



# 4

## RADON SISÄILMASSA

Anne Weltner, Hannu Arvela, Tuukka Turtiainen,  
Ilona Mäkeläinen, Tuomas Valmari

### SISÄLLYSLUETTELO

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 4.1 | Terveyshaitta .....                             | 112 |
| 4.2 | Radonlähteet .....                              | 120 |
| 4.3 | Radonin alueellinen esiintyminen .....          | 122 |
| 4.4 | Radonpitoisuuteen vaikuttavia tekijöitä .....   | 128 |
| 4.5 | Radonin ja hajoamistuotteiden mittaaminen ..... | 135 |
| 4.6 | Radonia koskevat hallinnolliset ohjeet .....    | 140 |
| 4.7 | Radonkorjaukset .....                           | 143 |
| 4.8 | Radon uudisrakentamisessa .....                 | 149 |
| 4.9 | Radonfysiikkaa .....                            | 150 |

Radon on sisäilmassa esiintyvä radioaktiivinen kaasu, jonka on todettu lisäävän riskiä sairastua keuhkosityöpään. Suomessa todetaan vuosittain 2000 keuhkosityöpää, joista radonin arvioidaan aiheuttavan 100–600. Kotimaisten ja kansainvälisten tutkimusten perusteella todennäköisimpänä määränä pidetään 200 vuotuisia keuhkosityöpätapausta. Ei ole havaittu, että radon aiheuttaisi muita terveyshaittoja kuin keuhkosityöpää.

Radonia syntyy kallio- ja maaperässä radioaktiivisen uraanin ja toriumin hajoatessa useiden vaiheiden kautta lopulta stabiiliksi, ei-aktiiviseksi lyijyksi (liitteet 1 ja 2). Radon on hajoamissarjojen ainoa kaasu ja sitä esiintyy useina isotooppeina: uraanisarjan  $^{222}\text{Rn}$  (radon), toriumisarjan  $^{220}\text{Rn}$  (toron) ja aktiniumisarjan  $^{219}\text{Rn}$  (aktinon). Säteilysuojelun kannalta merkittävin radonin isotooppi on  $^{238}\text{U}$ -sarjan  $^{222}\text{Rn}$ , jonka puoliintumisaika on 3,8 vuorokautta.  $^{220}\text{Rn}$ :n puoliintumisaika on 56 sekuntia, joten vain pieni osa siitä ehtii kulkeutua maa- ja kallioperästä hengitysilmaamme. Aktiniumsarjaan kuuluvaa radonin isotooppia  $^{219}\text{Rn}$  ei käytännössä hengitysilmassa esiinny lyhyen puoliintumisaajan (3,96 s) ja maankuoren hyvin pienen  $^{235}\text{U}$ -pitoisuuden vuoksi. Jatkossa radonista puhuttaessa tarkoitetaan nimenomaan isotooppia  $^{222}\text{Rn}$ . Radonin ja sen hajoamistuotteiden aktiivisuuspitoisuuden ja altistuksen yksiköitä kuvataan tarkemmin luvussa 4.9. Termin radonin aktiivisuuspitoisuus sijaan käytetään jatkossa lyhyempää termiä radonpitoisuus.

Sisäilman suuri radonpitoisuus johtuu maaperän erittäin radonpitoisen ilman virtauksesta sisätiloihin. Suomalaisissa asunnoissa sisäilman keskimääräinen radonpitoisuus on 120 becquereliä kuutiometrissä ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ), joka on korkeimpia arvoja maailmassa. Syynä suureen pitoisuuteen ovat kylmä ilmastomme, rakennusten perustamistapa ja tiivys sekä tavallista enemmän urania sisältävä maankamara ja hyvin ilmaa läpäisevä rakennusmaa. Sisäilman radonista aiheutuu suomalaisille keskimäärin 2 millisievertin (mSv) säteilyannos vuodessa eli noin puolet vuotuisesta efektiivisestä annoksesta.

## 4.1 | Terveyshaitta

Radoniin liittyvä keuhkosityöpävaara ei aiheudu itse radonkaasusta, vaan sen lyhytikäisistä hajoamistuotteista. Sekä radonkaasu että ilmassa leijuvat radonin hajoamistuotteet kulkeutuvat hengitysilman mukana keuhkoihin. Toisin kuin radonkaasu, hajoamistuotteet tarttuvat keuhkoputkistoon ja keuhkorakkuloihin aiheuttaen keuhkoille säteilyannoksen. Saatu annos lisää riskiä sairastua keuhkosityöpään.

Radonin ja keuhkosyövän välisestä yhteydestä on olemassa paljon eri menetelmin saatua tietoa. Yhteyden selvittämiseen on käytetty ainakin kolmea lähestymistapaa: epidemiologiaa, dosimetriaa ja eläinkokeita.

Epidemiologia on tutkimusala, jonka kohteena on sairauksien esiintymisen väestössä. Seurantatutkimuksissa selvitetään yhden tai useamman sairauden ilmaantuvuutta valitussa ihmisjoukossa (kohortissa), jonka altistus tietylle tekijälle tunnetaan. Tapaus-verrokkitutkimuksissa taas selvitetään, eroaako tiettyyn tautiin, kuten keuhkosyöpään, sairastuneiden henkilöiden altistus (yksi tai useampia altisteita) heille valittujen verrokkihenkilöiden altistuksesta. Radonin aiheuttamaa keuhkosyöpävaaraa selvittävät seurantatutkimukset ovat useimmiten kohdistuneet kaivosympäristössä saatuun altistukseen ja tapaus-verrokkitutkimukset asuinympäristön altistukseen.

Dosimetria tarkoittaa säteilyannosten mittaamista tai arvioimista laskennallisin menetelmin. Radondosimetria perustuu sekä kokeelliseen että teoreettiseen tutkimukseen. Sen päämääränä on arvioida radonista ja sen lyhytikäisistä hajoamistuotteista aiheutuva säteilyannos ja sen perusteella syöpäriski. Laadullisesti parhaat ja laajimmat epidemiologiset tutkimukset ovat selvittäneet radonin vaikutusta kaivoksissa työskennelleisiin aikuisiin miehiin. Radondosimetrian avulla näiden tutkimusten riskiarvioita voidaan soveltaa myös sellaisiin ihmisryhmiin ja olosuhteisiin, joiden riskistä ei ole saatavilla kvantitatiivista tietoa (naiset ja lapset, asuinympäristö).

Eläinkokeilla voidaan tutkia edellisiä lähestymistapoja tarkemmin miten esimerkiksi tupakansavu tai altistuksen jaksottaminen muuttaa radonaltistuksesta aiheutuvaa riskiä. Haittapuolena on, ettei tuloksia voida suoraan soveltaa ihmiseen.

## Historiaa

Radonin terveyshaittojen tutkimuksen voidaan katsoa alkaneen 1500-luvulla. Ensimmäiset tiedossa olevat radonin uhrit olivat kaivostyöntekijöitä. Tuon ajan kaivostekniikasta on käytettävissä melko tarkkoja tietoja alan uranuurtajan Georgius Agricolan vuonna 1556 ilmestyneen kirjan ”De Re Metallica” ansiosta. Kirjan mukaan 1400-luvun lopulla alkoi voimaperäinen hopeakaivostoiminta Erzgebirgen pohjoisrinteillä Schneebergin alueella (nykyisin Saksan aluetta) sekä toisella puolella Erzgebirgeä Joachimsthalissa (nykyisin Jáchymovin kaupunki Tshekissä). Agrico-

lan mukaan Schneebergissä malmi oli hyvin syvällä. Jotkin kaivoskuilut ulottuivat jopa 400 metrin syvyyteen. Ilmanvaihto kuiluissa oli ilmeisesti kaukana nykyisistä työsuojelunormeista. Joachimsthalissa taas malmiä louhittiin läheltä maan pintaa. Aikalaiset havaitsivat, että Schneebergissä nuoret miehet kuolivat usein keuhkosairauteen. Ensimmäisenä havainnon kirjasi Paracelsus, jonka teos ”Von der Bergsucht und anderen Bergkrankheiten” ilmestyi 1567. Sanaa Bergsucht – vuorisairaus – käytettiin yleisnimenä kaivosmiesten keuhkosairauksille. Sairautta kutsuttiin myöhemmin Schneebergin keuhkosairaudeksi. Se yleistyi 1600- ja 1700-luvuilla samanaikaisesti, kun hopean, kobolttin ja kuparin louhinta lisääntyi. Vuonna 1879 paikalliset lääkärit Härtig ja Hesse määrivät Schneebergin taudin keuhkosityöväksi. Heidän mukaansa tautiin kuoli noin 75 prosenttia alueen kaivosmiehistä. Vaikka keuhkosityöpä pystyttiinkin yhdistämään alueen kaivostoimintaan, ei vielä tiedetty, mikä teki- jä sen aiheutti.

Vuonna 1898 Marie ja Pierre Curie eristivät Joachimsthalin uraanipitoi- sesta malmista aiemmin tuntemattomat alkuaineet radiumin ja poloniumin. He havaitsivat radiumin tuottavan radioaktiivista kaasua, jota he kutsuivat nimellä radiumemanaatio. Ensimmäiset radiumemanaation mittaustulokset julkaistiin vuonna 1901. Myöhemmin kaasu sai nimen radon. Samoihin aikoihin havaittiin ensimmäiset röntgensäteilyn ja radiumin aiheuttamat ihosityövät. Palapelin ratkaisevat palat olivatkin jo koossa, mutta kokonaiskuva ei ollut vielä hahmottunut.

Maailmassa alkoi 1940-luvulla laaja uraanin louhinta lähinnä sotilaal- lisia tarkoituksia varten. Tärkeimmät alueet olivat Belgian Kongo, Ka- nada ja Colorado USA:ssa. Uraanin kysynnän vuoksi kaivostoiminta aloitettiin uudelleen myös Schneebergin vanhalla kaivosalueella, sil- loisessa Itä-Saksassa, samoin kuin silloisessa Tshekkoslovakiassa Joachimsthalin eli nykyisen Jáchymovin vanhalla malmialueella. Suo- messakin käynnistyi louhinta Askolassa ja Enon kunnan Paukkajavaa- rassa 1950- ja 1960-lukujen vaihteessa. Askolassa toiminta kahdessa avolouhoksessa oli erittäin pienimuotoista. Paukkajavaarassa malmiä louhittiin pienessä avolouhoksessa ja pienessä maanalaisessa kaivok- sessa yhteensä 30 000 tonnia. Molempien kaivosten toiminta lopetettiin kannattamattomana.

Saksassa tehtiin jo 1930-luvulla mittauksia, joiden mukaan Schnee- bergin alueen kaivoksissa radonpitoisuudet olivat luokkaa 70 000– 120 000 Bq/m<sup>3</sup>. Eräässä kaivoksessa radonpitoisuus oli keskimäärin puoli miljoonaa becquereliä kuutiometrissä ilmaa. Kaivoksella oli

synkkä maine, sillä useimmat kaivosmiehet sairastuivat siellä keuhkosyöpään ja sitä kutsuttiinkin nimellä kuolemankaivos.

Alkuvaiheessa kaivostyöntekijöiden säteilysuojeluun ei kuitenkaan kiinnitetty huomiota. Radonia tai sen hajoamistuotteita ei mitattu kaivoksissa systemaattisesti ennen 1950-lukua. Ongelmaksi koettiin, etteivät teoreettiset laskelmat keuhkojen ekvivalenttiannoksesta johtaneet havaittuihin korkeisiin syöpäilmaantuvuuksiin. Arseenia ja muita myrkyllisiä aineita sisältävän pölyn uskottiin olevan tärkein syy kaivosmiesten keuhkosyöpään. Radonin aiheuttaman keuhkosyövän mekanismeista selvittävät tutkimukset kuitenkin jatkuivat. Asia ratkesi, kun radonin hajoamistuotteiden rooli selvisi.

Ensimmäiset kvantitatiiviset epidemiologiaan perustuvat arviot kaivosilman radonin hajoamistuotteiden aiheuttamasta keuhkosyöpäriskistä saatiin 1970-luvulla. Samoihin aikoihin Suomessakin ryhdyttiin mittaamaan ja valvomaan kaivosten radonpitoisuutta. Ensimmäiset mittaukset asunnoissa tehtiin 1970-luvun puolenvälin jälkeen. Asuntojen säteilysuojelu-ongelmaksi radon tunnistettiin vasta 1980-luvun alussa.

## Radondosimetriaa

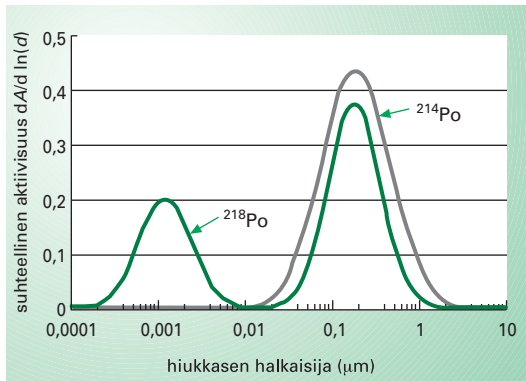
Valtaosa radonin ja sen hajoamistuotteiden aiheuttamasta efektiivisestä annoksesta on peräisin keuhkoihin jääneistä alfasäteilyä lähettävistä hajoamistuotteista. Radonkaasun osuus annoksesta on vain pari prosenttia. Samansuuruinen osuus aiheutuu vereen liuenneesta radonista ja sen hajoamistuotteista muulle elimistölle. Annos aiheutuu lähes kokonaan alfasäteilystä; beeta- ja gammasäteilyn osuus on niin pieni, että se voidaan jättää huomiotta.

Radonin lyhytikäisten hajoamistuotteiden aktiivisuuspitoisuus ilmoitetaan yleensä potentiaalisenä alfaenergiapitoisuutena (lyhyemmin alfaenergiapitoisuus). Se on tilavuusyksikössä ilmaa olevien lyhytikäisten hajoamistuotteiden alfahajoamisissa vapautuva energiamäärä, kun jokainen atomi on hajonnut  $^{210}\text{Pb}$ -atomiksi (katso luku 4.9).

Radonin hajoamistuotteet ovat ilmassa kahdessa erilaisessa muodossa: kiinnittymättöminä tai aerosolihiukkasiin kiinnittyneinä. Syntymänsä jälkeen radonin hajoamistuotteet reagoivat nopeasti – alle sekunnissa – ilmassa olevien höyryjen ja kaasujen kanssa muodostaen pieniä molekyyli-ryppäitä. Tämä hajoamistuotteiden niin sanottu kiinnittymätön osuus

koostuu valtaosaltaan nuklidista  $^{218}\text{Po}$ . Molekyyliryppäät törmäävät difuusion vaikutuksesta ilman aerosolihiukkasiin ja kiinnittyvät niihin tyypillisesti 1–100 sekunnin kuluessa.

Kiinnittymisen lisäksi myös päinvastainen tapahtuma on mahdollinen: Alfahajoamisessa rekyyliydin saattaa irrota hiukkasesta. Esimerkiksi  $^{218}\text{Po}$ :n hajotessa syntyvän  $^{214}\text{Pb}$ :n irtoamistodennäköisyys on noin 0,8. Sen sijaan beetahajoamisessa rekyylienergia ei riitä siihen, että muodostuvat hajoamistuotteet (uraanisarjassa  $^{214}\text{Bi}$  ja  $^{214}\text{Po}$ ) irtoaisivat aerosolihiukkasesta. Kiinnittymättömät hajoamistuotteet ovat kooltaan alle 0,01  $\mu\text{m}$  molekyyliryppäissä ja kiinnittyneet yli 0,01  $\mu\text{m}$  hiukkasissa (kuva 4.1). Kiinnittymättömien osuus alfaenergiapitoisuudesta on huoneilmassa tyypillisesti 2–8 prosenttia.



**KUVA 4.1 Radonin hajoamistuotteiden aktiivisuusjakaumia huoneilmassa hiukkasten koon funktiona**

Kokoalueella yli 0,01  $\mu\text{m}$  oleva osuus on kiinnittynyt ilmaan leijuviin hiukkasiin. Alle 0,01  $\mu\text{m}$  kokoalueella oleva osuus koostuu kiinnittymättömistä hajoamistuotteista.

Ilmassa olevien hajoamistuotteiden ja radonkaasun aktiivisuuspitoisuuksien suhdetta kuvataan tasapainosuhteella, joka on todellisen alfaenergiapitoisuuden ja täydellistä tasapainoa vastaavan alfaenergiapitoisuuden suhde. Täydellinen tasapaino vallitsisi, jos radonpitoisuus olisi pitkään muuttumaton ja hajoamistuotteita poistuisi ilmasta ainoastaan radioaktiivisen hajoamisen kautta. Tasapainosuhteen arvo on pienempi kuin yksi, koska osa hajoamistuotteista tarttuu seiniin ja muihin pintoihin.

Tasapainosuhteeseen vaikuttaa pääasiallisesti kaksi kilpailevaa prosessia: edellä mainittu kiinnittymättömien hajoamistuotteiden tarttuminen aerosolihiukkasiin sekä niiden poistuminen ilmasta erilaisille pinnoille. Mitä suurempi on ilman hiukkaspitoisuus, sitä nopeammin hajoamistuotteita sisältävät ryppäät tarttuvat aerosolihiukkasiin ja sitä suurempi osa hajoamistuotteista on kiinnittyneessä muodossa. Kiinnit-

tyneet hajoamistuotteet pysyvät ilmassa pitkään. Noin kahdeksan tunnin kuluttua ne ovat tarttuneet asunnon seinille ja muihin pintoihin. Kiinnittymättömät hajoamistuotteet tarttuvat pintoihin sata kertaa nopeammin. Tyypillinen tasapainosuhteen arvo asunnoissa on 0,4–0,6.

Kun hengitysilman hiukkaspitoisuus on suuri – kuten kaivoksessa – on kiinnittymättömien hajoamistuotteiden osuus pieni ja annoksen voidaan katsoa olevan suoraan verrannollinen alfaenergiapitoisuuteen. Kun hiukkaspitoisuus on pieni – kuten usein asunnossa – kiinnittymättömien osuus koko alfaenergiapitoisuudesta on suhteellisesti suurempi kuin suuren hiukkaspitoisuuden tapauksessa. Kiinnittymättömät hajoamistuotteet tarttuvat myös keuhkoputkistoon paljon herkemmin, mistä seuraa, että niistä aiheutuva annos alfaenergiapitoisuuden yksikköä kohden on suurempi kuin kiinnittyneistä aiheutuva. Kiinnittymättömien hajoamistuotteiden suurempi annosvaikutus kompensoi niiden nopean pintoihin tarttumisen aiheuttamaa pienentyntä kokonaisalfaenergiapitoisuutta, mistä seuraa, että radonkaasun pitoisuus on parempi annoksen mitta kuin alfaenergiapitoisuus.

Absorboituneen annoksen laskemiseksi tarvitaan matemaattinen malli, jonka avulla keuhkojen eri osiin kohdistuva säteilyaltistus ja säteilyannos voidaan arvioida. Eri malleilla saadut annosarvot riippuvat niissä käytettyjen parametrien arvoista ja muista oletuksista. Tärkeimmät annosarvioon vaikuttavat parametrit ovat hengitysilman pienhiukkasten kokojakauma, kiinnittymättömien hajoamistuotteiden osuus, hengitysnopeus ja syvyys, jolla säteilyherkkien solujen tumat sijaitsevat kudoksessa. Keuhkosyöpään sairastuneita kaivostyöntekijöitä tutkittaessa on havaittu, että 75 prosenttia kasvaimista sijaitsee keuhkoputkiston alueella. Säteilylle herkimät solut sijaitsevat siis keuhkoputkiston epiteelissä. Luvussa 7.5 käsitellään kansainvälisen säteilysuojelutoimikunnan (ICRP) keuhkomalleja myös muiden radioaktiivisten aineiden osalta.

