



8

ULKOINEN SÄTEILY

Juhani Lahtinen, Hannu Arvela,
Roy Pöllänen, Mikael Moring

SISÄLLYSLUETTELO

8.1	Hiukkaskertymänopeus – annoslaskennan perusta	302
8.2	Lisäyskerroin	304
8.3	Säteilylähteiden geometriat ja säteilysuojukset	310
8.4	Laskennalliset menetelmät	319
8.5	Taustasäteily	319
8.6	Radioaktiivisesta pilvestä tuleva säteily	326
8.7	Annosnopeus maaperän radioaktiivisista aineista	327
8.8	Ulkoinen beetasäteily	338
8.9	Ulkoisen säteilyn havainnointi	341

Ulkoinen säteily kohdistuu ihmiseen kehon ulkopuolisista lähteistä. Ihminen on elinympäristössään jatkuvasti alttiina ulkoiselle luonnon taustasäteilylle. Osa siitä syntyy maaperässä ja rakennusmateriaaleissa olevien luonnon radioaktiivisten aineiden hajotessa, osa taas on auringosta ja ulkoavaruudesta peräisin olevaa kosmista säteilyä. Myös ihmisen toiminnan kautta ympäristöön vapautuneet keinotekoiset radioaktiiviset aineet aiheuttavat altistusta ulkoiselle säteilylle.

Ulkoinen säteily voi olla mitä tahansa säteilyn lajia, niin gamma- ja röntgensäteilyä kuin hiukkassäteilyäkin. Beetahiukkaset ja neutronit saattavat aiheuttaa merkittävän altistuksen, kun taas kehon ulkopuolinen alfasäteily ei aiheuta merkittäviä säteilyannoksia. Useimmista radioaktiivisista aineista emittoituva beetasäteily kantaa ilmassa alle 10 metriä ja vedessä tai kudoksessa alle senttimetrin; alfasäteily puolestaan kantaa ilmassa alle 10 senttimetriä ja vedessä tai kudoksessa alle 100 mikrometriä (kirja 1, Säteily ja sen havaitseminen, kuva 1.8). Niinpä kehon ulkopuolinen alfa- ja beetasäteily voikin aiheuttaa annosta vain silloin kun säteilyn lähde sijaitsee kehon välittömässä läheisyydessä. Alfasäteily kykenee aiheuttamaan säteilyannosta käytännössä vain silloin kun radioaktiiviset aineet joutuvat kosketuksiin esimerkiksi ihon kanssa. Silloinkin pääosa alfahiukkasten energiasta absorboituu ihon noin 50 μm paksuun kuolleeseen pintakerrokseen. Alfasäteily jätetäänkin usein ottamatta huomioon arvioitaessa ulkoisesta säteilystä aiheutuvaa annosta. Elektronien energian on puolestaan oltava yli 50 keV, jotta ne voisivat läpäistä ihon kuolleen pintakerroksen.

Tässä luvussa keskitytään lähinnä gammasäteilyn ja lyhyesti myös beetasäteilyn aiheuttaman annosnopeuden laskentaperiaatteiden ja -menetelmien esittämiseen erilaisissa geometrioissa ja säteilytilanteissa. Säteilytys ja kerma voidaan tarvittaessa laskea annosnopeudesta muuntokertoimien avulla. Annosnopeustarkasteluiden lisäksi kerrotaan luonnon taustasäteilystä sekä ulkoisen säteilyn valvontajärjestelyistä Suomessa. Annosnopeuslaskennan tarkastelu antaa perustietoa myös säteilysuojauslaskennalle.

8.1 | Hiukkaskertymänopeus – annoslaskennan perusta

Gammasäteily on sähkömagneettista säteilyä, joka hiukkassäteilystä poiketen voi kulkea väliaineessa pitkiä matkoja; esimerkiksi 1–2 MeV gammasäteet (fotonit) voivat edetä ilmassa keskimäärin satoja metrejä ennen kuin ne kokevat vuorovaikutuksen väliaineen atomien kanssa. Vuorovai-

kutuksista tärkeimmät ovat fotosähköilmiö, Comptonin sironta ja parin syntyminen (katso kirja 1, luku 1).

Osa väliaineessa – vaikkapa säteilysuojuksessa (kuva 8.1) – etenevistä fotoneista kokee vuorovaikutuksen väliaineen kanssa ja siten menettää energiaa, siroaa tai mahdollisesti absorboituu kokonaan. Siroamattomien samaenergisten (monoenergisten) ja samansuuntaisten primaarifotonien kertymänopeus on

$$\varphi_u = \varphi_0 e^{-\mu x} \quad (8.1)$$

missä φ_0 on hiukkaskertymänopeus ennen väliainekerrosta, μ väliainemateriaalin matkavaimennuskerroin ja x fotonien väliaineessa kulkema matka. Väliaineen paksuuden kasvaessa jatkuvasti pienenevä osa primaarifotoneista pääsee väliaineesta läpi. Liitteessä 7 on vaimennuskerrotoimia eräissä väliaineissa. Gammasäteilyn tapauksessa hiukkaskertymänopeutta kutsutaan tässä luvussa myös fotonikertymänopeudeksi.

Absorptioannosnopeus \dot{D} (Gy/h) ilmassa saadaan muuntamalla fotonikertymänopeus ensin energiakertymänopeudeksi ja kertomalla tämä energia-absorption massakerroimella.

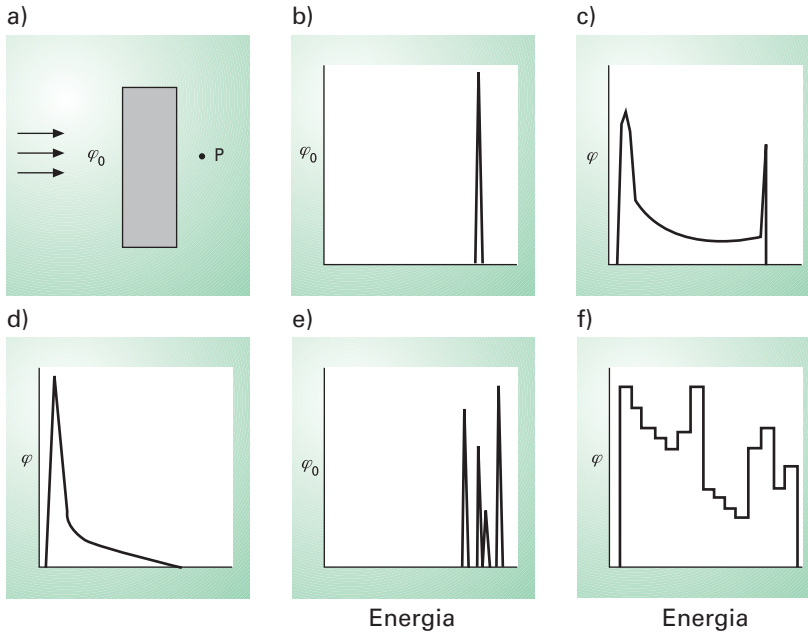
$$\dot{D} = 5,77 \cdot 10^{-7} \varphi E (\mu_{\text{en}}/\rho), \quad (8.2)$$

missä fotonikertymänopeus on φ (fotonia/(cm² s)), fotonien energia E (MeV) ja ilman energia-absorption massakerroin μ_{en}/ρ (cm²/g).

Yhtälö 8.2 on annosnopeuden laskennan perusyhtälö, jonka avulla voidaan laskea monoenergisen gammasäteilyn absorptioannosnopeus. Esimerkiksi kuvan 8.1a tapauksessa sijoittamalla yhtälöön 8.2 $\varphi = \varphi_0$ tai $\varphi = \varphi_u$ saadaan laskettua primaarifotonien aiheuttama annosnopeus ennen suojusta ja suojuksen jälkeen.

Absorboitunut annos on verrannollinen kyseisen aineen energia-absorption massakerroimeen (kirja 1 luku 1.5). Absorptioannosnopeus muissa aineissa kuin ilmassa voidaan siten laskea kertomalla absorptioannosnopeus ilmassa kyseisen aineen ja ilman energia-absorption massakerroimien suhteella. Liitteessä 8 on energia-absorption massakerroimia eräissä väliaineissa.

Jos lähteen synnyttämän säteilykentän fotoneilla on useita eri energioita (kuva 8.1e), saa yhtälö 8.2 muodon



KUVA 8.1 Suojuksen vaikutus gammasäteilykenttään

- a) Yksinkertainen tilanne, jossa monoenergiseltä ja yhdensuuntaiselta säteilyltä suojaudutaan levysuojuksen avulla.
- b) Alkuperäinen hiukkaskertymänopeuden φ_0 energijakauma.
- c) Fotonien kertymänopeus pisteessä P suojuksen takana. Siroamattomien primaarifotonien kertymänopeus on pienentynyt ja lisäksi säteilykentässä on sironneita pienempienergiisiä fotoneita.
- d) Kun suojuks on kyllin paksu, jää käytännössä jäljelle vain sironneita fotoneita.
- e) Säteilylähteestä emittoituu useita primaarienergialtaan erilaisia fotoneita.
- f) Säteilykentän laskennallinen arvio.

$$\dot{D} = 5,77 \cdot 10^{-7} \sum_i \varphi_i E_i (\mu_{en} / \rho)_i, \quad (8.3)$$

jossa φ_i ja $(\mu_{en} / \rho)_i$ ovat energiaa E_i vastaavat fotonikertymänopeuden ja energia-absorption massakertoimen arvot. Kun – yleisessä tapauksessa – on käytettävissä arvio kertymänopeuden energijakaumasta $\varphi(E)$ (kuva 8.1f), annosnopeus on

$$\dot{D} = 5,77 \cdot 10^{-7} \int_0^{E_0} \varphi(E) E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)(E) dE \quad (8.4)$$

8.2 | Lisäyskerroin

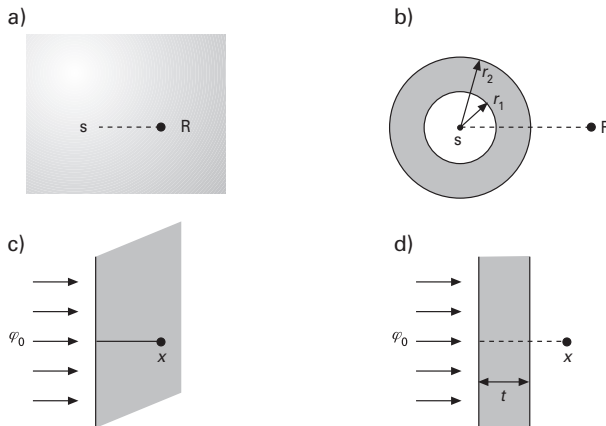
Ainoastaan siroamattomien primaarifotonien absorptio väliaineessa noudattaa yhtälöä 8.1. Vaikka jokainen vuorovaikutustapahtuma poistaa yh-

den primaarifotonin, syntyy tilalle uusia sekundaarifotoneita: karakteristisen röntgensäteilyn, Comptonin ilmiön tai parinmuodostukseen liittyvän häviämisseiteilyn kvantteja. Säteilytyksen kohteen saavuttavien fotonien lukumäärä ja niiden energiavuon tiheys ovat siten aina suuremmat kuin eksponentiaalisen vaimennuslain mukaan arvioituna.

Sekundaarifotonien vaikutus otetaan huomioon käyttämällä lisäyskerointa (B), joka määritellään seuraavasti:

$$B = \frac{\text{kaikkien kohteen saavuttavien fotonien aiheuttama annosnopeus}}{\text{siroamattomien primaarifotonien aiheuttama annosnopeus}}$$

Lisäyskertoimen arvo riippuu väliaineesta ja fotonien siinä kulkemasta matkasta, lähde-energiasta (E_0) sekä säteilytysgeometriasta (kuva 8.2). Primaarisäteilyn väliaineessa kulkema matka ilmoitetaan usein törmäysväleinä $\mu(E_0)R$ tai $\mu_0 R$, missä $\mu(E_0)$ tai μ_0 on siroamattomien primaarifotonien matkavaimennuskertoimen ja R on väliaineessa kuljettu matka. Törmäysväli kuvaa keskimääräistä matkaa, joka fotonilta vaaditaan vuorovaikutuksen kokemiseen.



KUVA 8.2 Yksinkertaistettuja säteilytilanteita ja lisäyskertoimen arviointi

- Isotrooppinen pistemäinen säteilylähde s äärettömässä väliaineessa.
- Esimerkki tilanteesta, jossa käytetään isotrooppiselle pistelähteelle laskettua lisäyskerointa. Lähteen ympärillä on pallomainen kuori. Siroamattomien fotonien kertymänopeus lasketaan etäisyydellä R ja lisäyskerroin välimatkalle $t = r_2 - r_1$. Äärettömälle väliaineelle laskettu lisäyskerroin yliarvioi tässä tapauksessa annosnopeutta, koska r_2 :n ulkopuolella ei ole raskasta väliainetta sirottamassa säteilyä takaisin.
- Yksisuuntainen fotonisuihku. Lisäyskerroin lasketaan väliaineessa etäisyydellä x tasomaisesta pinnasta.
- Käytännön tilanne, jossa annosnopeus lasketaan etäisyydellä x fotonisuihkuille lasketun lisäyskerroimen avulla. Lisäyskerroin lasketaan suojukselle, jonka paksuus on t .

Lisäyskerroin voidaan määritellä monille suureille, kuten hiukkaskertymänopeudelle, energia-absorptiolle, absorptioannosnopeudelle ja säteilytysnopeudelle. Lisäyskerroin esimerkiksi absorptioannosnopeudelle ilmassa määritellään

$$B = \int E \varphi(E) \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}(E) dE / \int E \varphi_u(E) \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}(E) dE, \quad (8.5)$$

missä μ_{en}/ρ on ilman energia-absorptio massakerroin. Lisäyskerroimen laskeminen edellyttää tietoa kertymänopeuden energijakaumasta $\varphi(E)$, joka taas on laskettava jollakin tarkalla menetelmällä. Kirjallisuudesta löytää yleensä vain muutamia yksinkertaisia säteilytilanteita varten laskettuja tarkkoja arvoja lisäyskerroimelle (kuva 8.2).

Kun lisäyskerroin B tunnetaan, annosnopeus ilmassa saadaan yhtälöstä

$$\dot{D} = 5,77 \cdot 10^{-7} B \varphi_u E (\mu_{\text{en}}/\rho). \quad (8.6)$$

Yleisessä tapauksessa primaarifotonit ovat monienergisiiä. Kertymänopeus joudutaan laskemaan summaamalla kaikkien fotonien vaikutus. Primaarigammaenergiaa vastaava lisäystekijä kannattaa ottaa mukaan jo tässä laskentavaiheessa. Näin saatava sironnan huomioon ottava kertymänopeus φ_b korvaa yhtälön (8.6) tekijät B ja φ_u (katso yhtälö 8.26).

Lisäyskerrointaulukot ja yhtälösovitykset

Tunnetuimpia alkuperäisiä lisäyskerrointaulukoita ovat Goldsteinin ja Wilkinsin vuonna 1954 julkaisemat taulukot. Niissä on annettu yhdeksää välille 0,255–10 MeV sijoittuvaa primaarienergiaa vastaavat energian, energia-absorptio ja säteilytyksen lisäyskerroimet, kun väliaineena on vesi ja kuusi alkuainetta ($Z = 13\text{--}92$). Ero eri suureille lasketujen kertoimien välillä ei ole käytännön työssä merkittävä. Laskenta-geometria on käytetty isotrooppista pistemäistä säteilylähdettä ja yhdensuuntaista fotonisuihkua. Pistelähteelle laskettu lisäyskerroin on aina suurempi kuin yhdensuuntaiselle fotonisuihkulle laskettu lisäyskerroin. Taulukoissa 8.1 ja 8.2 on esitetty annosnopeuden lisäyskerroimia vedessä ja lyijyssä.

Viimeisen kolmenkymmenen vuoden aikana – suureksi osaksi tietokoneiden kehityksen myötä – on lisäyskerroimia päästy arvioimaan tapauskohtaisesti erilaisilla tarkoilla laskentamenetelmillä (luku 8.4).

Väli- aine	Energia (MeV)	1	2	$\frac{\mu_0 R}{4}$	7	10	15	20
Vesi	0,255	3,09	7,14	23,0	72,9	166,0	456,0	982,0
	0,5	2,52	5,14	14,3	38,8	77,6	178,0	334,0
	1,0	2,13	3,71	7,68	16,2	27,1	50,4	82,2
	2,0	1,83	2,77	4,88	8,46	12,4	19,5	27,7
	3,0	1,69	2,42	3,91	6,23	8,63	12,8	17,0
	4,0	1,58	2,17	3,34	5,13	6,94	9,97	12,9
	6,0	1,46	1,91	2,76	3,99	5,18	7,09	8,85
	8,0	1,38	1,74	2,40	3,34	4,25	5,66	6,95
	10,0	1,33	1,63	2,19	2,97	3,72	4,90	5,98
	Lyijy	0,5	1,24	1,42	1,69	2,00	2,27	2,65
1,0		1,37	1,69	2,26	3,02	3,74	4,81	5,86
2,0		1,39	1,76	2,51	3,66	4,84	6,87	9,00
3,0		1,34	1,68	2,43	3,75	5,30	8,44	12,3
4,0		1,27	1,56	2,25	3,61	5,44	9,80	16,3
5,1		1,21	1,46	2,08	3,44	5,55	11,7	23,6
6,0		1,18	1,40	1,97	3,34	5,69	13,8	32,7
8,0		1,14	1,30	1,74	2,89	5,07	14,1	44,6
10,0		1,11	1,23	1,58	2,52	4,34	12,5	39,2

TAULUKKO 8.1 Annosnopeuden lisäyskerroin isotrooppiselle pistemäiselle säteilylähteelle äärettömän laajassa väliaineessa (Goldstein H. Fundamental aspects of reactor shielding. Addison-Wesley, 1959)

Väli- aine	Energia (MeV)	1	2	$\frac{\mu_0 R}{4}$	7	10	15
Vesi	0,5	2,63	4,29	9,05	20,0	35,9	74,9
	1,0	2,26	3,39	6,27	11,5	18,0	30,8
	2,0	1,84	2,63	4,28	6,96	9,87	14,4
	3,0	1,69	2,31	3,57	5,51	7,48	10,8
	4,0	1,58	2,10	3,12	4,63	6,19	8,54
	6,0	1,45	1,86	2,63	3,76	4,86	6,78
	8,0	1,36	1,69	2,30	3,16	4,00	5,47
	Lyijy	0,5	1,24	1,39	1,63	1,87	2,08
1,0		1,38	1,68	2,18	2,80	3,40	4,20
2,0		1,40	1,76	2,41	3,36	4,35	5,94
3,0		1,36	1,71	2,42	3,55	4,82	7,18
4,0		1,28	1,56	2,18	3,29	4,69	7,70
6,0		1,19	1,40	1,87	2,97	4,69	9,53
8,0		1,14	1,30	1,69	2,61	4,18	9,08
10,0		1,11	1,24	1,54	2,27	3,54	7,70

TAULUKKO 8.2 Annosnopeuden lisäyskerroin yhdensuuntaiselle fotonisuihkulle äärettömän laajassa väliaineessa (Goldstein H. Fundamental aspects of reactor shielding. Addison-Wesley, 1959)

Lisäykertoimen arvojen interpolointi kerrointaulukkoista on työlästä, joten ajan myötä on kehitetty erilaisiin käyräsovituksiin perustuvia approksimaatioita. Näistä tunnetuimpia on esitetty kaavoissa 8.7–8.10.

