



1

RADIOAKTIIVISET AINEET, SÄTEILY JA YMPÄRISTÖ

Roy Pöllänen

SISÄLLYSLUETTELO

1.1	Ympäristön radioaktiiviset aineet	12
1.2	Radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen	15
1.3	Radioaktiivisten aineiden määrä ympäristössä	18
1.4	Säteilyaltistuksen määrittämisessä käytettäviä suureita	25
1.5	Säteilyannokset eri säteilylähteistä	27

1.1 Ympäristön radioaktiiviset aineet

Kaikkialla ympäristössämme on ionisoivaa säteilyä lähettäviä radioaktiivisia aineita. Valtaosa aineista on luonnollisista lähteistä (liite 1), mutta osa on keinotekoisesti tuotettuja (liite 3). Säteilyaltistus ei kuitenkaan aina liity elinympäristön radioaktiivisiin aineisiin: ihmiset voivat altistua ionisoivalle säteilylle vaikkapa röntgentutkimuksissa (katso kirja 3, Säteilyn käyttö) tai kosmiselle säteilylle matkustaessaan lentokoneella.

Luonnon radionuklidit

Kosminen säteily muodostuu auringosta ja aurinkokunnan ulkopuolelta tulevista hiukkasista sekä niiden ja ilmakehän vuorovaikutuksista syntyvistä sekundaarihiukkasista. Kosmisen säteilyn vaikutuksesta ilmakehän yläkerroksissa syntyy jatkuvasti niin sanottuja kosmogeenisia radionuklideja – esimerkiksi ^3H , ^7Be , ^{14}C ja ^{22}Na – jotka ilmakehän pystysuuntaisen sekoittumisen takia siirtyvät ilmakehän alakerrokseen ja tätä kautta edelleen muun muassa ravintoketjuihin. Tunnetuin nuklideista on ^{14}C , jota käytetään hyväksi radiohiiliajoituksessa.

Maaperässä on erittäin pitkäikäisiä niin sanottuja primordiaalisia radioaktiivisia aineita, jotka ovat olleet olemassa jo maapallon syntyessä. ^{238}U , ^{235}U ja ^{232}Th ovat luonnon hajoamissarjojen lähtönuklidit (liite 2). Säteilyaltistuksen kannalta tärkeimmät ovat radioaktiivisen jalokaasun, radonin, tytärnuklidit. Merkittäviä luonnon hajoamissarjoihin kuulumattomia radionuklideja ovat ^{87}Rb ja erityisesti ^{40}K , joka on huomattava sekä sisäisen että ulkoisen säteilyn lähde.

Ihminen vaikuttaa toiminnallaan luonnon radioaktiivisista aineista aiheutuvaan säteilyaltistukseen. Esimerkiksi luonnon radioaktiivisia aineita sisältävän fossiilisen polttoaineen tai lannoitteiden tuotanto ja käyttö voi altistaa ympäristön asukkaita säteilylle. Merkittävä työperäisen säteilyaltistuksen aiheuttaja on kaivostoiminta. Suomessa säteilyaltistuksen kannalta merkittävin ongelma on kuitenkin asuntojen ja työpaikkojen rakentaminen siten, että rakennuksen alla ja ympärillä olevien maa-ainesten sisältämä radon pääsee kulkeutumaan sisätiloihin.

Keinotekoiset radionuklidit

Keinotekoiset radionuklidit ovat ihmisen toiminnan tuloksena syntyneitä radioaktiivisia aineita. Näitä niin sanottuja antropogeenisiä radionuklideja voidaan tuottaa esimerkiksi neutroniaktiivoinnilla tai fissio- ja fuusioreaktioiden avulla. Näiden aineiden tytämnukliditkin ovat usein radioaktiivisia. Käsite ”keinotekoinen radioaktiivinen aine” on jossain määrin harhaanjohtava, sillä niitä syntyy luonnossa kosmisen säteilyn neutronien vaikutuksesta ja ^{238}U :n spontaanin fission takia. Kaksi miljardia vuotta sitten Gabonin Oklossa, päiväntasaajan Afrikassa, toimi luonnon ydinreaktoreita. Satoja tuhansia vuosia kestänyt ketjureaktio tuotti samoja radionuklideja kuin nykyiset ihmisen rakentamat reaktorit.

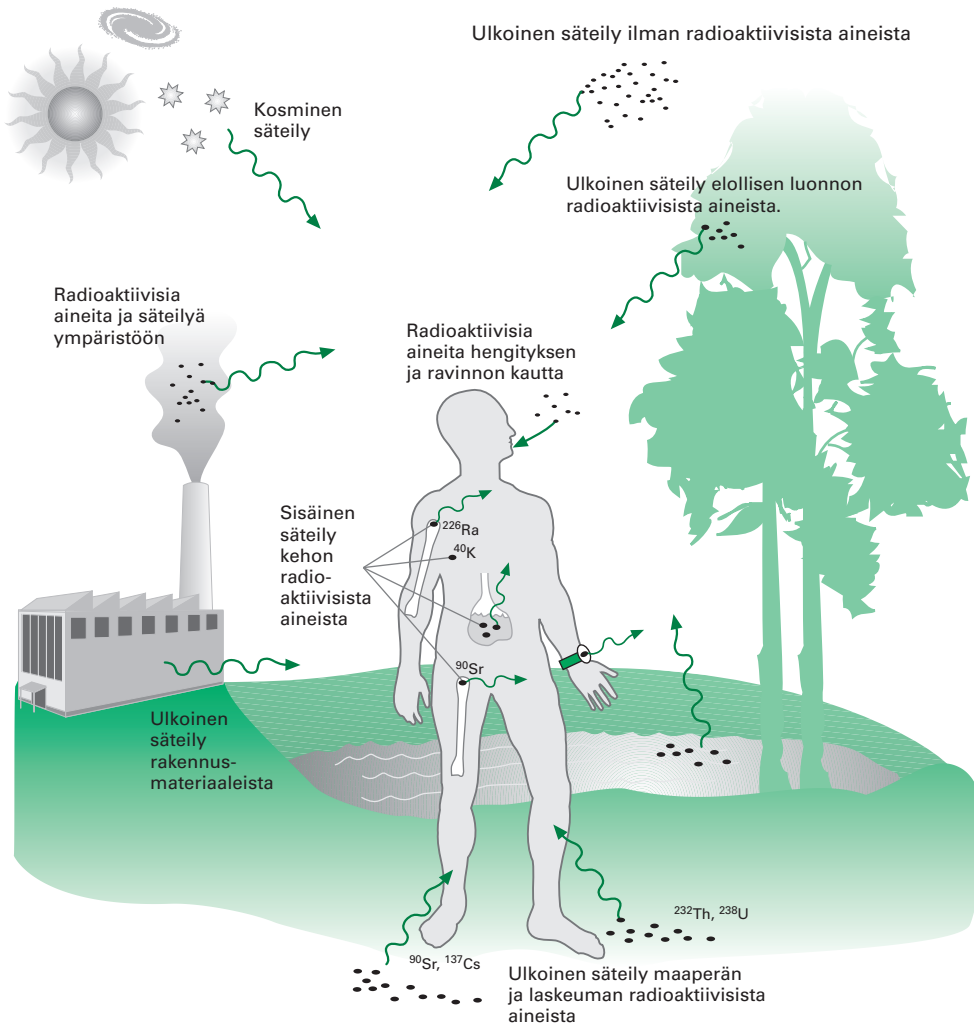
Keinotekoisia radioaktiivisia aineita syntyy ikään kuin sivutuotteena energiantuotannossa käytetyissä ydinreaktoreissa, joskin näitä aineita voidaan tuottaa myös tarkoituksellisesti muun muassa lääketieteellisiä tutkimuksia ja hoitoja varten. Hiukkaskiihdyttimillä voidaan tutkimustarkoituksiin tuottaa pieniä määriä urania raskaampia, erittäin lyhytikäisiä alkuaineita. Ilmakehässä 1950–1960-luvuilla tehdyissä ydinasekokeissa vapautui ympäristöön suuria määriä radioaktiivisia aineita.

Fissiossa raskas ydin (useimmiten ^{235}U tai ^{239}Pu) hajoaa runsaasti neutroneja sisältäviksi kevyemmiksi ytimiksi, jotka monimutkaisen hajoamisketjun seurauksena lopulta hajoavat stabiileiksi aineiksi. Useat fissiotuotteista ovat erittäin lyhytikäisiä; tärkeimmistä pitkäikäisistä nuklideista mainittakoon ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28,8$ a) ja ^{137}Cs (30 a). Vakavissa reaktori-onnettomuuksissa lyhytikäiset nuklidit, kuten esimerkiksi jodi-isotoopit ^{131}I (8 d) ja ^{133}I (21 h), voivat aiheuttaa merkittäviä säteilyannoksia lyhyessä ajassa. Fuusiossa kevyet ytimet yhdistyvät raskaammiksi ytimiksi vapauttaen samalla energiaa. Fuusiotuotteista suuri osa on stabiileja aineita.

