

Kati Ylitalo

Maaperän radonpitoisuuden huomioiminen uudisrakennuksen
pohjarakennuslausunnossa

Rakentaminen ja talotekniikka ylempi AMK koulutusohjelma
2020

MAAPERÄN RADONPITOISUUDEN HUOMIOIMINEN UUDISRAKENNUKSEN POHJARAKENNUSLAUSUNNOSSA

Ylitalo, Kati
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Rakentaminen ja talotekniikka ylempi AMK koulutusohjelma
Tammikuu 2020
Sivumäärä:80
Liitteitä: -

Asiasanat: radon, terveysvaikutukset, määräykset ja ohjeet, kenttämittaus, radonin torjunta

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää maaperän radonpitoisuuden huomioiminen uudisrakennuksen pohjarakennuslausunnossa. Radon rakennuksen sisäilmassa aiheuttaa pitkäaikaisesti altistettuna keuhkosityövän riskin, jonka vuoksi se tulisi ottaa huomioon mahdollisimman aikaisessa vaiheessa rakennusprosessia. Lisäksi erilaiset normit ja säädökset velvoittavat radonin huomioonottamisen suunnittelussa ja rakentamisessa. Työn tarkoituksena oli myös mahdollinen yritystoiminnan kehittäminen maaperän radonmittausten suorittamiseen.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin radonin aiheuttamia terveysvaikutuksia sekä radoniin liittyvää lainsäädäntöä, ohjeita ja normeja. Lisäksi tarkasteltiin olemassa olevia sisäilman radonpitoisuuksien mittaustuloksia Porin ja Satakunnan alueelta. Tutkimuksen lähtöaineistona käytettiin Säteilyturvakeskuksen pientalojen sisäilmasta mitattujen radonpitoisuuksien tutkimustuloksia sekä arvioitiin mahdollisia korkeiden radonpitoisuuksien alueita Geologian tutkimuskeskuksen kartta-aineiston avulla. Työssä tutkittiin myös erilaisia olemassa olevia maaperän radonpitoisuuden mittausten menetelmiä, joista valittiin yritystoimintaamme parhaiten soveltuva mittauslaitteisto ja -menetelmä. Mittausmenetelmästä laadittiin maaperän radonmittauksen kenttätutkimusohjeet ISO 11665-11 standardia noudattaen. Lopuksi tarkasteltiin olemassa olevia ratkaisuja radonin torjumiseksi uudisrakentamisessa.

Säteilyturvakeskuksen suorittamien sisäilman radonpitoisuuden mittaustuloksia Porin ja Satakunnan alueella on vielä vähän ja harvakseltaan, joten niiden perusteella ei voida täysin selvittää yksittäisen rakennuspaikan radonpitoisuutta. Radonia esiintyy kuitenkin maaperässä joka paikassa aina jossain määrin. Ainoa tapa siis selvittää rakennuspaikan radonpitoisuus on mitata se maaperästä ennen rakentamista. Mikäli radonpitoisuutta ei mitata suoraan maaperästä, hyvä ratkaisu uudisrakennuksien sisäilman radonpitoisuuden torjumiseksi saattaisi olla, että rakennuspaikasta riippumatta kaikkiin uudisrakennuksiin, jotka tulevat olemaan asuin- tai työkäytössä, tehtäisiin huolelliset perustusten tiivistykset sekä rakennuspohjaan asennettaisiin vapaasti tuulettuva radonputkisto, etenkin maanvaraisella laatalla perustettaviin rakennuksiin. Uudisrakennuksen pohjarakennuslausunnon laatimisvaiheessa ei aina ole tiedossa rakennettavan rakennuksen perustustyyppiä, jolloin perustustyyppin perusteella on vaikea määrittellä tietynlaisen radonsuojauksen tarpeellisuus. Esimerkiksi tuulettuvalla alapohjalla, tai reunavahvistetulla laatalla varustetun rakennuksen radonsuojauksessa jo pelkästään rakenteiden huolellinen tiivistäminen koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon kanssa saattaisi olla jo riittävä suojaus radonriskien torjumiseen.

OBSERVING THE RADON CONCENTRATION OF SOIL IN A STATEMENT OF THE FOUNDATION ENGINEERING OF A NEW BUILDING

Ylitalo, Kati

Satakunta University of Applied Sciences

Master's Degree Programme in Construction and Building Service Technology

January 2020

Number of pages:80

Appendices:-

Keywords: radon, health effects, regulations and instructions, field measurement, radon control

The aim of the thesis was to resolve how the radon concentration of soil is observed in the statement of foundation engineering of a new building. Long-term exposure to radon in the building's indoor air causes the risk of lung cancer and therefore radon should be observed as early as possible in the construction process. In addition, different norms and rules require that radon is observed in design and construction of a building. The second purpose of the thesis was to develop a possible business within the sector of soil radon measurement.

In this study, the health effects caused by radon were investigated, as well as radon-related laws, norms and rules. In addition, existing measurement results of indoor radon concentrations in the Pori and Satakunta area were reviewed. Research data from STUK (Radiation and Nuclear Safety Authority) were used to evaluate on indoor radon concentrations in small houses and soil maps from GTK (Geological Survey of Finland) were used to estimate potential areas of high radon concentration. In the thesis, different existing methods for measuring the radon concentrations of soil were investigated and the most suitable measurement method and equipment for business purposes were chosen. From this method field study guidelines for soil radon measurement according to ISO 11665-11 standard were prepared. At the end of the thesis existing solutions for radon control of a new building were reviewed.

There is still limited number of measurement results of indoor radon concentrations available by STUK in Pori and Satakunta area. These results don't completely determine the radon concentration of an individual building site. Radon is always present everywhere in the soil to some extent. The only way to determine a building site's radon concentration is to measure it from the soil before construction. Unless the radon concentration cannot be measured directly from the soil, a good solution to combat indoor radon levels in residential buildings (either residence or workplace) could be: regardless of the location of the building site, the foundations of all new buildings will be carefully sealed and freely ventilated radon pipelines will be installed into the foundation, especially to those buildings with ground slab. The foundation type of the building to be constructed is not always known at the time of preparing the statement of the foundation engineering for the new building. It's therefore difficult to determine the need for a certain type of radon protection. For example, in a building with a ventilated base or an edge-reinforced slab, even careful sealing of the structures with mechanical supply and exhaust ventilation, might already be sufficient protection against radon risks.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
1.1	Työn tausta ja tavoitteet.....	6
1.2	Keskeiset käsitteet.....	8
2	TUTKIMUSMENETELMÄT	10
3	RADONIN AIHEUTTAMAT TERVEYSVAIKUTUKSET.....	12
4	RADONIN ESIINTYMINEN SEKÄ NORMIT JA SÄÄDÖKSET	14
4.1	Radon maaperässä.....	14
4.2	Radon sisäilmassa	15
4.3	Lainsäädäntö, määräykset ja ohjeet.....	18
5	RADONTUTKIMUKSET SATAKUNNASSA.....	23
5.1	Säteilyturvakeskuksen olemassa olevat tutkimustulokset	23
5.2	Mahdolliset korkeiden radonpitoisuuksien alueet Porissa ja Satakunnassa .	26
5.3	Radonmittaustarpeen kehitysnäkymät Satakunnassa.....	38
6	RADONPITOISUUDEN MITTAUS MAAPERÄSTÄ.....	39
6.1	Mittausmenetelmiä	39
6.2	ISO 11665-11:2016- standardi.....	40
6.3	Käytettävä mittauslaitteisto	41
6.4	Maaperän ilmanläpäisevyys ja sen mittaaminen.....	44
6.4.1	Ilmanläpäisevyys eri rakennusmateriaaleilla.....	46
6.5	Virhelähteet.....	47
6.5.1	Ajallinen ja spatiaalinen (3D) vaihtelu.....	48
6.5.2	Näytteenottomenetelmän vaikutus.....	50
7	RADONPITOISUUDEN MITTAUS RAKENNUSPOHJAN TÄYTTÖMATERIAALEISTA.....	51
7.1	Käytettävä mittauslaitteisto	52
7.2	Täyttömateriaalien radonpitoisuuden valvonta.....	54
8	MENETELMÄOHJEET MAAPERÄN RADONMITTAUKSEEN.....	56
8.1	Mittauskalusto, investointikustannukset ja käyttöönotto	56
8.2	Mittaustyön suunnittelu	57
8.3	Maastotyö	57
8.3.1	Alkuvalmistelut ja muut työvaiheet	59
8.3.2	Tutkimuksen suoritus	60
8.3.3	Tutkimuksen päättäminen	63
8.4	Laboratorioanalyysit ja tulokset.....	64
8.4.1	Mittaustulosten raportointi	64

9 RADONIN TORJUNTA UUDISRAKENNUKSESSA	66
9.1 Perusratkaisut	66
9.1.1 Maanvarainen betonilaatta.....	67
9.1.2 Ryömintätilainen alapohja.....	68
9.2 Perustusten tiivistäminen.....	68
9.3 Rakennuksen ilmanvaihto.....	69
9.4 Rakennuspohjan tuuletusjärjestelmä	71
9.5 Säteilyturvakeskuksen otantatutkimukset 2009 ja 2016	72
10 POHDINTA	74
LÄHTEET	77
LIITTEET	

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Opinnäytetyön tilaajana oli Ramboll Finland Oy, Porin toimiston infra-yksikkö. Ramboll Finland Oy on kansainvälinen suunnittelu- ja konsultointialan yritys, jonka palveluja ovat innovatiiviset ratkaisut kaupunkien, infrastruktuurin, liikenteen, ympäristön ja rakennusten suunnittelussa, rakennuttamisessa, rakentamisessa ja ylläpidossa (Ramboll Finland Oy www-sivut 2019).

Ramboll Finland Oy:n Porin toimiston infra-yksikön toimialoja ovat mm. geotekniikka, joka käsittää infran ja talonrakennuksen, sekä vesi-, alue- ja ympäristörakenteiden geoteknistä suunnittelua. Suunnittelun lisäksi geotekniikkaan kuuluvat mm. rakennuspaikan maaperän pohjatutkimukset, jotka käsittävät mm. maaperän kairauksia ja maanäytteiden ottoa monitoimikairakoneella. Lisäksi Porin toimistossa on maalaboratorio, jossa käsitellään mm. maaperästä otettuja maanäytteitä. Maaperän pohjatutkimusten tuloksista laaditaan useimmiten myös pohjarakennuslausunto, jossa kuvataan mm. maaperän pohjasuhteet, rakennuksen perustamistapa ja rakennuspaikan terveellisyys. Porin infra-yksikön muita toimialoja ovat mittaus- ja kartoitustekniikka, tie- ja katualueiden suunnittelu sekä ympäristötekniikka.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, miten maaperän radonpitoisuus tulisi huomioida uudisrakennuksen pohjarakennuslausunnossa, ennen kuin uudisrakennusta on vielä rakennettu.

Radon rakennuksen sisäilmassa aiheuttaa pitkäaikaisesti altistuttuna keuhkosityövän riskin ja uudisrakennuksen mahdolliset radonriskit tulisi sen vuoksi huomioida mahdollisimman aikaisessa vaiheessa rakennusprosessia.

Työn lähtökohtia radonin aiheuttamien terveysvaikutusten lisäksi olivat mm. erilaiset geotekniseen suunnitteluun ja pohjarakentamiseen annetut ohjeistukset radonin huomioonottamisesta suunnittelussa. Esimerkiksi ympäristöministeriön asetuksessa pohjarakentamisesta §4, Geotekninen suunnittelu mukaan rakennuspaikan radonriskit on otettava huomioon suunnittelussa ja rakentamisessa (Ympäristöministeriön asetus pohjarakentamisesta §4.2014).

Lisäksi Geoteknisen suunnittelun tehtäväluettelossa GEO12, tilaaja voi yleissuunnitteluvaiheessa vaatia pohjarakennuslausuntoon selvitettäväksi rakennushankkeen radonin torjuntatarpeen (radonselvitys) sekä esitettäväksi alustavat ratkaisut radonin torjumiseksi (RT-10-11127. 2013).

Edellä mainittuja ohjeita tulkitessa geoteknisten suunnittelijoiden/ pohjarakennuslausuntojen laatijoiden tulisi siis kirjata rakennuspaikan radonriskin/-pitoisuuden huomioiminen uudisrakennuksen pohjarakennuslausuntoon jo rakennuspaikan pohjaolosuhteita tutkittaessa eli maaperän pohjatutkimuksen suoritusvaiheessa.

Vastataksaan em. asetuksiin sekä tilaajan mahdollisiin vaatimuksiin, tulisi geoteknisellä suunnittelijalla olla tiedossa rakennuspaikan maaperän radonpitoisuus, jolloin uudisrakennuksen pohjarakennuslausuntoon voisi kirjata mahdollisen radonin torjuntatarpeen, sekä mahdollisesti esittää alustavat ratkaisut radonin torjumiseksi. Tähän asiaan ei tällä hetkellä esimerkiksi Porin ja lähialueiden osalta löydy selkeää vastausta esim. Säteilyturvakeskuksen suorittamien rakennusten sisäilman radonpitoisuuden mitatuista tuloksistakaan. Ainoa tapa selvittää rakennuspaikan radonpitoisuus on mitata se suoraan maaperästä esimerkiksi pohjatutkimusten yhteydessä.

Rakennuspaikalla, suoraan maaperästä tehtäviä radonmittausmenetelmiä on tällä hetkellä hyvin vähän käytössä Suomessa, joten tässä opinnäytetyössäni selvitin yritystoimintaamme parhaiten soveltuvan maaperän radonmittauksen mittausmenetelmän sekä laadin mittausmenetelmän kenttätutkimusohjeet ja tein lisäksi joitain huomioita mitaustyön suunnittelua varten.

Edellä mainittujen lisäksi selvitin olemassa olevia ratkaisuja radonriskien torjumiseksi uudisrakentamisessa.

1.2 Keskeiset käsitteet

Aktiivinen näytteenotto	Lyhyellä aikavälillä tehtävä näytteenottomenetelmä, jossa näyte kerätään pumpun avulla adsorbenttiin ja jossa näytteen ilmatilavuus ja keräysaika on määritelty
Becquerel (Bq)	Säteilyn aktiivisuuden yksikkö SI-järjestelmässä. 1 Bq tarkoittaa yhden atomiytimen virityksen purkautumista sekunnin aikana. Becquerelien määrä ilmaisee säteilyn voimakkuuden
Diffuusio	Aineen molekyylit siirtyvät suuremmasta pitoisuudesta pienempään pitoisuuteen
Ilmanläpäisevyys (m ²)	Maaperän läpäisevyyden SI-yksikkö m ² . 1 darcy (d) $\approx 10^{-12}$ m ²
Konvektio	Aineen siirtyminen ilmavirtausten mukana lämpötilaeroista johtuen
Pascal (Pa)	Paineen yksikkö
Passiivinen näytteenotto	Pitkäkestoinen, jopa viikkoja kestävä näytteenottomenetelmä, jossa näyte diffundoituu adsorbenttiin
Pumppu tai ruisku	Pumppu, jolla maaperän huokosilma imetään näytteenottoastiaan
Radon (Rn)	Radioaktiivinen hajuton, väritön ja mauton jalokaasu, joka aiheuttaa keuhkosityöpää
Radonmonitori	Radonmittauksessa tarvittava mittalaite, joka kerää mittausdatan
Rakennuspohjan tuuletusjärjestelmä	Radonin poistoputkisto, joka asennetaan rakennuspohjan salaojituskerrokseen
Säteilyannos Sievert (Sv)	Säteilyn ekvivalenttiannoksen yksikkö Sievert (Sv), joka kuvaa ihmisen saamaa säteilyannoksen haittavaikutuksen riskiä
Maaperän huokoisuus	Ilmoittaa kuinka tiheään maaperä on tiivistynyt

Maaperän huokosilma	Maa-aineksen rakeiden välissä oleva ilmatila
Maaperän ilmanläpäisevyys	Maaperän rakeisuudesta ja laadusta riippuva ominaisuus
Maaperän vesipitoisuus	Maaperässä oleva veden kylläisyys, ilmoitetaan prosentteina
Näytteenottoastia	Astia, johon maaperän huokosilma kerätään
Näytteenottoputki/-anturi	Putki, joka asennetaan näytteenotossa maaperään huokosilman keräystä varten

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tämän opinnäytetyön tutkimusmenetelmänä on laadullinen tutkimusmenetelmä. Laadullinen eli kvalitatiivinen tutkimus sisältää lukuisia suuntauksia, tiedonhankinta- ja analyysimenetelmiä sekä tapoja aineiston tulkitsemiseen. Laadullinen tutkimus rakentuu aiemmista, tutkittavasta aiheesta tehdyistä tutkimuksista sekä muotoilluista teorioista, empiirisistä aineistoista sekä tutkijan omasta ajattelusta ja päättelystä (Menetelmäopetuksen tietovaranto verkkosivut 2019).

Tässä opinnäytetyössä tiedonhankinnan menetelmänä käytettiin mm. case- eli tapaus-tutkimusta. Tapaus-tutkimus kohdistuu useimmiten ajankohtaisiin asioihin, jota myös radon sisäilmassa ja sen aiheuttamat terveysvaikutuksetkin tällä hetkellä edustavat. Case-tutkimus kohdistuu enemmän selitykseen kuin tulkintaan, joka voidaan toteuttaa arkistomateriaalin pohjalta tai esimerkiksi täydentää henkilötasolta saatavalla tiedolla.

Tapaus-tutkimuksessa tutkitaan yksittäistä tapahtumaa, rajattua kokonaisuutta käyttämällä monipuolisia ja eri menetelmillä hankittuja tietoja. Tapaus-tutkimuksen teko ei myöskään rajoita menetelmävalintoja. Käytössä voivat olla yhtä hyvin kvalitatiiviset kuin kvantitatiivisetkin menetelmät. Tapaus-tutkimuksen käyttö liittyy monesti myös johonkin yritykseen tai organisaatioon. Tapaus-tutkimuksiksi voidaan luokitella myös monet projektit ja kehittämis- tai arviointitutkimukset. Kaikkien laadullisten tutkimusten voidaan tavallaan ajatella olevan tapaus-tutkimuksia (Menetelmäopetuksen tietovaranto verkkosivut 2019).

Opinnäytetyössä arkistomateriaalina käytettiin mm. Säteilyturvakeskuksen (STUK) tutkimusaineistoa radonpitoisuuksista sekä aiheeseen liittyvää kirjallisuutta. Säteilyturvakeskuksen radoniin liittyvää aineistoa oli saatavilla myös verkkosivuilta runsaasti ja aineisto siellä saattoi päivittyä melko nopeasti, jolloin uutta tietoa radonista tuli opinnäytetyön laatimisenkin aikana lisää.

Lisäksi opinnäytetyössä selvitettiin sisäilman radoniin liittyviä eri tahojen säädöksiä ja lakeja sekä sisäilman radonin aiheuttamia terveysvaikutuksia. Näiden lisäksi selvitettiin erilaisia olemassa olevia maaperän radonpitoisuuden mittaamenetelmiä

yritystoiminnan mahdollista kehittämistä varten. Tietoa erilaisista mittausmenetelmistä löytyi lähinnä ulkomailla tehdyistä tutkimusaineistoista sekä lehtiartikkeleista, joista valittiin oman yritystoiminnan kannalta sopivin mittausmenetelmä.

Opinnäytetyöhön tarvittavien lisätietojen saamiseksi olin yhteydessä puhelimitse tai sähköpostilla mm. Säteilyturvakeskuksen, Geologian tutkimuskeskuksen sekä radonmittauksia tekevän yrityksen henkilöstöön. Viimeksi mainitusta yrityksestä tietojen saaminen oli haastavaa, koska yrityksen henkilöstön edustaja ei puhelinkeskustelussa halunnut kertoa kaikkia tarvitsemiani tietoja pelätyn kilpailuaseman heikentymisen vuoksi.

Opinnäytetyöni tiedonhankinnan menetelmänä olen soveltanut osittain myös benchmarking- menetelmää. Benchmarking eli vertailuanalyysi tai vertaiskehittäminen on arviointia, jossa organisaatiot vertaavat toimintojaan toisen organisaation kanssa. Menetelmässä opitaan hyviltä esikuvilta niiden parhaista käytännöistä ja jonka tavoitteena on saavuttaa parannuksia omassa yritystoiminnassaan. Vertailua voidaan toteuttaa esimerkiksi etsimällä tietoa parhaista käytännöistä erilaisista julkaisuista tai artikkeleista, kirjoista sekä internetsivuilta (Itä-Suomen yliopisto www-sivut 2019).

Tässä opinnäytetyössä benchmarking-menetelmän käyttäminen oli kuitenkin hieman haastavaa, koska maaperän radonmittauspalveluja tarjoavia yrityksiä on vielä kovin vähän Suomessa. Pelätyn kilpailuaseman heikentymisen vuoksi tarkempien tietojen saaminen näistä yrityksistä oli hankalaa. Maaperän radonmittauksia on tehty jo vuosia ulkomailla ja niiden mittausmenetelmistä löytyikin tietoa internetissä olevista kansainvälisistä tutkimuksista sekä -lehtiartikkeleista.

3 RADONIN AIHEUTTAMAT TERVEYSVAIKUTUKSET

Radon on sisäilmassa esiintyvä hajuton, mauton ja väritön radioaktiivinen kaasu, jonka on todettu lisäävän riskiä sairastua keuhkosityöpään. Suomessa todetaan vuosittain 2000 keuhkosityöpää, joista radonin on arvioitu aiheuttavan noin 300 hengen kuolemaan johtavaa tapausta. Tupakoitsijoilla radonista aiheutuva riski sairastua keuhkosityöpään on vielä suurempi kuin tupakoimattomalla. Matalassa radonpitoisuudessa asuvalla, jatkuvasti tupakoivalla henkilöllä on noin 10 prosentin todennäköisyys sairastua keuhkosityöpään, kun taas tupakoimattomalla sairastumisen riski on vain noin 0,5 prosenttia (Säteilyturvakeskus www-sivut 2019).

Radon on suurin keuhkosityövän aiheuttaja tupakoinnin jälkeen. Ei tiedetä olevan olemassa kynnysarvoa, jonka alapuolella radon ei aiheuttaisi keuhkosityövän riskiä. Jopa alhaiset radonpitoisuudet voivat aiheuttaa keuhkosityöpäriskin pienehköä kasvua. Epidemiologiset tutkimukset vahvistavat, että sisäilmassa oleva radon lisää keuhkosityövän riskiä väestössä. Radonin ei ole todettu aiheuttavan muita terveysvaikutuksia (WHO Handbook 2009, 3).

