

Hilma Saarinen

# **RADONIN JATKUVATOIMINEN OPTINEN HAVAINNOINTI**

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Prof. Juha Toivonen  
Toukokuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Hilma Saarinen: Radonin jatkuvatoiminen optinen havainnointi  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknis-luonnontieteellinen tutkinto-ohjelma  
Toukokuu 2024

---

Radon on luonnossa esiintyvä radioaktiivinen kaasu. Kun radon hajoaa, syntyy suurienerginen alfahiukkanen. Alfahiukkasen energia muuttuu törmäyksien seurauksena atomien viritystiloiksi, jotka purkautuvat emittoiden fotonin. Työssä perehdytään radonin pitoisuuden määrittämiseen jatkuvatoimisen optisen havainnoinnin, eli syntyneiden fotoneiden havaitsemisen avulla.

Aluksi käydään läpi alfasäteilyn perusteet, minkä jälkeen perehdytään itse radonin aiheuttamaan säteilyyn ja sen vaikutuksiin. Pitkä altistuminen suurille pitoisuuksille radonia aiheuttaa terveysriskin. Suomessa esiintyy suuria radonpitoisuuksia muun muassa maaperän korkean uraanipitoisuuden ja kylmän ilmaston takia. Maaperän radon pääsee sisätiloihin rakennusten alipaineen takia. Sisätilan radonpitoisuuksien mittaamiseen käytetään useimmiten radonpurkkia. Työssä esitellään radonpurkin, Lucas-kammion sekä ionisaatiokammion toimintaperiaatteet. Tämän jälkeen perehdytään radonin optisen havainnoinnin perusteisiin ja mittauksissa käytetyn mittauslaitteiston toimintaan.

Työssä hyödynnetään Tampereen yliopiston optiikan laitoksella aiemmin suoritettujen mittausdataa. Mittauksissa tutkittavaa kaasua pumpataan mittauskammion läpi. Kammiossa tapahtuvat hajoamiset havaitaan optisesti valomonistinputkien avulla. Valomonistinputket ovat erityisen herkkiä, minkä takia mittauksista saadaan myös virhesignaaleja. Virhesignaalien ja radonin hajoamisesta peräisin olevien signaalien lisäksi signaaleja tulee myös radonin tytärindien polonium-218:n ja polonium-214:n hajoamisesta. Radonin pitoisuuden määrittämistä varten täytyy mittauksista saadusta datasta pystyä erottamaan radonin osuus. Tätä varten määritellään kammion kokonaisaktiivisuutta kuvaava funktio. Funktio sovitetaan mittausdataan kertoimien avulla. Saatujen kertoimien avulla kammion kokonaisaktiivisuutta kuvaavaa funktiota voidaan hyödyntää myös muiden tutkittavien kaasujen radonpitoisuuden määrittämiseen.

Mittausajan minimoimiseksi radonin tytärindien polonium-214:n vaikutus mittausdataan poistettiin. Tämän ansiosta radonpitoisuus voidaan määrittää mittauksissa käytetyn mittalaitteiston avulla 4 h sijasta jo alle puolen tunnin mittausajalla. Jotta mittausaika saataisiin vielä lyhyemmäksi, täytyisi kammion kokonaisaktiivisuutta kuvaavan funktion kaikki kertoimet saada määritettyä tarkemmin. Tämä voitaisiin mahdollisesti tehdä toistamalla mittauksia eri kaasuille.

Radonin jatkuvatoimisen optisen havainnoinnin voidaan todeta olevan toimiva tapa radonin pitoisuuden määrittämiseen. Haasteita menetelmään tuo laitteiston herkkyydestä johtuva taustakohinan määrä sekä kammion kokonaisaktiivisuutta kuvaavan funktion kertoimien valitsemisen epätarkkuus. Menetelmässä on siis vielä kehitettävää ja näin ollen se ei ainakaan vielä tule korvaamaan muita radonin havainnointimenetelmiä.

Avainsanat: alfasäteily, radioluminesenssi, optinen havainnointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto . . . . .	1
2.	Radon säteilylähteenä . . . . .	3
2.1	Alfasäteily . . . . .	3
2.2	Radonista peräisin oleva säteily . . . . .	5
2.3	Radon Suomessa . . . . .	8
2.4	Radonin terveysvaikutukset. . . . .	10
3.	Radonin havainnointimenetelmät . . . . .	12
3.1	Radonmittauspurkki. . . . .	12
3.2	Lucas-kammio . . . . .	14
3.3	Ionisaatiokammio. . . . .	14
4.	Alfasäteilyn optinen havainnointi . . . . .	16
4.1	Luminesenssi . . . . .	16
4.2	Radioluminesenssi . . . . .	16
5.	Mittausmenetelmät . . . . .	18
5.1	Mittauslaitteisto . . . . .	18
5.2	Mittausjärjestelyt . . . . .	19
6.	Kokonaisaktiivisuus mittauskammiossa . . . . .	21
6.1	Kokonaisaktiivisuutta kuvaavan funktion muodostaminen . . . . .	21
6.2	Kokonaisaktiivisuutta kuvaavan funktion sovitus. . . . .	24
7.	Tulokset ja analyysi. . . . .	25
7.1	Funktion sovitus mittausdataan . . . . .	25
7.2	Radonin pitoisuuden määrittäminen funktion avulla . . . . .	27
7.3	Mittausajan minimointi. . . . .	28
7.4	Virhearvio . . . . .	29
8.	Yhteenveto . . . . .	32
	Lähteet . . . . .	34

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$F$	pumppauksen virtausnopeus
$K_t$	tytärytimen kineettinen energia
$K_\alpha$	alfahiukkasen kineettinen energia
$T_{1/2}$	puoliintumisaika
$V$	mittauskammion tilavuus
$\lambda$	hajoamisvakio
$m_t$	tytärytimen massa
$m_\alpha$	alfahiukkasen massa
$v_t$	tytärytimen nopeus
$v_\alpha$	alfahiukkasen nopeus
Bq	Becquerel
cps	lukumäärä sekunnissa (engl. counts per second)
PMT	valomonistinputki (engl. photomultiplier tube)
STUK	Säteilyturvakeskus (engl. Radiation and Nuclear Safety Authority)
TAU	Tampereen yliopisto (engl. Tampere University)
TUNI	Tampereen korkeakouluyhteisö (engl. Tampere Universities)
url	verkkosivun osoite (engl. Uniform Resource Locator)

# 1. JOHDANTO

Radon on väritön ja hajuton radioaktiivinen kaasu, jota vapautuu ilmaan muun muassa maaperän uraanin hajotessa. Radonin hajotessa syntyy ionisoivaa säteilyä, mikä on haitallista eliöille, mukaan lukien ihmisille. Erityisen haitallista radon on päästessään sisätiloihin, jolloin ihmiset voivat altistua pitkäaikaisesti suurille annoksille säteilyä. Radonaltistumisen on arvioitu aiheuttavan Suomessa vuosittain 150–270 keuhkosyöpää [1].

Radonin pitoisuudet sisäilmassa riippuvat niin maantieteellisestä sijainnista, rakennustavasta kuin ilmanvaihdostakin. Koska tekijöitä on monia, on tärkeää suorittaa radonmittauksia tiloissa, joissa vietetään paljon aikaa, turvallisen altistusmäärän takaamiseksi. Mittaustapoja on erilaisia eri tarkoituksiin. Esimerkiksi, toisilla mittauksilla pystytään kartoittamaan pitkän aikavälin altistusta ja toisilla taas tarkemmin pitoisuuksia lyhyeltä aikaväliltä.

Radonin hajoamisessa syntyvät alfahiukkaset reagoivat herkästi materian kanssa, jonka takia hiukkasten kantama ilmassa on vain muutamia senttimetrejä (3–5 cm) [2]. Tämä tekee yksittäisten alfahiukkasten mittaamisesta hankalaa. Optisella havainnoinnilla alfahiukkasten määrää pystytään arvioimaan pidemmän välimatkan päästä, mikä voi helpottaa mittauksia.

Asuntojen radonpitoisuuksien mittaamiseen yleisimmin käytetty mittaustapa, radonpurkimittaus, vaatii kahden kuukauden mittausajan. Optisesti mittaamalla voidaan mittaukset suorittaa lyhyemmällä aikavälillä. Radonin jatkuvatoiminen optinen havainnointi voi olla mahdollinen mittaustapa nopeammille ja tarkemmille mittauksille. Optisesti mittaamalla radonpitoisuuksia ei mitata suoraan radonin määrästä, vaan epäsuorasti radonin hajoamisesta syntyvien reaktioiden kautta. Näin ollen mittauksiin liittyy monia epätarkkuustekijöitä, joten on oleellista tutkia, olisiko tällainen nopeammin suoritettava radonpitoisuuden mittaaminen optisen havainnoinnin avulla tarpeeksi tarkka käytettäväksi pitoisuuksien mittaamiseen huoneilmassa.

Työn tarkoituksena on perehtyä radonin havainnointimenetelmiin, erityisesti jatkuvatoimiseen optiseen havainnointiin. Työssä tutustutaan aluksi alfasäteilyn perusteisiin sekä käydään läpi radonin merkitystä säteilylähteenä. Kappaleessa 3 tutustutaan käytössä oleviin radonin havainnointimenetelmiin, minkä jälkeen, kappaleessa 4, käydään läpi radonin optisen havainnoinnin mahdollistavan luminenssi-ilmiön perusteet. Teorian jälkeen tutus-

tutaan mittauksissa käytettyyn mittauslaitteistoon sekä mittausjärjestelyihin. Mittauksista saatavan signaalin käsittelyä varten, kappaleessa 6 muodostetaan mittauskammion kokonaisaktiivisuutta kuvaava funktio. Funktio sovitetaan mittausdataan kappaleessa 7, minkä avulla määritetään radonin pitoisuus tutkittavassa kaasussa. Tämän lisäksi, kappaleessa 7 käydään myös läpi mahdollisuuksia mittausajan lyhentämiseen sekä arvioidaan mitaustavan toimivuutta.

## 2. RADON SÄTEILYLÄHTEENÄ

### 2.1 Alfasäteily

Alfasäteily on yksi radioaktiivisen säteilyn muodoista. Radioaktiiviset aineet lähettävät hajoessaan ionisoivaa säteilyä, eli säteilyä, jonka energia on niin suuri, että se pystyy irrottamaan säteilyn kohteeksi joutuvan aineen atomeista elektroneja, tai rikkomaan aineen molekyylejä. Ionisoiva säteily voi olla sähkömagneettista säteilyä, kuten gammasäteily, tai hiukkassäteilyä, kuten alfa- ja beetasäteily.

Alfasäteilyä syntyy alfahajoamisesta, missä atomin ytimeistä poistuu alfahiukkanen. Alfahiukkanen on heliumydin, eli se koostuu kahdesta protonista ja kahdesta neutronista. Koska alfahiukkasella on kaksi protonia eikä yhtäkään elektronia, se on sähköisesti varautunut, mikä vaikuttaa hiukkasen vuorovaikutukseen muiden atomien ja molekyylien kanssa. Alfahiukkasen poistuessa ytimeistä, atomin järjestysluku pienenee kahdella ja massaluku neljällä. Alfahajoamista kuvaa esimerkiksi seuraava reaktioyhtälö [2, s. 572]:



Hajoavaa ydintä kutsutaan emoytimeksi ja reaktiotuotteena syntynyttä ydintä tytärytimeksi. Kun hajoaminen tapahtuu, emoytimen sidosenergia muuttuu alfahiukkasen sekä tytärytimen liike-energiaksi.

Alfahajoamista voi tapahtua spontaanisti vain, jos emoytimen massa on suurempi kuin tytärytimen ja alfahiukkasen yhteenlaskettu massa [2]. Tällöin hajoamisen seurauksena vapautuu energiaa ja näin ollen ydin pääsee stabiilimpaan matalamman energian tilaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että alfahajoaminen on yleistä lähinnä vain lyijyä raskaammilla ytimillä. Hajoamisessa vapautuneen energian määrä voidaan laskea kaavan

$$E = (\Delta m) c^2 \quad (2.2)$$

avulla [2], missä  $c$  on valonnopeus tyhjiössä ja  $\Delta m$  on emoytimen ja hajoamistuotteiden, eli tytärytimen sekä alfahiukkasen, yhteenlasketun massan erotus.

Alfahiukkasen energia riippuu emoytimen massasta. Energia säilyy, joten hajoamisessa

vapautunut energia jakautuu tytärtyimelle ja alfahiukkaselle yhtälön

$$\Delta E = \frac{1}{2}m_t v_t^2 + \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 \quad (2.3)$$

mukaisesti [2, s. 110], missä  $m_t$  on tytärtyimen massa,  $m_\alpha$  alfahiukkasen massa,  $v_t$  on tytärtyimen nopeus ja  $v_\alpha$  alfahiukkasen nopeus. Näin ollen tietyn ytimen alfhajoamisessa syntyneellä alfahiukkasella on sama energia, ellei tytärtydin jää virittyneeseen tilaan. Joka tapauksessa saman ytimen alfhajoamisessa syntyneiden alfahiukkasten energiat voivat saada vain diskreettejä arvoja, sillä syntyneen tytärtyimen viritystilojen energiat ovat myös kvantittuneet eli saavat vain diskreettejä arvoja.

Koska alfahiukkasen massa on paljon pienempi kuin tytärtyimen massa ja liikemäärä säilyy, alfahiukkasen nopeus on huomattavasti suurempi kuin syntyneen tytärtyimen nopeus. Alfahiukkasen nopeudelle voidaan johtaa liikemäärän säilymisen avulla kaava [2]

$$\bar{v}_\alpha = -\frac{m_t}{m_\alpha}\bar{v}_t. \quad (2.4)$$

Yhdistämällä energian säilymisen kaava (2.3) ja tämä liikemäärän säilymisen kaava (2.4), saadaan alfahiukkasen energialle yhtälö

$$K_\alpha = \frac{\Delta E}{1 + \frac{m_\alpha}{m_t}} \quad (2.5)$$

ja vastaavasti tytärtyimen energialle

$$K_t = \frac{\Delta E}{1 + \frac{m_t}{m_\alpha}}. \quad (2.6)$$

Esimerkiksi  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ -ytimen alfhajotessa poloniumin isotoopiksi  ${}^{218}_{84}\text{Po}$  energiaa vapautuu 5,59 MeV [3]. Hajoamisessa syntyneen alfahiukkasen energia on tällöin kaavan 2.5 mukaisesti noin 5,5 MeV ja  ${}^{218}_{84}\text{Po}$ -ytimen energia vain noin 0,1 MeV. Suurin osa hajoamisessa vapautuvasta energiasta menee siis alfahiukkasen liike-energiaksi. Työn kannalta ei siis ole oleellista, jääkö tytärtydin virittyneeseen tilaan vai ei, sillä tytärtyimen osuus hajoamisessa vapautuneesta energiasta on pieni.