Bergerin muoto:

$$B(E, \mu_0 r) = 1 + a(E) \mu_0 r e^{b(E) \mu_0 r}. \quad (8.7)$$

Yleistetty Taylorin muoto:

$$B(E, \mu_0 r) = \sum_{n=1}^N A_n(E) e^{-a_n(E) \mu_0 r}. \quad (8.8)$$

Polynomiapproksimaatio:

$$B(E, \mu_0 r) = \sum_{n=0}^N A_n(E) (\mu_0 r)^n. \quad (8.9)$$

Geometris-progressiivinen menetelmä:

$$B(E, \mu_0 r) = 1 + \frac{C-1}{K-1} (K^{\mu_0 r} - 1), \quad K \neq 1 \quad (8.10a)$$

$$B(E, \mu_0 r) = 1 + (C-1) \mu_0 r, \quad K = 1. \quad (8.10b)$$

Edellä μ_0 on matkavaimennuskerroin ja r säteilyn väliaineessa kulkema matka. a , b , A_n , a_n , C ja K ovat primaarisäteilyn energiasta E ja väliaineesta riippuvia vakioita (tai lausekkeita, kuten geometris-progressiivisen menetelmän parametri K , joka riippuu myös väliaineesta kuljetusta matkasta). Kirjallisuudesta löytyy edellä esitettyjen lisäksi muitakin approksimaatioita.

Sopivilla yksinkertaisilla parametrivalinnoilla Bergerin yhtälömuodosta saadaan lineaarinen malli (8.11) ja yleistetystä Taylorin muodosta taas niin sanottu Taylorin malli (8.12)

$$B(E, \mu_0 r) \cong 1 + \alpha(E) \mu_0 r, \quad (8.11)$$

$$B(E, \mu_0 r) \cong A(E) e^{-\alpha_1(E) \mu_0 r} - [1 - A(E)] e^{-\alpha_2(E) \mu_0 r}. \quad (8.12)$$

Lineaarisen mallin tarkkuus on hyvä vain rajalliselle väliaineen paksuudelle, jonka ulkopuolella virhe voi olla useita kymmeniä prosentteja. Taulukossa 8.3 on ilmoitettu pistelähteen lineaarisen lisäystekijämallin kerroimen α arvoja eri väliaineille ja energioille.

Taylorin mallin (8.12) vakioita A , α_1 ja α_2 on taulukoitu eri väliaineita varten liitteessä 9. Kun gammaenergia $E > 1$ MeV, mallin mukaan laskettu lisäyskerroin on viiden prosentin tarkkuudella sama kuin alkupe-
räinen yhtälön sovituksessa käytetty lisäyskerroin. Lyijyn tapauksessa tarkkuus on parempi kuin 1,8 prosenttia. Taylorin mallin tapa esittää lisäyskerroin eksponentiaalitermien summana on käytännöllinen. Sen avulla lisäyskerroimen vaikutus voidaan usein ottaa huomioon seuraavasti: siroamattomien fotonien kertymänopeudelle laskettu yhtälö korvataan kahdella termillä, joista toiseen matkavaimennuskertoimen μ tilalle sijoitetaan tekijä $\mu(1 + \alpha_1)$ ja toiseen taas $\mu(1 + \alpha_2)$. Näin saadut termit painotetaan kertoimilla A ja $(1 - A)$ ja lasketaan yhteen uudeksi yhtälöksi.

Kolmas paljon käytetty approksimaatio on Bergerin yhtälö (8.7), jolla saavutetaan hyvä tarkkuus laajalla törmäysvälialueella. Kirjallisuudesta löytyy parametrien arvoja myös pienille lähde-energioille (liite 10).

Vaikka edellä ei ole sitä korostettukaan, myös ilmassa tapahtuu siroamista, joskin ilman pienen tiheyden vuoksi varsin vähän. Tarkasteltaessa annosnopeutta kaukana lähteestä (useampia kymmeniä metrejä) on sironta ilmassa ja siitä johtuva annosnopeuden lisäys syytä ottaa huomioon.

Energia (MeV)	Väliaine					
	Vesi	Betoni	Alumiini	Teräs	Tina	Lyijy
7 vapaan matkan sovitus						
0,5	4,680	3,744	2,646	1,428	0,5153	0,1549
1,0	1,995	1,906	1,609	1,237	0,7199	0,2990
2,0	1,030	1,023	0,9686	0,8556	0,6731	0,3796
3,0	0,7397	0,7303	0,7197	0,6691	0,5837	0,3810
4,0	0,5884	0,5736	0,5663	0,5403	0,5146	0,3523
6,0	0,4321	0,4329	0,4334	0,4297	0,4153	0,3034
8,0	0,3406	0,3376	0,3476	0,3391	0,3317	0,2419
10,0	0,2877	0,2923	0,2847	0,2681	0,2550	0,1933
20 vapaan matkan sovitus						
0,5	13,093	5,012	5,737	2,377	0,5090	0,1043
1,0	3,479	2,992	2,539	1,864	0,8495	0,2549
2,0	1,255	1,233	1,193	1,119	0,8521	0,3947
3,0	0,7863	0,7857	0,8061	0,8446	0,8509	0,5123
4,0	0,5951	0,5942	0,6075	0,6942	0,8643	0,6378
6,0	0,4030	0,4145	0,4626	0,6134	1,079	1,1250
8,0	0,3085	0,3200	0,3697	0,5245	1,191	1,417
10,0	0,2584	0,2737	0,3087	0,4759	1,108	1,237

TAULUKKO 8.3 Lineaarisen lisäystekijämallin parametri α isotrooppiselle pistelähteelle (Goldstein H. Fundamental aspects of reactor shielding. Addison-Wesley, 1959)

8.3 Säteilylähteiden geometriat ja säteilysuojukset

Säteilylähteen tärkeimmät ominaisuudet ovat sen voimakkuus ja geometria. Voimakkuuteen vaikuttaa lähteen emittoiman säteilyn laji, energia ja fotonituottonopeus. Erilaisille geometrioille ominaisia fotonituottonopeuksia merkitään jatkossa seuraavasti:

<i>Geometria</i>	<i>Fotonituottonopeus</i>
pistelähde	S ftonia s^{-1}
viivalähde	S_L ftonia $cm^{-1} s^{-1}$
pintalähde	S_A ftonia $cm^{-2} s^{-1}$
tilavuuslähde	S_V ftonia $cm^{-3} s^{-1}$

Tässä luvussa tarkastellaan annosnopeuksien laskemista eri geometrioissa (kuva 8.3). Myös yksinkertaisten säteilysuojusten vaikutuksen huomioon ottaminen esitetään soveltuvin osin. Radioaktiivisia aineita sisältävän pilven aiheuttamaa annosnopeutta on käsitellään luvussa 8.6 ja laskeuman aiheuttamaa taas luvussa 8.7.

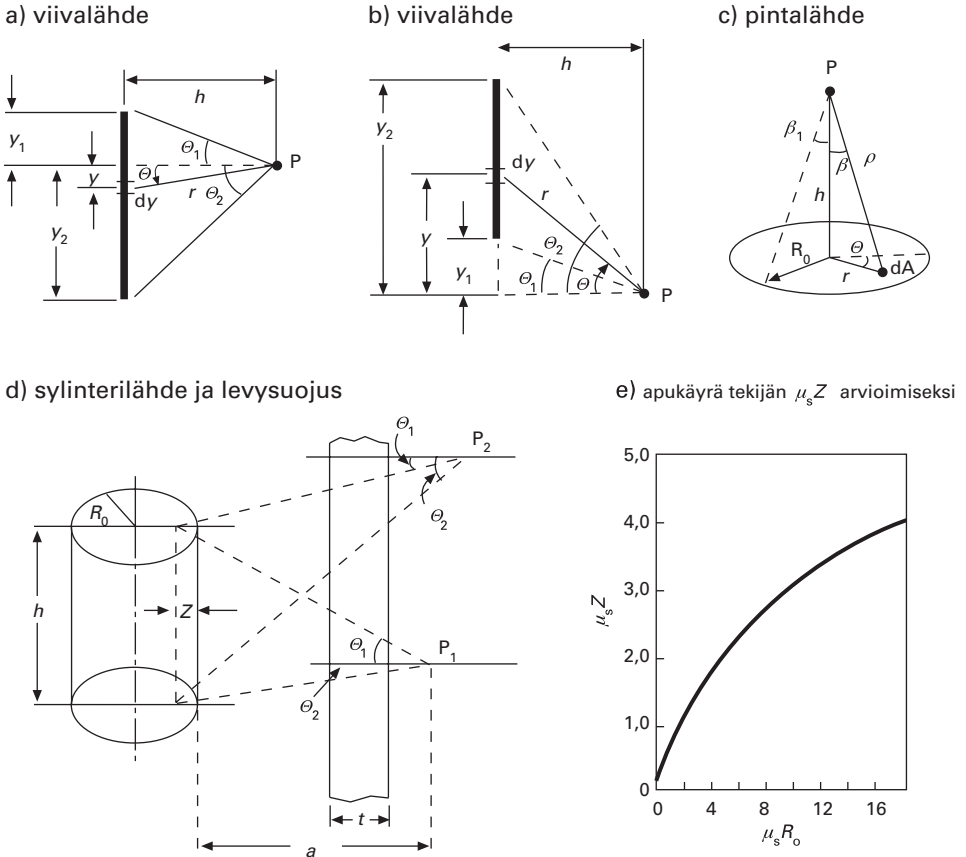
Tietyn gammasiirtymän aiheuttama fotonituottonopeus saadaan kertomalla lähteen aktiivisuus A kyseisen gammaenergian emissiotodennäköisyydellä $p_\gamma(E)$:

$$S = p_\gamma(E)A \quad (8.13)$$

Tekijä $p_\gamma(E)$ ilmaisee, kuinka monta kyseistä gammakvanttia keskimäärin syntyy yhtä radioaktiivista hajoamista kohti. Hajoamisen yhteydessä voi syntyä useita energialtaan erilaisia fotoneja, joilla kaikilla on oma emissiotodennäköisyytensä. Käytännön annoslaskuissa yleensä riittää merkittävimpien gammasiirtymien tarkastelu.

Pistemäinen säteilylähde

Jos säteilylähteen koko on pieni verrattuna lähteen ja laskentapisteen välimatkaan, lähde voidaan käsitellä pistemäisenä. Pistemäisellä lähteellä ei ole ulottuvuutta eikä siinä siten tapahdu myöskään absorptiota. Nyrkkisääntönä pistelähdeapproksimaation käyttö on perusteltua silloin, kun lähteen ja tarkastelupisteen välinen etäisyys on kymmenkertainen lähteen suurimpaan dimensioon nähden.



KUVA 8.3 Erilaisia lähdegeometrioita

- a) ja b) erilaisia viivalähdegeometrioita
- c) pintalähde (tasolähde)
- d) sylinterilähde ja levysuojus
- e) apukäyrä sylinterin aiheuttaman absorptioannosnopeuden laskemiseksi (kun $a/R_0 > 10$).
Matkavaimennuskerroin sylinterimateriaalissa on μ_6 .

Pistelähdetarkastelussa lähteen ympärille etäisyydelle R voidaan kuvitella pallomainen pinta. Fotonituottonopeus S on sama kuin pallon pinnan lävistävien fotonien lukumäärä sekunnissa edellyttäen, että säteily ei absorboitu eikä siroa lähteessä tai matkalla R . Fotonikertymänopeus etäisyydellä R on siten

$$\varphi(R) = \frac{S}{4\pi R^2}. \tag{8.14}$$

Kun otetaan huomioon absorptio lähteen ja tarkastelupisteen välillä sijaitsevassa väliainekerroksessa (paksuus t), siroamattomien primaarifotonien kertymänopeudelle pätee yhtälö

$$\varphi_u(R) = \frac{S}{4\pi R^2} e^{-\mu}. \quad (8.15)$$

Lisäykertoimen avulla annosnopeudelle saadaan seuraava yleinen yhtälö (jossa R on ilmoitettu senttimetreinä):

$$\dot{D} = 5,77 \cdot 10^{-7} \frac{S}{4\pi R^2} B E \frac{\mu_{en}}{\rho} e^{-\mu}. \quad (8.16)$$

Säteilytysnopeusvakio ja kermanopeusvakio

Gammasäteilylähteet emittoivat tavallisesti useita energialtaan erilaisia gammakvantteja. Nämä kaikki on huomioitava annosnopeutta laskettaessa. Säteilysuojelulaskujen helpottamiseksi on kirjallisuudessa laskettu valmiiksi eri radionuklidien niin sanotut säteilytysnopeusvakiot Γ . Ne ilmoittavat säteilytysnopeuden yhden metrin etäisyydellä suojaamattomasta pistelähteestä, jonka aktiivisuus on 1 Bq ja jonka emittoima säteily ei absorboiduu tai siroa matkalla tarkastelukohteeseen. Kermanopeusvakio Γ_δ puolestaan ilmoittaa vastaavan kermanopeuden ilmassa. Laskettaessa absorptioannosnopeutta ilmassa voidaan hyvällä tarkkuudella käyttää kermanopeusvakioita. Liitteessä 11 on säteilytysnopeus- ja kermanopeusvakioiden arvoja eräille radionuklideille.

Lähteen, jonka aktiivisuus on A , aiheuttama kermanopeus ilmassa etäisyydellä R on

$$\dot{K} = \frac{A\Gamma_\delta}{R^2} \quad (8.17)$$

missä Γ_δ on kyseisen nuklidin kermanopeusvakio.

ESIMERKKI 8.1

Mikä on absorptioannosnopeus ilmassa yhden metrin päässä ^{60}Co -lähteestä, jonka aktiivisuus on 1 GBq (10^9 Bq)?

^{60}Co emittoi yhtä radioaktiivista hajoamista kohti kaksi gammakvanttia, joiden energiat E_1 ja E_2 ovat 1,17 MeV ja 1,33 MeV. Energia-absorptio massakertoimet ilmassa (liite 8, lineaarinen interpolointi) näillä energioilla ovat $(\mu_{en}/\rho)_1 = 0,0271 \text{ cm}^2/\text{g}$ ja $(\mu_{en}/\rho)_2 = 0,0263 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Yhtälön (8.14) perusteella kertymänopeudeksi saadaan

$$\varphi_{1,2} = \frac{10^9}{4\pi(100)^2} \frac{1}{\text{cm}^2\text{s}} = 7\,960 \frac{1}{\text{cm}^2\text{s}}$$

ja annosnopeudeksi yhtälöstä (8.3)

$$\dot{D} = 5,77 \cdot 10^{-7} \cdot (7\,960 \cdot 1,17 \cdot 0,0271 + 7\,960 \cdot 1,33 \cdot 0,0263) \text{ Gy/h}$$

eli

$$\dot{D} = (0,146 + 0,161) \text{ mGy/h} = 0,31 \text{ mGy/h}$$

Kermanopeusvakion avulla (liite 11) saadaan tietysti sama tulos.

ESIMERKKI 8.2

Kuinka suuri on edellisen esimerkin absorptioannosnopeus, kun lähde ympäröidään 5 cm paksulla lyijysuojalla?

^{60}Co :n energioita 1,17 MeV ja 1,33 MeV vastaavat matkavaimennuskerrointen arvot lyijyssä ovat 0,730 ja 0,662 1/cm (liite 7). Lyijysuojuksen paksuus 5 cm vastaa siten 3,65 ja 3,31 törmäysväliä ($\mu_0 t$). Liitteestä 9 saadaan lineaarisella interpoloinnilla Taylorin mallin parametrit A , α_1 ja α_2 , minkä jälkeen lisäskertoimet voidaan laskea kaavasta (8.12).

Energia (MeV)	A	α_1	α_2
1,17	3,40	-0,0350	0,1194
1,33	3,79	-0,0350	0,1048

$$B_1 = 3,40 e^{0,035 \cdot 3,65} + (1 - 3,40) e^{-0,1194 \cdot 3,65} = 2,31$$

$$B_2 = 3,79 e^{0,035 \cdot 3,31} + (1 - 3,79) e^{-0,1048 \cdot 3,31} = 2,28$$

Käyttämällä hyväksi edellisessä esimerkissä laskettuja siroamattomien fotonien kertymänopeuksia ja ottamalla huomioon lyijyssä tapahtuva vaimeneminen $\exp(-\mu_0 t)$ saadaan kysytyksi annosnopeudeksi

$$\dot{D} = (0,146 e^{-3,65} \cdot 2,31 + 0,161 e^{-3,31} \cdot 2,12) \text{ mGy/h} = 0,021 \text{ mGy/h.}$$

Esimerkkitapauksessa 5 cm:n lyijykerros vaimentaa säteilyä tekijällä 0,07.