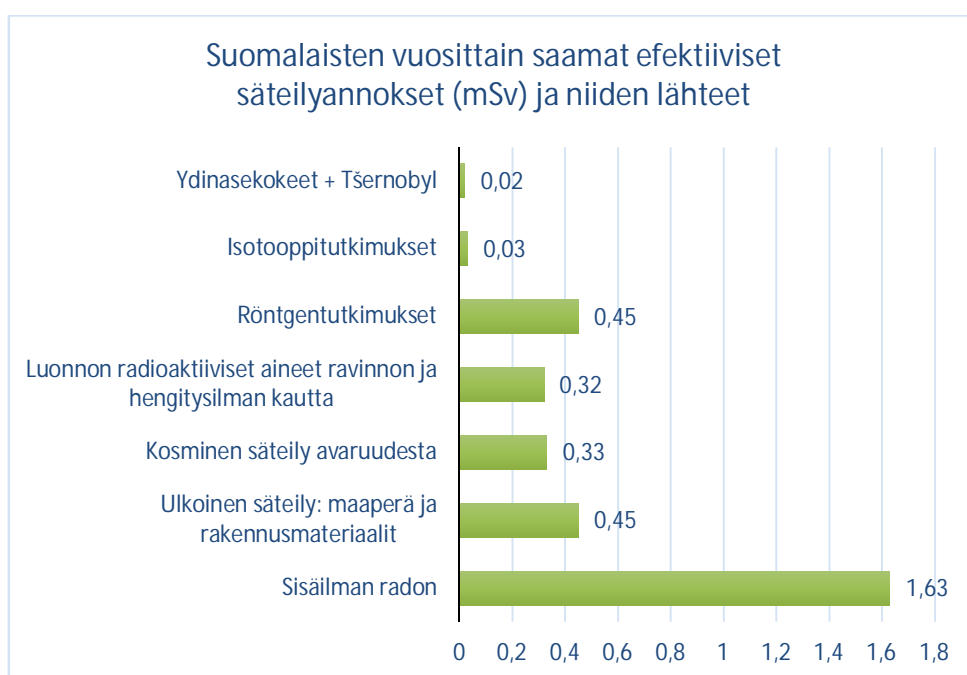
Suurin osa radonin aiheuttamista keuhkosityövistä johtuu sisäilman alhaisista ja kohtalaisista radonpitoisuuksista, eikä niinkään korkeista radonpitoisuuksista, koska yleensä vähemmistö ihmisistä altistuu suurille radonpitoisuuksille. Radoniin liittyvien keuhkosityöpien osuus kaikista keuhkosityövistä on arvioitu olevan 3-14 %, riippuen maan keskimääräisestä radonpitoisuudesta sekä käytetyistä laskentamenetelmistä (WHO Handbook 2009, 3).

Radon on tällä hetkellä tarkasteltuna suurin lähde ihmisen altistumalle luonnonsäteilylle. Maaperästä kulkeutuva radonkaasu on suurin säteilyn aiheuttaja rakennusten sisäilmassa, josta se kulkeutuu hengitettynä ihmisen keuhkoihin ja vaikuttaa sitä kautta ihmisen terveyteen (Säteilyturvakeskus www-sivut 2019).

Ihmisen saaman säteilyannoksen määrä ilmoitetaan yksiköllä sievert. Sievert (Sv) kuvaa säteilyn haittavaikutuksen riskiä. Annosnopeus ilmaisee kuinka suuren säteilyannoksen ihminen saa tietyssä ajassa. Annosnopeuden ilmaisuun käytetään yksikköä

mikrosievertiä tunnissa ($\mu\text{Sv/h}$). Normaalioloissa ulkoisen säteilyn, esimerkiksi maaperästä tulevan säteilyn annosnopeus on noin $0,1 - 0,2 \mu\text{Sv}$ tunnissa. Tällöin kymmenessä tunnissa säteilyannos onkin jo 1-2 mikrosievertiä (Salminen 2018).

Kuvassa 1 on esitetty eri lähteitä suomalaisten vuosittain saamista efektiivisistä säteilyannoksista. Suomalaisten keskimääräinen säteilyannos on noin 3,2 millisievertiä vuodessa (Säteilyturvakeskus www-sivut 2019). Kaaviokuvasta voidaan todeta, että sisäilman radonilla on merkittävä osuus koko suomalaisten keskimääräisestä säteilyannoksesta.



Kuva 1. Suomalaisten vuosittain saamien säteilyannosten määrät ja niiden lähteet (Säteilyturvakeskuksen www-sivut 2019)

Radioaktiivisen aineen aktiivisuus ilmoitetaan yksiköllä becquerel (Bq). Yksi becquerel tarkoittaa yhden atomiytimen virityksen purkautumista sekunnin aikana. Becquerelien määrä ilmaisee säteilyn voimakkuuden. Esimerkiksi radonsäteily ilmoitetaan becquereleinä kuutiometriä (tilavuutta) kohti (Säteilyturvakeskuksen www-sivut 2019).

Eurooppalaisen yhteistutkimuksen mukaan 30 vuoden asuminen asunnossa, jonka sisäilmassa on noin 700 Bq/m^3 radonpitoisuus, kaksinkertaistaa riskin sairastua keuhkosyöpään 75 ikävuoteen mennessä (Darby 2004).

Sosiaali- ja terveysministeriön asetusten mukaan uuden rakennuksen suunnittelussa ja toteutuksessa sisäilman radonin viitearvo on 200 Bq/m^3 . Asunnon sekä muun oleskelutilan sisäilman radonin viitearvo on 300 Bq/m^3 (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä 1044/2018, 20§ ja 21§). Maailman terveysjärjestö WHO on suositellut sisäilman sallituksi radonpitoisuudeksi 100 Bq/m^3 (WHO Handbook 2009).

Noin kolmannes radonin aiheuttamista keuhkosyövistä Suomessa syntyy pienillä alle 100 Bq/m^3 radonpitoisuuksilla, koska radoniin liittyvän keuhkosyöpäriskin annosvaste on nykyisen tutkimustiedon perusteella lineaarinen ja ilman kynnsarvoa. Näissäkin syöpätapauksissa tupakoitsijoiden osuus on kuitenkin noin 80 %. Säteilyaltistumisen pienentämiseksi myös alle 100 Bq/m^3 , radonpitoisuudet rakennuksissa on hyvä tavoite silloin, kun se on järkevästi mahdollista (Säteilyturvakeskus, kansallinen toimintasuunnitelmaluonnos, 31).

4 RADONIN ESIINTYMINEN SEKÄ NORMIT JA SÄÄDÖKSET

4.1 Radon maaperässä

Radonia syntyy kallio- ja maaperässä radioaktiivisen uraanin ja toriumin hajotessa useiden vaiheiden kautta lopulta stabiiliksi, ei-aktiiviseksi lyijyksi. Radon on hajoamissarjojen ainoa kaasu ja sitä esiintyy useina isotooppeina: uraanisarjan ^{222}Rn (radon), toriumisarjan ^{220}Rn (toron) ja aktiniumisarjan ^{219}Rn (aktinon). Radonin pysyvimmän isotoopin ^{222}Rn (radon) puoliintumisaika on 3,8 päivää.

Radon on yleensä pääosin peräisin kallioperästä tai kalliosta rapautuneesta maasta. Erityisesti riskialueita ovat hyvin ilmaa läpäisevät, pohjaveden yläpuolella olevat karkearakeiset maakerrostumat ja rikkonaiset kalliit syväkivialueilla ja niiden reunoilla Hämeestä Kaakkois-Suomeen ulottuvalla vyöhykkeellä. Kaikki kivennäismaalajit

tuottavat radonia maaperän huokosilmaan. Kallion kyky tuottaa radonpitoista ilmaa riippuu sen rikkonaisuudesta (RIL 121-2004, 44).

Graniitti sisältää luonnostaan uraania. Eteläsuomalainen ja erityisesti kaakkoissuomalainen graniitti on luonnostaan radioaktiivista, yleensä uraanipitoista. Radioaktiivisuuden lähteinä ovat radioaktiiviset mineraalit, joista yleisempiä ovat allaniitti ja monzaniitti. Suomen kallioperä on monivaiheisten geologisten prosessien lopputulos, ja uraania on rikastunut kallioperään paikoin runsaasti (Tompuri 2017, Tekniikan maailma, 66).

Maaperän huokosilmaan siirtynyt radonkaasu kulkeutuu maaperässä diffuusion avulla, jolloin se kulkeutuu suuremmasta pitoisuudesta pienempään pitoisuuteen. Tämän lisäksi radonkaasu kulkeutuu maaperän ilmavirtausten eli konvektion avulla. Etenkin huonosti ilmaa läpäisevissä maalajeissa, kuten savessa ja siltissä diffuusio on merkittävin kulkeutumismekanismi. Hyvin läpäisevillä maalajeilla, kuten esimerkiksi soraharjuilla taas maaperän ilmavirtaukset voivat olla merkittävin radonkaasun kulkeutumistapa (Pöllänen 2003, 154-155).

Diffuusio suuntautuu suuremmasta pitoisuudesta pienempään. Diffuusiomatka maaperässä on tyypillisesti 1- 2 metriä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että mitä syvemmälle maaperässä mennään, sitä pienempi on diffuusion vaikutus radonpitoisuuteen. Noin 2- 4 metrin syvyydessä radonpitoisuus saavuttaa maksimiarvonsa (Pöllänen 2003, 155).

4.2 Radon sisäilmassa

Tällä hetkellä puhutaan paljon erilaisista terveydelle haitallisista rakennusten sisäilmaongelmista, joita ovat mm. hiukkasmaiset epäpuhtaudet, fysikaaliset-, kemialliset- ja mikrobiologiset tekijät sekä erilaiset hajuhaitat. Radon luokitellaan myös sisäilman epäpuhtaudeksi (Sisäilmayhdistys ry:n www-sivut 2019). Koska radon on hajuton kaasu, sen olemassaoloa on myöskin vaikea havaita. Lisäksi se ei aiheuta ihmiselle samankaltaisia oireiluja lyhyellä aikavälillä kuin useat muut sisäilmaongelmat. Radonin olemassaolo ja sen pidempiaikaisen altistumisen aiheuttama keuhkosityöpä on

onneksi huomattu, jonka johdosta on alettu tekemään radonpitoisuuden mittauksia rakennusten sisäilmasta. Radonpitoisuuden mittaaminen sisäilmasta on kuitenkin vielä vapaaehtoista yksityisillä talouksilla, mutta työpaikkojen radonmittauksista on tullut jo lakisääteistä tietyillä ns. radonriskialueilla.

Suomalaisissa asunnoissa sisäilman keskimääräinen radonpitoisuus on 120 becquereliä kuutiometrissä (Bq/m^3), joka on korkeimpia arvoja maailmassa. Suomen korkeat radonpitoisuudet johtuvat kylmästä ilmastostamme, rakennusten perustamistavasta ja niiden tiiviydestä. Lisäksi Suomessa on tavallista enemmän uraania sisältävä maankamara ja monissa paikoin hyvin läpäisevä rakennusmaa. Sisäilman radonista aiheutuu suomalaisille keskimäärin 2 millisievertin (mSv) säteilyannos vuodessa eli noin puolet vuotuisesta efektiivisestä annoksesta (Pöllänen 2003, 112).

Radonia voi siirtyä rakennuksen sisäilmaan myös uraanipitoisten kallioalueiden porakaivovesien välityksellä. Lisäksi kaikki mineraalainesta sisältävät seinä-, katto- ja lattiarakenteet kasvattavat osaltaan sisäilman radonpitoisuutta (RIL 121-2004, 44).

Sisäilman radonin merkittävin lähde on maaperän radonpitoinen huokosilma, joka virtaa rakennuksen sisätiloihin perustusten rakojen, huokoisten materiaalien ja tiivistämättömien läpivientien kautta. Maaperän ilmanläpäisevyys vaikuttaa erittäin merkittävästi sisätiloihin tulevan vuotovirtauksen voimakkuuteen (RIL 121-2004, 44).

Radonin kulkeutuminen maaperän huokosilmasta ulkoilmaan tapahtuu tavallisesti diffuusion avulla. Kulkeutuminen konvektion eli ilmavirtausten mukana on taas merkittävin radonin siirtymistapa maaperästä rakennuksen sisäilmaan. Käytännössä konvektio riippuu maaperän läpäisevyydestä, sisä- ja ulkoilman välisestä paine-erosta sekä rakennuksen lattian rakojen aiheuttamasta virtausvastuksesta. Eri maalajien läpäisevyys vaihtelee huomattavasti. Savella se on 10^{-16} m^2 ja esimerkiksi soralla 10^{-8} 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 rakennuksen sisäilmaan (Pöllänen 2003, 155-156).

Maaperän ilmanläpäisevyys riippuu maalajin rakeisuudesta. Esimerkiksi savimaan, jonka rakeisuus on pieni, ilmanläpäisevyyskin on pieni. Soramaassa taas on melko

suuri huokosilmatilavuus eli rakeiden välissä on enemmän huokosilmaa, jolloin soraan ilmanläpäisevyys on suurempi kuin esimerkiksi savella.

Luonnollinen paine-ero maaperän huokosilman ja rakennuksen sisäilman välille voi muodostua mm. seuraavista tekijöistä:

- Sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero
- Tuulen puoleiselle seinälle muodostuu korkeampi paine kuin mitä muualla ulkoilmassa on. Varsinkin hyvin läpäisevillä maalajeilla paine jakautuu myös rakennuksen alla olevaan maahan, aiheuttaen sisäänpäin suuntautuvan painegradientin.

Rakennuksen ilmanvaihto vaikuttaa maaperän huokosilman ja rakennuksen sisäilman väliseen paine-eroon. Painovoimaisen ilmanvaihdon rakennuksissa paine-ero muodostuu pääasiassa sisä- ja ulkoilman välisistä lämpötilaeroista. Koneellisella ilmanvaihdolla varustetuissa rakennuksissa paine-eroon vaikuttaa lämpötilan lisäksi tulo- ja poistoilmavirtojen säädöt sekä rakenteiden tiiviys (Pöllänen 2003, 157).

Radonin päästessä rakennuksen sisäilmaan sen hajoamistuotteena syntyy poloniumia, lyijyä ja vismuttia. Polonium hajoaa kolmessa minuutissa, lyijy ja vismutti noin 20 minuutissa. Ilmassa oleva radonpitoisuus ei laske, koska radonia syntyy jatkuvasti uraanin hajoamistuotteena. Hajoamistuotteet, muun muassa polonium, kiinnittyy keuhkojen herkille solupinnoille, kun radonpitoista ilmaa hengitetään. Radonkaasu tuottaa alfasäteilyä, joka tarkoittaa että atomin ytimestä lähtee kahden protonin ja neutronin muodostama alfahiukkanen. Hengityksen osalta alfasäteilyn vaikutukset rajoittuvat keuhkoihin. Kun radonpitoisuus sisäilmassa on jatkuvasti hyvin korkea, säteilevää ainesta kiinnittyy keuhkosoluihin niin paljon, että riski sairastua keuhkosyöpään kasvaa. Kansanterveydellisesti sisätilojen radonpitoisuuden enimmäisarvojen määrittäminen on vaatinut perusteellista tutkimustyötä, jonka tuloksena korkean radonpitoisuuden riskit ovat nykyään tiedossa (Tompuri 2017, Tekniikan maailma, 64).

4.3 Lainsäädäntö, määräykset ja ohjeet

Radonin huomioonottamisesta suunnittelussa ja rakentamisessa sekä radonpitoisuuden enimmäisraja-arvoista rakennuksen sisäilmassa on olemassa eri tahojen laatimia määräyksiä, ohjeita sekä säädöksiä. Seuraavassa on esitetty lyhyesti satunnaisessa järjestyksessä erityisesti geotekniseen suunnitteluun ja pohjarakentamiseen vaikuttavia tekijöitä.

Ympäristöministeriön asetus pohjarakentamisesta 4§, Geotekninen suunnittelu
Asetuksen mukaan pohja- ja maarakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa on otettava rakennuspaikan radonriskit huomioon (Ympäristöministeriön asetus pohjarakenteista 465/2014, 4§).

Geoteknisen suunnittelun tehtäväluettelo GEO12

Tilaaaja voi yleissuunnitteluvaiheessa vaatia pohjarakennuslausuntoon selvitettäväksi rakennushankkeen radonin torjuntatarpeen sekä esitettäväksi alustavat ratkaisut radonin torjumiseksi. Lisäksi tilaaja voi halutessaan tilata erikseen radonselvityksen tai radonmittaukset (RT 10-11127 2013, 5-6).

Geoteknisen suunnittelun tehtäväluettelon em. ohjeen perusteella tulisi olla tiedossa rakennuspaikan maaperän radonpitoisuus jo ennen rakentamista, jolloin voitaisiin esittää mahdollisia ratkaisuja radonin torjumiseksi. Mikäli tilaaja esimerkiksi haluaa tilata radonselvityksen tai radonmittaukset, tulisi palveluja tarjoavalla yrityksellä olla siihen tarkoitukseen soveltuvat maaperän radonpitoisuuden mittauslaitteet.

Kuntien rakennusjärjestys

Eri kaupungeissa ja kunnissa voidaan antaa paikkakunnasta riippuen ohjeistusta radonriskin huomioimisesta suunnittelussa ja rakentamisessa. Esimerkiksi Porin kaupungin rakennusvalvonnan mukaan mahdolliset radonriskit on huomioitava jo suunnittelussa. Rakennusvalvonta vaatii myös esitettäväksi todistuksen rakennuspohjaan tuotavasta radonvapaasta kiviaineksesta. Samoin myös rakenteiden tiiviysvaatimukset rakennuspaikasta riippumatta tulisi näkyä suunnitelmissa. Lisäksi Porin kaupungin rakennusvalvonta ohjaa rakentajia radonriskien huomioimisessa aloituskokouksen yhteydessä (Lönnberg henkilökohtainen tiedonanto 21.8.2019).

Ohjeistusta radonriskien huomioimisesta voi löytyä myös kuntien verkkosivujen kautta. Esimerkiksi Säkylän kunnan rakennusvalvonnan verkkosivuilla on rakentajille ohjeistusta radonin huomioinnosta rakentamisessa (Säkylän kunnan www-sivut 2019).

Pohjarakennusohjeet RIL 121-2004 mukaan rakennuspaikan radonriskit on otettava huomioon suunnittelussa ja rakentamisessa. Ohjeessa mainitaan, että suunnittelun ohjearvona oleva radonpitoisuuden raja 200 Bq/m^3 ylittyy suurimmassa osassa maata. Radontekninen suunnittelu voidaan ohjeen mukaan jättää tekemättä, mikäli paikkakunta-kohtaiset radontutkimukset selkeästi osoittavat, että asuntojen radonpitoisuudet alittavat asetetun enimmäisarvon säännönmukaisesti. Mikäli radonia ei huomioida suunnittelussa, tulee kirjalliset perustelut liittää rakennuskohteen suunnitelma-asiakirjoihin (RIL 121-2004, 44).

Rakennuspohjan kuivatusohjeet RIL 2009 (uudistuu RIL 126-2020) mukaan radonin ohjearvojen ylitykset rakennuksissa ovat niin yleisiä, että radonriskien huomioinnin ottaminen on perusteltua koko maassa (RIL 126-2009, 18).

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta
Asetus on tarkoitettu käytettäväksi uuden rakennuksen sisäilmaston ja ilmanvaihdon suunnitteluun ja rakentamiseen. Asetus koskee myös rakennuksen laajentamista sekä kerrosalaan laskettavan tilan lisäämistä. Asetusta ei kuitenkaan sovelleta maatalouden tuotantorakennuksien suunnitteluun ja rakentamiseen, eikä uudisrakennuksiin, jotka ovat käytössä vähemmän kuin neljä kuukautta vuodessa (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017, 1§).

Rakennuksen sisäilmassa ei saa esiintyä terveydelle haitallisessa määrin hiukkasmaisia epäpuhtauksia, fysikaalisia, kemiallisia tai mikrobiologisia tekijöitä eikä viihtyisyyttä heikentäviä hajuja (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017, 5§).

Pääsuunnittelijan, erityissuunnittelijan ja rakennussuunnittelijan tulee suunnitella rakennuksen vaipan ja sisä rakenteiden ilmanpitävyys sekä hormivaikutuksen hallinta niin, että edellytykset ilmanvaihdon toiminnalle voidaan varmistaa ja vältetään

rakenteissa sekä maaperässä olevien epäpuhtauksien ja radonin siirtymistä sisäilmaan sekä kosteuden siirtymistä rakenteisiin (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017, 21§).

Sisäilmastoluokitus 2018 RT 07-11299

Sisäilmastoluokitus on tarkoitettu käytettäväksi mm. rakennus- ja taloteknisen suunnittelun apuna. Sisäilmastoluokitus antaa ohjeistusta mm. sisäympäristön tavoitearvoille. Sisäympäristön laadun tavoitearvot radonpitoisuuksissa ovat:

- Sisäilmastoluokassa S1 (yksilöllinen sisäilmasto enintään 100 Bq/m³)
- Sisäilmastoluokassa S2 (hyvä sisäilmasto enintään 100 Bq/m³)
- Sisäilmastoluokassa S3 (tydyttävä sisäilmasto enintään 200 Bq/m³)
(RT 07-11299 2018, 7)

Säteilylaki 157§, Sisäilman radonpitoisuuden rajoittaminen rakennushankkeessa

”Rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava, että rakennus suunnitellaan ja toteutetaan siten, että sisäilman radonpitoisuus on mahdollisimman pieni” (Säteilylaki 859/2018, 157§).

Edellä mainitussa Säteilylaisissa ei ole määritetty sisäilman radonpitoisuudelle raja-arvoa, mutta sen mukaan tulisi rakennuksen suunnittelussa ja toteutuksessa huomioida radonriskit jo pienenkin radonpitoisuuden omaavilla alueilla.

Säteilylaki 155§, Työpaikan radonpitoisuuden selvittäminen

Työnantajan on selvitettävä työtilan ja muun työskentelytilan radonpitoisuus, mikäli tilat sijaitsevat alueilla, joissa > 10 % radonmittaustuloksista ylittää viitearvon 300 Bq/m³. Lisäksi mittauksia tulee tehdä työpaikoilla, jotka sijaitsevat kokonaan tai osittain maan alla tai jotka ovat rakennettu tontille, jossa on hyvin ilmaa läpäisevä maapohja (esimerkiksi sora tai hiekka). Myös talousvettä toimittavissa laitoksissa (esim. vesilaitos), jossa pohjavesi on kosketuksissa sisäilmaan, tulee selvittää radonpitoisuus. Selvitystä ei tarvitse tehdä, mikäli yhdenkään työntekijän vuosittainen työaika työtilassa ei ylitä 20 tuntia tai jos työtila sijaitsee maanpinnan tasosta katsottuna rakennuksen toisessa tai ylemmässä kerroksessa tai jos rakennuksen lattia ja seinät eivät ole kosketuksissa maaperään ja näiden välisen tilan tuulettuvuus on hyvä. Työpaikan

radonpitoisuus tulee mitat säännöllisesti, jos työpaikka sijaitsee maanalaisessa louhoksessa tai -louhintatyömaalla (Säteilylaki 859/2018, 155§).

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä, 19§

”Työpaikan radonpitoisuuden viitearvo on 300 becquereliä kuutiometrissä työtilassa, jossa työaika on suurempi tai yhtä suuri kuin 600 tuntia vuodessa. Radonpitoisuus lasketaan työnaikaisen radonpitoisuuden vuosikeskiarvona. Työperäistä altistusta koskeva viitearvo radonille on 500 000 becquereliä kuutiometrissä vuodessa. Altistus lasketaan kaikissa työtiloissa vuoden aikana kertyneiden altistusten summana. Työperäistä altistusta koskevaa viitearvoa radonille ei sovelleta, jos työntekijä työskentelee ainoastaan työtilassa, jossa radonpitoisuus on työpaikan sisäilman radonpitoisuuden viitearvoa pienempi” (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä 1044/2018, 19§).

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä, 20§

”Asunnon ja muun oleskelutilan sisäilman radonpitoisuuden viitearvo on 300 becquereliä kuutiometrissä” (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä 1044/2018, 20§).

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä, 21§

”Uuden rakennuksen suunnittelua ja toteutusta koskeva sisäilman radonpitoisuuden viitearvo on 200 becquereliä kuutiometrissä” (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä 1044/2018, 21§).

