

Tuomas Ryhänen

**MAANVASTAISTEN BETONILAATTOJEN
KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA JA SEN
MERKITYS RADONLÄPÄISEVYYTEEN**

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastajat: Juha Vinha ja Eero Tuominen
Helmikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Tuomas Ryhänen: Maanvastaisten betonilaattojen kosteustekninen toiminta ja sen merkitys radonlöpäisevyyteen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Helmikuu 2022

Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus on parantunut ajan kuluessa rakentamista ohjaavien määräysten muuttuessa. Lämmöneristepaksuudet ovat kasvaneet ja täyttökerroksessa on yleistynyt karkearakeisemman maa-aineksen käyttö. Lisäksi täyttökerroksen radontuuletusjärjestelmien sekä lattialämmitysjärjestelmien käyttö on yleistynyt. Kosteusteknisen toimivuuden parantumisen johdosta maanvastaisen betonilaatan kosteuspitoisuus tulee tasaantumaan aiempaa alhaisemmalle tasolle. Yksittäisissä laboratoriomittauksissa on havaittu viitteitä siitä, että betonin kosteuspitoisuus voi vaikuttaa betonin radonlöpäisevyyteen. Tällöin maanvastaisen alapohjarakenteen läpi diffuusiolla kulkeutuva radonin määrä voi lisätä sisäilman radonpitoisuutta yli viitearvojen pienemmillä maaperän radonpitoisuuksilla.

Teoriaosuudessa tarkasteltiin maanvastaisen alapohjarakenteen kosteustekniseen toimintaan liittyviä fysikaalisia ilmiöitä. Lisäksi tarkasteltiin maanvastaisen alapohjarakenteen eri rakennekerrosten vaikutusta alapohjarakenteen kosteus- sekä radontekniseen toimintaan. Aineistotutkimusosiossa tarkasteltiin maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusteknistä toimivuutta kosteusmittausaineiston perusteella keräämällä vuosien 2000–2020 aikana tehtyjen kuntotutkimusten yhteydessä tehtyjä kosteusmittaustuloksia, joita täydennettiin diplomityön yhteydessä tehdyillä kosteusmittauksilla. Työn laboratoriotutkimusosuudessa mitattiin maanvastaisesta alapohjarakenteesta irrotettujen betonilaattojen radonlöpäisevyyttä.

Diplomityössä analysoidun aineiston ja sitä täydentävien kosteusmittausten perusteella maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus on parantunut lämmöneristekerrospaksuuden kasvamisen, karkearakeisten täyttökerrosten sekä täyttökerroksen tuuletusjärjestelmän ansiosta. Betonilaattojen suhteellinen kosteus tulee jatkossa tasaantumaan enenevissä määrin 50–60 % RH tasolle pitkällä aikavälillä. Uusien määräysten ja ohjeistusten mukaan toteutuissa maanvastaisissa alapohjarakenteissa tiiviiden pintarakenteiden käyttö maanpäällisessä kerroksessa on pääsääntöisesti kosteus- ja sisäilmateknisesti turvallista, kunhan varmistetaan riittävä alustan kuivatus ennen päällystystä.

Betonin ikääntyessä betonin lujuus kehittyy hydrataatioreaktion edetessä, jolloin betonilaatan radonlöpäisevyys pienenee. Tehtyjen laboratoriomittausten perusteella betonin radonlöpäisevyys kasvaa betonin kuivuessa. Kirjallisuuden perusteella betonin kuivuminen lisää radonlöpäisevyyttä suhteessa enemmän, mitä betonin lujuuden kehittyminen vähentää. Rakentamista ohjaavien määräysten johdosta maanvastaiset alapohjarakenteiden betonilaatat tulevat olemaan entistä kuivempia, jonka johdosta radonin diffuusio alapohjarakenteiden läpi tulee olemaan suurempaa.

Tutkimuksen perusteella on epätodennäköistä, että betonilaatan aiempaa pidemmälle etenevä kuivuminen kuitenkaan ainakaan systemaattisesti aiheuttaa sisäilman radonpitoisuuden kasvamista yli viitearvojen tavanomaisten radonpitoisuuksien alueilla, kunhan huolehditaan betonilaatan riittävästä lujuudesta tai käytetään muita radonia vähentäviä toimenpiteitä. On mahdollista, että heikosti tiivistetyissä tai heikkolujuuksisissa, kuten C15/20 lujuusluokan betonilaatoissa, betonilaatan läpi tunkeutuva radon voi nostaa sisäilman radonpitoisuuden yli sallittujen raja-arvojen, jonka johdosta heikkolujuuksisten betonien käyttöä maanvastaisissa betonilaatoissa tulee välttää. Kuitenkin tärkein radonin torjumiskeino on edelleen huolehtia alapohjarakenteen ilmatiiviydestä, koska merkittävin radonin kulkeutumisreitti on konvektiovirtaus rakenteiden ilmatiiviyden kautta.