Viivamainen säteilylähde

Viivalähteen (kuvat 8.3a ja 8.3b; fotonituottonopeus S_L) pituusalkion dy aiheuttama fotonikertymänopeus etäisyydellä r on

$$d\varphi = \frac{S_L dy}{4\pi r^2}. \quad (8.18)$$

Sijoituksilla $r = h/\cos \Theta$, $y = h \tan \Theta$ ja $dy = h \cos^{-2} \Theta d\Theta$ saadaan äärellisen viivalähteen synnyttämäksi fotonikertymänopeudeksi

$$\varphi = \frac{S_L}{4\pi} \int_{|\Theta_1|}^{|\Theta_2|} \frac{h \cos^2 \Theta}{h^2 \cos^2 \Theta} d\Theta. \quad (8.19)$$

Integraalin sisällä osoittajan ja nimittäjän tekijät $\cos^2 \Theta$ kumoavat toisensa, joten äärelliselle viivalähteelle saadaan yhtälöt

$$\varphi = \frac{S_L}{4\pi h} (|\Theta_2| \pm |\Theta_1|) \quad (8.20)$$

tai

$$\varphi = \frac{S_L}{4\pi h} \left[\tan^{-1} \left(\frac{y_2}{h} \right) \pm \tan^{-1} \left(\frac{y_1}{h} \right) \right]. \quad (8.21)$$

Plusmerkkiä on käytettävä kuvan 8.3a tilanteessa ja miinusmerkkiä kuvan 8.3b tapauksessa. Äärettömälle viivalähteelle ($\Theta_{1,2} = \pi/2$) taas pätee

$$\varphi = \frac{S_L}{4h}. \quad (8.22)$$

Viivalähteestä aiheutuva annosnopeus kermanopeusvakion avulla lausuttuna on

$$\dot{D} = \frac{\Gamma_\delta S_L}{h} (|\Theta_2| \pm |\Theta_1|). \quad (8.23)$$

Mikäli lähteen ja tarkastelupisteen välillä on vaimentavaa väliainetta, on kaavaan 8.18 lisättävä termi $\exp(-\mu t/\cos \Theta)$, jossa t on vaimentavan kerroksen paksuus. Fotonikertymänopeudelle saadaan silloin

$$\varphi = \frac{S_L}{4\pi h} \left[F(|\Theta_2|, \mu t) \pm F(|\Theta_1|, \mu t) \right], \quad (8.24)$$

jossa merkintä $F(\Theta, \mu t)$ tarkoittaa Sievertin integraalia (liite 12). Symmetriselle viivalähteelle ($\Theta_1 = \Theta_2 = \Theta$) seuraa (8.24):stä

$$\varphi = \frac{S_L}{2\pi h} F(\Theta, b), \quad (8.25)$$

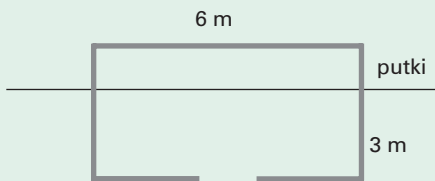
missä $b = \mu t$ ja t on kohtisuora etäisyys viivalähteestä. Absorptioannosnopeutta laskettaessa on otettava huomioon vaimentavan materiaalin lisäyskerroin. Taylorin mallia kuvaavan yhtälön 8.12 yhteydessä annetun ohjeen perusteella siroamattomien fotonien ja lisäyskerroimen tulo voidaan esittää symmetriselle viivalähteelle muodossa

$$\varphi_b = \frac{S_L}{2\pi h} [AF(\Theta, b_1) + (1-A)F(\Theta, b_2)], \quad (8.26)$$

missä $b_i = \mu(1 + \alpha_i)t$ ($i = 1, 2$). Annosnopeus saadaan kaavasta 8.6 sijoittamalla tekijän $B\varphi_u$ tilalle φ_b .

ESIMERKKI 8.3

Huoneen poikki kulkee putki, jossa virtaa radioaktiivista ainetta sisältävää jäähdytysvettä. Huoneen mitat käyvät ilmi oheisesta kuvasta. Mikä on veden sisältämän ^{24}Na :n aiheuttama annosnopeus huoneen ovelta, kun aktiivisuus putkessa on 100 MBq/m ?



^{24}Na :n kermanopeusvakio (liite 11) on $4,35 \cdot 10^{-7} \text{ (Gy/h)(m}^2/\text{MBq)}$. Sitä käyttäen saadaan yhtälöstä (8.23)

$$\dot{D} = \frac{4,35 \cdot 10^{-7} \cdot 100}{3} \cdot (\pi/4 + \pi/4) \text{ Gy/h} = 0,023 \text{ mGy/h.}$$

Tasomainen säteilylähde

Mikäli radioaktiiviset aineet ovat jakautuneet tasaisesti tasopinnalle, on kyseessä niin sanottu pintalähde (tasolähde). Tarkastellaan ympyrämäistä tasopintaa (kuva 8.3c), jonka fotonituottonopeus on S_A . Differentiaalinen fotonikertymänopeus pisteessä P pintaa vastaan kohtisuoralla akselilla on

$$d\varphi = \frac{S_A dA}{4\pi \rho^2}, \quad (8.27)$$

jossa $dA = r dr d\theta$ ja $\rho^2 = h^2 + r^2$. Integroimalla (8.27) saadaan fotonikertymänopeudeksi

$$\varphi = \frac{S_A}{4} \ln \left(\frac{R_0 + h^2}{h^2} \right). \quad (8.28)$$

Jos pinnan ja pisteen P välillä on absorboiva väliainekerros, jonka matkavaiennuskerroin on μ ja paksuus t , differentiaaliseen kertymänopeuteen on lisättävä kerroin $\exp(-\mu t / \cos \beta)$. Tällöin fotonikertymänopeus akselilla on

$$\varphi = \frac{S_A}{2} \left[E_1(\mu t) - E_1(\mu t / \cos \beta_1) \right], \quad (8.29)$$

missä $E_1(\mu t)$ on ensimmäisen kertaluvun eksponentti-integraali (liite 13) ja $\beta_1 = \tan^{-1}(R_0/h)$.

Useimmissa tapauksissa tasolähdettä voidaan käsitellä pistelähteenä, kun etäisyys h on vähintään kaksinkertainen tason halkaisijaan nähden.

ESIMERKKI 8.4

Laboratorion lattialle on levinnyt kahden metrin säteelle tasaisesti 1 000 MBq ^{131}I -liuosta. Laske absorptioannosnopeus yhden metrin ja 0,1 metrin korkeudella keskellä saastunutta aluetta. Vertaa tulosta pistelähteen aiheuttamaan annosnopeuteen.

Annosnopeus voidaan laskea jodin kermanopeusvakion Γ_δ (liite 11) avulla korvaamalla yhtälössä (8.28) S_A tekijällä $4\pi\Gamma_\delta A_s$, missä A_s on aktiivisuus pinta-alaa kohti (aktiivisuuskate).

$$A_s = \frac{1000}{\pi 2^2} = 79,6 \text{ MBq/m}^2$$

$$\Gamma_\delta = 5,2 \cdot 10^{-8} \text{ (Gy m}^2\text{)/(MBq/h)}$$

$$\dot{D} = \pi\Gamma_\delta A_s \ln \left(\frac{R_0^2 + h^2}{h^2} \right)$$

$h = 1 \text{ m}$:

$$\dot{D} = 3,14 \cdot 5,2 \cdot 10^{-8} \cdot 79,6 \cdot \ln \left(\frac{2^2 + 1^2}{1^2} \right) \text{ Gy/h} = 0,021 \text{ mGy/h}$$

$h = 0,1 \text{ m}$:

$$\dot{D} = 3,14 \cdot 5,2 \cdot 10^{-8} \cdot 79,6 \cdot \ln\left(\frac{2^2 + 0,1^2}{0,1^2}\right) \text{ Gy/h} = 0,078 \text{ mGy/h}$$

Pistelähteelle saadaan yhtälöstä (8.17)

$h = 1 \text{ m}$:

$$\dot{D} = \frac{1000 \cdot 5,2 \cdot 10^{-8}}{1^2} \text{ Gy/h} = 0,052 \text{ mGy/h}$$

$h = 0,1 \text{ m}$:

$$\dot{D} = \frac{1000 \cdot 5,2 \cdot 10^{-8}}{0,1^2} \text{ Gy/h} = 5,2 \text{ mGy/h}$$

Pistelähdeaproskimaatiota ei voi käyttää, jos laskentapiste on lähellä radioaktiivisia aineita sisältävää pintaa tai tasoa.

Levymainen säteilylähde

Kun äärellisen levyn paksuus on t , fotonituottonopeus S_V , matkavaimennuskertoimet levyssä ja ilmassa μ_s ja μ_a sekä kohtisuora etäisyys levyyn h , saadaan äärettömän leveän levyn tapauksessa fotonikertymänopeudeksi

$$\varphi = \frac{S_V}{2\mu_s} \left[E_2(\mu_a h) - E_2(\mu_a h + \mu_s t) \right], \quad (8.30)$$

missä E_2 on toisen kertaluvun eksponentti-integraali (liite 13; vertaa pinta-lähde). Äärettömän paksun levylähteen aiheuttamaa kertymänopeutta tarkastellaan myöhemmin maaperän aktiivisuuden yhteydessä (luku 8.7).

Sylinterimäinen säteilylähde

Tarkastellaan kuvan 8.3d mukaista tilannetta, jossa sylinterilähteen sivulla on sylinterin akselin suuntainen levysuojus paksuudeltaan t . Sylinterissä radioaktiiviset aineet ovat jakautuneet tasaisesti fotonituottonopeuden ollessa S_V . Tarkka ratkaisu on hyvin monimutkainen eikä sitä normaalisti juurikaan käytetä. Sen sijaan tilannetta pyritään käsittelemään viivalähteenä (kuva 8.3e). Viivalähteen sijainti – etäisyys Z sylinterin reunasta – pyritään asettamaan sellaiseksi, että siinä otetaan oikein huomioon sylinterin sisällä tapahtuva säteilyn vaimeneminen.

Kun $a/R_0 > 10$, saadaan fotonikertymänopeuksiksi pisteissä P_1 (plusmerkki) ja P_2 (miinusmerkki):

$$\varphi = \frac{S_V R_0^2}{4(a+Z)} \left[F(\Theta_2, b) \pm F(\Theta_1, b) \right], \quad (8.31)$$

missä $b = \mu t + \mu_s Z$. Tässä μ_s on matkavaimennuskerroin sylinterissä ja μ matkavaimennuskerroin levysuojuksessa. $F(\Theta, b)$ on Sievertin integraali (liite 12).

Monikerroksiset suojukset

Suojuksessa on usein eri aineista valmistettuja päällekkäisiä kerroksia (paksuudet t_1, t_2, \dots, t_n). Siroamattomien fotonien kertymänopeus saadaan yksinkertaisesta yhtälöstä

$$\varphi = \varphi_0 e^{-(\mu_1 t_1 + \mu_2 t_2 + \dots + \mu_n t_n)}. \quad (8.32)$$

Lisäskertoimien arviointi ei kuitenkaan ole yksinkertaista, koska eri ainekerroksiin tulevat fotonien kertymänopeudet poikkeavat toisistaan. Seuraavia nyrkkisääntöjä voidaan kuitenkin soveltaa:

- Mikäli kaksi suojuskerrosta ovat suhteellisen samanlaisia (materiaalien järjestyksluvut eivät poikkea toisistaan enempää kuin 5...10), käytetään sen ainekerroksen lisäskerrointaulukoita tai -yhtälöitä, jolla on suurempi lisäskerroin ja lasketaan kokonaislisäskerroin olettaen koko suojuksen koostuvan tästä aineesta.
- Kun raskas väliaine seuraa kevyttä, käytetään vain raskaan suojusmateriaalin lisäskerointa.
- Kun kevyt väliaine seuraa raskasta, käytetään materiaalien lisäskertoimien tuloa. Menetelmä yliarvioi annosnopeuksia, jos kerroksia on useampia kuin kaksi.
- Kun suojuskerroksia on useita, painotetaan lisäskertoimet törmäysväleinä lasketuilla etäisyyksillä ja lasketaan kertoimien tulo.
- Todellinen monimutkainen suojus korvataan laskennallisesti suojuksella, jonka koostumus on yksinkertainen mutta gammasäteilyn vaimenemisen kannalta samanlainen kuin todellisen suojuksen.

8.4 | Laskennalliset menetelmät

Tässä yhteydessä ei voida käsitellä tarkkoja annoslaskennassa ja suojusten mitoittamisessa käytettäviä laskentamenetelmiä, vaan tyydytään esittämään vain lyhyt katsaus. Laskentamenetelmissä pyritään ottamaan huomioon kaikki gammasäteilyn ja eri väliaineiden väliset vuorovaikutukset. Tarkkuutta rajoittaa yleensä vain numeerisen laskennan karkeus, esimerkiksi käytettävien energia- ja suuntamuutosten suuruus. Useimmat menetelmät perustuvat Boltzmannin kuljetusyhtälön (8.33) ratkaisuun, jolloin laskettava suure on fotonikertymänopeus φ .

$$\nabla \cdot \vec{\Omega} \varphi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \mu(\vec{r}, E) \varphi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) = S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \iint n \sigma(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \varphi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' \quad (8.33)$$

missä \vec{r} on paikkavektori, E fotonien energia, $\vec{\Omega}$ fotonin etenemissuunnan osoittava vektori, μ on matkavaimennuskertoimen, S lähde-termi, s sirontavaikutusala ja n sirottavien elektronien tiheys.

Kuljetusyhtälö ottaa huomioon hiukkasten tuoton, hävikin ja siroamisen. Diskreettien koordinaattien menetelmässä kuljetusyhtälö ratkaistaan numeerisesti iteroiden. Kuljetusyhtälö voidaan myös ratkaista approksimoimalla lähdejakauman ja fotonikertymänopeuden suuntajakaumaa Legendren polynomien sarjana (niin sanottu palloharmonisten funktioiden menetelmä), kun taas momenttimenetelmässä yhtälö ratkaistaan Legendren polynomien momenttikehitelmien avulla.

Monte Carlo -menetelmä perustuu toisenlaiseen lähestymistapaan. Tietokonetta käyttäen tuotetaan suuri määrä laskennallisia hiukkashistorioita; toisin sanoen seurataan tuhansien – jopa satojentuhansien – hiukkasten kulkua lähteestä niiden tuhoutumiseen tai systeemistä karkaamiseen asti. Ohjelma valitsee lähteen emittoimien hiukkasten ominaisuudet sekä hiukkasten ja erilaisten väliainemateriaalien vuorovaikutuksen tapahtumapaikat ja sirontasuunnat satunnaisesti siten, että niiden keskinäiset todennäköisyydet vastaavat teoreettisia jakaumia. Laskennan lopputulos kussakin pisteessä on kooste lukuisten kyseiseen pisteeseen tulevien fotonien energia- ja suuntatiedoista.

8.5 | Taustasäteily

Ihmiseen kohdistuu jatkuvasti ionisoivaa ulkoista säteilyä, jonka lähteinä ovat maaperässä ja rakennusmateriaaleissa olevat radioaktiiviset aineet

tai joka on peräisin avaruudesta. Ulkoisen säteilyn kannalta ympäristössä esiintyvät radionuklidit voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

1. Maaperän alkuperäiset eli primordiaaliset radionuklidit. Niiden puoliintumisaika on niin pitkä, että ne sekä niiden radioaktiiviset tytärynuklidit ovat edelleen havaittavissa.
2. Kosmisen säteilyn kautta syntyvät radionuklidit. Nämä eivät vaikuta merkittävästi ulkoiseen säteilyyn maan pinnalla.
3. Ihmisen tuottamat radionuklidit. Ennen Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuutta tähän ryhmään kuuluvat ympäristössä olevat radioaktiiviset aineet olivat pääasiassa peräisin ilmakehässä tehdyistä ydinasekokeista. Tshernobylin päästöt aiheuttivat selvän lisäyksen ulkoisen säteilyn tasoon Suomessa (taulukko 8.4). Myös ydinvoimalat sekä radioaktiivisia aineita käsittelevät sairaalat ja laboratoriot aiheuttavat päästöjä. Näiden merkitys ympäristön ulkoisen säteilyn tasoon on normaaliolanteessa erittäin vähäinen.

Taustasäteily voi nousta ei-hyväksyttävälle tasolle esimerkiksi poikkeavan korkeita aktiivisuuspitoisuuksia sisältävien luonnonmateriaalien käytön takia. Rakennusmateriaalien sisältämien radioaktiivisten aineiden aktiivisuuspitoisuuksille on Suomessa asetettu enimmäisarvot.

Maaperän radioaktiiviset aineet

Tärkeimmät luonnon ulkoisen gammasäteilyn lähteet ovat alkuperäisnuklidit ^{40}K , ^{232}Th ja ^{238}U , joita esiintyy kaikissa maalajeissa. Näiden kolmen nuklidin puoliintumisajat ovat miljardeja vuosia (liite 1), minkä vuoksi ne – ja niiden tytärynuklidit – ovat vielä jäljellä näinkin kauan maapallon syntymisen jälkeen (taulukko 8.4). Uraanilla ja toriumilla on useita gammasäteilyä lähettäviä tytärynuklideja, koska ne hajoavat monimutkaisen ketjun kautta stabiileiksi alkuaineiksi (liite 2). ^{238}U -sarjan tärkeimpien isotooppien joukossa on kuitenkin vain kaksi merkittävää gammasäteilijää, ^{214}Bi ja ^{214}Pb .