Maailman Terveysjärjestö WHO (World Health Organization) on suositellut sisäilman sallituksi radonpitoisuudeksi 100 Bq/m³ (WHO Handbook 2009).

Säteilylaki 159§, Kansallinen toimintasuunnitelma radonriskien ehkäisemiseksi

”Sosiaali- ja terveysministeriö laatii kansallisen toimintasuunnitelman radonista aiheutuvien pitkän aikavälin riskien ehkäisemiseksi” (Säteilylaki 859/2018, 159§).

Suomen Säteilyturvakeskus (STUK) on laatinut kansallisen toimintasuunnitelmaluonnoksen radonriskien ehkäisemiseksi (KATORRE) – ilman radonia terveempi elämä. Toimintasuunnitelmaluonnos on laadittu siksi, koska säteilysuojelun

perusnormidirektiivikin edellyttää, että sen jäsenmailla tulee olla viestintästrategia, jolla lisätään väestön, paikallisviranomaisten, työntekijöiden ja työnantajien tietoisuutta radonin aiheuttamista riskeistä.

Suomen kansallisen toimintasuunnitelmaluonnoksen merkittävimmät tavoitteet radonriskien ehkäisemiseksi vuoteen 2040 mennessä ovat mm. radonista aiheutuva keuhkosyöpäriskin pienentyminen, radonaltistuksen pieneneminen nykyisestä, sisäilman radonpitoisuuksien tunteminen nykyistä paremmin sekä radonriskitietoisuuden yleinen lisääntyminen. Jotta näihin tavoitteisiin päästään, tulee mm. uudet rakennukset rakentaa radonturvallisiksi ja kansallista radontietokantaa tulee kehittää kattavammaksi ja avoimemmaksi. Tämä tarkoittaisi käytännössä sitä, että radonmittausten määrää lisätään sekä hyödynnetään digitalisaatiota, jossa radonmittausten tulokset voitaisiin viedä kansalliseen radontietokantaan. Uusien rakennusten radonpitoisuuden tavoitearvolla 150 Bq/m^3 voidaan alentaa merkittävästi radonin aiheuttamia syöpätapauksia (Kansallinen toimintasuunnitelma 2016).

Säteilyturvakeskuksen ylitarkastaja Olli Holmgren on antanut Tekniikan maailman haastattelussa maininnan, että: ”Vallitseva viitearvo eri Euroopan maissa on tyypillisesti $200 - 300 \text{ Bq/m}^3$. Meidän ei ole syytä suhtautua asiaan löyhästi, koska Suomen maaperä kuuluu Tsekinmaan ja Ruotsin lisäksi Euroopan radonpitoisimpiin. Ongelma on eriasteisena olemassa kaikkialla Euroopassa, paitsi Islannissa ja Alankomaissa”, Olli Holmgren muistuttaa (Tompuri 2017, Tekniikan maailma, 67).

Edellä mainittujen määräysten, ohjeiden ja säädöksiensä mukaan rakennuksien radonriskien huomioimisessa on joitain eroavaisuuksia. Esimerkiksi Pohjarakennusohjeiden RIL 121-2004 mukaan radontekninen suunnittelu voidaan jättää tekemättä, jos paikakuntakohtaiset radontutkimukset selkeästi osoittavat, että asuntojen radonpitoisuudet alittavat asetetun enimmäisarvon 200 Bq/m^3 säännönmukaisesti. Kirjalliset perustelut huomiotta jättämisestä tulee kuitenkin liittää suunnitelma-asiakirjoihin. Vastavasti Ympäristöministeriön asetus pohjarakentamisesta sekä Rakennuspohjan kuivausohjeet RIL 2009 mukaan radonriskit tulee ottaa huomioon koko maassa. Kaksi jälkimmäistä ohjeistusta ovat kuitenkin uudempia, jolloin tietoa radonin haittavaikutuksista rakennuksen sisäilmassa on saattanut tulla lisää ja on myös sitä kautta vaikuttanut ohjeistuksiin.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta ei ole ottanut kantaa sisäilman radonpitoisuuden raja-arvoihin. Sisäilmastoluokitus sitä vastoin on antanut ohjeet sisäympäristön tavoitearvoille. Esimerkiksi sisäilmastoluokassa S1 ja S2 tavoitearvo sisäilman radonpitoisuudelle on enintään 100 Bq/m³. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä määrittää uuden rakennuksen sisäilman sallituksi radonpitoisuuden raja-arvoksi 200 Bq/m³, joka taas vastaa sisäilmastoluokan S3 tavoitearvoa.

Suomen Säteilyturvakeskuksen laatiman kansallisen toimintasuunnitelmaluonnoksen mukaisesti uuden rakennuksen sisäilman radonpitoisuuden tavoitearvo vuoteen 2040 mennessä olisi 150 Bq/m³, kun taas maailman terveysjärjestö WHO on suositellut sisäilman sallituksi radonpitoisuudeksi 100 Bq/m³.

5 RADONTUTKIMUKSET SATAKUNNASSA

5.1 Säteilyturvakeskuksen olemassa olevat tutkimustulokset

Säteilyturvakeskus (STUK) on suorittanut radonpitoisuuksien mittauksia pientalojen sisäilmasta eri puolella Suomea yhteensä noin 220 000 kpl. Mittauksia on tehty radonmittauspurkeilla vuosien 1980 - 2018 aikana. Tutkimusten tuloksia on esitetty mm. STUK:n julkaisuissa Otantatutkimus 2006, -2009 ja -2016 (Säteilyturvakeskuksen [www-sivut](http://www.stuk.fi) 2019).

Radonpitoisuuden mittauksia rakennusten sisäilmasta on tehty myös Porin ja muun Satakunnan alueella. Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty Porin ja muiden Satakunnan alueiden rakennusten sisäilmasta mitattuja radonpitoisuuksia prosentteina postitoimialueittain. Vertailun vuoksi on otettu myös taulukko 3 Tampereen keskustan ja Pispalan harjun alueen radonpitoisuuksista, joista mm. jälkimmäisestä alueesta on löydetty suuriakin radonpitoisuuksia rakennusten sisäilmasta.

Seuraavia taulukoita tulkitessa tulee kuitenkin huomioida, että kyseessä ovat tilastot aiemmin tehdyistä mittauksista, jotka eivät välttämättä anna todellista kuvaa yksittäisen asunnon radonpitoisuudesta. Taulukoissa oleva radonpitoisuuden vuosikeskiarvo on laskettu kertomalla mittauskaudella tehdyn mittauksen tulos lukuarvolla 0,9. Mikäli mittaus on kestänyt 272 vuorokautta tai enemmän, niin tällöin taulukoissa esiintyvä mittaustulos on sellaisenaan vuosikeskiarvo (Säteilyturvakeskuksen www-sivut 2019).

Taulukko 1. Sisäilman mitatut radonpitoisuudet Porissa, Säteilyturvakeskus

Kunta	Postitoimipaikka	Mitattuja asuntoja	Keskiarvo Bq/m ³	Mediaani Bq/m ³	200 Bq/m ³ ylitykset %	300 Bq/m ³ ylitykset %	1000 Bq/m ³ ylitykset %
Pori	Käppärä-Isomäki	13	49	36	0	0	0
Pori	Impola	20	45	34	5	0	0
Pori	Toejoki	22	45	36	0	0	0
Pori	Ruosniemi	24	44	28	0	0	0
Pori	Kalaholma-Väinölä	10	35	29	0	0	0
Pori	Vanhakoivisto	15	42	30	0	0	0
Pori	Niittymaa	10	67	59	0	0	0
Pori	Vähärauma	23	43	33	0	0	0
Pori	Musa-Tiiliruukki	10	49	37	0	0	0
Pori	Pietniemi-Leppäkorpi	19	43	37	0	0	0
Pori	Kyläsaari	10	42	40	0	0	0
Pori	Pihlava	16	58	51	0	0	0
Pori	Söörmarkku	19	59	47	0	0	0
Pori	Noormarkku Keskus	90	127	67	19	12	1
Pori	Ahlainen	17	122	45	18	6	0
Pori	Lavia Keskus	19	102	53	5	5	0

Taulukosta 1 nähdään, että Porissa sallittujen sisäilman radonpitoisuuksien (yli 200 ja 300 Bq/m³) ylittäviä alueita ovat mm. Noormarkun keskus, Ahlainen sekä Lavian keskus. Tämän lisäksi Noormarkun keskustan alueella on havaittu sisäilman radonpitoisuuksissa jopa 1000 Bq/m³ ylityksiä (1 % mittauksista). Taulukon mukaan Porissa muilla postitoimialueilla radonia rakennuksen sisäilmassa on huomattavasti alle sallittujen pitoisuuksien. Tosin mittauksia ei ole tehty vielä riittävän kattavasti, joten kaikkien Poriin kuuluvien postitoimialueiden tuloksia ei ole taulukossa esitetty.

Taulukon alueet ovat merkitty tarkimmillaan vain postinumeron tarkkuudella ja alueiden rajoja tuloksissa ei ole muuten sen tarkemmin määritelty. Taulukon mukaan on siis melko vaikeaa päätellä tietyn yksittäisen rakennuksen tai rakennuspaikan sisäilman radonpitoisuus.

Taulukko 2. Sisäilman radonpitoisuudet muualla Satakunnassa, Säteilyturvakeskus

Kunta	Postitoimipaikka	Mitattuja asuntoja	Keskiarvo Bq/m ³	Mediaani Bq/m ³	200 Bq/m ³ ylitykset %	300 Bq/m ³ ylitykset %	1000 Bq/m ³ ylitykset %
Eura	Panelia	12	77	62	0	0	0
Eura	Kauttua	24	158	118	33	13	0
Eura	Eura Keskus	29	90	63	10	0	0
Eurajoki	Eurajoki Keskus	29	90	68	3	0	0
Eurajoki	Irjanne	20	120	61	5	5	5
Eurajoki	Lapjoki	15	68	37	7	7	0
Eurajoki	Kuivalahti	11	139	100	9	9	0
Eurajoki	Luvia	40	54	52	0	0	0
Harjavalta	Harjavalta Keskus	28	79	55	7	4	0
Kiukainen	Kiukainen Keskus	10	44	47	0	0	0
Kokemäki	Kokemäki Keskus	31	95	77	6	3	0
Kokemäki	Peipohja	18	56	50	0	0	0
Köyliö	Köyliö Keskus	10	68	54	0	0	0
Merikarvia	Merikarvia Keskus-Rann	23	36	30	0	0	0
Merikarvia	Kuvaskangas	11	41	40	0	0	0
Merikarvia	Tuorila	12	140	29	8	8	8
Nakkila	Nakkila Keskus	37	62	55	3	0	0
Pomarkku	Pomarkku Keskus	25	92	58	16	4	0
Rauma	Lappi	41	83	68	5	0	0
Siikainen	Siikainen Keskus	21	63	41	0	0	0
Säkylä	Säkylä Keskus	35	87	76	9	0	0
Ulvila	Ulvila Keskus	29	49	37	3	0	0
Ulvila	Vanha-Ulvila	17	70	56	0	0	0
Ulvila	Harjuppää	10	57	52	0	0	0
Ulvila	Kullaa Keskus	18	144	88	17	11	0

Taulukosta 2 nähdään, että muualta Satakunnasta löytyy jo useampia yli sallitun sisäilman radonpitoisuuden (yli 200 Bq/m³ ja 300 Bq/m³) omaavia paikkakuntia. Jopa saman paikkakunnan alueella voi radonpitoisuus vaihdella huomattavastikin. Esimerkiksi Eurassa Kauttuan alueella on havaittavissa melko suuriakin radonpitoisuuksia verrattuna esimerkiksi Euran Panelian alueeseen. Myös Eurajoen alueella on havaittu sisäilman sallitun radonpitoisuuden ylityksiä, Luviaa lukuunottamatta. Eurajoen Irjanteella on havaittu sisäilman radonpitoisuuksissa jopa 1000 Bq/m³ ylityksiä (5 % mittauksista). Merikarvialla Tuorilan alueella on havaintoja sisäilman sallitun radonpitoisuuden ylityksistä, kun taas Merikarvian keskustan – rannikon tuntumassa sekä Kuvaskankaalla ei näitä ylityksiä ollut. Tuorilassa on havaittu sisäilman radonpitoisuuksissa jopa 1000 Bq/m³ ylityksiä (8 % mittauksista). Lisäksi Harjavallassa, Kokemäellä, Nakkilan keskustassa, Pomarkun keskustassa, Rauman Lapissa, Säkylän keskustassa, Ulvilan keskustassa sekä Kullaan keskustan alueella on sallittujen radonpitoisuuksien ylityksiä ollut rakennusten sisäilmassa.

Taulukkoon 3 on otettu vertailun vuoksi vielä Tampereen keskustan ja Pispalan alueen sisäilmasta mitattuja radonpitoisuuksia. Pispalan alue Tampereella sijaitsee maantieteellisesti harjulla, jolla tiedetään olevan korkeita radonpitoisuuksia.

Taulukko 3. Sisäilman radonpitoisuuksia Tampereella, Säteilyturvakeskus

Kunta	Postitoimipaikka	Mitattuja asuntoja	Keskiarvo Bq/m ³	Mediaani Bq/m ³	200 Bq/m ³ ylitykset %	300 Bq/m ³ ylitykset %	1000 Bq/m ³ ylitykset %
Tampere	Tampere Keskus	119	242	128	33	20	3
Tampere	Pispala	386	1520	436	63	56	35

Taulukosta 3 nähdään että Tampereen keskustan alueelta on mitattu huomattavasti korkeampia radonpitoisuuksia Porin ja muun Satakunnan alueeseen verrattuna. Tampereen Pispalan harjulla mitattujen asuntojen radonpitoisuuksien keskiarvo on peräti 1500 Bq/m³, kun taas koko Porin ja muun Satakunnan alueella korkein radonpitoisuuden keskiarvo oli 158 Bq/m³, joka oli laskettu Euran Kauttuan mitatuista asunnoista.

Säteilyturvakeskuksen tekemien sisäilman radonpitoisuuden tutkimusten perusteella ei vielä täysin kokonaan voida määrittää millä maantieteellisillä alueilla esimerkiksi saman kunnan sisällä on korkeampi radonpitoisuus. Tutkimusaineistoa radonpitoisuudesta rakennusten sisäilmasta Porissa ja Satakunnassa on saatavilla edelleen vielä vähän. Rakennusalueiden radonpitoisuuksia tulisikin tarkastella yhtenäisen maaperän perusteella. Tällöin tulisi tietää maaperän pohjasuhteet eri alueilla, hyvin ilmaa läpäisevät hiekkamaat ja tiiviimmät moreeni- tai savimaat, jolloin pohjasuhteiden perusteella olisi helpompi arvioida mahdollisten korkeampien radonpitoisuuksien alueita.

5.2 Mahdolliset korkeiden radonpitoisuuksien alueet Porissa ja Satakunnassa

Hyvin ilmaa läpäisevässä maaperässä sekä tavallista enemmän uraania sisältävässä maa- ja kallioperässä esiintyy yleensä korkeampia radonpitoisuuksia.

Esimerkiksi Kontionlahden kunnalle teetetyssä opinnäytetyössä tutkittiin maaperän perusteella tapahtuvaa alueittaista vertailua sisäilman radonpitoisuuksien suhteen. Säteilyturvakeskuksen tekemästä sisäilman radonpitoisuuden mittaustutkimuksesta valittiin hyvin ilmaa läpäisevä hiekkamaa sekä tiivis moreenimaa. Rakennusten

perustamisolosuhteet olivat rinnasteisia. Vertailun tuloksista nähtiin, että sora- ja hiekkaharjujen radonpitoisuus asuntojen sisäilmassa on yli kaksinkertainen moreenimaahan verrattuna (Lajunen 2007, 59).

















Radonmittauksia ennen rakentamista tulisi tehdä varsinkin alueilla, joilla maaperän pohjasuhteiden perusteella saattaa esiintyä korkeita radonpitoisuuksia, koska korkeiden radonpitoisuuksien alueilla on suuremmat riskit päästää myös haitalliset radonkaasut rakennuksen sisäilmaan.

Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) maankamara -verkkosivuilta saatavista maaperäkartoista voi maaperäkuvauksen perusteella arvioida mahdollisia Porin ja Satakunnan alueen korkeampia radonpitoisuuksien alueita.

Maaperäkartoissa esitetyt maaperän kerrostiedot pohjautuvat maaperä- havaintoaineiston tietokantaan, johon on koottu Geologian tutkimuskeskuksen maaperän kartoitus- ja tutkimusaineisto sekä lisäksi muista organisaatioista saatua havaintoaineistoa. Aineisto soveltuu alueelliseen maaperän luokitteluun, eikä sitä tule käyttää suurimittakaavaisiin tarkoituksiin (GTK, maankamara www-sivut 2019).

Kuvassa 2 on esitetty GTK:n maaperäkartoissa kuvattujen värien maalajitiedot. Jokaiselle maalajille on esitetty oma värisävyensä. Maalajitiedot perustuvat rakennustekniseen (RT-luokitus) maalajiluokitukseen.

MAAPERÄKARTTOJEN MAALAJITIEDOT

 Kalliomaata, maanpeite enintään 1 m (yleensä moreenia) (Ka)	 Hiesu (Hs)
 Rapakallio (RpKa)	 Liejuhiesu, humuspitoisuus 2-6 % (LjHs)
 Rakka (RaKa)	 Savi (Sa)
 Lohkareita (Lo)	 Liejusavi, humuspitoisuus 2-6 % (LjSa)
 Kiviä (Ki)	 Lieju, humuspitoisuus yli 6 % (Lj)
 Hiekkamoreeni (Mr), Soramoreeni (SrMr)	 Rahkaturve (St)
 Hienoainesmoreeni (HMr)	 Saraturve (Ct)
 Sora (Sr)	 Turvetuotantoalue (Tu)
 Hiekka (Hk)	 Täytemaa (Ta)
 liejuinen Hiekka, humuspitoisuus 2-6 % (LjHK)	 Kartoittamaton (0)
 karkea Hieta (KHt)	 Vesi (Ve)
 liejuinen Hieta (karkea), humuspitoisuus 2-6 % (LjHt)	

Kuva 2. Maaperäkartoissa esitettyjen värien maalajitiedot (GTK:n maankamara www-sivut 2019).

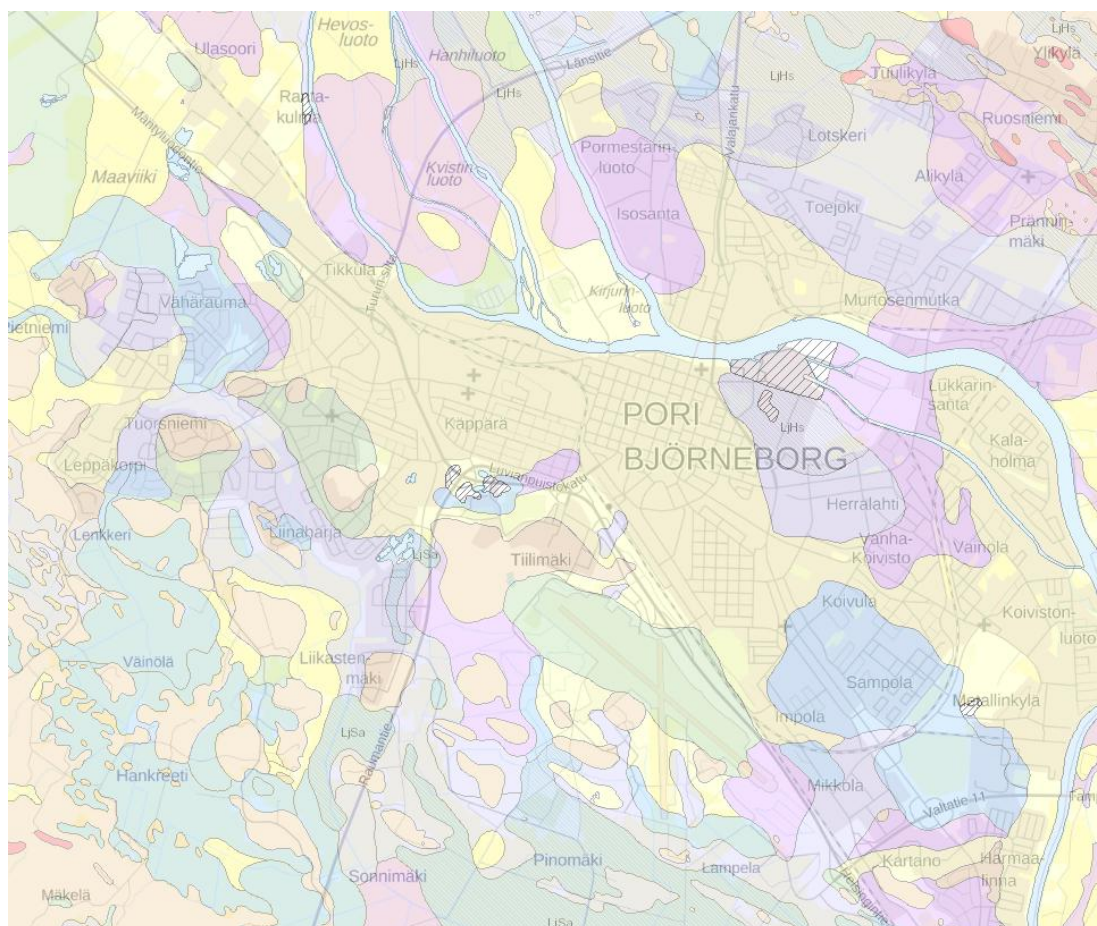
Taulukossa 4 on esitetty maalajien jakaminen rakeisuuden perusteella rakennustekniseen maalajiluokitukseen (RT) ja geotekniseen (GEO) maalajiluokitukseen. Taulukosta nähdään suoraan maalajiluokitusten maalajite-erot.

Taulukko 4. Maalajien lajitteiden rakeisuus RT- ja GEO-maalajiluokituksissa (Ronkainen. 12)

Geotekninen maalajiluokitus	Rakeiden läpimitta (mm)	Rakennustekninen maalajiluokitus
Savi	< 0,002	Savi
Siltti	0,002 - 0,02	Hiesu
	0,02 - 0,06	Hieta
Hiekka	0,06 - 0,2	
	0,2 - 2	Hiekka
Sora	2 - 20	Sora
	20 - 60	Kivet
Kivet	60 - 200	Lohkareet
Lohkareet	> 600	

Seuraavilla sivuilla on esitetty Geologian tutkimuskeskuksen maaperäkartoista poimittuja karttaotteita. Kartat eivät ole mittakaavassa, mutta kartoista voidaan nähdä värisävyjen mukaan kuvattujen maalajien perusteella mahdolliset korkeat radonpitoisuuden alueet.

Kuvassa 3 on esitetty karttaa Porin kaupungin keskustan ja sen lähiympäristön alueelta.



Kuva 3. Porin keskustan alueen maaperäkarttaote, GTK:n maankamara www-sivut

Kuten kartasta voidaan havaita, Porin ydinkeskustan ympäristö on melko suurelta osin karkeaa hietaa eli geoteknisen rakennusluokituksen mukaisesti hiekkaa. Tämän lisäksi keskustan alueella on mm. hiesua eli silttiä (violetti alue). Kauempana keskustasta, Tiilimäen, Liikastemäen ja Tuorsniemen kaupunginosien suuntaan mennessä maaperä muuttuu karkeammaksi ja on pääosin moreenia (ruskeat alueet). Porin keskustan alueella ja aivan sen lähiympäristössä ei ole kartan mukaan juurikaan havaittavissa kalliota (punaiset alueet) tai kallio ainakin esiintyy todella syväällä maanpinnasta.

