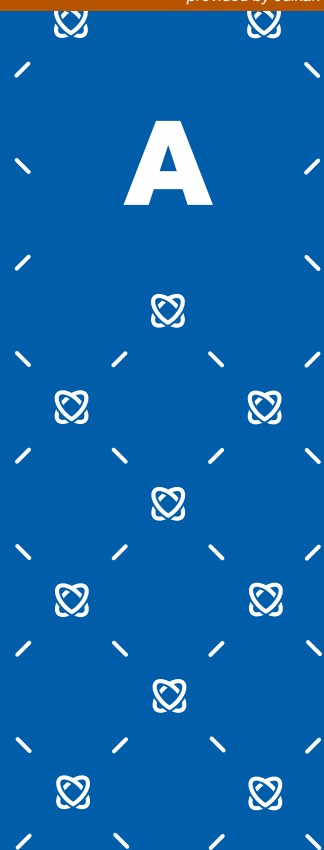




STUK-A263 / HUHTIKUU 2020

Siiskonen Teemu (toim.)



Suomalaisten keskimääräinen efektiivinen annos vuonna 2018

TÄMÄN RAPORTIN LAADINTAAN OVAT OSALLISTUNEET

Siiskonen T (toim.), Bly R, Isaksson R,
Kaijaluoto S, Kiuru A, Kojo K, Kurttio P,
Lahtinen J, Lehtinen M, Muikku M, Peltonen T,
Ruonala V, Torvela T, Turtiainen T, Virtanen S.

ISBN 978-952-309-446-8

ISSN 2243-1888



Suomalaisten keskimääräinen efektiivinen annos vuonna 2018

Siiskonen T. (toim.)

Siiskonen Teemu (toim.), Suomalaisten keskimääräinen efektiivinen annos vuonna 2018. STUK-A263, Helsinki 2020, 48 s.

AVAINSANAT: vuotuinen efektiivinen annos, väestö, ionisoiva säteily

Tiivistelmä

Tässä raportissa päivitetään tiedot suomalaisten vuosittain saamasta keskimääräisestä efektiivisestä annoksesta. Suomalaiset altistuvat niin luonnollisista kuin keinotekoisista lähteistä peräisin olevalle ionisoivalle säteilylle. Vuonna 2018 suomalaisten saama keskimääräinen efektiivinen annos oli 5,9 millisievertiä (mSv). Kaksi kolmasosaa tästä säteilyannoksesta, 4 mSv, on peräisin sisäilman radonista. Noin 1,1 mSv suomalaisten vuotuisesta efektiivisestä annoksesta aiheutuu luonnon taustasäteilystä (muu kuin sisäilman radon). Säteilyn lääketieteellinen käyttö aiheuttaa suomalaiselle keskimäärin 0,76 mSv vuotuisen efektiivisen annoksen.

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	4
1 JOHDANTO	7
2 SISÄILMAN RADON	9
2.1 RADONPITOISUUS ASUNNOISSA	9
2.2 ALTISTUSAIKA ASUNNOISSA	12
2.3 RADONIN AIHEUTTAMA TERVEYSHAITTA	12
2.4 EFEKTIIVISEN ANNOKSEN LASKEMINEN RADONILLE	13
3 ULKOINEN TAUSTASÄTEILY	15
3.1 MAAPERÄN JA RAKENNUSMATERIAALIEN RADIOAKTIIVISET AINEET	15
3.2 KOSMINEN SÄTEILY	21
3.3 LENTÄMINEN	22
4 SISÄINEN SÄTEILYALTISTUS – LUONNONNUKLIDIT	24
4.1 KALIUM-40	24
4.2 URAANI- JA TORIUMSARJAN NUKLIDIT ELINTARVIKKEISSA	25
4.3 URAANI- JA TORIUMSARJAN NUKLIDIT TALOUSVEDESSÄ	25

5	SISÄINEN SÄTEILYALTISTUS – KEINOTEKOISET NUKLIDIT	28
5.1	SISÄISEN SÄTEILYN AIHEUTTAMA ANNOS ARVIOITUNA RAVINNON KAUTTA	28
5.2	SISÄISEN SÄTEILYN AIHEUTTAMA ANNOS ARVIOITUNA SUORIEN IHMISMITTAUSTEN AVULLA	29
6	SÄTEILYN LÄÄKETIETEELLINEN KÄYTTÖ	32
6.1	RÖNTGENTUTKIMUKSET	32
6.2	ISOTOOPPITUTKIMUKSET	33
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	35
	LIITE 1: ANNOSMÄÄRITYKSESSÄ KÄYTETTÄVÄT SUUREET JA TERMIT	38
	LÄHDELUETTELO	42

I Johdanto

Ihminen altistuu elämänsä aikana sekä luonnollisista että keinotekoisista lähteistä peräisin olevalle ionisoivalle säteilylle. Tätä altistumista kuvataan efektiivisellä annoksella (ja sen elinikäisellä kertymällä), joka samalla kuvaa ionisoivan säteilyn ihmisen terveydelle aiheuttamaa haittaa. Eräs tällainen ionisoivan säteilyn aiheuttama haitta on syöpä, jonka riski nykykäsityksen mukaan kasvaa efektiivisen annoksen kasvaessa.

Suomalaisten vuosittain saamaa keskimääräistä efektiivistä annosta voidaan käyttää suhteuttamaan ionisoivan säteilyn terveyshaittoja muiden tekijöiden aiheuttamiin haittoihin. Annostietojen avulla voidaan vertailla säteilyaltistuksen eri lähteitä ja niiden merkitystä sekä pohtia vastatoimenpiteitä tai torjuntatoimia.

Suurin osa suomalaisten vuosittain saamasta efektiivisestä annoksesta aiheutuu luonnossa olevista radionuklideista. Ne voidaan jakaa neljään ryhmään: kosminen säteily, maaperän nuklideista aiheutuva säteily sekä ihmisen nielemät (ruoka, juomavesi) tai hengittämät nuklidit. Näistä kahta ensimmäistä voidaan pitää taustasäteilynä, sillä niiden aiheuttama annos on pysynyt vakiona vuosikymmeniä eikä saadun säteilyannoksen suuruuteen voi juuri vaikuttaa. Hengitettyjen tai nieltyjen luonnonnuklidien aiheuttamaan annokseen sen sijaan voidaan vaikuttaa. Sisäilman radon aiheuttaa Suomessa ylivoimaisesti suurimman säteilyaltistuksen.

Ihmisen toiminnoissa syntyviä tai käytettäviä radioaktiivisia aineita kutsutaan keinotekoisiksi radioaktiivisiksi aineiksi riippumatta siitä, ovatko ne alun perin olleet luonnon radionuklideja vai ydinreaktion tai muun toiminnan avulla syntyneitä. Keinotekoisia radioaktiivisia aineita on vapautunut ympäristöön ja pieniä määriä niitä vapautuu edelleenkin. Suomalaisten kannalta keinotekoisista säteilyn lähteistä – säteilyn lääketieteellinen käyttö pois lukien – eniten säteilyaltistusta ovat historiallisesti aiheuttaneet ydinasekokeet 1950–60 -luvuilla sekä vuonna 1986 tapahtunut Tšernobylin onnettomuus. Nykyään molempien vaikutus vuotuiseseen efektiiviseen annokseen on hyvin pieni.

Radioaktiivisia aineita ja ionisoivaa säteilyä käytetään hyväksi lääketieteessä sekä diagnostisissa tutkimuksissa ja toimenpiteissä, että sädehoidoissa.

Tutkimuksissa käytetään pääasiassa röntgensäteilyä tai radioaktiivisia lääkkeitä. Sädehoidossa käytetään ulkoisia ja sisäisiä säteilylähteitä tai radioaktiivisia lääkkeitä. Sädehoidoista aiheutuvaa säteilyaltistusta ei ole tässä raportissa huomioitu. Säteilyn lääketieteessä käytössä ihminen altistetaan säteilylle, koska hänen katsotaan hyötyvän siitä terveydellisesti.

2 Sisäilman radon

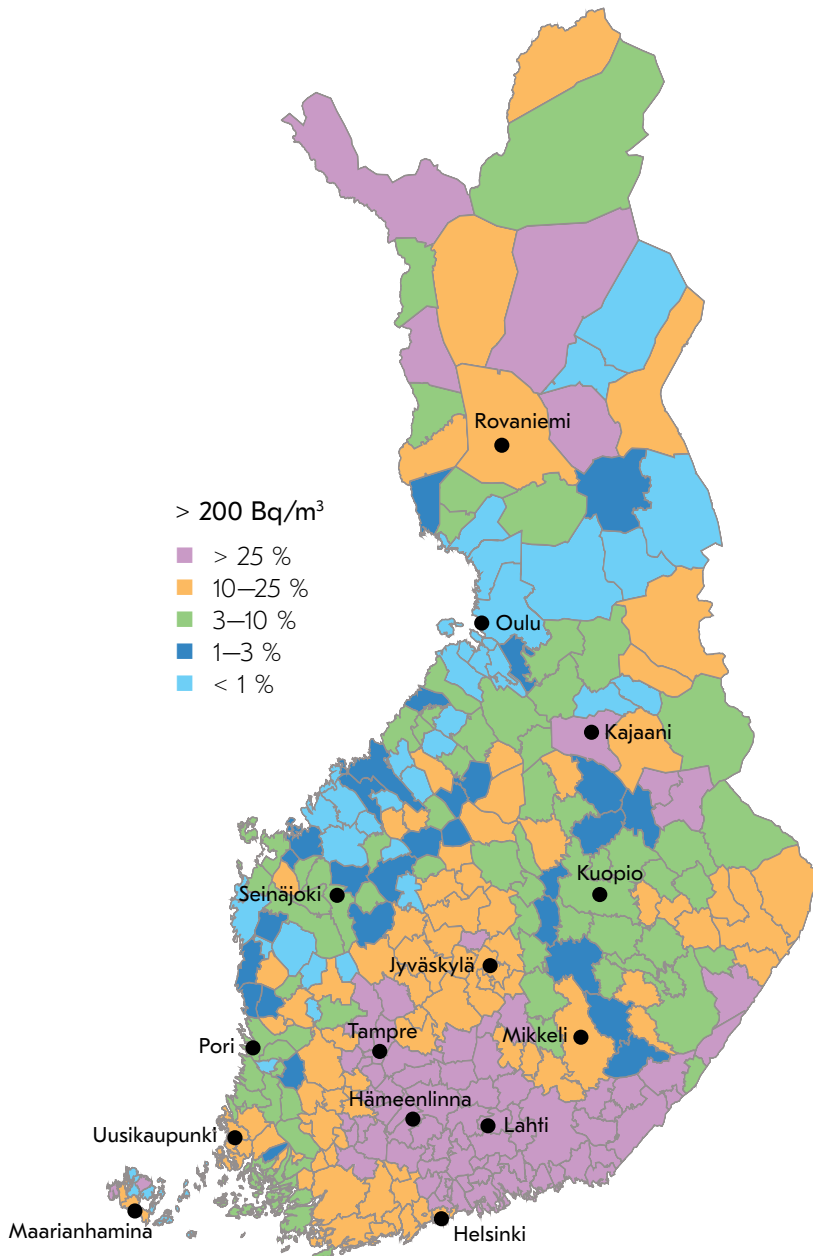
Tässä arvioissa tarkastellaan ainoastaan asuntojen hengitysilmassa esiintyvistä radonista aiheutuneita efektiivisiä annoksia. Työpaikalla ja muissa oleskelutiloissa (esim. päiväkodit, koulut, liikuntatilat ja kirjastot) tapahtuvalle radonaltistukselle annosarviota ei tehdä. Valtaosa radonaltistuksesta tapahtuu keskimäärin kodeissa.