Geologit käyttävät maaperän alkuainepitoisuuksien yhteydessä yksikköjä prosentti ja ppm (parts per million). Muunnoskertoimet ovat:

$$\begin{aligned} 1 \text{ ppm } ^{232}\text{Th} &\triangleq 4,07 \text{ Bq/kg } ^{232}\text{Th} \\ 1 \text{ ppm } ^{238}\text{U} &\triangleq 12,5 \text{ Bq/kg } ^{238}\text{U} \\ 1 \% \text{ K} &\triangleq 310 \text{ Bq/kg } ^{40}\text{K} \end{aligned}$$

	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs
Pitoisuus Suomen maaperässä (Bq/kg)	38	41	640	
Laskeuma (kBq/m ²)				9
Kertymänopeus (1/(cm ² s))	2,9	4,2	3,3	1,9
Absorptioannosnopeus ilmassa (μGy/h)	0,016	0,027	0,027	0,01

TAULUKKO 8.4 Eräiden nuklidien keskimääräinen aktiivisuuspitoisuus Suomen maaperässä ja niiden säteilyvaikutukset vuonna 2001 ja aktiivisuuspitoisuuksille laskettu absorptioannosnopeus ja fotonikertymänopeus yhden metrin korkeudella ulkoilmassa.

Aktiivisuuspitoisuusarvot perustuvat Geologian tutkimuskeskuksen moreenimittauksiin. Pitoisuudet vaihtelevat alueellisesti hyvin paljon. Cesiumlaskeumasta noin 1 kBq/m² on seurausta ydinasekokeista ja 8 kBq/m² on Tshernobylin onnettomuuden aiheuttama keskimääräinen laskeuma Suomessa.

Kaliumin pitoisuus prosentteina tarkoittaa kaliumin kokonaismäärää, josta vain osa on isotooppia ⁴⁰K (luonnonkaliumissa ⁴⁰K:n osuus 0,0119 prosenttia). Yhdessä grammassa luonnonkaliumia on 31 Bq ⁴⁰K:ää.

Kun emonuklidi – ²³²Th, ²³⁵U tai ²³⁸U – on hyvin paljon pitkäikäisempi kuin tytärnuklidit, syntyy aikanaan aktiivisuustasapaino (poikkeuksiakin on, katso luku 5.2), jossa uraani- ja toriumsarjan tytärnuklidien aktiivisuus on sama kuin emonuklidin aktiivisuus. Kaasumaisten tytäraineiden kuten radonin ekshalaatio maaperän ylimmistä kerroksista ilmakehään vähentää kuitenkin maan pintakerroksissa radonin hajoamistuotteiden aktiivisuuspitoisuutta.

Taulukon 8.4 mukaisesti suomalainen elää gammasäteilykentässä, jossa kertymänopeus on noin 10 fotonia neliösenttimetriä kohden sekunnissa. Kun tiedämme, että ihmiskehon pinta-ala on karkeasti arvioiden yksi neliömetri, voidaan arvioida, että ihmiskehoon osuu sekunnissa 100 000 gammakvanttia.

Kosminen säteily

Korkeus meren pinnasta ja suojaavat rakenteet vaikuttavat kosmisen säteilyn voimakkuuteen. Säteilyssä on ”pehmeä” osa (elektronit ja fotonit), joka vaimenee merkittävästi jo tavallisen rakennuksen seinissä, ja ”kova” osa (pääosin myoneja), joka vaimenee kunnolla vain hyvin paksussa maa-

tai vesikerroksessa. Vallitseva ilmanpaine vaikuttaa näihin molempiin säteilylajeihin. Suomessa kosmisen säteilyn absorptioannosnopeus ulkoilmassa merenpinnan tasolla on noin 43 nGy/h.

Radioaktiivisten aineiden laskeuma

Tuore radioaktiivisten aineiden laskeuma asettuu erilaisille pinnoille ja maan ylimpiin pintakerroksiin, josta aineet kulkeutuvat edelleen syvemmälle. Aktiivisuuspitoisuus on suurimmillaan aivan pinnassa ja vähenee syvemmällä. Esimerkiksi ^{137}Cs :n on todettu sitoutuvan lujasti maaperän savihiukkasiin; tällöin veden kuljettaessa cesiumia alaspäin syntyvä pystysuuntainen pitoisuusjakauma on eksponentiaalinen. Maa-lajista riippumatta suurin osa maaperän radiocesiumista on 10 senttimetrin paksuisessa kerroksessa maanpinnassa vielä vuosia laskeuman tulon jälkeen.

Cesiumin syvyysjakaumaan vaikuttaa olennaisesti se, onko maata muokattu 1960-luvun alkuvuosien ydinkokeiden ja Tshernobylin onnettomuuden jälkeen. Peltomaalla tehdyt mittaukset osoittavat, että ^{137}Cs -jakauma on hyvin tasainen kyntösyvyyteen asti muutaman vuoden kuluttua laskeumasta. Koskemattomalla luonnonniityllä ydinasekoelaskemasta tehdyt mittaukset taas osoittavat, että syvyysjakauma on eksponentiaalinen.

Gammasäteily ulkona ja asunnoissa

Säteilyturvakeskus kartoitti ulkoisen gammasäteilyn tason Suomessa vuosina 1978–1982. Tutkimus tehtiin autoon sijoitetuilla säteilymittauslaitteilla. Kartoituksen aikana ajettiin yhteensä noin 15 000 kilometriä. Mittauslaitteet havainnoivat säteilyä jatkuvasti ajon aikana. Laitteina käytettiin herkkää paineionisaatiokammiota ja Geiger-Müller-putkia. Kartoituksen tuloksena saatu annosnopeus voi poiketa jonkin verran esimerkiksi tien lähellä pellolla tai metsässä vallitsevasta annosnopeudesta. Mitatut säteilytasot kuvastavat kuitenkin hyvin sellaisilla paikoilla vallitsevaa annosnopeutta, joilla oleskellaan paljon ulkona. Sisätiloissa ulkoisen säteilyn annosnopeutta mitattiin vuosina 1990–1991 suoritetun valtakunnallisen radontutkimuksen yhteydessä. Mittalaitteena käytettiin pientä termoluminesenssikidettä (TLD), joka oli kiinnitetty puolen vuoden ajan ajaksi asuntoon sijoitettuun radonmittariin.

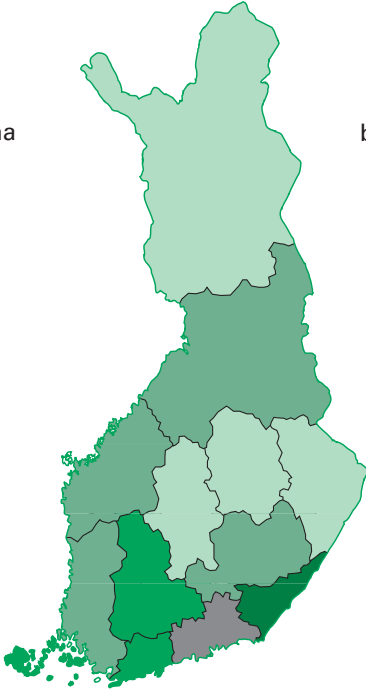
Lääni	Pientalot gammasäteily sisällä (nGy/h)	Kerrostalot gammasäteily sisällä (nGy/h)	Ulkona luonnon gammasäteily (nGy/h)	Ulkona Tshernobyl- laskeumasta vuonna 1991 (nGy/h)
Ahvenanmaa			85	2
Uusimaa, länsi	76	108	79	3
Uusimaa itä, ja Kymi länsi	67	153	98	11
Turku	59	94	70	12
Kymi, itä	69	105	85	3
Häme	67	102	72	25
Mikkeli	55	76	65	13
Keski-Suomi	52	88	57	16
Kuopio	46	60	54	8
Pohjois-Karjala	48	78	58	2
Vaasa	45	89	62	13
Oulu	44	77	61	2
Lappi	62	79	59	1
Koko maa	58	100	71	12

TAULUKKO 8.5 Ulkona ja sisätiloissa vallitseva väestöpainotettu keskimääräinen absorptioannosnopeus lääneittäin (vanha läänijako)

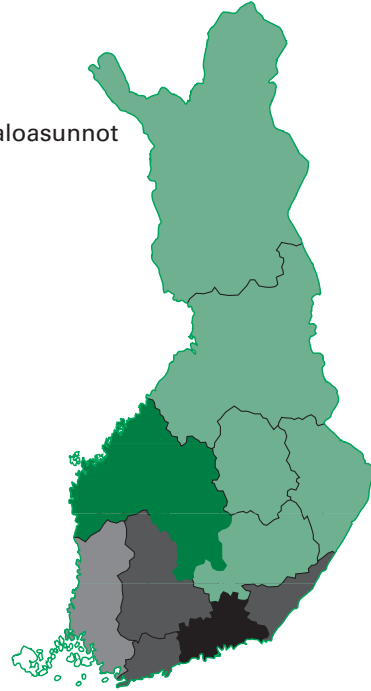
Tuloksista on vähennetty kosmisen säteilyn absorptioannosnopeus. Sisätiloissa mittauksia tehtiin pientaloissa 235 ja kerrostaloasunnoissa 111. Taulukkoon on lisäksi merkitty Tshernobylin turman aiheuttama annosnopeus ulkona vuonna 1991.

Taulukko 8.5 esittää mittausten tulokset läänikohtaisina numeroarvoina. Vastaavat tulokset karttoina ovat kuvassa 8.4. Absorptioannosnopeus kuvaa maaperän ja rakennusmateriaalien sisältämien luonnon radioaktiivisten aineiden aiheuttamaa ulkoista säteilyä. Kuntakohtaiset annosnopeudet ulkona olivat 45–139 nGy/h. Väestöllä painotettu annosnopeuden keskiarvo ulkona oli 71 nGy/h. Kerrostaloissa annosnopeus on selkeästi suurempi kuin pientaloissa, valtakunnalliset keskiarvot ovat 100 nGy/h ja 58 nGy/h. Ero johtuu betonista tai kivimateriaalista tehtyjen pintojen määrästä. Kerrostaloissa seinät, lattia ja katto säteilevät. Pientaloissa taas normaalisti seinät ja katto on tehty puupohjaisista materiaaleista. Yksittäisissä pientaloissa annosnopeus oli 22–144 nGy/h ja kerrostaloasunnoissa 45–184 nGy/h.

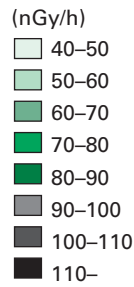
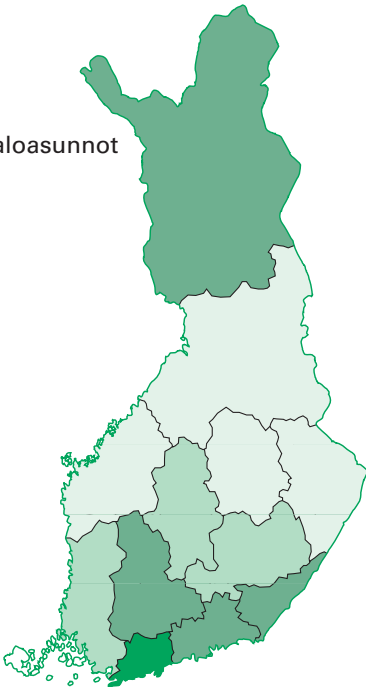
a) Ulkona



b) Kerrostaloasunnot



c) Pientaloasunnot



KUVA 8.4 Ulkoisen gammasäteilyn absorptioannosnopeus Suomessa

Annosnopeudessa ei ole mukana kosmisen säteilyn absorptioannosnopeutta.

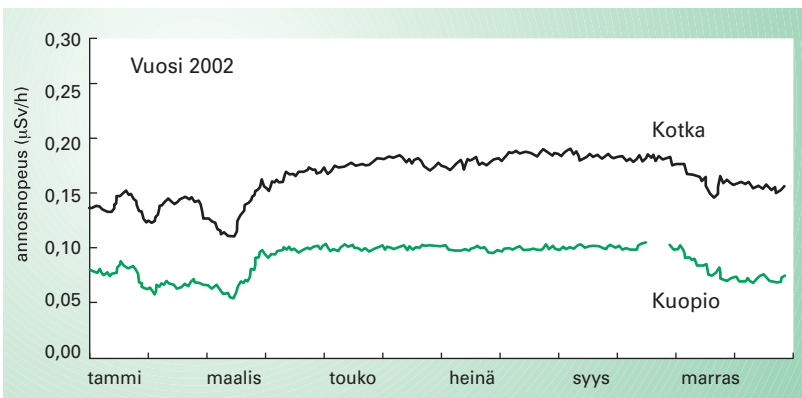
- a) absorptioannosnopeus ulkona.
- b) absorptioannosnopeus kerrostaloasunnoissa.
- c) absorptioannosnopeus pientaloasunnoissa.

Sekä maaperästä että rakennusmateriaaleista aiheutuva annosnopeus on korkein Kaakkois-Suomessa, missä maaperän uraani-, torium ja kaliumpitoisuudet ovat suurimmillaan. Tällä alueella vallitseva kivilaji on uraanipitoinen rapakivi-graniitti. Myös moreenien ja sora-aineuksen luonnon radioaktiivisten aineiden pitoisuus on keskimääräistä korkeampi. Itä- ja Pohjois-Suomessa vallitsevat taas pienen aktiivisuuspitoisuuden gneissit ja basalttiset kivilajit.

Taustasäteilyn ajallinen vaihtelu

Luonnon taustasäteily voi vaihdella paikallisesti melkoisesti, mutta vaihtelua esiintyy myös ajallisesti (kuva 8.5). Selvästi havaittava vuodenaikaisvaihtelu on pääosin seurausta maanpintaa talvisin peittävän veden, lumen ja jään maaperästä tulevaa säteilyä vaimentavasta vaikutuksesta.

Lumen ja jään aiheuttamien muutosten lisäksi ulkoisen säteilyn voimakkuuteen vaikuttaa myös radonin hajoamistuotteiden aktiivisuuspitoisuuden vaihtelu maaperässä ja ilmassa. Normaalisti radonpitoisuus ilmakehässä on melko tasainen useiden kilometrien korkeuteen saakka. Inversiotilanteissa – jolloin ilma maanpinnan lähellä on kylmempää kuin ylempänä – ilmakerrosten pystysuuntainen sekoittuminen on kuitenkin vähäistä. Tällöin radonin ja sen hajoamistuotteiden pitoisuus on suurimmillaan lähellä pintaa.



KUVA 8.5 Ulkoisen säteilyn annosnopeus vuonna 2002 Kotkassa ja Kuopiossa sijaitsevilla säteilyvalvonta-asemilla (katso myös kuva 8.10)

Myös sateet voivat aiheuttaa voimakkaimman muutoksen ulkoisen säteilyn annosnopeuteen, sillä sade huuhtoo radonin hajoamistuotteita maan pinnalle. Sateen aiheuttamat vaihtelut ovat suuruudeltaan alle 0,1 $\mu\text{Sv/h}$.

8.6 | Radioaktiivisesta pilvestä tuleva säteily

Tiettyä radionuklidia sisältävän pilven gammasäteilyn absorptioannosnopeus ilmassa \dot{D} maanpinnalla paikassa (x_p, y_p, z_p) ajanhetkellä t on:

$$\dot{D}(x_p, y_p, z_p, t) = \sum_i \int_{x=0}^{\infty} \int_{y=-\infty}^{\infty} \int_{z=0}^{\infty} c_A(x, y, z, t) \frac{B(\mu_i r)}{4\pi r^2} e^{-\mu_i r} p_\gamma(E_i) E_i \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_i dx dy dz, \quad (8.34)$$

missä summausindeksi i käy yli kyseisen radionuklidin emittoimat gammakvantit (energia E_i , emissiotodennäköisyys $p_\gamma(E)$). $c_A(x, y, z, t)$ on nuklidin aktiivisuuspitoisuus pilven kohdassa (x, y, z) hetkellä t ja μ_i ja $(\mu_{en}/\rho)_i$ ovat energiaa E_i vastaavat matkavaimennuskerroin ja energia-absorption massakerroin ilmassa, B absorptioannosnopeuden lisästekijä ilmassa sekä r pisteiden (x, y, z) ja (x_p, y_p, z_p) välinen etäisyys. Integrointi ulotetaan (teoriassa) yli koko pilven tilavuuden.

Mikäli mittaustietoja ei ole käytettävissä, aktiivisuuspitoisuudet voidaan arvioida jollakin päästötietoja, meteorologisia havaintoja sekä fyysikaalis-meteorologisia riippuvuuksia ja lainalaisuuksia hyödyntävällä leviämismallilla, jonka avulla päästöpilven ajallinen ja paikallinen käyttäytyminen voidaan ennustaa (luku 3). Useimmissa tapauksissa annosnopeudelle saadaan kuitenkin lauseke, jota ei voida ratkaista analyttisesti. Tällöin joudutaan turvautumaan joko numeeriseen integrointiin tai erilaisiin yksinkertaistuksiin ja korjaustekijöihin. Lähellä päästöpistettä pilvi – tai oikeastaan kapea vana – voidaan esimerkiksi korvata viivalahteella, kun taas hyvin kaukana voidaan eräissä tapauksissa käyttää hyväksi niin sanottua puoliäärettömän pilven approksimaatiota.