Kun käytetään viimeisintä ja parasta saatavissa olevaa tietoa fyysikaalisista ja biologisista parametreista, saadaan keuhkoputken epiteelin tyvisoluille absorboituneen annoksen (nGy) ja alfaenergi-altistuksen ( $\text{Bq h/m}^3$  EEC, luku 4.9) väliseksi muuntokertoimeksi 5–25 nGy/( $\text{Bq h/m}^3$ ) (keskimmäinen arvo 9 nGy/( $\text{Bq h/m}^3$ )). Kertomalla alfasäteilyn painotuskertoimella 20 ja keuhkoputkiston kudospainotuskertoimella 0,08 saadaan efektiivisen annoksen ja altistuksen suhteeksi noin 15 nSv/( $\text{Bq h/m}^3$ ) eli 9,56 mSv/WLM. Hengitysnopeudeksi ole-



tetaan tällöin  $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ , hiukkasten mediaanihalkaisijaksi  $0,1\text{--}0,15 \mu\text{m}$  ja kiinnittymättömien hajoamistuotteiden osuudeksi  $0,05$ .

ICRP:n esittämä vaihtoehtoinen tapa arvioida alfaenergia-altistuksen ja efektiivisen annoksen suhdetta perustuu epidemiologisissa tutkimuksissa havaittuun keuhkosityövän ilmaantuvuuteen altistusyksikköä kohti. Riittävää kvantitatiivista tietoa riskistä on toistaiseksi saatavissa vain kaivos- ja kaivostutkimuksista. Niiden antamaan tietoon perustuen saadaan muunnoskertoimen arvoksi työympäristössä  $5,06 \text{ mSv/WLM}$  ja asuinympäristössä  $3,88 \text{ mSv/WLM}$ . Tästä voidaan laskea, että asuminen  $100 \text{ Bq/m}^3$  radonpitoisuudessa vastaa  $1,7 \text{ mSv}$ :n efektiivistä annosta vuodessa. Silloin oletetaan, että kotona oleskellaan  $7\,000$  tuntia vuodessa ja että tasapainosuhteen arvo on  $0,4$ . Dosimetrinen ja suoraan riskiin perustuva malli eroavat toisistaan noin tekijällä  $2,5$ . Yhteensopivuus on mallien epävarmuudet huomioon ottaen tyydyttävä.

## Epidemiologiset tutkimukset

Ensimmäinen kvantitatiivinen arvio radonin hajoamistuotteiden alfaenergia-altistuksen ja keuhkosityövän välisestä yhteydestä saatiin 1971 julkaistusta epidemiologisesta tutkimuksesta. Lundinin ja hänen työtovereittensa julkaisema kohorttitutkimus käsitteli USA:n uraanikaivostyöläisiä. Seuraavana vuonna julkaistiin vastaava tutkimus tshekkoslovakialaisista uraanikaivostyöläisistä. Sekä näissä että useissa myöhemmin julkaistussa tutkimuksissa keuhkosityövän riskin havaittiin kasvavan työssä saadun kokonaisaltistuksen myötä.

Vaikka keuhkosityöväriski altistusyksikköä kohti vaihtelee tutkimuksesta toiseen, on tulos ollut samansuuntainen kaikissa niissä tutkimuksissa, joissa aineiston laatu ja määrä ovat riittäviä: kaivostyössä saadun alfaenergia-altistuksen ja keuhkosityövän välillä on yhteys. Suuret aineistot ovat antaneet mahdollisuuden tutkia myös miten eri tekijät muokkaavat alfaenergia-altistuksen aiheuttamaa riskiä. Tällaisia tekijöitä ovat tupakointi, työntekijän ikä altistuksen alkaessa tai taudin puhjetessa, altistuksesta kulunut aika ja altistuksen kesto. Sekä kaivos- että asuntotutkimusten tuloksista kerrotaan enemmän kirjassa *Säteilyn terveysvaikutukset* (kirja 4) säteilyepidemiologiasta kertovassa luvussa 7.

Asuinympäristössä radonista aiheutuva keuhkosityöväriski on vaikea tutkittava, koska todella suuret pitoisuudet ovat suhteellisen harvinaisia.

Tupakointi on radonia paljon voimakkaampi keuhkosityövän aiheuttaja, ja radonin osuutta riskiin on vaikea saada näkyviin. Vaikeutena on lisäksi se, että kymmenien vuosien takainen radonaltistus on arvioitava tämänhetkisen pitoisuuden perusteella.

Ensimmäinen asuin ympäristön epidemiologinen tutkimus käsitteli Öölannin saaren asukkaiden radonaltistusta ja keuhkosityöpäilmaantuvuutta, ja se julkaistiin jo vuonna 1979. Sen jälkeen on tehty useita muita epidemiologisia tutkimuksia. Tulokset ovat olleet vaihtelevia. Yhdysvaltain tiedeneuvoston BEIR VI-raportti arvioi, että USA:n väestölle aiheutuu radonista vuosittain 3 000–33 000 kuolemaan johtavaa keuhkosityöpätapausta. Suomeen sovellettuna vastaava luku olisi 100–1 000.

Vuonna 1997 julkaistiin niin sanottu meta-analyysi, jossa oli yhdistetty tulokset kahdeksasta suurimmasta, laajuudeltaan vähintään 200 keuhkosityöpätapausta käsittävästä huoneilman radontutkimuksesta. Tutkimukset oli tehty useissa maissa, ja myös kaksi suomalaista tutkimusta oli mukana. Tulokset osoittivat, että pitkäaikainen asuminen 150 Bq/m<sup>3</sup> pitoisuudessa nosti keuhkosityöpäriskiä 14 prosenttia verrattuna radonille altistumattomien henkilöiden riskiin. Yhtäpitävä riskisuhde saatiin myös kaivostutkimusaineistosta, jossa rajoitettiin samantasoiisiin altistuksiin kuin huoneilmatutkimuksessa. Tulokset olivat yhtäpitäviä meta-analyysin tulosten kanssa. Keuhkosityöpätapauksiksi muutettuina tulokset vastaavat Suomessa lukua 200 tapausta vuodessa.

Sekä tupakointi että radon lisäävät keuhkosityöpäriskiä. Tupakoitsijan keuhkosityöpäriski vastaa tupakoimattoman henkilön elinikäistä asumista talossa, jonka sisäilman radonpitoisuus on 3 000–10 000 Bq/m<sup>3</sup>. Tietty radonaltistus aiheuttaa tupakoitsijalle paljon suuremman lisärisikin kuin tupakoimattomalle. Tupakoinnin lopettaminen vähentää siis sekä tupakasta että radonista aiheutuvia keuhkosityöpiä. Toisaalta radonpitoisuuden alentaminen vähentää tupakoitsijan keuhkosityöpäriskiä.

Kuriositeettina mainittakoon, että varsinkin Itävallassa on vieläkin ”radonhoitoloita”, joiden uskotaan helpottavan mitä erilaisimpia sairauksia potevien ihmisten tilaa. Kyse on entisistä kaivoksista, joissa potilaat viettävät päivittäin muutamia tunteja kerrallaan viikkoja kestävien hoitojen ajan hengittäen erittäin radonpitoista ilmaa.

## 4.2 Radonlähteet

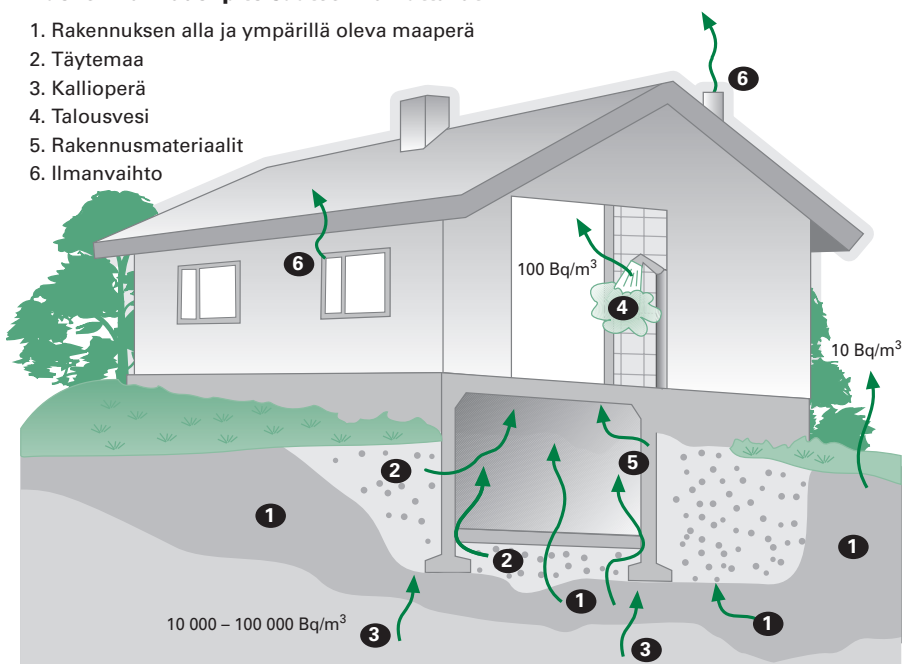
### Maaperän radonpitoinen ilma

Merkittävin radonlähde pientaloissa on maaperän huokosilma, jonka radonpitoisuus on tyypillisesti  $10\,000\text{--}100\,000\text{ Bq/m}^3$ . Ulkoilmaan päästessään radonpitoisuus laimenee ja on metrin korkeudella maanpinnasta enää noin  $10\text{ Bq/m}^3$ . Pienikin ilmavirtaus maaperästä asuntoon riittää nostamaan sisäilman radonpitoisuuden satoihin becquereleihin kuutiometrissä. Rakennuspaikalle tuotava täyttömaa vaikuttaa osaltaan asunnon radonpitoisuuteen. Täyttömaan radonpitoisuus ei vähene lainkaan rakennuksen elinaikana, koska radonin lähtöaineen  $^{238}\text{U}$ :n puoliintumisaika on 4,5 miljardia vuotta.

Ulko- ja sisäilman välinen lämpötilaero aiheuttaa alipaineen, jonka takia rakennuspohjasta virtaa radonpitoista ilmaa perustuksen kautta asuntoon. Ilmavirtaus sisätiloihin on voimakkainta talvella, kun lämpötilaero sisäilman ja ulkoilman välillä on suurin. Merkittävin vuotokohta suomalaisissa rakennuksissa on maanvaraisen laatan ja sokkelin välinen rako. Radonpitoinen ilma pääsee virtaamaan myös sokkelissa ja maanvastai-

#### Huoneilman radonpitoisuuteen vaikuttavat:

1. Rakennuksen alla ja ympärillä oleva maaperä
2. Täytemaa
3. Kallioperä
4. Talousvesi
5. Rakennusmateriaalit
6. Ilmanvaihto



KUVA 4.2 Huoneilman radonpitoisuuteen vaikuttavat tekijät

sessä seinässä, jos niissä on käytetty kevytsoraharkkoa. Vuotoja voi myös tapahtua putkia ja kaapeleita varten tehdyistä läpivienneistä. Radonpitoisten ilmapirtausten ehkäisy onkin tärkeimpiä radonturvalliselle perustukselle asetettavia vaatimuksia.

Maaperän radonpitoinen ilma vaikuttaa myös kerrostaloissa ensimmäisen kerroksen radonpitoisuuteen. Jos asunnon alapuolella ei ole kellaria, vaan lattialaatta on valettu suoraan soran päälle, radonpitoisuus on keskimäärin yhtä suuri kuin pientaloissa. Koneellisen poistoilmanvaihdon aiheuttama alipaineisuus tehostaa maaperästä tulevan radonpitoisen ilman virtausta sisätiloihin. Maaperästä tuleva radon voi myös levitä ylempien kerrosten asuntoihin putkistokanavien ja porraskäytävien kautta.

## Rakennusmateriaalit radonlähteenä

Kerrostalojen ylemissä kerroksissa betonirakenteet ovat normaalisti ainoa radonin lähde. Sisäilman radonpitoisuus on niissä tyypillisesti 50–200 Bq/m<sup>3</sup> ja keskimäärin noin 70 Bq/m<sup>3</sup>. Keskimääräistä suurempia pitoisuuksia esiintyy Kaakkois-Suomen kerrostaloissa, joissa betoniin käytettävän soran uraanipitoisuus on normaalia suurempi.

Suomesta ei ole löydetty kerrostaloasuntoja, joissa rakennusmateriaalit olisivat aiheuttaneet enimmäispitoisuuden 400 Bq/m<sup>3</sup> ylityksiä, kun ilmanvaihtuvuus on ollut vähintään määräysten mukainen 0,5 h<sup>-1</sup>. Ruotsissa käytettiin rakennusmateriaalien tuotannossa radiumia sisältäviä kivilajeja (alunaliusketta) 1930-luvulta aina vuoteen 1975. Tästä syystä siellä onkin mitattu suuria radonpitoisuuksia myös kerrostaloissa. Suomessa radiumpitoista niin sanottua blåbetong-materiaalia on käytetty tiettävästi vain Ahvenanmaalla.

Betonielementeistä tehdyissä pientaloissa rakennusmateriaaleista erittyvän radonin vaikutus on samanlainen kuin kerrostaloissa. Puu on Suomessa käytetyin pientalojen kantavien rakenteiden materiaali. Lattialaatta on kuitenkin usein betonista ja siitä aiheutuva radonpitoisuuden lisäys on tyypillisesti 10–30 Bq/m<sup>3</sup>.

## Talousvedestä vapautuu radonia

Talousvettä käytettäessä osa veteen liuenneesta radonista vapautuu hengitysilmaan (katso luvut 4.9 ja 5). Talousvesi voi olla huomattava

radonlähde, jos sen radonpitoisuus on suuri. Sisäilman radonpitoisuuden lisäys on keskimäärin 100 Bq/m<sup>3</sup>, jos talousveden radonpitoisuus on 1 000 Bq/l. Näin suuria pitoisuuksia on yleensä vain kallioporakai-vojen vedessä. Eniten radonia vapautuu astianpesukoneen, pyykinpesukoneen ja suihkun käytön yhteydessä. Suomessa kotitalouksien keskimääräisellä kulutustottumuksella noin 60 prosenttia veteen liuenneesta radonista vapautuu ilmaan. Asunnoissa, joissa käytetään porakaivovettä, talousveden radon voi lisätä merkittävästi radonin määrää ilmassa. Verkostovettä tai tavallisen rengaskaivon vettä käyttävissä asunnoissa talousvedestä ilmaan vapautuva radon on vain hyvin pieni lisä verrattuna rakennusten perustusten kautta tulevaan radonmäärään.

### 4.3 Radonin alueellinen esiintyminen

Suomessa asuntojen keskimääräinen radonpitoisuus on suurimpia koko maailmassa. Suomalaisen asuntojen radonpitoisuuden vuosikeskiarvot ovat välillä 10–20 000 Bq/m<sup>3</sup>. Hetkellisesti on mitattu jopa 100 000 Bq/m<sup>3</sup> ylittäviä pitoisuuksia.

Säteilyturvakeskus suoritti vuosina 1990–1991 laajan satunnaisotantaan perustuvan tutkimuksen, jonka perusteella saatiin edustava kuva Suomen radontilanteesta (taulukko 4.1). Mitattuja asuntoja oli noin 3 000.

|             | Keskiarvo<br>(Bq/m <sup>3</sup> ) | yli 200 Bq/m <sup>3</sup><br>(%) asuntoa (lkm) |         | yli 400 Bq/m <sup>3</sup><br>(%) asuntoa (lkm) |        | yli 800 Bq/m <sup>3</sup><br>(%) asuntoa (lkm) |        |
|-------------|-----------------------------------|--|---------|--|--------|--|--------|
| Pientalot   | 145                               | 17,9   | 209 000 | 5,0  | 59 000 | 1,4  | 16 000 |
| Kerrostalot | 80                                | 1,6  | 16 000  | 0,8  | 7 000  | 0,3  | 3 000  |
| Kaikki      | 120                               | 12,3   | 225 000 | 3,6  | 66 000 | 1,0  | 19 000 |

**TAULUKKO 4.1 Radonpitoisuuden keskiarvot sekä prosentit ja lukumäärät asunnoista, joissa radonpitoisuus ylittää 200, 400 ja 800 Bq/m<sup>3</sup>**

Lukuarvot perustuvat Säteilyturvakeskuksen otantatutkimukseen vuosilta 1990–1991.

### Radonkartoitus

Radontutkimus aloitettiin Suomessa 1970-luvun alkupuolella. Radon nähtiin silloin lähinnä kaivosten työturvallisuuskysymyksenä. Tiedettiin myös, että Suomessa on kalliopohjavesiä, joissa esiintyy suuria radonpitoisuuksia. Sisäilman radonin arveltiin 1970-luvulla olevan ainoas-

taan porakaivovettä käyttävien asuntojen ongelma. Pidetään myös mahdollisena – vaikkei todennäköisenä – että joistakin rakennusmateriaaleista saattaa erittyä suuria määriä radonia. Yhdysvalloissa ja Euroopassa huomattiin 1980-luvun alussa, että huoneilmassa voi olla suuri radonpitoisuus, vaikka porakaivovettä ei käytetä eivätkä rakennusmateriaalit sisällä normaalista poikkeavia määriä radiumia.

Vuonna 1980 otettiin Säteilyturvakeskuksessa käyttöön menetelmiä, joilla voitiin mitata radonpitoisuuden pitkän aikavälin keskiarvo. Helppokäyttöisen ja halvan alfajalkimenetelmän myötä löydettiin vuoden 1980 lopulla ensimmäiset erittäin suuren radonpitoisuuden asunnot Itä-Uudeltamaalta. Niissä radonpitoisuus oli talvella jopa  $40\,000\text{ Bq/m}^3$ . Syy suuriin pitoisuuksiin ei johtunut porakaivovedestä, koska asunnoissa ei yleensä käytetty porakaivovettä; tai jos käytettiin, niin porakaivoveden radonpitoisuus oli pieni. Halpa mittausmenetelmä mahdollisti vuonna 1982 laajan kartoituksen, jonka perusteella saatiin yleiskuva sisäilman radonpitoisuuden maantieteellisestä jakaumasta. Korkeimman radonpitoisuuden alueeksi osoittautuivat Itä-Uusimaa ja Kymenlaakso. Syyksi korkeisiin radonpitoisuuksiin paljastuivat tavallista enemmän urania sisältävä graniittinen kallioperä ja ilmaa hyvin läpäisevät harjut.