Neutronivuon tiheys ydinräjäytyksissä ja ydinreaktoreissa on niin suuri, että niissä voi muodostua huomattavia määriä aktiivintuotteita. Fissioreaktoreiden tyypillisimpiä aktiivintuotteita ovat muun muassa ^{60}Co , ^{134}Cs ja ^{236}U . Aktiivintuotteina voidaan pitää myös niin sanottuja transuraanisia aineita, jotka syntyvät uraanista peräkkäisten neutronikaappausten ja hajoamisten seurauksena. Säteilysuojelullisesti merkittävimmät ovat plutoniumin isotoopit ^{238}Pu , ^{239}Pu ja ^{240}Pu .

Radionuklidit säteilyaltistuksen aiheuttajana

Elinympäristössämme havaittava ionisoiva säteily on valtaosin peräisin radioaktiivisista aineista. Säteilyaltistuksen kannalta ratkaisevaa on se, minkälaisia aineiden säteilyominaisuudet ovat, missä radioaktiiviset aineet altistuksen kohteeksi joutuneen henkilön kannalta sijaitsevat – toisin sanoen onko kyseessä ulkoinen vai sisäinen säteily (kuva 1.1) – ja miten aineet kulkeutuvat elinympäristössä ja ihmisissä.



KUVA 1.1 Kaikkialla ympäristössämme on säteilyä ja radioaktiivisia aineita.

Kehossa olevien radioaktiivisten aineiden lähettämää säteilyä kutsutaan sisäiseksi säteilyksi. Ulkoisen säteilyn tapauksessa säteilyn lähde on kehon ulkopuolella.

Radioaktiivisten aineiden lähettämän säteilyn laji ja energia sekä aineiden sijainti kudoksiin nähden ovat olennaisia säteilyn haittavaikutusten kannalta. Esimerkiksi kehon ulkopuolella sijaitsevat vain alfasäteilyä lähettävät aineet eivät voi aiheuttaa merkittävää säteilyannosta, sillä alfasäteily pysähtyy jo ihon kuolleeseen pintakerrokseen. Sen sijaan hengityksen tai ravinnonoton kautta kehoon joutuneista radioaktiivisista aineista emittoituva alfasäteily voi aiheuttaa erittäin suuria annoksia varsinkin soluihin, jotka sijaitsevat alle 100 mikrometrin (μm) etäisyydellä alfasäteilyä lähettävästä aineesta. Yksinomaan beetasäteilyä emittoivat radioaktiiviset aineet voivat välittömästi kehon ulkopuolella sijaitessaan säteilyttää kehoa noin senttimetrin syvyyteen.

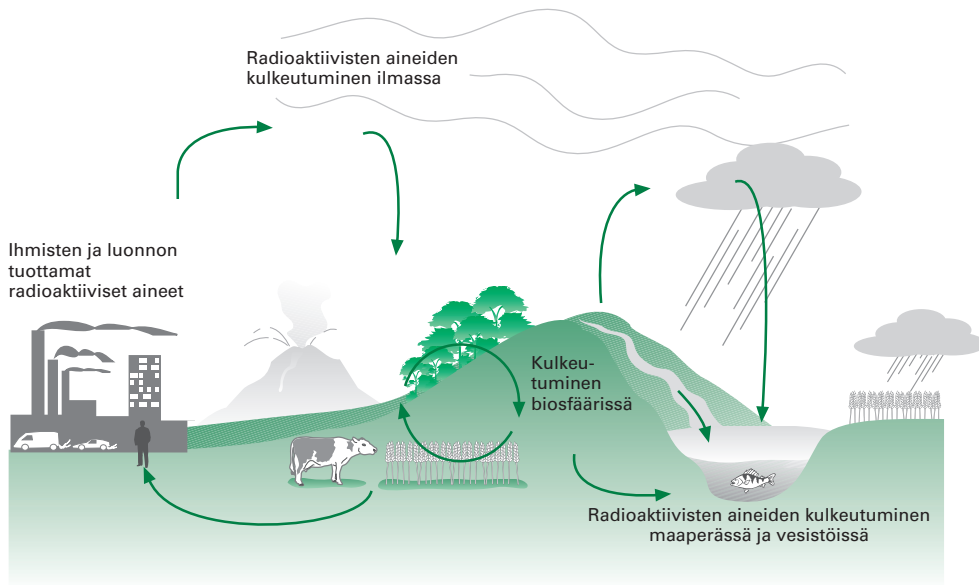
Kuitenkin harvat radioaktiiviset aineet lähettävät pelkästään joko alfa- tai beetasäteilyä. Vain beetasäteilyä lähettävästä nuklidista mainittakoon ^{90}Sr , joka kehoon jouduttuaan kertyy muun muassa luustoon. Kun radioaktiivinen aine emittoi joko alfa- tai beetasäteilyä, ovat tytärnuklidit useimmiten virittyneessä tilassa, jonka purkautuessa emittoituu yksi tai useampia gammavänttejä. Viritystilän purkautuessa voi atomista emittoitua myös elektroni- tai röntgensäteilyä. Gammasäteily voi tunkeutua syvälle kehoon tai – energian ollessa riittävän suuri – mennä jopa suoraan kudosten läpi vuorovaikuttamatta lainkaan. Useimmiten merkittävin osuus ulkoisen säteilyn annoksesta aiheutuukin gammasäteilystä.

1.2 | Radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen

Radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen ja säteilyn kulkeutuminen ovat eri asioita, vaikka käsitteet usein sekoitetaankin. Puhutaan esimerkiksi siitä, että säteilyä vuotaa ympäristöön, kun tarkoitetaan radioaktiivisten aineiden vuotoa; hehkulamputakaan ei sanota *vuotavan* valoa – hehkulamppu *säteilee* sekä näkyvää että infrapunavaloa. Karkeana nyrkkisääntönä säteilyn kulkeutumisesta ilmassa voi pitää, että alfasäteily kantaa korkeintaan 0,1 metrin päähän, beetasäteily 10 metrin päähän ja gammasäteily noin 1 kilometrin päähän säteilyn lähteestä; erityisesti gammasäteilyn osalta ei kuitenkaan tarkasti ottaen voida puhua kantamasta (kirja 1, Säteily ja sen havaitseminen, luvut 1.4 ja 1.5).

Sen sijaan radioaktiiviset aineet voivat kulkeutua ilmavirtausten tai veden mukana kauaksikin päästöpaikasta ja vasta säteillessään kehossa tai sen välittömässä läheisyydessä aiheuttaa vaaraa. Tshernobylin onnettomuudessa vapautuneita hiukkasia kulkeutui ilmakehässä jopa tuhansien kilometrien päähän. Ilmakehässä tehtyjen ydinasekokeiden seurauksena radioaktiivisia aineita jäi vuosiksi stratosfääriin, josta ne kulkeutuivat – koepaikan sijainnin mukaan – kaikkialle joko pohjoiselle tai eteläiselle pallonpuoliskolle.

Pääsääntöisesti saman alkuaineen eri isotoopit käyttäytyvät kemiallisesti samalla tavalla. Niinpä luonnossa ja ihmisessä radioaktiiviset aineet osallistuvat aineiden kiertokulkuun kuten vastaavat stabiilit alkuaineet (kuva 1.2). Avaimena radioaktiivisten aineiden kulkeutumisen ymmärtämisessä onkin luonnon stabiilien aineiden kiertokulun ja tähän liittyvien moninaisten (takaisin)kytkentöjen ymmärtäminen. Säteilyaltistuksen kannalta on erityisen tärkeää tietää, mistä radioaktiiviset aineet ympäristöömme tulevat ja minne ne kertyvät. Vaikka radionuklidit ennen hajoamistaan käyttäytyvät ympäristössä kuten vastaavat stabiilit nuklidit, voivat tytäraineet olla kemiallisilta ominaisuuksiltaan täysin eroailevia. Niinpä tytäraineiden kulkeutuminenkin voi olla erilaista. Esimerkkinä mainittakoon maaperässä kiinteässä olomuodossa oleva radium ja sen lyhytikäinen kaasumainen hajoamistuote radon. Vaikka radium kulkeutuu maaperässä heikosti, on radon puolestaan erittäin liikkuvaa.



KUVA 1.2 Radioaktiiviset aineet kulkeutuvat ympäristössä osana luonnon ainekiertoa.

Radioaktiivisia aineita syntyy jatkuvasti ilmakehässä kosmisen säteilyn vaikutuksesta (luku 2) ja niitä kulkeutuu maaperästä ilmakehään esimerkiksi tuulen tai ihmisen toiminnan seurauksena. Ilmakehän vaakasuuntaiset virtaukset siirtävät aineita tehokkaasti paikasta toiseen ja pystysuuntaiset virtaukset ilmakerroksesta toiseen. Radioaktiivisten aineiden siirtyminen ilmasta suoraan elollisiin olentoihin tapahtuu joko deponoitumalla eliöiden pintaan tai hengityksen ja suoraan ilmasta tapahtuvan ravinnonoton kautta. Ilma poikkeaa muista radioaktiivisten aineiden ”väliaineista” siinä, että kaasuja lukuun ottamatta ilmakehä ei varastoi radioaktiivisia aineita. Ennemmin tai myöhemmin radioaktiiviset aineet asettuvat luonnollisten poistumisprosessien takia eri pinnoille (luku 3).