Avainsanat: Maanvastainen betonilaatta, kosteustekninen toiminta, radonin diffuusio

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Tuomas Ryhänen: Slab-on-grounds moisture behavior and its effect on radon permeability
Master of Science Thesis
Tampere University
Construction Engineering
February 2022

Slab-on-ground structures' moisture behavior has improved due to new regulations when thermal insulation thickness has risen and the use of coarse-grained soils has increased. In addition, the use of underfloor heating and ventilation system of filling layer has improved structures' moisture behavior. Modern slab-on-ground structures' moisture content of concrete slab can dry to 50-60 % RH level. There have been indications in individual laboratory measurements that concrete pores' water vapor content influences concrete's radon permeability. Slab-on-ground structures improving moisture behavior can grow to radon permeability and indoor air radon content based on individual laboratory measurements.

The theoretical part deals with the phenomena related to slab-on-ground structures' moisture behavior and how slab-on-ground structures' structural layers influence moisture behavior. The material research section examined structures' moisture behavior using moisture measurements of condition surveys. In laboratory studies, radon permeability, moisture content, and compressive strength of concrete slabs were measured.

Based on the analysed material of the research, the moisture behavior of slab-on-ground structures has improved, when thermal insulation thickness has risen, and coarse-grained use has increased. In addition, the ventilation system of the filling layer has improved structures' moisture behavior. The moisture content of modern slab-on-ground structures will stabilize to lower levels in the long run. Using the vapor-tight floor covering in modern slab-on-ground structure is moisture behavior safety above ground layer if the concrete slab's moisture content is enough low before covering.

As the concrete ages, the strength of the concrete develops as the hydration progresses, reducing the radon permeability of the concrete slab. Based on laboratory measurements, as the concrete dries, the concrete slabs' radon permeability increases. Based on the literature, when the concrete is drying, it increases radon permeability more than the growth of concrete's strength decrease. Modern slab-on-ground structures' improvement of moisture behavior increases to radon flow through the concrete slab.

Based on this, concrete slabs further drying would not cause an increase in the radon content of indoor air above reference values if adequate strength of the concrete is ensured or other measures to reduce radon levels are used. It is possible that in poorly compacted or low-strength concrete slabs, such as C15/20 strength class, radon penetrating the concrete slab may raise the radon content of the indoor air above reference values, which avoids the use of low-strength concrete in concrete slabs. The most important radon entry is convection flow, so the most important thing is to take care of the air thickness of the structure.

Keywords: Slab-on-ground, moisture behavior, radon diffusion

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty yhteistyössä Tampereen yliopiston sekä Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n kanssa. Työn aiheesta, rahoituksen hankinnasta ja ohjauksesta vastasi Vahanen Rakennusfysiikka Oy. Tutkimuksen rahoitukseen ja ohjausryhmään osallistuivat: Rakennusteollisuus ry, Kiilto Oy, Helsingin kaupunki, Vilpe Oy sekä Betonteollisuus ry. Lisäksi työn ohjausryhmään osallistuivat Ympäristöministeriö ja Suomen säteilyturvakeskus. Työn ohjaajana toimi Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n erikoisasiantuntija Ari-Veikko Kettunen.

Kiitän kaikkia työn rahoittamiseen ja ohjausryhmään osallistuneita tahoja sekä henkilöitä, jotka mahdollistivat tämän työn tekemisen. Erityiskiitokset Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n Ari-Veikko Kettuselle, Sami Niemelle sekä Toni Lammille diplomityön ohjauksesta sekä arvokkaista neuvoista diplomityön varrella. Lisäksi kiitokset kaikille työkavereille tärkeistä neuvoista sekä siitä, että mahdollistitte työn ensimmäisen tutkimusosuuden. Haluan kiittää myös professori Juha Vinhaa ja diplomi-insinööri Eero Tuomista diplomityön tarkastamisesta sekä ohjaamisesta. Kiitos Tampereen kaupunki mahdollisuudesta hankkia laboratorio-osuuteen tarvittavat koekappaleet kiinteistöistänne.

Kiitokset kaikille kavereille ikimuistoisesta yliopistoajasta. Lisäksi kiitokset perheelleni kannustuksesta sekä tuesta liki 20 vuotta kestäneellä koulu- ja opiskelutaipaleella. Erityiskiitokset haluan esittää kotiin Susannalle tsemppauksesta ja tuesta silloin, kun sitä eniten tarvitsi yliopisto-opiskeluajan varrella.