Kartan koilliskulmassa, Ruosniemen kaupunginosassa on selvästi jo kalliotakin havaittavissa.

Kartassa kalliomaana kuvataan alueet, jotka ovat alle yhden metrin paksuisen maakerroksen peitossa. Yleensä kalliota peittävä maakerros on moreenia.

Kuvassa 4 on esitetty karttaa Pohjois-Porin ja Söörmarkun alueelta.

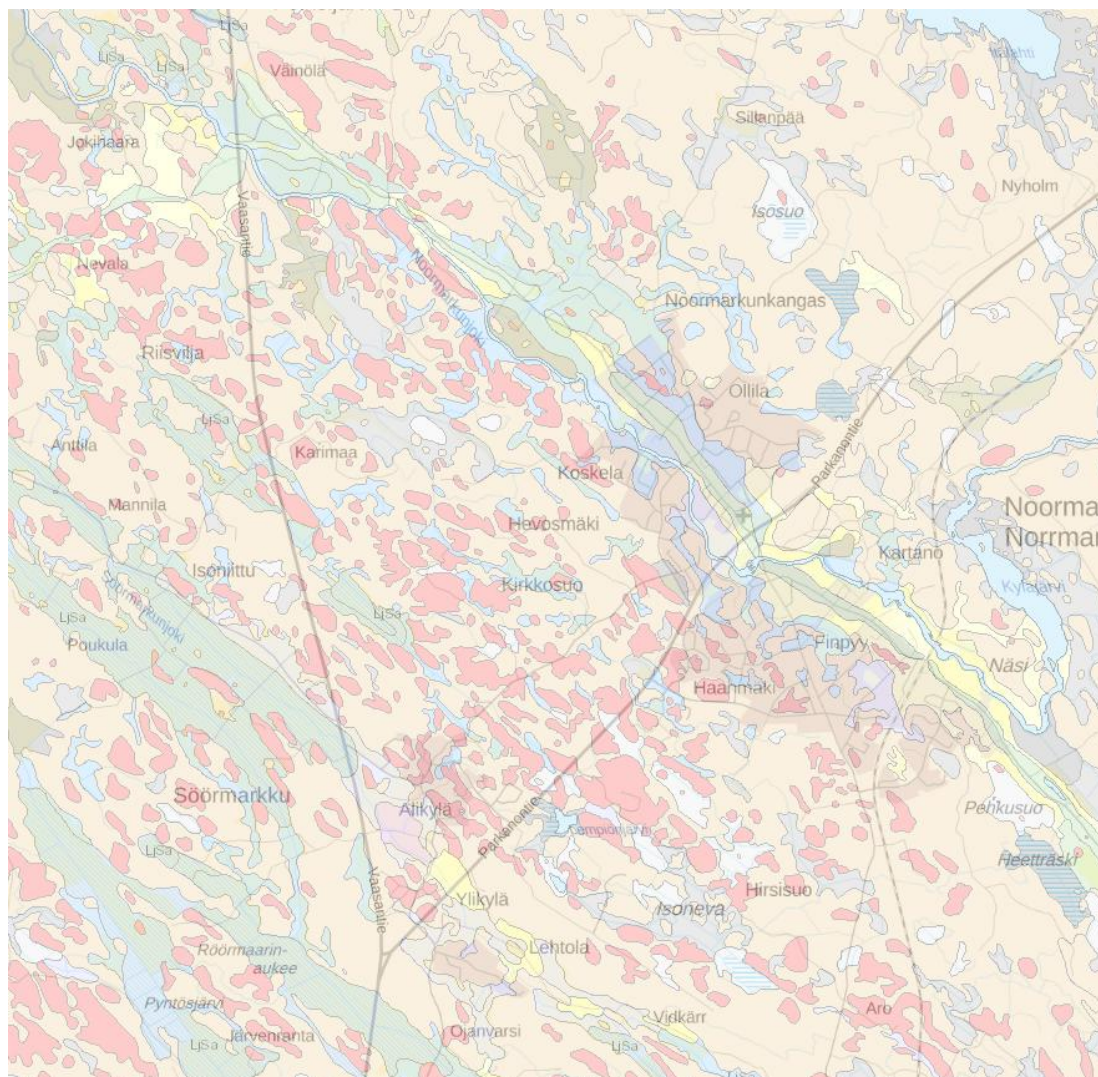


Kuva 4. Karttaa Pohjois-Porin ja Söörmarkun alueelta, GTK:n maankamara [www-sivut](http://www.suomenkalliomaan.fi)

Pohjois-Porin ja Söörmarkun alueen kartassa on kalliota havaittavissa jo melko paljon verrattuna esimerkiksi Porin keskustan ja sen lähiympäristön alueeseen. Kalliota esiintyy mm. Ruosniemen kaupunginosan Ylikylässä ja Järvikylässä, kuten myös Hyvelässä sekä Söörmarkussa. Esimerkiksi Söörmarkussa on aiempien Säteilyturvakeskuksen mittausten perusteella saatu näyttöjä melko suuristakin radonpitoisuuksista rakennusten sisäilmassa. Kartassa näkyvällä alueella muita maalajeja ovat mm. moreeni

(ruskea alue) sekä joissain paikoin esiintyy myös liejuista savea (vihertävä alue) ja -hiesua.

Seuraavassa kuvassa (kuva 5) on esitetty maaperäkartaotetta lähemmin Porin Söörmarkun ja Noormarkun alueelta.



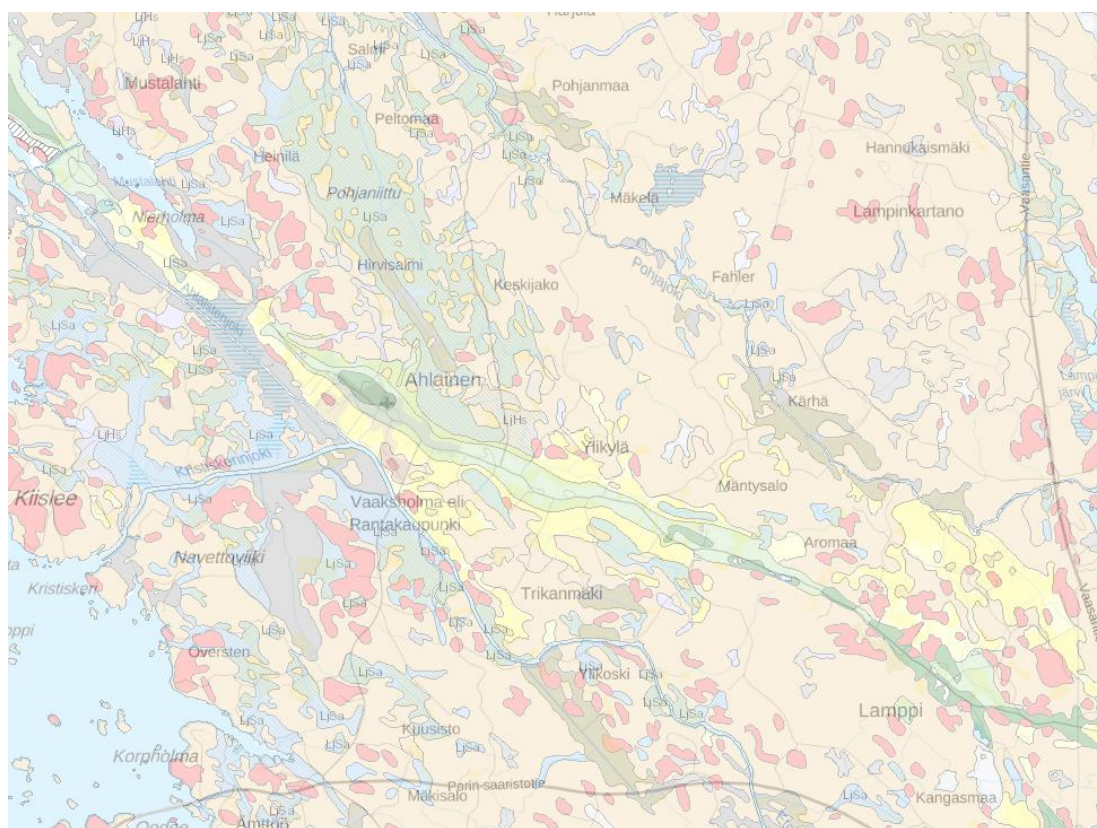
Kuva 5. Söörmarkku ja Noormarkku, GTK:n maankamara www-sivut

Kuvan 5 kartasta voidaan havaita Söörmarkun ja Noormarkun keskustan alueella olevan melko paljonkin kalliosta aluetta (punainen alue), jolloin mahdollisesti niillä alueilla voidaan olettaa olevan melko korkea maaperän radonpitoisuus. Kuten Säteilyturvakeskuksen tekemien rakennusten sisäilman radonmittausten perusteella (taulukko 1) havaitaan, Noormarkun keskuksen (mukaan lukien Söörmarkku) radonpitoisuuden mitatut arvot ylittivät 200 Bq/m^3 jo lähes 20 % mitatuista rakennuksista. Lisäksi

korkeista yli 1000 Bq/m³ ylityksistäkin on tehty havaintoja, tosin vain 1 % kaikista mitatuista rakennuksista.

Erityyppisten kallioiden radonpitoisuus saattaa vaihdella huomattavastikin. Suomen yleisin kallioperä on graniitti.

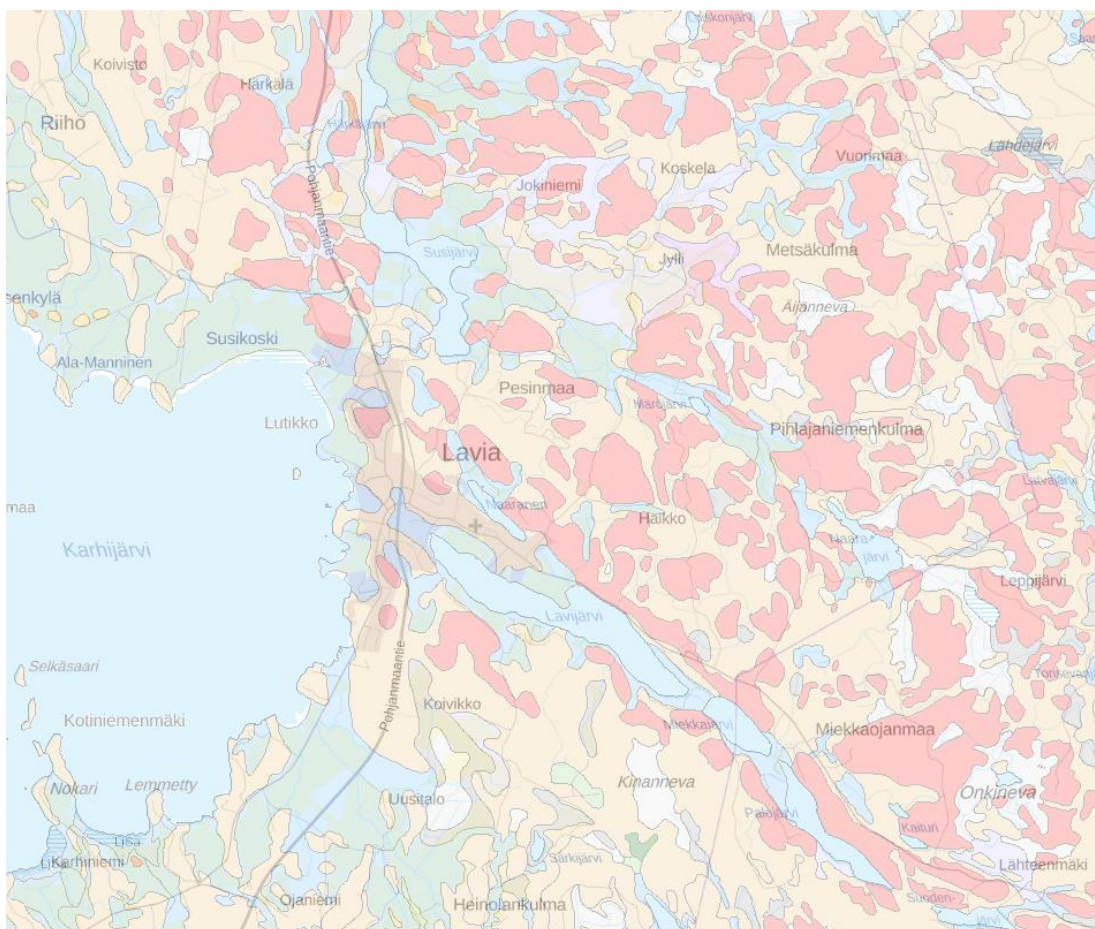
Kuvassa 6 on esitetty maaperäkarttaa Porin Ahlaisten alueelta, jossa Säteilyturvakeskuksen tekemien mittausten perusteella on havaittu sisäilman radonpitoisuuden arvoissa 200 Bq/m³ ylityksiä 18 % kaikista mitatuista rakennuksista.



Kuva 6. Karttaa Porin Ahlaisten alueelta, GTK:n maankamara www-sivut

Kuvasta 6 voidaan havaita, että Porin Ahlaisten kaupunginosan maaperä on pääosin moreenia (ruskea alue) ja joitain kalliota (punaiset alueet). Sinisellä esitetty alue on liejuista savea ja vihreällä esitetty alue on soraa ja/tai hiekkaa.

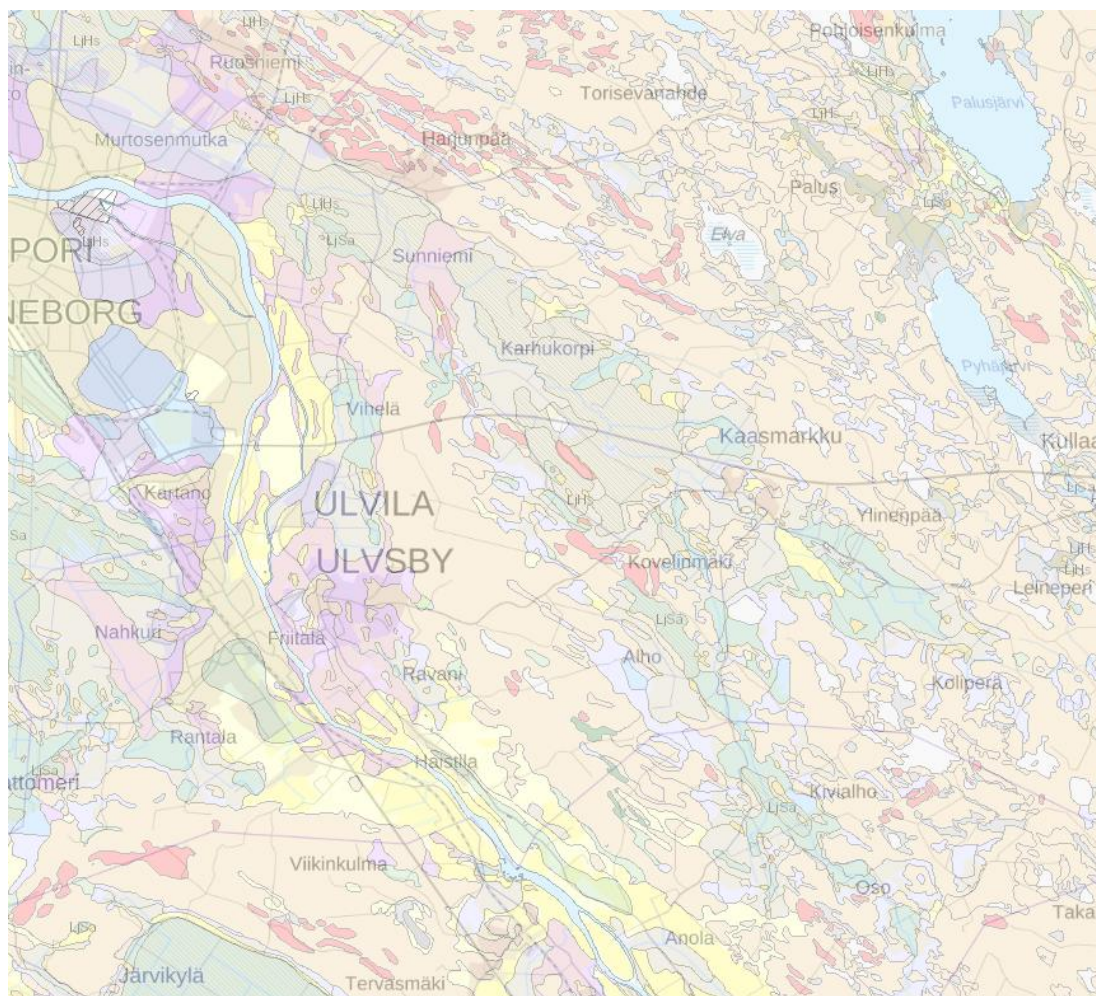
Seuraavassa kuvassa (kuva 7) on esitetty maaperäkarttaa Porin Lavian alueelta. Säteilyturvakeskuksen tekemien mittausten perusteella Lavian keskuksessa on havaittu sisäilman radonpitoisuuden arvoissa 200 Bq/m^3 ylityksiä 5 % kaikista mitatuista rakennuksista. Tämä ei ole kovinkaan paljon, mutta päätin kuitenkin ottaa näihin karttaotteisiin mukaan kaikki ne Poriin kuuluvat alueet, jotka ylittivät Säteilyturvakeskuksen tekemissä radonpitoisuuksien mittauksissa yli 200 Bq/m^3 raja-arvot rakennusten sisäilmassa.



Kuva 7. Karttaa Porin Lavian alueelta, GTK:n maankamara [www-sivut](http://www.gtk.fi)

Kuten kuvasta 7 voidaan havaita, myös Lavian keskuksen korkeat radonpitoisuuden arvot saattavat johtua alueen maaperästä, joka on melko suurelta osin kalliota (punainen alue). Alue on muilta osin kartan mukaan pääasiassa moreenia (ruskea alue).

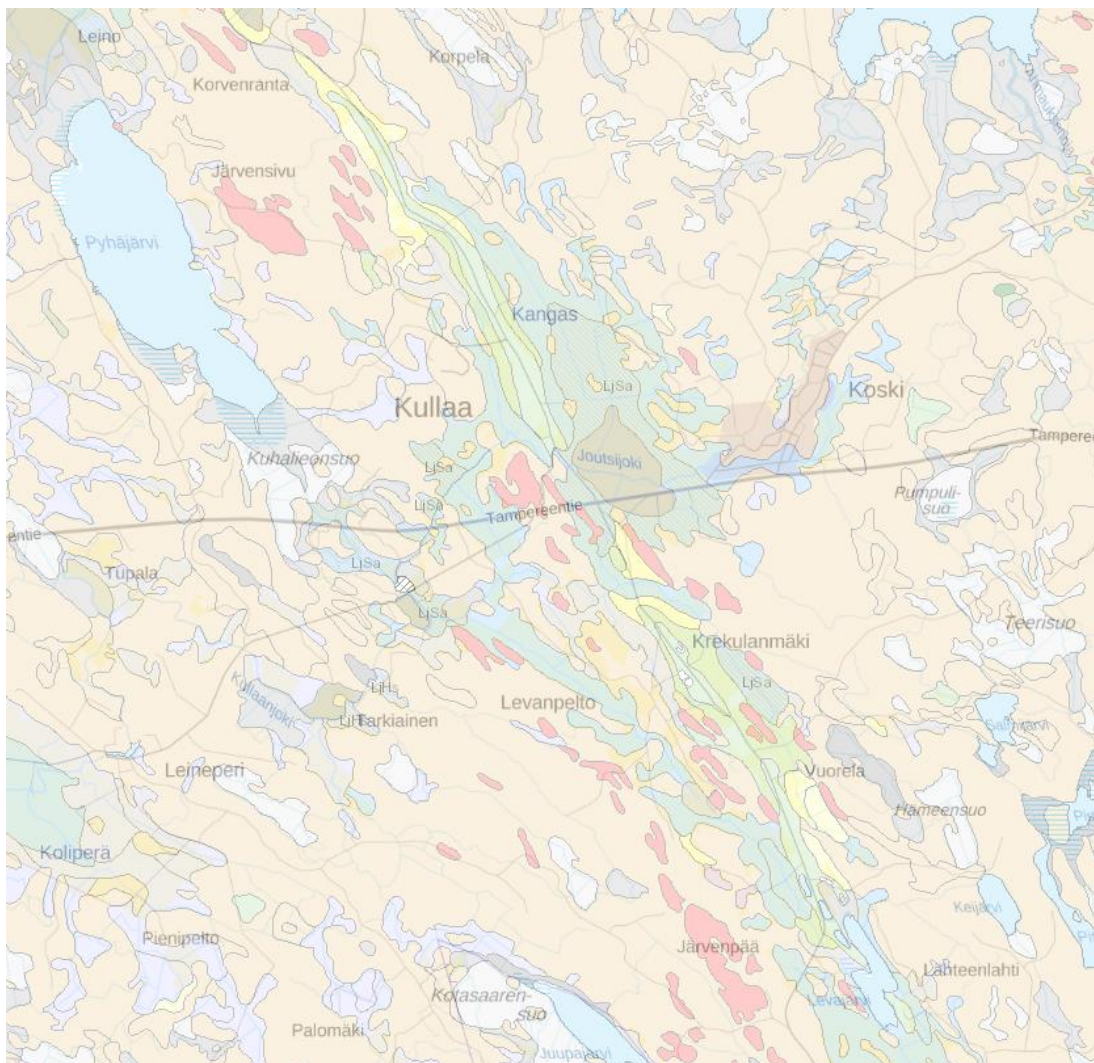
Seuraavassa maaperäkarttaotteessa (kuva 8) on esitetty Ulvilan kaupungin keskustan ja sen lähiympäristön aluetta.



Kuva 8. Ulvilan keskusta ja lähiympäristö, GTK:n maankamara www-sivut

Ulvilan alueen karttaotteesta, kuvasta 8 voidaan havaita Ulvilan keskusta-alueen maaperän olevan melko monimuotoista, jossa on havaittavissa moreenin lisäksi monin paikoin mm. liejuista savea, hiesua eli silttiä, liejuista silttiä sekä kalliota. Säteilyturvakeskuksen tekemien mittausten perusteella Ulvilan keskuksessa on havaittu sisäilman radonpitoisuuden arvoissa 200 Bq/m^3 ylityksiä 3 % kaikista mitatuista rakennuksista. Ulvilan Kullaan alueen mittaustuloksissa on taas havaittu 200 Bq/m^3 ylityksiä 17 % kaikista mitatuista rakennuksista ja jopa 300 Bq/m^3 ylityksiä 11 % kaikista mitatuista rakennuksista.

Seuraavassa kuvassa (kuva 9) on tarkasteltu Kullaan alueen maaperää lähemmin.