Hajoaminen on harvoin niin sanotusti puhdasta alfhajoamista. Hajoamisen seurauksena, alfahiukkasen lisäksi, ytimestä vapautuu useimmiten gammafotoni. Tämä johtuu siitä, että tytärtydin jää hajoamisen seurauksena monesti virittyneeseen tilaan, jonka purkautuessa ytimestä emittoituu gammafotoni. [4, s. 543] Alfhajoamisessa syntynyt tytärtydin voi olla myös beeta-miinus-aktiivinen, jolloin tytärtydin beetahajoaa. Hajoamisen seurauksena syntyy tässäkin tapauksessa useimmiten gammafotoni. Jotkin alfa-aktiiviset ytimet, esimerkiksi poloniumin isotooppi  ${}^{218}\text{Po}$ , ovat myös lievästi beeta-miinus-aktiivisia. Tällöin alfhajoamisen sijasta voi tapahtua myös beetahajoamista, mutta todennäköisyys tälle on

hyvin pieni:  $^{218}\text{Po}$ -ytimelle vain noin 0,02 prosenttia [3].

Alfasäteily on radioaktiivisena säteilynä vaarallista. Sen kantama on kuitenkin heikko verrattuna esimerkiksi toiseen hiukkassäteilyn lajiin, beetasäteilyyn. Beetahiukkaset voivat läpäistä tavallisen paperiarkin, mutta pysähtyvät ohueen alumiinilevyyn, kun taas alfa-hiukkanen ei läpäise edes paperia [2]. Alfahiukkaseen huono läpäisevyys johtuu hiukkasen suuresta massasta ja varauksesta. Suuri massa ja sähköinen varaus tekevät todennäköisyydestä reagoida materian kanssa suuren, minkä takia alfahiukkaseen etenemismatka ilmassakin on vain muutamia senttimetrejä.

Radioaktiivinen hajoaminen on täysin satunnainen prosessi eikä yksittäisen ytimen hajoamista voida mitenkään ennustaa. Suurelle määrälle ytimiä voidaan kuitenkin tilastisesti ennustaa aika, jolloin puolet ytimestä on hajonnut ja näin ollen aktiivisuus vähentynyt puoleen alkuperäisestä. Tätä aikaa kutsutaan puoliintumisaikaksi ( $T_{1/2}$ ) [2]. Puoliintumisaika on keskeinen käsite radioaktiivisten aineiden hajoamista tutkiessa.

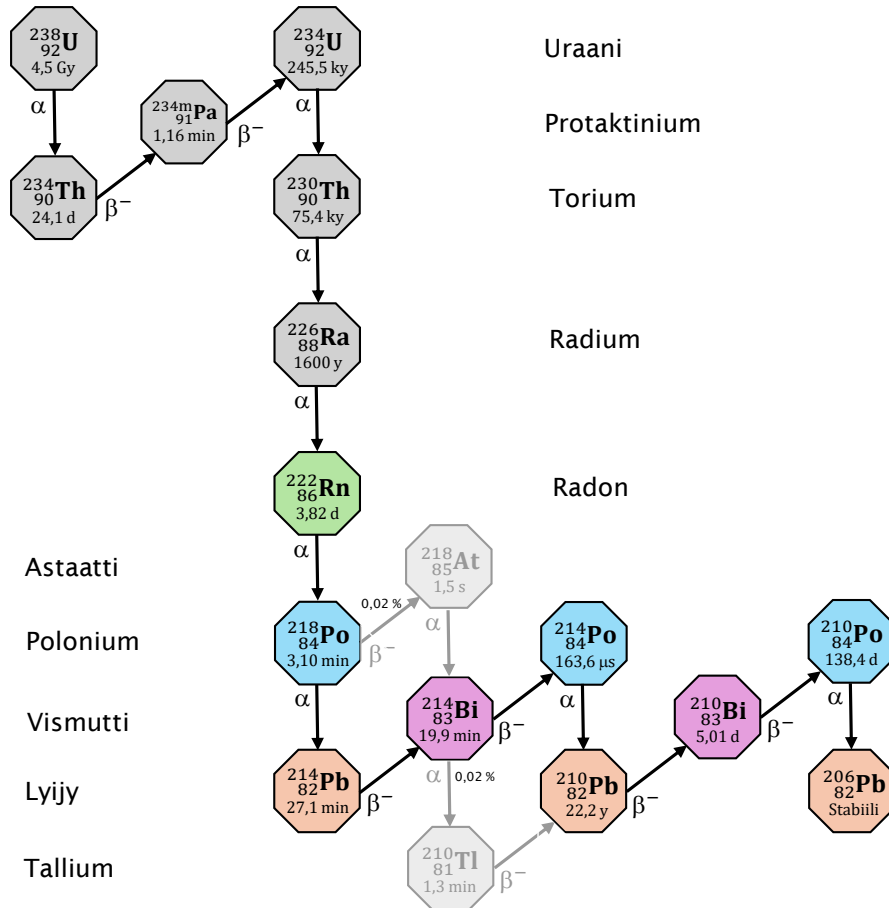
Säteilyannoksen haitallisuutta arvioidaan aineen aktiivisuuden avulla. Aktiivisuuden yksikkö on becquerel (Bq). Aktiivisuus kertoo kyseisen ainemäärän ydinmuutosten määrän sekunnin aikana. Aktiivisuus ilmoitetaan usein aktiivisuutena paino- tai tilavuusyksikköä kohti. Esimerkiksi sisätilojen radonista peräisin oleva aktiivisuuspitoisuus ilmoitetaan yleensä yksikössä becquereliä per kuutiometri ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ). Radonin havainnointi perustuu sen lähettämän säteilyn havainnointiin, joten radonin pitoisuudesta voidaan myös puhua yksikössä  $\text{Bq}/\text{m}^3$ , vaikka Bq onkin aktiivisuuden yksikkö. Jos ilman radonpitoisuus on esimerkiksi  $200 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , tämä tarkoittaa, että yhdessä kuutiometrissä kyseistä ilmaa tapahtuu sekuntin aikana keskimäärin 200 hajoamista.

## 2.2 Radonista peräisin oleva säteily

Radioaktiivisen aineen hajoessa syntyy tytärudin, joka on usein myös radioaktiivinen. Näin ollen radioaktiiviset ytimet muodostavat hajoamisketjuja eli hajoamissarjoja. Hajoamisketjuissa ydin muuttuu toiseksi aina joko alfa- tai beetasäteilyn seurauksena. Hajoamisia tapahtuu, kunnes saavutetaan stabiili ydin. Suurin osa luonnossa esiintyvistä radioaktiivisista säteilystä on peräisin raskaista ytimistä  $^{232}_{90}\text{Th}$ ,  $^{238}_{92}\text{U}$  ja  $^{235}_{92}\text{U}$  lähtöisin olevista hajoamisketjuista [2, s. 573]. Kaikki nämä ketjut päättyvät stabiiliin lyijyisotooppiin. Radon on osa kaikkia näitä hajoamissarjoja.

Radonin pysyvin ja yleisin isotooppi on  $^{222}\text{Rn}$ , mitä syntyy uraani-238:n hajoamisketjussa. Tätä hajoamissarjaa on havainnollistettu kuvassa 2.1. Radonin isotooppi  $^{219}\text{Rn}$  on osa uraani-235:n hajoamisketjua ja  $^{220}\text{Rn}$  taas torium-232:n hajoamisketjua. Näitä radonin isotooppeja esiintyy kuitenkin vain vähän luonnossa. Radon-219:n vähäinen esiintyvyys johtuu siitä, että se on peräisin uraani-235:stä, jonka osuus luonnossa esiintyvistä uraanista on vain 0,72 prosenttia [5]. Radon-220:n puoliintumisaika on hyvin lyhyt, vain

55,6 sekuntia [3], minkä takia vain pieni osa kyseistä radonin isotooppia ehtii kulkeutua maa- ja kallioperästä ilmaan, jota tutkimme.



**Kuva 2.1.** Uraani-238:n hajoamisketju. Kuvaan on merkitty ketjussa tapahtuvat alfa- ja beetahajoamiset. Himmennetyt ytimet kuvaavat hajoamisia, joiden todennäköisyys on vain 0,02 prosenttia. Puoliintumisaikojen ja hajoamisten todennäköisyyksien lähde: [3]

Kuten kuvasta 2.1 voidaan havaita, radonista peräisin oleva alfasäteily syntyy pääosin radon-222:n hajotessa poloniumin isotoopiksi  $^{218}\text{Po}$ , tämän hajotessa lyijyn isotoopiksi  $^{214}\text{Pb}$  sekä myöhemmin hajoamisketjussa poloniumin isotooppien  $^{214}\text{Po}$  ja  $^{210}\text{Po}$  hajotessa lyijyn eri isotoopeiksi. Kuvaan himmeällä merkityt hajoamiset osoittavat, että muitakin reittejä radon-222:n hajoamisesta hajoamisketjun viimeiseen tuotteeseen, lyijyn isotooppiin  $^{206}\text{Pb}$  on olemassa. Todennäköisyydet näille muille reiteille ovat kuitenkin hyvin pienet, sillä  $^{218}\text{Po}$  beetahajoaa astaatin isotoopiksi  $^{218}\text{At}$  ja  $^{214}\text{Bi}$  alfahajoaa talliumin isotoopiksi  $^{210}\text{Tl}$  vain 0,02 prosentin todennäköisyydellä [3]. Alfasäteilyä voi siis kuitenkin mahdollisesti syntyä myös näistä muista reiteistä.

Jos otetaan huomioon kuvassa 2.1 näkyvät ydinten puoliintumisajat, voidaan havaita, että lyhytaikaisessa tarkastelussa radonista peräisin oleva alfasäteily syntyy pääosin radon-222:n sekä poloniumin isotooppien  $^{218}\text{Po}$  ja  $^{214}\text{Po}$  hajoamisesta. Polonium-214:n hajotesa syntyvän lyijyn isotoopin  $^{210}\text{Pb}$  voidaan ajatella olevan lyhyellä aikavälillä tarkasteltuna stabiili, sillä sen puoliintumisaika on 22,2 vuotta. Jos kaikkien hajoamisketjun ydinten puoliintumisajat radonin isotoopista  $^{222}\text{Rn}$  poloniumin isotooppiin  $^{214}\text{Po}$  laskettaisiin yhteen, olisi yhteenlaskettu puoliintumisaika vain vuorokausien luokkaa. Tämä on huomattavasti lyhyempi aika verrattuna  $^{210}\text{Pb}$ -ytimen 22,2 vuoden puoliintumisaikaan. Työn kannalta oleelliset hajoamisketjun ydinten puoliintumisajat ovat esitetty taulukossa 2.1.

**Taulukko 2.1.** Uraani-238:n hajoamisketjun ydinten puoliintumisajat, hajoamistavat sekä hajoamisessa vapautuva energia radon-222:sta lyijy-210:een [3].

ydin	puoliintumisaika	hajoamistapa	hajoamisessa vapautuva energia
$^{222}_{86}\text{Rn}$	3,82 d	$\alpha$	5,59 MeV
$^{218}_{84}\text{Po}$	3,10 min	$\alpha$	6,11 MeV
$^{214}_{82}\text{Pb}$	27,1 min	$\beta^-$	
$^{214}_{83}\text{Bi}$	19,9 min	$\beta^-$	
$^{214}_{84}\text{Po}$	162,6 $\mu\text{s}$	$\alpha$	7,83 MeV
$^{210}_{82}\text{Pb}$	22,2 y	$\beta^-$	

Taulukkoon 2.1 on kerätty myös työn kannalta oleellisten ydinten alfahajoamisessa vapautuvan energian määrä [3]. Kuten edellä on mainittu, tämä energia jakautuu tytärytimen ja alfahiukkasen kesken, mutta suurin osa energiasta menee alfahiukkasen liike-energiaksi. Käytännössä vapautuvan energian määrä vastaa siis lähestulkoon syntyvän alfahiukkasen energiaa.

## 2.3 Radon Suomessa

Suomalaisissa pientaloasunnoissa sisäilman keskimääräinen radonpitoisuus on  $142 \text{ Bq/m}^3$  [6]. Tämä on korkeimpia arvoja maailmassa. Syynä korkeisiin radonpitoisuuksiin on Suomen kallio- ja maaperän suuri uraanipitoisuus, hyvin läpäisevä maaperä, rakennusten perustustapa ja tiiviys, ilmanvaihto sekä kylmä ilmasto. [7]

Maaperästä radon pääsee sisäilmaan alipaineesta aiheutuvan ilmavirran mukana. Ilmavirtaus sisätiloihin on voimakkainta talvella [7]. Talvella Suomessa on kylmä, jolloin ulkoilman ja sisäilman välinen paine-ero on suurempi kuin lämpötilojen ollessa lähempänä toisiaan. Tällöin sisätiloissa vallitsee alipaine, mikä lisää maaperän radonpitoisen ilman virtausta sisätiloihin. Talvisin ovia ja ikkunoita ei pidetä juurikaan auki, mikä edistää osaltaan alipaineen syntymistä sisätiloihin. Säteilyaltistuksen kannalta merkittävin ongelma Suomessa onkin asuntojen ja työpaikkojen rakentaminen siten, että rakennuksen alla ja ympärillä oleva maa-ainesten sisältämä radon pääsee kulkeutumaan sisätiloihin [7, s. 120]. Alipainetta saattaa muodostua uusiin ilmatiiviisiin asuntoihin myös kesäaikaan, kun sisällä halutaan pitää koneellisen ilmanvaihdon ja jäähdytyslaitteiden ylläpitämä viileä ilma. Alipaineongelmat ovat merkittävimpiä koneellisen poistoilmanvaihdon asunnoissa ja erityisesti tiivisrakenteisissa asunnoissa [8].