Maassa ja kallioperässä radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen on hidasta verrattuna aineiden kulkeutumiseen ilmassa tai vedessä. Ilmasta maahan joutuneet ja maassa jo olevat radioaktiiviset aineet voivat liueta pohjaveteen ja kulkeutua siitä edelleen vesistöihin. Kaasumainen radon liikkuu maaperässä ja maasta edelleen ulkoilmaan ja rakennuksiin diffuusiolla ja konvektiolla (luku 4).

Vesistöihin joutuu radioaktiivisia aineita pohjaveteen liuenneena, laskeutuneena suoraan ilmasta sekä kulkeutumalla sadeveden mukana jokiin ja edelleen järviin ja meriin. Pohjaveden kierto on hyvin hidasta verrattuna pintavesien kiertoon, ja pohjavesi onkin pitkään kosketuksissa maa- ja kallioperän kanssa (luku 5). Niinpä pohjavesien mineraali- ja siten myös radionuklidien pitoisuus on huomattavasti suurempi kuin pintavesissä. Pintavedet ovat pohjavettä huomattavasti herkempiä ilman radioaktiivisten aineiden aiheuttamalle kontaminaatiolle.

Maaperän ja veden sisältämiä radioaktiivisia aineita siirtyy kasvien ravinteidenoton kautta edelleen eläimiin ja ihmisiin. Radioaktiivisten aineiden käyttäytyminen erilaisissa ympäristöissä ja ravintoketjuissa vaihtelee huomattavasti (luku 6). Säteilyaltistuksen kannalta merkityksellisimpiä ovat sellaiset ravintoketjut, joihin radioaktiiviset aineet kertyvät ja joista saatuja elintarvikkeita ihmiset käyttävät ravinnokseen. Säteilyaltistus saadaan tällöin sisäisenä säteilynä (luku 7). Erityisen haitallisia ovat sellaiset aineet, kuten esimerkiksi ^{90}Sr , jotka kertyvät kudoksiin ja joiden biologinen puoliintumisaika on pitkä. Uraania voidaan saada ravinnon ja hengityksen kautta, mutta uraani poistuu virtsanerityksen myötä elimistöstä verrattain nopeasti. Sen sijaan radioaktiivista jodia – vaikkapa lääkinnällisessä diagnostiikassa yleisesti käytettäviä isotooppeja ^{123}I , ^{125}I sekä mahdollisissa vakavissa reaktorionnettomuuksissa vapautuvia isotooppeja ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I ja ^{135}I – saattaa tietyissä tapauksissa kertyä

kilpirauhaseen määriä, jotka voivat aiheuttaa suoria säteilyhaittoja. Kaikki elolliset olennot sisältävät radioaktiivisia aineita; ihmisissä yleisimpiä radionuklideja ovat ^{40}K , ^{14}C , ^3H ja radiumin isotoopit.

Erilaisilla pinnoilla sekä ilmassa että maa- ja kallioperässä olevat radioaktiiviset aineet tuottavat ulkoista säteilyä (luku 8). Ilmaan ja maanpintaan päässeet keinotekoiset radioaktiiviset aineet voivat vakavassa reaktorionnettomuudessa olla huomattava ulkoisen säteily lähde. Ulkoisen säteilyn annosnopeuden mittaaminen onkin tärkeää säteilyvaaran uhatessa (luku 9).

1.3 Radioaktiivisten aineiden määrä ympäristössä

Radioaktiiviset aineet ovat elollisen luonnon kannalta haitallisimpia juuri silloin, kun ne hajoavat ja lähettävät ympäristöönsä säteilyä. Poikkeuksena ovat eräät hyvin pitkäikäiset nuklidit – kuten esimerkiksi ^{238}U – jotka ovat kemiallisten ominaisuuksiensa puolesta myrkyllisempiä kuin säteilyominaisuuksiensa puolesta. Lisäksi hajoamisnopeus vaihtelee nuklideittain erittäin paljon. Niinpä radioaktiivisten aineiden hajoamisnopeus onkin havainnollisin määrää kuvaava suure. Radioaktiivisten aineiden määrää luonnehditaankin käyttäen pikemminkin aktiivisuuden (Bq) kuin massan (kg) yksikköä. Tietyn radionuklidin i massan m_i ja aktiivisuuden A_i välillä on yksinkertainen yhteys

$$m_i = A_i \frac{M_i}{\lambda_i N_A}, \quad (1.1)$$

jossa λ_i on nuklidin i hajoamisvakio (1/s), N_A on Avogadron vakio ($6,02 \cdot 10^{23}$ 1/mol) ja M_i on kyseisen nuklidin moolimassa (g/mol). Hajoamisvakiolla ja puoliintumisaikalla on yhteys $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda_i$.

ESIMERKKI 1.1

Aikuisessa suomalaisessa on ^{40}K :ää noin 5 kBq ja Tshernobylin onnettomuudesta peräisin olevan ^{137}Cs :ää (vuonna 1987) keskimäärin 2 kBq. Mitkä ovat vastaavat määrät massan yksikössä ilmaistuna?

^{40}K :n moolimassa on 40 g/mol, puoliintumisaika $1,28 \cdot 10^9$ a ja hajoamisvakio on siten $1,72 \cdot 10^{-17}$ 1/s.

^{137}Cs :n moolimassa on 137 g/mol, puoliintumisaika on 30,17 a ja hajoamisvakio $7,29 \cdot 10^{-10}$ 1/s.

Sijoitetaan nämä kaavaan 1.1 jolloin ^{40}K :n määräksi ihmisessä saadaan $1,9 \cdot 10^{-5}$ kg ja ^{137}Cs :n määräksi vastaavasti $6,2 \cdot 10^{-13}$ kg.

Radioaktiivisten aineiden pitoisuus ympäristössä massan yksikkönä ilmaistuna on yleensä erittäin pieni ja monesti aineet voidaankin havaita vain niiden lähettämän säteilyn perusteella. Vaikka pitoisuudet ovatkin pieniä, voivat ainemäärät kokonaisuudessaan olla suuria erityisesti pitkäikäisten luonnon radionuklidien osalta. Uraanin pitoisuus maaperässä on muutamia grammoja tonnissa, mutta kokonaisuudessaan sitä on maankuoressa valtavia määriä. Tästä määrästä vain pieni osa on kaupallisesti hyödynnettävissä. Luonnon ainekierrossa olevien stabiilien aineiden määrä on erittäin paljon suurempi kuin radioaktiivisten aineiden määrä eivätkä radionuklidit siten vaikuta juuri lainkaan ainekiertoon. Radioaktiivisten aineiden pitoisuus ihmisen välittömässä elinympäristössä ei ole vakio vaan vaihtelee sekä ajallisesti että paikallisesti.

Luonnon radioaktiiviset aineet

Maaperässä radioaktiivisten aineiden kulkeutumisprosessit ovat monasti niin hitaita, että pitoisuuden ajallisen vaihtelun voidaan katsoa olevan säteilyaltistuksen kannalta merkityksetön. Maaperästä emittoituvan gammasäteilyn määrään vaikuttaa olennaisesti maaperän radioaktiivisten aineiden aktiivisuuspitoisuus kyseisellä paikalla (taulukko 1.1). Ulkoisen säteilyn annosnopeuden vaihtelu eri paikkakunnilla Suomessa (0,04–0,3 $\mu\text{Sv/h}$) johtuukin pääasiassa maaperän uraanin, toriumin ja ^{40}K :n pitoisuuden vaihtelusta.

Maaperän sisältämien radioaktiivisten aineiden pitoisuus ei yleensä juuri muutu ajan funktiona. Sitä vastoin aktiivisuuspitoisuus ilmassa sekä sisällä että ulkona lähellä maanpintaa voi vaihdella hyvinkin paljon. Esimerkiksi radonpitoisuuden vaihtelu ulkoilmassa johtuu pääosin kulloinkin vallitsevasta säätilasta ja erityisesti pintailman pystysuuntaisesta sekoittumisesta. Radonin diffuusioon ilmakehään vaikuttaa myös maaperän kosteus. Ilman sisältämien luonnon radioaktiivisten aineiden määrälliseen vaihteluun vaikuttaa myös lähteen suuruuden ajallinen vaihtelu. Merellisten ilmassojen vallitessa tyypillinen ulkoilman radonpitoisuus Suomessa on luokkaa 1 Bq/m^3 ja mantereellisten ilmassojen vallitessa noin 5 Bq/m^3 .