Tampereella 24.2.2022

Tuomas Ryhänen



SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimuksen tavoite	1
1.3 Tutkimusmenetelmät ja rajaukset	2
2. LÄMPÖ	3
2.1 Lämmön johtuminen	3
2.2 Lämmön konvektio	4
2.3 Lämpösäteily	5
3. KOSTEUS	6
3.1 Kosteus ilmassa	6
3.2 Kosteus materiaalissa	6
4. KOSTEUDEN SIIRTYMINEN	10
4.1 Veden painovoimainen siirtyminen	10
4.2 Kosteuden konvektio	10
4.3 Diffuusio	11
4.4 Kapillaarinen siirtyminen	13
4.5 Kosteuslähteet	15
5. RADON	18
5.1 Yleistä	18
5.2 Radonin siirtyminen	19
5.2.1 Konvektio	19
5.2.2 Diffuusio	19
5.3 Radonin torjuminen	22
5.4 Määräykset ja ohjeistukset	24
6. MAANVASTAINEN ALAPOHJARAKENNE	25
6.1 Kosteus- ja lämpötekniinen toimivuus	26
6.1.1 Täyttökerros	26
6.1.2 Lämmöneristekerros	29
6.1.3 Betonilaatta	31
6.1.4 Pintarakenne	32
6.1.5 Sisäilma	34
6.1.6 Lattialämmitetty alapohjarakenne	35
6.2 Radontekniinen toimivuus	36
6.2.1 Betonin huokosrakenne	36

6.2.2	Betonin kosteuspitoisuus	40
6.2.3	Betonilaatan ilmatiiviyys.....	41
6.2.4	Pintarakenne.....	41
6.2.5	Lämmöneristekerros	42
6.2.6	Täyttökerros.....	43
7.	TUTKIMUSMENETELMÄT	44
7.1	Maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusmittaustulosten tarkastelu	44
7.2	Radonläpäisevyyden laboratoriokokeet.....	44
7.2.1	Koekappaleiden irrotus	47
7.2.2	Koekappaleiden käsittely ja tiivistäminen	49
7.2.3	Mittausjärjestelyt	50
7.2.4	Koekappaleen ja kammion poikkileikkauksen aiheuttama mittausepävarmuus	53
8.	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU.....	56
8.1	Alapohjarakenteen kosteustekninen toimivuus.....	56
8.1.1	Pintarakenteen vesihöyryvastuksen vaikutus	57
8.1.2	Lämmöneristekerrospaksuuden vaikutus	58
8.1.3	Betonilaatan ja täyttökerroksen välisen lämpötilaeron vaikutus ...	61
8.1.4	Ulkoilman vaikutus	63
8.1.5	Maanvastaisen alapohjarakenteen täyttökerroksen vaikutus.....	68
8.1.6	Sisäilman vesihöyrypitoisuuden vaikutus betonilaatan kosteusjakaumaan.....	69
8.1.7	Täyttökerroksen huokosilman suhteellisen kosteuden vaikutus...	71
8.2	Maanvastaisen betonilaatan radonläpäisevyys	72
8.2.1	Koekappaleiden kosteusjakaumat.....	72
8.2.2	Koekappaleiden puristuslujuudet	74
8.2.3	Koekappaleiden huokoisuus	75
8.2.4	Koekappaleiden oma radontuotto	76
8.2.5	Koekappaleiden diffuusiokerroin	77
9.	JOHTOPÄÄTÖKSET	83
9.1	Tutkimuksen onnistuminen.....	83
9.2	Maanvastaisen alapohjarakenteen kosteustekninen toiminta	83
9.3	Betonilaatan kosteuspitoisuuden vaikutus radonläpäisevyyteen	85
10.	YHTEENVETO	89
	LÄHTEET	92
	LIITTEET.....	95

MERKINNÄT

δ_v	vesihöyrynläpäisevyys	m^2/s
δ_p	vesihöyrynläpäisevyys	$kg/(msPa)$
ε	materiaalin huokoisuus	
ξ	betonin kapillaarihuokoisuus	
φ	suhteellinen kosteus	% RH
v	vesihöyrypitoisuus	kg/m^3
v_{sat}	vesihöyryn kyllästypitoisuus	kg/m^3
λ	väliaineen lämmönjohtavuus	$W/(mK)$
λ	hajoamisvakio	1/h
Φ	materiaalin oma radontuotto	$Bq/(m^2h)$
β_v	pinnan kosteudensiirtokerroin	m/s
λ	väliaineen lämmönjohtavuus	$W/(mK)$
ρ_a	ilman tiheys $\approx 1,2 kg/m^3$	$kg/m^3 (20\text{ °C})$
η	veden viskositeetti	
ρ_w	veden tiheys $\approx 1000 kg/m^3$	$kg/m^3 (0\text{ °C})$
σ	veden pintajännitys	
θ	reunakulma	°
μ	kaasun moolimassa	mol/kg
d	paksuus	m
g	kosteusvirran tiheys	$kg/(m^2s)$
g_{conv}	konvektiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys	$kg/(m^2s)$
g	putoamiskiihtyvyys = $9,81 m/s^2$	m/s^2
h	väliaineen lämmönsiirtokerroin	W/m^2
k	veden permeabiliteetti	kg/m
p_c	huokosalipaine	Pa
p_g	ilmanpaine	Pa
p_w	hydrostaattinen paine	Pa
p	radonmuutoksen nousukulma	$Bq/(m^3s)$
q	lämpövirran tiheys	W/m^2
q_c	konvektiolla siirtyvä lämpövirran tiheys	W/m^2
q	diffuusiovirtaus	$Bq/(m^2h)$
r_a	ilmavirran tiheys	$m^3/(m^2s)$
r	säde	m
r	diffuusiomatka	m
v	molekyylin nopeus	m/s
A	pinta-ala	m^2
A_w	veden imeytymiskerroin	$kg/(m^2/\sqrt{s})$
B_w	veden tunkeutumiskerroin	m/\sqrt{s}
C	radonpitoisuus	Bq/m^3
D_a	molekyylidiffuusiokerroin	m^2/s
D_e	materiaalin tehokas diffuusiokerroin	m^2/h
E_d	pinnan radonin ekshalaatio	$Bq/(m^2s)$
H	kokonaislämpövirta	W
I	huokosten pituus	m
J	radonkaasun määrä	Bq/m^3
L	materiaalin paksuus	m
$R_{maaperä}$	ilmavirtauksen määrä maaperästä	m^3/s
R	rakenteen lämmönvastus	$W/(mK)$
R	kaasuvakio $=8,314 \times 10^{11} J/Kmol$	$J/(Kmol)$