Merkittävin radonlähde pientaloissa on maaperän huokosilma. Maaperän huokosilma on aktiivisuudeltaan tavallisesti  $10\,000\text{--}100\,000 \text{ Bq/m}^3$  luokkaa. Metrini korkeudella maaperästä pitoisuus on kuitenkin enää noin  $10 \text{ Bq/m}^3$ , joten ulkoilmassa radonpitoisuudet eivät ole haitallisia. Radonpitoisen ilman virratessa maaperästä asuntoon, sisäilman radonpitoisuus voi kuitenkin olla pienenkin virtauksen takia jo satoja becquereljä kuutiometrissä. [7] Maaperän uraanipitoisuuden ja kylmän ilmaston lisäksi suureen radonpitoisuuteen vaikuttaa siis myös millaiselle maaperälle talo on perustettu. Maaperän ilmanläpäisevyys vaikuttaa eniten sisätiloihin virtaavan ilman määrään. Karkean soran tai kalliomurskeen ilmanläpäisevyys on yli tuhatkertainen verrattuna tiiviisiin maalajeihin kuten hietaan tai saveen. [8] Näin ollen hyvin ilmaa läpäiseville paikoille kuten harjuille ja niiden ympäristöille, sekä muille sora- ja kalliomailla perustetut rakennukset ovat alttiita suurille radonpitoisuuksille. Suurimmat radonpitoisuudet saavutetaan taloissa, jotka ovat perustettu hyvin ilmaa läpäisevälle maaperälle jonka uraanipitoisuus on tavallista suurempi [7].

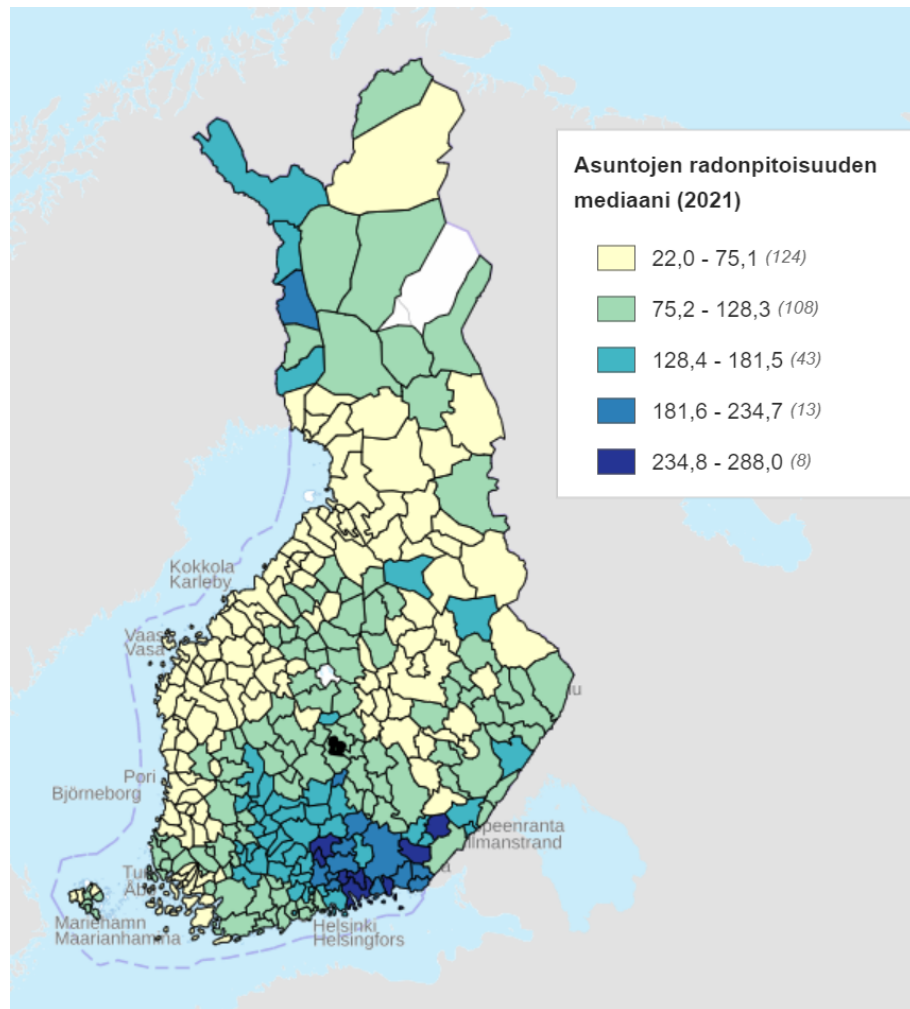
Maaperän lisäksi sisäilman radonpitoisuuteen vaikuttavat rakennustapa ja -materiaali. Suomessa yleisin pientalon perustamistapa on sokkeli ja maanvarainen lattialaatta. Radontorjunnan kannalta maanvarainen lattialaatta on huono ratkaisu, sillä huokosilma pääsee kulkeutumaan sisäilmaan laatan ja seinärakenteiden välisistä saumoista, ellei vuoteittejä ole tiivistetty. [6, s. 24] Jo yhden millimetrin suuruinen rako aiheuttaa merkittävän vuodon [8]. Soramaiden lisäksi radonia erittyy myös kalliosta ja täytemaasta talon alla [7]. Jos täytemaana on käytetty maa-ainesta, joka on louhittu hyvin uraanipitoisesta kalliosta, voi taloon päästä tätä kautta suuria määriä radonia, vaikka rakennuksen maaperästä

vapautuvan radonin määrä olisi pieni. Muita radonlähteitä rakennuksissa on muun muassa rakennusmateriaalina usein käytetty betoni. Vaikka talo olisi rakennettu puusta, on monesti lattioiden rakentamisessa käytetty betonia, joka tuo asunnon radonpitoisuuteen noin 10–30 Bq/m<sup>3</sup> lisäyksen [7]. Jos pien- tai kerrostaloasunnon seinät ovat tehty betonielementeistä, rakennusmateriaaleista erittyvä radon aiheuttaa radonpitoisuuteen noin 10–100 Bq/m<sup>3</sup> lisäyksen [8]. Asunnoissa, joissa käytetään porakaivovettä, talousvedestä vapautuva radon voi lisätä myös merkittävästi sisäilman radonpitoisuutta [7] [8]. Koska radonin lähteitä on monia ja suuret radonpitoisuudet voivat syntyä muustakin kuin maaperästä, on mittauksia tärkeää tehdä kaikkialla Suomessa.

Merkittävin tapa vaikuttaa sisätilojen radonpitoisuuteen on ottaa se huomioon rakennusvaiheessa. Tärkeitä radonturvallisuuden kannalta on estää maaperästä tulevat ilmavirtaukset. Tämä voidaan tehdä valitsemalla perustamistavaksi esimerkiksi tuulettuva alapohja. Maanvaraisesta laatastakin saa perustustapana radonturvallisen, kun kiinnittää huomiota perustuksen tiiviyteen ja asentaa radonputkiston laatan alle täyttösoraan. [7, s. 149] Valmiiden talojen radonpitoisuuksiin voidaan myös vaikuttaa esimerkiksi tiivistämällä vuotokohdat tai asentamalla radonimuri tai -kaivo. Tällaisiin radonkorjauksiin ryhdytään usein vain, jos radonpitoisuudet ovat merkittävän suuret. Joskus pelkästään ilmanvaihdon parantamisella voidaan saavuttaa haluttu muutos radonpitoisuuksissa. [7]

Kuvassa 2.2 on esitetty pientaloasuntojen radonpitoisuuksien mediaanit kunnittain. Kuvasta nähdään, että radonpitoisuudet vaihtelevat välillä 22–288 Bq/m<sup>3</sup>. Säteilylain (859/2018) [10] mukaan sosiaali- ja terveysministeriö antaa viitearvot radonin enimmäispitoisuudelle muun muassa asunnon tai muun oleskelutilan sisäilmalle, työpaikan sisäilmalle sekä sisäilman radonpitoisuudelle uudisrakentamisessa. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen (1044/2018) [11] mukaan asunnon sisäilman radonpitoisuuden viitearvo on 300 Bq/m<sup>3</sup>. Kuvassa 2.2 näkyvät radonpitoisuudet eivät siis mediaaniarvoiltaan ylitä tätä asuntojen sisäilman radonpitoisuutta koskevaa viitearvoa. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, ettei yksittäisissä asunnoissa viitearvot ylittyisi. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen (1044/2018) [11] mukaan uusien rakennuksien suunnittelua ja toteutusta koskeva viitearvo on 200 Bq/m<sup>3</sup>. Tämä arvo ylittyy kuvan 2.2 perusteella mediaaniarvolta ainakin kahdeksassa kunnassa. Suurimmat pitoisuudet ovat alueellisesti Kaakkois-Suomessa. Tämä johtuu lähinnä Kaakkois-Suomen maaperästä, joka on erityisen uraanipitoista rapakivigraniittia. [7, s. 124]

Koska mediaaniarvot eivät kerro yksittäisistä rakennuksista paljoa, on hyödyllistä tutkia myös tilannetta asuntokohtaisesti. Säteilyturvakeskuksen suorittamissa mittauksissa löytyi 11 000 asuntoa, jossa oli yli 400 Bq/m<sup>3</sup> radonpitoisuus. Uusien asuntojen enimmäisarvon 200 Bq/m<sup>3</sup> ylittäviä asuntoja oli 27 000. Luvut perustuvat kesään 2008 mennessä tehtyihin 30 vuoden aikaisiin mittauksiin, joissa kohteina oli 87 000 suomalaista pientaloasuntoa ja 5 000 kerrostaloasuntoa. [6] Radonpitoisuuksiin on siis hyvä kiinnittää huomiota, jotta asuin- ja oleskelutilat pysyisivät turvallisina.



**Kuva 2.2.** Pientaloasuntojen radonpitoisuuksien mediaanit kunnittain. Mittaukset on tehty STUK:n radonmittauspurkeilla vuosina 1990–2020. Lähde: STUK [9] (pohjakartta: Maanmittauslaitos). Yksikkönä radonpitoisuuksille kartassa on  $\text{Bq/m}^3$ .

## 2.4 Radonin terveysvaikutukset

Sisätiloissa esiintyvä radonkaasu on ylivoimaisesti suurin säteilyaltistaja niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa. [7, s. 27] Vaikka hiukkaset eivät läpäise ihoa, on alfasäteily haitallista, jos säteilyä lähettävää radioaktiivista ainetta pääsee elimistöön muun muassa hengitysilman tai elintarvikkeiden mukana. Säteilyannoksen aiheuttamia satunnaisia haittoja voidaan arvioida efektiivisen annoksen avulla, mikä ottaa huomioon eri elinten ja kudosten säteilyherkkyyden [7]. Noin puolet suomalaisen vuotuisesta efektiivisestä säteilyannoksesta on peräisin sisäilman radonista [7, s. 112].

Radoniin liittyvä keuhkosityöpävaara ei aiheudu itse radonkaasusta, vaan sen lyhytikäisistä hajoamistuotteista. Radonilla on jalokaasun elektronikonfiguraatio, joten se on kemiallisesti inertti. Tämä tarkoittaa sitä, että radonkaasu ei reagoi muiden molekyylien kanssa ja näin ollen poistuu uloshengityksen mukana. Kuitenkin hajotessaan elimistön sisällä, alfahiukkaset pääsevät vaikuttamaan elimistön solujen kanssa ja tekemään tuhoa. Tämä

radonkaasun osuus efektiivisestä säteilyannoksesta on vain pari prosenttia [7]. Suurin osa säteilyannoksesta tulee radonin hajoamistuotteista, jotka reagoivat muiden molekyylien kanssa. Hajoamistuotteet tarttuvat keuhkoputkistoon ja keuhkorakkuloihin aiheuttaen keuhkoille säteilyannoksen [7].

Radonaltistumisen on arvioitu aiheuttavan Suomessa vuosittain 150–270 keuhkosyöpää [1]. Ionisoivan alfahiukkasen tai fotonin osuma solun tumaan voi aiheuttaa vaurioita DNA:ssa. Jos vauriota ei korjata, syntyy mutaatioita. Monen mutaation seurauksena syntyy taas syöpäsoluja. [12] Koska alfahiukkasten kantama on hyvin lyhyt, alfahiukkasen suuri energia jakautuu vain pienelle alueelle. Tämän takia säteily aiheuttaa suurta paikallista tuhoa. Vaikka hajoamisesta syntyy myös gammasäteilyä, jakautuu gammasäteiden energiat pitkän kantaman takia laajemmalle alueelle, eikä yksittäille elimille aiheudu erityisen suurta säteilyannosta. Keuhkosyöpäriskin kannalta oleellista on suurissa radonpitoisuuksissa vietetty aika. Mitä pidempi altistus suurelle radonpitoisuudelle, sitä suurempi riski sairastua keuhkosyöpään.

### 3. RADONIN HAVAINNOINTIMENETELMÄT

Radon on hajuton ja mauton kaasu, joten ainoa tapa selvittää sen pitoisuus ilmassa on mitata se. Mittaamiseen on käytössä monia eri mittalaitteita. Eri mittalaitteet ilmoittavat radonin pitoisuuden eri tarkkuuksilla, mikä on hyvä ottaa huomioon sopivaa mittalaitetta valitessa. Joitain mittalaitteita hyödynnetään esimerkiksi vain enimmäisarvon ylityksen toteamiseen ja toiset kertovat tarkemman arvon joka tunnilta. Mittalaitteet ilmoittavat radonin pitoisuuden yksikössä  $\text{Bq/m}^3$ .

Radonista peräisin olevan säteilyn syöpäriskin suuruden arvioimisessa on oleellista pitkän aikavälin altistus. Jotta mittaustulos edustaisi riittävän pitkää ajanjaksoa, on mittaukset hyvä suorittaa pitkällä aikavälillä. Tähän sopiva mittalaite on radonmittauspurkki, joka ilmoittaa pitkän aikavälin (noin 2 kuukauden) keskiarvon radonpitoisuudelle. Pitkän aikavälin mittauksissa on kuitenkin se ongelma, että keskiarvon arvioiminen on hankalaa, sillä radonin pitoisuudet voivat vaihdella suuresti päivänkin aikana [13].

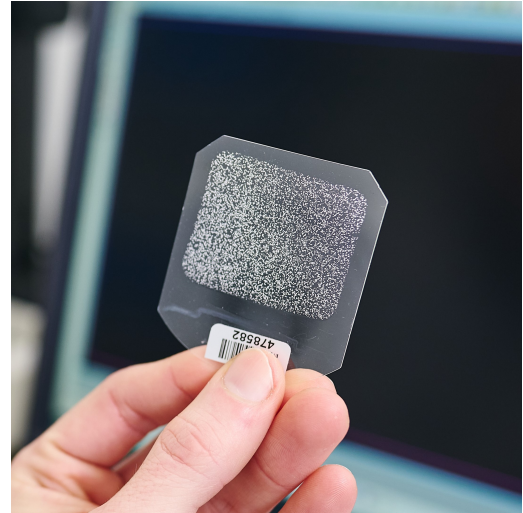
Vaikka asuintilojen radonpitoisuuksia mitatessa yleisimmin käytössä ovat passiiviset pitkän mittausajan vaativat radonpurkit, aktiiviset mittaukset voivat olla hyödyllisiä radonvuodon aiheuttajaa tutkiessa. Esimerkiksi joissain tapauksissa korkeat radonpitoisuudet rakennuksessa saavutettiin, kun tuulen suunta oli tietty [13]. Tätä ei voitaisi havaita pitkän aikavälin keskiarvomittauksilla. Tällaisia mittalaitteita, jotka kertovat lyhyen aikavälin pitoisuuden luotettavasti, kutsutaan jatkuvatoimisi mittalaitteiksi.