2.1 Radonpitoisuus asunnoissa

Sisäilman radonista aiheutuvan annoksen laskennassa tarvitaan tieto keskimääräisestä altistuspitoisuudesta asunnossa sekä arvio kotona vietetystä ajasta. Arviot altistuspitoisuudesta saadaan vuosina 2006–2007 tehdystä väestötutkimukseen pohjautuvasta VARO-tutkimuksesta (Mäkeläinen ym. 2009). Tutkimuksessa oli mukana 2 866 asuntoa, joista 2 267 oli pientaloja (rivi- ja omakotitaloja) ja 599 kerrostaloissa. Radonpitoisuuden keskiarvo vuoden aikana selvitettiin kahdella puolen vuoden mittauksella. Mittaukset tehtiin STUKin alfajälkimenetelmään perustuvalla radonmittauspurkillä (Reisbacka 2011).

Kaikkien pientaloissa tehtyjen mittausten väestömäärillä painotettu keskiarvo oli 121 Bq/m³ ja kerrostaloissa tehtyjen 49 Bq/m³. Huoneilman radonpitoisuuden asukaskohtaiseksi keskiarvoksi saatiin 96 Bq/m³. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen 1044/2018 mukaisesti huoneilman radonpitoisuuden viitearvo on 300 Bq/m³. Uuden rakennuksen suunnittelua ja toteutusta koskeva viitearvo on 200 Bq/m³. Tulosten perusteella 15 %:ssa pientaloista radonpitoisuus ylitti 200 Bq/m³.

Suomen radonkartasta (Kuva 1) nähdään, että koko maassa esiintyy alueita, joissa pientaloasunnoissa mitatut radonpitoisuudet ovat suurempia kuin suunnittelua ja toteutusta koskeva viitearvo. Erityisen yleistä tämä on kuitenkin Salpausselän sora-alueilla sekä Kaakkois-Suomessa.



KUVA 1. Kunnittainen osuus mitatuista pientaloasunnoista, joissa radonpitoisuus on ollut suurempi kuin 200 Bq/m³.

Asunnoista suurimmat radonpitoisuudet esiintyvät pien- ja rivitaloasunnoissa sekä kerrostalojen maanvastaisissa kerroksissa. Pientaloissa suurimmat pitoisuudet esiintyvät rinnetaloissa, joissa maapaineseinä on rakennettu kevytbetoni- tai kevytsoraharkoista, jotka läpäisevät radonia ja/tai joissa on maanvarainen lattialaatta.

Vuonna 2018 radonpitoisuudet asunnoissa ovat todennäköisesti keskimäärin pienempiä kuin VARO-tutkimuksen aineiston perusteella tehdyt arviot. Tähän viittaa kaksi erillistä kehityssuuntaa:

- 1 Kerrostaloissa asuvan väestön osuus on kasvanut Suomessa. Vuoden 2006 tilastojen mukaan kerrostaloasuntojen määrä oli 43 % kaikista asunnoista ja kerrostaloissa asui noin 34 % väestöstä. Vuoden 2018 tilastojen mukaan kerrostaloasuntojen määrä on 46 % kaikista asunnoista ja kerrostaloissa asuu noin 37 % väestöstä (Asunnot ja asuinolot, Tilastokeskus). Koska kerrostaloasunnoissa radonpitoisuus on selvästi pienempi kuin pientaloissa, on väestön keskimääräinen altistuminen radonille nykyisin myös pienempää.
- 2 Uusien asuinrakennusten radonpitoisuudet ovat pienentyneet 2000-luvulla selvästi. Syynä tähän on radontorjunnan yleistyminen rakentamisessa. Vuonna 2000–2005 rakennettujen pientalojen radonpitoisuuden keskiarvo oli 120 Bq/m³, 2006–2008 rakennuttujen pientalojen 95 Bq/m³ ja vuonna 2012–2013 rakennusluvan saaneiden pientalojen enää 71 Bq/m³ (Mäkeläinen ym. 2009, Arvela ym. 2010, Kojo ym. 2016).

Maan sisäisen muuttoliikkeen takia nykyinen väestöpainotus aineistolle olisi hieman erilainen nyt kuin vuonna 2006. Sen vaikutusta radonpitoisuuden keskiarvoon ei tässä raportissa arvioida. Asuntokannan uudistumisen vaikutusta keskimääräiseen radonpitoisuuteen on vaikeaa arvioida luotettavasti ilman uutta valtakunnallista otantatutkimusta, joten myöskään sen vaikutusta ei tässä arvioida. Uusi otantatutkimus on suunniteltu aloitettavaksi lähivuosina.

Kohdan 1 mukainen korjaus on sitä vastoin vaivaton tehdä VARO-aineistolle. Vuoden 2018 asuntotilaston mukaisella painotuksella (pientalo-kerrostalo) keskiarvoksi saadaan 94 Bq/m³.

2.2 Altistusaika asunnoissa

Aiemmassa annosarviossa (Muikku ym. 2014) altistusajaksi asunnoissa arvioitiin 7 000 tuntia vuodessa. Se on sama kuin kansainvälisesti käytetty sisätiloissa oleskelun painokerroin 0,8 (esim. UNSCEAR, 2000). Vuonna 2002 tehdyn tutkimuksen mukaan suomalaiset viettävät omassa kodissa keskimäärin 6 400 h/a ja jonkun muun kodissa 300 h/a (Mäkeläinen ym. 2005), joten laskennassa käytetty altistusaika oli todennäköisesti hieman liian suuri. Tässä annosarviossa käytetään kuitenkin edelleen keskimääräisenä altistusajaksi 7 000 h/a, koska se vastaa kansainvälisesti käytettyä sisätiloissa oleskelun painokerrointa.

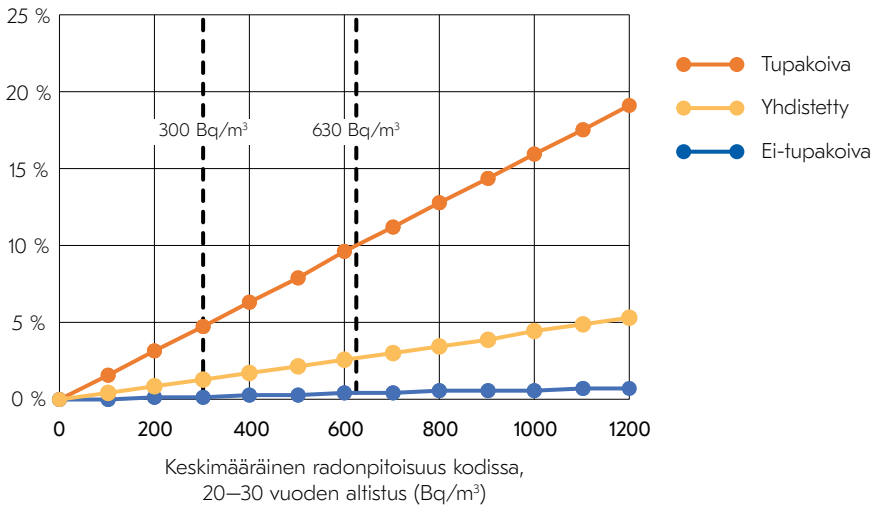
2.3 Radonin aiheuttama terveyshaitta

Radonille altistuminen lisää riskiä sairastua keuhkosityöpään. Radonaltistuksen ja keuhkosityövän yhteys on todistettu monissa epidemiologisissa tutkimuksissa. Muita terveysvaikutuksia ei ole voitu kiistatta osoittaa.

Kodeissa jokaista radonpitoisuuden 100 Bq/m³ kohden keuhkosityöpäriski lisääntyy suhteellisesti 16 %, kun altistusaika on noin 30 vuotta (Darby ym. 2006). Keuhkosityöpäriski siis kaksinkertaistuu, kun pitkäaikainen altistus pitoisuus on noin 600 Bq/m³. Tupakoivilla perusriski on huomattavasti suurempi ja näin ollen myös absoluuttinen riski lisääntyy tupakoimattomasta selvästi enemmän (Kuva 2). Tupakoivalla perusriski sairastua keuhkosityöpään on kuvassa 2 arvioitu olevan 10 % ja tupakoimattoman 0,4 %. Yhdistetty riski on arvioitu keskimääräiselle väestölle eri maanosissa, jossa on sekä tupakoivia että tupakoimattomia (ICRP, 2010).

Radonin aiheuttamia keuhkosityöpäkuolemia arvioidaan tapahtuvan Suomessa vuosittain noin 280. Näistä noin 240 aiheutuu tupakan ja radonin yhteisvaikutuksesta (Mäkeläinen 2010).

Absoluuttinen lisäriski (%) kuolla keuhkosyöpään 75 vuoteen mennessä



KUVA 2. Absoluuttinen lisäriski kuolla keuhkosyöpään kasvaa lineaarisesti radonaltistuksen funktiona.

2.4 Efektiivisen annoksen laskeminen radonille

Efektiivinen annos on säteilysuojelussa käytetty suure, jolla voidaan arvioida eri säteilyaltistuksien yhteismäärää ja rajoittaa altistumista niin pieneksi kuin käytännön toimin on mahdollista. Radonin tapauksessa efektiivinen annos kuvaa huonosti radonin aiheuttamaa riskiä sairastua keuhkosyöpään, koska efektiivinen annos ei ota huomioon tupakointia. Toisin sanoen sama efektiivinen annos aiheuttaa tupakoivalle ja tupakoimattomalle selvästi erisuuruisen riskin. Säteilysuojelussa ei kuitenkaan voida ottaa kantaa henkilön tupakointiin. Siksi efektiivinen annos arvioidaan tupakoivalle ja tupakoimattomalle samalla tavalla.

Edellisessä annospäivityksessä vuonna 2012 radonin aiheuttaman efektiivisen annoksen arvioinnissa käytettiin ICRP:n vuonna 1993 julkaisemaa annosmuuntokerrointa, joka oli laskettu tuolloisten epidemiologisten tutkimusten ja yleisen riskikertoimen perusteella. Vuonna 2017 ICRP julkaisi uuden, pääosin dosimetrisiin malleihin perustuvan annosmuuntokertoimen radonaltistukselle. Arvo on lähes kolminkertainen aiempaan verrattuna.

Uusi annosmuuntokerroin perustuu tarkentuneeseen tietoon radonin hajoamistuotteiden luovuttamasta säteilyn energiasta hengityselimistöissä, mutta se huomioi myös uusimmat epidemiologiset tutkimukset.

Tässä raportissa käytetään uutta annosmuuntokerrointa ja näin ollen radonaltistuksesta johtuva keskimääräinen efektiivinen annos on 4 mSv eli selvästi vuoden 2012 arviota suurempi. Uusi annosmuuntokerroin ei vaikuta riskinarviointiin, ts. radonista aiheutuvien syöpäkuolemien arvioituun määrään. Tämä arvio perustuu epidemiologisiin tutkimuksiin, ei efektiiviseen annokseen.

TAULUKKO 1. Radonpitoisuus suomalaisissa asunnoissa (väestöpainotus:

Mäkeläinen ym. 2009, asuntotyypipainotus: Asunnot ja asuinolot, Tilastokeskus vuosi 2018).