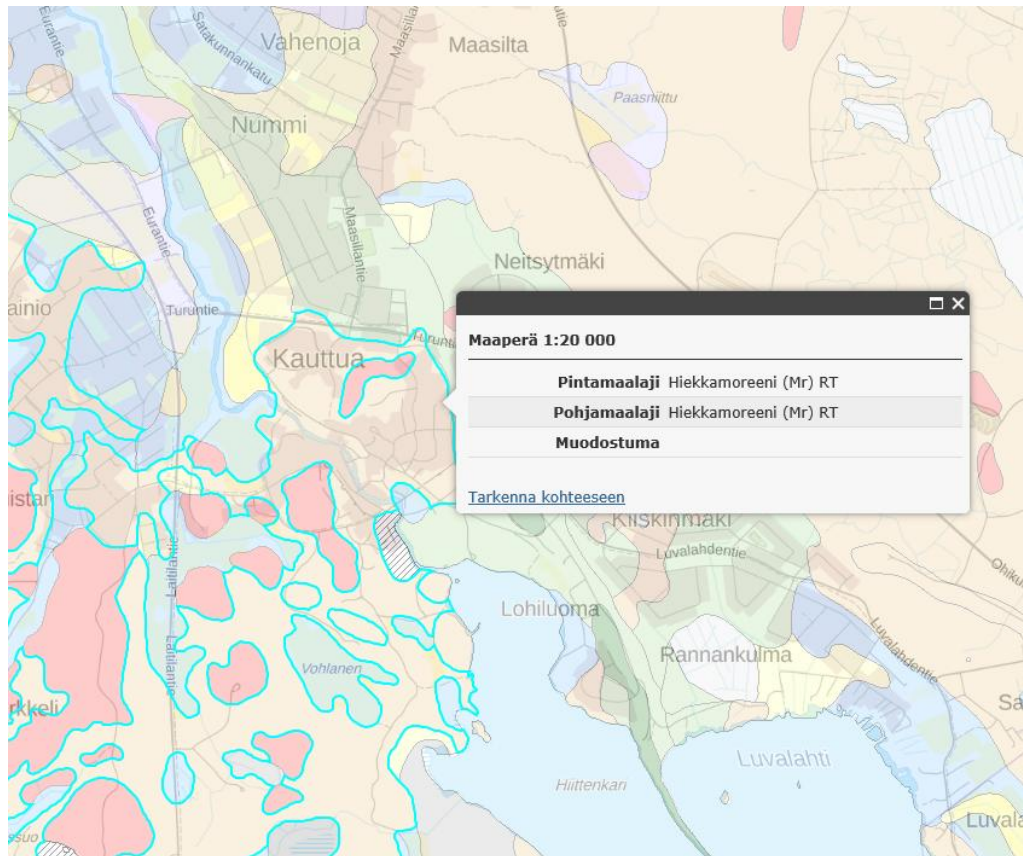


Kuva 9. Ulvilan Kullaan alue, GTK:n maankamara www-sivut

Kuvasta 9 voidaan havaita Kullaan maaperän olevan kartan mukaan pääosin moreenia (ruskea alue). Lisäksi alueelta löytyy mm. kallioisiakin kohtia, sekä myös liejuista savena.

Seuraavassa maaperäkartaotteessa (kuva 10) on kuvattu Euran kuntaa, lähinnä Kauttuan aluetta sen korkean radonpitoisuuden vuoksi. Euran Kauttualla on säteilyturvakeskuksen tekemien mittausten perusteella havaittu sisäilman radonpitoisuuden arvoissa 200 Bq/m^3 ylityksiä 33 % kaikista mitatuista rakennuksista. Tämän lisäksi 300 Bq/m^3 ylityksiä on havaittu 13 % kaikista mitatuista rakennuksista. Nämä ovat suurimmat mitatut radonpitoisuuden arvot rakennusten sisäilmassa Porissa ja muun Satakunnan alueella Säteilyturvakeskuksen tekemien mittausten mukaan.

Seuraavassa kuvassa olen tarkentanut vielä karttaa aivan Kauttuan keskukseen, josta voi maaperätietojen perusteella havaita maaperän olevan hiekkamoreenia. Punainen täplä Kauttuan keskuksessa kuvaa kallioista maaperää.



Kuva 11, Euran Kauttuan alue tarkennettuna, GTK:n maankamara www-sivut

5.3 Radonmittaustarpeen kehitysnäkymät Satakunnassa

Säteilyturvakeskuksen tekemien alueellisten mittausten mukaan Porissa ei ole havaittavissa kovin suuria radonpitoisuuksia, lukuunottamatta Noormarkun, Söörmarkun, Lavian ja Ahlaisten alueita. Havaintoja on edelleen vielä kovin vähän ja harvakseltaan. Porissa ja sen lähialueella maaperän pohjaolosuhteet saattavat vaihdella huomattavastikin. Porin alueella on suurimmaksi osin savi- ja silttipitoista maata, jolloin ko. alueen radonpitoisuuskin voi olla melko pieni maaperän pienen ilmanläpäisevyyden vuoksi.

Porista ja sen lähialueelta löytyy savi- ja silttialueiden lisäksi myös hiekkaista sekä kallioista maaperää, jolloin radonpitoisuus voi olla hyvinkin suuri maaperän huokosilmassa. Kuten aiemmista GTK:n karttaotteista voitiin havaita, maaperä muualla Satakunnassa on huomattavasti enemmän moreenia sekä kallioista. Kaikista yli 200 Bq/m³ ylittävistä Satakunnan alueista en ottanut tähän karttaotteita, mutta esimerkiksi Harjavallassa tiedetään olevan hyvin hiekkapitoinen maa, josta tosin on tehtykin havaintoja korkeammista radonpitoisuuksista. Edellä mainittujen karttojen perusteellakaan ei voida täysin määrittää yksittäisen rakennuspaikan maaperää. Tämän johdosta siis tutkimuksia tarvittaisiin lisää, mikäli korkeiden radonpitoisuuksien alueita halutaan selvittää tarkemmin.

On olemassa myös tapauksia esimerkiksi radonharmittomana pidetyllä pääkaupunkiseudulla, jossa on kuitenkin Säteilyturvakeskuksen tekemissä tehoiskuissa löydetty jopa kymmenkertaisia radonpitoisuuksia ohjearvoihin verrattuna. Säteilyturvakeskuksessa valmistellaankin ohjeistuksen tarkentamista niin, että saman kunnan alueella voi esiintyä riskitasoltaan erilaisia radonvyöhykkeitä. Suunnitelmissa on, että suositukset annettaisiin tulevaisuudessa pienimmillään postinumeroalueen tarkkuudella (Tompuri 2018, Rakennuslehti).

6 RADONPITOISUUDEN MITTAUS MAAPERÄSTÄ

Radonpitoisuus voidaan mitata myös suoraan maaperästä jo rakennuspaikalla, jolloin rakennuspaikan radonpitoisuus olisi tiedossa jo ennen uudisrakennuksen rakentamista. Radonpitoisuuden mittausta suoraan maaperästä tekevät tällä hetkellä vain muutamat yritykset Suomessa. Eri puolella maailmaa radonmittauksia maaperästä on tehty jo useampia vuosia/vuosikymmeniä.

6.1 Mittausmenetelmiä

Radonpitoisuus maaperän huokosilmasta voidaan mitata esimerkiksi ottamalla ilmanäyte maaperästä maahan asennetun putken avulla. Näyte tulee ottaa mahdollisimman syvältä, vähintään 1 metrin syvyydeltä, koska radonpitoisuus pienenee maan pintaa kohti. Luotettavimman tuloksen aikaansaamiseksi olisi kuitenkin parasta mitata radonpitoisuus noin 2-4 metrin syvyydeltä (Pöllänen 2003, 140).

Radonpitoisuuden mittaus maaperästä voitaisiin tehdä myös sijoittamalla integroiva alfajälki-ilmaisimien maaperään. Mittauksen tehoa kuitenkin heikentää tuulen vaikutus ja erityisesti mahdollisissa harjuolosuhteissa tuulen aiheuttamat ilmavirrat voivat laimentaa huokosilman radonpitoisuutta syvälläkin maaperässä (Pöllänen 2003, 140). Tällä menetelmällä maaperän radonmittaus voitaisiin toteuttaa melko pienillä kustannuksilla, mutta mittausmenetelmän herkkyys tuulen vaikutukselle saattaa vaikuttaa mitaustulosten luotettavuuteen.

Maaperän radonpitoisuutta on mitattu muun muassa kallioperän rakoiluista Yhdysvalloissa. Mittauksissa on käytetty CR-39 ilmaisimia, jotka ovat yleisestikin käytössä Yhdysvalloissa radonpitoisuuden mittauksissa rakennusten sisäilmasta. Maaperän radonpitoisuuden mittauksessa CR-39 ilmaisimet sijoitettiin rei'itettyihin putkiin, jotka olivat asennettu syvälle maaperän ja kallioperän rajapintaan. Putkien ympärille maanpinnalle oli tehty tiivis bentoniittikaulus estämään mm. sadeveden virtaus putken sisälle. CR-39 ilmaisimet olivat putkien sisällä 21 päivää, jonka jälkeen ne poistettiin putkista ja lähetettiin laboratorioon analysoitavaksi (Giles 2012).

Edellä mainittu mittausmenetelmä oli suhteellisen yksinkertainen ja edullinen toteuttaa. Mittausvälineinä tarvittiin ainoastaan maakaira reikien tekemiseen maaperään, johon putket upotettiin sekä lisäksi jokaista reikää kohden hieman bentoniittisavea mittausputkien ympärystä tiivistämiseen. Radonpitoisuuden mittaamiseen maaperästä mittalaitteena käytettiin putkiin sijoitettuja CR-39 ilmaisimia. Kyseessä on passiivinen näytteenotto ja radonmittauksen kesto on melko pitkä luotettavan tuloksen aikaansaamiseksi. Kyseisessä tutkimuksessa mittauksen kesto oli 21 päivää.

Maaperän radonpitoisuutta on mitattu myös mm. Romaniassa Băita-Stein alueella syksyllä 2010. Tässä mittauksessa käytettiin mittauslaitteistona LUK3C (Lucas cell) radonmittaria sekä lisälaitteita. Maaperän radonpitoisuuden mittauksessa käytettiin teräksistä näytteenottoputkea, joka oli asennettu noin 50 cm syvyydelle maanpinnasta. Maaperän huokosilman radon kerättiin ”Janet” –pumpulla, tilavuudeltaan 150 ml. Pumppu oli kiinnitetty näytteenottoputken yläosaan. Mittausten jälkeen pumppuun kerätty maaperän huokosilma asetettiin Lucas Cell- mittalaitteeseen, josta saatiin mitattua maaperän keskimääräinen radonpitoisuus. Tämän menetelmän suorittamisessa yhdessä mittauspisteessä ei kulunut maksimissaan kuin 10 minuuttia aikaa ja kyseessä oli ns. aktiivinen kenttämittaus (Cosma 2013, 174-179).

Edellä mainittu Romaniassa toteutettu mittausmenetelmä soveltuisi lyhyen mittausaikansa vuoksi myös oman yritystoimintamme palveluihin. Aktiivinen, nopea kenttämittaus tuottaisi lyhyellä aikavälillä nopeasti tuloksia maaperän huokosilman radonpitoisuudesta.

6.2 ISO 11665-11:2016- standardi

Mikäli maaperän radonpitoisuutta mitataan suoraan maaperästä, tulee laadukkaan mittauksen ja mittaustuloksen aikaansaamiseksi noudattaa ISO 11665- standardin osan 11 mukaista menetelmää (Holmgren henkilökohtainen tiedonanto 3.4.2019).

ISO 11665-standardin osa 11 kuvaa radonpitoisuuden mittausmenetelmiä maaperästä käyttäen passiivista tai aktiivista, paikan päällä tapahtuvaa mittausmenetelmää maksimissaan 2 metrin syvyydeltä maanpinnasta. Tämän lisäksi standardi määrittää yleiset

kansainväliset vaatimukset radonpitoisuuden mittaamenetelmiin maaperästä. Standardissa kuvatut mittaamenetelmät soveltuvat kaikentyyppisille maaperille (ISO 11665-11:2016).

Radonpitoisuutta maaperästä voidaan mitata suoraan paikan päällä tehtävällä aktiivisella mittaamenetelmällä tai passiivisella, ns. jatkuvalla, pidemmällä aikavälillä tapahtuvalla mittaamenetelmällä.

Aktiivista mittaamenetelmää käytettäessä radonpitoisuus maaperästä mitattuna perustuu näytteenoton määrään, näytteen siirtymisestä näytteenottoastiaan sekä fysikaalisten vaihtelujen (fotonit, sykkeen lukumäärät ja voimakkuudet) mittaukseen, jotka vaikuttavat radonin ja sen hajoamistuotteiden säteilyyn niiden siirtyessä maaperästä näyteastiaan (ISO 11665-11:2016, 3).

Passiivista, pidemmällä aikavälillä tapahtuvaa mittaamenetelmää käytettäessä radonpitoisuus maaperästä mitattuna perustuu näytteenottoastian sijoitukseen maaperään tietyllä tutkimusaikavälillä, diffuusion vaikutuksesta radonkaasun siirtymisestä näyteastiaan sekä fysikaalisista vaihteluista radonin ja sen hajoamistuotteiden säteilyyn niiden siirtyessä maaperästä näytteenottoastiaan (ISO 11665-11:2016, 3).

6.3 Käytettävä mittauslaitteisto

Yritystoiminnassamme maaperän pohjatutkimuksiin liittyvät toimeksiannot saattavat tulla usein melko nopeasti tehtäväksi, joten tässä työssäni yrityksen toiminnan kehittämisessä oli tavoite saada maaperän radonpitoisuudesta melko nopeasti mittaustuloksia. Tämän johdosta perehdyin hieman enemmän aktiiviseen, paikan päällä tehtävään nopeampaan radonmittausmenetelmään, joka soveltuisi hyvin ns. kenttämittaukseen maastossa ja jonka mittaustulokset olisivat saatavilla mahdollisimman nopeasti käyttöön. Seuraavassa olenkin määritellyt yritystoimintaamme parhaiten sopivimman ja nykyisin mm. Suomessa käytetyn mittalaitteiston, joka tuottaa standardin mukaisella menettelytavalla mahdollisimman laadukkaita ja luotettavia mittaustuloksia.

Maaperästä tehtävään radonpitoisuuden aktiiviseen mittausmenetelmään tarvittavia laitteita ovat:

- näytteenottoputki/ maaperäanturi, joka asennetaan suoraan maaperään
- näytteenottoastia, johon maaperän huokosilma kerätään
- radonmonitori ja pumppu, mittauslaite, jolla radonpitoisuuden tulokset analysoidaan
- kevyt vasara maaperäanturin maahan asentamista varten
- muut lisävarusteet

Aktiiviseen, ts. paikalla tehtäviin maaperän radonpitoisuuden kenttämittauksiin on markkinoilla tarjolla em. tarkoitukseen sopiva laitteisto varusteineen:

- Alphaguard DF2000-radonmonitori, sisäisellä pumpulla varustettuna
- maaperäanturi (1m) varusteineen
- anturin jatke (maksimi kokonaispituus 10 m)
- kuljetuslaatikko
- DPS-5000 paine-eroanturi

Seuraavassa on esitetty kuva Alphaguard DF2000- radonmonitorista sisäisellä pumpulla varustettuna (kuva 12), jolloin erillistä pumppua ei tarvita. Lisäksi ko. mittalaite mittaa samalla myös maaperän ilmanläpäisevyyden, kun lisävarusteena käytetään DPS-5000 paine-eroanturia (kuva 15).



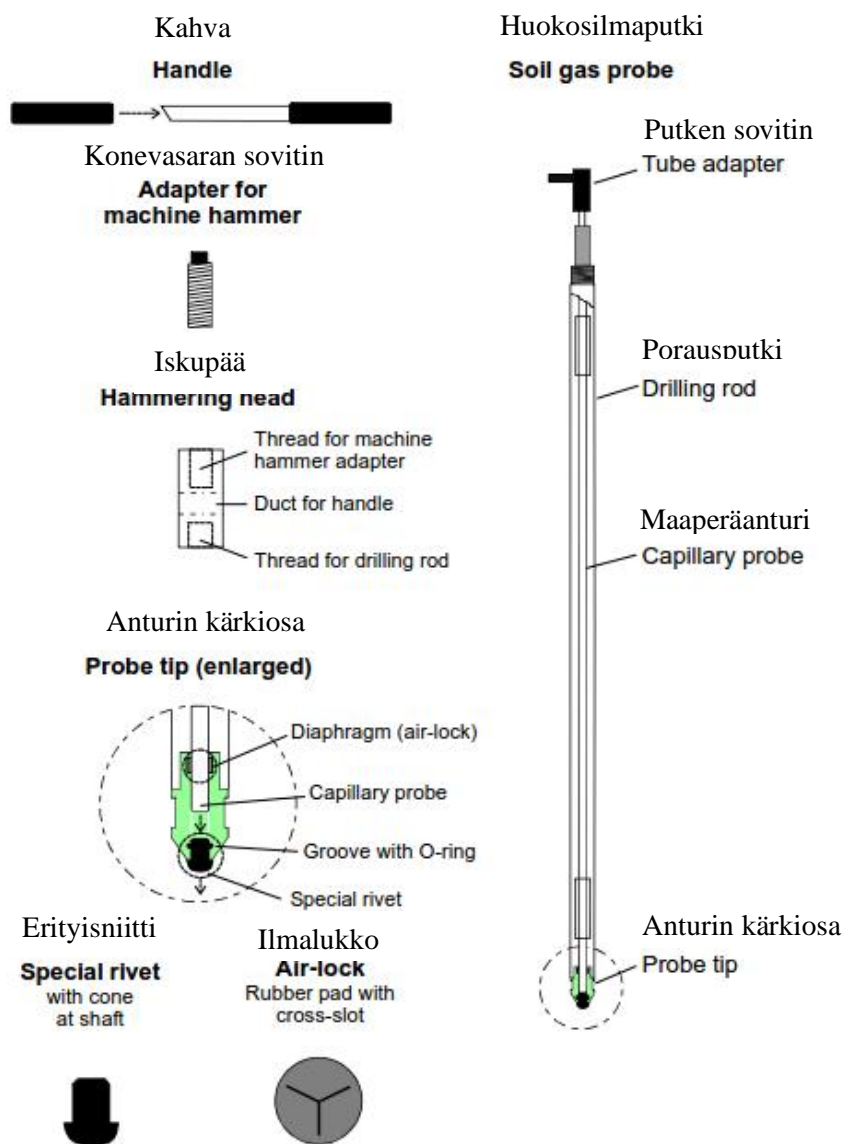
Kuva 12. Alphaguard DF2000 radonmonitori. (Bertin-instruments www-sivut 2019)

Alapuolella on kuva maaperään asennettavasta teräksisestä maaperäanturista varusteineen sekä kuljetuslaatikko niiden kuljetusta varten (kuva 13).



Kuva 13. Maaperäanturi varusteineen sekä kuljetuslaatikko (Bertin-instruments www-sivut 2019)

Seuraavassa on esitetty tarkempi kuva maaperäanturista ja sen eri osista (kuva 14). Kuvassa on esitetty eri osien nimet myös suomeksi (vapaa suomennos).



Kuva 14. Maaperäanturin eri osat (Saphymo GmbH)

6.4 Maaperän ilmanläpäisevyys ja sen mittaaminen

Maaperän radonpitoisuuden selvittämiseksi tulee lisäksi mitata myös maaperän ilmanläpäisevyys tai radonin diffuusiovakio.

Radonin diffuusiovakio kuvaa radonin kulkeutumista diffuusion avulla, jossa aine liikkuu suuremmasta pitoisuudesta kohti pienempää pitoisuutta (Holmgren henkilökohtainen tiedonanto 3.4.2019).

Ilmanläpäisevyys (permeability) on maaperän ominaisuus, joka perustuu kaasujen kyvystä virrata maaperän läpi. Läpäisevyyden SI-yksikkö on neliometri (m²). Käytännössä läpäisevyyden yksikkö on darcy (d), joka johtaa nimensä Henry Darcyn (Darcyn laki) mukaan. 1 darcy on suuruusluokaltaan $\approx 10^{-12}$ m² (Wikipedia 2019).

Maaperän ilmanläpäisevyys riippuu mitattavan maaperän laadusta ja rakeisuudesta. Mikäli mittauspaikan pohjaolosuhteet eli maaperän maakerrokset ovat tiedossa, maalajien ilmanläpäisevyys voidaan saada myös suoraan taulukosta 4.

Taulukko 4. Maalajien ilmanläpäisevyys ja rakeiden läpimitta. (Arvela, Holmgren & Reisbacka 2012, Asuntojen radonkorjaaminen, liite A).

Maalaji tai -lajite	Ilmanläpäisevyys m ² Suuruusluokka	Rakeiden läpimitta mm
Savi	10 ⁻¹⁵	< 0,002
Siltti	10 ⁻¹⁴	0,002 - 0,06
Hiekkamoreeni	10 ⁻¹³	lajittumaton
Soramoreeni	10 ⁻¹²	lajittumaton
Hiekka		0,06 - 2,0
hienohiekka	10 ⁻¹¹	0,06 - 0,2
keskihiekka	10 ⁻¹⁰	0,2 - 0,6
karkeahiekka	10 ⁻⁹	0,6 - 2,0
Sora		2,0 - 60
hienosora	10 ⁻⁹	2 - 6
keskisora	10 ⁻⁸	6 - 20
karkeasora	10 ⁻⁷	20 - 60
Kivet		60 - 600

Nykyisillä uusilla radonmittauslaitteistoilla voidaan mitata maaperän ilmanläpäisevyys samanaikaisesti radonmittauksen kanssa erillisen paine-eroanturin avulla.

Paine-eroanturi kytketään Alphaguard DF2000- laitteen huokosilmasäiliön tuloaukkoon. Laite mittaa ja tallentaa samanaikaisesti maaperän ilmanläpäisevyyden ja radonpitoisuuden sekä välittää tiedon eteenpäin Alphaguard DF2000-laitteistolle muuntamista ja tallentamista varten. Lisäksi se suojaa sisäistä kaasupumppua yli- tai alipaineelta erityisellä sulkuominaisuudella (Bertin Instruments Oy. Radon Product Ranges-catalogue 2019-01, 7).

Alla on esitetty kuva DPS-5000 paine-eroanturista.



Kuva 15. DPS-5000 Paine-eroanturi (Bertin-instruments www-sivut 2019)

Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) maankamara -verkkosivuilta löytyy maaperäkartoja sekä pohjatutkimusrekisteri, jotka antavat tietoa maaperän pohjaolosuhteista. Maaperäkartoista saatava tieto maaperästä perustuu melko laajaan alueeseen ja maaperän pohjaolosuhteet voivat muuttua huomattavasti jo lyhyehkölläkin välimatkalla, jolloin se tulee ottaa huomioon maaperän radonpitoisuuden mittaustuloksen määrittelyssä.

6.4.1 Ilmanläpäisevyys eri rakennusmateriaaleilla

Suomessa tyypillisemmin käytetty ilmanläpäisevyyden L , yksikkö esimerkiksi rakennusmateriaaleille on $\text{m}^3/(\text{msPa})$. Ilmanläpäisevyyden L määrittelee lauseke:

$$L = k/\eta$$

missä

k = huokoisen aineen permeabiliteetti ilman suhteen, m^2

η = ilman dynaaminen viskositeetti vakio- lämpötilassa , $(\text{N s})/\text{m}^2$

(RIL 225-2004, 33).

Seuraavassa on esitetty vertailun vuoksi muutamien rakennusmateriaalien ilmanläpäisevyyden suureita:

- Kuusi $8,3 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3/(\text{msPa})$
 - Betoni $3,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3/(\text{msPa})$
 - Tiili $8,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{msPa})$
 - EPS-lämmöneriste $4,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{msPa})$
 - Kivivillalevy $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{msPa})$
- (RIL 255-1-2014, 461)

Ohessa taulukko ilmavirtausteknisten suureiden muunnosesimerkeistä.

Taulukko 5. Ilmavirtaussuureiden muunnosesimerkkejä (RIL 225-2004, 33).