#### 3.1 Radonmittauspurkki

Helppo ja yleisin tapa selvittää sisätilojen radonpitoisuus pitkällä aikavälillä on käyttää radonmittauspurkkia. Radonmittauspurkillä suoritettu mittaus kertoo mittausajan radonpitoisuuden keskiarvon. Tämä mittaustapa on siis hyvä kertomaan, ylittääkö sisätilan radonpitoisuus suositellun arvon ( $300 \text{ Bq/m}^3$  [11]).

Radonmittauspurkki on esitetty kuvassa 3.1. Radonmittauspurkki on halkaisijaltaan noin 5 cm kokoinen pyöreä kiekko. Purkissa on muovikuori, jonka läpi radon siirtyy diffuusion avulla. Radonin hajoamistuotteet jäävät purkin sisällä olevaan suodattimeen, jolloin vain radon pääsee sen läpi. Radonmittauspurkin toiminta perustuu purkin sisällä olevaan polykarbonaattikalvoon, johon tulee paikallinen vaurio alfahiukkasen osuessa siihen. Alfa-

hiukkasia syntyy purkin sisään päässeen radonin ja tämän tytärtyimien hajotessa purkin sisällä. [7, s. 135]



**Kuva 3.1.** Kuva radonmittauspurkista ja sen sisällä olevasta muovifilmistä etsauksen jälkeen. Lähde: Säteilyturvakeskus.

Kun mittaukset ovat suoritettu, muovifilmi analysoidaan myöhemmin laboratoriossa radonpitoisuuden määrittämiseksi. Alfahiukkasten aiheuttamat paikalliset vauriot voidaan havaita optisella mikroskoopilla, kun jäljet ovat ensin saatu näkyviksi sähkökemiallisella etsauksella. Jäljet tulevat näkyviin etsauksessa, sillä alfahiukkasen kulkeman reitin ympärillä olevat vaurioituneet alueet syöpyvät etsauksessa nopeammin kuin alueet jotka eivät ole vaurioituneita. Etsauksessa filmi upotetaan tavallisesti NaOH tai KOH -liuokseen ja liuosta lämmitetään, jotta vaurioituneet alueet irtoavat ja näin ollen jäljet saadaan näkyviin. Liuosta voidaan lämmittää eri tavoin muun muassa upottamalla liuos lämpimään vesikylpyyn, säteilyttämällä liuosta mikroaalloilla tai ultraäänillä aiheutetun värinän avulla. [14] Radonpitoisuus on verrannollinen jälkien tiheyteen. Näin ollen radonpitoisuuden keskiarvo pystytään päättämään jälkien avulla, kun tiedetään mittauksiin käytetty aika.

Asuintilojen radonpitoisuutta määrittäessä radonmittauspurkkeja olisi hyvä olla yli 100 m<sup>2</sup> asunnossa vähintään kaksi kappaletta. Purkit sijoitetaan eri huoneisiin. Asunnoissa nämä huoneet ovat useimmiten makuuhuone ja olohuone, sillä näissä huoneissa vietetään eniten aikaa. Purkkeja säilytetään huoneissa vähintään 2 kuukautta, mutta mieluiten 3 kuukautta. Mittaukset kannattaa suorittaa syyskuun alun ja toukokuun lopun välisenä aikana. [15] Kesäaikaan sisätilojen alipaine on pienempi, sillä sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero on pienempi. Alipaineeseen vaikuttaa myös se, että kesällä pidetään ovia ja ikkunoita enemmän auki, jolloin paine pääsee tasoittumaan. Kesäaikaan suoritettut mittaukset antaisivat siis väärän tuloksen, jos tarkoituksena on määrittää sisäilman pitoisuus rakennuksessa, jossa oleskellaan myös talviaikaan.

Radonmittauspurkki antaa arvon radonpitoisuudelle pitkältä aikaväliltä. Jos työpaikalla havaitaan radonmittauspurkin avulla kohonnut radonpitoisuus, on oleellista tehdä mittauk-

sia lyhyemmältä aikaväliltä. Esimerkiksi ilmastointi vaikuttaa radonin pitoisuuteen sisäilmassa, joten jos ilmastointi on öisin pois päältä, voi työntekijöiden altistus olla pienempi kuin mitä radonmittauspurkilla annettu keskimääräinen arvo osoittaa. Tästä syystä mittaaminen jollain jatkuvatoimisella mittalaitteella voi olla hyödyllistä pitkän aikavälin radonpitoisuuden arvon ylittyessä työpaikalla. Radonpurkki ei sovellu lyhyen aikavälin mittauksiin, sillä silloin muovifilmiin tulevia jälkiä olisi liian vähän.

### 3.2 Lucas-kammio

Tuikekennojen toiminta perustuu kennon kykyyn emittoida valoa altistuessaan ionisoivalle säteilylle. Varauksellisten hiukkasten osuessa kennon pintaan, hiukkasten kineettinen energia muuntuu valoksi, joka voidaan havaita. [16, s.223] Yksi esimerkki tuikekennosta on Lucas-kammio. Lucas-kammiota ja sen pohjalta kehitettyjä menetelmiä on käytetty pitkään radonpitoisuuksien mittaamiseen [7, s.137].

Tutkittava kaasu johdetaan filtterin läpi tiiviisti suljettuun metalliseen kammioon, jonka seinät ovat useimmiten päällystetty hopealla aktivoitulla sinkkisulfaatilla [ZnS(Ag)]. Kun tutkittavassa kaasussa tapahtuu alfahajoamista, syntyneet alfahiukkaset virittävät kammion pinnan sinkkisulfidimolekyylejä. Tämän viritystilan purkautuessa syntyy fotoneja. Kammion yhdellä sivulla on valon läpäisevä ikkuna, mitä kautta tulevat fotonit havaitaan. Havaitsemisessa hyödynnetään valomonistinputkea, joka muuttaa fotonien energian sähköiseksi signaaliksi ja vahvistaa saatua signaalia. [7] Saatujen signaalien perusteella voidaan päätellä alfahajoamisten määrä tutkitussa kaasussa.

Menetelmän tehokkuus on hyvä, eli lähes kaikki alfahajoamiset havaitaan, joten sitä voidaan käyttää myös pienien radonpitoisuuksien havaitsemiseen. Lucas-kammiota on myös mahdollista hyödyntää tietyn tilavuuden radonpitoisuuden määrittämisen lisäksi jatkuvatoimisessa havainnoinnissa. Tällöin voidaan esimerkiksi pumpata ilmaa jatkuvasti kammion läpi. [7]

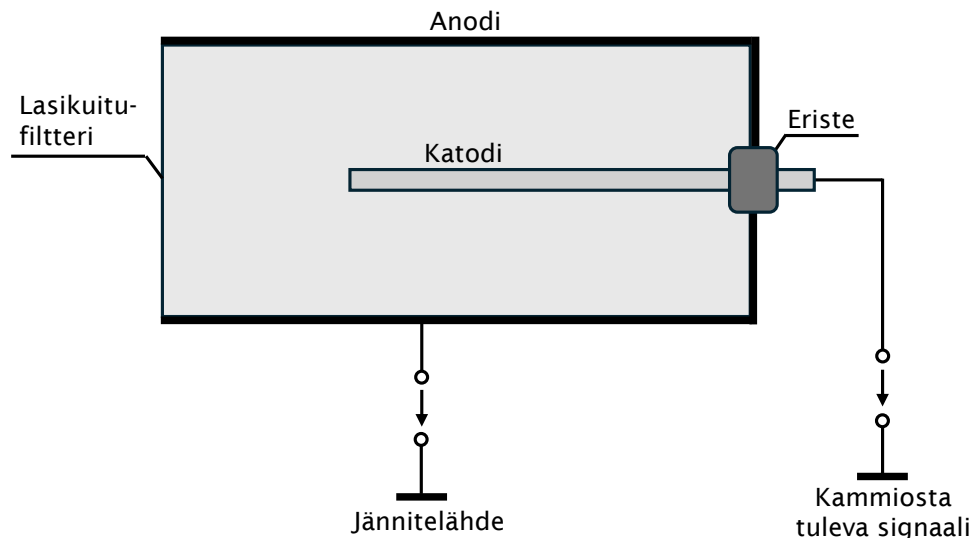
Käytännössä kammiota on käytetty esimerkiksi hanaveden radonpitoisuuden tutkimisessa. Tutkimuksessa käytettiin mittalaitteistoa, jossa ensin vapautettiin radon vedestä ilmaan ja sitten tutkittiin tämän ilman radonpitoisuutta Lucas-kammion avulla [17]. Lucas-kammioita ei nykyään enää juurikaan käytetä, sillä ionisaatiokammio toimii samaan tarkoitukseen yhtä hyvin, mutta on halvempi. Hintavat optiset detektorit ja sinkkisulfidipäällystyksen vaikeus tekevät Lucas-kammiosta kalliin verrattuna ionisaatiokammioon.

### 3.3 Ionisaatiokammio

Ionisaatiokammio on yksi yksinkertaisimmista säteilyn ilmaisimista. Ionisaatiokammiossa tutkittava kaasu viedään kahden elektrodin väliseen sähkökenttään. Ionisoivan säteilyn ionisoidessa kaasun molekyylejä, syntyy ionipareja. Nämä ioniparit kerätään elektrodeille.

Valitsemalla sopiva keräysjännite, kaikki varaukset saadaan kerättyä. [18, s. 116] Sähköisesti varautuneet ioniparit saavat aikaan sähkövirran elektrodien välille. Syntynyt virta on verrannollinen ioisaation ja näin ollen säteilyn määrään. Ionisaatiokammiota voidaan siis käyttää radonpitoisuuden määrittämiseen. Ionisaatiokammio on yleisesti käytössä oleva jatkuvatoiminen mittalaite, vaikka sitä voidaan hyödyntää myös yksittäisten pulssien mitaamisessa [16, s. 131].

Vertailumenetelmänä tässä työssä on käytetty AlphaGuard (Saphymo GmbH) -mittalaitetta. Laite havaitsee alfahajoamiset sen sisään rakennetun ionisaatiokammion avulla. AlphaGuardin ionisaatiokammiota on havainnollistettu kuvassa 3.2. AlphaGuardin ionisaatiokammio on tilavuudeltaan 0,56 litraa ja muodoltaan sylinterimäinen. Kammion metallinen pinta toimii anodina ja keskellä kammiota on katodina toimiva sauva. Kun anodi kytketään jännitelähteeseen, syntyy anodin ja katodin välille sähkökenttä.



**Kuva 3.2.** Havainnollistava kuva AlphaGuardin ionisaatiokammioista. Kuvan piirtämisessä on käytetty apuna lähdettä [19].

Tutkittava kaasu pääsee kammioon diffundoitumalla sylinterin toisessa päässä olevan lasikuitufilterin läpi. Filteri estää radonin hajoamistuotteiden ja muiden epäpuhtauksien pääsyn kammioon. Kammiossa tapahtuvista alfahajoamisista syntyneet alfahiukkaset ionisoivat kammion sisältämän kaasun molekyylejä. Ionisaatiossa syntyvät positiivisesti varautuneet ionit pyrkivät kammiossa katodille ja elektronit anodille, mikä havaitaan virtana. Syntyneen virran perusteella voidaan arvioida radonin pitoisuutta tutkittavassa kaasussa.

## 4. ALFASÄTEILYN OPTINEN HAVAINNOINTI

### 4.1 Luminesenssi

Kun atomin elektronit virittyvät korkeammalle energiatasolle ja tämä viritystila purkautuu, syntyy valoa. Kyseistä ilmiötä kutsutaan luminesenssiksi. Luminesensseja on eri tyyppisiä riippuen viritystilan syntymistavasta. Esimerkiksi fotoluminesenssissa viritystila on syntynyt fotonin törmätessä materiaan ja radioluminesenssissa ionisoivan säteilyn törmätessä materiaan.

Esimerkiksi valon tai ionisoivan säteilyn törmätessä materiaan, fotoni tai hiukkanen luovuttaa energiaansa atomin elektronille, jolloin se virittyy korkeammalle energiatilalle. Viritystila purkautuu spontaanisti ja elektroni siirtyy takaisin alemmalle energiatasolle emittoimalla fotonin. Purkautumisesta syntynyt fotoni saa energiansa virittyneeltä elektronilta. Näin ollen syntyneen fotonin energia on sama kuin elektronin viritystilan ja tilan, jolle se on purkautunut, erotus.

Viritystila voi purkautua suoraan perustilaan tai toisten viritystilojen kautta. Tästä syystä viritystilan purkautumisesta voi syntyä eri energisiä fotoneja. Koska syntyneen fotonin energia on sama kuin energiatilojen erotus, fotoneilla on vain tietty määrä mahdollisia eri energioita. Nämä energiat määräytyvät siitä, mikä atomi tai molekyyli on kyseessä. Koska energioiden arvot ovat diskreettejä, viritystilan purkautumisesta syntyneen energian spektri on viivaspektri. Luminesenssista syntyneen valon aallonpituusjakauman perusteella voitaisiin siis päätellä, mistä atomeista tai molekyyleistä törmäyksen kohde koostuu.

### 4.2 Radioluminesenssi

Radioluminesenssista puhutaan, kun viritystila on peräisin ionisoivasta säteilystä eli alfa-, beeta- gamma- tai röntgensäteilystä. Säteily saa aikaan elektronin virittymisen korkeammalle energiatilalle. Kun tämä viritystila purkautuu, syntyy tietyn energisiä fotoneja.

Radonin jatkuvatoimisessa optisessa havainnoinnissa hyödynnetään ilman radioluminesenssia. Maan ilmakehä koostuu pääosin typestä ja hapesta. Typen osuus ilmasta on 78 tilavuusprosenttia ja hapen 21 prosenttia. Muiden kaasujen osuus ilmakehästä on vain noin yhden prosentin. [20] Ilmakehän tyyppi esiintyy kahden atomin molekyylinä  $N_2$ . Ato-

meja pitää yhdessä kolme kovalenttista sidosta. Sidos on todella vahva, joten normaaliolosuhteissa molekyyli ei reagoi muiden atomien kanssa. Myös ilman happi esiintyy kahden atomin molekyylinä  $O_2$ . Vaikka happea esiintyy merkittäviä määriä ilmassa, sen viritystilat purkautuvat useimmiten siten, ettei purkautumisen seurauksena synny fotoneja. Näin ollen happimolekyylien tarkastelu ei ole oleellista ilman radioluminesenssin yhteydessä.