Asuntotyyppi	Radonpitoisuus (Bq/m ³)	Radonpitoisuutta vastaava vuosiannos (mSv)
Pientalot		
keskiarvo	121	5
mediaani	75	3
maksimi	2269	100
Kerrostalot		
keskiarvo	49	2
mediaani	36	2
maksimi	587	30
Koko väestö		
keskiarvo	94	4

3 Ulkoinen taustasäteily

Ihmiseen kohdistuu jatkuvasti ulkoista ionisoivaa säteilyä, jonka lähteinä ovat maaperässä ja rakennusmateriaaleissa olevat radioaktiiviset aineet tai joka on peräisin avaruudesta. Ulkoisen säteilyn kannalta ympäristössä esiintyvät luonnollista alkuperää olevat radionuklidit voidaan jakaa kahteen ryhmään:

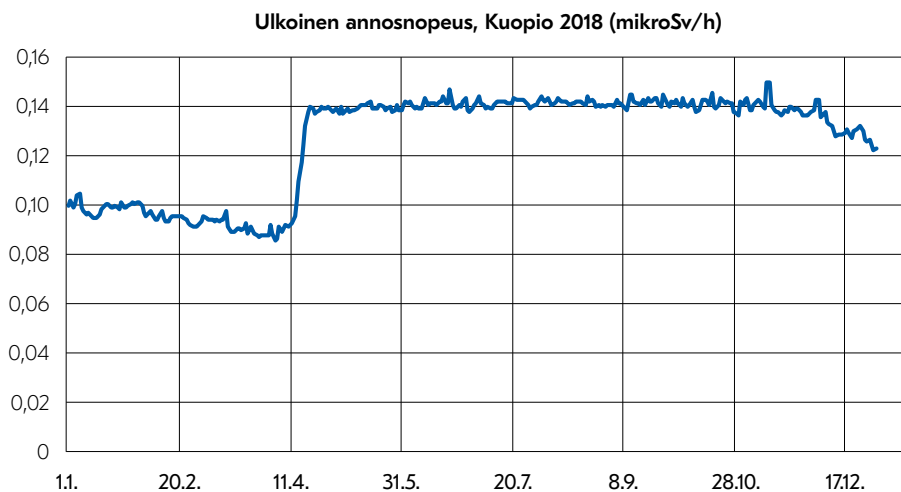
- 1 Maaperän alkuperäiset eli primordiaaliset radionuklidit. Niiden puoliintumisaika on niin pitkä, että ne ja niiden radioaktiiviset tytärynuklidit ovat edelleen havaittavissa. Primordiaalisten radionuklidien aiheuttamia säteilyannoksia on käsitelty kohdassa 3.1.
- 2 Kosmisen säteilyn kautta syntyvät radionuklidit (esimerkiksi ^3H , ^7Be , ^{14}C ja ^{22}Na). Näiden ns. kosmogeenisten nuklidien merkitys maan pinnalla on vähäinen, mutta sen sijaan kosmisen säteilyn ilmakehässä tuottama sekundäärisäteily aiheuttaa altistusta.

3.1 Maaperän ja rakennusmateriaalien radioaktiiviset aineet

Tärkeimmät luonnon ulkoisen säteilyn lähteet ovat alkuperäisnuklidit ^{40}K , ^{232}Th ja ^{238}U , joita esiintyy kaikissa maalajeissa. Näiden kolmen nuklidin puoliintumisajat ovat miljardeja vuosia, minkä vuoksi niitä on vielä jäljellä näinkin kauan maapallon syntymisen jälkeen. Uraanilla ja toriumilla on useita radioaktiivisia tytärynuklideja. ^{238}U -sarjan tärkeimpien isotooppien joukossa on kuitenkin vain kaksi merkittävää ulkoista altistusta aiheuttavaa säteilijää, ^{214}Bi ja ^{214}Pb . Maaperän sisältämiä radioaktiivisia aineita esiintyy luonnollisesti myös erilaisissa rakennusmateriaaleissa.

Luonnon taustasäteily vaihtelee paikallisesti maaperän laadusta riippuen, mutta vaihtelua esiintyy myös ajallisesti. Kuvassa 3 näkyvä vuodenaikaisvaihtelu on pääosin seurausta maanpintaa talvisin peittävän veden, lumen ja jään

maaperästä tulevaa säteilyä vaimentavasta vaikutuksesta. Ulkoisen säteilyn voimakkuuteen vaikuttaa vähäisessä määrin myös radonin hajoamistuotteiden aktiivisuuspitoisuuden vaihtelu maaperässä ja ilmassa. Myös sateet voivat aiheuttaa selvästi havaittavan muutoksen ulkoisen säteilyn annosnopeuteen, sillä sade huuhtoo ilmassa olevia radonin hajoamistuotteita maan pinnalle tai sen läheisyyteen. Sateen aiheuttamat lyhytaikaiset vaihtelut ovat yleensä suuruudeltaan alle $0,1 \mu\text{Sv/h}$.



KUVA 3. Annosnopeus Kuopion säteilymittausasemalla vuonna 2018.

3.1.1 Luonnon taustasäteily sisätiloissa

Huoneilman radonista aiheutuvan vuosittaisen annoksen määrittämisen yhteydessä 1990–1991 selvitettiin myös ulkoisen säteilyn annosnopeus satunnaisesti valituissa 350 asunnossa (Arvela ym. 1995).

Keskeiset tulokset on esitetty taulukossa 2 ja kuvassa 4. Tehtyjä mittauksia ja laskennallisia oletuksia on selostettu tarkasti erillisessä julkaisussa (Arvela ym. 1995), koosteenomaisesti raportissa STUK-A211 (Muikku ym. 2005) ja lyhyesti raportissa STUK-A259 (Muikku ym. 2014). Mitatut ulkoisen säteilyn annosnopeudet sisätiloissa ovat suurimpia alueilla, joilla ulko-olosuhteissakin

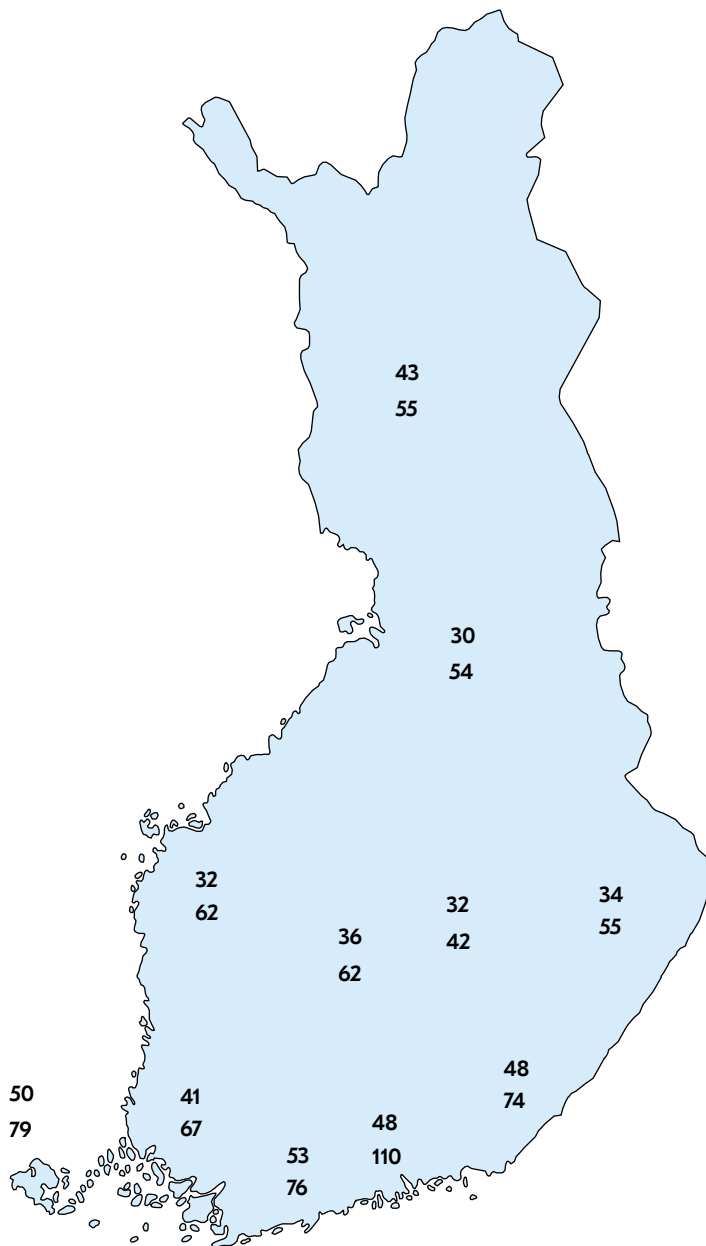
mitattu säteilytaso on keskimääräistä suurempi (alueet, joiden maaperässä on paljon uraania, toriumia ja/tai kaliumia).

Alun perin absorptioannosnopeuksina (nGy/h) ilmassa mitatuista annosnopeuden lukuarvoista on vähennetty kosmisen säteilyn osuus (32 nGy/h) ja Tšernobyl-laskeuman aiheuttama osuus. Lisäksi alkuperäiset tulokset on muutettu efektiivisiksi annosnopeuksiksi (nSv/h) kertomalla ne karkeasti tekijällä 0,7 (UNSCEAR 1993) ja pyöristetty sitten kahteen merkitsevään numeroon.

TAULUKKO 2. Ulkoinen taustasäteily sisällä asunnoissa. Kosmisen säteilyn ja Tšernobyl-laskeuman aiheuttama osuus on vähennetty mittaustuloksista (tarkemmat taulukon taustatiedot tekstissä).

Oleskelupaikka	Annosnopeuden havaintoväli (nSv/h)	Annosnopeuden keskiarvo (nSv/h)
Sisällä		
Annosnopeus pientaloissa	15–100	41
Annosnopeus kerrostaloissa	32–130	71
Kaikki asunnot	15–130	51 ¹⁾

¹⁾ Väestöpainotettu vuoden 1993 hallintoaluejaon ja asumismuodon mukainen annosnopeuden keskiarvo, joka on viime vuosikymmenten kaupungistumisen ja yleisen muuttoliikkeen myötä jonkin verran muuttunut tässä ilmoitetusta.



KUVA 4. Keskimääräisiä ulkoisia annosnopeuksia (nSv/h) asuinrakennusten sisällä eri osissa Suomea. Ylempi luku viittaa pientaloihin ja alempi kerrostaloihin. Mittausarvoista on vähennetty kosmisen säteilyn ja Tšernobyl-laskeuman osuus. Ahvenanmaata edustavat tulokset on saatu skaalaamalla ulkona mitattu annosnopeus (Arvela 1995). Tarkemmat kuvassa esitettyjen lukuarvojen taustatiedot ovat tekstissä.

3.1.2 Luonnon taustasäteily ulkona

Käytetty taustasäteilyn annosnopeuden määrittäminen ulkona perustuu vuosina 1978–1982 tehtyihin mittauksiin (Lemmelä 1984). Tuloksia on myöhemmin julkaistu kosmisen säteilyn osuudella (32 nGy/h eli 22,4 nSv/h) vähennettyinä absorptioannosnopeuksina ilmassa (Arvela ym. 1995, Muikku ym. 2005) sekä efektiivisinä annosnopeuksina kertomalla absorptioannosnopeudet tekijällä 0,7 (Muikku ym. 2014). Nykyisen hallintoaluejaon mukaiset keskimääräiset annosnopeudet on esitetty kuvassa 5. Koko maan alueellinen keskiarvo on 46 nSv/h.

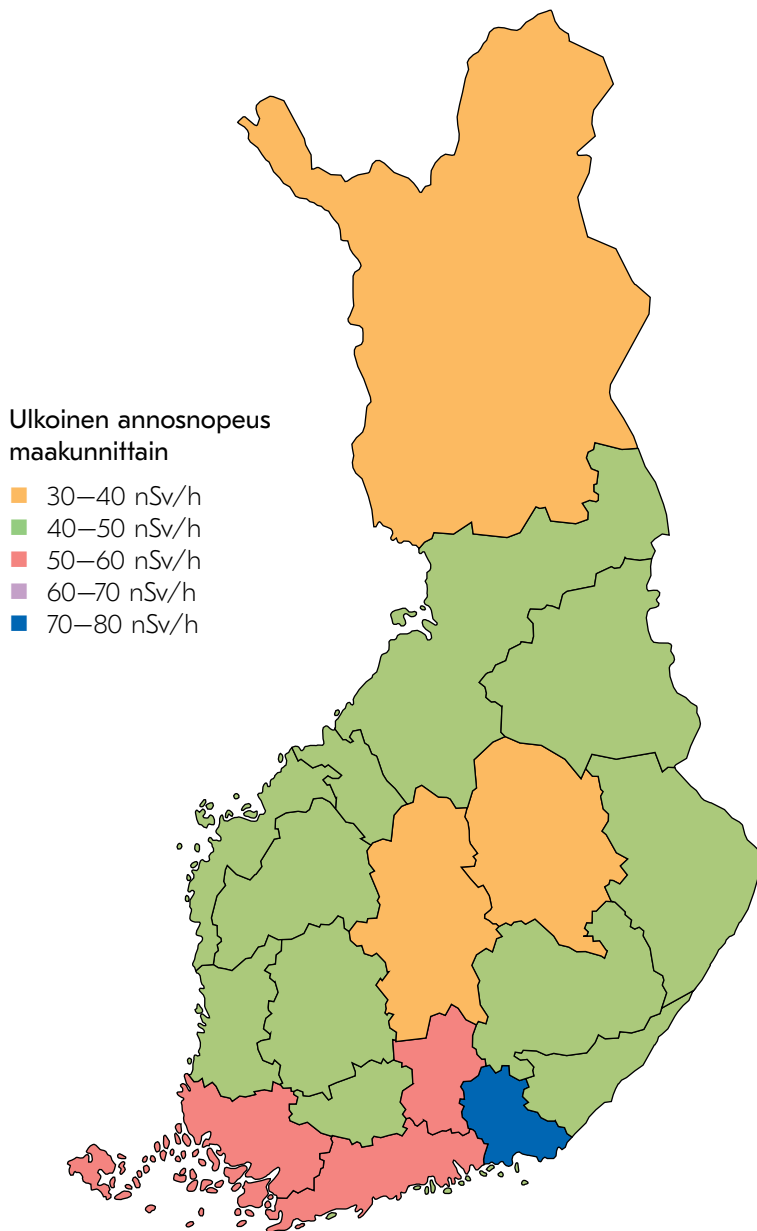
3.1.3 Ulkoisen taustasäteilyn aiheuttama kokonaisaltistus

Arvioitaessa ulkoisen taustasäteilyn aiheuttamaa vuosittaista (8 760 tuntia) väestön keskimääräistä annosta oletetaan, että ihmiset viettävät 80 % ajastaan sisällä ja 20 % ulkona. Vuoden 1993 tilanteen mukainen alue- ja väestöjakaumapainotettu keskimääräinen efektiivinen sisällä saatava vuosiannos olisi silloin 0,36 mSv ja vastaava ulkona saatava keskimääräinen annos noin 0,09 mSv, jolloin kokonaisannos olisi 0,45 mSv.