Suunnitelmallisen radonkartoituksen avulla on pyritty löytämään ne asunnot, joissa radonpitoisuus ylittää  $400\text{ Bq/m}^3$  ja estämään, ettei enää rakennettaisi uusia taloja, joissa radonpitoisuus ylittää  $200\text{ Bq/m}^3$ . Enimmäisarvon  $400\text{ Bq/m}^3$  ylitysten löytämiseksi Säteilyturvakeskus on laatinut kaikkiin Suomen kuntiin niin sanotun radonmittaussuunnitelman, jossa kunta on jaettu testialueisiin. Testialueiksi on rajattu läpäisevyydeltään erilaisia maaperäalueita kuten harjuja, savikoita, moreenialueita ja kallioalueita. Alueita on valittu myös kallioperän uraanipitoisuuden perusteella. Tieto uraanipitoisuudesta on saatu joko olemassa olevista mitaustuloksista tai on käytetty arvioita kivilajin tyypillisestä uraanipitoisuudesta. Tieto alueen maa- ja kallioperästä on selvitetty geologisista kartoista. Myös aiemmin suoritettuja huoneilman radonmittauksia on hyödynnetty. Ensimmäisen suunnitelman toteuttamisen jälkeen on arvioitu, antavatko tulokset aihetta lisämittauksiin. Jatkosuunnitelmissa uudet mittaukset on osoitettu niille alueille, joilta on löytynyt enimmäisarvon ylityksiä.

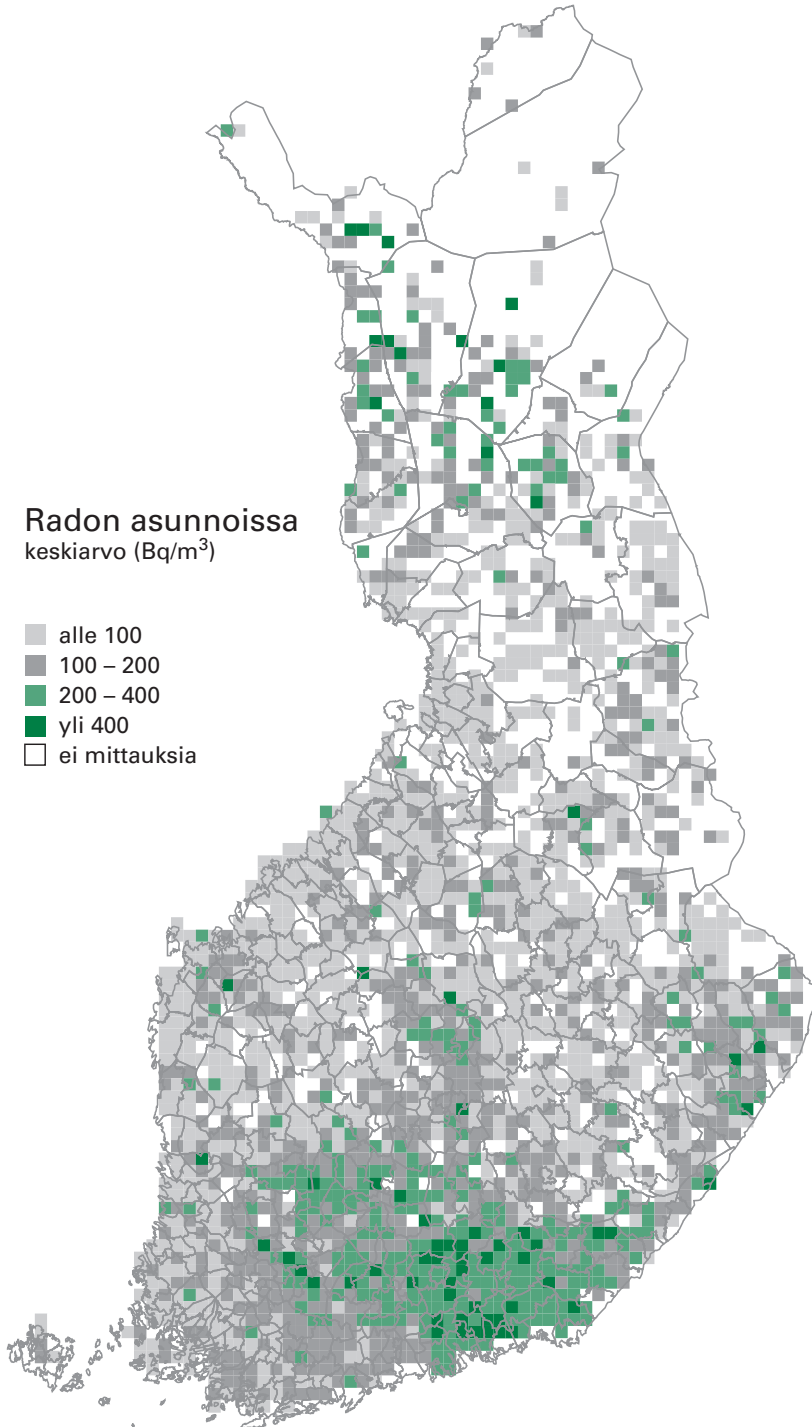
Enimmäisarvon ylittävien pitoisuuksien etsintä on tuottanut arvokasta tietoa myös uudisrakentajia varten. Tuloksia on käytetty hyväksi niin sanottujen radonennusteiden eli rakennusmaan yleispiirteisten radon-

luokitusten laadinnassa. Säteilyturvakeskus on laatinut radonennusteet Itä-Uudellemaalle, Kymen lääniin ja eräisiin yksittäisiin kuntiin. Ennusteessa rakennusmaa on luokiteltu sen mukaan, kuinka suuressa osassa pientaloja radonpitoisuudet 200 ja 400 Bq/m<sup>3</sup> tullaan ylittämään, jos rakennusvaiheessa ei mitenkään varauduta radonin torjuntaan.

Sisäilman radonpitoisuudessa esiintyy suuria alueellisia ja paikallisia vaihteluita (taulukko 4.2 ja kuvat 4.3 ja 4.4). Merkittävimpänä syynä alueellisiin vaihteluihin ovat rakennuspaikan maa- ja kallioperän geologiset ominaisuudet. Radonpitoisuus on suurin taloissa, jotka on perustettu hyvin ilmaa läpäisevälle maaperälle ja tavallista enemmän uraania sisältävälle maa- ja kallioperälle. Harjut ja suurin osa reunamuodostumista, kuten esimerkiksi Salpausselät, koostuvat sora- ja hiekkakerroksista. Ne ovat syntyneet jäätikköjokien pyöristämästä kiviaineksesta ja läpäisevät ilmaa erittäin hyvin. Muut maalajit, kuten moreeni, siltti tai savi, ovat hiekkaa ja soraa tiiviimpiä eikä niissä tapahdu merkittäviä ilmavirtauksia.

Kallio- ja maaperän uraanipitoisuus vaihtelee alueittain. Etelä-Suomen graniittialueilla ja erityisesti Kaakkois-Suomen rapakivigraniitin alueella uraanipitoisuus on yleensä suurempi kuin muualla. Suomessa moreenin uraanipitoisuus on keskimäärin noin 3 grammaa tonnissa (g/tn). Tämä vastaa <sup>238</sup>U-pitoisuutta 40 Bq/kg. Kaakkois-Suomen rapakivigraniittialueella uraanipitoisuus on keskimäärin noin 5 g/tn ja niin sanotun pohjagneissin alueella Itä-Suomessa ja Kainuussa noin 2 g/tn.

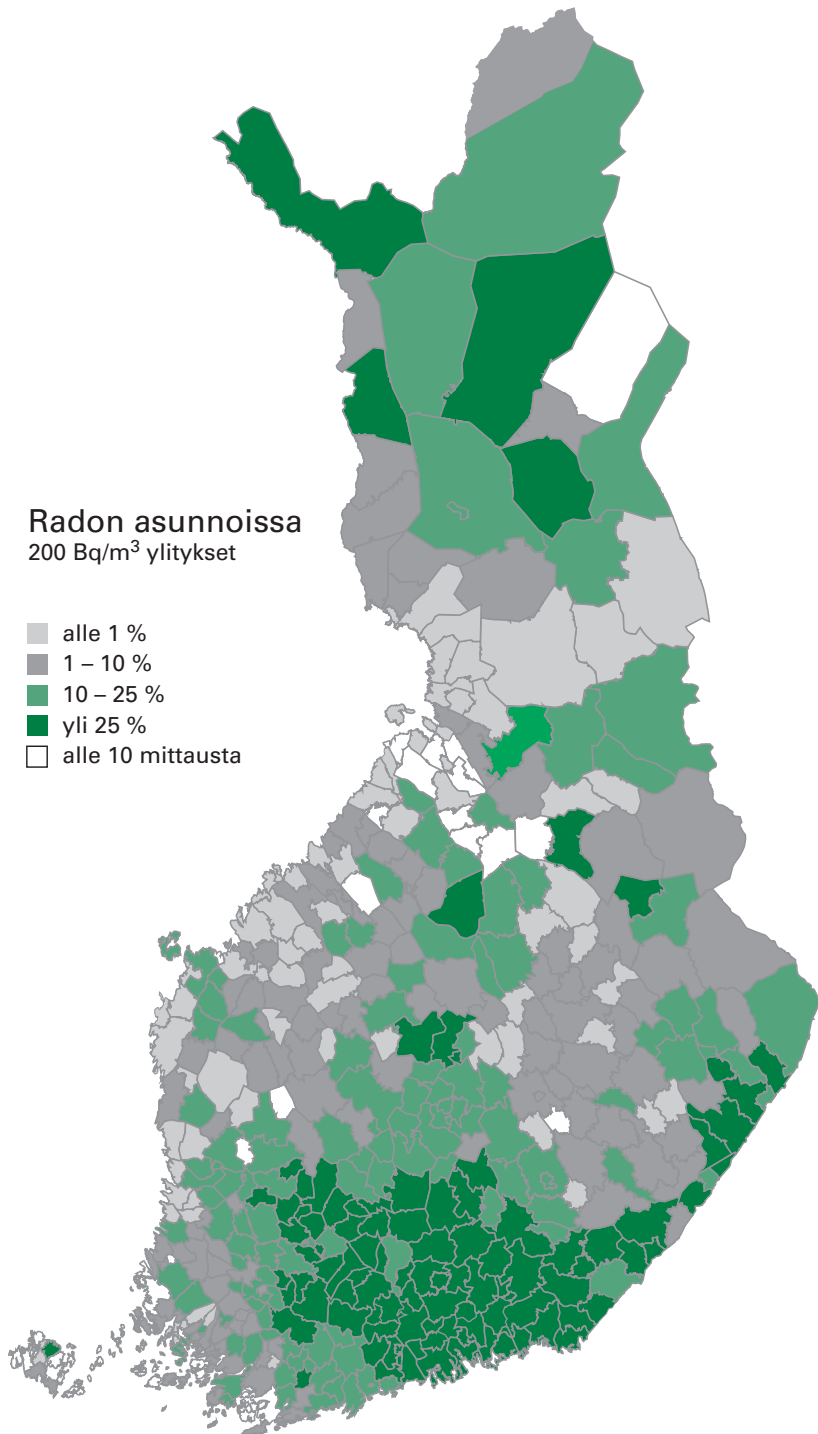
Lähes koko Etelä-Suomen lääni ja Pirkanmaa muodostavat yhtenäisen korkean radonpitoisuuden alueen, jossa suuria radonpitoisuuksia esiintyy kauttaaltaan koko alueella niin tiiviille kuin läpäiseville maalajeille rakennetuissa taloissa. Suurimmat radonpitoisuudet on kuitenkin mitattu alueilla, joilla on sekä suuri uraanipitoisuus että läpäiseviä maalajeja. Tällainen alue on esimerkiksi Lahden seutu. Harjuille rakennetuissa taloissa radonpitoisuus on keskimäärin kaksin- ja jopa viisinkertainen verrattuna tiiviille maaperälle perustettujen talojen radonpitoisuuteen. Esimerkiksi Tampereella läpäisevälle maaperälle perustettujen pientaloasuntojen radonpitoisuus on keskimäärin 1000 Bq/m<sup>3</sup> ja tiiviille maaperälle perustettujen noin 200 Bq/m<sup>3</sup>.



**KUVA 4.3 Asuntojen radonpitoisuuden keskiarvo 10 x 10 km ruuduissa**

Aineisto käsittää noin 38 700 pientaloasuntoa ja kerrostalon ensimmäisen kerroksen asuntoa.





**KUVA 4.4 Radonpitoisuuden 200 Bq/m<sup>3</sup> ylittävien asuntojen prosentuaalinen osuus kunnissa**  
Aineisto käsittää 58 500 pientaloasuntoa ja kerrostalon ensimmäisen kerroksen asuntoa.

| Maakunta          | Mitattuja asuntoja | Aritm. ka (Bq/m <sup>3</sup> ) | Mediaani (Bq/m <sup>3</sup> ) | 200 Bq/m <sup>3</sup> ylitykset (%) | 400 Bq/m <sup>3</sup> ylitykset (%) | Maksimi (Bq/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------|--------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| Uusimaa           | 9 458              | 180                            | 120                           | 27                                  | 7                                   | 4 500                        |
| Varsinais-Suomi   | 2 710              | 120                            | 80                            | 11                                  | 2                                   | 3 200                        |
| Itä-Uusimaa       | 4 052              | 370                            | 200                           | 51                                  | 23                                  | 13 000                       |
| Satakunta         | 1 557              | 100                            | 70                            | 7                                   | 2                                   | 1 900                        |
| Häme              | 5 366              | 280                            | 170                           | 40                                  | 15                                  | 10 900                       |
| Pirkanmaa         | 5 522              | 330                            | 150                           | 36                                  | 15                                  | 33 000                       |
| Päjäät-Häme       | 6 064              | 440                            | 230                           | 56                                  | 28                                  | 16 000                       |
| Kymenlaakso       | 6 124              | 310                            | 220                           | 56                                  | 21                                  | 6 200                        |
| Etelä-Karjala     | 3 516              | 280                            | 160                           | 41                                  | 18                                  | 10 100                       |
| Etelä-Savo        | 1 385              | 120                            | 80                            | 11                                  | 3                                   | 1 600                        |
| Savo              | 1 382              | 90                             | 70                            | 5                                   | 1                                   | 1 100                        |
| Pohjois-Karjala   | 1 746              | 170                            | 100                           | 18                                  | 7                                   | 5 200                        |
| Keski-Suomi       | 2 832              | 150                            | 110                           | 19                                  | 5                                   | 2 600                        |
| Etelä-Pohjanmaa   | 932                | 90                             | 60                            | 5                                   | 2                                   | 1 700                        |
| Pohjanmaa         | 677                | 70                             | 50                            | 4                                   | 1                                   | 1 500                        |
| Keski-Pohjanmaa   | 450                | 80                             | 60                            | 5                                   | 1                                   | 600                          |
| Pohjois-Pohjanmaa | 1 554              | 80                             | 60                            | 4                                   | 1                                   | 2 700                        |
| Kainuu            | 1 164              | 290                            | 100                           | 26                                  | 15                                  | 5 800                        |
| Lappi             | 1 831              | 160                            | 100                           | 18                                  | 6                                   | 4 700                        |
| Ahvenanmaa        | 194                | 130                            | 90                            | 15                                  | 3                                   | 790                          |

**TAULUKKO 4.2 Sisäilman radonpitoisuus maakunnittain**

Säteilyturvakeskuksen aineisto sisältää omakotitalot, paritalot, rivitalot ja kerrostalojen ensimmäisten kerrosten asunnot. Mitattuja asuntoja on yhteensä noin 58 500 kappaletta.

## Radonpitoisuus muissa maissa

Asuntojen radonpitoisuus on suurinta Suomessa, Ruotsissa ja Tshekissä sekä USA:n itärannikolla. Merkittävimmät syyt ovat uraanipitoinen maa- ja kallioperä, ilmaa hyvin läpäisevä maaperä, rakennusten perustustapa, ilmanvaihto ja kylmä ilmasto. Kylmänä vuodenaikana radonpitoista ilmaa virtaa asuntoon enemmän kuin lämpimänä vuodenaikana. Pohjoismaissa kylmä jakso myös kestää pidempään kuin esimerkiksi Keski-Euroopassa.

Kallioperä on uraanipitoista muissakin maissa kuin Suomessa ja Ruotsissa. Hyvin ilmaa läpäiseviä harjuja tavataan niissä Pohjois-Euroopan ja Pohjois-Amerikan maissa, jotka ovat olleet jääkauden aikana jäätikönnä peittämiä. Suomessa ja Ruotsissa harjut ovat kuitenkin erityisen soraval-

taisia muihin maihin verrattuna ja harjuja tavataan täällä enemmän kuin muualla. Lämpäiseviä rakennusmaita on Euroopassa vuoristojen alarinteiden maanvyörymäalueilla sekä karstialueilla. Karstialueilla vesi on liuottanut kalkkikivistä koostuvaa kallioperää muodostaen luolia ja onkaloita, joissa radonpitoinen ilma voi liikkua.

Asuntojen radonmittauksia on tehty useissa maissa. Hyvin suuria pitoisuuksia (jopa yli 10 000 Bq/m<sup>3</sup>) tavataan sekä Pohjois- että Etelä-Euroopassa. Asuntojen radonpitoisuuden keskiarvoja eri maissa ei voi suoraan verrata toisiinsa, koska kaikkien maiden tilastot eivät perustu Suomen kaltaisiin edustaviin otantatutkimuksiin. Pohjoismaisia tilastoja voidaan kuitenkin pitää keskenään vertailukelpoisina (taulukko 4.3). UNSCEAR 2000 -raportin mukaan kaikkien maapallon asuntojen väestöllä painotettu radonpitoisuuden aritmeettinen keskiarvo on noin 40 Bq/m<sup>3</sup> ja geometrinen keskiarvo noin 30 Bq/m<sup>3</sup>.

|        | Aritm. keskiarvo (Bq/m <sup>3</sup> ) | Geom. keskiarvo (Bq/m <sup>3</sup> ) | Maksimipitoisuus (Bq/m <sup>3</sup> ) |
|--------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Suomi  | 120                                   | 84                                   | 33 000                                |
| Ruotsi | 108                                   | 56                                   | 85 000                                |
| Norja  | 89                                    | <sup>1)</sup>                        | 50 000                                |
| Tanska | 53                                    | 29                                   | 600                                   |

<sup>1)</sup> Ei tiedossa

**TAULUKKO 4.3** Asuntojen radonpitoisuuden tilastolukuja Pohjoismaissa

## 4.4 Radonpitoisuuteen vaikuttavia tekijöitä

### Perustustapa ja radonpitoisuus

Radonpitoisuus on selvästi suurempi 1980-luvulla ja sen jälkeen rakennetuissa taloissa kuin aiemmin rakennetuissa (taulukko 4.4). Ilmiö selittyy suurelta osin rakentamistavan muuttumisella. Maanvarainen laatta on korvannut aiemmin yleisesti käytetyn ryömintätalaisen perustuksen. Myös hyvin ilmaa läpäisevän kevytsoraharkon yleistymisen on kasvattanut radonpitoisuutta. Entiset kellarilliset rintamamiestalot on korvattu rinnetaloilla, joissa on oleskelutiloja alakerrassa ja yhteys yläkerran ja alakerran välillä on avoin.

| Perustustapa<br>Perusmuurin<br>rakennusmateriaali  | Osuus<br>kaikista<br>pientaloista<br>(%) | Radonpitoisuuden<br>geometrinen ja<br>aritmeettinen<br>keskiarvo |                                | Osuus kaikista<br>400 Bq/m <sup>3</sup><br>ylittävistä<br>pientaloista<br>(%) |
|--|--|--|--------------------------------|---|
|  |  | Geom.<br>(Bq/m <sup>3</sup> )                                    | Aritm.<br>(Bq/m <sup>3</sup> ) |   |
| Tyypillinen<br>rakennusvuosi <sup>1)</sup>   |  |  |                                |   |
| Maanvarainen laatta, ei kellaria,<br>perusmuuri valubetonia,<br>1969–1984                        | 34                                       | 117  | 174                            | 42  |
| Maanvarainen laatta, ei kellaria,<br>perusmuuri kevytsoraharkoista,<br>1983–1988                 | 8  | 168  | 230                            | 18  |
| Maanvarainen reunajäkistetty<br>laatta <sup>2)</sup> , ei kellaria, 1973–1983                    | 9  | 81   | 102                            | 1   |
| Tuulettuva alapohja eli<br>ryömintätila, 1928–1955   | 15                                       | 77   | 114                            | 7   |
| Kellarillinen talo, ovi ja<br>portaat kellariin tai käynti<br>ulkokautta, 1952–1967              | 27                                       | 80   | 123                            | 16  |
| Rinnetalo, perusmuuri betonia,<br>avoin portaikko alimpaan<br>kerrokseen, 1960–1979              | 4  | 147  | 250                            | 10  |
| Rinnetalo, perusmuuri kevyt-<br>soraharkoista, avoin portaikko<br>alimpaan kerrokseen, 1978–1988 | 3  | 184  | 280                            | 6   |
| Kaikki pientalot   | 100                                      | 98   | 145                            | 100   |

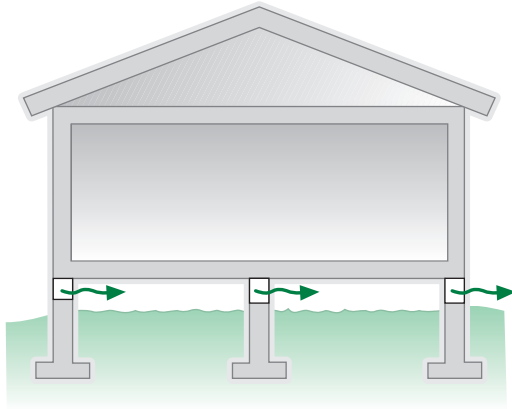
<sup>1)</sup> Pientalokannan rakennusvuoden jakauman 25 % ja 75 % kvartiilit vuonna 1990

<sup>2)</sup> Reunajäkistetyt laatan tunnistaminen on kyselylomakkeen vaikeimpia kohtia ja asunnot kuuluvatkin osaksi aikaisempiin sokkelilla ja erillisellä maanvaraisella laatalta varustettuihin taloihin. 400 Bq/m<sup>3</sup> ylittävissä taloissa valinta on tarkastettu.