Alfasäteilyn aiheuttamat typen viritystilat ovat harvemmin peräisin suoraan alfahiukkasen törmäyksestä typpimolekyyleihin. On kymmenen kertaa todennäköisempää, että alfahiukkanen ionisoi typpimolekyylin kuin että se virittäisi neutraalin molekyylin [21]. Alfahiukkasen edetessä ilmassa, suurin osa sen energiasta menee siis ionisaatiossa syntyvien elektronien liike-energiaksi. Nämä niin sanotut sekundaariset elektronit taas ionisoivat lisää typpimolekyylejä kunnes elektronin liike-energia on tarpeeksi pieni virittääkseen typpimolekyylin.

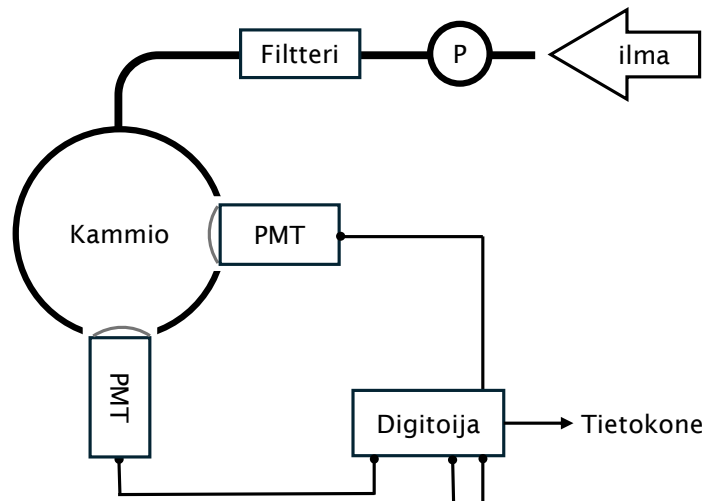
Sen lisäksi, että vain pieni osuus alfahiukkasen energiasta päätyy viritystilojen energiaksi, vain pieni osa syntyneistä viritystiloista purkautuu tavoilla, joista syntyy fotoneja. Alfahajoamisen seurauksena syntyy arviolta noin  $19 \pm 3$  fotonia jokaista alfahiukkasen MeV kohden [21]. Taulukon 2.1 energioiden avulla voidaan päätellä, että radon-222:n, polonium-218:n ja polonium-214:n hajoamisista syntyy jokaisesta noin 100–150 fotonia. Ajallisesti fotonien syntymiseen menee muutamia nanosekunteja [16]. Tämän muutaman sekuntin aikana MeV kokoluokkaa oleva alfahiukkanen ehtii törmätä useita tuhansia kertoja, ennen kuin on menettänyt kineettisen energiansa kokonaan [21]. Koska alfahiukkasen törmäyksiä on useita tuhansia, mutta fotoneita syntyy hajoamista kohden vain noin 100–150, on selkeää, että vain pieni osa fotonin törmäyksistä johtaa viritystilan syntyyn, joka purkautuessaan emittoisi fotonin. Koska yhden fotonin signaali on heikko, syntyvien fotonien suuresta määrästä on hyötyä, kun alfahajoamiset halutaan havaita optisesti.

Ilman radioluminesenssi on hyvin heikko ilmiö, minkä takia sen havaitsemiseen tarvitaan tarkkoja mittalaitteita. Syntynyttä signaalia voidaan vahvistaa esimerkiksi valomonistinputken avulla, jotta se voidaan havaita. Kun ilmiötä halutaan hyödyntää alfahajoamisen määrittämiseen, haasteeksi tulee alfahajoamisen seurauksena syntyneiden fotonien erottaminen muista fotoneista. Tarkat mittalaitteet havaitsevat tarkasti myös muista tapahtumista peräisin olevat fotonit. Fotoneja syntyy koko ajan esimerkiksi taustasäteilyn seurauksena. Avaruuden kosmisesta säteilystä syntyvät fotonit ovat energialtaan samaa luokkaa kuin ilman typen luminesenssista syntyvät fotonit, mikä myös hankaloittaa niiden erottamista toisistaan [21]. Mittalaitteen tarkkuudesta johtuen ilman radioluminesenssia hyödyntävissä mittauksissa taustakohinan suuruus on merkittävä.

## 5. MITTAUSMENETELMÄT

### 5.1 Mittauslaitteisto

Työssä hyödynnetään Tampereen yliopistossa vuonna 2015 suoritetuista mittauksista ja Johan Sandin väitöskirjan [21] kuvailuja mittauksista. Mittaukset suoritettiin kuvan 5.1 mukaisella laitteistolla.



**Kuva 5.1.** Radonin optiseen jatkuvatoimiseen havainnointiin käytössä ollut mittauslaitteisto. Ilmaa pumpattiin pumpun (P) avulla filtteriin läpi kammioon, jossa tapahtuvat alfa-hajoamiset havaittiin valomonistinputkien (PMT) avulla. Signaali muutettiin digitaaliseen muotoon digitoijan avulla. Kuvan piirtämisessä on käytetty apuna Sandin väitöskirjaa [21].

Tutkittava kaasu pumpataan HEPA (*high efficiency particulate*) -filtteriin läpi, jotta mittauskammioon ei pääse radonin hajoamistuotteita tai muita epäpuhtauksia. Mittauksissa käytetty kammio on pallon muotoinen, halkaisijaltaan 20 cm kokoinen integroiva pallo (SPH-8-3 AdaptaSphere, Labsphere). Kammion sisäpinta on erittäin heijastavaa materiaalia, jotta mahdollisimman moni fotoneista päätyisi detektoreille. Pinnan arvioidaan heijastavan 97 prosenttia siihen osuvista fotoneista [21].

Detektoreina käytetään kahta laaja-alaisia valomonistinputkea (engl. *photomultiplier tube*, PMT)(9829QB, ET Enterprises), jotta mahdollisimman monesta detektorille saapuneesta

fotonista saadaan signaali. Fotonin osuessa valomonistinputken fotokatodille, fotokatodista irtoaa elektroni. Irronnut elektroni ohjataan dynodille, johon törmätessään se irroittaa dynodista elektroneja. Nämä elektronit ohjataan taas uudelle dynodille, missä niiden määrä moninkertaistuu. Tämä toistuu, kunnes elektroneja on syntynyt tietty, valomonistinputkelle ominainen määrä. Yleensä valomonistinputket saavat aikaan yhdestä osuneesta fotonista  $10^7$ – $10^{10}$  kertaisen määrän elektroneja. [16] Mittauksissa käytettyjen valomonistinputkien kerroin on valmistajan mukaan  $10^7$  [21]. Valomonistinputki muuttaa siis yhden heikosti havaittavan fotonin helpommin havaittavaksi sähkövirraksi.

Valomonistinputkista saadut virrat muutetaan analogisesta muodosta digitalisiksi nopeasti toimivan digitoijan (DT5751, Caen) avulla. Digitoijaan pystytään määrittämään saadun pulssin integrointivälit kahdelle eri aikaikkunalle. Tämä on hyödyllistä, kun halutaan erottaa virhepulssit todellisista pulsseista. Kun detektorin kynnysjännite ylittyy, laite alkaa kerätä dataa 1 ns viiveellä. Laitteeseen voi valita myös yhteensattumien aikaikkunan (engl. *coincidence window*). Jos vain toisen detektorin kynnysjännite ylittyy, mutta tämän yhteensattumien aikaikkunan aikana toisen detektorin kynnysjännite ei ylity, ei saatua dataa kerätä talteen, sillä sen ajatellaan olleen virhesignaali.

Mittauksista saatu data koostuu tapahtumista, joissa molempiin detektoreihin on osunut fotoni yhteensattumien aikaikkunan sisällä. Mittauksien tuloksena saadaan lista näiden tapahtumien aikaleimasta ja valittujen aikaikkunoiden integraalien arvoista molemmilla detektoreilla. Datan perusteella voidaan laskea havaittujen signaalien määrä sekuntissa (engl. *counts per second*, cps). Saatua cps-arvo on verrannollinen kammiossa tapahtuvien hajoamisten määrään, joten sen voidaan ajatella kuvaavan kammiossa olevien ydinten aktiivisuutta tässä tapauksessa.

## 5.2 Mittausjärjestelyt

Mittaukset tehtiin optiikan laboratoriossa Tampereen yliopistossa, joka sijaitsee maan tasolla. Mittaukset suoritettiin 13. päivä huhtikuuta vuonna 2015. Tutkittavaa ilmaa pumpattiin kammioon neljän tunnin ajan puoli seitsemästä puoli yhteentoista illalla. Tutkittavan ilman pumppausta ennen ja jälkeen kammio huuhdeltiin pumppaamalla sen läpi synteetistä ilmaa. Alun huuhtelu kesti kaksi tuntia ja lopun huuhtelu yli 8 tuntia. Pumppauksen virtausnopeutena käytettiin 1,4 l/min.

Kammiossa tapahtuvan radioluminesenssin ansiosta yhdestä alfahajoamisesta syntyy noin 100 ftonia. Nämä ftonit heijastuvat kammion seinistä, kunnes ne osuvat valomonistinputkien fotokatodeihin, tai absorboituvat kammion seinälle. Kammion seinämien todennäköisyys heijastaa ftoni on 97 prosenttia, minkä perusteella ftonin eliniäksi arvioitiin noin 7 ns [21]. Samaa 7 ns arvoa käytettiin lyhyen aikavälin ikkunan arvona (engl. *short window*). Pitkän aikavälin ikkunan arvoksi (engl. *long window*) valittiin 50 ns. Yhteensattumien aikaikkunaksi (engl. *coincidence window*) valittiin 32 ns. Ikkunoiden valinta tehtiin

kokeellisesti niin, että niiden avulla oli parhaiten mahdollista erottaa alfahajoamiset muista tapahtumista [21]. Kynnysjännitteenä käytettiin 19,5 meV.

Mittausten aikana määritettiin huoneilman radonpitoisuudelle vertailuarvo AlphaGuard mittalaitteen avulla. Tällä tavoin mitattuna huoneilman radonpitoisuudeksi saatiin 870 Bq/m<sup>3</sup>.

## 6. KOKONAISAKTIIVISUUS MITTAUSKAMMIOSSA

Mittauksista saatava cps-arvo kuvaa kammion sisällä olevaa kokonaisaktiivisuutta. Jotta radonin pitoisuus voitaisiin määrittää, täytyy sen aktiivisuuden vaikutus cps-arvoon erottaa muista aktiivisuuden lähteistä. Tätä varten muodostetaan funktio, mikä kuvaa radonin kokonaisaktiivisuutta kammiossa. Kun funktiossa on eriteltyä eri tekijöiden vaikutus aktiivisuuteen, voidaan funktiosta erottaa radonin osuus ja näin ollen päätellä radonin pitoisuus.

### 6.1 Kokonaisaktiivisuutta kuvaavan funktion muodostaminen

Mittauksista saatu aktiivisuutta kuvaava cps-arvo sisältää kaikkien kolmen alfahajoajan radon-222:n, polonium-218:n sekä polonium-214:n vaikutuksen. Hajoamisketjussa poloniumin isotooppien  $^{218}\text{Po}$  ja  $^{214}\text{Po}$  välissä tapahtuvia beetahajoamisia ei tarvitse ottaa huomioon kokonaisaktiivisuuden arvossa, sillä beetahajoamisista syntyvä radioluminesenssi on niin pientä, ettei mittalaitteisto havaitse sitä juuri ollenkaan. Ydinten hajoamisten yhteisvaikutusta kammion aktiivisuuteen kuvaa yhtälö

$$A_{ytimet}(t) = A_{Rn}(t) + A_{Po-218}(t) + A_{Po-214}(t), \quad (6.1)$$

missä  $t$  on aika ja  $A_{Rn}$  on radonin,  $A_{Po-218}$  polonium-218:n ja  $A_{Po-214}$  polonium-214:n aktiivisuus. ydinten hajoamisista johtuva aktiivisuus kuvaa ydinten lukumäärän muutosta ajan suhteen. Ydinten aktiivisuudella ja lukumäärällä on seuraavanlainen yhteys [2, s. 571]:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N, \quad (6.2)$$

missä yhtälön vasen puoli kuvaa ytimen aktiivisuutta ja  $\lambda$  on ytimelle ominainen hajoamisvakio. Aktiivisuuden kerroin on negatiivinen, sillä ydinten lukumäärä vähenee hajoamisten seurauksena. Hajoamisvakion yhtälö saadaan johdettua puoliintumisajan määritelmästä [2]

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (6.3)$$

Hajoamisvakio on siis

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}}. \quad (6.4)$$

Hajoamisvakion yhtälön 6.4 ja hajoamisnopeutta kuvaavan yhtälön 6.2 perusteella voidaan päätellä, että ydinten lukumäärän ollessa sama, ytimiä, joilla on pitkä puoliintumisaika, hajoaa vähemmän aikayksikköä kohden verrattuna ytimiin, joilla on lyhyt puoliintumisaika.

Yhtälöä 6.2 hyödyntäen ydinten aiheuttaman kokonaisaktiivisuuden yhtälö 6.5 voidaan ilmoittaa myös muodossa

$$A_{ytimet}(t) = \lambda_{Rn}N_{Rn}(t) + \lambda_{Po-218}N_{Po-218}(t) + \lambda_{Po-214}N_{Po-214}(t), \quad (6.5)$$

missä  $N_{Rn}(t)$  on radonin,  $N_{Po-218}(t)$  polonium-218:n ja  $N_{Po-214}(t)$  polonium-214:n ydinten lukumäärä kammiossa ajanhetkellä  $t$  ja  $\lambda_{Rn}$ ,  $\lambda_{Po-218}$  sekä  $\lambda_{Po-214}$  ydinten hajoamisvakiot.

Tavoitteena on saada erotettua radonin osuus kammiossa olevasta aktiivisuudesta, joten ydinten lukumäärien muutos ajan suhteen  $N(t)$  tulee selvittää. Radonydinten lukumäärään kammiossa vaikuttaa sen hajoamisnopeus sekä mittauksen alussa pumppauksen virtausnopeus. Radonin hajotessa syntyy  $^{218}\text{Po}$ -ytimiä, joten niiden määrään vaikuttaa sekä radonin hajoamisnopeus että niiden oma hajoaminen.  $^{214}\text{Po}$ -ydinten määrään vaikuttaa samalla tavoin  $^{218}\text{Po}$ -ydinten hajoamisnopeus sekä  $^{214}\text{Po}$ -ydinten oma hajoaminen.