Nämä annosarviot eivät täysin vastaa nykytilannetta, koska viime vuosikymmeninä tietty väestöosuus on luonnollisesti siirtynyt toisille paikkakunnille erilaisiin taustasäteilyoloihin ja lisäksi useilla paikkakunnillakin asutus on entistä enemmän keskittynyt kerrostaloalueille.

3.1.4 Tšernobylin laskeuman osuus ulkoisessa altistuksessa

Tšernobylin onnettomuudesta aiheutuneen radioaktiivisen laskeuman osuus maaperän ja rakennusmateriaalien aiheuttamasta ulkoisesta taustasäteilystä on nykyisin lähes merkityksetön. Sen osuus väestön keskimääräisestä ulkoisen taustasäteilyn vuosiannoksesta on nykyisin pieni, noin 0,01 mSv, ja se pienenee koko ajan.



KUVA 5. Keskimääräinen ulkoinen annosnopeus maakunnittain. Alueita, joissa annosnopeus on 60–70 nSv/h ei havaintojen mukaan ole. Annosnopeuksiin ei sisälly kosmisen säteilyn eikä Tšernobyl-laskeuman osuutta (tarkemmat kuvaan liittyvät taustaselitykset tekstissä).

3.2 Kosminen säteily

Maan magneettikenttä ja ilmakehä suojaavat maapallon elollisia olentoja avaruudesta tulevalta hiukkassäteilyltä. Siitä huolimatta kosmiselle säteilylle altistutaan niin maanpinnalla kuin lentokoneissakin. Altistuksen aiheuttaa kosmisen säteilyn ilmakehässä tuottama sekundäärisäteily. Annoksen suuruuteen vaikuttavat auringon aktiivisuus ja asuinpaikan sijainti (lähinnä leveyspiiri ja korkeus merenpinnasta) sekä asuinrakennuksista saatava suoja.

Suomi sijaitsee leveyspiirien 60° ja 70° välissä ja suurin osa väestöstä asuu likimain merenpinnan tasolla. Ihmiset viettävät keskimäärin 80 % ajastaan sisällä, minkä vuoksi vuosiannosta laskettaessa on otettava huomioon myös asuinrakennusten rakenteiden säteilyä vaimentava vaikutus. Vaikutus huomioidaan sisällä vietetyn ajan ja ns. suojauskertoimen avulla. Keskimääräinen suojauskerroin on 0,8 (UNSCEAR 2008) eli asuntojen rakenteet vaimentavat kosmisen säteilyn annosnopeuden sisätiloissa keskimäärin 80 prosenttiin ulkona mitatusta kosmisen säteilyn annosnopeudesta.

Kosmisesta säteilystä aiheutuvaa ulkoista säteilyaltistusta arvioitaessa on erikseen huomioitava harvaan ionisoivien varauksisten hiukkasten (lähinnä elektronien ja myonien) ja fotonien sekä tiheään ionisoivan säteilyn (protonit ja raskaat ionit, sisältäen neutronisäteilyn synnyttämät sekundäärihiukkaset) osuus.

Kosmisen säteilyn harvaan ionisoiva komponentti aiheuttaa 32 nSv efektiivisen annoksen tunnissa (UNSCEAR 2008, taulukko 4, sivu 328). Kun rakennuksen suojauskerroin on 0,8 ja sisätiloissa vietetyn ajan osuus 80 % ja ulkona vietetyn ajan osuus 20 %, voidaan laskea harvaan ionisoivan komponentin ja fotonien aiheuttama efektiivinen annos vuodessa:

$$32 \text{ nSv/h} \times 8760 \text{ h/a} \times 0,8 \times 0,8 = 0,179 \text{ mSv/a sisätiloissa}$$

$$32 \text{ nSv/h} \times 8760 \text{ h/a} \times 0,2 = 0,056 \text{ mSv/a ulkona}$$

Kosmisen säteilyn tiheään ionisoiva komponentti (neutronisäteily) aiheuttaa 10,9 nSv efektiivisen annoksen tunnissa (UNSCEAR 2008, taulukko 4, sivu 328). Kun rakennuksen suojauskerroin on 0,8 ja sisätiloissa vietetyn ajan osuus 80 % ja ulkona vietetyn ajan osuus 20 %, voidaan laskea neutronien aiheuttama efektiivinen annos vuodessa:

$$10,9 \text{ nSv/h} \times 8760 \text{ h/a} \times 0,8 \times 0,8 = 0,061 \text{ mSv/a sisätiloissa}$$

$$10,9 \text{ nSv/h} \times 8760 \text{ h/a} \times 0,2 = 0,019 \text{ mSv/a ulkona}$$

Sekundäärisäteilyn lisäksi kosmisen säteilyn aiheuttamat vuorovaikutukset ilmakehässä saavat aikaan kosmogeenisia radionuklideja, kuten esimerkiksi hiili-14. Ihmiselle näistä radionuklideista aiheutuu hyvin vähän säteilyaltistusta, noin 0,012 mSv vuodessa (UNSCEAR 2008).

Harvaan ionisoivien varauksisten hiukkasten, fotonien, tiheään ionisoivan säteilyn sekä kosmogeenisten radionuklidien aiheuttama keskimääräinen efektiivinen annos vuodessa on siten

$$(0,179 + 0,056 + 0,061 + 0,019 + 0,012) \text{ mSv/a} = 0,327 \text{ mSv/a}$$

eli suomalaisille aiheutuu kosmisesta säteilystä keskimäärin 0,33 mSv:n suuruinen efektiivinen annos vuodessa.

3.3 Lentäminen

Matkustajakoneiden lentokorkeudella kosmisen säteilyn annosnopeus on monikymmenkertainen maanpinnan tasoon nähden. Useimmat lentomatkustajat altistuvat kosmiselle säteilylle vain satunnaisesti ja lyhyitä aikoja kerrallaan, jolloin lisäys tavanomaiseen säteilyaltistukseen vuositasolla on vähäistä. Sen sijaan lentohenkilöstön altistusajat ovat pidempiä, jopa yli 900 tuntia vuodessa. Mitä korkeammalla ja mitä kauempana päiväntasaajasta lennetään, sitä suurempi on kosmisen säteilyn annosnopeus. Mannerten väliset lennot lennetään noin 9–13 km korkeudessa. Kun lennetään leveyspiirillä 50° (vastaa lentoa Pohjois-Euroopan ja Pohjois-Amerikan välillä), on annosnopeus yleensä n. 4–8 µSv/h. Lennettäessä lähempänä päiväntasaajaa on annosnopeus n. 4 µSv/h. Lyhyemmät lennot lennetään n. 7,5–10 km korkeudessa, jolloin annosnopeus on tyypillisesti n. 3 µSv/h (UNSCEAR 2008). Taulukkoon 3 on koottu muutamia tyypillisiä lentoaikoja ja lennon aikana aiheutuneita efektiivisiä annoksia Helsingistä lähtevillä lentoreiteillä.

TAULUKKO 3. Tyypillinen lentoaika ja lennon aikana aiheutunut efektiivinen annos eräillä Helsingistä lähtevillä lentoreiteillä. Efektiivinen annos on laskettu CARI-7 -ohjelmalla.

Lentoreitti	Lentoaika (min)	Efektiivinen annos (μSv)
Helsinki–Oulu	55	2,7
Helsinki–Oslo	80	6,4
Helsinki–Moskova	95	8,0
Helsinki–Bryssel	140	13,3
Helsinki–Barcelona	200	16,6
Helsinki–New York	500	53,3
Helsinki–Tokio	531	55,0
Helsinki–Bangkok	531	38,7
Helsinki–Los Angeles	625	72,9
Helsinki–Singapore	650	40,0

Auringonpurkaus voi lyhytaikaisesti nostaa annosnopeutta lentokoneessa. Purkausten aiheuttama lisäys kosmisen säteilyn annosnopeuteen on pitkällä aikavälillä arvioitu olevan muutaman prosentin luokkaa tyypillisillä lentokorkeuksilla.

Keskimääräisen säteilyannoksen arvioimiseksi käytettiin ”Suomalaisten matkailu” -tilastoa (Tilastokeskus), jonka mukaan 15–84 -vuotiaat Suomessa vakituisesti asuvat henkilöt tekivät lentäen 5 960 000 ulkomaanmatkaa vuonna 2018. Yksi matka sisälsi menon ja paluun kohdemaahan. Aineistosta ei käy ilmi, oliko lento suora vai sisälsikö se koneen vaihtoja. Tilastokeskuksen aineistossa lentomäärät oli jaoteltu kohdealueiden mukaisesti. Lisäksi kotimaan lentomatkoja oli noin 1 000 000. Näiden lukujen perusteella suomalaiset altistuivat säteilylle 13 920 000 lennon aikana vuonna 2018. Lentoyhtiöiltä saatiin tiedot syyskuussa 2019 toteutuneiden lentojen aiheuttamista säteilyaltistuksista kohdealueittain. Lentojen säteilyaltistustiedot eri kohteisiin laskettiin CARI-7 -ohjelmalla ja laskelmat perustuivat noin 2 400 lentoprofiilin aineistoon. Suomalaisten saama kokonaisannos lentomatkailusta vuonna 2018 oli 216 manSv.

Vuonna 2018 Suomen väestö koostui 5 513 000 henkilöstä. Tilastokeskuksen mukaan 15–84 -vuotiaat edustavat noin 81 % väestöstä eli 4 465 530 henkilöä. Näin ollen lentomatkailusta aiheutui suomalaisille keskimäärin 0,048 mSv suuruinen efektiivinen annos vuonna 2018.

4 Sisäinen säteilyaltistus – luonnonnuklidit

Ihmiset saavat elimistöönsä luonnon radioaktiivisia aineita ruuan, juomaveden ja hengityksen kautta. Merkittävimmän sisäisen säteilyn annoksen aiheuttaa hengitysilmassa esiintyvä radon ja sen hajoamistuotteet, joista aiheutuvaa annosta käsitellään kappaleessa 2.

Suomalaisille ruuan ja juomaveden kautta saaduista ^{238}U ja ^{232}Th -sarjojen radionuklideista aiheutuva vuotuinen annos on laskettu keskimääräisen ravinnon ja veden kulutuksen avulla. Elintarvikkeista aiheutuu noin 0,10 mSv vuotuinen annos ja juomavedestä noin 0,03 mSv/a. Kun näihin arvoihin lisätään ^{40}K :stä aiheutuva annos, 0,17 mSv/a, saadaan luonnon nuklidien aiheuttamaksi sisäisen säteilyn annokseksi keskimäärin 0,30 mSv vuodessa.