Ilmanläpäisevyys, L	Permeabiliteetti, k	Ilmanläpäisyn ominaisvastus, R_a
$\text{m}^3/(\text{m s Pa})$	m^2	$(\text{kPa s})/\text{m}^2$
$10 \cdot 10^{-6}$	$0,18 \cdot 10^{-9}$	100
$50 \cdot 10^{-6}$	$0,9 \cdot 10^{-9}$	20
$100 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-9}$	10
$200 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-9}$	5
$400 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-9}$	2,5
$800 \cdot 10^{-6}$	$14,4 \cdot 10^{-9}$	1,25
$1500 \cdot 10^{-6}$	$27 \cdot 10^{-9}$	0,67
$3000 \cdot 10^{-6}$	$54 \cdot 10^{-9}$	0,33
$5000 \cdot 10^{-6}$	$90 \cdot 10^{-9}$	0,2

6.5 Virhelähteet

Radonpitoisuuden mittaustulokseen vaikuttavat mittaustaikojen ympäristön sekä maaja kallioperän vaihtelut. Tämän vuoksi standardin mukaisten mittausten menetelmien käyttö on tarkoitettu varmistamaan laadukas mittaus sekä tarkat ja yhteensopivat menetelmät, jolloin mittaustulokset ovat helpommin verrattavissa toisiinsa mittaustilanteesta ja -paikasta riippumatta (ISO 11665-11:2016).

Maaperän läpäisevyys on tärkein parametri, kun arvioidaan radonin kulkeutumista maaperässä. Maaperä on heterogeeninen väliaine, jonka vuoksi saman tontin alueella voi esiintyä useampaa maalajia, esim. moreenia, kalliota ja silttiä eri kohdissa ja eri syvyyksillä maaperässä. Jotta maaperän läpäisevyydestä saataisiin mahdollisimman

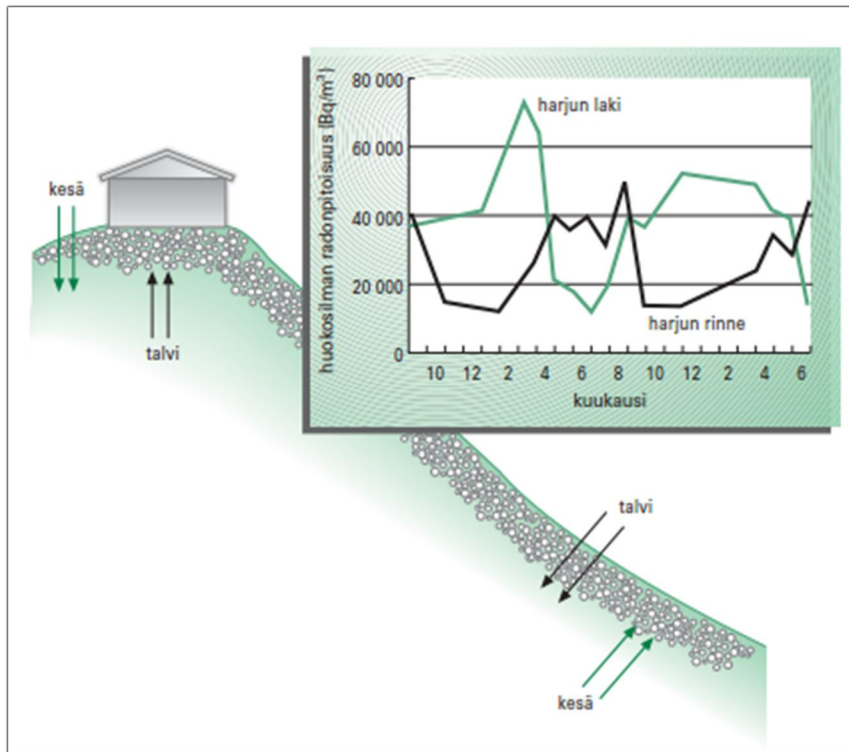
edustava kuva, tulisi maaperään tehdä useita läpäisevyysmittauksia tontin eri kohdista ja eri syvyyksiltä (Säteilyturvakeskus, kansallinen toimintasuunnitelmaluonnos, 22).

Mikäli maaperän radonmittaukset tehdään rakentamattomaan maaperään, voivat mitaustulokset antaa todellisuutta vääristävän kuvan. Kun tontille/ alueelle rakennetaan kunnallistekniikka, voivat radonin kulkeutumisolosuhteet olla hyvinkin erilaiset kuin ennen kunnallistekniikan rakentamista (Säteilyturvakeskus, kansallinen toimintasuunnitelmaluonnos, 22).

6.5.1 Ajallinen ja spatiaalinen (3D) vaihtelu

Maaperän radonpitoisuuden mitaustulokseen vaikuttavat huomattavasti erilaiset ajalliset kausivaihtelut, kuten eri vuorokausina sekä -tunteina tapahtuvat muutokset mitauspaikan ympäristössä. Näitä ovat mm. tuulen ja lämpötilan aiheuttamat muutokset. Esimerkiksi jo mittauksen aikana maaperästä otettu huokosilmanäyte saattaa laimeta tuulen vaikutuksesta ja sen voimakkuudesta riippuen. Näin ollen hetkellinen kenttämittaus ei anna täysin todellista kuvaa mitauspaikan huokosilman radonpitoisuudesta pidemmällä aikavälillä.

Harjualueilla radonpitoisuuden vaihtelua kasvattavat muutokset maaperän huokosilman radonpitoisuudessa. Tuuli ja lämpötilaero aiheuttavat esimerkiksi harjun sisäisiä ilmavirtauksia. Harjun yläosassa voi olla talvella sulia kohtia harjun sisäisten lämpimien ilmavirtausten noustessa ylöspäin. Kylmä ilma kulkeutuu rinnealueella harjun sisään, mikä lisää myös maan routimista. Kesäaikaan ilmavirtaukset kulkeutuvat taas päinvastoin. Kuvassa 16 on esitetty huokosilman radonpitoisuuden vaihtelu harjun laella ja rinteessä (Pöllänen 2003, 132).



Kuva 16. Huokosilman radonpitoisuuden vaihtelu harjun laella ja rinteessä (Pöllänen 2003, 133)

Jyrkkärinteisten harjujen lakialueilla olevissa rakennuksissa voi radonpitoisuus olla talvella kymmenkertainen kesäaikaan verrattuna. Alarinteessä olevissa rakennuksissa radonpitoisuus voi olla taas kesällä suurempi kuin talvella (Pöllänen 2003, 132).

Radonpitoisuus maa- ja kallioperässä vaihtelee myös vaaka-, sekä pystysuuntaisesti. Tähän spatiaaliseen (3D) vaihteluun vaikuttaa mm. seuraavat maaperän parametrit:

- Uraanin ja radiumin määrä maa- ja kallioperässä
- Maalajin raekoko, läpäisevyys, huokoisuus, kosteus, vesipitoisuus ja tiheys
- Kvartaarisen muodostuman paksuus, kallioperän laatu, kerroksellisuus
- Maaperän rakenne, muodonmuutokset, halkeamat
- Hydrologiset ja geodynaamiset prosessit; kaasumaisten ja nestemäisten aineiden siirtyminen huokosissa ja rakoillussa ympäristössä, radium ja radon maanalaisissa pohja/rakovesissä.
- Alueen sijainti, notko, rinne, rinteän yläosa
- Ulkoiset ja meteorologiset tekijät, lämpötila, paine, lumentulo

(ISO 11665-11:2016, introduction)

Tsekkiläisen vuonna 1990 perustetun radontutkimuksiin erikoistuneen yrityksen (RADON v.o.s) vuosien kokemuksen mukaan, spatiaalinen vaihtelu maaperän radonpitoisuudessa on merkittävämpi kuin ajallinen vaihtelu. Maaperän radonpitoisuus voi vaihdella huomattavan paljon pienilläkin etäisyyksillä. Esimerkiksi maankuoren rakoilut tai rikkonaisuudet voivat aiheuttaa heterogeenistä vaihtelua myös radonpitoisuudessa. Alueet, joissa on homogeeninen eli tasalaatuinen geologinen rakenne sekä radonpitoisuus ovat harvinaisia, joten mikä tahansa radonpitoisuuden arviointi, joka perustuu vain yhteen mittaukseen rakennuspaikalla, on melko huono. Toisaalta taas spatiaalisen vaihtelun olemassaolo antaa merkittävän syyn miksi rakennusten mahdollisten radonsuojausten käytön määrittelyn tulisikin perustua rakennuspaikan maaperän tutkimukseen ja mittaukseen, eikä suuriin mittakaavoihin perustuviin radonriskialueiden karttoihin (radon.eu -www-sivut 2018).

6.5.2 Näytteenottomenetelmän vaikutus

Maaperän huokosilman radonpitoisuuden mittaustuloksen luotettavuuteen vaikuttavat myös virheelliset näytteenottomenetelmät. Tällaisia ovat mm. halkaisijaltaan liian pieni näytteenottoputki, joka on asennettu esimerkiksi aiemmin kairattuun, halkaisijaltaan isompaan reikään. Mikäli maa näytteenottoputken ympärillä ei ole riittävän tiivis, mittaustulokset eivät anna luotettavaa tietoa, koska mahdollisuus huokosilman laimenemisestä ulkoilmaan on hyvin suuri (ISO 11665-11:2016, 17).

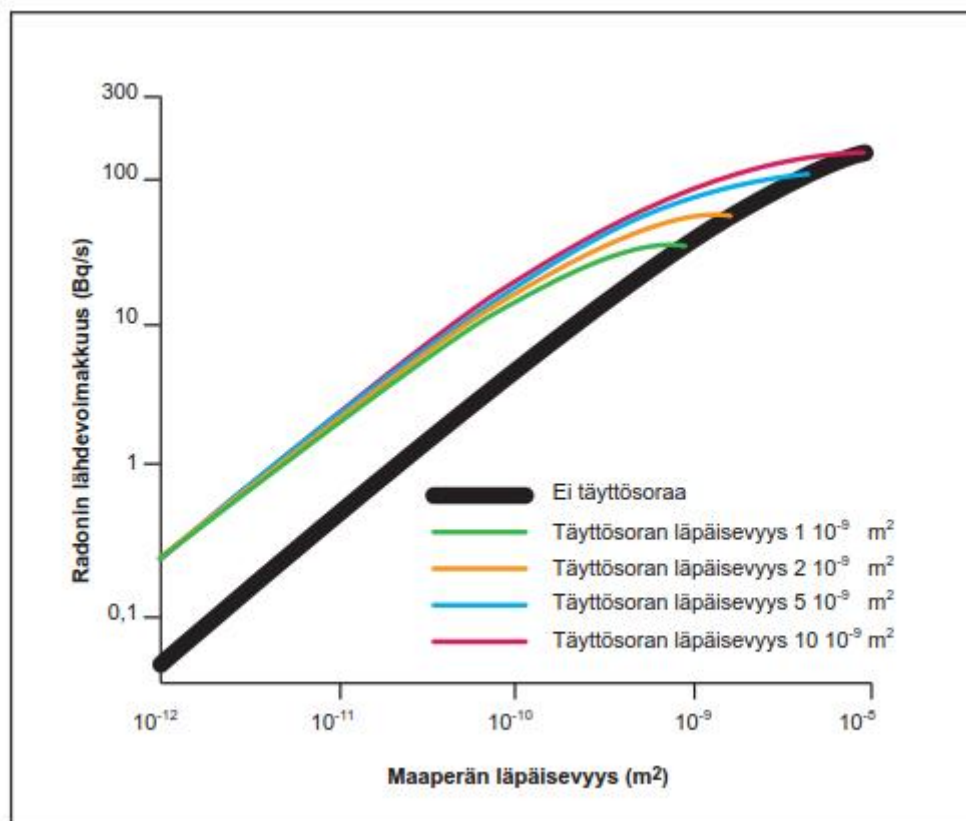
7 RADONPITOISUUDEN MITTAUS RAKENNUSPOHJAN TÄYTTÖMATERIAALEISTA

Uudisrakennuksissa paksujen ja karkeiden täyttömaiden käyttö kasvattavat myös radonpitoisuutta rakennuksen alapohjassa, vaikka sora itsessään ei tuottaisi radonia. Rakennuksen alapohjaan sijoitettavat täyttömaat ovat usein hyvin ilmaa läpäiseviä, jolloin maaperän radon pääsee kulkeutumaan ilmavirtausten mukana paremmin rakennuksen sisäilmaan.

Rakennuspohjan radonriskiin vaikuttavat aina alkuperämaan lisäksi paikalle tuotavat täyttömaat ja salaojasorat. Paksu täyttömaakerros esimerkiksi savimaalle tuotuna voi jo yksinään tuottaa rakennuksen sisätiloihin enimmäisarvon 200 Bq/m³ ylittäviä radonpitoisuuksia. Lisäksi laatan alla oleva alkuperäismaata läpäisevämpi kiviaines saattaa kasvattaa rakennuksen sisäilman radonpitoisuutta myös jo karkeutensa johdosta (RIL 121-2004, 44).

Rakennuspohjan täyttöihin käytettäville soralle tai murskeelle tulisi tehdä radonkaasuanalyysi, mikäli käytettävä kiviaines on peräisin radonkriittiseltä alueelta (RIL 132-2000, 65).

Kuva 17 esittää mallilaskujen antamaa radonpitoisen ilman virtaamista rakennuksen sisätiloihin. Kuvassa virtaus on annettu radonvirtauksena (Bq/s). Esimerkiksi 10 Bq/s vastaa kuvan esimerkissä radonpitoisen ilman virtausta, joka on noin 0,3 l/s (1m³/h). Laatan alle laitettava 15 cm paksu täyttöSORA, joka on alkuperäismaata läpäisevämpää, kasvattaa vuotovirtausta tekijällä 3-5. Vuotovirtauksen kasvu johtuu läpäisevän maa-aineksen pienemmästä virtausvastuksesta. TäyttöSORAN radontuotto ei ole kuitenkaan merkitsevää, mikäli sen ilmanläpäisevyys on samaa suuruusluokkaa kuin rakennuspohjan alkuperäismaa (Arvela, Holmgren & Reisbacka 2012, Asuntojen radonkorjaaminen, liite A).



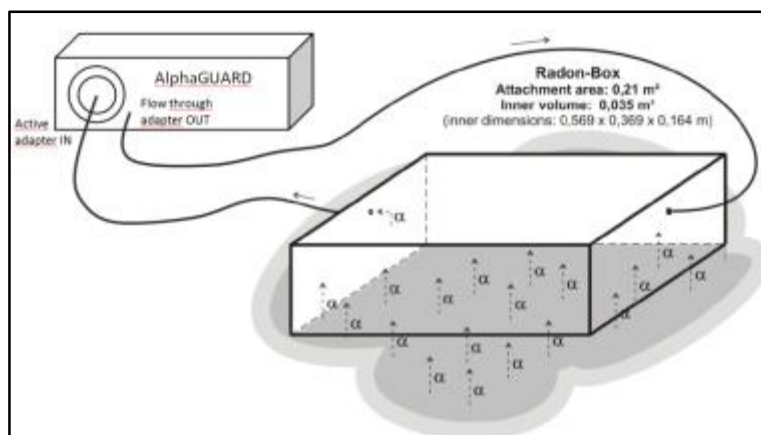
Kuva 17. Radonin virtausnopeus kellarilliseen asuntoon (Arvela, Holmgren & Reisbacka 2012, Asuntojen radonkorjaaminen, liite A)

Kuvassa 17, X-akselin vasemmassa reunassa oleva maaperän ilmanläpäisevyys 10^{-12} m² edustaa maa-ainesta, jossa on runsaasti hienoainesta, esimerkiksi sora-moreenia. Suurinta läpäisevyyttä 10^{-8} m² edustaa jo melko karkea sora-aines. Kuvassa käytetyt täyttösora-ainekset, joiden ilmanläpäisevyys on 10^{-9} m²... 10^{-8} m² ovat seulottua soraa, jonka raekoko on useista millimetreistä kymmeneen millimetriin, joka edustaa tyyppillistä Suomessa käytettävää täyttösoraa. Murskattu sepeli on vieläkin läpäisevämpää (Arvela, Holmgren & Reisbacka 2012, Asuntojen radonkorjaaminen, liite A).

7.1 Käytettävä mittauslaitteisto

Maaperän radontuotto 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 (Pöllänen 2003, 140).

Seuraavissa kuvissa on esitetty erilaisia vaihtoehtoisia menetelmiä maanäytteen, esimerkiksi uudisrakennuksen täyttösoran radonpitoisuuden mittaukseen. Kuvassa 18 maanäyte on asetettu suljettuun, ilmatiiviiseen laatikkoon. Laatikossa (kuva 19) muodostunut maanäytteen radonpitoisuus voidaan mitata esim. AlphaGUARD- radonmonitorilla.



Kuva 18. Radonpitoisuuden mittaus maanäytteestä (Bertin-instruments www-sivut 2019).



Kuva 19. Ilmatiivis laatikko maanäytteen radonpitoisuuden mittaamiseen (Bertin-instruments www-sivut 2019).

Maanäytteen radonpitoisuus voidaan myös mitata suljetusta ionisaatiokammioista (kuva 20).



Kuva 20. Ionisaatiokammio (ISO 11665-11:2016, 15).

7.2 Täyttömateriaalien radonpitoisuuden valvonta

Paikalle tuotavan täyttömateriaalin kiviaineksen vaikutus sisäilman radonpitoisuuteen tulee torjua ensisijaisesti radonturvallisilla perusratkaisuilla. Erittäin poikkeuksellisissa tapauksissa, joissa on tiedossa maa-aineksen korkea uraanipitoisuus, tulee harkita paikalle tuotavan maa-aineksen käytöstä luopumista. Tällaisessa tapauksessa tulee selvittää alkuperäisen rakennusmaan, täyttösoran ja valitun perustustavan kokonaisvaikutus radonteknisen ratkaisun toimivuuteen (Säteilyturvakeskus [www-sivut](http://www.sateilyturvakeskus.fi) 2019).

Kiviainestoimittajien suhtautuminen radonriskeihin vaihtelee, koska Säteilyturvakeskuksen ohjeita ei mielletä velvoittaviksi. Uudessa säteilylainsäädännössä toimijoiden vastuu säteilyturvallisuudesta mahdollisesti korostuu aiempaa selkeämmin. Suurien kiviainestoimittajien keskuudessa on vakiintunut käytäntö, jonka mukaan uudelta louhokselta toimitetaan näytteitä Säteilyturvakeskukselle analysoitavaksi. Säteilyturvakeskus ottaa kantaa, voiko kiviainesta käyttää talonrakentamiseen vai tarvitaanko lisää selvityksiä. Myös talonrakentamisessa käytettävällä kiviaineksella on ”aktiivisuusindeksi”, joka kuvaa kyseisen kiviaineksen sisältämän gammasäteilyn määrää. Jos indeksi on alle yhden, sen perusteella voidaan päätellä radonriski turvallisen pieneksi. Jos taas indeksi on yli yhden, niin tilannetta tulee seurata. Kiviainesten uusintamittausten tarve riippuu siitä, miten alhainen aktiivisuusindeksi on (Tompuri 2018, Rakennuslehti).

Suomessa talonrakennustuotantoon käytettyjen kivi- ja mineraalimateriaalien radioaktiivisuus mitataan, jos on syytä epäillä, että ohjeen ST 12.2 (Rakennusmateriaalien ja tuhkan radioaktiivisuus) mukainen toimenpidearvo ylittyy. Mittaustuloksista (torium-232, radium-226, kalium-40 ja cesium-137) lasketaan aktiivisuusindeksi, jolla voidaan arvioida ylittääkö gammasäteilystä aiheutuva vuotuinen efektiivinen annos rakennuksissa arvon 1mSv. Näin ollen tulee myös soran radium-226-pitoisuus tutkittua. Jos täyttösoran radium-226-pitoisuus on yli 100 Bq/kg, ei sitä tyypillisesti voida käyttää talonrakennustuotantoon ja voimakkaasti radonia tuottavia materiaaleja ei päädy rakennusten täyttösoriksi edellyttäen, että toiminnanharjoittajat noudattavat mittausvelvoitettaan. (Säteilyturvakeskus, kansallinen toimintasuunnitelmaluonnos, 23).

8 MENETELMÄOHJEET MAAPERÄN RADONMITTAUKSEEN

8.1 Mittauskalusto, investointikustannukset ja käyttöönotto

Maaperän radonmittaus ns. aktiivisena kenttämittauksena voidaan suorittaa esimerkiksi alla olevalla mittauskalustolla:

- Alphaguard DF2000 sisäisellä pumpulla varustettuna
- Maaperäanturi (1m) varusteineen
- Maaperäanturin kuljetuslaatikko
- Anturin jatke, maksimipituus 10 metriä
- DSP-5000 paine-eroanturi

Taulukossa 6 on esitetty edellä mainitun mittauskaluston ja siihen liittyvien varusteiden investointikustannukset. Mittauslaitteiston hintatiedot ovat päivätty maaliskuussa 2019.

Taulukko 6. Mittauskaluston investointikustannukset

Laitteisto	Hinta (€) +alv*
1 kpl AlphaGUARD DF2000 sisäisellä pumpulla varustettuna	14000
1 kpl Maaperäanturi (1m) varusteineen	1250
1 kpl Kuljetuslaatikko maaperäanturille	615
1 kpl Anturin jatke = 1m (maksimipituus 10m)	475
1 kpl DSP-5000 paine-eroanturi	850
Yhteensä	17190

*) Hintatiedot päivätty 03/2019 (Bertin-Instruments Oy)

Mittalaitteen kokonaiskustannukset tarvikkeineen kustantavat yhteensä 17 190 €+ alv. Laitte toimitetaan tilaajalle kalibrointitodistuksella. Laitteen toimitus sisältää myös laitteiston käyttökoulutuksen.

8.2 Mittaustyön suunnittelu

Maaperästä tehtävän radonpitoisuuden mittauksen tavoite on saada mahdollisimman edustava näyte maaperän huokosilmasta, välttäen mahdollisimman paljon näytteenottoon vaikuttavia häiriötekijöitä. Näytteenottoa häiritseviä tekijöitä voivat olla esimerkiksi hyvin tuulinen sää tai runsasluminen maasto. Mittaustyön hyvä suunnittelu edesauttaa hyvin onnistunutta näytteenottoa. Esimerkiksi ennen varsinaista kenttämittausta tulee perehtyä mittauspaikan olosuhteisiin sekä selvittää maaperän pohjasuhteet. Mikäli mittauspaikalla tai sen välittömässä läheisyydessä on aiemmin tehty maaperän pohjatutkimuksia, on niistä löytyvä tieto erittäin hyödyllistä. Jos mittauspaikan pohjatutkimustietoja ei ole saatavilla, voi yleisesti saatavilla olevista Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) verkkosivuilta löytyvistä maaperäkartoista olla apua mittauspaikan maaperän tulkitsemisessä. Tietysti jos suinkin mahdollista ajan ja resurssien puitteissa, käynti mittauspaikalla ennen varsinaista mittaustyötä edesauttaa mittauspaikan olosuhteiden hahmottamista sekä helpottaa mittaustyön suunnittelua.