Kun kammioon aletaan pumpata tutkittavaa kaasua, kammiossa olevan radonin pitoisuus kasvaa aluksi nopeammin ja sitten hitaammin. Tämä johtuu siitä, että pumppauksessa kammioon siirtyy tutkittavaa kaasua, mutta samalla sieltä poistuu sama määrä kammiossa olevan tutkittavan kaasun ja pumppauksen alussa kammiossa olleen puhtaan ilman seosta. Kammioista poistuu pumppauksen takia kammion radonkonsentraatiosta ja pumppausnopeudesta riippuva määrä ytimiä. Pumppauksen vaikutus radonydinten lukumäärään voidaan laskea seuraavalla tavalla:

$$N_{Rn, pump.}(t) = \frac{A_{Rn, Bq/m^3}}{\lambda_{Rn}} \cdot F - \frac{N_{Rn}(t)}{V} \cdot F, \quad (6.6)$$

missä  $A_{Rn, Bq/m^3}$  on tutkittavan kaasun radonpitoisuus yksikössä  $\text{Bq/m}^3$ ,  $F$  on pumppauksen virtausnopeus ja  $V$  kammion tilavuus.  $N_{Rn, pump.}(t)$  kasvaa siis ajan suhteen, kunnes kammiossa on vain tutkittavaa kaasua.

Kammiossa tapahtuvien ydinmuutosten nopeus voidaan ilmoittaa yhtälön 6.2 avulla. Hyödyntämällä tätä tietoa, sekä pumppauksen aiheuttamaa radonydinten määrän muutosta 6.6, voidaan kammiossa tapahtuvaa radonydinten muutosta ajan suhteen kuvata seuraavalla tavoin:

$$\frac{dN_{Rn}(t)}{dt} = N_{Rn, pump.}(t) - \lambda_{Rn}N_{Rn}(t). \quad (6.7)$$

Radonin hajoamisista johtuva ydinten väheneminen on lähes mitätön verrattuna pump-

pauksen mukana kammioista poistuviin radonytimiin, sillä radonin hajoamisvakio on todella pieni.

Jokaisessa radonin hajoamistapahtumassa syntyy  $^{218}\text{Po}$ -ydin.  $^{218}\text{Po}$ -ydinten lukumäärä siis kasvaa samalla tavoin kuin radonytimet vähenevät. Hajoamisten takia  $^{218}\text{Po}$ -ydinten lukumäärä ei pelkästään kasva, vaan se myös vähenee yhtälön 6.2 osoittamalla tavalla.  $^{218}\text{Po}$ -ydinten lukumäärän muutosta ajan suhteen kuvaa siis yhtälö

$$\frac{dN_{Po-218}(t)}{dt} = \lambda_{Rn}N_{Rn}(t) - \lambda_{Po-218}N_{Po-218}(t). \quad (6.8)$$

Samalla tavoin saadaan muodostettua muidenkin hajoamisketjun ydinten muutosnopeuden kaavat.  $^{214}\text{Pb}$ -ydinten muutosnopeutta kuvaa yhtälö

$$\frac{dN_{Pb-214}(t)}{dt} = \lambda_{Po-218}N_{Po-218}(t) - \lambda_{Pb-214}N_{Pb-214}(t), \quad (6.9)$$

missä  $\lambda_{Pb-214}$  on lyijy-214:n hajoamisvakio ja  $N_{Pb-214}(t)$   $^{214}\text{Pb}$ -ydinten lukumäärä.  $^{214}\text{Bi}$ -ydinten muutosnopeutta kuvaa yhtälö

$$\frac{dN_{Bi-214}(t)}{dt} = \lambda_{Pb-214}N_{Pb-214}(t) - \lambda_{Bi-214}N_{Bi-214}(t), \quad (6.10)$$

missä  $\lambda_{Bi-214}$  on vismutti-214:n hajoamisvakio ja  $N_{Bi-214}(t)$   $^{214}\text{Bi}$ -ydinten lukumäärä. Vastaavasti  $^{214}\text{Po}$ -ydinten muutosnopeutta kuvaa yhtälö

$$\frac{dN_{Po-214}(t)}{dt} = \lambda_{Bi-214}N_{Bi-214}(t) - \lambda_{Po-214}N_{Po-214}(t). \quad (6.11)$$

Johdettujen differentiaaliyhtälöiden avulla voidaan ratkaista ydinten lukumäärät eri ajanhetkillä.

Mittauksista saatavaan cps-arvoon vaikuttaa ydinten hajoamisesta johtuvan aktiivisuuden 6.5 lisäksi muista kuin alfahajoamisista tuleva taustakohinan signaali. Tämän lisäksi mittalaitteiston tehokkuus vaikuttaa oleellisesti mittauksista saatavaan cps-arvoon. Mittalaitteistomme ei havaitse kaikkia hajoamisia, joten on syytä valita ytimille painokertoimet. Painokertoimiin vaikuttaa lähinnä se, millä todennäköisyydellä kammiossa tapahtunut hajoaminen havaitaan. Jos oletetaan teorian olevan toimiva, hajoamisia tapahtuu teorian mukainen määrä. Tällöin painokertoimen ollessa 1, kaikki hajoamiset havaitaan, kun taas painokertoimen ollessa esimerkiksi 0,5, vain puolet hajoamisista havaitaan. On syytä siis olettaa, että painokertoimien arvot ovat välillä 0–1. Ottamalla sekä taustakohinan että mittalaitteiston tehokkuuden vaikutus huomioon, mittauksista saatavaa kokonaisaktiivisuuden signaalia kuvaa yhtälö

$$A_{kok}(t) = A\lambda_{Rn}N_{Rn}(t) + B\lambda_{Po-218}N_{Po-218}(t) + C\lambda_{Po-214}N_{Po-214}(t) + K(t), \quad (6.12)$$

missä vakiot  $A$ ,  $B$  ja  $C$  ovat vastaavasti radon-222:n, polonium-218:n sekä polonium-214:n painokertoimet ja  $K(t)$  taustakohinan vaikutus kokonaisaktiivisuuteen.

## 6.2 Kokonaisaktiivisuutta kuvaavan funktion sovitus

Jotta radonin pitoisuus voitaisiin päätellä mittauksista saatavan kokonaisaktiivisuutta kuvaavan cps-arvon avulla, täytyy johtamallemme kokonaisaktiivisuuden yhtälölle 6.12 saada määritettyä kertoimet. Koska ydinten muutosnopeudet riippuvat toisistaan, on funktion sovittamisessa käytännöllistä hyödyntää nopeusyhtälöä (eng. *rate equation*). Nopeusyhtälö muodostetaan syöttämällä johtamamme differentiaaliyhtälöt kaikkien hajoamisketjun ydinten muutosnopeuksille 6.7–6.11. Kun nopeusyhtälöä integroidaan Matlabin sisäänrakennetun ode45-funktion avulla, Matlab muodostaa sarjan datapisteitä kuvaamaan teorian mukaisia ydinten lukumääriä valituilla ajanhetkillä.

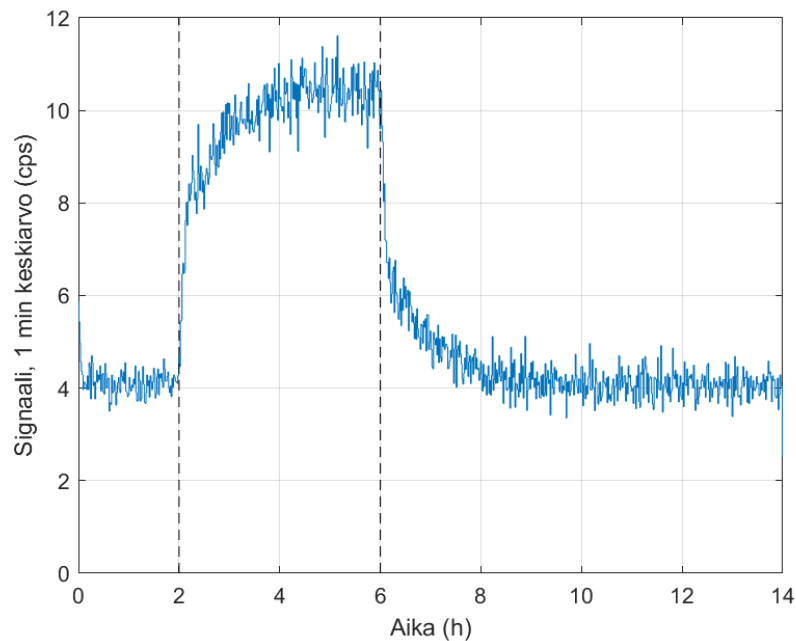
Ode45-funktio integroi sille annetut differentiaaliyhtälöt halutulla aikavälillä. Funktiolle annetaan differentiaaliyhtälöiden lisäksi yhtälöiden arvojen alkuehdot sekä aika-akselin arvot, joille funktion halutaan laskevan nämä yhtälöiden arvot. Funktio palauttaa matriisin, jossa on jokaista differentiaaliyhtälöä vastaava yhtälön arvo valituilla ajanhetkillä. Tässä tapauksessa funktion antamat arvot ovat ydinten lukumäärät valituilla ajanhetkillä.

Saadun matriisin arvojen perusteella voidaan muodostaa mittausdataan sopiva, teorian mukaisen mallin muotoinen funktio. Funktio sovitetaan mittausdataan kertoimien avulla. Matlabin lsqcurvefit-funktio on tähän tarkoitukseen sopiva. Kun ode45-funktion antamat  $^{222}\text{Rn}$ -,  $^{218}\text{Po}$ - ja  $^{214}\text{Po}$ -ydinten lukumäärät kerrotaan ydinten hajoamisvakioilla, saadaan yhtälön 6.2 mukaisesti arvot ydinten aktiivisuuksille funktiolle annetuilla ajanhetkillä. Kun teorian mukaiset aktiivisuudet ovat tiedossa, voidaan lsqcurvefit-funktiota hyödyntää kokonaisaktiivisuuden yhtälön 6.12 kertoimien valitsemisessa. Kun lsqcurvefit-funktiolle syötetään tarvittavat tiedot, se etsii rajoitusten mukaiset kertoimet, joilla mallin mukainen sovite vastaa mahdollisimman hyvin mittausdatan pisteitä. Funktiolle syötettävät tiedot ovat kokonaisaktiivisuuden yhtälön 6.12 mukainen malli, kertoimien  $A$ ,  $B$  ja  $C$  alkuarvot sekä rajoitukset, aika-akselin arvot sekä ode45-funktion avulla saadut aktiivisuuden ja mittausdatan arvot valituilla ajanhetkillä.

## 7. TULOKSET JA ANALYYSI

### 7.1 Funktion sovitus mittausdataan

Mittauksista saadusta datasta laskettiin aikaleimojen avulla jokaisen minuutin aikana kerättyjen tapahtumien lukumäärä. Tämä arvo jaettiin vastaamaan minuutin aikana kerättyjen tapahtumien cps-arvoa. Saaduista cps-arvoista eri minuuteilla muodostettiin kuvaaja. Kuvaaja on esitetty kuvassa 7.1

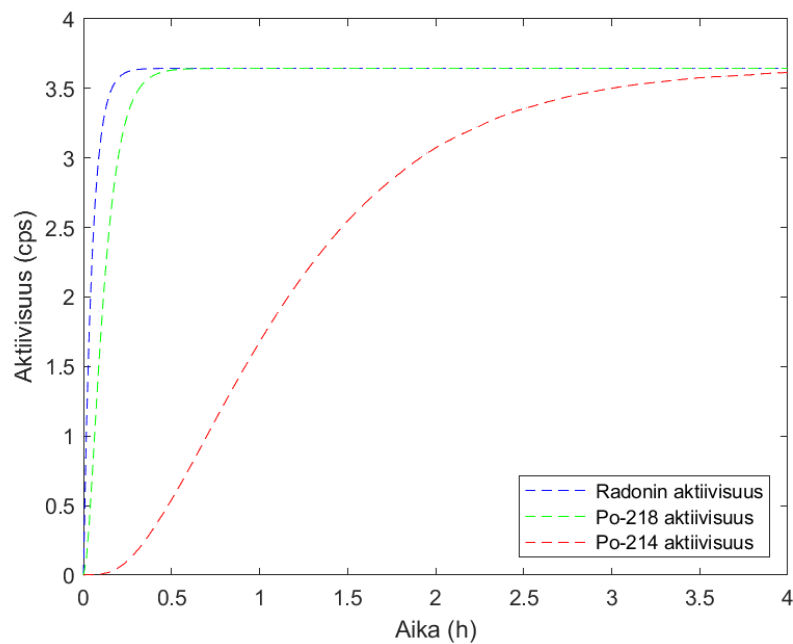


**Kuva 7.1.** Aktiivisuus kammiossa mittauksien aikana. Kuvassa näkyy alun huuhtelun (2 h), tutkittavan kaasun pumppauksen (4 h), sekä lopun huuhtelun (8 h) vaikutus mittauksista saatuun cps-arvoon. Kuvaan on piirretty katkoviivat osoittamaan ajanhetket, joilla tutkittavan kaasun pumppaaminen aloitettiin ja lopetettiin.

Kuvasta 7.1 nähdään, että alun huuhtelun aikana cps-arvo on noin 4. Kun radonpitoista ilmaa aletaan pumppaamaan 2 h kuluttua, cps-arvo nousee eksponentiaalisesti suurin piirtein arvoon 10 cps. Kammion läpi aletaan 6 h kohdalla pumpata taas puhdasta ilmaa, jolloin cps-arvo alkaa laskea eksponentiaalisesti, kunnes se saavuttaa uudelleen arvon 4 cps. Ensimmäisen kahden tunnin aikana sekä lopussa, kun radonpitoinen ilma on poistunut kokonaan kammioista huuhtelun seurauksena, kammiossa on vain synteettistä ilmaa.

Tämän tiedon perusteella voidaan taustakohinan vaikutuksen ajatella olevan datan cps-arvo kyseisillä aikaväleillä. Koska taustakohinan arvo näyttää olevan lähes vakio, voidaan sille laskea keskiarvo viimeisten tuntien ajalta. Taustakohinan arvoksi  $K(t)$  saadaan 4,07 cps.