**TAULUKKO 4.4** Pientalojen perustamistavan vaikutus radonpitoisuuteen vuosina 1990–1991 suoritetun otantatutkimuksen perusteella

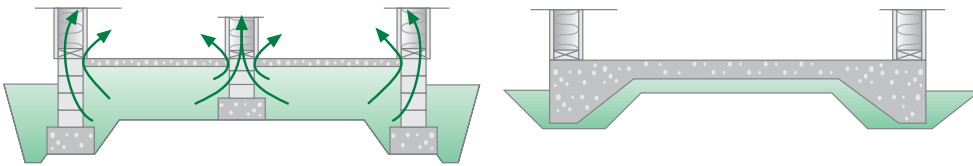
Tuulettuvalla alapohjalla eli ryömintätalalla (kuva 4.5) varustetuissa taloissa radonpitoisuudet ovat pienimpiä. Jos alapohjan ilmanvaihto on vähäistä ja alapohjarakenteet läpäisevät ilmaa, voi näissäkin taloissa olla kohonneita radonpitoisuuksia.

Maanvaraisen laatan merkittävimpiä vuotoreittejä ovat laatan ja seinärakenteiden väliset saumat (kuva 4.6). Betoninen lattialaatta kutistuu kuivussa ja laatan reuna-alueelle syntyy 1–5 millimetrin rako. Laatan laajuus vaikuttaa raon kokoon. Raon leveys ei kuitenkaan oleellisesti vaikuta virtauksen suuruuteen. Maaperän ilmanläpäisevyys on merkittävin vuotovir-



**KUVA 4.5 Tuulettuva alapohja**

taukseen vaikuttava tekijä. Karkea ja läpäisevä täyttösora lisää vielä osaltaan varsinaisesta rakennusmaasta tulevia ilmavirtauksia. Täyttösoran tulee täyttää salaojatoralle asetetut raekokovaatimukset. Reunajäykistetyssä laattassa ei synny laatan ja sokkelin välistä kutistumaraakoa. Tämän vuoksi se on hyvä ja radonturvallinen perustusratkaisu.



**KUVA 4.6 Maanvarainen ja reunajäykistetty laatta ja radonin vuoreitit**

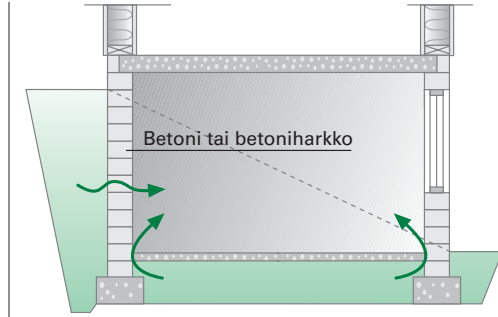
Suomessa rakennettiin 1950-luvulla runsaasti kellarillisia taloja. Kellarikerroksessa ei normaalisti ollut asuintiloja. Kellarissa oli erilliset ilmanvaihtokanavat ja ylempään kerrokseen kuljettiin portaiden ja oven kautta. Nykyajan vastine kellaritalolle on rinnetalo, jonka perustuksissa on maanvastaisia seiniä ja kerroksia yhdistää avoin porraskäytävä (kuva 4.7). Maanvastaisten seinien takia ilman radonpitoisuus alimmassa kerroksessa on suurempi kuin seuraavassa kerroksessa. Rinnetaloissa alimman kerroksen ilmalla on esteetön pääsy ylempiin kerroksiin. Valubetoniset maanvastaiset seinät ovat radonin kannalta hyvä ratkaisu, koska tällainen seinä ei läpäise radonia. Sen sijaan käsittelemätön kevytsoraharkko läpäisee radonpitoista ilmaa erittäin hyvin. Ilmavirtausta seinien läpi voidaan vähentää ohutrappauksella. Radon läpäisee rapatun seinän kuitenkin diffuusiolla.

### Hyvä ilmanvaihto pienentää radonpitoisuutta

Hyvä ilmanvaihto pienentää sisäilman epäpuhtauksien määrää ja on osa radonturvallista rakentamista. Pientalojen ilmanvaihtuvuuden suunnitte-

lun lähtökohta on se, että asunon ilma vaihtuu kerran kahdessa tunnissa eli ilmanvaihtuvuus on silloin  $0,5 \text{ h}^{-1}$ . Ilmanvaihtuvuuteen vaikuttaa asunon vaipan tiiviys, raitisilmaventtiilit ja ilmanvaihtolaitteilla aikaansaadut ilmvirtaukset sekä säätö.

Painovoimaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä ei ole puhallinta, joka vaikuttaisi asunon ilmavirtoihin. Nykyaikaisessa painovoimaisen ilmanvaihdon talossa on ulkoilmaventtiileitä asuintiloissa ja poistoilmaventtiileitä pesutiloissa ja keittiössä. Koneellisessa poistoilmavaihtojärjestelmässä imetään poistopuhaltimen avulla ilmaa pesutiloista ja keittiöstä. Raitista korvausilmaa tulee asuntoon asuintiloihin asennettujen korvausilmaventtiilien kautta. Koneellisessa tulo- ja poistoilmavaihtojärjestelmässä hallitaan sekä poisto- että tuloilmavirtoja koneellisesti. Tuloilmaventtiilit sijoitetaan sekä makuuhuoneisiin että olohuoneeseen. Poistoilmaventtiilit sijoitetaan pesutiloihin ja keittiöön.



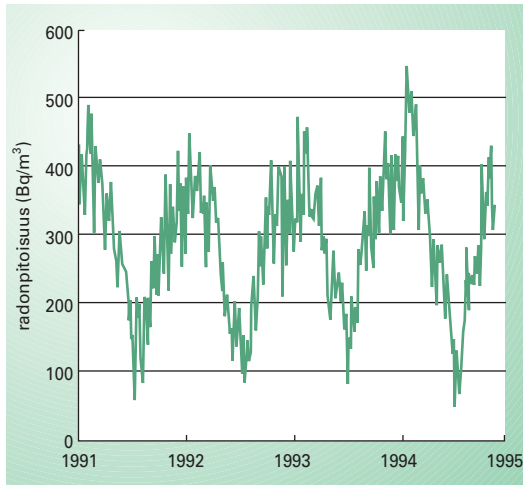
**KUVA 4.7 Rinnetalon perustus ja radonin sisäänpääsyreitit**

Hyvän ilmanvaihtuvuuden lisäksi tulee huolehtia siitä, ettei koneellinen ilmanvaihto kasvata liikaa asunnon alipaineisuutta. Asunnon alipaineisuus vaikuttaa maaperästä tulevan radonvirtauksen suuruuteen. Koneellisella tulo- ja poistojärjestelmällä pystytään hallitsemaan ilmavirtojen aiheuttamaa alipaineisuutta huomattavasti paremmin kuin poistoilmavaihtojärjestelmällä. Tulo- ja poistoilmavirtojen suhde tulee rakennusmääräysten mukaan säätää siten, että asunto jää vain lievästi alipaineiseksi.

Ylipaineistamalla asunto voitaisiin teoriassa vähentää maaperästä tulevan radonin määrää. Ylipaineistaminen ei kuitenkaan ole sallittua rakenteiden kosteusvaurioriskin takia. Ohjeiden mukaan säädetyissä koneellisen tulo- ja poistoilmavaihdon taloissa tyypillinen alipaine on 2–5 Pa. Koneellisen poistoilmavaihdon pientaloasunnoissa tyypillinen paine-ero on 5–10 Pa ja kerrostaloasunnoissa 5–20 Pa. Alipaineisuuden vaikutus on otettava huomioon erityisesti soramaille rakennettaessa. Maaperän ollessa läpäisevää ilmanvaihdon tehostaminen johtaa tiivisvaippaisessa koneellisen poistoilmavaihdon talossa jopa radonpitoisuuden kasvuun.

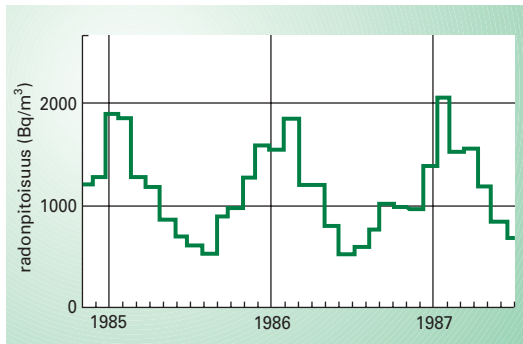
## Radonpitoisuuden ajallinen vaihtelu

Sisäilman radonpitoisuus vaihtelee sekä vuorokauden että vuodenaikojen mukaan. Kun sisä- ja ulkolämpötilan ero kasvaa, lisääntyy radonpitoisen ilman virtaus maaperästä sisätiloihin. Siksi radonpitoisuus on talvella suurempi kuin kesällä ja yöllä suurempi kuin päivällä (kuvat 4.8 ja 4.9).



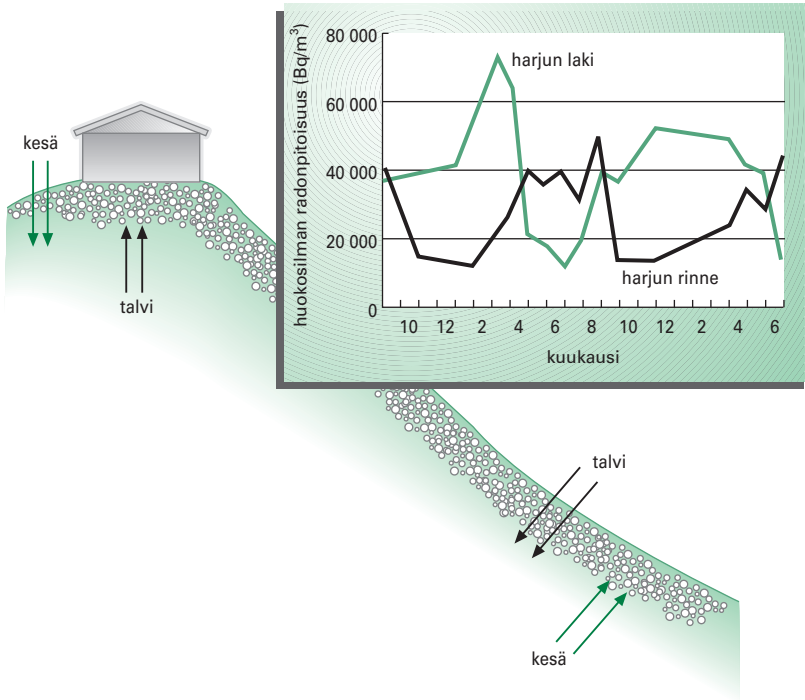
**KUVA 4.8 Suomessa tyypillistä radonpitoisuuden laskennallisesti arvioitua vaihtelua vuosina 1991–1994**

Voimakkaimmat huiput aiheutuvat erityisen poikkeavista lämpötiloista.

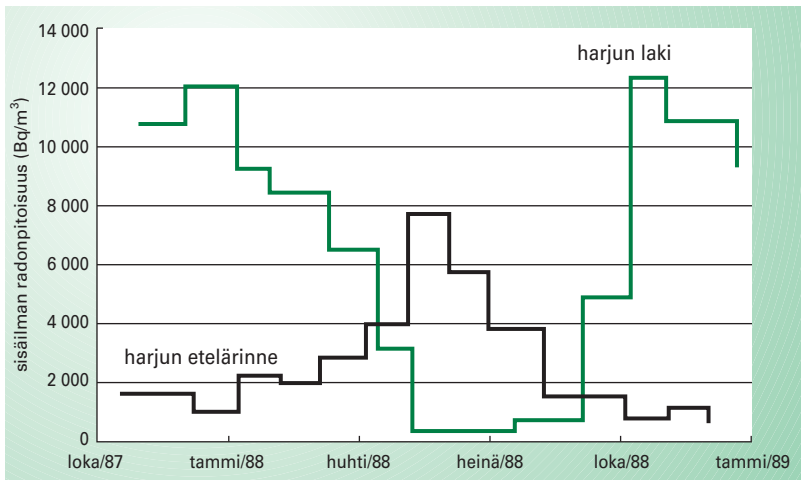


**KUVA 4.9 Radonpitoisuuden vuosivaihtelu sorharjulla sijaitsevassa maanvaraiselle laatalle perustetussa talossa**

Harjuille rakennetuissa taloissa sisäilman radonpitoisuuden vaihtelua kasvattavat muutokset maaperän huokosilman radonpitoisuudessa. Tuuli ja lämpötilaero aiheuttavat harjun sisäisiä ilmavirtauksia. Ilmiö voidaan havaita muun muassa siitä, että harjun laella voi talvella olla sulia kohtia harjun sisäisten lämpimien ilmavirtausten suuntautuessa ylöspäin. Kylmää ilmaa menee rinnealueella harjun sisään, mikä lisää maan routimista. Kesällä ilmavirtaukset suuntautuvat päinvastoin (kuva 4.10). Jyrkkämuotoisten harjujen lakialueilla olevissa taloissa radonpitoisuus voi talvella olla kymmenkertainen verrattuna kesäaikaan. Alarinteen taloissa pitoisuus voi kesällä olla suurempi kuin talvella (kuva 4.11).



**KUVA 4.10** Huokosilman radonpitoisuuden vaihtelu harjun laella ja rinteessä

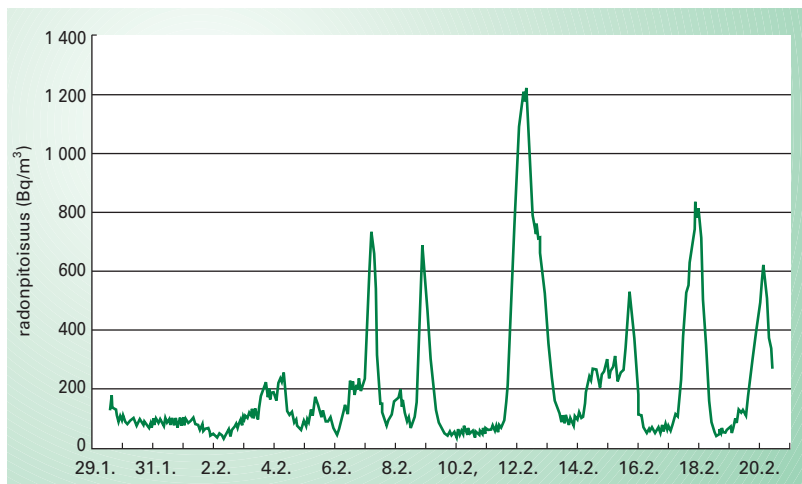


**KUVA 4.11** Radonpitoisuuden vaihtelu Pispalanharjun laella ja rinteessä sijaitsevilla taloissa

Asuntojen radonpitoisuuden vuorokausivaihtelu on suurinta syksyllä, koska yöllä on viileää ja päivällä voi olla hyvinkin lämmintä. Tuulen suunta voi myös vaikuttaa radonpitoisuuteen. Kuvan 4.12 esittämässä tapauksessa suurimmat pitoisuudet esiintyivät tuulen kääntyessä talon pit-

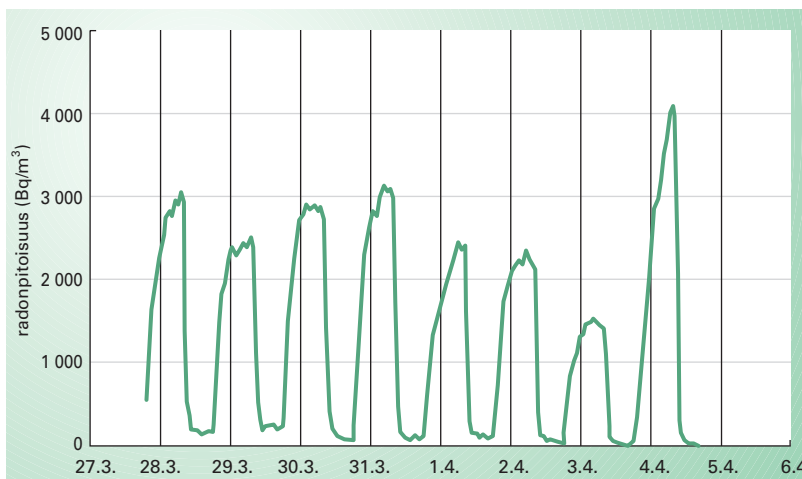


kää sivua vasten, jolloin perustuksen vuotoreittien kautta asuntoon virtaa radonpitoista ilmaa normaalia enemmän.



**KUVA 4.12 Radonpitoisuuden vaihtelu soramalle rakennetussa pientalossa viikon aikana talvella 2001**

Ilmanvaihtolaitteen käyttö voi vaikuttaa radonpitoisuuden vaihteluun merkittävästi. Työpaikoilla koneellisen ilmanvaihdon teho on päivällä säädetty suuremmaksi kuin yöllä. Radonpitoisuus saattaa nousta huomattavan suureksi yöaikana, jos ilmanvaihto suljetaan yöksi (kuva 4.13).



