 937-41

Ivanov VK, Tsyb AF, Gorsky AI, Maksyutov MA, Rastopchin EM, Konogorov AP, Korelo AM, Biryukov AP, Matyash VA. Leukaemia and thyroid cancer in emergency workers of the Chernobyl accident: Estimation of radiation risks (1986-1995). *Radiat Environ Biophys* 1997; 36: 9-16

Jakob P, Kenigsberg Y, Zvonova I, Goulko G, Buglova E, Heidenreich WF, Golovneva A, Bratilova AA, Drozdovitch V, Kruk J, Pochtennaja GT, Balonov M, Demidchik EP, Paretzke HG. Childhood exposure due to the Chernobyl accident and thyroid cancer risk in contaminated areas of Belarus and Russia. *Br J Cancer* 1999; 80(9): 1461-9

Laaksonen J. 1986. Tshernobylin ydinvoimalaitosonnettomuus ja arviointia sen vaikutuksista. Eri painos Jukka Laaksosen esitelmästä Sähkövoimapäivillä 23.9.1986. Helsinki: Säteilyturvakeskus

Lazutka JR. Chromosome aberrations and rogue cells in lymphocytes of Chernobyl clean-up workers. *Mutat Res* 1996; 350: 315-29

Lindholm C. 2000. Stable chromosome aberrations in the reconstruction of radiation doses. Helsinki: Oy Edita Ab.

Littlefield LG, McFee AF, Salomaa SI, Tucker JD, Inskip PD, Sayer AM, Lindholm C, Mäkinen S, Mustonen R, Sorensen K, Tekkel M, Veidebaum T, Auvinen A, Boice JD Jr. Do recorded doses overestimate true doses received by Chernobyl cleanup workers? Results of cytogenetic analyses of Estonian workers by fluorescence *in situ* hybridization. *Radiat Res* 1998; 150: 237-49

Lubin JH, Qiao YL, Taylor PR, Yao SX, Schatzkin A, Mao BL, Rao JY, Xuan XZ, Li JY. Quantitative evaluation of the radon and lung cancer association in a case control study of Chinese tin miners. *Cancer Res* 1990; 50(1): 174-80

Paile W, Mustonen R, Salomaa S, Voutilainen A. 1996. Säteily ja terveys. Helsinki: Oy Edita Ab.

Pierce DA, Mendelsohn ML. A model for radiation-related cancer suggested by atomic bomb survivor data. *Radiat Res* 1999; 152: 642-54

Pierce DA, Shimizu Y, Preston DL, Vaeth M, Mabuchi K. Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12, part 1. Cancer: 1950-1990. *Radiat Res* 1996; 146: 1-27

Preston DL, Kusumi S, Tomonaga M, Izumi S, Ron E, Kuramoto A, Kamada N, Dohy H, Matsui T, Nonaka H, Thompson DE, Soda M, Mabuchi K. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987. *Radiat Res* 1994; 137(2 Suppl): S68-S97

Prisyazhniuk A, Gristchenko V, Zakordonets V, Fouzik N, Slipeniuk Y, Ryzhak I. The time trends of cancer incidence in the most contaminated regions of the Ukraine before and after the Chernobyl accident. *Radiat Environ Biophys* 1995; 34: 3-6

Pukkala E. 1995. Cancer risk by social class and occupation. A survey of 109 000 cancer cases among Finns of working age. Basel: Karger

Rahola T, Suomela M, Illukka E, Puhakainen M, Pusa S. 1987. Radioactivity of people in Finland after the Chernobyl accident in 1986. Supplement 9 to Annual Report STUK-A55. Helsinki: Säteilyturvakeskus.