Approksimaatiossa oletetaan, että arvioitaessa ulkoisen säteilyn annosnopeutta maanpinnalla pilveä voidaan pitää maata koskettavana puoliäärettömänä pilvenä, jonka aktiivisuuspitoisuus on kauttaaltaan sama kuin tarkastelukohdassa. Käytännössä tämä edellyttää, että pilvi ulottuu joitakin satoja metrejä tarkastelupisteen ympärille joka suuntaan ja että pitoisuus tällä alueella muuttuu paikasta toiseen vain vähän ja tasaisesti ilman

yrkkiä hyppäyksiä. Mikäli nämä ehdot täyttyvät, voidaan annosnopeuden laskemisessa hyödyntää nuklidikohtaisia annos(nopeus)muuntokertoimia, jotka ilmoittavat annosnopeuden maan pinnalla pilven sisältämää aktiivisuuspitoisuuskokoa kohden. Muuntokertoimien laskemisessa lähtökohdaksi on säteilytasapainotilanne, jossa tilavuusalkio ilmaa emittoi yhtä paljon säteilyenergiaa kuin siihen absorboituu. Tätä tilannetta korjataan ottamalla huomioon sekä maanpinnan että kehon oman absorptioon vaikutukset.

Muuntokertoimia käyttäen voidaan yhtälön (8.34) perusteella esimerkiksi efektiivisen annoksen nopeus laskea seuraavasti:

$$\dot{E}(x_p, y_p, 0, t) = c_A(x_p, y_p, 0, t) (DC)_{ilma}, \quad (8.35)$$

missä $(DC)_{ilma}$ on efektiivisen annoksen annosmuuntokerroin tarkasteltavalle radionuklidille. Jos pilvi sisältää useita nuklideja, voidaan niiden aiheuttamat annosnopeudet laskea yhteen.

Koska myös beetasäteily aiheuttaa ulkoisen säteilyn annosta – käytännössä tosin lähinnä vain iholle – on muuntokertoimien arvoissa usein mukana myös sen osuus. Taulukoita käytettäessä on lisäksi syytä olla tarkkana sen suhteen, ovatko kyseessä vain nuklidikohtaiset kertoimet vai onko niihin sisällytetty myös lyhtikäisten tytärnuklidien osuus aktiivisuustasapainotilanteessa (esimerkiksi $^{137}\text{Cs} + ^{137m}\text{Ba}$, taulukko 8.6).

8.7 | Annosnopeus maaperän radioaktiivisista aineista

Siroamattomien fotonien kertymänopeus

Maaperän radionuklidien aiheuttamaa säteilykenttää laskettaessa oletetaan usein, että maaperä on koostumukseltaan homogeeninen ja että maan ja ilman rajapinta on taso. Säteilykentän kannalta merkittävin kerros on maanpinnan ylimmät 20–30 senttimetriä. Luonnon radioaktiiviset aineet ovat usein tasaisesti jakautuneet tähän kerrokseen, kun taas laskeuman mukana tulleet radioaktiiviset aineet noudattavat syvyysuunnassa esimerkiksi eksponentiaalista jakaumaa.

Nuklidi	Kermanopeuskerroin 1 m korkeudella, puoliääretön pilvi ($\mu\text{Gy/h}$) / (Bq/m^3)	Annosuuntokerroin (efektiivinen annos), puoliääretön pilvi ($\mu\text{Sv/h}$) / (Bq/m^3)
⁴¹ Ar	$3,01 \cdot 10^{-4}$	$2,21 \cdot 10^{-4}$
⁵⁴ Mn	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	$2,53 \cdot 10^{-5}$	$2,02 \cdot 10^{-5}$
⁶⁰ Co	$5,90 \cdot 10^{-4}$	$4,54 \cdot 10^{-4}$
⁶⁵ Zn	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$
^{85m} Kr	$3,34 \cdot 10^{-5}$	$2,46 \cdot 10^{-5}$
⁸⁵ Kr	$6,30 \cdot 10^{-7}$	$9,17 \cdot 10^{-7}$
⁸⁷ Kr	$1,86 \cdot 10^{-4}$	$1,42 \cdot 10^{-4}$
⁸⁸ Kr	$4,54 \cdot 10^{-4}$	$3,50 \cdot 10^{-4}$
⁹⁵ Zr	$1,73 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$
⁹⁷ Zr	$4,14 \cdot 10^{-5}$	$3,25 \cdot 10^{-5}$
⁹⁵ Nb	$1,80 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$
⁹⁷ Nb	$1,52 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$
¹⁰³ Ru	$1,08 \cdot 10^{-4}$	$8,10 \cdot 10^{-5}$
¹⁰⁶ Rh	$4,75 \cdot 10^{-5}$	$3,74 \cdot 10^{-5}$
^{110m} Ag	$6,41 \cdot 10^{-4}$	$4,90 \cdot 10^{-4}$
¹³² Te	$5,15 \cdot 10^{-5}$	$3,71 \cdot 10^{-5}$
¹³¹ I	$8,68 \cdot 10^{-5}$	$6,55 \cdot 10^{-5}$
¹³² I	$5,26 \cdot 10^{-4}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$
¹³³ I	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$
¹³⁴ I	$6,05 \cdot 10^{-4}$	$4,68 \cdot 10^{-4}$
¹³⁵ I	$3,67 \cdot 10^{-4}$	$2,87 \cdot 10^{-4}$
^{133m} Xe	$9,43 \cdot 10^{-6}$	$4,58 \cdot 10^{-6}$
¹³³ Xe	$9,68 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{-6}$
¹³⁵ Xe	$5,51 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$
¹³⁴ Cs	$3,64 \cdot 10^{-4}$	$2,72 \cdot 10^{-4}$
¹³⁶ Cs	$5,08 \cdot 10^{-4}$	$3,82 \cdot 10^{-4}$
¹³⁷ Cs + ^{137m} Ba	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$9,81 \cdot 10^{-5}$
¹⁴⁰ Ba	$4,14 \cdot 10^{-5}$	$3,09 \cdot 10^{-5}$
¹⁴⁰ La	$5,44 \cdot 10^{-4}$	$4,21 \cdot 10^{-4}$

TAULUKKO 8.6 Eräiden nuklidien kermanopeuskertoimia ilmassa ja efektiivisen annoksen annosuuntokertoimia puoliäärettömästä pilvestä tulevalle säteilylle (lähteet: ICRU Report 53, 1994; Shleien et al. 1998; IAEA Safety Series 115, 1996)

Annosuuntokertoimet sisältävät myös beetasäteilyn osuuden. Kerma on suure, jota voidaan (tietyn edellytyksin) mitata, kun taas efektiivinen annos on laskennallinen säteilyn haittavaikutuksia kuvaava kehon eri elimien suhteen painotettu keskimääräinen summasuure. Käytännön säteilysuojelutyössä kermanopeuden voidaan katsoa kuvaavan myös absorptioannosnopeutta.

Ekspontiaalisen jakaumamallin mukaan fotonituottonopeus tilavuusyksikköä kohden syvyydellä z (cm) on

$$S(z) = S_0 e^{-(\alpha/\rho_s)z\rho_s}, \quad (8.36)$$

missä S_0 on fotonituottonopeus pinnalla tilavuusyksikköä kohti ($\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$), ρ_s on maan tiheys ja α/ρ_s massarelaksaatiokerroin (cm^2/g); α on matkarelaksaatiokerroin ($1/\text{cm}$), jonka käänteisarvoa sanotaan relaksaatiosyvydeksi. S_0 on laskettavissa yhtälön 8.13 avulla, kun aktiivisuuspitoisuus ja gammaemissiotodennäköisyys tunnetaan. Fotonituottonopeus tilavuusyksikköä kohden vähenee yhden relaksaatiosyvyyden matkalla arvoon, joka on $1/e$ vastaavasta arvosta maanpinnalla.

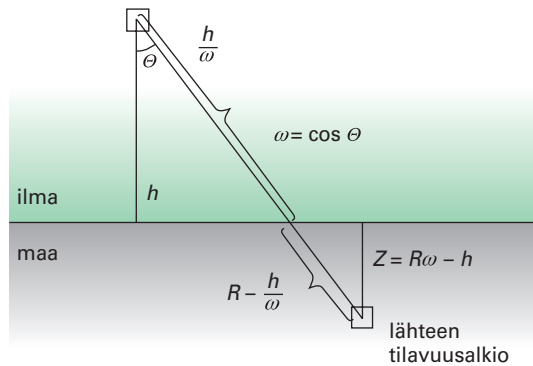
Tasolähteen (pintalähteen) tapauksessa massarelaksaatiokerroin – tai lyhyemmin jakaumakerroin – saa arvon $\alpha/\rho_s = \infty$. Maaperään tasaisesti jakautuneiden radioaktiivisten aineiden tapauksessa taas $\alpha/\rho_s = 0$.

Fotonituottonopeudeksi pinta-alayksikköä kohden eksponentiaalisen lähteen tapauksessa saadaan

$$S_A = \int_0^{\infty} S(z) dz = \frac{S_0}{\alpha} \quad (8.37)$$

Siroamattomien fotonien kertymänopeus korkeudella h tasaisen maanpinnan yläpuolella (kuvan 8.6 merkinnöin) lasketaan seuraavasti:

$$\varphi = \int_0^{\pi/2} \int_{h/\omega}^{\infty} \frac{S_0}{4\pi R^2} e^{-\frac{\alpha}{\rho_s}(R\omega-h)\rho_s} e^{-\frac{\mu_a h \rho_a}{\rho_s \omega}} e^{-\frac{\mu_s R-h/\omega}{\rho_s \rho_s}} 2\pi R^2 \sin\theta dR d\theta. \quad (8.38)$$



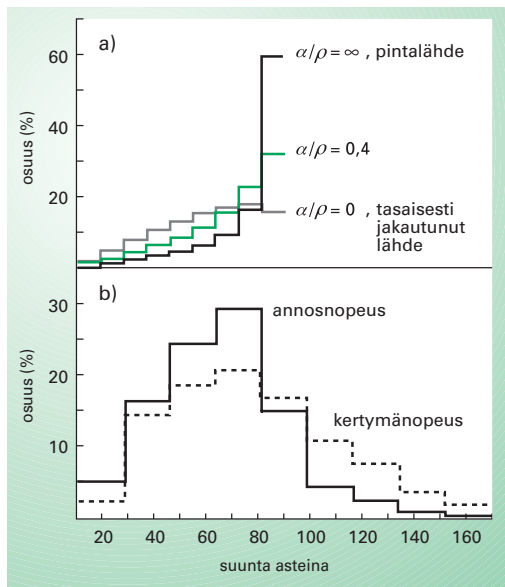
KUVA 8.6 Maaperän radioaktiivisten aineiden tuottaman säteilykentän laskenta

Tässä R on etäisyys maaperän tilavuusalkiosta tarkastelupisteeseen, ρ_a ja ρ_s ovat ilman ja maan tiheydet (g/cm^3), α/ρ_s jakaumakerroin sekä μ_a ja μ_s ilman ja maan matkavaimennuskertoimet ($1/\text{cm}$).

Yhtälöä (8.38) ei tässä yhteydessä integroida; todetaan vain, että lopputuloksena saadaan kertymänopeus ja sen derivaatta kulman Θ suhteen eri lähdejakaumille. Jatkossa esitetään vain kertymänopeuden lausekkeet (suuntajakauma on esitetty kuvassa 8.7).

Tasolähteelle ($\alpha/\rho_s = \infty$) seuraa

$$\varphi = \frac{S_A}{2} E_1 \left[\left(\frac{\mu_a}{\rho_a} \right) h \rho_a \right] \quad (8.39)$$



KUVA 8.7 Maaperästä tulevan säteilyn kulmajakauma

- Syvyysuunnassa eksponentiaalisesti ja tasaisesti jakautuneen radioaktiivisen aineen aiheuttaman fotonikertymänopeuden kulmajakauma yhden metrin korkeudella. Sivusuunnasta läheltä pintaa tulevien fotonien osuus kasvaa voimakkaasti, kun radioaktiiviset aineet ovat jakautuneet lähelle pintaa. Tasaisesti jakautuneesta 0,662 MeV:n (^{137}Cs , katso liite 3) lähteestä tulevasta siroamattomien fotonien kertymänopeudesta 15 prosenttia esimerkiksi on peräisin kuuden metrin säteen (suuntakulma 80°) ulkopuolelta ja vastaavasta pintalähteestä yli puolet.
- Tasaisesti maaperään jakautuneiden luonnon radioaktiivisten aineiden aiheuttaman absorptioannosnopeuden ja fotonikertymänopeuden kulmajakaumat. Ylhäältä päin tulevan säteilyn (niin sanottu "skyshine") – joka on maaperästä peräisin olevaa, yli 90° kulmaan ilmassa sironnutta säteilyä – osuus annosnopeudesta on noin 12 prosenttia. Syvyysuunnassa eksponentiaalisesti jakautuneen lähteen aiheuttama kulmajakauma on likimain samanlainen, kun relaksaatioisyvyys on vähintään kaksi senttimetriä ($\rho = 1,5 \text{ g/cm}^3$, $\alpha/\rho \leq 0,6 \text{ cm}^2/\text{g}$).

jossa $E_1(t)$ on ensimmäisen kertaluvun eksponentti-integraali (liite 13). Sen argumenttina on vapaiden matkojen – etäisyyksien, jotka tietynenerginen fotoni keskimäärin etenee ilman vuorovaikutusta väliaineatomien kanssa – lukumäärä, kun fotoni kulkee ilmassa matkan h .

Eksponentiaaliselle jakaumalle puolestaan pätee

$$\varphi = \frac{S_A}{2} \left\{ E_1 \left[\left(\frac{\mu_a}{\rho_a} \right) h \rho_a \right] - e^{\left[\left(\frac{\alpha}{\rho_s} \right) h \rho_a \frac{\mu_a / \rho_a}{\mu_s / \rho_s} \right]} E_1 \left[\left(\frac{\mu_a}{\rho_a} \right) h \rho_a + \left(\frac{\alpha}{\rho_s} \right) h \rho_a \frac{\mu_a / \rho_a}{\mu_s / \rho_s} \right] \right\} \quad (8.40)$$

Kun aktiivisuuspitoisuus on pystysuunnassa vakio (eli $\alpha / \rho_s = 0$), saadaan kertymänopeudeksi

$$\varphi = \frac{S}{2 \mu_s / \rho_s} E_2 \left[\left(\frac{\mu_a}{\rho_a} \right) h \rho_a \right], \quad (8.41)$$

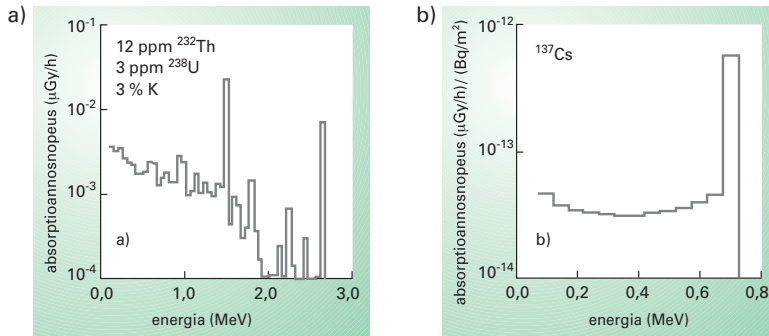
missä $E_2(t)$ on toisen kertaluvun eksponentti-integraali (liite 13). Jos S on ilmoitettu aktiivisuuspitoisuutena massayksikköä kohti, kertymänopeuden yksiköksi tulee $(\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}) / (\text{Bq kg}^{-1})$. Huomattakoon, että massavaimennuskerrointa käytettäessä maaperän tiheys ei suoraan vaikuta kertymänopeuteen, sillä massavaimennuskerroin μ_s / ρ_s riippuu alkuainekoostumuksesta, ei tiheydestä.

Säteilymittauksissa on tärkeää tietää, millä syvyydellä oleva lähde aiheuttaa havaitun kertymä- tai annosnopeuden. ^{137}Cs :n gammaenergia 0,662 MeV vastaa ympäristössä vallitsevan säteilykentän keskimääräistä energiaa. Tasaisesti jakautuneen 0,662 MeV:n lähteen aiheuttamasta siroamattomien fotonien kertymänopeudesta puolet tulee pintakerroksesta, jonka paksuus on 3 cm; 90 prosenttia vastaava paksuus on 13,5 cm. Jos jakaumakerroin on 0,30 cm^2/g , mikä vastaa ^{137}Cs :lle havaittua syvyysjakaumaa muutama vuosi laskeuman tulon jälkeen, on 95 prosenttia kertymänopeudesta lähtöisin 5 cm paksusta pintakerroksesta. Jakaumakerroin suurennettaessa pintakerroksen merkitys kasvaa entisestään.

Annosnopeus

Absorptioannosnopeuden spektri kertoo annosnopeuden aiheuttaneiden fotonien energiajakauman. Kuva 8.8 näyttää spektrin tyypilliselle maaperän ^{232}Th -, ^{40}K - ja ^{238}U -pitoisuudelle. Spektrissä näkyvä energialtaan suurin huippu edustaa ^{208}Tl :n 2.6 MeV gammaemissiota (toriumsarja,

liite 1). Myös kaliumin 1.46 MeV gammaemissio näkyy selkeästi. Maaperästä tulevien fotonien aiheuttama absorptioannosnopeus pienenee radioaktiivisten aineiden ollessa jakautuneena syvälle maahan ja on suurimmillaan pintalähteelle (taulukko 8.7).



KUVA 8.8 Absorptioannosnopeuden energiajakauma

- a) Luonnon radioaktiiviset aineet (yksikkö $\mu\text{Gy/h}$, spektrin energia-askel 50 keV).
 b) Syvyysuunnassa eksponentiaalisesti ($\alpha/\rho = 0,3 \text{ cm}^2/\text{g}$) jakautunut ^{137}Cs , spektrin energia-askel on 50 keV.