**KUVA 4.13 Radonpitoisuuden vaihtelu työpaikalla, jossa ilmanvaihto on kytketty pois yöajaksi (hammashoitola Itä-Suomessa)**

## 4.5 Radonin ja hajoamistuotteiden mittaaminen

Useimmat määritysmenetelmät perustuvat joko alfahiukkasten tai niiden jättämien jälkien ilmaisemiseen ja laskemiseen. Kuhunkin tilanteeseen parhaiten soveltuvan menetelmän valinnassa on otettava huomioon, että pitoisuus vaihtelee ajallisesti sekä vuorokauden- että vuodenaikojen myötä. Jos halutaan tietää radonpitoisuuden vuosikeskiarvo asunnossa, mittaustuloksen tulee edustaa riittävän pitkää ajanjaksoa, etteivät esimerkiksi säätilasta johtuvat pitoisuuden vaihtelut vääristä tulosta. Tähän tarkoitukseen sopii hyvin niin sanottu integroiva mittalaite, jolla saadaan mitattua keskimääräinen radonpitoisuus tietyllä ajanjaksolla, mutta ei sen vaihteluita. Jos on tarpeen mitata työaikaista pitoisuutta tai radonkorjauksen vaikutusta, tulee käyttää laitteita, jotka mittaavat lyhyen aikavälin pitoisuuden luotettavasti ja joista saa tietoa myös ajallisesta vaihtelusta. Näitä laitteita kutsutaan jatkuvatoimisiksi mittalaitteiksi.

Alfa- tai beetahiukkasten suoran rekisteröinnin lisäksi huoneilman radonista tai radonin hajoamistuotteista voidaan ottaa kertanäyte, jonka avulla saadaan arvioitua näytteenottohetkellä vallitseva pitoisuus. Radon imetään ilmatiiviseen kammioon tai radonin hajoamistuotteet kerätään suodattimelle, joista näiden aineiden aktiivisuus voidaan mitata.

### Alfajälki-ilmaisimet

Alfajälki-ilmaisimien on muovikalvo, joka on suljettu pieneen rasiaan (kuva 4.14). Radon siirtyy rasiaan sisään diffuusion avulla ja saavuttaa siellä tasapainon lyhytikäisten hajoamistuotteidensa kanssa. Osa radonin ja tytärnuklidien emittoimista alfahiukkasista osuu rasiassa olevaan muovikalvoon ja uppoaa siihen jättäen kalvon pintaan pienen näkymättömän vaurion. Vauriokohdat saadaan näkyviksi jäljiksi sähkökemiallisella syövytyksellä eli etsauksella. Jälkien lukumäärä lasketaan käsin tai automaattisesti kuva-analysilaitteiston ja -ohjelmiston avulla. Keskimääräinen radonpitoisuus voidaan laskea, kun tunnetaan jälkien määrä ja mittausaika.

Yksinkertaisen rakenteensa ja halpuutensa vuoksi alfajälki-ilmaisimet soveltuvat erinomaisesti radonin pitoisuuden mittaamiseen kodeissa ja työpaikoilla. Ilmaisimien sijoitetaan esimerkiksi kirjahyllyyn noin kahdeksi kuukaudeksi. Tuloksena saadaan radonpitoisuuden keskiarvo kyseiseltä mittausajalta. Alfajälki-ilmaisimia voidaan käyttää myös henkilökohtaisen radonaltistuksen seurannassa, koska kokonsa puolesta ne mahtuvat



**KUVA 4.14** Halkaisijaltaan viisisentimetrinen radonmittauspurkin sisällä on polykarbonaattikalvo.

Purkin kannen alla oleva suodatin (kuvassa oikealla) päästää lävitseen radonin, mutta ei sen hajoamistuotteita. Kuvan alaosassa oleva polykarbonaattikalvo on käsitelty laboratoriossa, jolloin alfahiukkasten aiheuttamat vauriokohdat ovat muuttuneet näkyviksi.

esimerkiksi taskuun. Lyhyen ajanjakson mittauksiin tai pienen radonpitoisuuden määrittämiseen ilmaisimet eivät sovellu, koska jälkien määrä voi jäädä vähäiseksi.

### Aktiivihiilikeräimet

Radon adsorboituu tehokkaasti aktiivihiileen. Radonin annetaan diffundoitua huoneilmasta aktiivihiilellä täytettyyn rasiaan. Radonin puoliintumisajan takia 70-prosenttinen tasapaino vallitsevan radonpitoisuuden ja hiileen sitoutuneen radonin välille saavutetaan noin viikossa ja 98-prosenttinen tasapaino noin kolmessa viikossa. Aktiivihiileen adsorboitunutta radonia ja sen hajoamistuotteita voidaan tämän jälkeen havainnoida esimerkiksi nestetuikelaskurilla (alfa- ja beetasäteily), tuikekiteellä, geigerputkella tai ionisaatiokammiolla (gamma-säteily). Aktiivihiilikeräimillä saatu mittaustulos kuvaa lähinnä viimeisten keruupäivien keskimääräistä radonpitoisuutta. Aktiivihiilikeräintä voidaan käyttää myös siten, että ilmaa kierrätetään pumpun avulla hiilen läpi.

## Ionisaatiokammio

Ionisaatiokammioita (kirja 1, Säteily ja sen havaitseminen, luku 4) käytetään yleisesti jatkuvatoimisina radonmittareina. Radon diffundoituu kammioon suodattimen läpi ja saavuttaa siellä tasapainon lyhytikäisten hajoamistuotteidensa kanssa. Radon voidaan tuoda kammioon myös pumpulla. Ionisaatiokammiot ovat osoittautuneet toimintavaroiksi kenttätutkimuksissa ja vertailukalibroinneissa. Asunto- tai työpaikkatutkimuksissa käytetään yleensä tunnin mittausjaksoa ja laitetta pidetään tutkimuskohteessa muutamasta päivästä yli viikkoon. Esimerkiksi kuvien 4.12 ja 4.13 esittämä radonpitoisuuden vaihtelu on mitattu ionisaatiokammiolla.

## Sinkkisulfidi-ilmaisimet

Tuikeilmaisimiin (kirja 1 luku 4) kuuluvaa Lucasin kammiota ja sen pohjalta kehitettyjä menetelmiä on pitkään käytetty radonpitoisuuden mittaamiseen. Tutkittava ilma johdetaan kammioon, jonka sisäpuoli on päällystetty hopealla aktivoidulla sinkkisulfidijauheella. Kammion yhdellä sivulla on valoa läpäisevä ikkuna. Radonin ja sen tytärnuklidien hajoamisessa syntyvät alfahiukkaset virittävät sinkkisulfidimolekyylejä, joiden viritystilat purkautuvat näkyvänä valona. Valontuikahdukset vahvistetaan valomonistinputkella ja rekisteröidään.

Kammiossa on tavallisesti yksi tai kaksi venttiiliä. Kun kammioon on imetty alipaine, voidaan näytteenotto tehdä helposti avaamalla venttiili. Toinen vaihtoehto on käyttää pumpua. Mittaaminen aloitetaan noin kolmen tunnin kuluttua näytteenotosta, jotta radon tasapainottuu hajoamistuotteidensa kanssa. Näin menetellen saadaan paras mittausstatistiikka.

Sinkkisulfidi-ilmaisinta voidaan käyttää myös jatkuvatoimisessa radonmittarissa. Tällöin radonin annetaan diffundoitua mittaustilaan valoa läpäisemättömän suodattimen läpi tai vaihtoehtoisesti ilmaa tuodaan kammioon pumpulla. Tehokkuutta voidaan lisätä kytkemällä mittaustilan kuoren ja sen sisällä olevan sinkkisulfidipinnan välille jännite, joka kerää hajoamistuotteet ilmaisimen pinnalle. Laskuri kerää pulsseja tietyn ajanjakson, esimerkiksi 10–180 minuuttia, ja tallentaa ne keruun jälkeen analysaattorin muistiin.

Menetelmän tehokkuus on hyvä, eli se havaitsee lähes kaikki ilmaisimelle osuvat näytteestä emittoituvat alfahiukkaset. Mittauksen geometria on hyvä, koska ilmaisimien ympäri tutkittavan näytteen. Siksi sinkkisulfidi-il-

maisimia voidaan käyttää myös, kun radonpitoisuus on pieni. Menetelmä soveltuu käytettäväksi muuallakin kuin laboratorioissa, sillä se ei ole herkkä ulkoisten tekijöiden muutoksille kuten esimerkiksi kosteuden ja lämpötilan vaihteluille.

## Radonin hajoamistuotteiden määrittäminen

Radonin lyhytikäisten hajoamistuotteiden määrittäminen voidaan tehdä joko mittaamalla kaikkien hajoamistuotteiden yhteinen alfaenergiapitoisuus tai hajoamistuotekohtaiset aktiivisuuspitoisuudet erikseen. Molemmat määrittäykset voidaan tehdä joko kertonäytteestä tai jatkuvatoimisella mittalaitteella. Kertonäytteenotossa ilmaa kierrätetään suodattimen läpi noin 5–10 minuuttia, minkä jälkeen suodattimelle kertyneiden hajoamistuotteiden aktiivisuus mitataan sopivan ajan kuluttua. Mittaamiseen voidaan käyttää esimerkiksi sinkkisulfidi-ilmaisinta. Jatkuvatoimisella mittalaitteella tutkittavaa ilmaa imetään suodattimen läpi ja samanaikaisesti mitataan suodattimen aktiivisuutta.

Uudenaikaiset hajoamistuotemittalaitteet pystyvät erottamaan aerosolihiukkasiin kiinnittyneet ja niihin kiinnittymättömät hajoamistuotteet sekä mittaamaan ilman radon- ja toronpitoisuuden. Kiinnittyneiden ja kiinnittymättömien hajoamistuotteiden erottelu perustuu siihen, että pienimpien aerosolihiukkasten (halkaisija alle 0,1 mikrometriä) liikkumista määräävä mekanismi on diffuusio. Erottelu toteutetaan imemällä ilmaa metalliverkon läpi, jolloin kiinnittymättömät hajoamistuotteet törmäävät verkkoon ja kiinnittyvät siihen. Tämän jälkeen sama ilma imetään suodattimen läpi, jolloin metalliverkon läpi menneet hiukkaset – ja hiukkasiin kiinnittyneet hajoamistuotteet – saadaan kerättyä. Lopuksi ilma johdetaan kammioon, jossa radon- ja toronpitoisuus mitataan. Hajoamistuotteiden pitoisuudet määritetään mittaamalla sekä verkko että suodatin automaattisesti puolijohdeilmaisimilla. Puolijohdeiden energianerotuskyvyn ansiosta nuklidit havaitaan erillisinä piikkeinä spektrissä.

Aikaisemmin käytettiin usein niin kutsuttuja Kusnetzin ja Tsivogloun menetelmiä, joissa molemmissa suodatinpaperille kerätään näyte ilman sisältämistä radonin hajoamistuotteista noin 5–10 minuutin aikana. Kusnetzin menetelmässä alfaenergiapitoisuus määritetään mittaamalla suodattimen aktiivisuus 40–90 minuutin kuluttua keräyksen päättymisestä. Aktiivisuuden, kerätyn ilmamäärän ja sopivien korjauskertoimien avulla voidaan laskea alfaenergiapitoisuus WL-yksiköissä. Tsivogloun menetel-

mässä suodattimen aktiivisuus mitataan kolmena ajanjaksona, esimerkiksi 2–5, 6–20 ja 21–30 minuuttia keräyksen päättymisestä. Eri hajoamistuotteiden pitoisuuksien laskeminen perustuu niiden eripituisiin puoliintumisaikoihin. Laskenta tehdään joko käyttämällä ennalta laskettuja kertoimia tai ratkaisemalla hajoamista kuvaava kolmen yhtälön ryhmä.

## Taannehtiva radonmääritys

Epidemiologisissa tutkimuksissa vaaditaan yleensä, että tutkittavan henkilön radonaltistus tunnetaan vähintään 20–30 vuoden ajalta. Altistuksen selvittäminen perinteisellä radonpurkkimittauksella ei ole aina yksinkertaista. Vaikka henkilö olisi asunut pitkään samassa asunnossa, radonpitoisuus on saattanut muuttua vuosien myötä. Radonin mittaaminen edellisissä asunnoissa voi olla mahdotonta. Taannehtivaa eli retrospektiivista radonmääritystä on 2000-luvulla testattu eri puolilla maailmaa. Menetelmä perustuu radonin pitkäikäiseen hajoamistuotteeseen  $^{210}\text{Pb}$ , jonka puoliintumisaika on 22,3 vuotta ja joka on tasapainossa alfasäteilyä lähettävän tytärnuklidinsa  $^{210}\text{Po}$  kanssa. Taannehtivassa menetelmässä mitattava kohde voi olla kova, tasainen esine, jonka pintakerroksessa olevan  $^{210}\text{Po}$ :n aktiivisuus mitataan (pintaloukkumenetelmä). Se voi olla myös huokoista materiaalia, johon radonkaasu diffundoituu syntyvän  $^{210}\text{Pb}$ :n jäädessä materiaalin sisään (tilavuusloukkumenetelmä). Esine, joka on seurannut omistajaansa muutosta toiseen ja johon on kertynyt  $^{210}\text{Pb}$ :tä, kertoo enemmän kyseisen henkilön altistuksesta kuin nykyisen asunnon radonpitoisuuden mittausta.

Lasipinnat, kuten peilit ja taulujen lasit ovat hyviä kohteita  $^{210}\text{Po}$ :n suoraan mittaamiseen. Lasin pinnalle joutuneet  $^{218}\text{Po}$ - ja  $^{214}\text{Po}$ -atomit voivat alfahajoamisessa saamansa rekyylienergian ansiosta tunkeutua jopa 100 nanometrin syvyydelle lasiin. Tällöin niitä ei ole mahdollista poistaa esineestä normaalin puhdistuksen yhteydessä. Altistus voidaan arvioida mittaamalla pintaan kiinnittynyt  $^{210}\text{Po}$  alfajälki-ilmaisimella. Tilavuusloukkumenetelmässä tutkittavaksi soveltuu esimerkiksi pala superlonpatjaa.  $^{210}\text{Po}$ :n aktiivisuuspitoisuus määritetään tällaisesta näytteestä radiokemiallisesti. Molemmissa menetelmissä on tärkeää, että henkilö on saanut esineen uutena ja hankinta-aika tunnetaan mahdollisimman tarkasti. Taannehtivan radonmäärityksen kalibrointi tehdään hallituissa olosuhteissa ja varmennetaan asunnoissa, joissa huoneilman radonpitoisuutta on seurattu useiden vuosien ajan.

## Maaperän huokosilman radonmittaus

Maaperän huokosilman radonpitoisuus voidaan mitata ottamalla ilmanäyte maaperästä maahan isketyn putken avulla. Näyte on otettava kyllin syvältä, koska radonpitoisuus pienenee maan pintaa kohti. Luotettavin näyte saadaan 2–4 m syvyydeltä, mutta käytännössä näyte joudutaan usein ottamaan noin metrin syvyydeltä. Mittaus voidaan tehdä myös sijoittamalla integroiva alfajälki-ilmaisim maaperään. Menetelmä on kuitenkin herkkä tuulioloille. Etenkin harjuissa tuuli voi laimentaa huokosilman radonpitoisuutta syvälläkin maaperässä.

Maaperän radontuotto (katso luku 4.9) voidaan mitata laboratoriossa sulkemalla maanäyte ilmatiiviiseen astiaan. Kun radonia on muodostunut riittävä määrä, otetaan näyte astian sisältämästä ilmasta ja määritetään sen radonpitoisuus Lucasin kammiolla. Radonpitoisuus voidaan mitata myös astiaan sijoitetulla alfajälki-ilmaisimella.

### 4.6 | Radonia koskevat hallinnolliset ohjeet

---

#### Asunnot

Säteilylaissa (592/91) mainitaan, että sosiaali- ja terveysministeriö antaa enimmäisarvot radonaltistuksen rajoittamiseksi asunnoissa. Sosiaali- ja terveysministeriön päätöksen (944/92) mukaan asunnon huoneilman radonpitoisuus ei saisi ylittää  $400 \text{ Bq/m}^3$ . Uusi asunto tulee suunnitella ja rakentaa siten, että radonpitoisuus ei ylitä  $200 \text{ Bq/m}^3$ . Radonpitoisuudella tarkoitetaan tässä vuoden pituisen ajanjakson aikana mitattua tai muutaman kuukauden pituisen mittauksen perusteella arvioitua radonpitoisuuden keskiarvoa, niin sanottua vuosikeskiarvoa. Mittaus tulee tehdä vähintään kahden kuukauden pituisena yhtäjaksoisena aikana. Radonpitoisuuden määrittämisessä täytyy käyttää Säteilyturvakeskuksen hyväksymää mittausmenetelmää.

Säteilysuojelun peruseriaatteisiin kuuluu säteilyaltistuksen pienentäminen aina silloin, kun se on tarkoituksenmukaista ja käytännöllisin keinoin toteutettavissa. Tämän periaatteen mukaisesti Säteilyturvakeskus on kehottanut harkitsemaan jo  $200 \text{ Bq/m}^3$  ylittävän pitoisuuden pienentämistä.

- Mikäli huoneilman radonpitoisuus ylittää  $400 \text{ Bq/m}^3$ , Säteilyturvakeskus suosittelee ryhtymään toimenpiteisiin radonpitoisuuden pienentämiseksi.
- Mikäli radonpitoisuus on  $200\text{--}400 \text{ Bq/m}^3$ , Säteilyturvakeskus suosittelee tarkoituksenmukaisia, helposti tehtäviä korjauksia.
- Mikäli huoneilman radonpitoisuus alittaa  $200 \text{ Bq/m}^3$ , ei toimenpiteitä tarvita.

Sosiaali- ja terveysministeriön sisäilmaohjeessa (1997) annetaan neuvoja kunnan terveydensuojeluviranomaisille, kuinka radonmittauksia järjestetään ja mittaustuloksia tulkitaan. Ohjeen mukaan kunnan terveydensuojeluviranomaisen on suoritettava sisäilman radonmittauksia radontilanteen selvittämiseksi kunnan eri alueilla. Jos tietyllä alueella tehdyt huoneilman radonmittaukset toistuvasti osoittavat enimmäisarvon  $400 \text{ Bq/m}^3$  ylityksen ja alueen geologiset piirteet viittaavat suuriin radonpitoisuuksiin, tulee terveydensuojeluviranomaisen ryhtyä toimenpiteisiin enimmäisarvon ylittävien asuntojen löytämiseksi. Säteilyturvakeskus tekee pyynnöstä tällaiselle alueelle erityisen radonmittaussuunnitelman. Sen tavoitteena on ennakoida ne kohteet, joissa radonpitoisuus voi olla suuri.