Nuklidi	Maaperä (Bq/kg)	Nuklidi	Merivesi (Bq/m ³)	Nuklidi	Ilma (Bq/m ³)
²³⁸ U	35	²³⁸ U	44	²³⁸ U	1,0 · 10 ⁻⁶
²³² Th	30	²³⁵ U	1,9	²³² Th	0,5 · 10 ⁻⁶
²²⁶ Ra	35	²³⁴ Th	37	²²⁶ Ra	1,0 · 10 ⁻⁶
⁴⁰ K	400	²³² Th	0,004	²¹⁰ Pb	0,0005
		²³⁰ Th	15	¹⁴ C	0,056
		²²⁷ Ac	0,004	⁷ Be	0,013
		³ H	0,0014		

TAULUKKO 1.1 Eräiden luonnon radionuklidien tyypillinen aktiivisuuspitoisuus maaperässä, merivedessä ja ilmassa

Maaperän osalta arvot ovat maittain mitattujen aktiivisuuspitoisuuksien mediaaneja (UNSCEAR 2000). Meriveden tapuksessa arvot ovat pohjoiselta pallonpuoliskolta (Brune et al. 2000). Ilman sisältämien kosmogeenisten radionuklidien ³H, ⁷Be ja ¹⁴C osalta arvot ovat troposfääristä keskimäärin, ja muiden nuklidien osalta niin sanottuja viitteellisiä arvoja (UNSCEAR 2000). Taulukossa ilmoitetut luvut ovat vain suuntaa antavia; paikallinen ja ajallinen vaihtelu voi olla erittäin suuri.

Ulkoilmassa radonpitoisuuden vaihtelu on yleensä paljon pienempää kuin sisätiloissa. Pitoisuuden vaihtelu sisätiloissa johtuu pääosin sisätilojen ja maaperän välisestä paine-erosta. Monien ei-kaasumaisten radioaktiivisten aineiden pitoisuuteen vaikuttaa myös ihmisten toiminta. Pintailman sisältämän ⁷Be:n aktiivisuuspitoisuuden vaihtelun syynä on lähinnä ilmakehän suuren skaalan pystysuuntainen sekoittuminen pikemminkin kuin ⁷Be:n tuottonopeuden vaihtelu.

Luonnon radioaktiivisten aineiden pitoisuuden ajallinen ja paikallinen vaihtelu vesistöissä liittyy veden kiertokulkuun maaperässä ja vesistöissä. Pitoisuuteen vaikuttaa ratkaisevasti maaperän radioaktiivisten aineiden liukeneminen veteen ja se, kuinka kauan aineet ovat kosketuksissa veden kanssa. Sateen mukana ilmasta tulleiden luonnon radioaktiivisten aineiden määrä on erittäin pieni. Pitoisuusvaihtelun suuruuteen vaikuttaa myös vesistöjen koko ja tyyppi: puroissa, pienissä joissa ja järvissä se on paljon suurempaa kuin suurissa vesistöissä.

Veden kiertokulku vaikuttaa myös kasvien sisältämien radioaktiivisten aineiden määrään. Kasvit ottavat maaperästä veteen liuenneita ravinteita, joista osa on radioaktiivisia. Aineet voivat siirtyä ravintoketjussa edelleen eläimiin ja ihmisiin (taulukko 1.2). Luonnon radioaktiivisten aineiden aktiivisuuspitoisuus ihmisissä vaihtelee ja riippuu kulutustottumusten ohella elintarvikkeiden pitoisuusvaihtelun lisäksi hengitysilman sisältämien radioaktiivisten aineiden pitoisuuden vaihtelusta ja kehon aineen-

vaihdunnasta. Aineiden biologinen käyttäytyminen kehossa vaikuttaakin ratkaisevasti säteilyaltistukseen. Merkittävin säteilylähde ihmisen kehossa on lihasten ^{40}K . Kehossa olevan kaliumin määrä on vakio eikä riipu asuinpaikasta. Aikuisessa ihmisessä ^{40}K :n määrä on noin 3 000–6 000 Bq; miehissä hieman enemmän kuin naisissa ja lapsissa.

Yhdistyneiden Kansakuntien tieteellinen komitea UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) julkaisee muutaman vuoden välein YK:n yleiskokoukselle kattavan raportin ionisoivan säteilyn lähteistä ja vaikutuksista koko maapallolla. Arvioi-
dessaan luonnon radioaktiivisista aineista aiheutuvaa efektiivistä annosta UNSCEAR (2000) käyttää hyväksi viitteellisiä aktiivisuuspitoisuuksia, jotka perustuvat sekä mittaustuloksiin että asiantuntija-arvioihin. Suuri osa taulukoissa 1.1 ja 1.2 esitetyistä luvuista ovat näitä viitteellisiä arvoja. Aktiivisuuspitoisuuden vaihtelu voi yksittäistapauksissa, esimerkiksi yksittäisten elintarvikkeiden osalta, kuitenkin olla erittäin suurta – jopa yli tuhatkertainen viitteelliseen arvoon nähden.

Välittömään elinympäristöömme pääsee luonnon radioaktiivisia aineita myös ihmisten toiminnan seurauksena. Pieniä määriä radioaktiivisia aineita pääsee ilmakehään – ja sitä kautta myös muualle ympäristöön – esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden käytön takia. Koska niitä käytetään eniten teollisuusmaissa, on säteilyaltistus näillä alueilla myös suurinta. Ympäristön ja säteilyaltistuksen kannalta paljon merkittävämpää on kuitenkin kaivostoiminta ja mineraalien jatkojalostus, joista vapautuvat luonnon radioaktiiviset aineet voivat aiheuttaa suurta, joskin paikal-

Nuklidi	Maito- tuotteet (mBq/kg)	Liha- tuotteet (mBq/kg)	Vilja- tuotteet (mBq/kg)	Vihan- nekset (mBq/kg)	Juurekset hedelmät (mBq/kg)	Kalatuotteet (mBq/kg)	Juomavesi (mBq/kg)	Ihminen (mBq/kg)
^{238}U	1	2	20	20	3	30	1	3–100
^{232}Th	0,3	1	3	15	0,5	10	0,05	1–24
^{226}Ra	5	15	80	50	30	100	0,5	4,1–260
^{210}Pb	15	80	50	80	30	200	10	100–3 000
^{210}Po	15	60	60	100	40	2 000	5	100–2 400

TAULUKKO 1.2 Eräiden luonnon radionuklidien viitteellinen aktiivisuuspitoisuus elintarvikkeissa (tuorepainoa kohti) ja ihmisessä (UNSCEAR 2000)

Taulukossa ilmoitetut luvut ovat suuntaa antavia arvoja; esimerkiksi elintarvikkeiden ja juomaveden osalta paikallinen vaihtelu voi yksittäistapauksissa olla erittäin suuri. Luonnon radionuklidien pitoisuus ihmisessä vaihtelee kudoksittain ja taulukossa esitetyt luvut ovat viitteellisten pitoisuuksien ylä-/alarajat eri kudoksille (keuhkot, maksa, munuaiset, lihakset ja muut kudokset sekä luusto).

lista säteilyaltistusta. Tällöin radon on useimmiten merkittävin säteilyaltistaja. Suomessa on 1950- ja 1960-luvuilla harjoitettu uraanin louhintaa ja rikastusta Enon Paukkajavaaralla ja Askolassa. Nämä alueet on myöhemmin puhdistettu ja ennallistettu.

Keinotekoiset radioaktiiviset aineet

Keinotekoisien radioaktiivisten aineiden vapautumista ympäristöön pyritään estämään kaikin järkevin käytettävissä olevin keinoin. Radioaktiivisia aineita tuotannossaan käsittelevät laitokset – ydinvoimalaitokset, jälleenkäsittelylaitokset tai radioisotooppien valmistuslaitokset – eivät käytännössä kykene täysin suljettuun prosessiin, vaan pieniä määriä aineita joudutaan hallitusti päästämään ympäristöön. Ydinenergiatuotannossa vapautuu ilmakehään ja veteen radionuklideja, jotka leviävät koko ilmakehään altistaen siten koko maapallon väestöä (taulukko 1.3). Suomalaisen ydinvoimalaitosten päästöt ovat olleet huomattavasti alle päästörajojen (kirja 5, Ydinturvallisuus, luku 4.3).

Vuosi	³ H (ilmaan) · 10 ¹² Bq	³ H (veteen) · 10 ¹² Bq	¹⁴ C · 10 ¹² Bq	⁸⁵ Kr · 10 ¹² Bq	¹²⁹ I · 10 ¹² Bq
–1970	2 146	919	38	32 060	0,11
1970–1974	6 543	2 809	116	97 970	0,32
1975–1979	24 200	8 858	364	308 900	1,01
1980–1984	44 330	13 640	523	424 400	1,53
1985–1989	77 960	23 660	672	454 000	1,79
1990–1994	98 900	35 390	650	823 700	3,87
1995–1997	42 830	40 770	442	1 102 000	6,14

TAULUKKO 1.3 Ydinreaktoreista ja jälleenkäsittelylaitoksista vapautuneiden globaalisesti levinneiden radionuklidien päästöt (UNSCEAR 2000)

Vuoteen 1980 mennessä maaperässä, vedessä ja ilmakehässä oli tehty yhteensä 543 ydinasekoetta. Niiden ympäristövaikutukset olivat suurimmillaan itse koalueella, mutta erityisesti ilmakehässä tehdyt kokeet kontaminoivat ympäristöä laajalti (taulukko 1.4). Esimerkiksi Suomessa ydinasekoekiden aiheuttama ²³⁹Pu-laskeuma oli noin 60 Bq/m². Ydinasekoekista ympäristöön levinneiden radioaktiivisten aineiden määrä on globaalin säteilyaltistuksen kannalta paljon merkittävämpi kuin kaikkien jo tapahtuneiden ydinreaktorionnettomuuksien päästöt yhteensä.