Suomessa käytetään yleisesti talousvetenä pohjavettä, joka sisältää pintavettä enemmän luonnon radionuklideja. Siksi talousveden osuus on hyvä ottaa huomioon erikseen suomalaisten luonnonnuklideista aiheutuvaa säteilyannosta arvioidessa.

4.1 Kalium-40

Aikuisen (ikä ≥ 15 vuotta) painosta on noin 0,18 % kaliumia, josta radioaktiivisen isotoopin ^{40}K osuus on vakio eli $1,17 \cdot 10^{-4}$. Kaliumin saanti on tasapainossa sen erittymisen kanssa, joten ravinnon tai juomaveden kaliumpitoisuudella ei ole vaikutusta annokseen. Noin 70-kiloisessa ihmisessä ^{40}K aiheuttaa vuosittain noin 0,17 mSv sisäisen säteilyn annoksen. Lapsissa (ikä < 15) kaliumia on suhteellisesti enemmän kuin aikuisissa, noin 0,2 % painosta ja siitä aiheutuu vuosittain noin 0,185 mSv:n annos (UNSCEAR 2008).

4.2 Uraani- ja toriumsarjan nuklidit elintarvikkeissa

Elintarvikkeissa on aina pieniä määriä luonnon radioaktiivisia aineita. Niitä kulkeutuu kasveihin maaperästä samalla kun kasvi ottaa ravinteita juuristollaan. ^{238}U -sarjan isotooppeja ^{210}Pb ja ^{210}Po , jotka ovat radonin pitkäikäisiä hajoamistuotteita, deponoituu myös suoraan esim. lehtivihannesten pinnoille ilmasta. Lannoitteissa esiintyy luonnon radioaktiivisia aineita, jotka voivat hieman lisätä kasvien luonnonnuklidipitoisuutta. Tuotantoeläinten lihaan ja kananmuniin luonnon radioaktiiviset aineet siirtyvät eläinten käyttämän rehun, ravinnelisien ja juomaveden mukana.

Suurin osa elintarvikkeiden annosarvioihin käytetyistä radionuklidien aktiivisuuspitoisuuksista perustuvat UNSCEARin ilmoittamiin referenssipitoisuuksiin (UNSCEAR 2000) ja osa pitoisuuksista pohjautuu muihin tutkimuksiin (Turtiainen ja Kostiainen 2013, Vaaramaa ym. 2009, Turtiainen ym. 2014, Kämäräinen ym. 2017). Elintarvikkeiden kulutustilastot pohjautuvat Terveys- ja hyvinvoinnin laitoksen julkaisemaan Finravinto 2017 tutkimukseen (Valsta ym. 2018).

^{238}U ja ^{232}Th -sarjojen radionuklidit ruuassa aiheuttavat suomalaisille keskimäärin 0,10 mSv:n efektiivisen annoksen vuodessa. Merkittävin radioaktiivinen hajoamistuote on ^{210}Po , jonka osuus annoksesta on noin 62 %. Loppuosuus annoksesta koostuu lähinnä isotoopeista ^{210}Pb (19 %), ^{228}Ra (11 %) ja ^{226}Ra (7 %). Merkittävimmät elintarvikeryhmät annoksen kannalta ovat kala, viljat sekä hedelmät ja marjat.

4.3 Uraani- ja toriumsarjan nuklidit talousvedessä

Talousvedessä on aina pieni määrä luonnon radioaktiivisia aineita, jotka ovat lienneet siihen maa- ja kallioperän mineraaleista. Pohjavesi on huomattavasti kauemmin kosketuksissa maa- ja kallioperän kanssa kuin pintavesi, joten sen mineraali- ja siten myös radionuklidipitoisuudet ovat suurempia kuin pintaveden. Kalliopohjavesi on tyypillisesti hyvin vanhaa ja siksi siinä voi esiintyä radionuklideja pitoisuuksina, jotka ylittävät terveysperusteiset enimmäisarvot.

Vesilaitosten jakamasta vedestä noin 65 % on pohjavettä tai tekopohjavettä ja muu on pintavettä. Vesilaitokset käyttävät vain harvoin kalliopohjavettä vesilähteenään, ja silloin on useimmiten kyse pienistä laitoksista. Osa

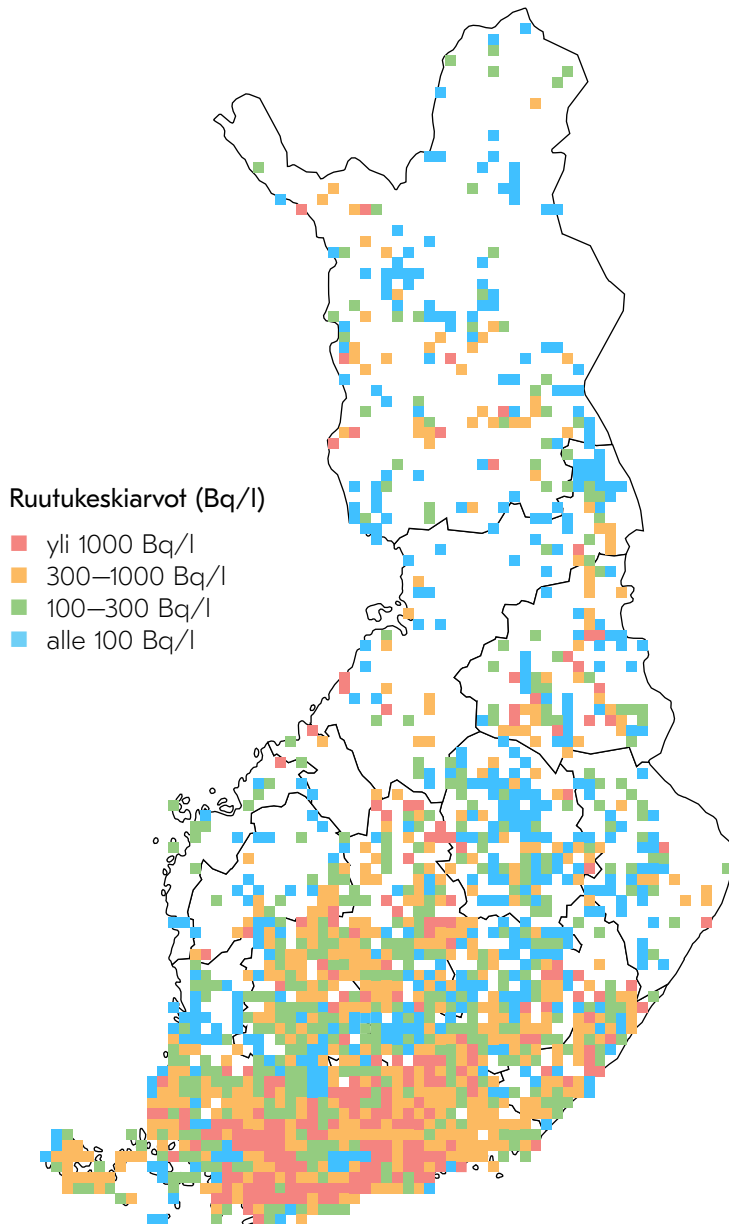
radionuklideista myös poistuu vesilaitoksilla normaalin vedenkäsittelyn yhteydessä (Hämäläinen ym. 2004). Yli 91 % suomalaisista on vesilaitosten vesijakelun piirissä. Loput, noin puoli miljoonaa suomalaista, saa talousvetensä kaivoista.

Eniten annosta aiheutuu uraanisarjan nuklideista ^{222}Rn , ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra ja uraanin isotoopeista ^{234}U ja ^{238}U . Toriumisarjan nuklideista ainoastaan ^{228}Ra on merkittävä säteilyannoksen aiheuttaja ja otettava huomioon annosta arvioitaessa.

Kaasumainen radon (^{222}Rn) aiheuttaa sisäisen säteilyannoksen sekä nautittuna että hengitysilman kautta. Talousveden sisältämä radon vapautuu veden käytön yhteydessä osittain huoneilmaan, erityisesti suihkun ja veden kuumentamisen yhteydessä. Koska radon poistuu vedestä lähes kokonaan veden keittämisen yhteydessä, huomioidaan radonin osalta vain juomaveden kulutus. Muut veden radionuklidit eivät höyrysty vedestä ruuan valmistuksen aikana. Tämän vuoksi niiden saanti lasketaan juomaveden, vedestä valmistettujen juomien (esim. kahvi ja tee) sekä ruokaan lisätyn veden määrästä. Miehet nauttivat ruuan ja juoman mukana hanavettä keskimäärin 1,9 litraa ja naiset 2 litraa päivässä (Muikku ym. 2009).

Suomalaisten talousvedestä saamat annokset vaihtelevat vesilähteen ja käyttömäärien mukaan, tarkemmat laskentaperusteet on kuvattu raportissa STUK-A259 (Muikku ym. 2014). Kaikille käyttäjille keskiarvo on 0,03 mSv vuodessa. Porakaivonkäyttäjien keskimääräinen vuosiannos on 0,28 mSv, rengaskaivon käyttäjän 0,05 mSv ja vesilaitosveden käyttäjän 0,02 mSv.

Porakaivoveden käyttäjien vuosiannos on keskimääräisesti muita vedenkäyttäjää korkeampi, mutta porakaivovesien korkeita luonnon-nuklidipitoisuuksia on Suomessa pienennetty 1990-luvun loppupuolelta alkaen vedenpuhdistuslaitteilla. Porakaivoveden radon pitoisuudessa on myös alueellista vaihtelua. Yksittäisiä korkeita pitoisuuksia voi kuitenkin esiintyä lähes joka puolella Suomessa (kuva 6). Suomessa radon aiheuttaa yli puolet vedestä saatavasta annoksesta. On arvioitu, että rengaskaivojen veden käyttäjille noin 60 % ja porakaivojen käyttäjille noin 75 % annoksesta aiheutuu radonista (Vesterbacka ym. 2004).



KUVA 6. Porakaivojen radonpitoisuuden keskiarvot Suomessa (Vesterbacka ja Vaaramaa, 2013).

5 Sisäinen säteilyaltistus – keinotekoiset nuklidit

Vuonna 1986 tapahtuneesta Tšernobylin onnettomuudesta sekä 1950- ja 1960-luvuilla ilmakehässä tehdyistä ydinasekokeista peräisin olevasta laskeumasta aiheutuva sisäinen säteilyaltistus on määritetty käyttäen hyväksi joko suorien ihmismittausten tuloksia tai elintarvikkeiden aktiivisuuspitoisuuksia. Tarkemmat kuvaukset laskentaan käytetyistä menetelmistä on annettu raportissa STUK-A259 (Muikku ym. 2014).

5.1 Sisäisen säteilyn aiheuttama annos arvioituna ravinnon kautta

Sisäisen säteilyaltistuksen suuruus voidaan laskea elintarvikkeiden kulutuksen ja niiden sisältämien radioaktiivisten aineiden määrien avulla (STUK-A211, Liite 2: Sisäisen säteilyn aiheuttaman annoksen määrittäminen (Muikku ym. 2005)).

Ympäristön säteilyvalvontaohjelmaan sisältyy ruoka- ja juomanäytteiden tutkimus koko vuorokauden aterioista ja juomista kolmen paikkakunnan sairaaloiden suurkeittiöistä. Näiden mittausten avulla saadaan laskettua radioaktiivisten aineiden saanti, jossa on jo huomioitu ruoan valmistus- ja kulutustekijät. Luonnontuotteita koskeva saantiarvio joudutaan tekemään erikseen, sillä suurkeittiöissä niitä käytetään vähemmän kuin kotitalouksissa. Myös alueelliset erot luonnontuotteiden osalta ovat huomattavasti suuremmat. Suurkeittiöiden ruokaa ja juomaa käyttävien ¹³⁷Cs:sta saama vuosittainen säteilyannos on ollut keskimäärin 0,003 mSv ajanjaksolla 2013–2018. Vuosina 2013–2018 suurkeittiöiden ruoasta ja juomasta lasketut ⁹⁰Sr:stä aiheutuneet vuotuiset säteilyannokset olivat keskimäärin 0,0008 mSv (Vesterbacka 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 ja Mattila ja Inkinen 2019).