Säteilyturvakeskus suosittaa, että asunnon ja työpaikan radonmittaus tehdään marraskuun alun ja huhtikuun lopun välisenä aikana, koska radonpitoisuus on talvella yleensä suurempi kuin kesällä. Harjualueilla voi joissain tapauksissa esiintyä kesällä suurempia pitoisuuksia kuin talvella. Harjualueilla kannattaakin mitata sekä talvella että kesällä tai vaihtoehtoisesti tehdä koko vuoden kestävä mittaus. Joskus viranomaisilta tiedustellaan myös, onko tarpeen mitata kesämökin radonpitoisuus. Lämpiminä aikoina, jolloin ikkunat ja ovet ovat usein auki, radonpitoisuus on todennäköisesti pieni. Jos vapaa-ajan asuntoa käytetään paljon muina vuodenaikoina kuin kesällä, voi radonmittaus olla tarpeellinen. Mittaus on tehtävä silloin, kun vapaa-ajan asunnossa oleskellaan; muutoin radonaltistuksesta saadaan virheellinen kuva. Säteilyturvakeskus ja kuntien terveystarkastajat neuvovat radonmittauksiin liittyvissä asioissa.

Suomessa asuntojen radonpitoisuuden enimmäisarvoja koskeva päätös on sopusoinnussa Euroopan Unionin suositusten kanssa. Eri maissa asuntoja koskevat enimmäisarvot ovat väliltä  $150\text{--}1\,000 \text{ Bq/m}^3$  ja työpaikkoja koskevat arvot väliltä  $150\text{--}3\,000 \text{ Bq/m}^3$ . Kolmasosa Euroopan maista soveltaa asunnoille samaa enimmäispitoisuutta kuin Suomi ja kolmasosassa enimmäispitoisuus poikkeaa Suomen enimmäisarvoista.



Noin kolmasosassa asuntojen sisäilman radonpitoisuudelle ei ole asetettu lainkaan enimmäisarvoja.

## Työpaikat

Säteilylaissa (592/91) on maininta luonnonsäteilystä aiheutuvan säteilyaltistuksen rajoittamisesta. Lain ja säteilyasetuksen (1512/91) nojalla Säteilyturvakeskus antoi enimmäisarvon työpaikkojen sisäilman radonpitoisuudelle. Säteilyasetuksen muutoksen (1143/98) perusteella radonpitoisuuden vuosikeskiarvo työaikana ei saa ylittää  $400 \text{ Bq/m}^3$ . Toimenpidearvo koskee kaikkia työpaikkoja ja esimerkiksi kouluja, päiväkoteja ja muita julkisia tiloja. Jokainen työnantaja on velvollinen selvittämään työtilojen radonpitoisuuden, jos toimenpidearvon ylittymistä epäillään. Jos työ ei ole säännöllistä, voi keskimääräinen radonpitoisuus olla suurempi kuin  $400 \text{ Bq/m}^3$  (taulukko 4.5).

| Vuotuinen työaika              | Toimenpidearvo ( $\text{Bq/m}^3$ ) |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Säännöllinen työ (1600 tuntia) | 400                                |
| Enintään 600 tuntia            | 1 000                              |
| Enintään 300 tuntia            | 2 000                              |
| Enintään 100 tuntia            | 6 000                              |

**TAULUKKO 4.5** Työpaikan radonpitoisuuden toimenpidearvot eri työajoille

Työpaikkojen radonpitoisuus tulee selvittää niissä kunnissa, joissa asunnoissa mitatuista radonpitoisuuden vuosikeskiarvoista vähintään kymmenen prosenttia ylittää arvon  $400 \text{ Bq/m}^3$ . Säteilyturvakeskus päivittää Internet-sivuillaan ([www.stuk.fi](http://www.stuk.fi)) olevan kuntalistan vuosittain. Radonpitoisuus tulee mitata myös työpaikoilla, jotka sijaitsevat harjuilla tai muilla hyvin ilmaa läpäisevillä sora- tai hiekkamuodostumilla koko maassa. Pitoisuus tulee mitata kaikissa maan alla sijaitsevilla työtiloissa, joissa työskennellään pysyvästi. Mittausvaatimus ei koske sellaisia työpaikkoja, joissa työtilojen radonpitoisuus on sijainnin, rakenteen tai muun vastaavan syyn vuoksi mitä ilmeisemmin pienempi kuin  $400 \text{ Bq/m}^3$ . Mittauksia ei yleensä tarvitse tehdä työtiloissa, jotka sijaitsevat kerrostalotyyppisen rakennuksen toisessa tai sitä ylemmissä kerroksissa.

Työpaikkojen sisäilman radonpitoisuus määritetään käyttäen alfajälki-ilmaisinta eli radonpurkkia tai muuta tarkoitukseen soveltuvaa menetel-

mää. Mittauksissa käytettävien laitteiden ja menetelmien tulee olla Säteilyturvakeskuksen hyväksymiä. Radonpurkkia tulee pitää työtilassa lämmityskaudella vähintään kahden kuukauden yhtäjaksoisen ajan. Työpai-kan radonpitoisuus mitataan rakennuksen alimman kerroksen työskente-lytiloissa. Toimistoissa riittää yksi tulos noin kahtasataa neliometriä koh-ti, teollisuushalleissa 1–2 tulosta/halli. Jokaisessa erillisessä rakennuk-sessa pitää tehdä vähintään yksi mittaus. Toimenpidearvojen ylittyessä työnantajan on pienennettävä radonaltistusta. Mikäli pienentäminen ei onnistu, työnantajan on järjestettävä työntekijöiden työolojen tarkkailu.

## 4.7 | Radonkorjaukset

Maaperästä tuleva radonpitoinen ilma on merkittävin syy sisäilman ko-honneisiin radonpitoisuuksiin. Tämän vuoksi tehokkaimpia ovat mene-telmät, jotka suoraan vähentävät ilmavirtausta maasta sisäilmaan. Vuoto-reittien tiivistämisellä voidaan virtauksia yrittää estää, mutta riittävän tii-viyden saavuttaminen on vaikeaa – käytännössä usein jopa mahdotonta. Ilmanvaihtoteknisten korjausmenetelmien tehokkuus vaihtelee. Parhaat tulokset on saavutettu, kun ilmanvaihdon taso ennen korjausta on ollut matala tai jos asunto on ollut erittäin alipaineinen (kuva 4.15).

### Maaperästä tulevien vuotojen estäminen

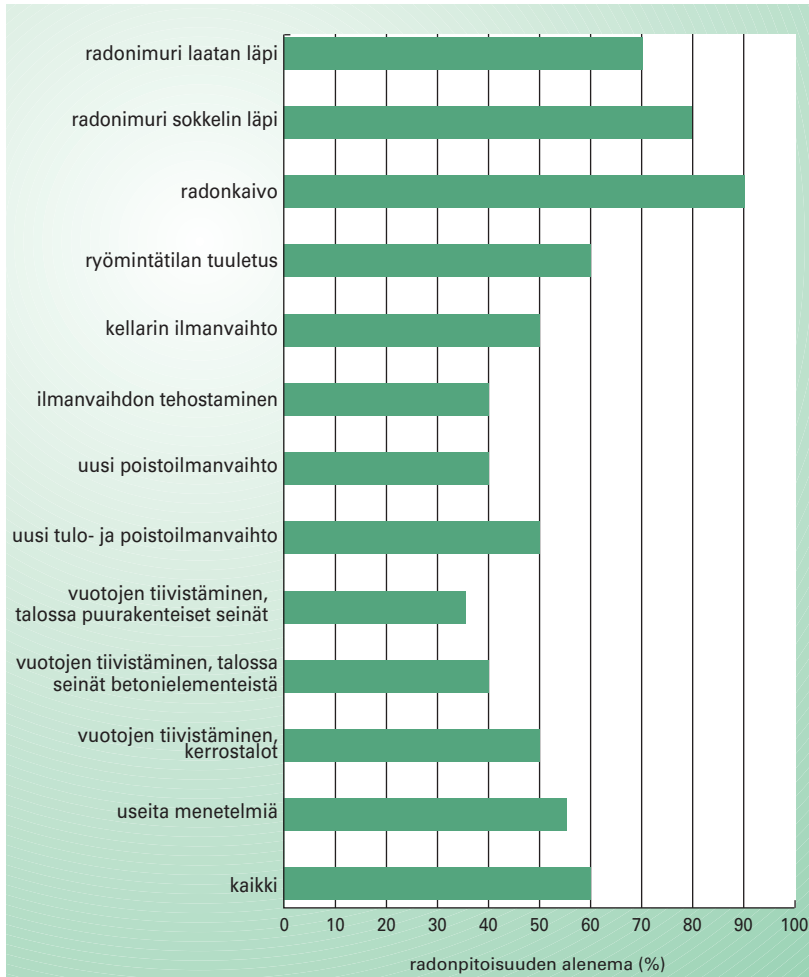
- Radonimuri
- Radonkaivo
- Vuotoreittien tiivistäminen

### Ilmanvaihtotekniset korjaukset

- Ilmanvaihdon parantaminen asuintiloissa
- Ilmanvaihdon parantaminen kellarissa
- Alipaineisuuden vähentäminen
- Tuulettuvan alapohjan ilmanvaihdon kasvattaminen

## Radonimuri

Radonimuri on tehokas menetelmä, joka sopii useimpiin kohteisiin (kuva 4.16). Nimitystä ”radonimuri” käytetään, vaikka radonin imeminen laa-tan alta ei olekaan menetelmässä tärkeää vaan alipaineen syntyminen laatan alle. Alipaine vähentää ilman virtausta maaperästä asuntoon py-säyttäen sen onnistuneessa korjauksessa kokonaan. Alipaine saadaan



**KUVA 4.15** Eri korjausmenetelmillä saavutettu radonpitoisuuden keskimääräinen alenema

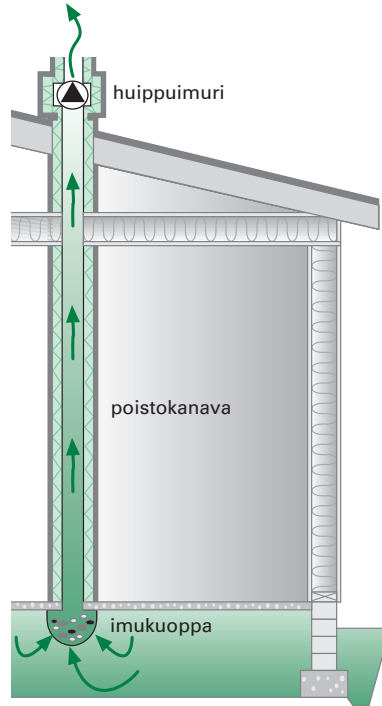
Tiivistämisratkaisuissa on suoritettu samanaikaisesti ilmanvaihdon korjauksia.

aikaan kanavapuhaltimella, joka imee ilmaa yhdestä tai useammasta pisteestä lattialaatan alta. Pientaloissa on saavutettu hyviä tuloksia 70 watin puhallinteolla. Radonimuri alentaa myös maaperästä virtaavan ilman radonpitoisuutta. Radonimuri on tuloksiltaan parhaita korjausmenetelmiä. Radonpitoisuus on tavallisesti pienentynyt 50–90 prosenttia alkuperäisestä arvosta. Yli 70 prosentissa tehdyistä korjauksista radonpitoisuus on laskenut alle  $400 \text{ Bq/m}^3$ . Parhaat tulokset on saavutettu yhtenäisellä suorakaiteen muotoisella laatalla varustetuissa rivi- ja pientaloissa, joissa imurin vaikutus pääsee esteettä leviämään laatan reuna-alueille saakka (kuva 4.17). Ympäristöministeriö on julkaissut radonimurin suunnit-

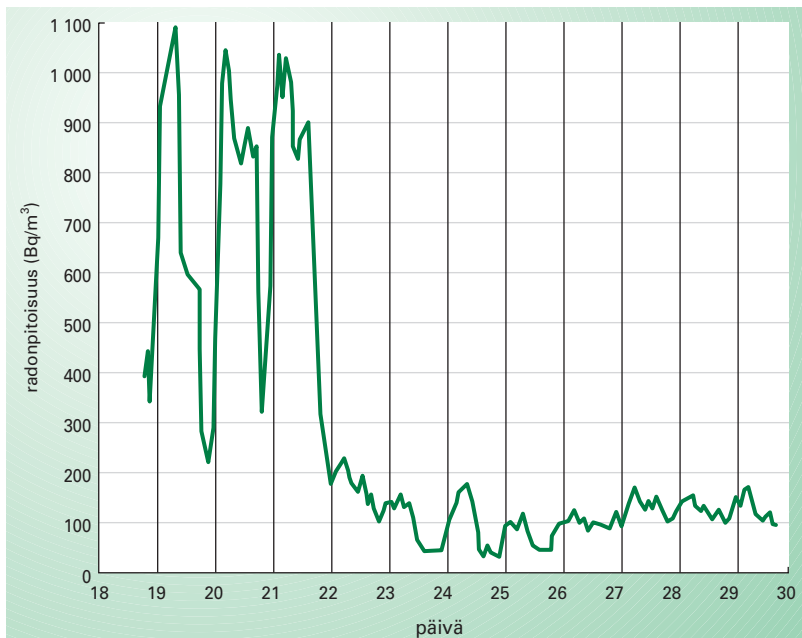
nittelusta ja toteutuksesta yksityiskohtaisen oppaan. Radonimurin kustannukset ovat 1 000–2 000 euroa.

## Radonkaivo

Radonkaivo (kuva 4.18) soveltuu ilmaa hyvin läpäiseville soramaille. Kaivo rakennetaan talon ulkopuolelle muutaman metrin päähän perustuksista. Kaivoon asennetaan puhallin, jolla imetään ilmaa maaperästä. Syntyvä virtaus alentaa asuntoon maaperästä virtaavan ilman radonpitoisuutta.



**KUVA 4.16** Radonimurin toimintaperiaate



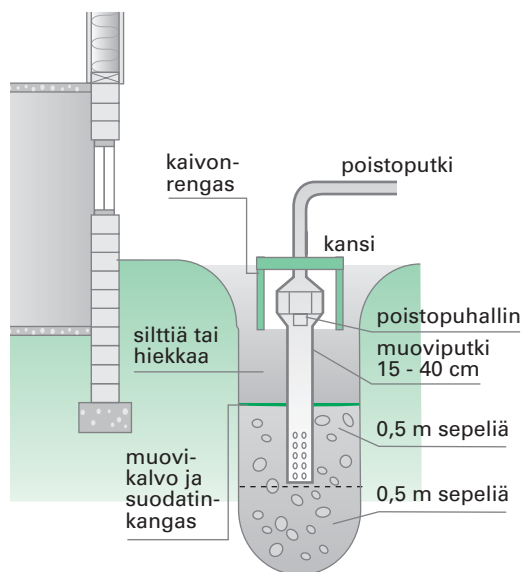
**KUVA 4.17** Radonpitoisuuden vaihtelu ja pieneminen radonimurin kytkemisen jälkeen helsinkiläisessä paritalossa

Mittaukset on tehty syyskuussa, jolloin ulkoilman suuri lämpötilaero yön ja päivän välillä aiheuttaa voimakkaan vaihtelun asunnon radonpitoisuudessa.

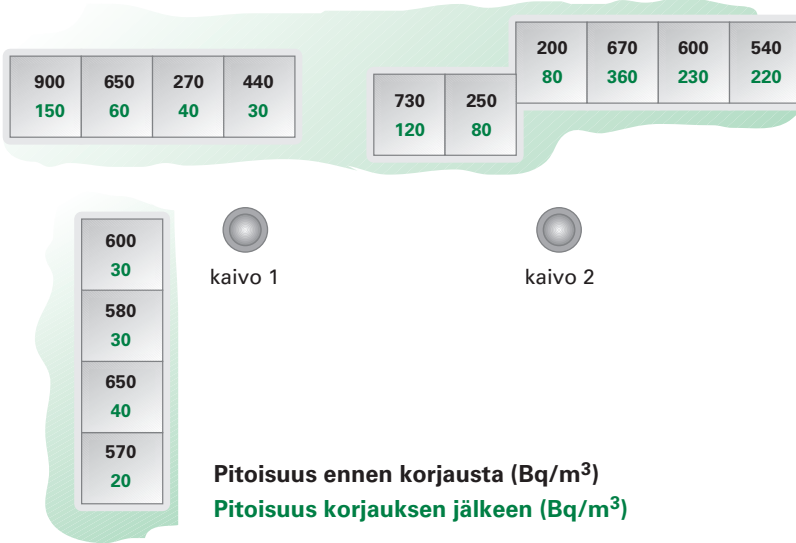
Yhden pientalon radonkaivoon sopiva puhallinteho on 150 W. Tehovaatimus kasvaa, jos kaivon vaikutusaluea halutaan laajentaa. Yhdellä sopivasti sijoitetulla kaivolla ja riittävän tehokkaalla puhaltimella on pystytty alentamaan vierekkäisissä rivitaloissa jopa yli kymmenen asunnon radonpitoisuutta (kuva 4.19). Kaivon vaikutusalue on suotuisissa oloissa 20–40 metriä. Kaivon tehoon vaikuttavat muun muassa maaperän läpäisevyys, kerroksellisuus, imupisteen syvyys sekä poistopuhaltimen teho. Tiiviistä maalajista ei saada imettyä riittävästi ilmaa, jolloin alipaineenttä ei leviä putken suuta kauemmaksi. Kaivon vaikutuksesta radonpitoisuus on tavallisesti pienentynyt yli 90 prosenttia alkuperäisestä arvosta. Arvo  $400 \text{ Bq/m}^3$  on alittunut lähes kaikissa tapauksissa, vaikka radonpitoisuuden lähtöarvot ovat olleet erittäin suuria. Radonkaivon kokonaiskustannukset ovat 1000–3000 euroa.

### Rakenteiden tiivistäminen pienentää ilmapvirtaa maasta

Maata vasten olevia rakenteita tiivistämällä pyritään katkaisemaan radonvirtaus asuntoon. Kaikkia mahdollisia vuotokohtia on käytännössä mahdoton löytää tai tiivistää. Siksi tiivistäminen ei yleensä ole riittävän tehokas toimenpide ainoana korjauskeinona. Radon virtaa asuntoon lattialaatan ja seinän välisestä saumasta sekä sokkelin ja seinän kautta. Myös kantavat väliseinät sekä näiden ja lattialaatan liitoskohdat toimivat vuotoreitteinä. Jos virtausta tapahtuu myös sokkelista seinärakenteisiin,



**KUVA 4.18 Radonkaivon rakenne**



**KUVA 4.19** Rivitaloasuntojen radonpitoisuus pieneni, kun käytettiin kahta radonkaivoa.

ei laatan ja seinän välisen raon tiivistäminen välttämättä tuota haluttua tulosta. Parhaat raon tiivistämisellä saadut tulokset onkin saatu betonielementeistä rakennetuissa kerrostaloissa, joissa maaperän radonpitoinen ilma ei pääse sokkelin ja seinärakenteiden kautta asuntoon.

Läpäisevästä seinämateriaalista tehty kellarillisen talon perusmuuri tai rintetalon alakerran maanvastainen seinä voi olla merkittävä radonin vuotopinta. Perusmuuri tiivistetään betonilaastilla laatasta välipohjaan saakka.

Puusta rakennetuissa pientaloissa radonpitoisuus pienenee tiivistämällä tyypillisesti 10–20 prosenttia. Yhdistämällä korjaukseen ilmanvaihdon tehostaminen on saavutettu 20–40 prosentin alenemia. Tiivistäminen on materiaalikustannuksiltaan halpaa, mutta muuten työlästä. Tarvikkeet maksavat muutamasta kymmenestä eurosta yli parin sadan euron.