Rahu M, Tekkel M, Veidebaum T, Pukkala E, Hakulinen T, Auvinen A, Rytömaa T, Inskip PD, Boice JD Jr. The Estonian study of Chernobyl cleanup workers : II. Incidence of cancer and mortality. *Radiat Res* 1997; 147: 653-7

Ron E, Lubin JH, Shore RE, Mabuchi K, Modan B, Pottern LM, Schneider AB, Tucker MA, Boice JD Jr. Thyroid cancer after exposure to external radiation: a pooled analysis of seven studies. *Radiat Res* 1995; 141(3): 259-77

Saari H, Luokkanen S, Kulmala M, Lehtinen S, Raunemaa T. Isolation and characterization of hot particles from Chernobyl fallout in southwestern Finland. *Health Phys* 1989; 57(6): 975-84

STUK A-55. 1987. Studies on environmental radioactivity in Finland in 1986. Annual report. Helsinki: Valtion painatuskeskus.

Säteilyasetus 20.12.1991/1512

Thompson DE, Mabuchi K, Ron E, Soda M, Tokunaga M, Ochikubo S, Sugimoto S, Ikeda T, Terasaki M, Izumi S, Preston DL. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part II: solid tumors, 1958-1987. *Radiat Res* 1994; 137(2 Suppl): S17-S67

Tronko MD, Bogdanova TI, Komissarenko IV, Epstein OV, Oliynyk V, Kovalenko A, Likhtarev IA, Kairo I, Peters SB, LiVolsi VA. Thyroid carcinoma in children and adolescents in Ukraine after the Chernobyl nuclear accident. Statistical data and clinicomorphologic characteristics. *Cancer* 1999; 86: 149-56

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2000. Sources and effects of ionizing radiation, volume I: Sources. UNSCEAR Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations: New York.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2000. Sources and effects of ionizing radiation, volume II: Effects. UNSCEAR Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations: New York.

STUK-A-sarjan julkaisuja/STUK-A reports

STUK-A190 Lähkölä A. Tshernobylin onnettomuuden aikaan Kiovassa olleiden suomalaisten säteilyaltistuminen ja syöpäilmaantuvuus. Helsinki 2002.

STUK-A189 Leszczynski K. Advances in traceability of solar ultraviolet radiation measurements. Helsinki 2002.

STUK-A188 Pöllänen R. Nuclear fuel particles in the environment - characteristics, atmospheric transport and skin doses. Helsinki 2002.

STUK-A187 Lindholm Carita, Simon Steve, Makar Beatrice, Baverstock Keith (Eds.) Workshop on dosimetry of the population living in the proximity of the Semipalatinsk atomic weapons test site. Helsinki 2002.

STUK-A186 Ammann M, Sinkko K, Kostianen E, Salo A, Liskola K, Hämäläinen R P, Mustajoki J. Decision analysis of countermeasures for the milk pathway after an accidental release of radionuclides. Helsinki 2001.

STUK-A185 Sinkko K, Ammann M, Kostianen E, Salo A, Liskola K, Hämäläinen R P, Mustajoki J. Maitotuotteisiin kohdistuvat vastatoimenpiteet ydinonnettomuustilanteessa. Helsinki 2001.

STUK-A184 Servomaa A, Parviainen T (toim.). Säteilyturvallisuus ja laatu röntgendiagnostiikassa 2001. Helsinki 2001.

STUK-A183 Sinkko K, Ammann M (eds.). RODOS Users' Group: Final project report. Helsinki 2001.

STUK-A182 Mäkeläinen I, Huikuri P, Salonen L, Markkanen M, Arvela H. Talousveden radioaktiivisuus - perusteita laatuvaatimuksille. Helsinki 2001.

STUK-A181 Jalarvo V. Suomalaisten solariuminkäyttö. Helsinki 2000.

STUK-A180 Salomaa S, Mustonen R (eds.). Research activities of STUK 1995 - 1999. Helsinki 2000.

STUK-A179 Salomaa S (ed.). Research projects of STUK 2000 - 2002. Helsinki 2000.