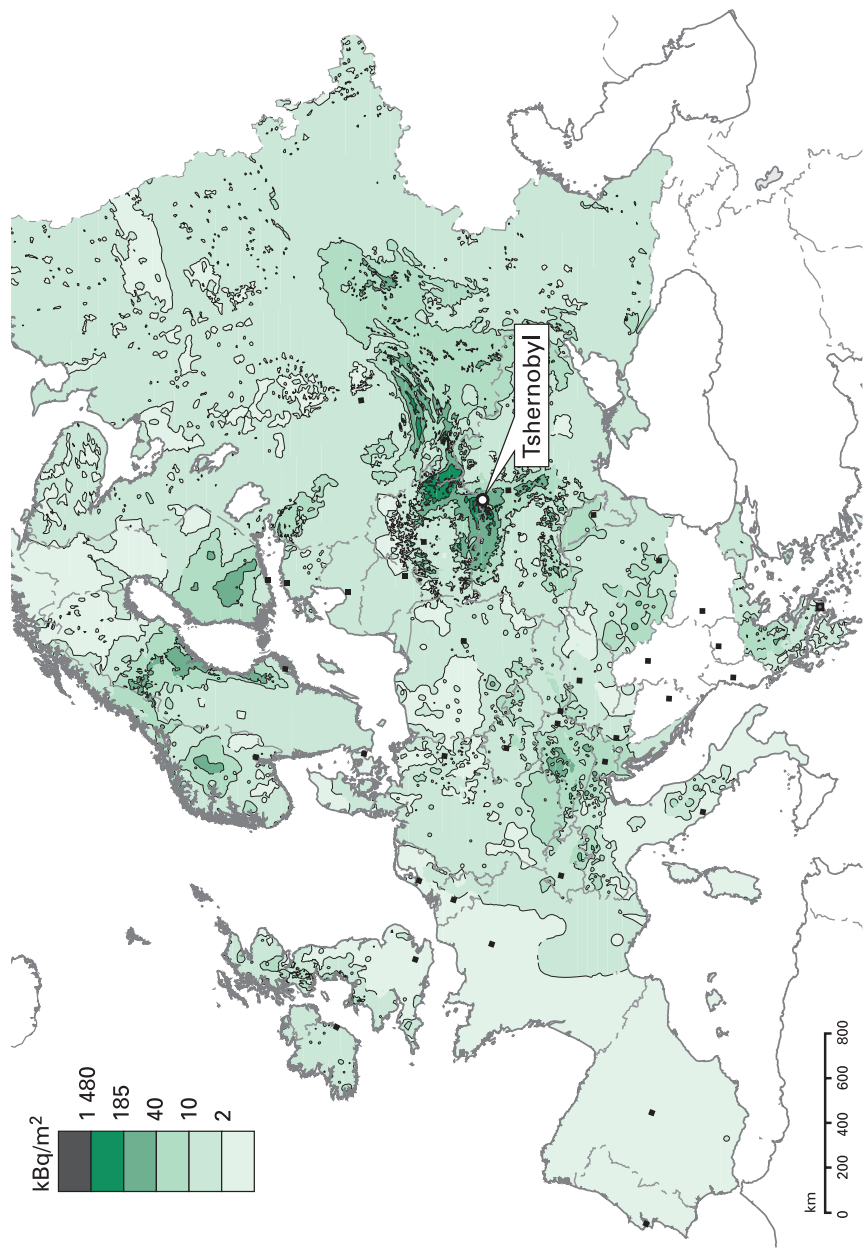
Keinotekoisia radioaktiivisia aineita on merkittäviä määriä laitoksissa, jotka useimmiten on sijoitettu etäälle asutuskeskuksista. Tällaisia laitoksia ovat muun muassa ydinvoimalat ja ydinpolttoaineen jälleenkäsittelylaitokset. Niinpä mahdollisen onnettomuuden tapahtuessa seuraukset ovat pahimmillaan joko itse laitosalueella tai sen välittömässä läheisyydessä. Vain poikkeuksellisissa tapauksissa – kuten Tshernobylin onnettomuudessa – ympäristöön vapautuneiden radioaktiivisten aineiden määrä on globaalin säteilyaltistuksen kannalta merkittävä. Tshernobylin turmassa suuri osa helposti haihtuvista radioaktiivisista aineista vapautui ilmakehään ja vaikeammin höyrystyvistäkin noin neljä prosenttia.

Nuklidi	Puoliintumisaika	Windscale 1957 · 10 ¹⁵ Bq	Harrisburg 1979 · 10 ¹⁵ Bq	Tshernobyl 1986 · 10 ¹⁵ Bq	Ydinasekoikeet 1945–1980 · 10 ¹⁵ Bq
⁸⁹ Sr	50,5 d	0,005	-	80	90 000
⁹⁰ Sr	28,6 a	0,00022	-	8	600
¹³¹ I	8,05 d	0,60	0,00055	260	70 000
¹³² Te	78,2 h	0,60	-	48	70 000
¹³³ Xe	5,25 d	12	370	1 700	1 900 000
¹³⁴ Cs	2,06 a	0,0012	-	19	-
¹³⁷ Cs	30,2 a	0,046	-	38	960
α-säteilijät		0,008	-	6	180

- ei todettu

TAULUKKO 1.4 Eräiden Windscalen, Harrisburgin ja Tshernobylin reaktorionnettomuuksissa ympäristöön päässeiden radionuklidien määrät verrattuna ydinasekoikeista vapautuneisiin

Tshernobylin voimalaitoksen lähialueilla ¹³⁷Cs-laskeuma ylitti monin paikoin 1 MBq/m² ja Suomessakin laajalti 10 kBq/m² (kuva 1.3). Suomeen asti kulkeutuneet radioaktiiviset aineet olivat pääasiassa peräisin onnettomuuden varhaisista vaiheista, jolloin osa päästöstä nousi yli kilometrin korkeuteen ja kulkeutui korkealla ilmakehässä kohti Skandinaavia. Radioaktiivisten aineiden määrä ei kuitenkaan ollut niin suuri, että väestöä olisi jouduttu suojaamaan säteilyn suorien terveyshaittojen vuoksi. Laskeuman mukana tuli paljon lyhytikäisiä radioaktiivisia aineita, jotka hävisivät luonnosta muutaman viikon kuluessa. Pitkällä aikavälillä säteilyaltistuksen kannalta tärkeitä nuklideja ovat esimerkiksi ⁹⁰Sr ja ¹³⁷Cs sekä transuraanisista aineista ²³⁹Pu, jonka laskeuma Suomessa oli noin 10 prosenttia ydinasekoikeiden aiheuttamasta laskeumasta.



KUVA 1.3 Tshernobylin onnettomuuden aiheuttama ¹³⁷Cs-laskeuma Euroopan alueella (De Cort M, Dubois G, Fridman Sh D, Germenchuk M G, Izrael Yu A, Janssens A, Jones A R, Kelly G N, Kvasnikova E V, Matveenko I I, Nazarov I M, Pokumeiko Yu M, Sitak V A, Stukin E D, Tabachny L Ya, Tsaturov Yu S, Avdyushin S I. Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident. EUR report nr. 16733, EC, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg 1998)

Keinotekoisia radioaktiivisia aineita tuotetaan myös lääkinnälliseen ja teollisuuskäyttöön (kirja 3, Säteilyn käyttö, luku 3). Teollisuuden käytöstä poistamia säteilylähteitä on silloin tällöin löytynyt ympäristöstä esimerkiksi romuttamoilta tai kaatopaikoilta. Vakavin lähellä Suomea sattunut onnettomuus tapahtui virolaisessa Kiisan kylässä, jossa yksityistaloudesta löytyi läheiseltä kaatopaikalta anastettu pienikokoinen mutta erittäin aktiivinen ^{137}Cs :ää sisältävä metallieriö (kirja 3 luku 7 sekä kirja 4 luku 4.2). Säteilyaltistuksen seurauksena yksi henkilö kuoli ja neljä muuta sai eriasteisia säteilyvammoja.