Aikavälillä 2–6 h kammion läpi pumpataan tutkittavaa kaasua. Tälle aikavälille halutaan saada mittaustataan sopiva funktio, mikä on samaa muotoa kuin aikaisemmin johdettu kokonaisaktiivisuuden funktio 6.12. Funktion sovittaminen tehdään edellisessä kappaleessa esitetyllä tavalla. Ensin muodostetaan nopeusyhtälö differentiaaliyhtälöiden 6.7–6.11 avulla. Saatu nopeusyhtälö annetaan ode45-funktiolle, joka antaa nopeusyhtälön mukaiset ydinten lukumäärät halutuilla ajan arvoilla. Ajan arvoina käytettiin 2-6 h aikavälin minuuttien arvoja. Ydinten lukumäärien tiedettiin olevan alkuhetkellä 0, jota käytettiin alkuarvona kaikkien ytimien lukumäärille. Kun ode45-funktion antamat arvot kerrotaan ydinten hajoamisvakioilla, saadaan ydinten aktiivisuuksille arvot valituilla ajanhetkillä. Tällä tavoin saadut  $^{222}\text{Rn}$ -,  $^{218}\text{Po}$ - ja  $^{214}\text{Po}$ -ydinten aktiivisuudet on esitetty kuvassa 7.2.

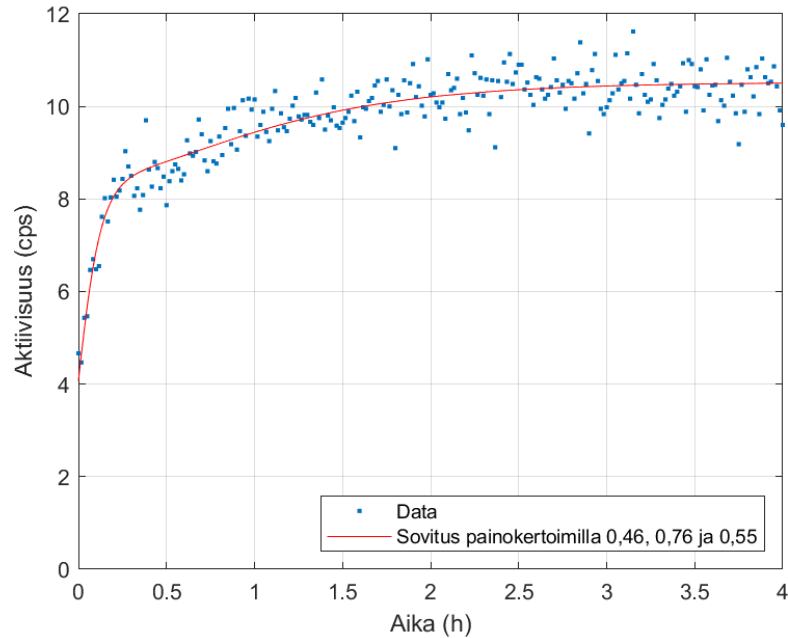


**Kuva 7.2.**  $^{222}\text{Rn}$ -,  $^{218}\text{Po}$ - ja  $^{214}\text{Po}$ -ydinten teorian mukaiset aktiivisuudet, kun kammioon pumpataan radonpitoista ilmaa.

Kuvan 7.2 käyristä nähdään, että radon-222:n sekä polonium-218:n aktiivisuus tasoittuu jo noin puolen tunnin kuluttua radonpitoisen ilman pumppauksen aloittamisesta. Polonium-214:n aktiivisuus kasvaa huomattavasti hitaammin, eikä se tasaannu edes neljän tunnin pumppauksen aikana.

Aktiivisuuksien määrittämisen jälkeen kokonaisaktiivisuuden yhtälö 6.12 sovitetaan mittaustataan lsqcurvefit-funktion avulla. Funktion mallina käytettiin kokonaisaktiivisuuden yhtälöä 6.12, missä ydinten lukumäärinä käytettiin nopeusyhtälön ja ode45-funktion avul-

la saatuja arvoja ja taustasäteilyn arvona aiemmin määriteltyä 4,07 cps. Kertoimien rajoituksina käytettiin väliä 0–1. Kertoimiksi saatiin  $A=0,43$ ,  $B=0,76$  ja  $C=0,55$ . Kokonaisaktiivisuuden funktion 6.12 kuvaaja saaduilla kertoimilla on esitetty kuvassa 7.3.



**Kuva 7.3.** Mittausdataan tehty sovitus. Sovitteen mallina käytetty kokonaisaktiivisuutta kuvaavaa funktiota 6.12.

Kuten kuvasta 7.3 huomataan, kokonaisaktiivisuuden kuvaaja ei tasoitu kunnolla neljän tunnin aikana. Jotta kokonaisaktiivisuuden kuvaaja tasoittuisi, täytyisi mittauksia jatkaa vielä pidempään.

Saadut kertoimet ilmoittavat meille ydinten suhteet toisiinsa nähden. Suhde pysyy vakiona, joten saatuja kertoimia voidaan hyödyntää myös muiden tuntemattomien kaasujen radonpitoisuuden arvioimisessa. Luotettavien tulosten saamiseksi olisi syytä kuitenkin suorittaa enemmän mittauksia, jotta kertoimien arvot olisivat luotettavat.

## 7.2 Radonin pitoisuuden määrittäminen funktion avulla

Kokonaisaktiivisuuden yhtälöstä 6.12 voidaan ratkaista radonin aktiivisuutta kuvaava osuus

$$A_{Rn}(t) = \frac{A_{kok}(t) - B \cdot \lambda_{Po-218} N_{Po-218}(t) - C \cdot \lambda_{Po-214} N_{Po-214}(t) + K(t)}{A}. \quad (7.1)$$

Yhtälöä 7.1 voidaan hyödyntää, kun halutaan määrittää tuntemattoman kaasun radonpitoisuus. Jos taustakohinan ajatellaan olevan sama kuin aiemmin suoritetuissa mittauksissa ja määritetyt painokertoimet ovat oikein, on yhtälössä kolme muuttujaa. Ongelma voidaan ratkaista sillä, että mittauksia jatketaan kunnes kokonaisaktiivisuuden arvo on tasoittunut. Kuten kuvasta 7.2 huomataan, ytimien aktiivisuudet ovat samat kokonaisak-

tiivisuuden tasoituttua. Tällöin kokonaisaktiivisuuden ja ydinten arvot pysyvät vakioina ja radonin pitoisuuden ratkaiseminen yhtälön 7.1 avulla on helppoa.

Jotta mittauksien perusteella voitaisiin päätellä radonin pitoisuus, oletetaan kokonaisaktiivisuuden olevan lähes tasoittunut ajanhetkellä 4 h. Sovitteen arvo on kyseisellä ajanhetkellä 10,5 cps. Sijoittamalla tämä arvo kokonaisaktiivisuuden arvoksi yhtälöön 7.1 ja käyttämällä kertoimia  $A=0,43$ ,  $B=0,76$  ja  $C=0,55$  sekä taustakohinan arvoa 4,07 cps, saadaan radonin aktiivisuudeksi 3,64 cps. Arvo vastaa  $870 \text{ Bq/m}^3$  radonpitoisuutta, mikä oli tutkittavan kaasun radonpitoisuus myös AlphaGuard-mittalaitteen mukaan.

### 7.3 Mittausajan minimointi

Jos kokonaisaktiivisuuden tulee tasoittua radonin pitoisuuden määrittämiseksi, mittausajan tarvitsee olla ainakin neljä tuntia käytetyllä mittauslaitteistolla. Koska ydinten suhde pysyy vakiona, olisi luultavasti myös mahdollista määrittää radonin pitoisuus ennen kuin kokonaisaktiivisuus on kasvanut maksimiarvoonsa. Koska kokonaisaktiivisuuden funktion painokertoimien tarkkoja arvoja ei tiedetä, on varmempaa päätellä tulos kokonaisaktiivisuudesta silloin, kun se pysyy vakiona.

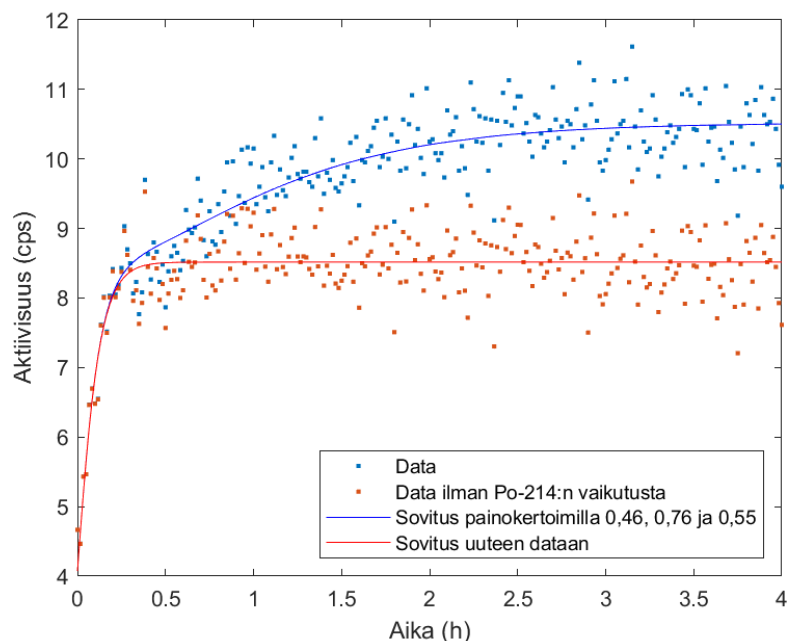
Kuten kuvasta 7.2 nähdään, kokonaisaktiivisuuden tasoittumiseen vaikuttaa oleellisesti polonium-214:n aktiivisuus. Ilman polonium-214:n vaikutusta kokonaisaktiivisuus voisi tasoittua jo noin puolen tunnin kuluttua. Lyhyempi mittausaika voidaan saavuttaa, jos polonium-214:n vaikutus aktiivisuuteen tiedetään, jolloin se voidaan vähentää datasta. Polonium-214:lle määritettyä painokerrointa  $C=0,55$  ja ode45-funktion avulla laskettuja  $^{214}\text{Po}$ -ydinten aktiivisuuksien arvoja eri ajanhetkillä hyödyntäen, voidaan mittausdatasta vähentää polonium-214:n aiheuttama vaikutus. Uuteen dataan voidaan tehdä sovitus samalla tavoin kuin aikaisemminkin lsqcurvefit-funktion avulla, mutta ilman polonium-214:n vaikutusta yhtälöön. Uusi kuvaaja on esitetty kuvassa 7.4

Kuvasta 7.4 nähdään, että kokonaisaktiivisuus tasoittuu huomattavasti nopeammin, kun datasta on vähennetty polonium-214:n vaikutus dataan. Polonium-214:n vähentämistä vastaava radonin aktiivisuuden yhtälön 7.1 tekijä

$$A_{kok}(t) - C \cdot A_{Po-214}(t) \quad (7.2)$$

saa vakioarvon jo alle puolen tunnin mittausajalla, mikä on nähtävissä kuvasta 7.4. Kun vakioarvo on saavutettu, myös muut yhtälön arvot pysyvät vakioina ja radonin pitoisuus on laskettavissa.

Koska kertoimien suhde toisiinsa pysyy vakiona, on mahdollista, että riittävän tarkkoja tuloksia saataisiin tutkimalla kokonaisaktiivisuuden funktion käyttäytymistä jo ennen sen tasoittumista. Tällöin radonin pitoisuuden määrittäminen voisi olla mahdollista myös alle puolen tunnin mittausajalla.



**Kuva 7.4.** Koko mittausdataan sekä dataan ilman polonium-214:n vaikutusta tehdyt sovitukset. Painokertoimiksi saatiin uuden datan avulla 0,47 ja 0,75. Uusien datapisteiden laskemisessa polonium-214:n kertoimena on käytetty arvoa 0,55.

## 7.4 Virhearvio

Suurin virhe mittauksiin tuli varmasti mittalaitteiston toiminnasta. Muista lähteistä aiheutuneen signaalin erottaminen mittauksen kannalta oleellisista signaaleista on haastavaa. Tämän lisäksi kaikista hajoamisista ei saada signaalia, eli laitteiston tehokkuus ei ole kovin hyvä. Tätä kompensoimaan valittavia painokertoimia eri ytimille ei voida myöskään kovin luotettavasti määrittää, vaikka ne toimivatkin mittauksista saadulle datalle tällä kertaa.

Kertoimien valinnassa hyödynnettiin mittausdataa, itse rakennettua nopeusyhtälöä, sekä Matlabin omia ode45- ja lsqcurvefit-funktioita. Asettamalla kertoimien rajoiksi väli 0–1, saatiin niille arvot  $A=0,43$ ,  $B=0,76$  ja  $C=0,55$ . Johan Sandin väitöskirjassa [21] Sand on valinnut kertoimiksi radonille 0,7 ja poloniumin isotoopeille 0,4. Radonin havaitsemistodennäköisyyden pitäisi olla suurempi kuin poloniumin isotooppien, sillä radon on kammiossa kaasuna, kun taas poloniumin isotoopit esiintyvät kiinteinä. Kaasumainen radon lähettää hajotessaan alfahiukkasia kaikkiin suuntiin. Kiinteä polonium taas kerääntyy kammion pintaan, jolloin sen hajoamisesta syntyvistä alfahiukkasista osa päätyy suoraan kammion seinämään, eikä näistä tapahtumista saada signaalia. Mahdollisesti tästä syystä Sand on voinut valita poloniumin isotoopeille samat arvot. Polonium-218:n puoliintumisaika on 3,10 minuuttia, joten se on luultavasti todellisuudessa ehtinyt kerääntyä kammion pintaan ennen hajoamista.

Radonille saatu painokerroin  $A=0,43$  aiheutti jo sovitteita tehdessä hämmennystä. Radonin havaitsemistodennäköisyyden kuuluisi olla teorian mukaan suurempi kuin poloniumin isotooppien. Tästä syystä annettiin lsqcurvefit-funktion sovittaa dataan kokonaisaktiivisuuden yhtälön 6.12 mallinen funktio niin, että radonin painokerroin oli itse määritetty. Muutama esimerkki tällä tavoin saaduista kertoimista on esitetty taulukossa 7.1.