Mittaustyön suunnitteluun kuuluu mm. rakennuspaikalle sijoitettavan mittauspisteen/mittauspisteiden sijainnin sekä määrän määrittäminen. Normaalikokoisen omakotitalon rakennuspaikalla saattaisi riittää 1 tai 2 mittauspistettä, mikäli pohjaolosuhteet rakennuspaikalla ovat melko homogeeniset. Pinta-alaltaan suurempien rakennuskohteiden esim. päiväkodit, kerrostalot jne. mittauksessa voisi tulla suurempien mittauspisteiden lukumäärä kysymykseen. Rakennuspaikan sijainti maaperäolosuhteiden lisäksi vaikuttaa myös mittauspisteiden lukumäärään. Mikäli rakennus sijaitsee esimerkiksi harjun/rinteen juuressa, voisi olla syytä tehdä useampia mittauksia eri kohdista rakennuspaikalla. Joka tapauksessa hyvä ennakkotieto rakennuspaikan olosuhteista on tärkeä edellytys hyvin sujuvalle maaperän huokosilman radonpitoisuuden näytteenotolle ja siitä saataville luotettaville tuloksille.

8.3 Maastotyö

Maaperän huokosilman radonpitoisuuden näytteenotto perustuu pienellä, kooltaan 12/2 mm ontolla teräsputkella otettuun ilmahavaintoon maaperästä. Nopea kenttämittaus (aktiivinen mittaus) mittaa juuri mittaushetkellä olevan maaperän huokosilman

sen hetkisen radonpitoisuuden. Mittaus perustuu negatiivisella paineella teräsputkesta ulosvedettyyn maaperän huokosilmanäytteeseen pumppua käyttäen (ISO 11665-11:2016).

Näytteenottoputken suositeltava asennussyvyys maaperään on vähintään 1 metri. Putken minimisyvyys riippuu kuitenkin maaperän ominaisuuksista mittauspaikalla sekä käytettävästä mittausmenetelmästä. Putken asennussyvyys riippuu lisäksi maaperän huokosilmanäytteen määrästä eli tilavuudesta. Myös joitain hyvin pienehköjä standardista poikkeavia työtapoja voidaan käyttää mittauksen suorittamisessa. Joissain tapauksissa esimerkiksi maaperän huokosilmanäytettä ei voida ottaa 1 metrin syvyydeltä. Tähän voi olla syynä mm. maaperän huono läpäisevyys, pohjavedenpinnan korkeusasema tai kallion sijainti maaperässä. Tällöin jos maaperän läpäisevyys on esimerkiksi erittäin huono, näytteenottoputken alaosan ilmarakoa voidaan laajentaa ”peruuttamalla” putkea noin 0,1...0,15 metriä lähemmäksi maanpintaa (ISO 11665-11:2016, 15).

Joissain tapauksissa aktiivista näytteenottoa ja mittausmenetelmää käytettäessä, maaperän huokosilmanäyte tulee suodattaa ennen sen siirtämistä havaintoastiaan. Suodatin suodattaa olemassa olevat radonin hajoamistuotteet sekä maaperän kosteuden ja estää niiden pääsyn havaintoastiaan. Mikäli näytteenoton ja näytteen mittauksen aloittamisesta on enemmän kuin 3 tuntia aikaa, niin suodatusta ei tarvita (ISO 11665-11:2016, 5).

Maaperän huokosilman ulospumppauksen aikana paine huokosilmassa vähenee ja siitä johtuen vaikuttaa vaiheen ja liuoksen tasapainotilaan. Rajoitettaessa tätä vaikutusta näytteenoton yhteydessä, näytteen tilavuuden tulisi olla < 1 litra ja virtausnopeuden maksimissaan 2 l/min. Maaperässä, joka on huonosti läpäisevää ja jossa on pieni rakoilisuuden huokostilavuus, tulisi käyttää tätäkin alhaisempia virtausnopeuksia (ISO 11665-11:2016, 5).

8.3.1 Alkuvalmistelut ja muut työvaiheet

Ennen varsinaista näytteenottoa tulee kirjata ylös näytteenoton aika ja paikka, näytteenottoputken asennussyvyys sekä sääolosuhteet mittaushetkellä. Myös valokuvat mittauspaikalta havainnoivat näytteenoton olosuhteita.

Aluksi näytteenottoputkessa kiinni oleva terävä kärkiosa asennetaan näytteenottoputken alapäähän (kuva 21). Putkessa kiinni olevan terävän kärkiosan tarkoitus on helpottaa putken tunkeutumista maahan, sekä sulkea putki tiivistä, ettei maahan asentamisen aikana maaperästä pääse maata putken sisälle.

Mikäli maaperä on erityisen tiivistä tai kovaa tai käytetään esimerkiksi koneellista asennusta, voidaan näytteenottoputken maahan asentamisessa käyttää vahvempaa ”porausputkea” (Drilling rod, kuva 14). Asennuksen jälkeen maaperäanturi (Capillary probe, kuva 14) asennetaan porausputken sisälle. Maaperäanturin ollessa porausputken sisällä se tunkeutuu maaperään porausputkessa olevan ilmalukon lävitse, jolloin ympäröivä ulkoilma ei pääse putken asennuksen yhteydessä putken sisälle (Saphymo GmbH 2017, 46).

Ennen näytteenottoa tulee tarkistaa, että kaikki näytteenotossa tarvittava laitteisto ovat puhtaita ja ehjiä. Lisäksi näytteenottoputken kaikki osat tulee tiivistää huolellisesti, ennen putken asentamista maaperään sekä lisäksi varmistaa, että putken sisällä ei ole esteitä, jotka voisivat heikentää maaperän huokosilman virtaamista putken sisällä.



Kuva 21. Näytteenottoputken kärkiosan asentaminen (ISO 11665-11:2016, 12).

8.3.2 Tutkimuksen suoritus

Näytteenottoputki eli anturi, jossa terävä kärkiosa on asetettu paikoilleen, asennetaan suunniteltuun näytteenottoaikaan (kuva 22). Suositeltava asennussyvyys on vähintään 1 metri. Putkea asennettaessa maahan, tulee varmistaa, ettei putken ympärille maahan jää mahdollisia vuotokohtia, josta maaperän huokosilmaa voisi haihtua pois maaperästä mittauksen aikana.



Kuva 22. Näytteenottoputken asentaminen maaperään (ISO 11665-11:2016, 12)

Putken yläpäähän asennetaan teräksinen ”iskupää”, joka estää näytteenottoputken yläpään vaurioitumisen lyöäessä putkea maahan. Putki lyödään suunniteltuun syvyyteen käyttäen apuna kevyttä vasaraa (kuva 23).



Kuva 23. Näytteenottoputken teräksisen iskupään asentaminen (ISO 11665-11:2016, 12,13)

Kun näytteenottoputki on asennettu suunniteltuun syvyyteen maaperässä, putken alapäässä oleva terävä kärkiosa lasketaan muutamia senttimetrejä putken alapäätä alemmaksi. Tämä tapahtuu niin, että näytteenottoputken sisälle laitetaan pienempi ”teräspankki”, jota lyödään näytteenottoputken sisällä alaspäin niin kauan, että terävä kärkiosa irtoaa putken alapäästä ja laskee muutaman senttimetrin näytteenottoputken alapäätä alemmaksi. Tähän tarkoitukseen voidaan käyttää vasaraa (kuva 24).



Kuva 24. Näytteenottoputken alapään kärkiosan irrottaminen (ISO 11665-11:2016,13)

Kärkiosan irrottua putken alapäästä alemmaksi maaperään (huom. kärkiosa on edelleen kiinni näytteenottoputkessa, jotta se saadaan vedettyä pois maaperästä), saadaan

tarvittava muutaman sentin ilmarako putken alapäähän, jonka kautta voidaan imeä maaperän huokosilmaa.

Lopuksi näytteenottoputken yläosaan kiinnitetään pumppu tai ruisku, käyttäen putken ja pumpun välissä pientä palaa tiivistä kumiputkea (kuva 25).



Kuva 25. Näytteenoton valmistelu (ISO 11665-11:2016,14).

Maaperän huokosilmaa imetään ensin putkesta ruiskulla tai pumpulla, jonka jälkeen ruisku tai pumppu irrotetaan. Mikäli mittaus suoritetaan ruiskulla, kumiputki pidetään tiiviisti suljettuna ensimmäisen ja toisen huokosilman näytteenoton välillä (kuva 26).



Kuva 26. Maaperän huokosilman imeminen ruiskulla (ISO 11665-11:2016,14)

Ja huokosilmaa imetään ruiskulla näytteenottoputkesta vielä toisen kerran (kuva 27).



Kuva 27. Maaperän huokosilman mittaus ruiskulla (ISO 11665-11:2016,14)

Mittauksen jälkeen maaperän huokosilmanäyte on valmis vietäväksi eteenpäin analysoitavaksi.

Käytettäessä mittauksessa AlphaGUARD DF2000- radonmonitoria sisäisellä pumpulla varustettuna, tulee ISO- standardin mukaisia ohjeita soveltaa mittauksessa.

Mikäli maaperän huokosilman näytteenotto putkesta mitattuna jostain syystä epäonnistuu, tulee suorittaa uusi mittaus noin kahden metrin etäisyydeltä alkuperäisestä mittauspaikasta (ISO 11665-11:2016).

8.3.3 Tutkimuksen päättäminen

Näytteenoton suoritettua, näytteenottoputki poistetaan varovasti maasta ja putken terävä kärkiosa, putki sekä muut näytteenotossa käytetyt osat puhdistetaan. Lisäksi näytteenottovälineiden kunto tarkistetaan. Näytteenotossa mahdollisesti rikkoutuneet osat tulee vaihtaa.

8.4 Laboratorioanalyysit ja tulokset

Näytteen analysointi tulee tehdä aikaisintaan 3 tuntia mittauksen suorittamisesta, jolloin maaperän radonkaasun hajoamistuotteet, kuten radium ehtii haihtua huokosilmanäytteestä. Maaperän huokosilman radonpitoisuus voidaan analysoida myös mittauspaikalla, edellyttäen että mittauksen suorittamisesta on kulunut vähintään 3 tuntia aikaa. Analyysit voidaan suorittaa myös myöhemmin esim. toimistossa tai maalaboratoriossa.

Käytettäessä mittauksessa AlphaGUARD DF2000- radonmonitoria, monitorin mukana toimitetaan tietokoneohjelma tulosten raportointia varten. Ohjelma lukee monitorissa olevan mittausdatan tietokoneelle ja tulostaa mittauksista visuaalisen diagrammin. Mittaustulokset ovat myös mahdollista siirtää Excel-taulukkoon, jossa taulukosta voi muokata itselleen sopivan tulosten raportointia varten.

8.4.1 Mittaustulosten raportointi

Maaperän huokosilmanäytteen radonpitoisuudesta laaditaan tulosraportti asiakasta varten. Tulosraportin tulee vastata vaatimuksiltaan ISO/IEC 17025 mukaista standardia ja sisältää mm. seuraavat asiat:

- viittaus mittausmenetelmissä käytettyyn standardiin ISO 11665-11
- mittausmenetelmä, sisältäen tiedot mittalaitteesta ja mittausparametreista
- näytemerkintä
- näytteenottomenetelmä (aktiivinen, passiivinen)
- näytteenoton aika (päiväys, kellonaika)
- näytteenoton kesto
- näytteenoton sijainti
- näytteen tilavuus
- näytteenottosyvyys
- yksiköt, joilla tulokset ovat ilmaistu
- testitulokset $C \pm u(C)$ tai $C U$, mukaan lukien täydentävä k arvo

Täydentävää tietoa esimerkiksi mittauksen tarkoituksesta sekä todennäköisyyksistä α , β ja $(1-\gamma)$

- päätös radonriskeistä, radonmittaustuloksesta sekä annetuista havaintorajoista riippuen
- maininta muista lisätiedoista, kuten esimerkiksi sääolosuhteista sekä maaperän vesipitoisuudesta näytteenoton aikana (ISO 11665-11:2016, 8-9).

9 RADONIN TORJUNTA UUDISRAKENNUKSESSA

Rakennustiedon ohjeen (RT 81-11099) mukaan radonin huomioonottaminen suunnittelussa ja rakentamisessa koko maassa on aina hyvin perusteltua. Ympäristöministeriön asetuksessa pohjarakentamisesta, 4§ Geotekninen suunnittelu, on myös ohjeistettu, että mikäli radonia ei huomioida suunnittelussa, tulisi kirjalliset perustelut liittää rakennuskohteen suunnitelma-asiakirjoihin.

Radontekniset ratkaisut esitetään rakennesuunnitelmissa tai erillisessä radonteknisessä suunnitelmassa. Suunnitelmista tulee näkyä rakennusosien tiivistysratkaisut ja rakennuspohjan tuuletusjärjestelmä (RT 81-11099, 2).

Radontorjuntatoimien vaatiminen rakennuslupakäytännön yhteydessä sekä toimenpiteiden laajamittainen ja huolellinen toteuttaminen koko maassa saattaa vähentää radonpitoisuuksia yli 50 % nykyiseen pientalokannan tilanteeseen verrattuna. Torjuntatoimenpiteillä on merkittävä suomalaisten radonaltistusta ja radonin terveyshaittoja pienentävä vaikutus tulevina vuosikymmeninä (Arvela, Mäkeläinen, Holmgren & Reisbacka 2010, 8-9).

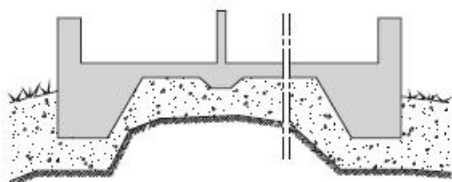
9.1 Perustusratkaisut

Radonia vapautuu maaperästä rakennuspaikasta riippumatta aina jossain määrin. Radon tulisikin huomioida jokaisessa uudisrakennuksessa, maaperän vähäisestä radonpitoisuudesta huolimatta, vähintään perustusten tiivistämisen osalta RT 81-11099 -ohjeistuksen mukaisesti. Näin menetellen voidaan vähentää jo huomattavasti sisäilmaan kulkeutuvan radonin määrää.

Erilaisten perustusratkaisujen valinnalla voidaan vaikuttaa merkittävästi uudisrakennuksessa tarvittavien radonteknisten ratkaisujen määrään. Alueilla, joilla on asuntojen huoneilmassa todettu erittäin korkeita radonpitoisuuksia, perustusratkaisujen valinnalla on suuri merkitys radontorjunnan onnistumiseen (RT 81-11099, 3).

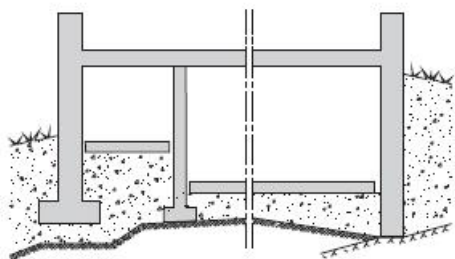
9.1.1 Maanvarainen betonilaatta

Maanvastaisissa rakenteissa paras ratkaisu radonintorjunnan suhteen on mahdollisimman yhtenäinen ja tiivis alapohja- ja perusrakenne, jossa on mahdollisimman vähän tiivistettävää, kuten esimerkiksi reunavahvistettu laattaperustus (kuva 28).



Kuva 28. Reunavahvistettu laattaperustus, RT 81-11099

Maanvastaiset harkkorakenteiset seinät rinne- ja kellaritaloissa sekä porrastetuissa lattiarakenteissa ovat osoittautuneet erittäin vaativiksi kohteiksi radonintorjunnassa (kuva 29) (RT 81-11099, 3).

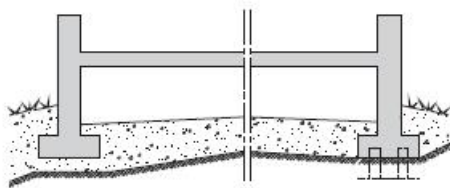


Kuva 29. Maanvarainen laattaperustus, kellarillinen rakennus, RT 81-11099

Radonturvallisen maanvaraisen laatan rakentamisessa tulee perustus tiivistää huolellisesti sekä asentaa radonputkisto laatan alapuolelle täyttösorakerrokseen. Riittävä tiivistys saavutetaan sokkelin ja laatan liitokseen asennetulla bitumikermillä. Hyvään lopputulokseen pyritään jo pelkän laadukkaan tiivistystyön avulla (Pöllänen 2003, 149).

9.1.2 Ryömintätilainen alapohja

Ryömintätilaisissa (tuulettuva alapohja, kuva 30) alapohjaratkaisuissa esiintyy huomattavasti vähemmän radonpitoisuuksien ylityksiä kuin maanvaraisissa ratkaisuissa. Tuulettuva alapohja ei kuitenkaan yksinään riitä estämään radonin kulkeutumista rakennuksen sisäilmaan. Myös ryömintätilaisen alapohjan rakentamisessa tulee huolehtia sen liittymien ja läpivientien huolellisesta tiivistämisestä sekä alapohjan riittävästä tuuleutuksesta (RT 81-11099, 3).



Kuva 30. Tuulettuva alapohjarakenne, RT 81-11099

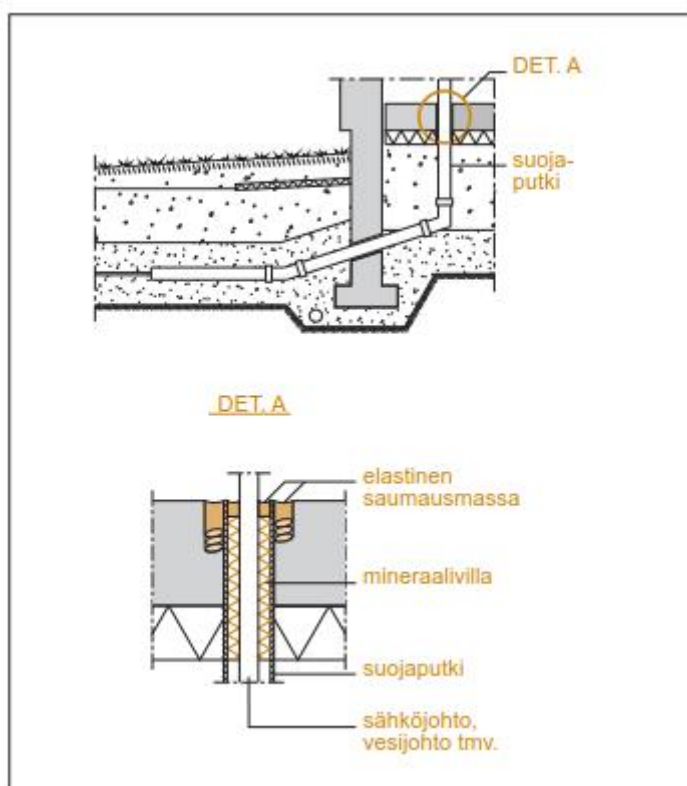
Ryömintätilan tuuletuksella voidaan pienentää ryömintätilan ilmassa olevaa radonpitoisuutta. Ilmanvaihtoa voi tehostaa aukaisemalla tuuletusluukut ja venttiilit. Tuulisella säällä ryömintätilan tuuletus toimii paremmin kuin tyynellä ilmalla. Tuuletukselta voidaan tehostaa myös koneellisesti. Säteilyturvakeskuksen tutkimuksissa 75 % kohteista radonpitoisuus oli tuuletetusta parantamalla pienentynyt puoleen, parhaissa tapauksissa pienentynyt jopa 80 – 90 % (Pöllänen 2003, 148).

9.2 Perustusten tiivistäminen

Radon kulkeutuu rakennuksiin ilmavirtausten mukana rakennusosien liitosten ja halkeamien kautta. Myös suoraan rakennusosien läpi kulkeutuminen on mahdollista, materiaalin ilmanläpäisevyydestä ja diffuusio-ominaisuuksista riippuen. Perustusten tiivistämisen tavoitteena on rakennuksen alapohjarakenteeseen muodostuva ilmasulku, joka katkaisee rakennuspohjasta huonetilaan kulkevat ilmavirtaukset (RT 81-11099, 2).

Betonirakenteet ovat yleensä riittävän tiiviitä estämään radonin kulkeutumisen sisätiloihin ja rakennuksen sisäilmaan, mutta se edellyttää rakenteiden saumojen ja liittymien erityisen huolellista tiivistämistä (RT 81-11099, 4).

Lisäksi alapohjarakenteen alapuolelta rakennukseen tulevien läpivientien, kuten mm. lämmitys-, vesi- ja viemäriputkien läpiviennit tai niiden suojaputket voivat toimia radonin vuotoreitteinä asuintiloihin. Näin ollen niidenkin huolellinen tiivistäminen on erittäin tärkeää (kuva 31) (RT 81-11099, 8).



Kuva 31. Alapohjan läpivientien tiivistys, RT 81-11099

9.3 Rakennuksen ilmanvaihto

Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä vaikuttaa asunnon ilmanvaihtuvuuteen, joka taas vaikuttaa suoraan asunnon ilmassa olevien epäpuhtauksien pitoisuuteen. Lisäksi ilmanvaihtojärjestelmä vaikuttaa asunnon alipaineisuuteen. Alipaineen kasvaessa maaperästä tuleva ilmavirtaus kasvaa. Sen vuoksi alipaineisuudella on merkitystä

radonpitoisuuden kannalta, etenkin jos alapohjarakenteessa on vuotoreittejä maaperän ilmalle (Arvela, Mäkeläinen, Holmgren & Reisbacka, 2010, 49).

Sisäilman radonpitoisuuden kannalta on tärkeää huomioida rakennuksen alipaineisuuden hallinta. Rakennuksen alipaineisuuteen vaikuttavat sisä- ja ulkolämpötilojen ero, rakennuksen tiivys ja ilmanvaihdon ilmavirtojen säätö koneellisessa ilmanvaihdossa (RT 81-11099, 2).

Koneellinen poistoilmanvaihto kasvattaa aina paine-eroa, joka lisää sisäilman radonpitoisuutta, jos alapohjarakenteessa on halkeamia ja rakoja. Erityisen ongelmallinen tilanne on karkeilla soramailla, joilla tiivisrakenteisissa taloissa on havaittu radonpitoisuuden kasvua, kun koneellista poistoilmanvaihtoa on tehostettu. Lisäksi korkea ilmanvaihdon alipaineisuus saattaa heikentää vapaasti tuulettuvan tai huippuimurilla varustetun tuuletusjärjestelmän vaikutusta. Toisaalta kuitenkin RakMK:n osan D2 (Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2012) mukaan ylipaineinen ilmanvaihto ei ole sallittu rakennuksen kosteusvaurioriskin vuoksi (RT 81-11099, 2-3).

Rakennuksen alipaineisuus on hallittavissa koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä merkittävästi paremmin kuin pelkästään koneellisella poistoilmanvaihdolla. Tällöin tuloilma tuodaan hallitusti, eikä sitä imetä rakenteiden ja liitosten läpi maaperästä tai ulkoilmasta (RT 81-11099, 2).

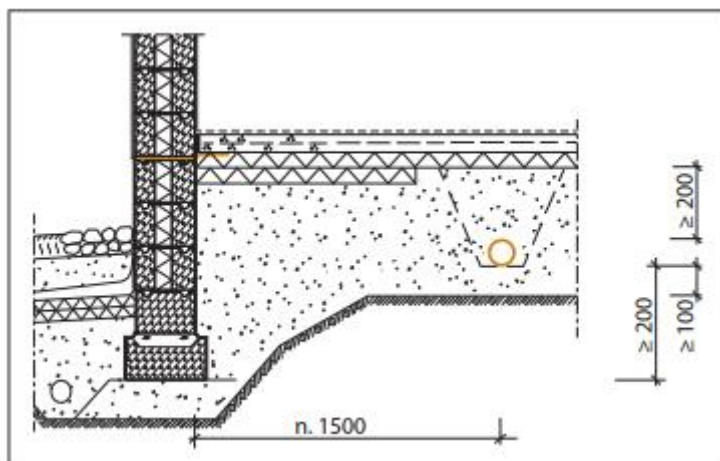
Nykyisin ei kuitenkaan uudisrakentamisessa käytetä enää pelkän koneellisen poistoilmanvaihdon järjestelmiä, vaan käytännössä uudisrakentamisessa käytetään ainoastaan koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon järjestelmiä.