Radioaktiivisia aineita käytetään pieniä määriä myös eräissä kulutustavaroissa (kirja 3 luku 6). Kotitalouksissa on joukko laitteita, joissa säteilyä käytetään joko suoranaisesti hyväksi tai joissa säteily syntyy sivutuotteena. Ionisoivaa säteilyä käytetään hyväksi muun muassa palovarottimissa ja sitä syntyy jossain määrin television ja tietokoneen näyttöpäätteen kuvaputkessa. Palovarottimissa käytetään ^{241}Am -säteilylähdettä; sen aktiivisuus on kuitenkin alle 40 kBq eikä lähteen olemassaoloa voida havaita tavallisella säteilysovelumittauksiin tarkoitettulla geigermittarilla. Asianmukaisesti käsiteltynä laite ei aiheuta terveydellistä haittaa. Lisäksi kellot, kameroiden linsit tai jopa korut saattavat sisältää pieniä määriä radioaktiivisia aineita.

1.4 | Säteilyaltistuksen määrittämisessä käytettävät suureita

Säteilyn luonne ja vaikutukset ovat niin monimuotoisia, että niiden kaikkien luonnehtimiseksi tarvitaan useita erilaisia ja eri käyttöön tarkoitettuja suureita. Tässä luvussa käydään lyhyesti läpi keskeisimmät säteilyn terveysvaikutuksia kuvaavat suureet; kattava kuvaus on esitetty kirjan 1, Säteily ja sen havaitseminen, luvussa 2 ja kirjan liitteessä 1.

Säteilyn vaikutus kudokseen perustuu säteilyn ja aineen välisiin vuorovaikutuksiin. Vuorovaikutuksessa säteilyn energia muuntuu ensin eri mekanismeilla tuotettujen sekundaarihiukkasten energiaksi. Esimerkiksi kerma (yksikkö gray, Gy) mittaa foton- tai neutronisäteilyn väliaineessa synnyttämien varauksisten sekundaarihiukkasten liike-energiaa. Sekundaarihiukkasten energia kuluu lopulta kudoksessa tapahtuviin atomi- ja molekyylylityson muutoksiin – useimmiten lämmöksi, mutta pahimmillaan DNA:n vaurioihin – ja tätä energian siirtymisprosessia aineeseen kuvaa absorboitunut annos. Absorboitunut annos (yksikkö gray, Gy) on ionisoivasta säteilystä pieneen kudosaikioon siirtynyt energia kyseisen alkion massayksikköä kohden.

Absorboitunut annos ei kuitenkaan yksin riitä kuvaamaan terveyshaittojen todennäköisyyttä eikä vaurioiden merkitsevyyttä, sillä samansuuruisilla absorboituneilla annoksilla eri lajin säteilyä on erilainen biologinen vaikutus. Absorboituneen energian määrän lisäksi on tällöin otettava huomioon muun muassa säteilyn laji ja energia, annoksen jakautuminen ja kertymisnopeus kudokseen, kudoksen vaurioalttius ja kyseisen kudoksen merkitys henkilön terveyteen ja niin edelleen. Käytännön säteilysuojelutyössä ja annosrajoituksia säädettyä käytetään absorboituneen annoksen sijaan laskennallisia keskimääräisiä suureita kuten ekvivalenttiannosta ja efektiivistä annosta. Suojelunormien suunnittelua ja toteuttamisen valvontaa varten tarvitaan tarkemmin määriteltyjä suureita, joista keskeisin on annosekvivalentti.

Absorboituneen annoksen tapaan annosekvivalentti (yksikkö sievert, Sv) on mitattavissa oleva suure. Se ottaa painotuskertoimien kautta huomioon eri säteilylajien erilaisen kyvyn aiheuttaa haittaa tietyssä kohtaa elävää kudosta. Annosekvivalentti määritellään absorboituneen annoksen ja säteilyn paikallisen laatutekijän tulona. Annosekvivalentti on hyvin ”paikkaan sidottu” suure ja se on periaatteessa määritettävä jokaisessa säteilykentän pisteessä erikseen.

Säteilysuojelussa yleisesti käytetyt suureet – kuten ekvivalenttiannos (yksikkö sievert, Sv) ja efektiivinen annos (yksikkö sievert, Sv) – eivät ole suoraan mitattavissa, vaan ne täytyy arvioida laskennallisin keinoin. On huomattava, että annosekvivalentti ja ekvivalenttiannos ovat eri suureita; annosekvivalentti määritellään pistemäisessä massaalkiossa, kun taas ekvivalenttiannos lasketaan tietylle kudokselle keskimääräisen absorboituneen annoksen avulla. Tällöin käytetään keskimääräisiä säteilyn laatutekijöitä, niin sanottuja säteilyn painotuskertoimia (katso luku 7.2). Elimen tai kudoksen ekvivalenttiannos on siihen absorboituneiden annosten summa painotettuna säteilyn painotuskertoimilla.

Säteilyn aiheuttamia stokastisia eli satunnaisia haittoja voidaan arvioida efektiivisen annoksen avulla. Se ottaa huomioon eri elinten ja kudosten erilaisen säteilyherkkyyden kudosten painotuskertoimien avulla (luku 7.2). Efektiivinen annos, jota usein kutsutaan puhekielellä kokokehannoiseksi tai vain annokseksi, on kudospainotuskertoimilla painotettujen ekvivalenttiannosten summa. Terveyshaittaa voidaan arvioida efektiivisen annoksen avulla myös siinä tapauksessa, että kehon eri osat altistuvat säteilylle epätasaisesti. Efektiivistä annosta ei tule käyttää säteilyn suorien terveyshaittojen arviointiin.

Energian siirtyminen ulkoisesta säteilystä kudokseen on ajallisesti välitön tapahtuma. Säteilyannoksen kertyminen lakkaa, mikäli ihminen poistuu säteilykentästä. Toisin on laita, jos radioaktiivisia aineita joutuu elimistöön. Tällöin säteilylle altistuminen jatkuu, kunnes radioaktiivinen aine poistuu elimistöstä. Ekvivalenttiannosta (tai efektiivistä annosta), joka koituu elimistöön joutuneen radioaktiivisen aineen kertasaannosta, sanotaan ekvivalenttiannoksen (tai efektiivisen annoksen) kertymäksi (yksikkö sievert, Sv). Arvioitaessa hitaasti kudoksista poistuvien aineiden aiheuttamaa annoskertymää oletetaan kertymäajaksi aikuisilla 50 vuotta ja lapsilla 70 vuotta.

Ekvivalenttiannosta (tai efektiivistä annosta), joka koituu tietyistä säteilytoiminnasta tai tietyistä erillisistä tapahtumasta elimistöön joutuneen yleensä pitkäikäisen radioaktiivisen aineen saannosta, sanotaan ekvivalenttiannoksen (tai efektiivisen annoksen) sitoumaksi (yksikkö sievert, Sv). Annositoumaa voidaan käyttää arvioitaessa tietyn väestöryhmän tai koko maailman väestön tietyistä säteilytoiminnasta saamaa säteilyrasitusta. Sitä sovelletaan esimerkiksi määritettäessä radioaktiivisten aineiden päästörajoja. Tiettyjen väestöryhmien kokonaissäteilyriskiä arvioitaessa käytetään kollektiivista (efektiivistä) annosta (yksikkö mansievert, manSv), joka on ryhmän yksilöiden efektiivisten annosten summa.

1.5 | Säteilyannokset eri säteilylähteistä

Väestön valtaenemmistölle luonnonsäteilyn aiheuttama säteilyannos on paljon suurempi kuin ihmisen toiminnan kautta saatava annos. Luonto itse onkin suurin säteilyaltistaja. Luonnonsäteilyn määrä ja sen vaihtelu paikasta toiseen antaa sopivan mittakaavan arvioitaessa ihmisen toiminnasta syntyneitä säteilyseurauksia. Sisätiloissa esiintyvä radonkaasu on ylivoimaisesti suurin säteilyaltistaja sekä Suomessa että koko maailmassa (taulukko 1.5). Keinotekoisista säteilylähteistä väestöä altistavat säteilyn lääketieteellinen käyttö, ydinasekoeket, ydinasetuotanto, ydinenergian tuotanto ja erilaisten onnettomuuksien säteilyvaikutukset.

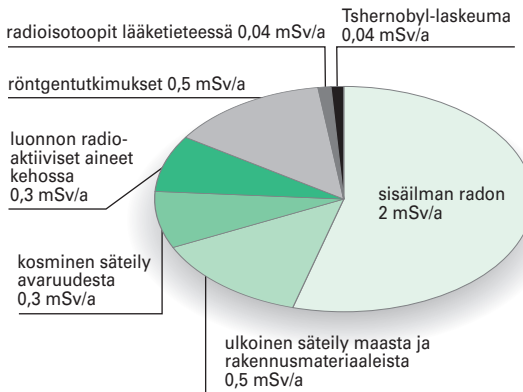
Suomessa henkilöä kohden saatu keskimääräinen efektiivinen annos on 3,7 mSv vuodessa ja on korkeimpia maailmassa (kuva 1.4). Huoneilman radonin osuus tästä on yli puolet. Runsas neljäsosa kertyy muusta luonnonsäteilystä ja vajaa neljäsosa lääketieteellisestä säteilyn käytöstä. Säteilyannos näistä lähteistä vaihtelee suuresti: jotkut saavat alle 1 mSv vuotuisen säteilyannoksen, tuhansilla suomalaisilla vuotuinen säteilyannos ylittää säännöllisesti 10 mSv.