S_f	sisäilman radonpitoisuus	Bq/(m ³ s)
T	lämpötila	K
V	tilavuus	m ³
W	veden kokonaismäärä	kg/m ²
Z_v	vesihöyrynvastus	s/m
Z_p	vesihöyrynvastus	(m ² sPa)/kg
ΔC	radonin pitoisuusero	Bq/m ³

MÄÄRITELMÄT

Käsitteet ja määritelmät

Diffuusio	Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuuseroja (tai osapaine-eroja). Diffuusiossa kaasu siirtyy korkeammasta pitoisuudesta alempaan pitoisuuteen.
Diffuusiokerroin	Diffuusiokerroin on kokeellisesti määritettävä kerroin, joka kuvaa kaasun virtausnopeutta rakenteessa.
Ekshalaatio	Materiaalin pinnalta vapautuva radonpitoisuus diffusion ja materiaalin oman radontuoton vaikutuksesta
Hygroskooppinen tasapainokosteus	Hygroskooppinen tasapainokosteus tarkoittaa sitä kosteuspitoisuutta, joka stationääritilassa sitoutuu huokoiseen aineeseen ympäristön tietyssä suhteellisessa kosteudessa ja lämpötilassa.
Hygroskooppisuus	Hygroskooppisuus tarkoittaa huokoisen aineen kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.
Kondensoituminen	Kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä rakenteiden pintoihin vedeksi tai jääksi, kun ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut pinnan lähellä kyllästyskosteuden (RH = 100 %)
Konvektio	Konvektio syntyy, kun väliaine virtaa ulkopuolisen voiman (pakotettu konvektio) tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen (luonnollinen konvektio) vaikutuksesta. Vesihöyry ja lämpö siirtyy konvektiolla virtaavan ilman mukana.
Kyllästyskosteus	Kyllästyskosteus ilmoittaa vesihöyrypitoisuuden, joka ilmaan mahtuu tietyssä lämpötilassa
Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus (λ) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen.
Suhteellinen kosteus	Ilman suhteellinen kosteus ilmoittaa kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä kyllästyskosteuspitoisuuteen verrattuna tietyssä lämpötilassa
Vesihöyrynläpäisevyys	Vesihöyrynläpäisevyys (δ_v tai δ_p) ilmoittaa vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero (tai vesihöyryn osapaine-ero) on yksikön suuruinen. Kosteus voi siirtyä materiaalissa muissakin

olomuodoissa kuin vesihöyrynä, jolloin voidaan puhua myös materiaalin kosteudenläpäisevyydestä.

- Vesihöyrynläpäisykerroin** Vesihöyrynläpäisykerroin (W_v ja W_p) ilmoittaa vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen rakenneosan, kun rakenneosan eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero on yksikön suuruinen.
- Vesihöyrynvastus** Vesihöyrynvastuksella (Z_v tai Z_p) tarkoitetaan vesihöyrynläpäisykerroimen käänteisarvoa. Tarkkaan ottaen vain vesihöyrynläpäisykerroimessa on mukana rajapintojen aineensiirtokerroimien vaikutus, mutta niiden osuus on käytännössä merkityksetön.
- Vesihöyrypitoisuus** Vesihöyrypitoisuus (μ) ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyrymäärän. Vesihöyrypitoisuuksien ero pyrkii tasoittumaan diffuusion avulla.
- Vesi-sideainesuhde [v/s]** Betonimassaan sekoitusvaiheessa käytetyn veden massan suhde sideaineen massaan. Vesi-sideainesuhteella on merkittävä vaikutus betonin lujuuteen ja huokoisuuteen.