Metsästä saatavien luonnontuotteiden ¹³⁷Cs-pitoisuudet ovat vähentyneet hitaasti Tšernobylin onnettomuuden jälkeen, lähinnä vain radioaktiivisen

hajoamisen kautta. Keskimääräisiä luonnontuotteiden kulutuslukuja käyttäen näistä tuotteista saadaan vuosittain vajaan 0,010 mSv:n suuruinen säteilyannos, joka jakautuu suunnilleen tasan eri ryhmien kesken (STUK-A A259, Muikku ym. 2014). Runsaasti metsäsieniä kuluttaville (6 kg/a) laskennallinen lisäys vuosittaiseen säteilyannokseen sienten ¹³⁷Cs:sta on välillä 0,005–0,038 mSv/a (Kostiainen ja Yliepieti, 2010), joka on alle prosentin suomalaisen vuosittaisesta säteilyannoksesta. Näin ollen runsaskaan metsäsienten kulutus ei kasvata vuosiannosta merkittävästi. Suorien ihmismittausten avulla on arvioitu runsaasti luonnontuotteita käyttävien ryhmien altistusta enemmän seuraavassa kappaleessa.

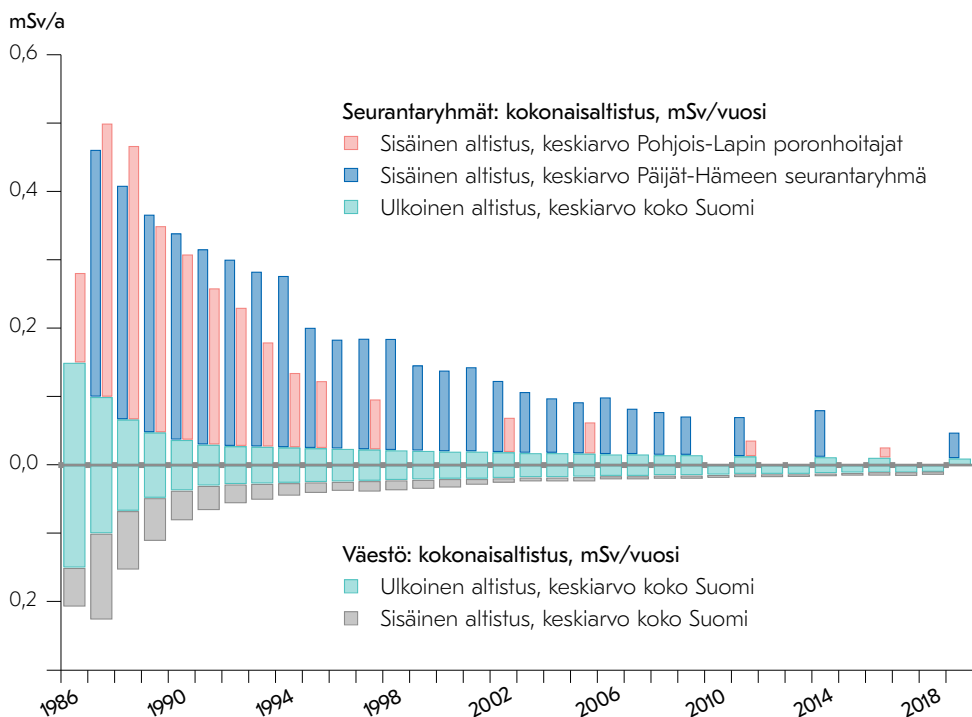
5.2 Sisäisen säteilyn aiheuttama annos arvioituna suorien ihmismittausten avulla

Sisäisen säteilyaltistuksen suuruus voidaan arvioida suoralla gammaspektrometrisellä mittauksella, niin sanotulla kokokehomittauksella, suoraan ihmisestä (STUK-A211, Liite 2: Sisäisen säteilyn aiheuttaman annoksen määrittäminen, Muikku ym. 2005). Kokokehomittauksella voidaan havaita kehossa mittaushetkellä olevat gamma- tai röntgensäteilyä lähettävät radionuklidit ja selvittää niiden määrät. Mittaustulos edustaa sitä osaa elimistöön joutuneen radionuklidin määrästä, joka on biologisen erittymisen ja radioaktiivisen hajoamisen seurauksena mittaushetkellä jäljellä elimistössä.

Sisäisen säteilyn aiheuttaman annoksen kertymän kannalta merkittävin keinotekoinen radioaktiivinen aine on cesiumin isotooppi ¹³⁷Cs. Suomessa on 1960-luvulta lähtien seurattu kokokehomittausten avulla ihmisten altistumista sisäiselle säteilylle. Mittausten avulla on voitu seurata sekä ilmakehässä tehtyjen ydinasekokeiden että Tšernobylin onnettomuudesta peräisin olevien radioaktiivisten aineiden hidasta poistumista ihmiskehosta.

Suurimmat ihmisissä havaitut ¹³⁷Cs-aktiivisuudet mitattiin 1960-luvun puolivälissä Pohjois-Lapin poronhoitajista, joiden elintapoihin liittyi runsas luonnontuotteiden ja poronlihan käyttö ravintona. Tšernobylin ydinvoimalaonnettomuuden jälkeen kokokehomittauksia varten perustettiin uusia seurantaryhmiä. Suurimman laskeuman saaneelle alueelle Päijät-Hämeeseen perustettiin seurantaryhmä, joka koostuu paljon luonnonantimia ravintonaan käyttävistä henkilöistä, esimerkiksi metsästäjistä ja kalastajista.

Kuvassa 7 esitetään Tšernobylin ydinvoimalaonnettomuuden seurauksena Suomeen kulkeutuneen cesiumin aiheuttaman säteilyannoksen epätasainen jakautuminen eri väestöryhmissä vuosina 1986–2018. Kuvassa verrataan edellä mainittujen kahden seurantaryhmän saamaa säteilyannosta koko väestön keskiarvoon. Molemmissa seurantaryhmissä sisäinen säteilyaltistus on väestön vastaavaa keskiarvoa suurempi. Tämä johtuu siitä, että näitä ryhmiä edustavat henkilöt saavat enemmän cesiumin isotooppeja ravintonsa kautta kuin suomalaiset keskimäärin.



KUVA 7. Keinotekoisien radioaktiivisten isotooppien suomalaisille aiheuttamat keskimääräiset efektiiviset säteilyannokset vuosina 1986–2018. Alaspäin suuntaava akseli kuvaa koko väestölle arvioitua kokonaisaltistusta, joka koostuu ulkoisesta ja sisäisestä altistuksesta. Ylöspäin suuntaavalla akselilla esitetään Päijät-Hämeen seurantaryhmän (vuoteen 2019) ja Pohjois-Lapin poronhoitajien keskimääräinen kokonaisaltistus jaettuna ulkoiseen ja sisäiseen altistukseen. Sisäisen säteilyaltistuksen arviossa on otettu huomioon ainoastaan cesiumin radioaktiiviset isotoopit ^{134}Cs ja ^{137}Cs .

Annosmäärittämisessä oletetaan, että ihmisessä olevan ^{137}Cs :n tai ^{134}Cs :n määrä on pysynyt vuoden aikana vakiona. Efektiivisen annoksen annosmuuntokertoimena on ^{137}Cs :lle käytetty arvoa $2,3 \mu\text{Sv}/(\text{Bq} \cdot \text{a}/\text{kg})$ ja ^{134}Cs :lle vastaavasti arvoa $3,4 \mu\text{Sv}/(\text{Bq} \cdot \text{a}/\text{kg})$. Keskimääräisen efektiivisen annoksen laskuperusteet on selvitetty raportissa STUK-A211 (Muikku ym. 2005). Vuonna 2018 väestön altistukseksi saadaan $0,003 \text{ mSv}$.

6 Säteilyn lääketieteellinen käyttö

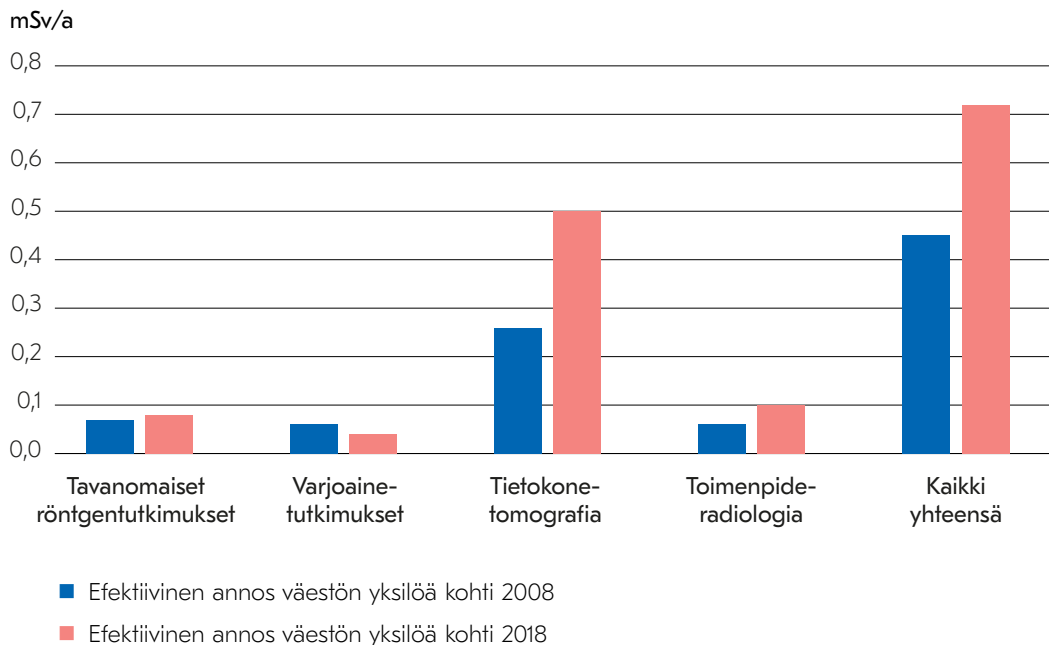
6.1 Röntgentutkimukset

Potilasannos röntgentutkimuksissa ja -toimenpiteissä (efektiivinen annos) voidaan laskea potilasannosmittausten ja elinkohtaisten annosmuuntokertoimien avulla saaduista elinannoksista (ekvivalenttiannoksista) käyttäen kudosten ja elinten painotuskertoimia. Vuonna 2018 otettiin käyttöön uudet painotuskertoimet ionisoivasta säteilystä annetulla valtioneuvoston asetuksella (1034/2018).

Röntgentutkimusten ja -toimenpiteiden lukumäärät on viimeksi selvitetty vuoden 2018 osalta (Ruonala 2019). Selvityksen mukaan Suomessa tehtiin 6,0 miljoonaa röntgentutkimusta ja -toimenpidettä. Tavanomaisten röntgentutkimusten ja varjoainetutkimusten yhteenlaskettu suhteellinen osuus kaikista röntgentutkimuksista oli 88,3 %, tietokonetomografiatutkimusten (TT) 9,5 %, läpivalaisu- tai TT-ohjattujen toimenpiteiden noin 0,9 %, verisuonten varjoainetutkimusten 0,6 % ja KKT-tutkimusten 0,7 %. Suomi on varsin lähellä kehittyneiden maiden keskiarvoa, kun tarkastellaan tutkimusmääriä väkilukuun suhteutettuna.

Vuonna 2018 röntgentutkimuksista ja -toimenpiteistä aiheutui vuonna 3 948 manSv kollektiivinen efektiivinen annos (Bly ym. 2020). Vastaava keskimääräinen efektiivinen annos kansalaista kohden on 0,72 mSv. Vuonna 2008 kollektiivinen efektiivinen annos oli 0,45 mSv kansalaista kohti. Euroopan maiden keskiarvo oli 1,1 mSv kansalaista kohti (EUROPEAN COMMISSION, 2014) ja USA:ssa 2,16 mSv kansalaista kohti vuonna 2016 (NCRP 2019).