Säteilyn lähde	Efektiiivisen annoksen vuosikeskiarvo (mSv)	Huomautuksia
Luonnonsäteily	2,4	Vaihteluväli tyypillisesti 1–2 mSv paikkakunnasta ja olosuhteista riippuen.
Lääketieteellinen käyttö (diagnostiikka)	0,4	Terveydenhoidon tasosta riippuen 0,04–1,0 mSv
Ydinasekokeet	0,005	Maksimissaan 0,15 mSv vuonna 1963. Pohjoisella pallonpuoliskolla suurempi kuin eteläisellä.
Tshernobylin turma	0,002	Pohjoisella pallonpuoliskolla maksimissaan 0,04 mSv vuonna 1986. Suurempi lähialueilla.
Ydinenergian tuotanto	0,0002	Kasvanut tuotannon myötä, mutta vähenee praktiikan kehittyessä.

TAULUKKO 1.5 Vertailu eri lähteistä saadun efektiiivisen annoksen vuosikeskiarvosta koko maailmassa vuonna 2000 (UNSCEAR 2000)

Suomalaisia ovat altistaneet myös ilmakehässä vuoteen 1962 asti tehdyt ydinasekokeet ja Tshernobylin turma vuonna 1986. Ydinasekokeiden seurauksena kertyvä kokonaisannos juuri ennen kokeiden alkua syntyneelle suomalaiselle koko hänen elinaikanaan on suuruusluokkaa 1 mSv ja Tshernobylin onnettomuudesta kertyvä annos 2 mSv. Koko maapallon väestön kannalta ydinasekokeet olivat kuitenkin paljon merkittävämpi tekijä.

Suomessa ydinenergian käytön aiheuttamat säteilyannokset laitosten ympäristössä ovat erittäin pieniä eivätkä ne siten näy kuvan 1.4 annoskakkussa. Ydinenergian käytöstä saatavat säteilyannokset tulevat vastaisuudessaakin pysymään merkityksettöminä, ellei jollakin Suomen tai lähialueen ydinvoimalaitoksella tapahdu vakavaa reaktorionnettomuutta.



KUVA 1.4 Suomalaisen keskimääräinen säteilyannos eri lähteistä vuonna 2002 oli noin 3,7 mSv.

Olellinen lisä suomalaisten saamaan säteilyannokseen voisi tulla ydinaseen käytöstä rajojemme tuntumassa. Ydinjätteiden käsittelyyn tai varastointiin ei liity suuren säteilyonnettomuuden mahdollisuutta. Suuraktiiviset ydinjätteet Suomessa ja lähialueilla ovat kiinteässä keraamisessa muodossa eikä niiden käsittelyn tai varastoinnin yhteydessä esiinny sellaisia kemiallisia tai fysikaalisia ilmiöitä, jotka aiheuttaisivat suuren radioaktiivisten aineiden päästön vaaran. Ydinjätehuollossa ratkaistavat kysymykset ovatkin aivan erityyppisiä kuin ydinvoimalaitosten kohdalla. Tavoitteena on radioaktiivisten aineiden pysyvä eristäminen biosfääristä siten, että säteilyaltistuksen määrä maapallolla ei lisäänty tulevien vuosisatojen tai -tuhansien kuluessa.

Vaikka luonnon radioaktiivisista aineista emittoituva säteily muodostaakin ihmiskunnan keskimääräisestä säteilyaltistuksesta valtaosan, saattavat esimerkiksi vakavissa reaktorionnettomuuksissa vapautuvat keinotekoiset säteilevät aineet aiheuttaa suurimmat henkilökohtaiset annokset. Muutamana viikkoa sisällä Tshernobylin onnettomuudesta säteilyn aiheuttamiin suoriin seurauksiin kuoli 28 voimalassa tai sen lähi-alueilla ollutta henkilöä. Säteilysairauksia todettiin kaikkiaan 134 henkilöllä.

Säteilyannos luonnon radioaktiivisista aineista

Luonnon säteilylähteitä on kaikkialla ympäristössämme ja ne aiheuttavat säteilyaltistusta jokaiselle maapallon asukkaalle (taulukko 1.6). Altistus voidaan jakaa neljään pääryhmään, joista kosminen ja maaperän radioaktiivisten aineiden säteily sekä ravinnon ja hengitysilman kautta saatujen

Altistuksen aiheuttaja	Efektiivinen annos (mSv)	
	Maailma	Suomi
Kosminen säteily	0,38	0,32
Kosmogeeniset radionuklidit	0,01	0,01
Ulkoinen säteily, ulkona	0,07	0,09
Ulkoinen säteily, sisätiloissa	0,41	0,36
Sisäinen säteily, radon hengityksen kautta	1,25	2
Sisäinen säteily, ⁴⁰ K ravinnosta	0,17	0,2
Sisäinen säteily, U- ja Th-sarjan nuklidit ravinnosta	0,12	0,12
Yhteensä	2,4	3,1

TAULUKKO 1.6 Ionisoivasta luonnonsäteilystä aikuiselle aiheutuva vuotuinen efektiivinen annos koko maapallolla (UNSCEAR 2000) ja Suomessa

radioaktiivisten aineiden säteily muodostavat luonnonsäteilyn taustan. Sisäilman radon ja sen hajoamistuotteet ovat suurin yksittäinen altistuksen lähde. Suomalaiset käyttävät talousvetenä lähinnä omien kaivojen tai vesilaitosten jakamaa vettä. Altistus saadaan sisäisenä säteilyinä: syömällä elintarvikkeita, joiden valmistukseen on käytetty radioaktiivisia aineita sisältävää vettä, juomalla, tai hengittämällä vedestä haihtuvia radioaktiivisia aineita, kuten juuri radonia.

Maailmassa on noin neljä miljoonaa säteilyaltistuksen seurannassa olevaa työntekijää, joista suurin osa työskentelee lääketieteellisen säteilyn käytön parissa. Viidennes on ydinenergian ja loput teollisuuden ja ase-tuotannon työntekijöitä. Noin viiden miljoonan ihmisen arvioidaan työs-sään altistuvan normaalia enemmän luonnon taustasäteilylle. Näistä suurin osa on hiilikavonien työntekijöitä. Altistuksessa on huomattavia eroja louhittavasta aineksestä ja suojelun tasosta riippuen (taulukko 1.7). Louhinnassa vapautunut radonkaasu on säteilyaltistuksen kannalta merkittävin radioaktiivinen aine. Suomessa maanlaisessa kaivostyössä on lähes 400 henkilöä, joiden saama keskimääräinen efektiivinen annos on noin 1 mSv vuodessa.

Praktiikka	Työntekijöiden lukumäärä (miljoonia)	Kollektiivinen efektiivinen annos vuodessa (manSv)	Keskimääräinen efektiivinen annos vuodessa (mSv)
Hiilen louhinta	3,91	2 600	0,7
Muiden mineraalien louhinta	0,76	2 000	2,7
Mineraalien prosessointi	0,3	300	1,0
Maanpäällinen altistus, Rn + tytärnuklidit	1,25	6 000	4,8
Lentohenkilöstö	0,25	800	3,0

TAULUKKO 1.7 Luonnonsäteilylle altistuvien työntekijöiden (uraanikaivoksissa työskentelevät eivät ole mukana) kollektiivinen efektiivinen annos vuodessa ja keskimääräinen efektiivinen annos vuodessa koko maapallolla (UNSCEAR 2000)

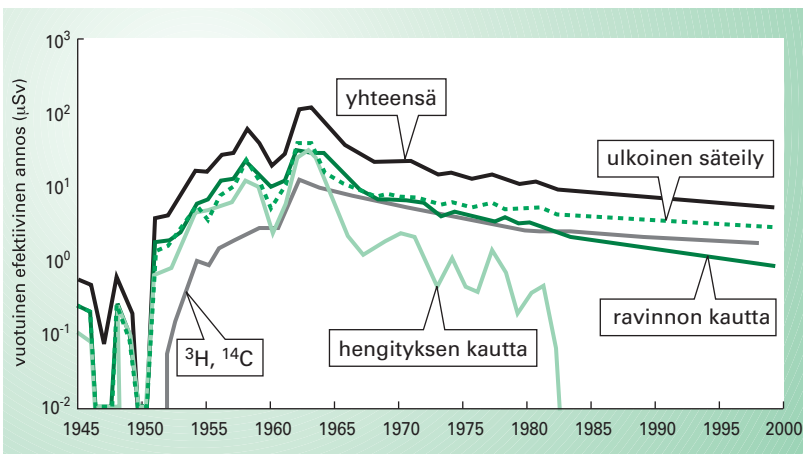
Säteilyannos keino-tekoisista radioaktiivisista aineista

Ilmakehässä varsinkin 1950- ja 1960-luvuilla tehdyt ydinasekokeet ovat olleet merkittäviä globaalin säteilyaltistuksen aiheuttajia, mutta nykyään – lyhytikäisten radionuklidien hajottua – altistus on aiempaa pienempi (kuva 1.5). Keskimääräinen vuotuinen efektiivinen annos koko maapallolla oli suurimmillaan vuonna 1963 (taulukko 1.5); vuonna 1990 annos

oli 0,006 mSv. Ydinasekokeiden aiheuttaman kollektiivisen efektiivisen annoksen sitouman arvioidaan olevan $3 \cdot 10^7$ manSv, josta 86 prosenttia aiheutuu ^{14}C :sta. Ydinasekokeiden lisäksi ydinasetehaista ja ydinmateriaaleja tuottavista sotilaallisista laitoksista on päässyt ympäristöön radioaktiivisia aineita. Niistä arvioidaan aiheutuvan $4 \cdot 10^4$ manSv:n globaali annositouma.