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

1980-luvulla maanvastaisten betonilaattojen alapuolella polystyreeninä käytetyn lämmöneristeen paksuutena on tyypillisesti käytetty 50–100 mm. Tätä ennen rakenteita on usein toteutettu myös lämmöneristämättöminä. Ympäristöministeriön asettaman asetuksen (C3 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten lämmöneristys, 2010) rakenneosakohtaisten lämmönläpäisykertoimien enimmäisarvojen tiukennuttua, maanvastaisten betonilaattojen lämmöneristepaksuudet ovat kasvaneet. Lisäksi maanvastaisissa alapohjarakenteissa käytetään yhä useammin lattialämmitystä.

Kasvaneen lämmöneristyskerroksen ja lattialämmityksen johdosta alapohjarakenteen kosteustekninen toimivuus on parantunut ja pitkällä aikavälillä betonilaattojen kosteuspiitoisuudet tulevat tasaantumaan matalammalle tasolle verrattuna 1980-luvulla valmistettuihin alapohjarakenteisiin. (Leivo ja Rantala 2002)

Nykyisen ohjeen mukaan 80 mm betonilaatta on riittävän paksu pitämään radonin diffuusiiovirran rakenteen läpi tarpeeksi pienenä, ettei sisäilman radonpitoisuudet nouse haitalliselle tasolle diffuusion vaikutuksesta normaalin radonpitoisuuden alueilla (RT 103123, Radonin torjunta). Betonille tehdyissä radonin diffuusioläpäisevyyden mittauksissa on havaittu, että radonin läpäisevyys kasvaa betonirakenteen suhteellisen kosteuden alentuessa. (Kettunen 2018)

Alapohjarakenteissa betonin suhteellinen kosteus tasaantuu melko hitaasti, jolloin radonin diffuusiiovirta voi kiihtyä ajan kuluessa betonin kuivuessa. Tällöin nykyisten vaatimusten mukaisesti lämmöneristetyissä maanvastaisissa betonirakenteissa ongelmaksi voi muodostua oletettua suurempi radonin diffuusiiovirta alapohjarakenteen läpi sisäilmaan, vaikka rakenteen ilmatiiviys kaikkine liittymineen olisikin hyvä.

1.2 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen päätavoite on selvittää, miten nykyaikainen maanvastainen alapohjarakenne toimii kosteusteknisesti ja mihin betonilaatan kosteustasoon kosteuspiitoisuus tasaantuu. Lisäksi tavoitteena on selvittää miten alapohjarakenteen eri rakennekerrokset ja ympäröivät tekijät vaikuttavat rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen.

Diplomityön toisena päätavoitteena on selvittää miten betonin kosteuspitoisuus vaikuttaa radonläpäisevyyteen tekemällä laboratoriokokeita ja vertailemalla niitä kirjallisuudesta löytyviin laboratoriomittauksiin. Laboratoriokokeet suoritetaan maanvastaisesta betonilaatasta irrotettuihin koekappaleisiin, jotka ovat noin 15 vuotta vanhoista kiinteistöistä.

Lisäksi osatavoitteena on selvittää miten betonin muut materiaaliominaisuudet vaikuttavat radonläpäisevyyteen. Betonin materiaaliominaisuuden vaikutusta tarkastellaan kirjallisuudessa tehtyjen tutkimusten ja laboratoriokokeiden perusteella.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja rajaukset

Työn teoriaosuudessa käsitellään rakennusfysikaalisten perusilmiöiden teoriaa, joka vaikuttaa olennaisesti maanvastaisen alapohjarakenteen kosteus-, lämpö- ja radontekniseen toimivuuteen. Lisäksi teoriaosuudessa tarkastellaan maanvastaisen alapohjarakenteen rakennekerrosten vaikutusta kosteus-, lämpö- ja radontekniseen toimivuuteen.

Diplomityö sisältää aineistopohjaisen tutkimusosion, jossa käydään läpi alapohjarakenteisiin suoritettuja erinäisten kuntotutkimusten yhteydessä tehtyjä kosteusmittaustuloksia. Aineiston perusteella tutkitaan miten eri muuttujat korreloivat alapohjarakenteen kosteustekniseen toimivuuteen. Aineisto on hankittu Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n tekemistä kuntotutkimuksista ja -selvityksistä. Lisäksi kosteusmittaustuloksia on hankittu Helsingin kaupungin kiinteistöihin tehdyistä tutkimuksista. Aineiston hankinnan yhteydessä aineistoa rajattiin siten, että betonin ikä mittaushetkellä on vähintään 3 vuotta ja alapohjarakenteessa on vähintään 50 mm lämmöneristettä betonilaatan alapuolella.