## Ryömintätilan tuuletus

Tuulettuvalla alapohjalla eli ryömintätalalla varustetuissa taloissa on keskimäärin pienempi radonpitoisuus kuin muulla tavalla perustetuissa taloissa, koska maaperästä tulevan huokosilman radonpitoisuus pienenee ryömintätalassa ennen kuin ilma siirtyy asuntoon. Jos tuuletus on puutteellinen ja alapohjan läpi tapahtuu virtausta sisätiloihin, radonkorjaus

voi olla tarpeen. Tuuletuksella voidaan pienentää ryömintätilan ilman radonpitoisuutta. Ryömintätilan ilmanvaihtoa voi tehostaa aukaisemalla tuuletusluukut ja venttiilit. Tuulisella säällä ryömintätilan tuuletus toimii hyvin, kun taas tyyneellä voi ilma ryömintätilassa olla hyvin seisovaa. Paras tulos saavutetaan pienen puhaltimen avulla. Ryömintätilan tuuletuksessa on huomioitava lämpö- ja kosteustekniset seikat. Tarvittaessa tuuletusaukkojen lukumäärää on lisättävä. Säteilyturvakeskuksen tutkimista kohteista 75 prosentissa radonpitoisuus oli tuuletusta parantamalla pienentynyt alle puoleen, parhaissa tapauksissa jopa 80–90 prosenttia.

## Ilmanvaihtokorjaukset

Asunnon radonpitoisuutta voidaan pienentää ilmanvaihtoa tehostamalla. Jos ilmanvaihtuvuus on jo hyvä, sitä ei ole enää järkevää lisätä. Seurauksena voi olla vetoisuutta, meluhaittoja ja lämmityskustannusten kohoaminen. Jos asunnon radonpitoisuus on yli  $800 \text{ Bq/m}^3$ , on todennäköistä, että ilmanvaihdon parantaminen ainoana toimenpiteenä ei ole riittävä menetelmä radonpitoisuuden pienentämiseksi.

Painovoimaista ilmanvaihtoa voi tehostaa asentamalla tuloilmaventtiileitä tai aukaisemalla poisto- ja tuloilmaventtiilit suurempaan asentoon. Koneellisen ilmanvaihdon tulisi olla jatkuvasti toiminnassa. Tarvittaessa voidaan käyttötehoa kasvattaa. Koneellisessa tulo- ja poistoilmavaihdossa on tulo- ja poistoilmavirta tasapainotettava asunnon alipaineisuuden vähentämiseksi. Eristämällä kellari ilmanvaihdollisesti muusta asunnosta ja parantamalla kellarin ilmanvaihtoa voidaan vähentää radonpitoisen ilman siirtymistä kellarista asuntoon.

Ilmanvaihdon tehostamisesta aiheutuvat kokonaiskulut vaihtelevat muutamasta kymmenestä eurosta jopa 5 000 euroon. Olemassa olevien venttiilien aukaisu tai tehon säätö ei aiheuta tarvikkekuluja. Kokonaan uuden tulo- ja poistoilmavaihtojärjestelmän hankkiminen ja asentaminen on kallein ratkaisu.

## Kerrostalojen radonkorjaukset

Pientalojen lisäksi suuria radonpitoisuuksia esiintyy niissä kerrostalojen alimman kerroksen asunnoissa, joissa lattialaatta on valettu suoraan täytösoran päälle. Enimmäisarvo  $400 \text{ Bq/m}^3$  ylittyy ainakin joka kymmenennessä ja  $200 \text{ Bq/m}^3$  ainakin joka viidennessä ensimmäisen kerroksen

asunnossa. Kerrostalojen rakenteellinen tiiviys, koneellinen poistoilmanvaihto ja tuloilmaventtiilien puute yhdessä kasvattavat asuntojen alipaineisuutta. Kerrostaloissa alipaine on tyypillisesti 10–20 Pa. Tuloilmaventtiilien asennuksella voidaan alipainetta vähentää jopa puoleen.

Perustusrakenteiden tiivistämisellä on saavutettu tyypillisesti 30–70 prosentin alenemia radonpitoisuuteen. Radonimurilla on saavutettu kerrostaloasunnoissa 60–80 prosentin ja radonkaivolla jopa yli 90 prosentin alenemia. Korjaustulokset eivät ole niin hyviä kuin pientalojen tapauksessa, sillä asuntojen alipaineisuus heikentää sekä radonimurin että radonkaivon toimintaa.

Alimman kerroksen asunnoissa on tapauskohtaisesti selvitettävä tuloilmaventtiilien asentamisella ja vuotojen tiivistämisellä saavutettava radonpitoisuuden alenema. Jos nämä korjaukset eivät auta, on harkittava radonimurin tai kaivon käyttöä. Alipaineisuuden hallinta on parhaiten toteutettavissa asuntokohtaisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä.

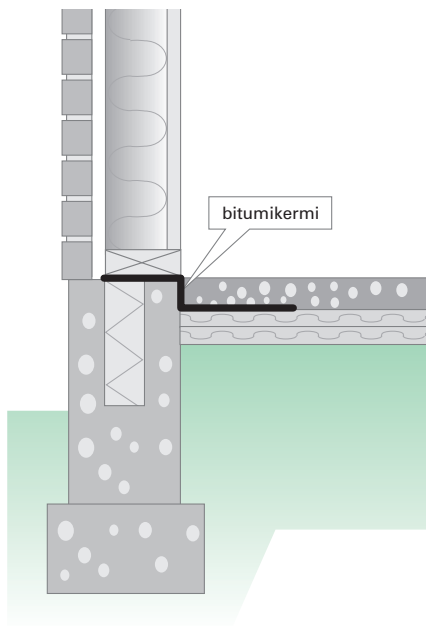
## 4.8 Radon uudisrakentamisessa

Sosiaali- ja terveysministeriön päätöksen ja Suomen rakennusmääräyskokoelman mukaisesti asunnot tulee suunnitella ja rakentaa siten, että radonpitoisuus  $200 \text{ Bq/m}^3$  alittuu. Tämä tavoitearvo on Suomen oloissa erittäin tiukka vaatimus; enimmäisarvo ylittyy laajoilla alueilla Suomessa hyvin yleisesti, jos radonia ei mitenkään torjuta jo rakennusvaiheessa. Perustustavan valinnalla voidaan merkittävästi vaikuttaa asunnon radonpitoisuuteen. Tuulettuva alapohja on radonturvallisin ratkaisu. Puurakenteisissa ryömintätilaisissa pientaloissa voidaan päästä jopa lähelle ulkoilman radonpitoisuutta,  $5\text{--}20 \text{ Bq/m}^3$ . Jos perustustavaksi valitaan maanvarainen laatta, tulee maaperän radonpitoisen ilman virtaukset estää rakennusteknisin toimenpitein.

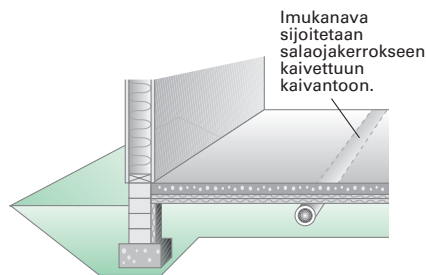
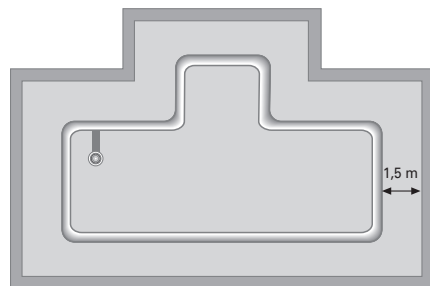
Radonturvallisen maanvaraisen laatan tekemisessä on kaksi keskeistä työvaihetta – perustuksen tiivistäminen ja radonputkiston asentaminen laatan alle täyttösoraan. Maanvarainen laatta voidaan rakentaa tiiviiksi käyttämällä reunajäykistettyä laattaa, jossa sokkeli ja lattialaatta valetaan samanaikaisesti. Tällöin laattaan ei synny rakoja, jonka kautta ilma pääsee virtaamaan maasta sisätiloihin. Jos lattialaatta valetaan erikseen sokkelin sisään, voidaan riittävä tiiviys saavuttaa sokkelin ja laatan liitokseen asennetulla bitumikermillä (kuva 4.20). Hyvään lopputulokseen pyritään jo pelkän laadukkaan tiivistystyön avulla.



Radonputkisto asennetaan laatan alle varmuustoimenpiteenä. Se otetaan käyttöön vasta tarkistusmittauksen jälkeen, mikäli radonpitoisuus ylittää enimmäisarvon  $200 \text{ Bq/m}^3$ . Putkistoon kytketään tällöin puhallin, jonka vaikutuksesta radonpitoisuus alenee. Puhallin aiheuttaa alipaineen laatan alle. Putket asennetaan täytesoraan noin 20 senttimetrin syvyydelle ja 1,5 metrin etäisyydelle sokkelista (kuva 4.21). Oikein suunniteltu ja valmiiksi asennettu putkisto takaa alipaineen tasaisen leviämisen täytesoraan paremmin kuin jälkeenpäin lattian läpi tehty järjestelmä.



KUVA 4.20 Bitumikermiä asennus laatan ja sokkelin liitokseen



KUVA 4.21 Radonputkiston asentaminen maanvaraisen lattialaatan alle

## 4.9 | Radonfysiikkaa

Radonin ja sen hajoamistuotteiden pitoisuuden ja altistuksen yksiköt

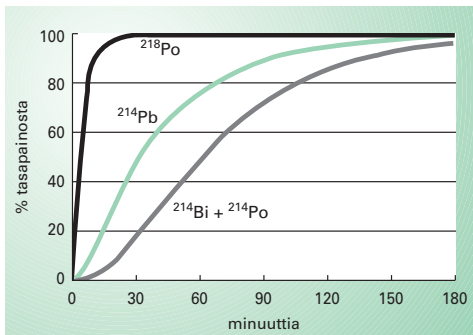
Tässä luvussa esitetyt suureet ja yksiköt pätevät radonin isotoopille  $^{222}\text{Rn}$  (radon). Vastaavia suureita voidaan käyttää myös isotoopille  $^{220}\text{Rn}$  (toron), mutta alfaenergian yksikköjen ja niistä johdettujen suureiden muuntokertoimet ovat silloin toiset. Lisätietoja löytyy esimerkiksi kansainvälisen säteilysuojelutoimikunnan ICRP:n julkaisuista 50 ja 65.

Radonin aktiivisuuspitoisuus (radonpitoisuus) ilmaistaan SI-yksiköissä becquereliä kuutiometriä kohti ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ). Aiemmin käytetty yksikkö on pikocurie/litra ( $\text{pCi}/\text{l}$  eli  $10^{-12} \text{ Ci}/\text{l}$ ). Yksiköiden suhde on

$$1 \text{ pCi}/\text{l} = 37 \text{ Bq}/\text{m}^3.$$

Radonin lyhytikäisten hajoamistuotteiden aktiivisuudet kasvavat tasapainoon radonin kanssa noin kolmessa tunnissa, jos lähtötilanteessa ilmassa on pelkkää radonkaasua (Kuva 4.22). Käytännössä täydellisen tasapainon syntymisen esteenä on ilmanvaihto ja hajoamistuotteiden tarttuminen ympäröiviin pintoihin.

Radonin hajoamistuotteiden aktiivisuuspitoisuudet voidaan ilmoittaa nuklidikohtaisesti samoissa yksiköissä kuin radonpitoisuus. On kuitenkin käytännöllistä kuvata ilmassa olevan hajoamistuotteiden seoksen aktiivisuuspitoisuutta, samoin kuin hajoamistuotteiden seoksen ja radonin aktiivisuuksien suhdetta, yhdellä luvulla. Tähän käytetään suureita potentiaalinen alfaenergiapitoisuus (lyhyemmin alfaenergiapitoisuus) ja tasapainosuhte. Alfaenergiapitoisuus on tilavuusyksikössä ilmaa olevien lyhytikäisten hajoamistuotteiden alfahajoamisissa vapautuva energiamäärä (taulukko 4.6). Sen SI-yksikkö on joulea kuutiometrissä ( $\text{J}/\text{m}^3$ ). Vanha yksikkö WL (working level) määriteltiin alfaenergiapitoisuudeksi, joka on tasapainossa radonpitoisuuden  $100 \text{ pCi}/\text{l}$  kanssa, vastaten alfaenergiapitoisuutta  $1,30 \cdot 10^8 \text{ MeV}/\text{l}$  ( $2,08 \cdot 10^{-5} \text{ J}/\text{m}^3$ ).



**KUVA 4.22 Radonin lyhytikäisten hajoamistuotteiden muodostuminen**

Pääosa hajoamistuotteista saavuttaa tasapainon radonin kanssa noin kolmen tunnin aikana.

Tasapainosuhte ilmoittaa todellisen alfaenergiapitoisuuden ja täydellistä tasapainoa vastaavan alfaenergiapitoisuuden ( $5,56 \cdot 10^{-9} \text{ J}/\text{Bq}$ ) suhteen. Sen arvo on tyypillisesti asunnoissa 0,4–0,6.

Aiemmin hajoamistuotepitoisuudelle on käytetty yksikköä EEC (Equilibrium Equivalent Concentration), joka on radonpitoisuus kerrottuna tasapainosuhteella. Myös muotoja EER (Equilibrium Equivalent Radon) ja  $EEC_{Rn}$  on käytetty. EEC-yksikön käyttö saattaa aiheuttaa sekaannusta, koska se voidaan saman yksikön ( $Bq/m^3$ ) tähden sekoittaa radonpitoisuuteen.

| Nuklidi    | Hajoamisen alfaenergia |                       | Puoliintumisaika | Potentiaalinen alfaenergia |                       | Osuus tasapainotilan alfaenergiasta (%) |
|------------|------------------------|-----------------------|------------------|----------------------------|-----------------------|---|
|            | (MeV)                  | (J)                   |                  | (J/atomi)                  | (J/Bq)                |   |
| $^{218}Po$ | 6,00                   | $0,96 \cdot 10^{-12}$ | 3,05 min         | $2,19 \cdot 10^{-12}$      | $5,8 \cdot 10^{-10}$  | 10                                      |
| $^{214}Pb$ |                        |                       | 26,8 min         | $1,23 \cdot 10^{-12}$      | $28,6 \cdot 10^{-10}$ | 51                                      |
| $^{214}Bi$ |                        |                       | 19,9 min         | $1,23 \cdot 10^{-12}$      | $21,2 \cdot 10^{-10}$ | 38                                      |
| $^{214}Po$ | 7,69                   | $1,23 \cdot 10^{-12}$ | 164 $\mu s$      | $1,23 \cdot 10^{-12}$      | $3,0 \cdot 10^{-16}$  | 0                                       |
| Yhteensä   | 13,69                  | $2,19 \cdot 10^{-12}$ |                  |                            | $55,6 \cdot 10^{-10}$ | 100                                     |

**TAULUKKO 4.6 Radonin lyhytikäisten hajoamistuotteiden alfaenergiat ja niiden vaikutus potentiaaliseen alfaenergiapitoisuuteen**

Atomin potentiaalinen alfaenergia  $\epsilon_p$  on summa, johon lasketaan mukaan kaikkien hajoamisten alfaenergiat kyseisen atomin hajoamisvaiheiden kautta  $^{210}Pb$ :ksi. Alfaenergia aktiivisuussyksikköä (Bq) kohti on siis  $\epsilon_p/\lambda_r = \epsilon_p \cdot T_r / \ln 2$ , missä  $\lambda_r$  on kyseisen nuklidin hajoamisvakio ja  $T_r$  puoliintumisaika.

Hajoamistuotteiden pitoisuutta kuvaavien yksiköiden muunnoskertoimet:

$$1 \text{ J/m}^3 = 6,242 \cdot 10^{12} \text{ MeV/m}^3$$

$$1 \text{ J/m}^3 = 1,80 \cdot 10^8 \text{ Bq/m}^3 \text{ EEC}$$

$$1 \text{ J/m}^3 = 4,8 \cdot 10^4 \text{ WL}$$

$$1 \text{ Bq/m}^3 \text{ EEC} = 5,56 \cdot 10^{-9} \text{ J/m}^3$$

$$1 \text{ WL} = 3 \text{ 700 Bq/m}^3 \text{ EEC}$$

Alfaenergia-altistuksen SI-yksikkö on  $J \text{ h/m}^3$ . Vanha yksikkö on WLM (working level month), joka vastaa kuukauden eli 170 tunnin työskentelyä yhden WL:n alfaenergiapitoisuudessa.

Alfaenergia-altistuksen, WLM:n ja EEC:n muuntosuhteet:

$$1 \text{ WLM} = 3,54 \cdot 10^{-3} \text{ J h/m}^3$$

$$1 \text{ WLM} = 6,37 \cdot 10^5 \text{ Bq h/m}^3 \text{ EEC}$$

$$1 \text{ J h/m}^3 = 0,282 \cdot 10^3 \text{ WLM}$$

Alfaenergia-altistus voidaan arvioida radonpitoisuuden avulla, jos tasapainosuhte oletetaan tunnetuksi. Jos tasapainosuhteen arvo on 0,4 ja kotona vietetty aika on 7 000 tuntia vuodessa ja työpaikalla 2 000 tuntia vuodessa, niin radonpitoisuus  $1 \text{ Bq/m}^3$  vastaa kotona altistusta  $1,56 \cdot 10^{-5} \text{ J h/m}^3$  ( $4,4 \cdot 10^{-3} \text{ WLM}$ ) ja työssä  $4,45 \cdot 10^{-6} \text{ J h/m}^3$  ( $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ WLM}$ ).

## Radonin synty maaperässä

Maankuoressa esiintyy kaikkialla uraania ja toriumia, jotka ovat luonnon hajoamissarjojen lähtöaineita (liitteet 1 ja 2). Maa- ja kallioperässä uraanisarjan  $^{226}\text{Ra}$  on vuosituhansien aikana saavuttanut tasapainon sarjan lähtöaineen  $^{238}\text{U}$  kanssa, jolloin niiden aktiivisuus on yhtä suuri.  $^{226}\text{Ra}$  hajoaa radoniksi emittoimalla alfahiukkasen. Syntynyt radonatomi saa rekylienergiaa 86 keV, joka riittää liikuttamaan sitä 0,02–0,07 mm ja vapauttamaan sen mineraalista. Syntyneet radonatomit voivat jäädä kiinni mineraalirakenteeseen, liueta huokostilassa olevaan veteen tai jäädä vapaaksi kaasuksi huokosilmaan.

Mineraalista maaperän huokostilaan vapautuvan radonin ja radonin kokonais määrän suhdetta kutsutaan emanaatiotekijäksi  $f$ , joka eri maalaajeissa on tavallisesti välillä 0,05–0,40. Emanatiotekijän arvoon vaikuttaa useita tekijöitä:

- Irtaimissa maalajeissa radium voi olla saostunut mineraalirakeiden pintaan. Tällöin radonin vapautuminen on helppoa ja emanaatiotekijä on suuri.
- Rakeiden huokosissa oleva vesi hidastaa rekylin vapauttamaa radonatomia tehokkaasti, jolloin se ei kiinnity uudestaan mineraalitekisiin vaan liukenee veteen. Vedestä radon siirtyy huokosilmaan Henryn lain mukaisesti ja saavuttaa tasapainon nestefaasin ja kaasufaasin välille. Henryn laki voidaan kirjoittaa esimerkiksi muodossa:

$$c_i = K_H p_v \quad (4.1)$$

missä  $c_i$  on kaasun pitoisuus nesteessä ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $K_H$  on Henryn lain vakio (radonille  $10^\circ\text{C}$ :ssa  $33 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^{-3} \text{ Pa}^{-1}$ ) ja  $p_i$  on kaasun osapaine (Pa). Huokosilman radonpitoisuus  $10^\circ\text{C}$ :ssa on noin kolminkertainen verrattuna huokosessa olevan veden radonpitoisuuteen. Emanaatiotekijä kasvaa huokostilan vesimäärän kasvaessa. Emanaatiotekijän maksimi saavutetaan, kun maaperän kosteus on viisi prosenttia.