Fotonin energia (MeV)	Jakaumakerroin α/ρ (cm^2/g)							
	0	0,05	0,2	0,33	0,5	1,0	10	∞
0,100	18,0	0,54	1,36	1,73	2,03	2,50	3,57	3,96
0,150	29,7	1,00	2,35	2,92	3,35	4,07	5,65	6,23
0,200	42,7	1,47	3,34	4,10	4,72	5,65	7,85	8,64
0,300		2,40	5,26	6,44	7,34	8,82	12,3	13,5
0,364	89,4							
0,500	126	4,18	8,89	10,8	12,3	14,8	20,6	22,9
0,662	172	5,51	11,6	14,1	16,0	19,1	26,7	29,5
0,750	198							
1,000	266	8,24	16,9	20,4	23,1	27,6	38,5	42,5
1,461	395	11,7	23,4	28,1	31,8	37,8	52,2	57,6
2,000		15,5	30,3	36,4	40,7	48,2	66,2	73,1
2,004	545							
2,250	609							
2,750	745							
3,000		21,9	41,8	49,3	55,4	65,5	89,3	98,3

TAULUKKO 8.7 Maaperästä tulevien fotonien aiheuttama kermaannos yhden metrin korkeudella (nGy/h) (ICRU Report 53, 1994)

Lähteen fotonituottonopeus tasaiselle jakaumalle ($\alpha/\rho = 0$) on $1 \text{ g}^{-1}\text{s}^{-1}$ ja eksponentiaalisille jakaumille ($\alpha/\rho > 0$) $1 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. α/ρ :n arvo ∞ vastaa pintalähdettä.

Nuklidi	Absorptioannosnopeus (nGy/h)	
	Ulkona	Sisällä
²³² Th	0,668	0,89
²³⁸ U	0,431	0,79
⁴⁰ K	0,0423	0,0696
¹³⁷ Cs	0,146	

TAULUKKO 8.8 Luonnon radioaktiivisista aineista aiheutuva absorptioannosnopeus ulkona yhden metrin korkeudella sekä betonirakenteisessa huoneessa (4 × 5 × 2,8 m; betoniseinän paksuus 20 cm)

Vertailun vuoksi taulukkoon on merkitty myös tasaisesti maaperään jakautuneen ¹³⁷Cs:n aiheuttama annosnopeus. Nuklidien aktiivisuuspitoisuudeksi maaperässä tai betonissa oletetaan 1 Bq/kg.

Absorptioannosnopeus muuttuu korkeuden funktiona hitaasti. Annosnopeus maan pinnassa on vain pari prosenttia suurempi kuin yhden metrin korkeudella, ja muutos on yhtä vähäinen siirryttäessä kahden metrin korkeuteen. Mitä korkeammalle mennään, sitä suuremmaksi kasvaa sironneiden pienenergistien fotonien osuus. Tämän vuoksi annosnopeus vähenee korkeuden funktiona nopeammin kuin kertymänopeus (taulukko 8.9).

Maaperän koostumus tai kosteus eivät vaikuta merkittävästi annosnopeuskertoimien arvoihin. Niinpä taulukkoja 8.8 ja 8.9 voidaan soveltaa maaperän kaikilla tiheyksillä käyttämällä oikein valittuja Bq/kg- tai α/ρ -arvoja. Maaperän kosteuden kasvaessa massayksikköä kohden ilmoitettu radioaktiivisten aineiden aktiivisuuspitoisuus pienenee ja eksponentiaalisen jakauman jakaumakerroin pienenee. Tällöin myös annosnopeus pienenee. Käytännössä esimerkiksi kymmenen prosentin vesimäärän lisäys maan pintakerroksissa laskee annosnopeutta saman verran.

Korkeus maanpinnasta (m)	Absorptioannosnopeus		Kertymänopeus	
	Luonnon radioaktiiviset aineet	¹³⁷ Cs	Luonnon radioaktiiviset aineet	¹³⁷ Cs
0	102	104	101	103
1	100	100	100	100
10	89	81	95	92
30	74	61	86	79
100	44	29	61	49
300	12	5	18	12

TAULUKKO 8.9 Absorptioannosnopeus ja kertymänopeus (sironnuttuun ja sironnut säteily) korkeuden funktiona

Taulukon arvot ovat suhteellisia (arvo yhden metrin korkeudella 100). ¹³⁷Cs:n jakaumakerroin on 0,2 cm²/g.

Laskeuman radioaktiivisten aineiden aiheuttama annosnopeus

Taulukko 8.10 antaa eräiden tärkeiden laskeumassa olevien nuklidien kermanopeuskertoimet eri syvyysjakaumilla ja taulukko 8.11 efektiivisen annoksen annosmuuntokertoimet maanpinnalla olevan tasolähteen tapauksessa. Tietyn radionuklidin aiheuttama efektiivisen annoksen nopeus voidaan laskea kaavasta

$$\dot{E} = A_s (DC)_{\text{laskeuma}}, \quad (8.42)$$

missä A_s on aktiivisuus pinta-alayksikköä kohden (aktiivisuuskate) ja $(DC)_{\text{laskeuma}}$ efektiivisen annoksen annosmuuntokerroin kyseiselle nuklidille. Samanlaista yhtälöä voidaan käyttää kermanopeuden laskemiseen.

Nuklidi	Kermanopeus ($\mu\text{Gy/h}/(\text{kBq/m}^2)$)							
	Jakaumakerroin α/ρ (cm^2/g)							
	0,01	0,05	0,2	0,33	0,5	1,0	10	∞
^{54}Mn	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$6,91 \cdot 10^{-4}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	$1,97 \cdot 10^{-3}$	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$3,30 \cdot 10^{-3}$	$3,71 \cdot 10^{-3}$
^{58}Co	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$8,08 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-3}$	$2,77 \cdot 10^{-3}$	$3,89 \cdot 10^{-3}$	$4,38 \cdot 10^{-3}$
^{60}Co	$5,90 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$4,10 \cdot 10^{-3}$	$4,93 \cdot 10^{-3}$	$5,58 \cdot 10^{-3}$	$6,64 \cdot 10^{-3}$	$9,20 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-2}$
^{65}Zn	$1,37 \cdot 10^{-4}$	$4,75 \cdot 10^{-4}$	$9,70 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$2,26 \cdot 10^{-3}$	$2,62 \cdot 10^{-3}$
^{96}Zr	$1,72 \cdot 10^{-4}$	$6,11 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$2,93 \cdot 10^{-3}$	$3,23 \cdot 10^{-3}$
^{95}Nb	$1,79 \cdot 10^{-4}$	$6,35 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,60 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$2,17 \cdot 10^{-3}$	$3,03 \cdot 10^{-3}$	$3,35 \cdot 10^{-3}$
^{103}Ru	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$4,04 \cdot 10^{-4}$	$8,59 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$2,21 \cdot 10^{-3}$
^{106}Rh	$4,81 \cdot 10^{-5}$	$1,73 \cdot 10^{-4}$	$2,65 \cdot 10^{-4}$	$4,43 \cdot 10^{-4}$	$5,03 \cdot 10^{-4}$	$6,02 \cdot 10^{-4}$	$8,40 \cdot 10^{-4}$	$9,30 \cdot 10^{-4}$
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$6,43 \cdot 10^{-4}$	$2,26 \cdot 10^{-3}$	$4,68 \cdot 10^{-3}$	$5,65 \cdot 10^{-3}$	$6,41 \cdot 10^{-3}$	$7,64 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$
^{132}Te	$4,22 \cdot 10^{-5}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$3,75 \cdot 10^{-4}$	$4,67 \cdot 10^{-4}$	$5,44 \cdot 10^{-4}$	$6,75 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$
^{131}I	$8,38 \cdot 10^{-5}$	$3,10 \cdot 10^{-4}$	$6,70 \cdot 10^{-4}$	$8,18 \cdot 10^{-4}$	$9,32 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$
^{132}I	$5,31 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$	$3,92 \cdot 10^{-3}$	$4,73 \cdot 10^{-3}$	$5,38 \cdot 10^{-3}$	$6,42 \cdot 10^{-3}$	$8,94 \cdot 10^{-3}$	$9,88 \cdot 10^{-3}$
^{133}I	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$5,04 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$2,46 \cdot 10^{-3}$	$2,72 \cdot 10^{-3}$
^{135}I	$3,74 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$2,59 \cdot 10^{-3}$	$3,11 \cdot 10^{-3}$	$3,52 \cdot 10^{-3}$	$4,19 \cdot 10^{-3}$	$5,80 \cdot 10^{-3}$	$6,40 \cdot 10^{-3}$
^{134}Cs	$3,61 \cdot 10^{-4}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$3,27 \cdot 10^{-3}$	$3,72 \cdot 10^{-3}$	$4,44 \cdot 10^{-3}$	$6,19 \cdot 10^{-3}$	$6,85 \cdot 10^{-3}$
^{136}Cs	$4,93 \cdot 10^{-4}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$	$3,60 \cdot 10^{-3}$	$4,35 \cdot 10^{-3}$	$4,94 \cdot 10^{-3}$	$5,90 \cdot 10^{-3}$	$8,22 \cdot 10^{-3}$	$9,08 \cdot 10^{-3}$
$^{137}\text{Cs} +$ $^{137\text{m}}\text{Ba}$	$1,31 \cdot 10^{-4}$	$4,69 \cdot 10^{-4}$	$9,93 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$2,29 \cdot 10^{-3}$	$2,54 \cdot 10^{-3}$
^{140}Ba	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$3,16 \cdot 10^{-4}$	$3,87 \cdot 10^{-4}$	$4,42 \cdot 10^{-4}$	$5,35 \cdot 10^{-4}$	$7,86 \cdot 10^{-4}$	$9,32 \cdot 10^{-4}$
^{140}La	$5,40 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$4,51 \cdot 10^{-3}$	$5,10 \cdot 10^{-3}$	$6,06 \cdot 10^{-3}$	$8,39 \cdot 10^{-3}$	$9,27 \cdot 10^{-3}$
^{143}Ce	$5,53 \cdot 10^{-5}$	$2,05 \cdot 10^{-4}$	$4,53 \cdot 10^{-4}$	$5,59 \cdot 10^{-4}$	$6,45 \cdot 10^{-4}$	$7,90 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$1,39 \cdot 10^{-3}$
^{144}Ce	$2,69 \cdot 10^{-6}$	$1,10 \cdot 10^{-5}$	$2,72 \cdot 10^{-5}$	$3,49 \cdot 10^{-5}$	$4,13 \cdot 10^{-5}$	$5,27 \cdot 10^{-5}$	$8,70 \cdot 10^{-5}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$

TAULUKKO 8.10 Eräiden laskeuman radionuklidien aiheuttama kermanopeus yhden metrin korkeudella eri jakaumakerrointen arvoilla (ICRU Report 53, 1994)

TAULUKKO 8.11 Efektiivisen annoksen annosuuntokertoimia eräille laskeuman radionuklideille maanpinnalla oleskelevälle ihmiselle, kun nuklidit muodostavat pinnalla olevan tasolähteen (Shleien et al. 1998).

Annosuuntokertoimet sisältävät myös beetasäteilyn osuuden.

Nuklidi	Efektiivisen annoksen annosuuntokerroin ($\mu\text{Sv/h}/(\text{kBq/m}^2)$)
^{54}Mn	$2,92 \cdot 10^{-3}$
^{58}Co	$3,65 \cdot 10^{-3}$
^{60}Co	$8,46 \cdot 10^{-3}$
^{65}Zn	$1,99 \cdot 10^{-3}$
^{95}Zr	$2,60 \cdot 10^{-3}$
^{95}Nb	$2,69 \cdot 10^{-3}$
^{103}Ru	$1,66 \cdot 10^{-3}$
^{106}Rh	$7,63 \cdot 10^{-4}$
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$9,54 \cdot 10^{-3}$
^{132}Te	$8,21 \cdot 10^{-4}$
^{131}I	$1,35 \cdot 10^{-3}$
^{132}I	$7,96 \cdot 10^{-3}$
^{133}I	$2,15 \cdot 10^{-3}$
^{135}I	$5,29 \cdot 10^{-3}$
^{134}Cs	$5,47 \cdot 10^{-3}$
^{136}Cs	$7,52 \cdot 10^{-3}$
$^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$
^{140}Ba	$6,48 \cdot 10^{-4}$
^{140}La	$7,78 \cdot 10^{-3}$
^{143}Ce	$1,00 \cdot 10^{-3}$
^{144}Ce	$7,31 \cdot 10^{-5}$

Koska maanpinta todellisuudessa on epätasainen ja koska radioaktiiviset aineet kulkeutuvat veden mukana nopeasti syvemmälle, antaa pintalähteelle laskettujen annosnopeuskertoimien käyttö oikean arvion vain tuoreelle kuivalle laskeumalle poikkeuksellisen tasaisilla paikoilla. Maanpinnan epätasaisuus vaikuttaa analogisesti samalla tavalla kuin jos lähde tunkeutuisi maan sisään (taulukko 8.12).

Niin maan pinnan epätasaisuuden vaikutus kuin laskeuman kulkeutuminen syvyysuunnassa voidaan ottaa huomioon valitsemalla jakaumakerroimen arvo sopivasti. Taulukon 8.10 perusteella laskeumanuklidien aiheuttama kermanopeus ei muutu kovin paljon jakaumakerroinvälillä $0,2 \dots 0,5 \text{ cm}^2/\text{g}$. Sekä tuoreessa että syvälle kulkeutuneessa laskeumassa α/ρ -arvolle $0,3 \text{ cm}^2/\text{g}$ lasketut kertoimet antavat suhteellisen hyvän arvion annosnopeudesta kyntämättömällä maalla. Kynetyllä pellolla taas laskeuman voidaan olettaa karkeasti jakautuneen tasaisesti 20 senttimetriä paksuun pintakerrokseen, jolloin voidaan soveltaa taulukossa 8.8 cesiumille ilmoitettua annosnopeuskerrointa.

	α/ρ ∞	α/ρ $0,1 \text{ cm}^2/\text{g}$
tasolähde	1,00	1,00
tasoitettu kenttä	1,00 – 0,83	1,00 – 0,97
ruohokenttä	0,83 – 0,74	0,97 – 0,94
karkea sora	0,74 – 0,64	0,94 – 0,88
kynnetty pelto	0,64 – 0,52	0,88 – 0,81

TAULUKKO 8.12 Maanpinnan epätasaisuuden suhteellinen vaikutus tuoreen ($\alpha/\rho = \infty$) ja maahan syvälle kulkeutuneen ($\alpha/\rho = 0,1 \text{ cm}^2/\text{g}$) ^{137}Cs -laskeuman aiheuttamaan kermanopeuteen

Peltomaan muokkaus vaikuttaa merkittävästi laskeuman syvyyssjakaamaan maaperässä ja siten annosnopeuteen. Tshernobylin turman jälkeen keväällä 1986 Suomessa tehtiin laskeumatilanteessa annosnopeusmittauksia peltoilla. Mittausten perusteella voitiin tehdä seuraavat päätelmät:

- Kynnetyllä pellolla laskeuman aiheuttama annosnopeus on 30 prosenttia pienempi kuin heinä- tai säntkipellolla
- Kun laskeuma tulee kyntämättömälle pellolle, kyntö ja äestys vähentävät annosnopeutta 70–80 prosenttia.
- Kun laskeuma tulee kynnetylle pellolle, äestys vähentää annosnopeutta 30 prosenttia.

ESIMERKKI 8.5

Tietyllä alueella on ääretön, tasainen ^{137}Cs -pintalähde – esimerkiksi tuore laskeuma – jonka aktiivisuuskate (pinta-aktiivisuus) on $10 \text{ kBq}/\text{m}^2$. Samaan aikaan ympäröivässä ilmassa on ^{133}Xe :n aktiivisuuspitoisuus $1 \text{ kBq}/\text{m}^3$. Kuinka suuri on ulkoisen säteilyn aiheuttama efektiivisen annoksen nopeus?

Käytettävä annosmuuntokerroin ^{137}Cs :lle saadaan taulukosta 8.11 ja ksenonille taulukosta 8.6.

Laskeuman aiheuttama annosnopeus lasketaan yhtälöstä (8.42)

$$\dot{E}_d = 10 \cdot 2,0 \cdot 10^{-3} \mu\text{Sv}/\text{h} = 20 \text{ nSv}/\text{h}$$

ja puoliäärettömän pilven aiheuttama annosnopeus yhtälöstä (8.35)

$$\dot{E}_a = 1000 \cdot 5,0 \cdot 10^{-6} \mu\text{Sv}/\text{h} = 5 \text{ nSv}/\text{h}$$

Kysytyy efektiivisen annoksen nopeus on näiden summa eli $25 \text{ nSv}/\text{h}$.

Lumen ja jään vaikutus

Lumen, veden ja jään vaimennuksen laskemiseksi on tunnettava näiden yhteinen vesi-arvo. Lumen tiheys vaihtelee runsaasti. Vastataneen lumen tiheys on keskimäärin $0,1 \text{ g/cm}^3$ (jolloin 100 mm:n lumikerroksen vesi-arvo on 10 mm), kun taas vanhan hankilumen tiheys saattaa olla jopa $0,5 \text{ g/cm}^3$. Etelä-Suomessa lumen keskimääräinen tiheys maaliskuussa on $0,25 \text{ g/cm}^3$. Suomessa Ilmatieteen laitos on tutkinut säteilymittausaseman havaitseman annosnopeuden vaimenemista lumen vesi-arvon kasvaessa. Vaimenemista voidaan kuvata seuraavan eksponenttiyhtälön avulla:

$$\dot{D} = \dot{D}_0 e^{-d \cdot 0,0095}. \quad (8.43)$$

Tässä D_0 on absorptioannosnopeus ilman lumen aiheuttamaa vaimennusta ja d lumikerroksen vesi-arvo (mm). Lumikerrokset, joiden vesi-arvot ovat 5, 10, 20, 50 ja 100 mm, vaimentavat säteilyä vastaavasti 5, 9, 17, 38 ja 61 prosenttia.