Kokeellisessa osuudessa mitataan alapohjarakenteen betonilaatasta irrotettujen koekappaleiden radonläpäisevyyttä, jonka perusteella betonille määritetään radondiffuusiokerroin. Lisäksi koekappaleille määritetään puristuslujuus, kosteuspitoisuus, tiheys sekä huokoisuus. Mittaukset suoritettiin neljälle koekappaleelle, jotka olivat irrotettu kahdesta eri kohteesta Tampereen kaupungin kiinteistöistä.

2. LÄMPÖ

Lämpö on aineen atomien tai molekyylien värähtelyliikettä. Lämmöllä on kolme eri tapaa siirtyä: johtumalla, konvektiolla ja säteilyllä.

2.1 Lämmön johtuminen

Lämmön johtumisessa lämpö siirtyy kiinteissä aineissa ja nesteissä molekyylien liike-energian avulla. Johtumiselle ominaista on se, että lämpö pyrkii tasaantumaan lämpimästä kylmään. (Siikanen 2014)

Materiaalin lämpövhtavuuteen λ [W/mK] vaikuttaa materiaalin tiheys ja kosteus. Kosteu- den, lämpötilan ja tiheyden kasvaessa materiaalin lämmön johtuminen kasvaa hygro- skooppisissa materiaaleissa. (RIL255-1-2014, Vinha et. al 2005) Johtumalla tapahtu- vassa lämmön siirtymisessä lämpövirran tiheys voidaan laskea Fourierin lailla (2.1)

$$q = -\lambda \Delta T = -\left(\lambda \frac{\Delta T}{\partial x}, \lambda \frac{\Delta T}{\partial y}, \lambda \frac{\Delta T}{\partial z}\right) \quad (2.1)$$

missä

q	on	lämpövirran tiheys [W/m ²]
λ	on	väliaineen lämmönjohtavuus [W/(m K)]
T	on	lämpötila [K]
x, y, z	on	lämpövirran suuntakoordinaatti [m]

Materiaalin kykyä vastustaa lämmön siirtymistä materiaalikerroksen läpi johtumalla kut- sutaan lämmönvastukseksi R [m²K/W]. Lämmönvastus lasketaan seuraavalla kaavalla (2.2) (Hagentoft 2001),

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (2.2)$$

missä

d	on	materiaalin kerrospaksuus.
-----	----	----------------------------

Monikerroksellisen rakenteen läpi johtumalla siirtyvä lämpövirran tiheys q voidaan laskea seuraavalla kaavalla (2.3),

$$q = \lambda - \frac{T_1 - T_2}{\Sigma R} \quad (2.3)$$

missä

$T_1 - T_2$	on	lämpötilaero rakenteen yli [°C],
-------------	----	----------------------------------

ΣR on rakenteen lämmönvastus [W/(mK)].

Kokonaislämpövirta H materiaalin läpi saadaan lämpövirran tiheyden q ja pinta-alan A tulona kaavalla (2.4) (Hagentoft, 2001),

$$H = qA = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (2.4)$$

missä

H on kokonaislämpövirta [W],
 A on pinta-ala [m²],
 d on rakenteen paksuus [m].

2.2 Lämmön konvektio

Konvektiossa lämpöenergia siirtyy kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Konvektio tapahtuu joko luonnollisesti tai pakotetusti. Luonnollisessa konvektiossa väliaine liikkuu lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen seurauksesta. Pakotetussa konvektiossa väliaine siirtyy eteenpäin ulkopuolisen voiman takia, esimerkiksi tuulen tai ilmanvaihtojärjestelmän aiheuttaman ilmavirtauksen vuoksi. (Vinha, 2011)

Materiaalin pinnan lämpötilan ollessa suurempi kuin virtaavan väliaineen lämpötila, siirtyy lämpöä materiaalista väliaineeseen konvektion avulla. Materiaalin pinnan lämpötila alenee konvektion vaikutuksesta, koska virtaavan väliaineen lämpötila on pienempi verrattuna materiaaliin. (Vinha, 2011)

Konvektion avulla materiaalin pinnasta ympäröivään ilmaan siirtyvän lämpövirran tiheyden q_c suuruus voidaan laskea seuraavalla kaavalla (2.5) (Hagentoft, 2001),

$$q_c = \alpha_c (T_s - T_a) \quad (2.5)$$

missä

α_c on väliaineen lämmönsiirtokerroin [W/m²],
 $T_s - T_a$ on materiaalin pinnan ja ympäröivän ilman välinen lämpötilaero [°].