- Henryn lain vakio  $K_H$  riippuu lämpötilasta: lämpötilan kasvaessa vakion arvo pienenee, jolloin radonpitoisuus huokosten vesitulassa pienenee ja ilmatilassa kasvaa.
- Alfaemissio voi vaurioittaa mineraalin hilarakennetta, jolloin radonatomi pääsee aiempaa helpommin huokostilaan.

Emanaatiotekijän avulla voidaan laskea maaperän radontuotto  $G_m$ , joka kuvaa kuinka paljon maaperässä syntyy radonia aikayksikössä ( $\text{Bq kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ). Radontuotto saadaan yhtälöstä

$$G_m = \lambda_{\text{Rn}} f c_{\text{Ra}}, \quad (4.2)$$

missä  $\lambda_{\text{Rn}}$  on  $^{222}\text{Rn}$ :n hajoamisvakio  $2,10 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  ja  $c_{\text{Ra}}$  on maaperän  $^{226}\text{Ra}$ -pitoisuus ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ). Mikäli maaperän huokoisuus  $\varepsilon$  ja kiintoaineen tiheys  $\rho$  tunnetaan, voidaan radontuotto ilmoittaa huokosilman tilavuusyksikköä kohti

$$G_v = \lambda_{\text{Rn}} f c_{\text{Ra}} \rho (1 - \varepsilon) \varepsilon^{-1}. \quad (4.3)$$

Kiintoaineen tiheys on tavallisesti  $2\,600\text{--}2\,800 \text{ kg m}^{-3}$  ja huokoisuus luokkaa  $0,25\text{--}0,6$ . Maan pinnan läheisyydessä diffuusio pienentää huokosilman radonpitoisuutta. Syvällä maanpinnan läheisyys ei vaikuta ja tällöin huokosilman radonpitoisuudeksi  $c_\infty$  saadaan

$$c_\infty = G_v \lambda_{\text{Rn}}^{-1} = f c_{\text{Ra}} \rho (1 - \varepsilon) \varepsilon^{-1}. \quad (4.4)$$

Suomessa maaperän  $^{226}\text{Ra}$ -pitoisuus on tyypillisesti  $40 \text{ Bq kg}^{-1}$ , huokoisuus  $0,3$  ja emanaatiotekijä  $0,2$ . Näillä arvoilla saadaan keskimääräiseksi huokosilman radonpitoisuudeksi  $50\,000 \text{ Bq m}^{-3}$ .

## Radonin kulkeutuminen maaperässä

Huokosilmaan siirtynyt radonkaasu kulkeutuu maaperässä sekä diffuusion että maaperän ilmavirtausten eli konvektion avulla. Huonosti läpäise-

vissä maalajeissa, kuten savessa ja siltissä, diffuusio on merkittävin kulkeutumismekanismi. Läpäisevillä maalajeilla, kuten soraharjuilla, maaperän ilmavirtaukset voivat olla tärkein kulkeutumistapa.

Diffuusio suuntautuu suuremmasta pitoisuudesta pienempään. Homogeenisen ja isotrooppisen väliaineen tapauksessa diffuusio voidaan laskea Fickin laista

$$J_d = -D_e \nabla c_{Rn}, \quad (4.5)$$

missä  $J_d$  on diffuusio ( $\text{Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) maaperän huokospinta-alaa kohti,  $D_e$  on maaperän efektiivinen diffuusiokvot radonille ( $\text{m}^2 \text{h}^{-1}$ ) ja  $c_{Rn}$  on huokosilman radonpitoisuus ( $\text{Bq m}^{-3}$ ).

Huokosilman radonpitoisuus syvyydellä  $z$  voidaan laskea yhtälöstä

$$c_{Rn} = c_\infty (1 - e^{-z/l}), \quad (4.6)$$

missä  $l$  on diffuusiomatka, joka määritellään  $l = (D_e/\lambda_{Rn})^{1/2}$ . Diffuusiomatka maaperässä on tyypillisesti 1–2 metriä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että diffuusion vaikutus radonpitoisuuteen vähenee syvemmälle mentäessä kunnes noin 2–4 metrin syvyydessä radonpitoisuus saavuttaa maksimiarvonsa.

Ekshalaatio eli paljaasta maasta ulos virtaavan radonin määrä pinta-alayksikköä kohti voidaan laskea kertomalla yhtälö 4.5 maan huokoisuudella  $\varepsilon$ . Yhdistämällä yhtälöt 4.4, 4.5 ja 4.6 saadaan paljaan maan ekshalaatioksi

$$J_{Rn} = \varepsilon \lambda_{Rn} l c_\infty = (D_e \lambda_{Rn})^{1/2} \rho f c_{Ra} (1 - \varepsilon). \quad (4.7)$$

Tyypilliselle suomalaiselle maaperälle  $D_e = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $\rho = 2650 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $f = 0,2$ ,  $c_{Ra} = 30 \text{ Bq kg}^{-1}$  ja  $\varepsilon = 0,5$ , joten ekshalaatioksi saadaan  $0,016 \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

## Radonin kulkeutuminen huokosilmasta sisäilmaan

Diffuusio on tavallisesti merkittävin kulkeutumismekanismi huokosilmasta suoraan ulkoilmaan kulkeutuvalla radonille. Kulkeutuminen (konvektio) ilmavirtausten mukana on taas merkittävin mekanismi, jolla radon siirtyy maaperästä asuintiloihin. Diffuusio maaperästä laa-

dukkaan betonilaatan läpi sisätiloihin ei ole normaalisti merkittävää. Konvektion aiheuttaa kahden eri ilmatilan välinen painegradientti. Konvektiovirtaus ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) lasketaan ideaalitapaukselle Darcyn laista

$$v = -k \mu^{-1} \nabla P, \quad (4.8)$$

missä  $k$  on maaperän läpäisevyys ( $\text{m}^2$ ),  $\mu$  on ilman dynaaminen viskositeetti ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) ja  $\nabla P$  on painegradientti ( $\text{Pa m}^{-1}$ ).

Käytännössä konvektio riippuu maaperän läpäisevyydestä, sisä- ja ulkoilman välisestä paine-erosta sekä lattian rakojen aiheuttamasta virtausvastuksesta. Virtausvastus on merkittävä tekijä, jos lattialaatan ja sokkelin välinen rako on halkaisijaltaan alle 0,5–1 mm. Käytännössä laattaan syntyy valun yhteydessä aina tätä suurempia rakoja. Eri maalajien läpäisevyys vaihtelee huomattavasti – savella se on  $10^{-16} \text{ m}^2$  ja soralla  $10^{-8} \text{ m}^2$ . Tavallisen täyttösoran läpäisevyys on noin  $5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ . Maaperän läpäisevyys onkin määräävin tekijä konvektiossa ja siten myös radonin kulkeutumisessa sisäilmaan.

Luonnollinen paine-ero maaperän huokosilman ja talon sisäilman välille voi muodostua eri tekijöistä:

1. Sisäilman ja ulkoilman välinen lämpötilaero. Eri lämpötiloissa olevilla ilmassa on eri tiheys, jolloin sisällä on kevyempi ilmapatsas ja alhaisempi paine. Paine-eroa lattialaatan ylä- ja alapuolen välillä voidaan arvioida yhtälöllä

$$\Delta P \approx \alpha (T_i^{-1} - T_o^{-1})(z - z_0), \quad (4.9)$$

missä  $\alpha = 3454 \text{ Pa K m}^{-1}$ ,  $T_i$  on talon sisälämpötila,  $T_o$  on ulkolämpötila ja  $z_0$  on korkeus, jossa paine ulkoseinän molemmilla puolilla on sama (niin sanottu neutraalitaso korkeus). Tyypillisessä kaksikerroksisessa pientalossa  $T_i = 293 \text{ K}$ , syksyllä ja keväällä  $T_o = 273 \text{ K}$  ja  $z_0 = 3 \text{ m}$ , jolloin betonilaatan korkeudelle ( $z = 0 \text{ m}$ ) muodostuu paineero suuruudeltaan 2,6 Pa.

2. Tuulen puoleiselle seinälle muodostuu korkeampi paine kuin mitä muualla ulkoilmassa vallitsee. Varsinkin läpäisevässä maalajissa paine jakautuu myös talon alla olevaan maahan aiheuttaen sisäänpäin suuntautuvan painegradientin.

Ilmanvaihto vaikuttaa maaperän huokosilman ja talon sisäilman väliseen paine-eroon. Pakotetusta ilmanvaihdosta johtuva talon alipaineisuus ( $\Delta P$ ) voidaan laskea yhtälöstä

$$\Delta P = \rho/2(Q/ELA)^2, \quad (4.10)$$

missä  $\rho$  on sisäilman tiheys ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $Q$  on paine-eron aiheuttama ilmavirtaus ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) ja  $ELA$  talon efektiivinen vuotopinta-ala ( $\text{m}^2$ ).

Painovoimaisen ilmanvaihdon taloissa paine-ero muodostuu pääasiassa sisä- ja ulkoilman välisestä lämpötilaerosta. Koneellisen ilmanvaihdon asunnoissa paine-eroon vaikuttaa lämpötilaeron lisäksi tulo- ja poistoilmavirtojen säädöt ja rakenteiden tiiviys. Koneellisen poistoilmavaihdon pientaloissa alipaineisuus on tyypillisesti 4–10 Pa, koneellisen tulo- ja poistoilmavaihdon taloissa vain 2–5 Pa.

## Rakennusmateriaalien radontuotto

Kiviainesta sisältävissä rakennusmateriaaleissa on pieniä määriä radonia tuottavaa radiumia. Rakennusmateriaalin radontuotto pinta-alayksikköä kohti  $E_d$  diffuusion kautta voidaan arvioida yhtälöllä

$$E_d = c_{\text{Ra}} \lambda_{\text{Rn}} \rho f(d/2), \quad (4.11)$$

missä  $c_{\text{Ra}}$  on materiaalin  $^{226}\text{Ra}$ -pitoisuus ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ),  $\rho$  on materiaalin tiheys ( $\text{kg m}^{-3}$ ) ja  $d$  materiaalin paksuus (m). Yhtälöä voidaan soveltaa materiaaleille, joissa radonin diffuusiomatka on huomattavasti pidempi kuin materiaalin paksuus ja materiaali tuottaa radonia kummallekin puolelle yhtä paljon.

Rakennusmateriaaleista diffundoituvan radonin määrä on helpointa mitata sulkemalla tutkittava materiaali ilmatiiviiseen astiaan, josta radonipitoisuus mitataan tietyn ajan kuluttua. Voidaan myös tehdä suoria mittauksia seinistä ja lattialaatoista.

| Materiaali                           | Radonin ekshalaatio ( $\text{Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) |
|--------------------------------------|--|
| Betoni                               | 7,5 – 32   |
| Sivutuotteesta valmistettu kipsilevy | 5 – 42   |
| Alunaliuskebetoni                    | 50 – 205   |
| Kevytbetoni                          | 1 – 3  |
| Tiili                                | 0,4  |

**TAULUKKO 4.7** Radonin ekshalaatio rakennusmateriaaleista



## Radonin siirtyminen talousvedestä huoneilmaan

Vettä käytettäessä radon pyrkii saavuttamaan tasapainon veden ja huoneilman välille yhtälön 4.1 mukaisesti. Radonin siirtyminen on erityisen voimakasta, jos talousvesi on kuumaa tai se on tehokkaasti kontaktissa huoneilman kanssa eli veden ja ilman välille muodostuu suuri pinta-ala. Näitä tilanteita ovat esimerkiksi pyykinpesukoneen, astianpesukoneen ja suihkun käyttö.

Radonin siirtymistä vedestä huoneilmaan voidaan arvioida yksinkertaistetulla mallilla, jossa talo ajatellaan yhdeksi tilavuusyksiköksi, johon vapautuva radon leviää tasaisesti. Silloin

$$\Delta c_{\text{ilma}} = \frac{c_v \cdot Q_v \cdot \varepsilon}{V \cdot (N + \lambda_{\text{Rn}})}, \quad (4.12)$$

missä  $\Delta c_{\text{ilma}}$  on veden käytöstä aiheutuva huoneilman radonpitoisuus ( $\text{Bq m}^{-3}$ ),  $c_v$  on veden radonpitoisuus ( $\text{Bq l}^{-1}$ ),  $Q_v$  on veden kokonaiskulutus ( $\text{l h}^{-1}$ ),  $\varepsilon$  on veden käyttömuodoilla painotettu radonin siirtymistehokkuus huoneilmaan,  $V$  on asuintilojen tilavuus ( $\text{m}^3$ ) ja  $N$  on sisäilman vaihtuvuus ( $\text{h}^{-1}$ ). Keskimääräisellä kulutustottumuksella noin 60 prosenttia käytetyn veden radonista vapautuu, joten  $\varepsilon = 0,6$ . Mallia soveltaen nelihenkisen perheen asunnossa (tilavuus  $250 \text{ m}^3$ , ilman vaihtuvuus  $0,4 \text{ h}^{-1}$ , vedenkulutus  $500 \text{ l d}^{-1}$ ) huoneilman radonpitoisuus kasvaa  $370 \text{ Bq m}^{-3}$ , kun talousvedessä on  $3\,000 \text{ Bq l}^{-1}$  radonia.

Siirtokerroin  $s$  määrittellään huoneilman radonpitoisuuden lisäyksen ja talousveden radonpitoisuuden suhteena. Koska  $N \gg \lambda$ , saadaan siirtokertoimeksi

$$s = \frac{\Delta c_{\text{ilma}}}{c_v} = \frac{Q_v \cdot \varepsilon}{V \cdot N}. \quad (4.13)$$

Edellisen esimerkin nelihenkisen perheen kotona siirtokerroin olisi tällöin  $1,25 \cdot 10^{-4}$ . Eri tutkimuksissa siirtokertoimen kokeelliset arvot ovat vaihdelleet välillä  $0,42 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-4}$ . Eri maissa yleisesti sovellettu keskimääräinen arvio on  $1,0 \cdot 10^{-4}$ . Radonin siirtymiseen vedestä ilmaan vaikuttavat muun muassa ilmanvaihdon aiheuttamien ilmavirtausten suunnat, talon vesipisteiden sijainti, poistokanavien sijoittelu ja mahdollinen tuulettaminen.

## Sisäilman radonpitoisuuden laskeminen

Sisäilman radonpitoisuus  $c$  ( $\text{Bq m}^{-3}$ ), koostuu useiden eri lähteiden tuottamasta radonista

$$c = \frac{S_s + S_d + S_v}{(\lambda_{\text{Rn}} + N) \cdot V} + c_0, \quad (4.14)$$

missä  $S_s$  on huokosilman konvektion mukana maaperästä sisätiloihin tuleva radon ( $\text{Bq h}^{-1}$ ),  $S_d$  radonin diffuusio rakennusmateriaaleista ( $\text{Bq h}^{-1}$ ),  $S_v$  radonin vapautuminen vedestä ( $\text{Bq h}^{-1}$ ) ja  $c_0$  ulkoilman radonpitoisuus ( $\text{Bq m}^{-3}$ ).

### ESIMERKKI 4.1

- a) Kerrostalon seinistä, lattiasta ja katosta erittyä radonia  $30 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Laske radonpitoisuus kerrostaloasunnossa, kun asunnon pinta-ala on  $100 \text{ m}^2$ , tilavuus  $260 \text{ m}^3$ , seinien kokonaispinta-ala  $300 \text{ m}^2$  ja ilmanvaihtuvuus  $0,5 \text{ h}^{-1}$ .

$$S = 30 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1} \cdot 300 \text{ m}^2 = 9\,000 \text{ Bq h}^{-1}$$

$$N = 0,5 \text{ h}^{-1}$$

$$V = 260 \text{ m}^3$$

Sijoittamalla nämä yhtälöön  $c = S/(N \cdot V)$  saadaan  $c = 69 \text{ Bq m}^{-3}$ .

- b) Laske pientalon radonpitoisuus, kun maaperästä virtaa radonpitoista ilmaa  $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  ja ilman radonpitoisuus on  $50\,000 \text{ Bq m}^{-3}$ . Asunnon tilavuus on  $260 \text{ m}^3$  ja ilmanvaihtuvuus  $0,5 \text{ h}^{-1}$ .

$$S = 50\,000 \text{ Bq m}^{-3} \cdot 1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 50\,000 \text{ Bq h}^{-1}$$

$$N = 0,5 \text{ h}^{-1}$$

$$V = 260 \text{ m}^3$$

Sijoittamalla nämä yhtälöön  $c = S/(N \cdot V)$  saadaan  $c = 385 \text{ Bq m}^{-3}$ .

## KIRJALLISUUTTA

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

Auvinen A, Mäkeläinen I, Hakama M, Castrén O, Pukkala E, Reisbacka, H, Rytömaa, T. Indoor Radon Exposure and Risk of Lung Cancer: a Nested Case-Control Study in Finland. *Journal of National Cancer Institute* 1996; 88:966–972. (See also: ERRATUM: *Journal of National Cancer Institute* 1998; 90:400–401).

Hopke P K (ed.). Radon and Its Decay Products, Occurrence, Properties and Health Effects. American Chemical Society, Washington DC, 1987.

International Commission on Radiological Protection. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Oxford: Pergamon Press, 1994.

International Commission on Radiological Protection. Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters. ICRP Publication 50. Oxford: Pergamon Press, 1987.

Mustonen R. Building materials as sources of indoor exposure to ionizing radiation. STUK-A105. Helsinki, 1992.

Naturally Occurring Radioactivity in the Nordic Countries – Recommendations. The Radiation Protection Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden, 2000.

Nazaroff W W, Nero A V Jr. (eds.). Radon and its decay products in indoor air. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1988.

National Research Council. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. Health Effects of Exposure to Radon. BEIR VI. Washington DC: National Academy Press, 1999.

Porstendörfer J. Properties and behaviour radon and thoron and their decay products in the air. *Journal of Aerosol Science* 1994; 25: 219–263.

Rakennustieto Oy. RT-ohjekortti RT 81-10791. Radonin torjunta, 2002.

Säteilyturvakeskus. ST-Ohje 12.1. Säteilyturvallisuus luonnonsäteilylle altistavassa toiminnassa, 2000.

Säteilyturvakeskus. ST-Ohje 12.2. Rakennusmateriaalien, polttoturpeen ja turvetuhkan radioaktiivisuus, 1993.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2000 Report. New York: United Nations, 2000.

Voutilainen A, Mäkeläinen I, Pennanen M, Reisbacka H ja Castrén O. Suomen radonkartasto – Radon Atlas of Finland. STUK-A148. Helsinki, 1997.

Voutilainen A, Mäkeläinen I, Reisbacka H ja Castrén O. Asuntojen radonpitoisuus Suomessa. STUK-A146. Helsinki, 1997.

Ympäristöministeriö. Pien- ja rivitalojen radontekninen korjaus. Imupistemenetelmä. Ympäristöopas 4, Oy Edita Ab, Helsinki, 1996.