Rakennusmateriaalien tuottama ulkoinen säteily

Useat rakentamisessa käytettävät materiaalit sisältävät radioaktiivisia aineita. Näin ollen voivat esimerkiksi lattia, katto ja seinät olla sisätiloissa ulkoisen säteilyn lähteitä. Lisäksi takaisinsironta näistä rakenteista vaikuttaa annosnopeuteen. Edellä taulukossa 8.8 on annettu esimerkinomaisesti Monte Carlo -menetelmällä lasketut annosnopeuskertoimet suurehkoissa huoneessa, jonka betoniseinämien paksuus on 20 senttimetriä (katso myös taulukko 8.5 ja kuva 8.4). Pientalossa, jossa vain lattia on betonia, voidaan käyttää maaperän radioaktiivisille aineille sovellettavia kertoimia. Absorptioannosnopeus betonista valmistetussa asunnossa on noin 70 prosenttia suurempi kuin ulkona maaperällä, jonka aktiivisuuspitoisuus on sama kuin asunnon seinämissä.

Säteilyturvakeskuksen antaman ohjeen perusteella talonrakennustuotantoon käytettävien rakennusmateriaalien gammasäteilystä ei saa aiheutua 1 mSv:n ylittävää vuotuista efektiivistä annosta. Toimenpidearvolla tarkoitetaan keskimääräisen gammasäteilystä aiheutuvan säteilyannoksen ylitystä. Se on ilmaistu aktiivisuusindeksinä, johon vaikuttavat rakennusmateriaalin ^{40}K -, ^{232}Th - ja ^{238}U -aktiivisuuspitoisuudet. Talonrakennustuotantoon käytettävien materiaalien aktiivisuusindeksi on

$$I = \frac{c_{\text{Th}}}{200} + \frac{c_{\text{Ra}}}{300} + \frac{c_{\text{K}}}{3000} \quad (8.44)$$

missä c_{Th} , c_{Ra} ja c_{K} tarkoittavat ^{232}Th :n, ^{226}Ra :n ja ^{40}K :n aktiivisuuspitoisuuksien numeroarvoja valmiissa materiaalissa ilmaistuna yksikkönä Bq/kg. Jos aktiivisuusindeksi on 1 tai pienempi, materiaalille ei aseteta radioaktiivisuuden takia käyttörajoituksia. Jos indeksin arvo on suurempi kuin 1, toiminnan harjoittajan on osoitettava, että turvallisuustavoitteet saavutetaan.

8.8 | Ulkoinen beetasäteily

Beetasäteilyn vahingolliset vaikutukset kohdistuvat lähinnä ihoon ja välittömästi sen alla oleviin kudoksiin. Lyhyen kantaman takia beetasäteilyn mahdollisesti aiheuttamat vauriot ovat toisenlaisia kuin esimerkiksi gammasäteilyn tapauksessa, sillä beetasäteilyn koko energia absorboituu tyypillisesti vain pieneen osaan kudosta. Ihon kanssa kosketuksissa olevista voimakkaista säteilylähteistä emittoituva kova beetasäteily voikin aiheuttaa jopa akuutteja ja vakavia, joskin verrattain paikallisia säteilypalovammoja (kirja 4, Säteilyn terveystvaikutukset, luku 4.2).

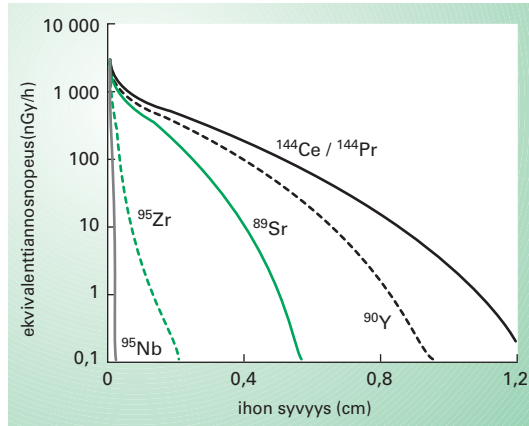
Beetasäteilyä emittoivien radioaktiivisten aineiden sijainti suhteessa kehoon ja säteilyn energia vaikuttavat ratkaisevasti säteilyaltistukseen. Ilman radioaktiivisista aineista tuleva beetasäteily altistaa kehon pintaa suhteellisen tasaisesti, kun taas laskeuman beetasäteily altistaa eniten alavartaloa. Ihon pintaan joutuneet beetasäteilyä lähettävät aineet säteilyttävät käytännössä vain kontaminoitunutta ihon kohtaa. Erikoistapauksena voidaan pitää erittäin aktiivisten niin sanottujen ”kuumien hiukkasten” (luku 3.6) aiheuttamaa säteilyaltistusta. Beetasäteilyn energia absorboituu tällöin hiukkasen välittömään ympäristöön ja jopa lähes pistemäisten säteilypalovammojen mahdollisuus on olemassa. Radioaktiivisten aineiden jakauma kehon pinnassa tai lähellä pintaa onkin tarkkaan tunnettava arvioitaessa beetasäteilyn aiheuttamaa annosta. Annos riippuu erittäin voimakkaasti tarkasteltavasta ihon syvyydestä ja erityisesti pistemäisen säteilylähteen tapauksessa siitä pinta-alasta, jolle annos lasketaan (kuva 8.9).

Beetasäteilyn aiheuttama annos

Beetasäteilystä aiheutuvan annoksen laskeminen on usein hankalampaa kuin gammasäteilystä aiheutuvan annoksen laskeminen. Beetasäteilyn energijakauma on jatkuva ja säteilyn absorptio ja sironta väliaineessa ennen kohdetta vaikuttaa ratkaisevasti saadun annoksen suuruuteen. Esimer-

KUVA 8.9 Pistemäisestä ihon pinnalla olevasta beetasäteilylähteestä aiheutuva ekvivalenttiansnosnopeus ihon syvyyden funktiona, kun kyseisen nuklidin aktiivisuus on 1 Bq.

Annosnopeus kullekin ihon syvyydelle on laskettu keskiarvona neliösenttimetrin pinta-alalle.



kiksi paksut kumisaappaat voivat oleellisesti pienentää maaperästä tulevan pehmeän beetasäteilyn aiheuttamaa annosta ihoon, kun taas saappaiden aiheuttaman absorptioon vaikutus kovaan beetasäteilyyn on paljon pienempi. Kulkiessaan väliaineessa varauksiset beetahiukkaset vuorovaikuttavat jatkuvasti väliaineen atomien elektroniverhon ja joskus jopa atomin ydinten kanssa. Niinpä beetahiukkaset menettävät vähitellen energiaansa, jolloin myös säteilyn energiajakauma muuttuu jatkuvasti. Myös beetahiukkasten kulkusuunta voi yksittäisessä vuorovaikutuksessa muuttua huomattavasti.

Beetasäteilyä aiheutuvan annoksen laskemiseksi on kehitetty useita menetelmiä. Vanhimmat ja vieläkin käytössä olevat menetelmät perustuvat empiirisiin funktioihin, joiden käyttökelpoisuus riippuu alkuehtojen toteutumisesta – esimerkiksi siitä, onko kyseessä pistemäinen säteilylähde vai tasainen kontaminaatio. Eräissä semiempiirisissä menetelmissä hyödynnetään esimerkiksi samaenergisille elektroneille laskettuja annosjakamia laskettaessa beetasäteilyä lähettävien nuklidien aiheuttamaa annosta. Eräät tietokoneohjelmat, kuten esimerkiksi Yhdysvalloissa paljon käytetyn VARSKIN-ohjelman eri versiot käyttävät puolestaan valmiiksi laskettuja annostekijöitä. VARSKINilla voidaan laskea ihoannoksia tilanteissa, joissa säteilevä aine on jakautuneena ihon pintaan esimerkiksi pistemäisesti, levyinä tai tietyin kokoisena kolmidimensionaalisena kappaletena tai sijaita vaatetuksen päällä.

Kehittyneimmät ja annoslaskujen kannalta tärkeimmät tietokoneohjelmat käyttävät Monte Carlo -tyyppistä lähestymistapaa simuloitaessa beetahiukkasten ja fotonien kulkeutumista ilmassa ja kudoksessa. Niiden käyttö edellyttää kuitenkin syvää asiantuntemusta. Käytännön tilanteissa on usein helpointa käyttää esimerkiksi juuri Monte Carlo -menetelmällä valmiiksi

laskettuja annosnopeuskertoimia. Niissä on kuitenkin rajoituksena se, että kertoimet pätevät vain tietyllä tavoin ihon pintaan tai vaatekukseen jakautuneen säteilevän aineen tapauksessa (taulukko 8.13). Mikäli kontaminoivan aineen kerros on paksu tai säteilevien hiukkasten koko on suuri, on otettava huomioon beetasäteilyn itseisabsorptio lähdemateriaalissa.

Nuklidi	Pistelähde, β ($\mu\text{Gy/h}/\text{Bq}$)	Pistelähde, γ ($\mu\text{Gy/h}/\text{Bq}$)	Pintalähde, β ($\mu\text{Gy/h}/(\text{Bq}/\text{cm}^2)$)	Pintalähde, γ ($\mu\text{Gy/h}/(\text{Bq}/\text{cm}^2)$)
^{54}Mn	-	$2,62 \cdot 10^{-2}$	-	$4,57 \cdot 10^{-2}$
^{60}Co	0,935	$2,39 \cdot 10^{-2}$	1,04	$8,42 \cdot 10^{-2}$
^{65}Zn	0,0217	$2,17 \cdot 10^{-2}$	0,0240	$3,58 \cdot 10^{-2}$
^{95}Zr	1,06	$1,30 \cdot 10^{-2}$	1,17	$3,06 \cdot 10^{-2}$
^{95}Nb	0,230	$1,30 \cdot 10^{-2}$	0,249	$3,11 \cdot 10^{-2}$
^{103}Ru	0,568	$1,25 \cdot 10^{-2}$	0,622	$2,38 \cdot 10^{-2}$
^{106}Rh	1,85	$4,53 \cdot 10^{-3}$	1,88	$9,39 \cdot 10^{-3}$
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	0,407	$4,09 \cdot 10^{-2}$	0,439	$1,06 \cdot 10^{-1}$
^{132}Te	0,813	$1,20 \cdot 10^{-2}$	0,901	$1,90 \cdot 10^{-2}$
^{131}I	1,32	$1,23 \cdot 10^{-2}$	1,42	$2,20 \cdot 10^{-2}$
^{132}I	1,58	$3,79 \cdot 10^{-2}$	1,62	$9,15 \cdot 10^{-2}$
^{133}I	1,57	$1,38 \cdot 10^{-2}$	1,62	$2,82 \cdot 10^{-2}$
^{135}I	1,51	$1,54 \cdot 10^{-2}$	1,57	$5,14 \cdot 10^{-2}$
^{134}Cs	1,00	$2,94 \cdot 10^{-2}$	1,07	$6,68 \cdot 10^{-2}$
^{136}Cs	0,888	$3,44 \cdot 10^{-2}$	0,984	$8,64 \cdot 10^{-2}$
$^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$	1,43	$1,22 \cdot 10^{-2}$	1,54	$2,69 \cdot 10^{-2}$
^{140}Ba	1,46	$1,00 \cdot 10^{-2}$	1,54	$1,46 \cdot 10^{-2}$
^{140}La	1,64	$2,61 \cdot 10^{-2}$	1,68	$7,85 \cdot 10^{-2}$
^{143}Ce	1,48	$9,78 \cdot 10^{-3}$	1,5	$1,71 \cdot 10^{-2}$
^{144}Ce	0,815	$1,77 \cdot 10^{-3}$	0,901	$2,34 \cdot 10^{-3}$

TAULUKKO 8.13 Ihon säteilyannoksen annosmuuntokertoimia taulukossa 8.11 mainituille radionuklideille (lähteet: Cross W G, Freedman N O, Wong P Y. Radiation Protection Dosimetry 40, 1992; Rohloff F, Heinzelmann M. Radiation Protection Dosimetry 14, 1986).

Kertoimet on annettu sekä beeta- että gammasäteilylle ja ne on laskettu keskiarvona neliösenttimetrin pinta-alaa kohden ihon tyvisolukerroksen nimellisyydelle $70 \mu\text{m}$ siinä kohdassa, missä annos on suurimmillaan. Pistemäisen säteilylähteen tapauksessa nuklidin aktiivisuudeksi oletetaan 1 Bq ja pintakontaminaation tapauksessa $1 \text{ Bq}/\text{cm}^2$. Annosnopeuskertoimet vastaavat pinta-annosta $H_p(0.07)$, katso kirja 1, luku 2.4.2.

Beetasäteilyn kyky aiheuttaa jopa deterministisiä säteilyhaittoja on otettu huomioon myös säteilylainsäädännössä. Säteilyasetuksessa on säädetty ihon ekvivalenttiannosraja säteilytyötä tekeville työntekijöille ja väestölle.

Ihon ekvivalenttiannos lasketaan 1 cm^2 :n alueelle kohdistuvana keskimääräisenä annoksena ja tarkastelusyvyyys on $70 \text{ }\mu\text{m}$. Säteilytyötä tekeville työntekijöille ihon ekvivalenttiannoksen raja on 500 mSv vuodessa ja väestölle 50 mSv vuodessa. Koska säteilyn painotuskerroin elektroneille on 1 voidaan taulukkoa 8.13 soveltaa arvioitaessa sitä, aiheuttaako tietty kontaminaatio annosrajan mahdollisen ylityksen. Esimerkiksi pistemäinen ^{134}Cs :ää sisältävä ja aktiivisuudeltaan 500 kBq :n hiukkanen ihon pinnassa aiheuttaa tunnissa säteilytyötä tekevän työntekijän ihoannosrajan ylityksen. Jos pistemäiselle iholla olevalle kuumalle hiukkaselle ei ole käytettävissä tarkkaa annosarviota, voidaan käyttää seuraavaa oletusta: ihon ekvivalenttiannos ei ylitä arvoa 500 mSv , jos kokonaisbeetaemissio ei altistusajana ylitä 10^9 :ää beetahiukkasta.

8.9 | Ulkoisen säteilyn havainnointi

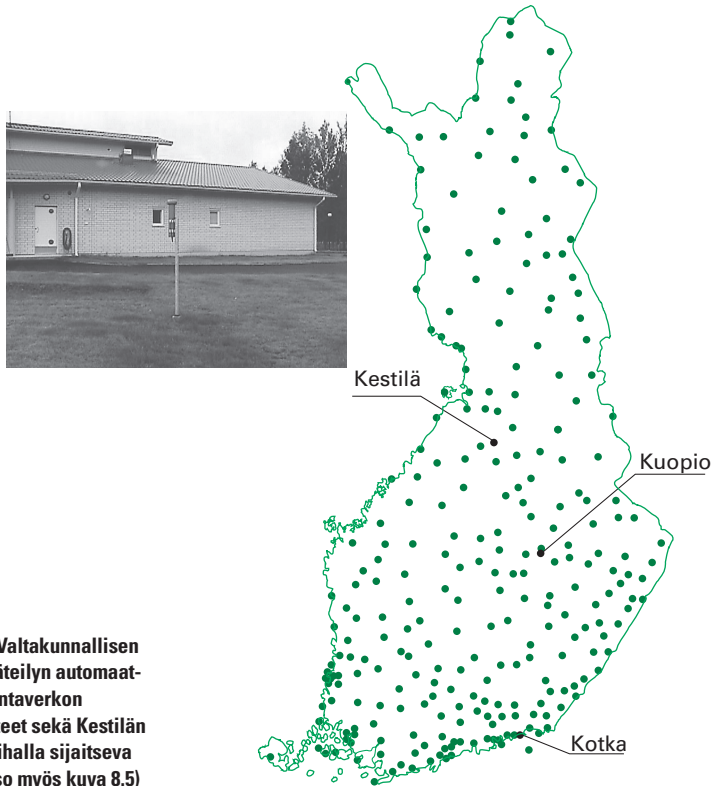
Ympäristössä tehtäviä säteilymittauksia tarvitaan annosnopeuden nopeaan arvioimiseen ja kartoittamiseen sekä radioaktiivisten aineiden tunnistamiseen. Mittauksia tarvitaan myös luonnonvarojen, uraanin ja muiden mineraalien etsinnässä. Säteilymittauksia tehdään esimerkiksi ydinvoimaloiden aiheuttamien ympäristövaikutusten valvomiseksi.

Luonnon taustasäteilyn annosnopeudessa (noin $0,1 \text{ }\mu\text{Sv/h}$) tapahtuvia pieniä muutoksia ei voi mitata tavallisilla säteilyn yleismittareilla, koska niiden erottelukyky ei siihen riitä. On käytettävä suurikokoisia geigerputkia, tuikeilmaisimia tai paineionisaatiokammioita. Mittalaitteiden näyttämän luotettavuutta voidaan parantaa käyttämällä usean minuutin mittausaikaa. Väestön saamien säteilyannoksien valvonnassa voidaan hyödyntää myös termoloisteilmaisimia (kirja 1 luku 4.6).

Suomessa käytössä olevat annosnopeusmittarit kuvaavat mitattavaa säteilykenttää annosekvivalenttinopeuden avulla (katso kirjan 1 luku 2, Suureet ja yksiköt). Sen yksikkö on sievertiä tunnissa (Sv/h). Ympäristössä vallitsevan säteilykentän keskimääräinen energia on lähellä ^{137}Cs :n gammaenergiä $0,662 \text{ MeV}$. Tälle energialle lasketut annosekvivalenttinopeudet ja siten mittarien näyttämät Sv/h-yksiköissä ovat noin 20 prosenttia suurempia kuin tässä luvussa esitetyt ulko- ja sisäympäristössä vallitsevat ilmalle lasketut absorptioannosnopeudet Gy/h-yksiköissä. Aikaisemmin käytetyillä mittalaitteilla, jotka antoivat säteilytysnopeuden yksikössä röntgeniä tunnissa (R/h), vastaavuus annosekvivalenttinopeuden kanssa on hyvä, kun käytetään muunnosta $1 \text{ R} = 0,01 \text{ Sv}$.