Rakenteen sisäisessä konvektiossa, suljetussa tilassa, rakenteen huokosilma alkaa siirtyä rakenteen sisäisten lämpötilaerojen vuoksi. Ilmiö on yleinen varsinkin pystysuuntaisissa ulkoseinärakenteissa, joissa rakenteen sisäpinta on lämmin ja ulkopinta viileä. Tällöin konvektiovirtaus syntyy, kun rakenteen huokosilma lämpenee sisäpinnassa, jolloin ilmavirtaus on ylöspäin, ja kun huokosilma viilenee kohdatessaan ulkopinnan, jolloin ilmavirtaus on alaspäin. Rakenteen sisäinen konvektio heikentää rakenteen lämmöneristystä, koska johtumalla ja säteilemällä siirtyvän lämmön lisäksi rakenteessa lämpö siirtyy myös konvektiolla. (Kivioja & Vinha, 2020) Alapohjarakenteessa ei tapahdu rakenteen

sisäistä konvektiota, koska lämpövirran suunta on ylhäältä alaspäin ja rakenteen lämpimämpi pinta on rakenteen yläpinta (Vinha 2011)

2.3 Lämpösäteily

Lämmönsiirto konvektiolla ja johtumisella vaatii aina väliaineen, mutta lämpösäteily ei. Lämpösäteilyssä lämpöenergia siirtyy kahden eri lämpötilassa olevan pinnan välillä sähkömagneettisina aaltoina. Lämpösäteilyn aallonpituutena on $10^{-1} - 10^2 \mu\text{m}$, josta näkyvän valon alue on $0,40 - 0,70 \mu\text{m}$. Lämpösäteilyn kohdatessa materiaalin pinnan, osa säteilyä heijastuu pinnasta poispäin, osa absorboituu materiaaliin ja osa läpäisee materiaalin. (Hagentoft 2001)

Leivon ja Rantalan (2005) mukaan lämpösäteilyllä ei ole merkittävää vaikutusta alapohjarakenteen lämpöteknisessä toimivuudessa. Alapohjarakenne koostuu yhtenäisistä rakennemassoista, jolloin oleellisin lämmönsiirtymismuoto on johtuminen. Tämän takia lämpösäteilyä ei tarkastella tässä diplomityössä tarkemmin.

3. KOSTEUS

Kosteudella tarkoitetaan vettä sen kaasumaisessa, nestemäisessä ja kiinteässä olomuodossa, mikä ei ole sitoutunut kemiallisesti vesimolekyylinä materiaaliin. Kosteuden olomuoto määräytyy ympäröivän ilman lämpötilasta ja paineesta. Kosteus voi esiintyä jäänä, vetenä tai vesihöyrynä. (Siikanen, 2014)

3.1 Kosteus ilmassa

Kostea ilma on ilman ja vesihöyryn kaasuseos. Kostea ilma voidaan rakenneteknisessä tarkastelussa käsitellä ideaalikaasuna, jolloin siihen pätee ideaalikaasun tilanyhtälö. (Björkholtz 1997)

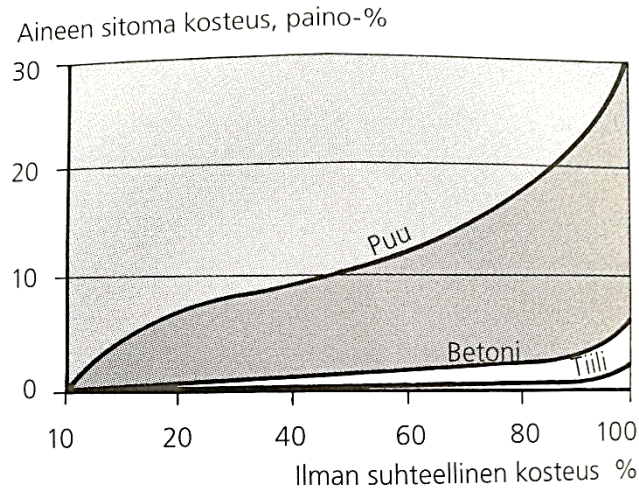
Kostean ilman vesihöyryn määrä voidaan esittää vesihöyrypitoisuutena, vesihöyryn osapaineena tai suhteellisena kosteutena (% RH). Vesihöyrypitoisuus ilmoittaa kuinka paljon ilma sisältää vesihöyryä grammoina yhtä ilmakuutiometriä kohden.

Suhteellinen kosteus ilmoittaa ilman vesihöyryn määrän prosentteina vesihöyrymäärästä mitä vallitsevan lämpötilan ilma kykenee sisältämään. Suhteellisen kosteuden ollessa 100 % vesihöyry tiivistyy vedeksi, koska ilman vesihöyryn määrä saavuttaa enimmäisvesihöyrymäärän (Siikanen, 2014). Ilman enimmäisvesihöyrymäärää kutsutaan vesihöyryn kyllästyspitoisuudeksi, joka on voimakkaasti riippuvainen lämpötilasta (RIL 255-1 2014 ja Hagentoft 2001).