Ydinenergiatuotannon aiheuttama säteilyaltistus koostuu uraanin louhinnasta ja rikastuksesta, polttoaineen valmistuksesta, reaktorien käytöstä, polttoaineen jälleenkäsittelystä ja jätteiden loppusijoituksesta. On arvioitu, että ydinvoiman tuotantoperiodin aikana reaktoreiden toiminnasta on aiheutunut ydinvoimalaitosten ympäristössä 2 900 manSv:n kollektiivinen annos. Vastaava annos jälleenkäsittelystä on 4 700 manSv ja uraanin louhinnasta ja rikastuksesta 900 manSv. Taulukossa 1.3 esitettyjen nuklidien kollektiivisen annositouman 10 000:n vuoden aikana arvioidaan olevan noin 200 000 manSv, josta yli 90 prosenttia aiheutuu ^{14}C :sta.

Ydinenergian tuotannossa toimivien työntekijöiden altistusta seurataan huolellisesti ja toiminta on hyvin dokumentoitua. Suomessa eniten altistuvat ne työntekijät, jotka työskentelevät ydinvoimalaitosten vuosihuolloissa ja korjaustöissä. Suomen ydinvoimalaitoksilla annos seurannassa oli vuonna 2001 kaikkiaan 2 975 työntekijää, joiden keskimääräinen säteilyannos oli 1,5 mSv. Kollektiivinen annos oli 2,3 manSv. Ydinvoiman käytöstä ympäristön asukkaalle aiheutuva laskennallinen säteilyannos on



KUVA 1.5 Ilmakehässä suorittujen ydinasekokeiden aiheuttama keskimääräinen efektiivinen annos vuosittain koko maapallolla ja jaoteltuna altistusreiteittäin (UNSCEAR 2000)

enimmillään ollut 0,004 mSv vuodessa – tuhannesosa luonnon taustasäteilystä saatavasta annoksesta.

Normaalisti toimivista ydinvoimaloista tai muista päästölähteistä ympäristöön vapautuvien keinotekkoisten radioaktiivisten aineiden määrä on pieni. Vakavissa reaktorionnettomuuksissa keinotekkoisten radioaktiivisten aineiden päästö voi kuitenkin olla niin suuri, että säteilystä aiheutuu suoria haittavaikutuksia. Suorien säteilyvaikutusten uhka ei liity pelkästään ydinreaktoreihin vaan kaikkiin laitoksiin, joissa käsitellään suuria määriä radioaktiivisia aineita. Vakavimmat siviilireaktoriensa onnettomuudet ovat tapahtuneet Ukrainassa (Tshernobyl) ja Yhdysvalloissa (Harrisburg, katso kirja 5 luku 6). Tunnetuimmat sotilaalliseen käyttöön liittyvät vakavat onnettomuudet ovat tapahtuneet Britanniassa (Windscale) ja Neuvostoliitossa (Kyshtym) Tsheljabinsk-40 -nimisessä plutoniumin tuotantolaitoksessa.

Ydinreaktorin sisältäviä satelliitteja (Kosmos 954 vuonna 1978) ja ydinparistokäyttöisiä satelliitteja (SNAP-9A vuonna 1964) on palanut ilmakehässä ja ne ovat siten levittäneet radioaktiivisia aineita ilmakehään. Aineiden määrä on ollut kuitenkin paljon pienempi kuin mitä oli Tshernobylin onnettomuudessa. Tunnetuimmat radioaktiivisten aineiden kuljetuksessa tapahtuneet ja ympäristöä saastuttaneet onnettomuudet ovat olleet Espanjassa (Palomares vuonna 1966) ja Grönlannissa (Thule 1968) tapahtuneet lentokoneiden maahansyöksyt, joissa murskautui ydinaseita. Ydinaseiden kuljetusonnettomuuksia on tapahtunut myös merellä. Jäämereen on uponnut ydinkäyttöisiä sukellusvenettä, mutta ne eivät ole aiheuttaneet mitattavia päästöjä ympäristöön. Tokaimuran ydinpolttoainetehtaan kriittisysonnettomuus vuonna 1999 altisti 69 ihmistä säteilylle, joista kolme kuoli suoriin säteilyhaittoihin. Radioaktiivisten aineiden päästöt ympäristöön jäivät kuitenkin vähäisiksi.

Vakavin onnettomuuksista oli Tshernobylin turma. Suurin osa radioaktiivisten aineiden laskeumasta tuli laitoksen lähialueille, mutta aineita kulkeutui merkittäviä määriä myös Pohjoismaihin sekä useisiin Etelä- ja Keski-Euroopan maihin. Radioaktiivisia aineita kulkeutui elintarvikkeisiin ja ihmisiin, ja kesän 1986 kuluessa annettiin elintarvikkeiden käyttöä rajoittavia ohjeita. Monilla alueilla Suomessa radioaktiivisten aineiden jäämiä näkyy yhä kaloissa, sienissä, riistaeläimissä ja metsämarjoissa. Niistä saatava säteilyannos on kuitenkin niin pieni, että elintarvikkeiden käyttöä ei enää tarvitse rajoittaa. Tshernobylin turman aiheuttamasta kokonais säteilyannoksesta puolet on peräisin elintarvikkeista ja puolet ympäristöstä tulevasta ulkoisesta säteilystä. Kolme neljäsosaa

elintarvikkeiden aiheuttamasta säteilyannoksesta kertyy luonnosta saatavista elintarvikkeista. Suomalaisten vuotuisesta 3,7 millisievertin säteilyannoksesta sadasosa aiheutuu Tshernobylin onnettomuudesta.

Tshernobylin turmasta aiheutuva kollektiivisen efektiivisen annoksen sitouma koko maapallon väestölle arvioidaan olevan 600 000 manSv. Teoreettisten laskelmien perusteella koko maailmassa jopa 30 000 ihmistä saattaa kuolla onnettomuuden aiheuttamaan syöpään 80 vuoden aikana. Valko-Venäjällä, Ukrainassa ja Venäjällä arvioidaan 3 000 ihmisen menehtyvän syöpään alueella, joka sai cesiumlaskeumaa yli 37 kBq/m². Tällä alueella asuu yhteensä viisi miljoonaa ihmistä, joten syöpien määrän kasvu ei sielläkään aiheuta piikkiä syöpätilastoihin. Suomessa Tshernobylin onnettomuuden arvioidaan aiheuttavan joitakin satoja syöpäkuolemia 80 vuoden aikana. Saman ajan kuluessa miljoona suomalaista kuolee muista syistä aiheutuneisiin syöpiin.

Tshernobylin turma on kuitenkin lisännyt lasten kilpirauhassyöpää Valko-Venäjällä, Ukrainassa ja Venäjällä. Alle 18-vuotiaana altistuneista 1 800 on sairastunut kilpirauhassyöpään, joista noin kymmenen on menehtynyt tautiin. Lasten kilpirauhassyöpää olisi voitu ehkäistä antamalla lapsille ajoissa joditabletti ja estämällä saastuneen maidon juonti. Säteilyn aiheuttamaa syöpää ei voida erottaa muista syistä aiheutuneesta syövästä. Ainakaan toistaiseksi tilastot eivät osoita muiden turmasta johtuvien syöpätyyppien määrän kasvua säteilylle altistuneessa väestössä.

KIRJALLISUUTTA

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

Brune D, Hellborg R, Persson B, Pääkkönen R (eds.). Radiation at home, outdoors and in the workplace. Scandinavian Science Publisher, 2001.

Cooper J R, Randle K, Sokhi R S. Radioactive releases in the Environment, Impact and Assessment. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2003.

Draganić I, Draganić Z, Adloff J-P. Radiation and Radioactivity on earth and beyond. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1990.

Makhijani A, Hu H, Yih K (eds.). Nuclear wastelands. A global guide to nuclear weapons production and its health and environmental effects. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1995.

Underhill P T. Naturally occurring radioactive material. Delray Beach, Florida: St. Lucie Press 1996.

United Nations Environmental Programme. Radiation - doses, effects and risks. UNEP 1985.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionising radiation. UNSCEAR 2000 report to the general assembly, with scientific annexes. Volume I: sources. New York: United Nations, 2000.