**Taulukko 7.1.** *Poloniumydinten kertoimet B ja C eri radonin kertoimilla A. Virheenä käytetty mittausdatan kaikkien pisteiden yhteenlaskettua virhettä, kun pisteitä on verrattu sovituksen arvoon samalla ajanhetkellä.*

A	B	C	virhe
0,50	0,72	0,55	78
0,60	0,61	0,56	78
0,70	0,51	0,57	78
0,80	0,40	0,57	79
0,90	0,30	0,58	80
1,00	0,19	0,59	81

Taulukosta 7.1 nähdään, että virhe pysyy lähes vakiona eri kertoimilla. Vaikka radonin ja polonium-218:n kertoimet vaihtelevat suuresti, polonium-214:n kerroin pysyy koko ajan lähes samana. Tämän perusteella polonium-214:n painokerroin on mittauksista riippumatta lähellä valittua arvoa 0,55. Tämä tarkoittaa sitä, että mittausajan lyhentäminen kappaleessa 7.3 esitetyllä tavalla on hyvinkin mahdollista ilman, että siitä syntyy suurta virhettä radonin pitoisuuden arvoon.

Radonin ja polonium-218:n kertoimien määrittämisen vaikeus johtuu luultavasti siitä, että niiden hajoamisista saatavat signaalit on vaikea erottaa toisistaan. Polonium-218:n puoliintumisaika on vain 3,10 minuuttia, mikä hankaloittaa erottamista. Radonin ja polonium-218:n yhteisvaikutus kuitenkin pysyy samana, joten kertoimien tarkoilla arvoilla ei tässä tapauksessa ole juurikaan merkitystä. Jos radonpitoisuus haluttaisiin määrittää funktion avulla jo ennen  $^{222}\text{Rn}$ - ja  $^{218}\text{Po}$ -ydinten lukumäärän stabiiloitumista, täytyisi kertoimille  $A$  ja  $B$  saada määritettyä tarkemmat arvot. Tarkemmat arvot voitaisiin mahdollisesti määrittää, kun mittauksia suoritettaisiin enemmän. Mittauksissa olisi hyvä käyttää myös kaasuja, joiden radonpitoisuudet vaihtelevat.

Taustakohinan suuren määrän vähentämiseen Sand on käyttänyt väitöskirjassaan [21] eri aikaikkunoiden integraalien avulla laskettua PSD-arvoa (eng. *pulse shape discrimination*). PSD arvo voidaan laskea seuraavan yhtälön avulla:

$$PSD = \frac{Q_{long} - Q_{short}}{Q_{long}}, \quad (7.3)$$

missä  $Q_{long}$  on pitkän aikavälin ikkunan ja  $Q_{short}$  lyhyen aikavälin ikkunan integraalin ar-

vo. Pitkän aikavälin ikkunalle (eng. *long window*) käytettiin arvoa 50 ns ja lyhyen aikavälin ikkunalle arvoa 7 ns (eng. *short window*). PSD-arvon perusteella pystytään päättämään onko detektorilla havaittu vain yksi foton vai enemmän. PSD-arvon perusteella Sand on vähentänyt mittausdatasta tapahtumat, joissa molempiin detektoreihin on osunut vain yksi foton. Tämä on perusteltu sillä, että suurin osa taustakohinan vaikutuksesta näkyy juuri näissä tapahtumissa.

Tässä työssä määritetyt kertoimet ovat samankaltaiset kuin Johanin valitsemat kertoimet, vaikka datassa oli mukana myös tapahtumat, joissa molempiin detektoreihin oli osunut vain yksi foton. Tällaisten tapahtumien vähentäminen mittausdatasta ei siis välttämättä ole tarpeen radonpitoisuuksien määrittämisessä. Taustakohinan arvo pysyy lähes vakiona, mikä tekee sen vaikutuksen vähentämisen mittausdatasta helpoksi.

Radonin pitoisuuden määrittämiseen tässä työssä esitellyn jatkuvatoimisen optisen havainnoinnin avulla tarvitaan noin puolen tunnin mittausaika. Tämä on jo parempi mittausaika kuin ilman poloniumin vähentämistä mittausdatasta. Muihin radonin jatkuvatoimiseen havainnointiin tarkoitettuihin mittalaitteisiin verrattuna tämä on kuitenkin vielä suhteellisen pitkä aika. Käyttämämme mittauslaitteiston vahvuutena on kuitenkin mittauskammion tilavuus. Esimerkiksi AlphaGuardin kammion tilavuus on vain 0,56 litraa, kun taas tämän työn mittalaitteiston kammio on 4,2 litraa. Suuren tilavuuden ansiosta kammiossa tapahtuvien hajoamisten määrä on suurempi kuin pienessä kammiossa tapahtuvien hajoamisten määrä. Mittauksista saatua dataa on siis enemmän, jolloin virhe pienenee.

Työssä käytetyn mittalaitteiston heikkoutena voidaan pitää taustakohinan määrää. Koska ilman radioluminesenssi on heikko ilmiö, täytyy mittauksissa käyttää herkkiä mittalaitteita, mikä lisää taustakohinan määrää. Sand on arvioinut työssä käytetyn mittalaitteiston taustakohinan arvoksi 1,8 cps, kun mittausdatasta on vähennetty tapahtumat, joissa molempiin detektoreihin on osunut vain yksi foton. Verrattuna AlphaGuardin taustakohinan arvoon, mikä on alle 0,0002 cps, taustakohinan määrä on suuri. Jos Sandin tekemiä muutoksia dataan ei tehdä, taustakohinan arvo on vielä suurempi, noin 4,07 cps.

Jotta jatkuvatoimista optista havainnointia käytettäisiin radonin pitoisuuksien määrittämiseen tulevaisuudessa, täytyisi mittalaitteistoa siis vielä kehittää. Taustakohinan vähentämisen ja kertoimien määrittämisen tarkkuuden parantamisen lisäksi on syytä kiinnittää huomiota mittauksen kustannuksiin. Laitteiston osat ovat kalliita, mikä todennäköisesti selittää, miksei vastaavaa laitetta ole markkinoilla.

## 8. YHTEENVETO

Työssä tutustuttiin aluksi radonista peräisin olevaan alfasäteilyyn. Radon on luonnossa esiintyvä radioaktiivinen kaasu, jota syntyy pääasiassa maaperän uraanin hajoamisen seurauksena. Maaperästä radon pääsee sisätiloihin rakennuksien alipaineen takia, minkä takia radon onkin suurin säteilyaltistaja. Pitkän ajan altistus säteilylle aiheuttaa terveysriskin. Suomessa radonpitoisuudet ovat erityisen korkeita, minkä takia pitoisuuksien mittaaminen on tärkeää sisäilman turvallisuuden varmistamiseksi. Radonin haitallisuus perustuu sen hajoamistuotteiden, kuten poloniumin isotooppien ja lyijyn isotooppien, alfa-aktiivisuuteen. Alfahajoamisen seurauksena ytimeistä emittoituu suurienerginen alfahiukkanen, jotka ionisoivat atomeja ja molekyylejä törmätessään niihin. Radonpitoista ilmaa hengitettäessä keuhkoihin kerääntyvät radonin tytärytimet aiheuttavat ionisaatiota hajotessaan keuhkoissa. Ionisaation seurauksena voi syntyä soluvaurioita, mikä lisää keuhkosyövän riskiä.

Radonin havainnointiin on käytössä monenlaisia laitteita. Työssä tutustuttiin kolmeen eri käytössä olevaan mittalaitteeseen: radonpurkkiin, Lucas-kammioon sekä ionisaatiokammioon. Radonpurkki on yleisimmin käytössä oleva mittalaite, joka ilmoittaa radonpitoisuuden keskiarvon muutaman kuukauden mittausajalta. Lucas-kammiota ja sen pohjalta kehitettyjä menetelmiä on käytetty jo pitkään. Myöhemmin käyttöön tullut ionisaatiokammio on kuitenkin korvannut Lucas-kammion käytön. Sekä Lucas-kammio, että ionisaatiokammio kertovat radonin pitoisuuden reaaliaikaisesti. Lucas-kammioista saadaan signaali alfahajoamisesta kammiossa syntyneiden fotonien avulla, kun taas ionisaatiokammiossa kammiossa syntyvien ionien aiheuttamasta sähkövirrasta.

Alfahajoamisen optinen havainnointi edellyttää luminesenssi-ilmiön ymmärtämistä. Kun atomin elektroni virittyy ja tämä viritystila purkautuu, syntyy fotoneita, eli valoa. Ilmiötä kutsutaan luminesenssiksi. Jos viritystila on syntynyt ionisoivasta säteilystä, voidaan puhua radioluminesenssista. Radonin optinen havainnointi perustuu sen hajoamisessa syntyvien alfahiukkasten aiheuttamaan luminesenssiin tutkittavassa kaasussa. Kun tutkittavana kaasuna on ilma, voidaan typpimolekyylien luminesenssi havaita. Koska luminesenssin signaali on heikko, täytyy mittalaitteisto valita niin, että se havaitsee fotonit herkästi.

Työssä käytössä ollut mittausdata oli peräisin Tampereen yliopiston optiikan laitoksella aiemmin suoritetuista mittauksista. Mittauksissa käytetty laitteisto koostui pallon muotoisesta mittauskammioista, jonne pumpattiin tutkittavaa ilmaa. Kammiossa tapahtuvat alfa-hajoamiset havaittiin niiden aiheuttaman luminesenssin avulla. Luminesenssissa syntyneet fotonit havaittiin valomonistinputkilla. Jotta radonin pitoisuus voitiin päätellä mittausdatasta, täytyi koko kammion signaalista saada eroteltua radonin vaikutus siihen. Tämä tehtiin muodostamalla kammiossa olevaa kokonaisaktiivisuutta kuvaava yhtälö. Yhtälön sovittaminen mittausdataan antoi eri ydinten hajoamisille kertoimet, jolloin radonin pitoisuuden määrittäminen kokonaisaktiivisuuden tasoituttua oli mahdollista. Kokonaisaktiivisuuden huomattiin tasoittuvan mittauksissa vasta yli neljän tunnin jälkeen. Mittausajan minimoinniksi mittausdatasta vähennettiin radonin tytärytimen polonium-214:n vaikutus siihen. Tämä teki mahdolliseksi radonin pitoisuuden määrittämisen jo noin puolen tunnin jälkeen.

Kokonaisuudessaan voidaan todeta mittauksissa käytössä olleen jatkuvatoimisen optisen havainnoinnin olevan toimiva tapa radonin pitoisuuden määrittämiseen. Virhettä tähän toi kuitenkin esimerkiksi kokonaisaktiivisuuden yhtälön kertoimien valitsemisen epätarkkuus sekä laitteiston herkkyydestä johtuva taustakohinan määrä. Jotta mittaustavan luotettavuus olisi määritettävissä, täytyisi mittauksia suorittaa enemmän. Mittausten määrä voisi tarkentaa myös kertoimien valintaa. Teoriassa työ kuitenkin selittää hyvin laitteiston toiminnan ja suoritettujen mittausten perusteella voidaan todeta teorian toimivan kohtuullisen hyvällä tarkkuudella. Radonin jatkuvatoiminen optinen havainnointi ei kuitenkaan ainakaan lähitulevaisuudessa tule korvaamaan jo käytössä olevia mittalaitteita, sillä mittalaitteisto on aika hintava, eikä merkittäviä hyötyjä verrattuna muihin mittaustapoihin ole havaittu.

## LÄHTEET

- [1] O. Kurkela, J. Nevalainen, S.-M. Pätsi, K. Kojo, O. Holmgren ja A. Auvinen, "Lung cancer incidence attributable to residential radon exposure in Finland," vol. 62, s. 35–49, 2023. DOI: 10.1007/s00411-022-01004-1.
- [2] M. Mansfield ja C. O'Sullivan, *Understanding physics*, Third edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2020, ISBN: 978-1-119-51950-8.
- [3] National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. "Chart of nuclides." Online database. (2024), url: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/> (viitattu 06.05.2024).
- [4] R. Harris, *Modern physics* (Pearson custom library), Second edition. Harlow: Pearson, 2013, ISBN: 978-1-29202-326-7.
- [5] M. Lounsbury, "The natural abundances of the uranium isotopes," *Canadian journal of chemistry*, vol. 34, nro 3, s. 259–264, 1956. DOI: 10.1139/v56-039.
- [6] T. Valmari, I. Mäkeläinen, H. Reisbacka ja H. Arvela, "Suomen radonkartasto 2010," Säteilyturvakeskus, tekninen raportti, 2010.
- [7] R. Pöllänen, *Säteily ympäristössä*. Säteilyturvakeskus, 2003, ISBN: 951-712-497-X.
- [8] O. Holmgren, H. Reisbacka ja H. Arvela, "Asuntojen radonkorjaaminen," Säteilyturvakeskus, tekninen raportti, 2012.
- [9] "Radonkartat." (2023), url: <https://stuk.fi/radonkartat> (viitattu 27.03.2024).
- [10] *Säteilylaki 859/2018*, Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20180859>, 9. marraskuuta 2018. (viitattu 06.05.2024).
- [11] *Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriön asetus ionisoivasta säteilystä 1044/2018*, Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20181044>, 22. marraskuuta 2018. (viitattu 06.05.2024).
- [12] W. Paile, *Säteilyn terveysvaikutukset*. Säteilyturvakeskus, 2002, ISBN: 951-712-499-6.
- [13] J. Miles, "Methods of Radon Measurement and Devices," National Radiological Protection Board, tekninen raportti, 2004.
- [14] N. F. Kadhum, L. A. Jebur ja A. A. Ridha, "Studying Different Etching Methods Using CR-39 Nuclear Track Detector," *Detection*, vol. 4, nro 3, s. 45–53, 2016. DOI: 10.4236/detection.2016.43007.
- [15] "Sisäilman radonmittaukset." (2023), url: <https://stuk.fi/sisailman-radonmittaukset> (viitattu 12.03.2024).
- [16] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, 4. ed. John Wiley, 2010, ISBN: 978-0-470-13148-0.

- [17] M. R. Calin, A. C. Ion, I. Radulescu, C. A. Simion, M. M. Mincu ja I. Ion, "Analysis of the radon concentrations in natural mineral and tap water using Lucas cells technique," *Journal of environmental engineering and landscape management*, vol. 30, nro 3, s. 370–379, 2022, ISSN: 1648-6897.
- [18] T. K. Ikäheimonen, *Säteily ja sen havaitseminen*. Säteilyturvakeskus, 2002, ISBN: 951-712-496-1.
- [19] *AlphaGUARD Portable Radon Monitor User Manual*, Saphymo GmbH, 2010.
- [20] H. Karttunen, J. Koistinen, E. Saltikoff ja O. Manner, *Ilmakehä, sää ja ilmasto*. Ursa, 2008, ISBN: 978-952-5329-61-2.
- [21] J. Sand, "Alpha Radiation Detection via Radioluminescence of Air," tohtorinväitös-kirja, Tampere University of Technology, 2016.