Tampereen teknillisen yliopiston COMBI-seminaarin tutkimuksen mukaan sisäilman radonpitoisuuden määrään vaikuttaa rakennuksen ilmanvaihto. COMBI-hankkeessa marras-huhtikuussa 2016-2017 ja 2017-2018 tutkittiin palvelurakennuksien sisäilman radonpitoisuuksia radonpurkeilla sekä jatkuvatoimisina mittauksina. Jatkuvatoimisten mittausten perusteella havaittiin, että sisäilman radonpitoisuus vaihtelee selvästi ilmanvaihtokoneen käyntiaikojen mukaan. Ilmanvaihtuvuuden ollessa pienemmällä huonetilan radonpitoisuus nousi oleellisesti korkeammalle tasolle verrattuna

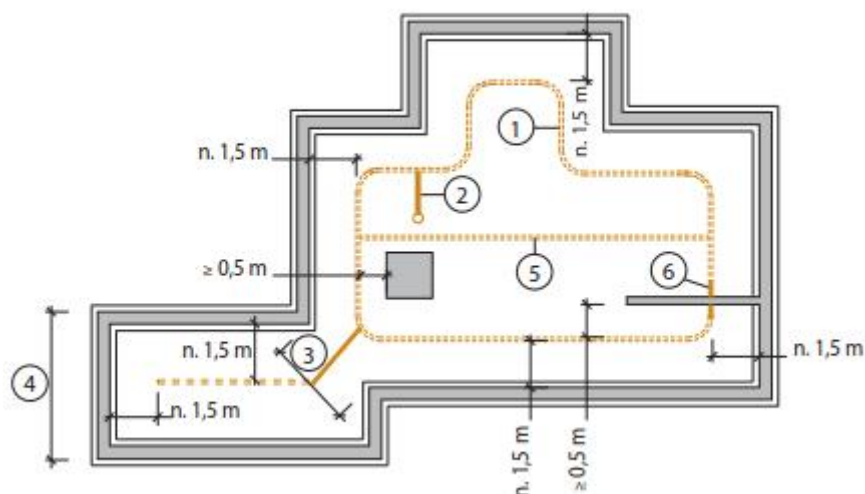
suuremman ilmanvaihtuvuuden jaksoihin. Muutokset tapahtuivat nopeasti sekä noudattivat tarkkaan ilmanvaihtokoneen käyntiaikoja. Ilmanvaihdon ollessa kokonaan pois päältä, sisäilman radonpitoisuudet nousivat korkealle tasolle (COMBI-seminaarin johdanto- ja yhteenvetoraportti. 2019, 40).

9.4 Rakennuspohjan tuuletusjärjestelmä

Rakennuspohjan tuuletusjärjestelmällä (radonputkisto), joka asennetaan salaojituserokseen (kuva 32), varmistetaan sisäilman radonpitoisuuden hallinta, mikäli perusrakenteisiin jää ilmavuotoja. Tuuletusjärjestelmän tarkoituksena on salaojituserokseen huokosilman tuulettaminen sekä rakennuspohjan alipaineistaminen. Rakennusvaiheessa tuuletusjärjestelmä toteutetaan rakennuspohjaan asennettavalla imukanavistolla (kuva 33), josta lähtee poistokanava avoimena vesikatolle. Rakennuksen valmistuttua tehdään radonpitoisuuden mittaus rakennuksen sisäilmasta ja asennetaan mahdollisesti poistopuhallin, mikäli mittaustulokset ylittävät radonpitoisuuden sallitun raja-arvon (RT 81-11099, 2,9).



Kuva 32. Radonputkiston asentaminen salaojituserrokseen, RT 81-11099



Kuva 33. Rakennuspohjan imukanavisto, RT 81-11099

Vapaasti tuulettuvalla radonputkistolla (ilman katolle asennettavaa poistopuhallinta) yksikerroksisessa, tasamaalle rakennetussa rakennuksessa on saatu näyttöjä sisäilman radonpitoisuuden alenemisesta. Rakennuspohjan tuuletusjärjestelmä, eli radonin poistoputkisto alentaisi painovoimaisenakin sisäilman radonpitoisuutta noin 40 %. Tuuletusputkessa olevaan ilman virtaukseen vaikuttaa mm. rakennuspohjan täyttökerroksen ja ulkoilman lämpötilaero, salaojituserroksen ilmanläpäisevyys sekä tuulen vaikutus (Rantanen 2015, 43).

9.5 Säteilyturvakeskuksen otantatutkimukset 2009 ja 2016

Säteilyturvakeskus on suorittanut väestöpohjaisia otantatutkimuksia sisäilman radonpitoisuudesta mm. vuosina 2009 ja 2016. Otantatutkimuksessa 2009 mitattiin radonpitoisuus 1500:ssa satunnaisesti valitussa pientaloasunnoissa, jotka saivat rakennusluvan vuonna 2006. Otantatutkimuksessa 2016 mitattiin radonpitoisuus 1332:ssa satunnaisesti valitussa pientaloasunnoissa, jotka saivat rakennusluvan marraskuun 2012 – lokakuun 2013 välisenä aikana.

Otantatutkimuksessa 2009 todettiin että matalaperustaisissa pientaloissa, joissa oli maanvarainen laatta, vapaasti tuulettuva radonputkisto sekä sokkelin ja laatan liitoksen

tiivistävä bitumikermi, rakennuksen sisäilman radonpitoisuus oli 55 % alhaisempi verrattuna kohteisiin, joissa näitä radonin torjuntatoimia ei ollut suoritettu.

Maanvarainen laatta on käytetyin perustustapa ja edellyttää huolellista radontorjuntaa koko maassa. Tuulettuva alapohja ja reunavahvistettu laatta takaavat parhaiten alhaisen radonpitoisuuden (Arvela, Mäkeläinen, Holmgren & Reisbacka, 2010, 3).

Otantatutkimuksen 2016 tutkimustuloksetkin osoittavat, että tuulettuva alapohja on radonturvallinen perustusratkaisu. Radonpitoisuuden 200 Bq/m³ ylityksiä ei esiintynyt ollenkaan omakotitaloissa, joissa oli tuulettuva alapohja. Matalaperustaisissa taloissa 200 Bq/m³ ylityksiä oli 6 % ja rinnetaloissa 10% omakotitaloissa (Kojo, Holmgren, Pyysing, & Kurtio, 2016, 26).

Uudisrakentamisen radontorjuntatoimet ovat kustannuksiltaan melko edullisia ja niillä on kosteusteknisestikin positiivisia vaikutuksia. Lisäksi radontorjuntaratkaisut vähentävät myös muiden haitallisten aineiden pääsyä maaperästä rakennuksen sisäilmaan. Jo vapaasti tuulettuvan radonputkiston hyödyt ja vaikutukset ovat niin merkittäviä, että putkiston asentaminen on suositeltavaa koko maassa (Arvela, Mäkeläinen, Holmgren & Reisbacka, 2010, 60).

10 POHDINTA

Suomen maaperän radonpitoisuuden ollessa hyvin korkea sekä sen aiheuttama keuhkosyövän riski on tärkeä syy huomioida asuin- sekä työskentelytiloiksi rakennettavien uudisrakennusten maaperän radonpitoisuus jo mahdollisimman aikaisessa vaiheessa rakentamista. Asia on tällä hetkellä melko hyvin käsittelyssä, koska EU-direktiivin mukaan käytännön toimiin tulee ryhtyä radonriskien torjumiseksi. Kansallinen toimintasuunnitelmaluonnos on tekeillä, mutta sen aikataulu raja-arvojen yms. kiristämiseksi on vielä melko kaukana tulevaisuudessa. Tärkeää olisikin tehdä joitain käytännön toimia jo nyt ja kuntien tulisi mahdollisesti vaatia enemmän pakollisia toimia radonriskien pienentämiseksi. Onneksi hyviä ratkaisuja radonin torjuntaan on olemassa.

Aiemmin mainitun tsekkiläisen radonmittauksiin erikoistuneen yrityksen mukaan, maaperän spatiaalinen (3D) vaihtelu on merkittävämpää maaperän radonpitoisuuden suhteen kuin maaperän ajallinen vaihtelu. Maaperän spatiaalisen vaihtelun perusteella radonsuojausten määrittelyn tulisikin perustua rakennuspaikan maaperän ominaisuuksiin, eikä radonriskialueiden karttoihin tai taulukoihin. Radonriskialueiden kartat perustuvat yleensä melko suureen mittakaavaan, jolloin niiden mittaustulokset eivät kerro todellista radonpitoisuutta yksittäisellä rakennuspaikalla.

Radontutkimuksia mm. Säteilyturvakeskuksen osalta Porin ja Satakunnan alueella on tehty vasta hyvin vähän ja harvakseltaan, jolloin ainoa tapa saada selville uudisrakennuksen rakennuspaikan radonpitoisuus on mitata se suoraan maaperästä.

Mahdollisimman tarkan kuvauksen saamiseksi uudisrakennuksen rakennuspaikan maaperän radonpitoisuudesta, tulisi mittauksia suorittaa useammista tutkimuspisteistä, etenkin jos ei ole täysin varmaa tietoa maaperän pohjasuhteiden homogeenisuudesta esimerkiksi aiemmin tehtyjen pohjatutkimusten perusteella. Mikäli rakennuspaikalla on tehty aiempia pohjatutkimuksia, joiden perusteella maaperän tiedetään olevan melko homogeeninen, niin silloin saattaisi 1-2 tutkimuspistettä pienemmästä rakennuskohteesta riittää.

Mikäli maaperän radonpitoisuus mitataan uudisrakennuksen rakennuspaikalta, tällöin mitattu radonpitoisuus ratkaisee uudisrakennuksen tarvittavan radonsuojauksen. Maaperästä mitattu radonpitoisuus ei kuitenkaan vielä kerro lopullista rakennuksen sisäilman radonpitoisuutta, joka riippuu mm. uudisrakennuksen perustustyypistä, perustusten tiivistämisestä sekä ilmanvaihdosta. Maaperästä saatavien radonpitoisuuksien mittaustuloksien perusteella pystytään kuitenkin jossain määrin määrittelemään minkälainen radonsuojaus uudisrakennuksessa olisi mahdollisesti tarpeen. Mikäli mittaustulokset olisivat lähellä sallittuja raja-arvoja, tulisi tehdä perusteellinen radonsuojaus, eli huolellisen perustuksien tiivistämisen lisäksi asentaa radonputkisto, mahdollisesti poistoilmapuhaltimella varustettuna. Mikäli mittaustulokset olisivat huomattavan alhaisia, saattaisi pelkkä huolellinen perustusten tiivistäminen koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon kanssa olla riittävä suojaus radonin torjumiseen. Lisäksi perustustyypin valinnalla voidaan vaikuttaa mahdollisten radonriskien torjumiseen.

Maaperän radonmittauksen teettäminen yksittäiselle pientalorakentajalle saattaa mahdollisesti muodostua kustannuksiltaan suuremmaksi verrattuna esimerkiksi vapaasti tuulettuvan radonputkiston asentamiseen rakennuspohjaan sekä sen lisäksi perustusten rakenteiden huolellisen tiivistämisen aiheuttamiin kustannuksiin.

Uudisrakennuksen pohjarakennuslausuntoa laatiessa ei aina ole tiedossa rakennettavan rakennuksen perustustyyppiä, jolloin sen perusteella on vaikea määritellä tietynlaisen radonsuojauksen tarpeellisuus. Radonia esiintyy maaperässä joka paikassa aina jossain määrin. Hyvä ratkaisu uudisrakennusten sisäilman radonpitoisuuden torjumiseksi saattaisi siis olla, että rakennuspaikasta riippumatta kaikkiin uudisrakennuksiin, jotka ovat asuin- tai työskentelykäytössä, tehtäisiin perustusten liitosten tiivistykset erityisen huolellisesti sekä sen lisäksi rakennuspohjaan asennettaisiin vapaasti tuulettuva radonputkisto. Tämä koskisi etenkin maanvaraisella laatalla perustettavia rakennuksia. Edellä mainituilla toimenpiteillä saavutettaisiin lisäksi muita hyötyjä rakennuksen sisäilman kannalta. Näillä toimenpiteillä saataisiin esimerkiksi rajattua myös muiden alapohjasta tulevien epäpuhtauksien pääsy rakennuksen sisäilmaan. Lisäksi radonputkistolla on todettu olevan myös rakennuspohjaa kuivattava vaikutus. Tällä hetkellä lähes kaikkiin uudisrakennuksiin asennetaan lisäksi koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, jolla on oikein säädettyinä ja käytettynä todettu olevan myös vaikutusta sisäilman radonpitoisuuden vähenemiseen.

Edellä mainittujen toimenpiteiden kustannukset rakennusten kokonaiskustannuksiin suhteutettuna ovat vielä melko alhaiset. Vaikka radonin torjunta olisi huomioitu hyvin uudisrakennuksen toteutuksessa, olisi sen lisäksi hyvä vielä rakennuksen valmistuttua mitata sisäilman radonpitoisuus esimerkiksi Säteilyturvakeskuksesta saatavilla radonmittauspurkeilla.

Todettakoon myös, että kun radontorjunta otetaan hyvin huomioon uudisrakennusten suunnittelussa ja rakentamisessa, eli ts. pyritään saamaan rakennuksen sisäilman radonpitoisuus mahdollisimman pieneksi, niin tällöin pitkällä aikavälillä vähennetään rakennusten sisäilmassa olevan radonin aiheuttamien terveysriskien lisäksi myös radonkorjausten tarvetta tulevaisuudessa. Radonriskien huomioonottaminen ennaltaehkäisevästi on huomattavasti edullisempaa kuin rakennusten korjaaminen jälkeinpäin.

Jatkotoimenpiteitä tähän opinnäytetyöhön liittyen voisi olla esimerkiksi maaperän radonpitoisuuden kenttämittaukset eri alueilta sekä niistä saatujen mittaustulosten digitalisointi radonkartalle. Tämän lisäksi voisi tehdä vertailuja suoraan maaperästä mitattujen radonpitoisuuksien, sekä myöhemmin rakennettujen tai jo samalla alueella olemassa olevien rakennusten sisäilman radonpitoisuuksien kanssa, huomioiden rakennuksen perustustyyppi jne. Em. mittaustuloksista voisi lisäksi nähdä paljonko maaperästä tuleva radonpitoisuus pienenee rakennusten sisäilmassa esimerkiksi huolellisen perustusten tiivistämisen, radonputkiston asentamisen sekä koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon vaikutuksesta. Tavoite tietysti on, että em. toimenpiteet radonin torjumiseksi ovat niin tehokkaat, että sisäilman radonpitoisuus jää huomattavasti alhaisemmaksi kuin maaperästä mitattu radonpitoisuus.

Maaperän radonpitoisuuden kenttämittauksia eri alueilla suorittaessa, tulisi käytössä olla maaperän radonpitoisuuden mittauslaitteisto sekä mahdollista rahoitusta mittaus-ten aiheuttamiin kustannuksiin. Maaperän kenttämittauksia eri alueilla suorittamalla radonpitoisuudet saataisiin alueittain mahdollisesti myös avoimempaan käyttöön tietokantoihin esimerkiksi rakentajia tai kaavoituksen suunnittelua varten. Tällä hetkellä yksityisten yritysten tekemät maaperän radonmittauksien tulokset ovat pääsääntöisesti tilaajien omistuksessa, eikä niitä ole saatavilla yleiseen hyötykäyttöön.

LÄHTEET

- Arvela, H., Holmgren, O. & Reisbacka, H. 2012. Asuntojen radonkorjaaminen. Helsinki: Kopio Niini Oy. STUK-A252.
- Arvela, I., Mäkeläinen, I., Holmgren, O. & Reisbacka, H. 2010. Radon uudisrakentamisessa: Otantatutkimus 2009. Helsinki: Edita Prima Oy. STUK-A244.
- Bertin Instruments Oy. Radon Product Ranges- catalogue 2019-01.
- Bertin Instruments Oy www-sivut. Viitattu 15.4.2019. <https://www.bertin-instruments.com/>
- COMBI- tutkimushankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportti. Tutkimusraportti 168. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laboratorio. 2019.
- Cosma, C., Cucuș-Dinu, A., Papp, B., Begy, R. & Sainz, C. 2013. Soil and building material as main sources of indoor radon in Băita-Stei radon prone area (Romania). Viitattu 15.2.2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X12002317?via%3Dihub>
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, JM., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Heid, I., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruano-Ravina, A., Ruosteenoja, E., Schaffrath Rosario, A., Tirmache, M., Tomášek, L., Whitley, E., Wichmann, H E. & Doll, R. 2004. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. Viitattu 28.12.2019. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC546066/>
- Geologian tutkimuskeskuksen www-sivut. Viitattu 17.3.2019. <http://www.gtk.fi>
- Giles, J.R, McLing, T.L, Brandon, W, Carpenter, M.V, Smith & G.J. 2012. Radon in Soil Gas Above Bedrock Fracture Sets at the Shepley's Hill Superfund Site. Idaho National Laboratory. Viitattu 15.2.2017. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc827992/m2/1/high_res_d/1070114.pdf
- Holmgren, O. 2018. Ylitarkastaja, Säteilyturvakeskus. Helsinki. Sähköpostikeskustelut 2018-2019.
- ISO 11665-11:2016(E). Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222. Part 11:Test method for soil gas with sampling at depth. 2016. International Standard.
- Itä-Suomen yliopiston www-sivut. Viitattu 28.12.2019. <https://www.uef.fi/benchmarking>
- Kojo, K., Holmgren, O., Pyysing, A. & Kurttio, P. 2016. Radon uudisrakentamisessa. Otantatutkimus 2016. Helsinki. STUK. Viitattu 28.12.2019. <https://www.julkari.fi/handle/10024/131619>

Lönnberg, M. 2019. Apulaisrakennustarkastaja, Ympäristö- ja lupapalvelut/ rakennusvalvontayksikkö. Porin kaupunki. Sähköpostikeskustelut 2019.

Menetelmäopetuksen tietovaranto www-sivut. Viitattu 28.12.2019.

<https://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/index.html>

Rantanen, A. 2015. Vapaasti tuulettuvan radonputkiston vaikutus sisäilman radonpitoisuuteen yksikerroksisissa pientaloissa. Opinnäytetyöt, rakennusterveys 2015. Itä-Suomen yliopisto. Koulutus- ja kehittämispalvelu Aducate. Viitattu 27.1.2018.

<https://docplayer.fi/19872814-Arto-rantanen-vapaasti-tuulettuvan-radonputkiston-vaikutus-sisailman-radonpitoisuuteen-yksikerroksisissa-pientaloissa.html>

Ronkainen, N. 2012. Suomen maalajien ominaisuuksia. Suomen ympäristökeskus.

Helsinki 2012. www.ymparisto.fi/julkaisut. Viitattu 24.6.2019. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2_2012_Suomen_maalajien_ominaisuuksia.pdf

https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2_2012_Suomen_maalajien_ominaisuuksia.pdf

https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2_2012_Suomen_maalajien_ominaisuuksia.pdf

Lajunen, M. 2007. Radonmittaukset ja radonsuojaukset, esimerkkitapauksena Kontionlahden kunta. AMK-opinnäytetyö. Kajaanin ammattikorkeakoulu. Viitattu 27.1.2018.

<https://www.theseus.fi/handle/10024/10778>

Pöllänen, R. 2003. Säteily ympäristössä. Säteilyturvakeskus. Hämeenlinna: Karisto Oy

RADON v.o.s www-sivut. Viitattu 16.10.2018. <http://www.radon.eu>

Ramboll Finland Oy www-sivut. 2019. Viitattu 28.12.2019. <https://fi.ramboll.com/>

RIL 121-2004 Pohjarakennusohjeet. 2004. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki.

RIL 126-2009 Rakennuspohjan ja tonttialueen kuivatus. 2009. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Hansaprint.

RIL 132-2000 Talonrakennuksen maarakenteet. 2000. Yleinen rakennusselostus ja laatuvaatimukset. Suomen rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Yleisjäljennös Oy

RIL 225-2004 Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta. 2005. Ohje standardien SFS-EN ISO 10456 ja SFS-EN ISO 6946 soveltamiseen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysiikallinen suunnittelu ja tutkimukset. 2014. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki. Tammerprint Oy.

RT 07-11299. Sisäilmastoluokitus 2018. 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Helsinki: Rakennustieto.

RT 10-11127. Geoteknisen suunnittelun tehtäväluettelo. 2013. Helsinki: Rakennustieto.

RT 81-11099. Radonin torjunta. 2012. Helsinki: Rakennustieto.

Salminen, E. 2018. Duodecim terveyskirjasto. Viitattu 27.9.2019. https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk01082

Saphymo GmbH. AlphaGUARD user manual 01/2017. 2017. Germany. Viitattu 08.2019.

Sisäilmayhdistys ry:n verkkosivut. 2019. Viitattu 28.12.2019. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Yleisimmat-sisailmaongelmat>

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä. 2018. 1044/2018. 19§ Työpaikan radonpitoisuuden viitearvo ja työperäistä altistusta koskeva viitearvo radonille.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä. 2018. 1044/2018. 20§ Asunnon ja muun oleskelutilan radonpitoisuuden viitearvot ja mittaaminen.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä. 2018. 1044/2018. 21§ Uuden rakennuksen radonpitoisuuden viitearvo.

Suomen RakMK D2. 2012. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.

Säkylän kunnan verkkosivut. Viitattu 28.12.2019. <https://www.sakyla.fi/ymparisto/rakennusvalvonta/rakentamisohjeita/radon-rakentamisessa/>

Säteilylaki. 2018. 859/2018. 155§ Työpaikan radonpitoisuuden selvittäminen.

Säteilylaki. 2018. 859/2018. 157§ Sisäilman radonpitoisuuden rajoittaminen rakennushankkeessa.

Säteilylaki. 2018. 859/2018. Säteilylaki 159§, Kansallinen toimintasuunnitelma radonriskien ehkäisemiseksi

Säteilyturvakeskuksen www-sivut. Viitattu 26.6.2018. <https://www.stuk.fi/>

Säteilyturvakeskuksen www-sivut. Kansallinen toimintasuunnitelma radonriskien ehkäisemiseksi. Viitattu 7.10.2018. <https://www.stuk.fi/aiheet/radon/kansallinen-toimintasuunnitelma-radonriskien-ehkaisemiseksi>

Tompuri, V. 2018. Radon ei ole vain harjualueiden ongelma. Rakennuslehti 9.3.2018

Tompuri, V. 2017. Pitääkö radonia pelätä? Tekniikan Maailma 23, 62-69.

Wikipedia www-sivut. Viitattu 30.7.2019. <https://www.wikipedia.org>

World Health Organization. 2009. WHO Handbook on indoor radon. A public health perspective. Viitattu 31.1.2019. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44149/9789241547673_eng.pdf;sequence=1

Ympäristöministeriön asetus pohjarakenteista. 2014. 465/2014. 4§ Geotekninen suunnittelu.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta.
2017. 1009/2017. 1§ Soveltamisala.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta.
2017. 1009/2017. 5§ Sisäilman laatu.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta.
2017. 1009/2017. 21§ Ilmavirroista aiheutuvat paineet ja rakenteiden ilmanpitävyys.