Suomessa röntgentutkimuksista ja -toimenpiteistä aiheutunut annos on kasvanut kymmenen vuoden aikana erityisesti TT-tutkimusten kasvaneen määrän vuoksi. Kollektiivisen efektiivisen annoksen jakaumat väestön yksilöä kohti vuonna 2008 ja 2018 on esitetty kuvassa 8.



KUVA 8. Röntgentutkimuksista ja -toimenpiteistä aiheutunut annos väestön yksilöä kohti vuosina 2008 ja 2018.

6.2 Isotooppitutkimukset

Isotooppitutkimuksista aiheutuva potilasannos (efektiivinen annos) muodostuu potilaalle annetun radioaktiivisen lääkkeen aiheuttamasta altistuksesta sekä isotooppitutkimukseen liittyvästä TT-tutkimuksesta (SPECT-TT- ja PET-TT-tutkimukset). Radioaktiivisesta lääkkeestä aiheutuva efektiivinen annos on laskettu käyttäen ICRP:n julkaisuissa 80, 106 ja 128 annettuja muuntokertoimia. Niille radioaktiivisille lääkeaineille, joille ei ole annettu kerrointa ICRP:n julkaisuissa, käytettiin tuoteselosteessa annettua tai kirjallisuudesta saatua muuntokerrointa. Käytetyt kertoimet pohjautuvat pääasiallisesti ICRP:n julkaisussa 60 esitettyyn dosimetriaan. TT-tutkimuksista aiheutuva altistus laskettiin käyttäen anatomisten alueiden mukaisia muuntokertoimia. Isotooppihoidoista aiheutuvaa altistusta ei ole huomioitu.

Isotooppitutkimusten ja -hoitojen lukumäärät sekä tutkimuksista aiheutuva altistus on viimeksi selvitetty vuoden 2018 osalta. Selvityksen mukaan Suomessa

tehtiin 42 411 isotooppitutkimusta, joista 13 125 oli positroniemissiotutkimusta. Tuhatta asukasta kohden tutkimuksia tehtiin 7,7, mikä on huomattavasti vähemmän kuin Euroopan maiden keskiarvo, 14 tutkimusta tuhatta asukasta kohden (EUROPEAN COMMISSION, 2014).

Vuonna 2018 isotooppitutkimuksista potilaille aiheutunut kollektiivinen efektiivinen annos oli 216,6 manSv, josta 144,2 manSv aiheutui radioaktiivisten lääkkeiden käytöstä ja 72,4 manSv TT-tutkimuksista. Keskimääräinen efektiivinen annos kansalaista kohti oli 0,039 mSv, josta radioaktiivisten lääkkeiden osuus oli 0,026 mSv ja TT:n osuus 0,013 mSv. Euroopan maiden efektiivisen annoksen keskiarvo kansalaista kohden oli 0,054 mSv (EUROPEAN COMMISSION, 2014), joka on selkeästi suomalaista keskimääräistä efektiivistä annosta korkeampi.

7 Johtopäätökset

Suomalaisten vuonna 2018 saama keskimääräinen efektiivinen annos on 5,9 mSv (Kuva 9). Noin kaksi kolmasosaa suomalaisen saamasta säteilyannoksesta on peräisin sisäilman radonista. Muutos vuoden 2012 annosarvioon verrattuna johtuu radonaltistuksen laskennassa käytetyn kertoimen muutoksesta. Keskimääräinen radonpitoisuus suomalaisissa asunnoissa on 94 becquereliä kuutiometrissä, mistä aiheutuu noin 4 mSv vuotuinen säteilyannos. Radonpitoisuudet vaihtelevat huomattavasti eri puolilla Suomea.

Luonnon taustasäteily aiheuttaa meille noin viidenneksen (1,1 mSv) vuotuisesta säteilyannoksestamme. Kehoon joutuneet luonnolliset radioaktiiviset aineet aiheuttavat tästä noin 0,30 mSv efektiivisen annoksen. Arvoon on laskettu mukaan myös talousveden luonnon radioaktiivisista aineista aiheutuva annos. Luonnonnuklidipitoisuudet porakaivovesissä voivat olla hyvinkin paljon suuremmat kuin vesijohtoverkostovedessä, ja annosten vaihteluväli on suuri. Ulkoisesta taustasäteilystä aiheutuva annos tulee maaperästä sekä rakennusmateriaaleista ja on keskimäärin 0,45 mSv/a suomalaista kohti. Arvot vaihtelevat hieman eri paikkakunnilla (0,17–1 mSv/a). Suurimmillaan ulkoinen säteily on Kaakkois-Suomen rapakivigraniittialueella. Avaruudesta peräisin olevasta kosmisesta säteilystä suomalaiset saavat noin 0,33 mSv annoksen vuodessa. Lentomatkestus aiheuttaa keskimäärin 0,05 mSv vuotuisen annoksen.

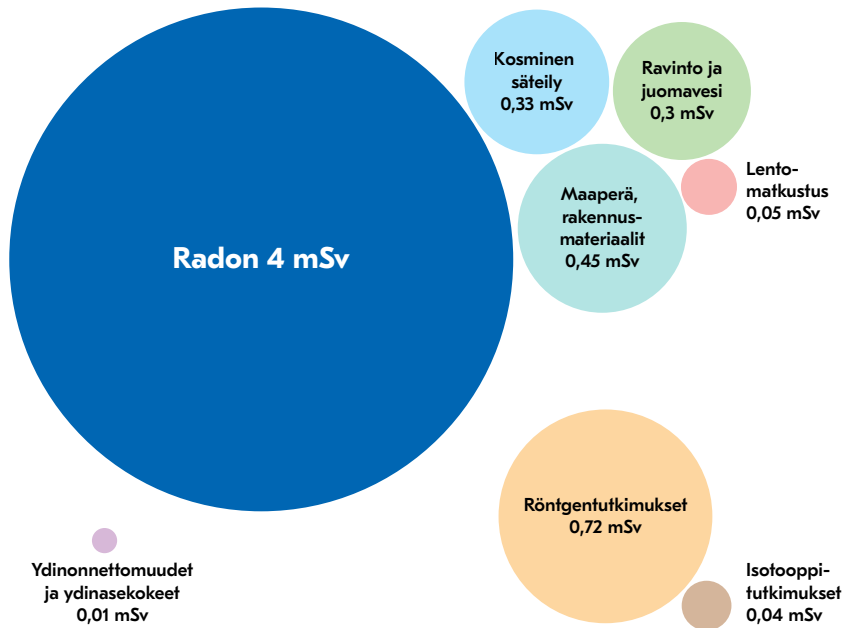
Lääketieteellisistä tutkimuksista suomalaisille aiheutunut annos on nousussa. Isootopikuvauksista aiheutuva keskimääräinen annos suomalaista kohti on 0,039 mSv. Vuonna 2018 Suomessa tehtiin noin 54 000 radioisotooppeja käyttävää tutkimusta. Röntgentutkimuksia ja toimenpiteitä tehtiin vuonna 2018 6,0 miljoonaa kappaletta. Kun erilaisista röntgentutkimuksista ja toimenpiteistä potilaille aiheutuvat säteilyannokset jaetaan kaikkien suomalaisten kesken, saadaan keskimääräiseksi efektiiviseksi annokseksi noin 0,72 mSv vuodessa. Annoksen kasvu edelliseen selvitykseen nähden johtuu pääosin kasvaneesta TT-tutkimusten lukumäärästä.

Tällä hetkellä Tšernobylin onnettomuutta seuranneesta ja ydinasekokeita seuranneesta laskeumasta aiheutuva keskimääräinen ulkoisen säteilyn

aiheuttama altistus on noin 0,01 mSv vuodessa. Suurin osa sekä ulkoisesta että sisäisestä säteilyaltistuksesta aiheutuu pitkäikäisestä radioaktiivisesta cesium-isotoopista ¹³⁷Cs. Vuonna 2011 tapahtuneen Fukushima Dai-ichin ydinvoimalaitosonnettomuuden aiheuttama lisäys suomalaisten vuosittaiseen säteilyannokseen on merkityksettömän pieni. Luonnossa esiintyvät keinotekoiset nuklidit aiheuttavat ravinnon kautta noin 0,003 mSv vuotuisen efektiivisen annoksen, eli kokonaisaltistus keinotekoisista nuklideista on noin 0,01 mSv.

Pienten annosten aiheuttamiin terveysvaikutuksiin liittyy vielä paljon epävarmuutta ja siksi ICRP:n kanta on, että mahdollisten aiheutuvien syöpätapausten lukumäärää ei pitäisi laskennallisesti arvioida etukäteen, kun tarkastelun kohteena ovat pienet säteilyannokset suurille ihmisjoukoille pitkien aikojen kuluessa. Lisäksi tässä raportissa kuvattu keskimääräinen efektiivinen annos on luonnollisesti suunta-antava, sillä jokaiseen altistuskomponenttiin liittyy merkittävä vaihteluväli.

Noin kaksi kolmasosaa (4 mSv) vuotuisesta kokonaisannoksesta aiheutuu radonista. Sisäilman radonin aiheuttama keuhkosityöpäriski on osoitettu lukuisissa sisäilman radonia selvittäneissä tapausverrokkitutkimuksissa ja niiden yhteisanalyyseissä (Lubin ym. 2004, Darby ym. 2005, Krewski ym. 2006). Suomessa vuosittain todettavista vähän yli 2 000 keuhkosityövästä arvioidaan noin 300 liittyvän radonaltistukseen. Sisäilman radonin on arvioitu aiheuttavan tupakoimattomilla noin 40 ja tupakoivilla noin 240 keuhkosityöpäkuolemaa vuodessa (Mäkeläinen 2010). Yksilö voi halutessaan vaikuttaa merkittävästi säteilyannokseensa, sillä radonaltistuksen pienentäminen on kohtuullisen helppoa rakentamalla uudet talot radonturvallisesti ja korjaamalla vanhoja taloja radonturvallisiksi.



KUVA 9. Vuonna 2018 suomalaisten saama ionisoivan säteilyn aiheuttama keskimääräinen efektiivinen annos oli 5,9 millisievertiä. Yli viisi millisievertiä on peräisin luonnon radioaktiivisista aineista ja alle yksi millisievert säteilyn lääketieteellisestä käytöstä. Ympäristössä olevien keino- ja ydinonnettomuudet ja ydinasekokeet aiheuttamien radioaktiivisten aineiden osuus efektiivisestä annoksesta on hyvin pieni.

Liite I:

Annosmäärityksessä käytettävät suureet ja termit

Ekvivalenttiannos

Kudoksen tai elimen T ekvivalenttiannos $H_{T,R}$ on säteilylaadun painotuskertoimella w_R kerrottu kudoksen tai elimen keskimääräinen absorboitunut annos $D_{T,R}$:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R} \quad (1.1)$$

missä w_R on painotuskerroin säteilylaadulle R . $D_{T,R}$ on säteilylaadusta R aiheutuva, kudoksen T keskimääräinen absorboitunut annos. Jos säteily koostuu useammasta kuin yhdestä, w_R -arvoltaan erilaisesta säteilylaadusta, ekvivalenttiannos H_T on:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (1.2)$$

Ekvivalenttiannoksen yksikkö on Sv. Jäljempänä kudoksesta puhuttaessa tarkoitetaan joko kudosta tai elintä.

Efektiivinen annos

Efektiivinen annos E on kudosten painotuskertoimilla w_T kerrottujen ekvivalenttiannosten H_T summa:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (1.3)$$

Efektiivisen annoksen yksikkö on Sv.

Ekvivalenttiannoksen avulla arvioidaan säteilyn haittavaikutuksia tarkasteltavassa kudoksessa. Efektiivisen annoksen avulla arvioidaan lähinnä säteilyn ihmiselle aiheuttamien satunnaisten haittavaikutusten riskiä. Ekvivalenttiannoksen ja efektiivisen annoksen laskemisessa tarvittavat w_R - ja w_T -kertoimet on esitetty taulukoissa 1.1 ja 1.2.