Ulkoisen säteilyn valvontaverkko

Ulkoisen säteilyn valvonnan kivijalka Suomessa on Säteilyturvakeskuksen ylläpitämä automaattinen valvontaverkko. Verkkoon kuuluu noin 300 keskus- ja ala-asemaa eri puolilla maata (kuva 8.10). Kunkin aseman säteilyanturi koostuu kahdesta saman suojakuoren sisällä olevasta erikokoisesta geigerputkesta, jotka yhdessä kattavat mittausalueen $0,01 \mu\text{Sv/h}$ – 10Sv/h .



KUVA 8.10 Valtakunnallisen ulkoisen säteilyn automaattisen valvontaverkon mittauspisteet sekä Kestilän kirjaston pihalla sijaitseva anturi (katso myös kuva 8.5)

Asemat sijaitsevat yleensä palolaitoksilla ja hätäkeskuksissa. Verkkoa ylläpidetäänkin Säteilyturvakeskuksen ja paikallisten pelastusviranomaisten yhteistyönä. Keskusasemien tietokoneet keräävät itsenäisesti annosnopeustiedot kaikilta niihin liitetyiltä antureilta. Normaalioloissa säteilymittaustulokset luetaan valtakunnalliseen säteilyvalvonnan tietosysteemiin USVAan kerran vuorokaudessa. USVA esittää tiedot esimerkiksi karttapohjan päällä olevina eri värisinä ympyröinä, haluttaessa myös muulla tavoin teemoitettuihin. Valvontaverkon tietoliikenne perustuu pääasiassa puhelinlinjoihin.

Mikäli hälytysraja jollakin mittausasemalla ylittyy, asema lähettää oman keskusasemansa kautta hälytysviestin sekä USVAan että Helsingin hätäkeskukseen. USVA välittää hälytystiedot automaattisesti edelleen valvonnasta vastaavien viranomaispäivystäjien matkaviestimiin sekä käynnistää hälyttäneen aseman ympäristössä sijaitsevien muiden asemien uusimpien mittaustulosten hakemisen.

Puolustusvoimilla on oma säteilymittausverkkonsa, jonka tulokset saadaan tarvittaessa myös USVA-järjestelmään (ja päinvastoin). Ilmatieteen laitoksella on erillinen muutaman aseman verkko, jossa antureina käytetään NaI-tuikeilmaisimia.

Automaattisten valvontaverkkojen lisäksi muun muassa kunnilla on valmiudet tehdä säteilymittauksia joko pelastustoimintaan tarkoitetuilla kannettavilla annosnopeusmittareilla tai paikallisesti asennetuilla jatkuvatoimisilla mittareilla. Säteilyvalvonta- ja pelastusviranomaisilla on käytävissään myös liikkuvia mittausjärjestelmiä.

Spektrometrinen havainnointi

Maaperässä olevien eri radionuklidien määrä (aktiivisuus) ja niiden aiheuttama annosnopeus voidaan saada selville joko ottamalla näyte maaperästä ja mittaamalla se laboratoriossa esimerkiksi gammaspektrometrilla tai viemällä mittauslaitteisto kentälle tutkittavalle paikalle. Kentällä tehtävän mittauksen etuna on, että ilmaisin havaitsee säteilyä hyvin laajalta alueelta; tällainen suora mittaus on myös nopea. Ilmaisin asetetaan tavallisesti metrin korkeudelle maasta avoimelle paikalle. Mikäli radionuklidien syvyysjakauma tunnetaan, mitatun spektrin kokonaisabsorptiopiikeistä (fotopiikeistä) voidaan laskea eri nuklidien aiheuttama annosnopeus ja niiden aktiivisuus maaperässä (kirja I luku 5.2).

Radionuklidien syvyysjakauma riippuu mitattavan maaperän laadusta, laskeumatyypistä ja ajankohdasta, mutta paikalliset erot syvyysjakauksissa ovat yleensä pieniä verrattuna laskeuman määrän eroihin. Tuoreen laskeuman tapauksessa voidaan radioaktiivisille aineille aluksi olettaa jokin pieni relaksaatiosyvyys. Koska kuitenkin siroamaton gammavuo riippuu voimakkaammin relaksaatiosyvyydestä kuin annosnopeus (luku 8.7), mittausten luotettavuutta voidaan huomattavasti parantaa ottamalla mitattavalta alueelta myös maanäytteitä ja määrittämällä niistä todellinen relaksaatiosyvyys.

Nuklidin pitoisuuden c (Bq/g tai Bq/m²) ja piikin pinta-alaa vastaavan laskentataajuuden N_f (havaittujen pulssien lukumäärä aikayksikköä kohden) suhde voidaan esittää kaavalla

$$\frac{N_f}{c} = \left(\frac{N_0}{\varphi} \right) \left(\frac{N_f}{N_0} \right) \left(\frac{\varphi}{c} \right) \quad (8.45)$$

missä tekijä N_0/φ antaa ilmaisimen akselin suunnassa (tai jossain muussa referenssisuunnassa) tulevien fotonien laskentataajuuden suhteen siroamattomien fotonien kertymänopeuteen. Suuntakorjauskerroin N_f/N_0 ottaa puolestaan huomioon ilmaisimen tehokkuuden. Se voidaan laskea kertymänopeuden derivaatan $d\varphi/d\Theta$ ja ilmaisimen tehokkuuden suuntavasteen avulla. Tekijä φ/c ilmoittaa maaperän aktiivisuuspitoisuuden aiheuttaman siroamattomien fotonien kertymänopeuden (yhtälöt 8.39–8.41).

Tietyn radionuklidin kokonaisabsorptiopiikin laskentataajuuden N_f suhde sironnan vaikutukset sisältävään nuklidin aiheuttamaan annosnopeuteen \dot{D} lasketaan jakamalla yhtälön (8.45) molemmat puolet tarkasteltavan nuklidin kyseistä lähdegeometriaa edustavalla annosmuuntokertoimella \dot{D}/c (vertaa luku 8.7). Näin saatavien kertoimien avulla voidaan arvioida havaittujen nuklidien aiheuttama annosnopeus.

Säteilytilanteen kartoitus ja liikkuvat mittauslaitteet

Laajalle alueelle levinneiden radionuklidien kartoittamiseksi tarvitaan liikkuvalla alustalla rakennettuja mittauslaitteistoja. Laskeumaa voidaan kartoittaa ilmasta lentokoneilla ja helikoptereilla tai maan pinnalta säteilynlisäimien varustetuilla autoilla. Mittauksia liikkuvalla alustalla voidaan myös tehdä radioaktiivisia aineita sisältävän pilven ylikulun aikana, mutta tällöin miehistön ja kaluston kontaminoitumisvaara on suuri. Ennen kuin mittauspartioita lähetetään säteilytilanteen varhaisvaiheessa kentälle, tulee varmistua siitä, että saavutettavan tiedon antama hyöty on vaaratekijöitä suurempi. Eräs tulevaisuuden menetelmä säteilytiedustelussa saattaa olla säteilynlisäimien varustettujen miehittämättömien ilma-alusten käyttö.

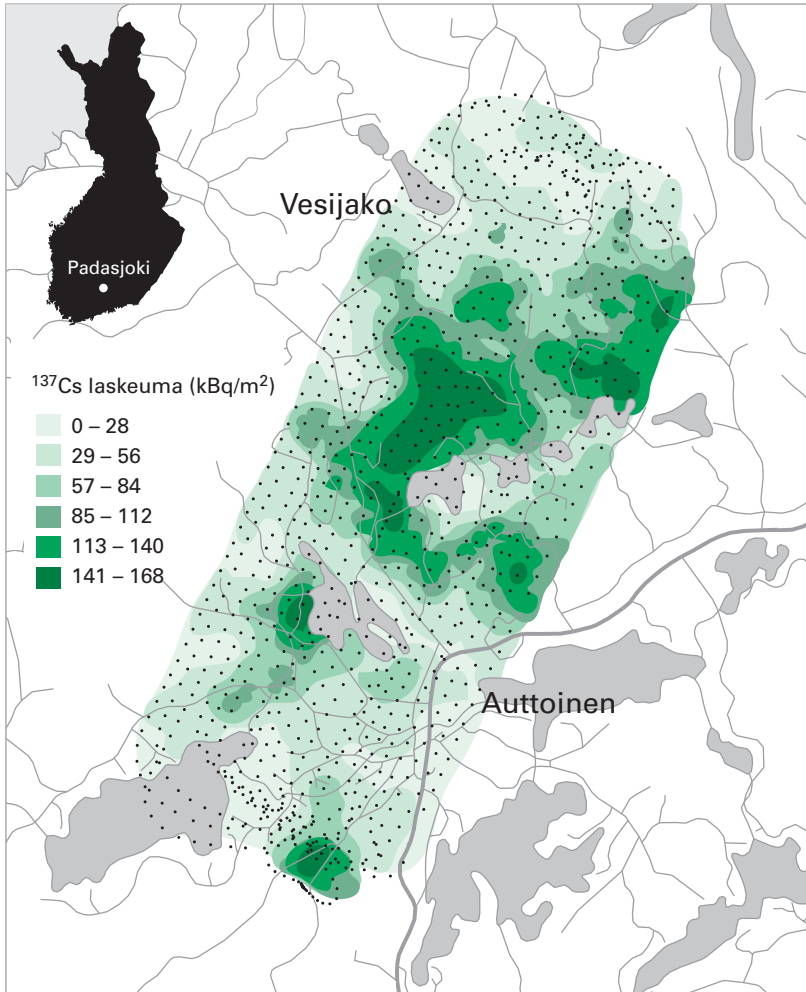
Liikkuviissa mittauksissa käytetään lyhyitä mittausjaksoja. Mikäli jaksota pidennetään, paikkaresoluutio huononee vastaavasti. Ilma-aluksissa tehtävissä mittauksissa mittausjakson pituus on sekunnista muutama sekuntiin ja autossa tehtävissä mittauksissa muutamista sekunneista korkeintaan minuuttiin. Esimerkiksi 540 km/h lentävä lentokone liikkuu sekunnissa 150 metriä, 30 km/h ajavalle autolle sama matka kestää 18 se-

kuntia. Jotta lyhyessä mittausajassa saataisiin mahdollisimman paljon informaatiota, kannattaa käyttää mahdollisimman tehokkaita spektrometristä dataa tuottavia ilmaisimia. Tehokkuudeltaan parhaita – mutta usein hankalakäyttöisiä – ovat suuret tilavuudeltaan yli kymmenen litran NaI-ilmaisimet, joita yleisesti käytetään lentokartoituksissa ja myös malminetsinnässä. Laskeumatilanteessa pienempi HPGe-ilmaisim (kirja 1 luku 5.2) on kuitenkin hyvän radionuklidien tunnistuskyvyn takia parempi, ja säteilyn intensiteetin ollessa korkea sen tehokkuuskin on täysin riittävä. Jos ympäristössä on suuri määrä radioaktiivisia aineita, on mahdollista, että tehokkaimmat ilmaisimet voivat ylikuormittua. Lentokalustolla voidaan silloin nousta korkeammalle, mutta tällöin kuitenkin paikkaresoluutio huononee.

Liikkuvilla alustoilla tehtäviin annosnopeusmittauksiin hyvin soveltuva laite on suurikokoinen kenttäkäyttöön tarkoitettu paineionisaatiokammio, jonka herkkyyden takia voidaan käyttää lyhyitä mittausaikoja. Myös tilavuudeltaan huomattavasti pienempiä GM-putkia voidaan käyttää, mikäli annosnopeus on moninkertainen normaaliin ympäristössä vallitsevaan säteilytaustaan verrattuna.

Säteilyhavainnon liittäminen oikeaan paikkaan on mittaustoiminnan oleellinen osa. Kun mittauksia tehdään suuria määriä, tulee paikantamisen tapahtua automaattisesti. Paikkatiedon tuottamiseen käytetään yleisesti satelliittiperustaista GPS-paikkannusta. Säteilymittaustulosten ja paikkakoordinaattien yhdistäminen tapahtuu automaattisesti tietokoneen ohjaamana. Tulokset voidaan esittää esimerkiksi tasoitettuna karttana (kuva 8.11) tai yksittäiset mittausarvot voivat olla kartalla erivärisinä pisteinä. Laskeumakartoituksessa spektrometrin mittauksen tuloksena saadaan yleensä useita karttoja, yksi jokaista havaittua nuklidia tai nuklidiryhmää kohden.

Ilma-alukset soveltuvat erityisesti laajojen alueiden säteilykartoitukseen. Lentokone tai helikopteri ei tarvitse tiestöä ja mittaukset tehdään yleensä lentämällä alueen yli useita kertoja ennalta suunniteltuja yhdensuuntaisia lentoviivoja pitkin. Viivojen välinen etäisyys vaihtelee halutun paikkaresoluution sekä kartoitettavan alueen koon ja käytössä olevien resurssien mukaan muutamasta kymmenestä metrillä ylöspäin. Maaston muodot, kuten esimerkiksi suuret kalliot ja taajamissa korkeat rakennukset, vaikeuttavat lentokalustolla mitatun tiedon tulkintaa. Ilma-aluksista tehtävissä mittauksissa ilmaisimen havaitsema pinta-ala on varsin suuri, joten pienet paikalliset poikkeavuudet eivät yleensä erotu. Erityisesti märkälaskeuma voi paikallisen valuman takia olla metrien mittakaavassa varsin laikuttaista, vaikka se kymmenien tai satojen metrien mittakaavassa vaikuttaakin tasaiselta.



KUVA 8.11 Padasjoella helikopteriin asennetulla NaI ilmaisimella vuonna 1995 tehty ¹³⁷Cs:n laskeumakartoitus

Kartoitetun alueen koko on 2,5 × 5 km. Kuvassa pisteviivoina näkyvien lentoviivojen välinen etäisyys on keskimäärin 125 m ja lentokorkeus 60 m. Harmaana näkyvät alueet ovat järviä, joista radioaktiiviset aineet ovat siirtyneet pois valumana tai pohjasedimenttiin.

Autolla mitattaessa pystytään havainnoimaan vain teitä ja teiden lähialueita. Tiestön vaihtelevat pinnoitteet ja ojat aiheuttavat huomattavia muutoksia säteilykenttään, jolloin alueellisesti edustavan mittaustiedon saaminen ei ole helppoa. Toisaalta autolla tehtävien mittausten etuna on se, että autolla voidaan liikkua siellä missä ihmisetkin liikkuvat. Näin saadut mittaustulokset ovat sellaisenaan käytettävissä säteilysuojelun tarpeisiin. Mikäli halutaan erityisen tarkkaa tietoa joltakin alueelta, voidaan suorittaa spektro-

metrisiä mittauksia kävellen tai polkupyörällä liikkuen; tällöin voisi esimerkiksi pahoin saastuneen kaupungin puistoalueita mitata selässä kannettavalla laitteistolla.

Liikkuville mittausalustoille asennettujen laitteiden kalibroinnille pätee samat periaatteet kuin laitteille, joita käytetään tietyssä paikassa tehtäviin mittauksiin (yhtälö 8.45). Etenkin ilma-aluksissa tehtävissä mittauksissa laitteistoja voidaan käyttää eri korkeuksilla, jolloin säteilyn kulma-riippuvuudet muuttuvat ja myös ilman aiheuttama vaimennus muuttuu merkittäväksi korkeuden kasvaessa. Huomattava osuus tuoreesta laskeumasta voi olla kiinni puiden lehvästössä tai neulasissa, mikä voi aiheuttaa hyvin epähomogeenisen säteilykentän erityisesti maan pinnalla suoritettavissa mittauksissa.

Liikkuville alustoille rakennetuilla laitteilla voidaan tarvittaessa myös etsiä kadonneita säteilylähteitä. Sellaiset GBq-luokan suojaamattomat lähteet, joiden emittoimien gammojen energia on satoja keV tai suurempi (esimerkiksi ^{137}Cs ja ^{60}Co), havaitaan lentokalustolla helposti ja autolla tehdyissä mittauksissa hyvissä olosuhteissa jopa yli sadan metrin päästä. Autolla voidaan myös havaita huomattavan paljon pienempiä lähteitä, mikäli ne ovat lähellä ajoreittiä.

KIRJALLISUUTTA

Arvela H. Evaluation of detector responses to natural environmental and fall-out gamma radiation. *Radiation Protection Dosimetry* 1988; 24: 343–345.

Cross W G, Freedman N O, Wong P Y. Beta ray dose distributions from skin contamination. *Radiation Protection Dosimetry* 1992; 40: 149–168.

Finck R R. High resolution field gamma spectrometry and its application to problems in environmental radiology. Doctoral Dissertation. Malmö, Sweden: Lund University, Department of Radiation Physics, 1992.

Goldstein H and Wilkins J E Jr. Calculations of the penetration of gamma rays. Final report. USAEC Report NYO-3075. Nuclear Development Associates, Inc. 1954.

Hatakka J, Paatero J, Viisanen Y, Mattsson R. Variations of external radiation due to meteorological and hydrological factors in Central Finland. *Radiochemistry* 1998; 40: 515–519.

International Atomic Energy Agency. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. Vienna: IAEA, 1996.

International Commission on Radiation Units and Measurements. Gamma-ray spectrometry in the environment. ICRU Report 53. Bethesda, Maryland: ICRU, 1994.

Jaeger RG (editor). Engineering compendium on radiation shielding, Vol. I. New York: Springer-Verlag, 1968.

Kocher DC. Dose rate conversion factors for external exposure to photons and electrons. NUREG/CR-1918, ORNL/NUREG-790. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1981.

RESUME 95: Rapid environmental surveying using mobile equipment. NKS Report. Copenhagen, Denmark: NKS, 1997.

Rohloff F, Heinzelmann M. Dose rates by photon radiation to the basal layer of the epidermis in the case of skin contamination. *Radiation Protection Dosimetry* 1996; 63: 15–28.

Shleien B, Slaback EA Jr., Birsky BK (editors). *Handbook of health physics and radiological health*. Third edition. Baltimore, Maryland: Williams & Wilkins, 1998.