STUK-A178 Rantavaara A, Calmon P, Wendt J, Vetikko V. Forest food chain and dose model (FDMF) for RODOS. Model description. Helsinki 2001.

STUK-A177 Rantavaara A, Moring M. Puun tuhkan radioaktiivisuus. Helsinki 2001.

STUK-A176 Lindholm C. Stable chromosome aberrations in the reconstruction of radiation doses. Helsinki 2000.

STUK-A175 Annanmäki M, Turtiainen T, Jungelas H, Rausse C. Disposal of radioactive waste arising from water treatment: Recommendations for the EC. Helsinki 2000.

STUK-A174 Servomaa A, Parviainen T (toim.). Säteilyturvallisuus ja laatu röntgendiagnostiikassa 2000. Koulutuspäivät 24.–25.2.2000 ja 10.–11.4.2000. Helsinki 2000.

- STUK-A173** Hämäläinen RP, Sinkko K, Lindstedt M, Ammann M, Salo A. Decision analysis interviews on protective actions in Finland supported by the RODOS system. Helsinki 2000.
- STUK-A172** Turtiainen T, Kokkonen P, Salonen L. Removal of Radon and Other Natural Radionuclides from Household Water with Domestic Style Granular Activated Carbon Filters. Helsinki 1999.
- STUK-A171** Voutilainen A, Mäkeläinen I, Huikuri P, Salonen L, Arvela H. Porakaivoveden radonkartasto/Radonatlas över borrbrunnar/Radon Atlas of wells drilled into bedrock in Finland. Helsinki 1999.
- STUK-A170** Saxén R, Koskelainen U, Alatalo M. Transfer of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs into fishes in some Finnish lakes. Helsinki 2000.
- STUK-A169** Annanmäki M, Turtiainen T (eds.). Treatment Techniques for Removing Natural Radionuclides from Drinking Water. Helsinki 1999.
- STUK-A168** Suomela M, Bergman R, Bunzl K, Jaakkola T, Rahola T, Steinnes E. Effect of industrial pollution on the distribution dynamics of radionuclides in boreal understorey ecosystems (EPORA). Helsinki 1999.
- STUK-A167** Thorring H, Steinnes E, Nikonov V, Rahola T, Rissanen K. A summary of chemical data from the EPORA project. Helsinki 1999.
- STUK-A166** Rahola T, Albers B, Bergman R, Bunzl K, Jaakkola T, Nikonov V, Pavlov V, Rissanen K, Schimmack W, Steinnes E, Suomela M, Tillander M, Åyräs M. General characterisation of study area and definition of experimental protocols. Helsinki 1999.
- STUK-A165** Ilus E, Puhakainen M, Saxén R. Strontium-90 in the bottom sediments of some Finnish lakes. Helsinki 1999.
- STUK-A164** Kosunen A. Metrology and quality of radiation therapy dosimetry of electron, photon and epithermal neutron beams. Helsinki 1999.
- STUK-A163** Servomaa A (toim.). Säteilyturvallisuus ja laadunvarmistus röntgendiagnostiikassa 1999. Helsinki 1999.
- STUK-A162** Arvela H, Rissanen R, Kettunen A-V ja Viljanen M. Kerrostalojen radonkorjaukset. Helsinki 1999.
- STUK-A161** Jokela K, Leszczynski D, Paile W, Salomaa S, Puranen L, Hyysalo P. Radiation safety of handheld mobile phones and base stations. Helsinki 1998.
- STUK-A160** Voutilainen A, Vesterbacka K, Arvela H. Radonturvallinen rakentaminen - Kysely kuntien viranomaisille. Helsinki 1998.
- STUK-A159** Hämäläinen RP, Sinkko K, Lindstedt M, Ammann M, Salo A. RODOS and decision conferencing on early phase protective actions in Finland. Helsinki 1998.

Täydellisen listan STUK-A -sarjan julkaisuista saa STUKista.

The complete list of STUK-A reports is available from STUK.