Ekvivalenttiannoksen kertymä

Kudoksen T ekvivalenttiannoksen kertymä $H_T(\tau)$ on kehoon joutuneen radioaktiivisen aineen tälle kudokselle aiheuttama ekvivalenttiannos:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} H_T(t) dt \quad (1.4)$$

missä $H_T(t)$ on ekvivalenttiannosnopeus kudoksessa T hetkellä t ja t_0 on saantohetki. Ekvivalenttiannoksen kertymän yksikkö on Sv. Jos integrointi-aikaa τ ei ole erikseen mainittu, oletetaan, että se on aikuisille 50 vuotta ja lapsille 70 vuoden ikään asti jäljellä olevien vuosien määrä.

Efektiivisen annoksen kertymä

Efektiivisen annoksen kertymä $E(t)$ on kudosten painotuskertoimilla w_T kerrottujen ekvivalenttiannosten kertymien $H_T(\tau)$ summa:

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau) \quad (1.5)$$

Efektiivisen annoksen kertymän yksikkö on Sv. Ekvivalenttiannoksen kertymä ja efektiivisen annoksen kertymä ovat suureita, joilla arvioidaan kehoon joutuneiden radioaktiivisten aineiden aiheuttamaa ekvivalenttiannosta ja efektiivistä annosta. Kehoon joutunut radioaktiivinen aine voi aiheuttaa altistusta pitkään saannon jälkeen.

Efekttiivisen annoksen määrittäminen radonaltistukselle

Radonaltistuksesta aiheutuva efektiivinen annos E lasketaan kaavalla:

$$E = h t C_{AE} \quad (1.6)$$

jossa h on annosmuuntokerroin alfaenergia-altistukselle
 t on altistusaika
 C_{AE} on alfaenergiakonsentraatio

Radonkaasu ei aiheuta juurikaan efektiivistä annosta, koska se ei liukene vereen eikä tartu keuhkoon vaan poistuu uloshengityksen kautta. Radonin lyhytikäiset hajoamistuotteet sitä vastoin ovat kiinteitä, joten ne tarttuvat hengityselimistöön.

Radonin lyhytikäisistä hajoamistuotteista johtuva alfaenergiakonsentraatio ilmassa voidaan arvioida radonpitoisuudesta. Jos hajoamistuotteet olisivat tasapainossa radonin kanssa (ts. niillä olisi sama aktiivisuus kuin radonilla) pätee:

$$1 \text{ Bq/m}^3 \text{ radonia tasapainossa} = 5,56 \cdot 10^{-9} \text{ J/m}^3 \quad (1.7)$$

Näin ei kuitenkaan ole, vaan alfaenergiakonsentraatio on aina tätä pienempi. Ilmiötä kuvataan tasapainotekijällä F , joka ilmoittaa osuuden tasapainoa vastaavasta tilanteesta. Näin ollen:

$$C_{AE} = C_{Rn} F 5,56 \cdot 10^{-9} \text{ (J/m}^3\text{)/(Bq/m}^3\text{)} \quad (1.8)$$

jossa C_{Rn} on radonpitoisuus. Jos tasapainotekijää ei tunneta, käytetään sille geneeristä arvoa 0,4.

Radonaltistuksen yksikkönä käytetään yleisesti WLM (working level month).

$$1 \text{ WLM} = 3,54 \cdot 10^{-3} \text{ Jh/m}^3 \quad (1.9)$$

Annosmuuntokerroin radonaltistukselle on $3 \text{ Sv J}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ m}^3$ tai 10 mSv WLM^{-1} . ICRP on ilmoittanut annosmuuntokertoimen yhden merkitsevän numeron tarkkuudella.

TAULUKKO 1.1. Säteilylaadun painotuskertoimet w_R eri säteilylaaduille (ICRP 2007).

Säteilylaatu	w_R
Fotonit, kaikki energiat	1
Elektronit* ja myonit, kaikki energiat	1
Neutronit	Energiasta riippuva jatkuva funktio
Protonit**, energia yli 10 MeV	2
Alfahiukkaset, fissionfragmentit, raskaat ytimet	20
* Muut kuin DNA-molekyylin sitoutuneiden ydinten lähettämät Augerelektronit	
** Lukuun ottamatta rekyyliprotoneita	

TAULUKKO 1.2. Kudosten painotuskertoimet w_T (ICRP 2007). Kertoimet perustuvat kumpaakin sukupuolta tasapuolisesti ja laajaa ikärakennetta edustavaan vertailuväestöön.

Kudos tai elin	w_T
Luuydin, paksusuoli, keuhkot, mahalaukku, rinta, muut kudokset	0,12
Sukurauhaset	0,08
Virtsarakko, ruokatorvi, maksa, kilpirauhanen	0,04
Luun pinta, aivot, sylkirauhaset, iho	0,01

Lähdeluettelo

Arvela H. Residential Radon in Finland: Sources, Variation, Modelling and Dose Comparisons. STUK-A124. Helsinki: Radiation and Nuclear Safety Authority; 1995.

Arvela H, Mäkeläinen I, Holmgren O, Reisbacka H. Radon uudisrakentamisessa. Otantatutkimus 2009. STUK A244. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2010.

Bly R, Järvinen H, Kaijaluoto S, Ruonala, V. Contemporary collective effective dose to the population from x-ray and nuclear medicine examinations – changes over last 10 years in Finland. Radiation Protection Dosimetry 2020.

EUROPEAN COMMISSION. Medical Radiation Exposure of the European Population. Part 1/2. Radiation Protection No 180; 2014.

Darby S, Hill D, Deo H, Auvinen A, Miguel Barros-Dios J et al. Residential radon and lung cancer-detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7 148 persons with lung cancer and 14 208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. Scand J Work Environ Health 2006; 32 Suppl 1: 1–84.

Hämäläinen K, Vesterbacka P, Mäkeläinen I, Arvela H. STUK-A206. Vesilaitosten vedenkäsittelyn vaikutus luonnon radionuklidipitoisuuksiin. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2004.

ICRP Publication 60. (Annals of the ICRP Vol. 21 No. 1–3, 1991). 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.

ICRP Publication 80. (Annals of the ICRP Vol. 28 No. 3, 1998). Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals.

ICRP Publication 103. (Annals of the ICRP Vol. 37 Nos. 2–4, 2007).
The 2007 Recommendations of the International Commission
on Radiological Protection.

ICRP Publication 106. (Annals of the ICRP Vol. 38 Nos. 1–2, 2008).
The 2007 Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals
– Addendum 3 to ICRP Publication 53.

ICRP Publication 115 (Annals of the ICRP Vol. 40 No. 1, 2010).
Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon.

ICRP Publication 128 (Annals of the ICRP Vol. 44, No. 2S, 2015).
Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals:
A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances.

Kojo K, Holmgren O, Pyysing A, Kurttio P. Radon uudisrakentamisessa.
Otantatutkimus 2016. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2016.

Kostiainen E, Ylipieti J. Radioaktiivinen cesium Suomen ruokasienissä.
STUK-A240. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2010.

Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM et al. A combined analysis of
North-American case-control studies of residential radon and lung cancer.
J Toxicol Environ Health A 2006; 69: 533–97.

Kämäräinen M, Turtiainen T, Vaaramaa K. Suomessa tuotetun lihan ja
kananmunien radioaktiivisuus. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2017.

Lemmelä H. Environmental external radiation in Finland.
STUK-B-VALO 32. Helsinki: Radiation and Nuclear Safety Authority; 1984.

Liukkonen J. Isotooppitutkimukset ja -hoidot Suomessa 2015. Helsinki:
Säteilyturvakeskus; 2019.

Lubin JH, Wang ZY, Boice JR et al. Risk of lung cancer and residential
radon in China: Pooled results of two studies. Int J Cancer 2004; 109:132–7.

Mattila A., Inkinen S. (toim.). Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa. Vuosiraportti 2018. STUK-B236. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2019.

Muikku M, Arvela H, Järvinen H, Korpela H, Kostiainen E, Mäkeläinen I, Vartiainen E, Vesterbacka K. Annoskakku 2004 – Suomalaisten keskimääräinen efektiivinen annos. STUK-A211. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2005.

Muikku M, Bly R, Lahtinen J, Lehtinen M, Siiskonen T, Turtiainen T, Valmari T, Vesterbacka K. Suomalaisten keskimääräinen efektiivinen annos. Annoskakku 2012. STUK-A259. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2014.

Muikku M, Puhakainen M, Heikkinen T, Ilus T. The mean concentration of uranium in drinking water, urine and hair of occupationally unexposed Finnish working population. *Health Physics* 2009, 96 (6): 646–654.

Mäkeläinen I, Moisio S, Reisbacka H, Turtiainen T. Indoor occupancy and radon exposure in Finland. In: McLaughlin JP, Simopoulos SE, Steinhäusler F (eds). *Radioactivity in the environment*. Elsevier 2005; 7: 687–693.

Mäkeläinen I, Kinnunen T, Reisbacka H, Valmari T, Arvela H. Radon suomalaisissa asunnoissa. *Otantatutkimus* 2006. STUK-A242. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2009.

Mäkeläinen I. Kuka saa syövän radonista? *Ympäristö ja Terveys* 2010; 3: 60–63.

NCRP Report No. 184 – Medical Radiation Exposure of Patients in the United States, 2019.

Reisbacka H. Radon Measurement Method with Passive Alpha Track Detector at STUK, Finland. *Proceedings – Third European IRPA Congress, 14–18 June 2010, Helsinki, Finland, 642–645 (2011)*

Ruonala V. Radiologisten tutkimusten ja toimenpiteiden määrät vuonna 2018. STUK-B242. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2019.

Turtiainen T, Kostiaainen E. Radiological hazards in Finnish cereals: comparison of man-made and natural sources. *Cereal Research Communications* 2013; 41 (1): 366–375.

Turtiainen T, Brunfeldt M, Rasilainen T, Skipperud L, Valle L, Mrdakovic Popic J, Roos P, Sundell-Bergman S, Rosén K, Weimer R. Doses from natural radioactivity in wild mushrooms and berries to the Nordic population. Electronic report NKS-294. Roskilde: NKS Secreteriat; 2014. [http://www.nks.org/en/nks_reports/view_document.htm?id=111010112002390] [viitattu: 27.1.2014]

UNSCEAR 1993. SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes.

UNSCEAR 2000. SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Volume I: SOURCES, Volume II: EFFECTS.

UNSCEAR 2008. SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Volume I: SOURCES.

Tilastokeskus, "Suomalaisten Matkailu" -tilasto.

Vaaramaa K, Solatie D, Aro L. Distribution of ^{210}Pb and ^{210}Po concentrations in wild berries and mushrooms in boreal forest ecosystems. *Science of the Total Environment* 2009; 408: 84–91.

Valsta L, Kaartinen N, Tapanainen H, Männistö S, Sääksjärvi K. (toim.) Ravitsemus Suomessa – FinRavinto 2017 -tutkimus. Helsinki: 2018.

Vesterbacka P, Mäkeläinen I, Tarvainen T, Hatakka T, Arvela H. Kaivoveden luonnollinen radioaktiivisuus. Otantatutkimus 2001. STUK-A199. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2004.

LÄHDELUETTELO

Vesterbacka P, Vaaramaa K. Porakaivoveden radon- ja uraanikartasto. STUK-A256. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2013.

Vesterbacka P. (toim.). Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa. Vuosiraportti 2013. STUK-B174. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2014.

Vesterbacka P. (toim.). Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa. Vuosiraportti 2014. STUK-B190. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2015.

Vesterbacka P. (toim.). Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa: Vuosiraportti 2015. STUK-B204. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2016.

Vesterbacka P. (toim.). Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa: Vuosiraportti 2016. STUK-B215. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2017.

Vesterbacka P. (toim.). Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa. Vuosiraportti 2017. STUK-B226. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2018.

A



ISBN 978-952-309-446-8

ISSN 2243-1888

STUK

Säteilyturvakeskus

Strålsäkerhetscentralen

Radiation and Nuclear Safety Authority

Laippatie 4, 00880 Helsinki

Puh. (09) 759 881

fax (09) 759 88 500

www.stuk.fi