3.2 Kosteus materiaalissa

Rakennusmateriaalit kykenevät sitomaan itseensä kosteutta, jonka määrä ilmoitetaan tyypillisesti paino-osina, painoprosenttina, kosteusmääränä tilavuutta kohden, tilavuusosina tai tilavuusprosentteina. Kosteus voi olla materiaalissa materiaaliin sitoutuneena, vetenä tai vesihöyrynä. Betonirakenteissa kosteuden määrä ilmoitetaan tyypillisesti huokosilman suhteellisena kosteutena. (Vinha et al. 2005.). Materiaalin kykyä sitoa ja luovuttaa kosteutta ilmasta kutsutaan hygroskooppisuudeksi.

Eri materiaalien hygroskooppisuus vaihtelee paljon, esimerkiksi betonilla on suuri hygroskooppisuus, kun mineraalivillalla taas hygroskooppisuus on vastaavasti pieni. Materiaalin kykyä sitoa itseensä kosteutta kuvataan sorptiokäyrällä (Kuva 3.1). (Siikanen, 2014 ja Leivo & Rantala, 2002)



Kuva 3.1. Eri materiaalien sorptiokäyrät, jotka kuvaavat materiaalien kykyä sitoa kosteutta itseensä ympäröivästä ilmasta. (Siikanen, 2014)

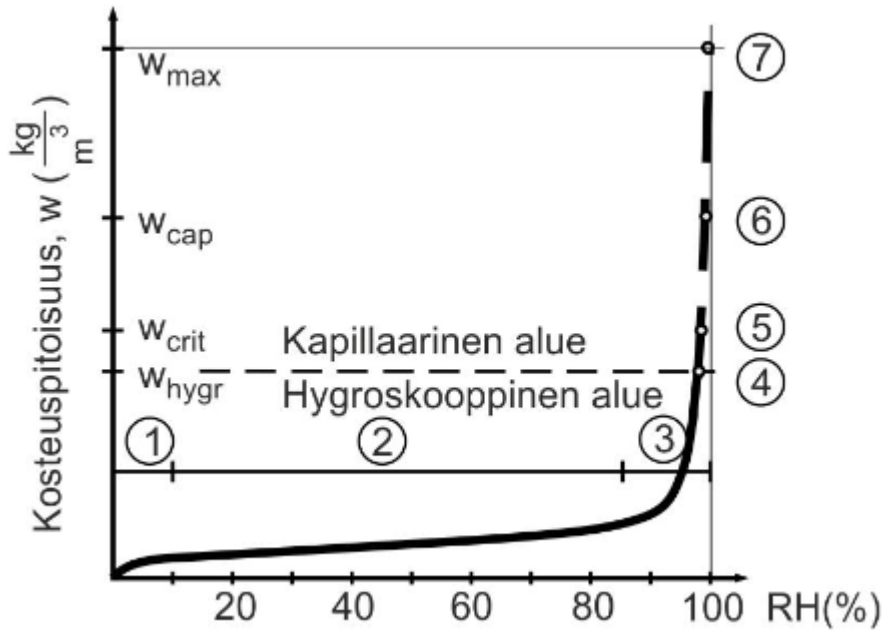
Kosteus sitoutuu materiaalin ensin monomolekyylarisena adsorptiona, jossa vesimolekyylit kiinnittyvät pintavoimin materiaalin huokosseinämiin yhtenä kerroksena (Kuva 3.2, kohta 1.) Kosteuden edelleen lisääntyessä alkaa polymolekyylarinen adsorptio, jolloin materiaalien seinämiin kiinnittyneiden vesimolekyyliden kerrospaksuus kasvaa (Kuva 3.2, kohta 2.). Kun polymolekyylarinen adsorptio etenee tarpeeksi pitkälle, vesimolekyyliden sitoutumisvoimat pienenevät ja vesimolekyylit alkavat käyttäytyä vapaammin ja pienemmissä huokosissa kosteus alkaa siirtyä kapillaarivoimien avulla. Ilmiötä kutsutaan kapillaarikondenssiksi. (Kuva 3.2, kohta 3.)

Kun materiaalin huokostilavuuden suhteellinen kosteus saavuttaa hygroskooppisen yläraja-arvon 98 % RH, materiaali saavuttaa hygroskooppisen kyllästyskosteuspitoisuuden, jota materiaalin kosteuspitoisuus ei voi ylittää ilman kosketusta vapaaseen veteen. (Kuva 3.2, kohta 4.) (Vinha 2011, Siikanen 2014).

Kuva 3.2 kohdassa 5 materiaalin kosteuspitoisuus on noussut kapillaariselle alueelle, jolloin kosteus sitoutuu pääosin nestemäisessä muodossa huokosten muodostamassa kapillaariverkostossa. Kapillaarisella alueella materiaalin kosteuspitoisuus suhteellisen kosteuden funktiona nousee hyvin jyrkästi verrattuna hygroskooppiseen alueeseen.

Kuva 3.2 kohdassa 6 kosteuspitoisuus saavuttaa kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden, joka kuvaa suurinta mahdollista materiaalin kosteuspitoisuutta, jonka materiaali voi saavuttaa kapillaari-imun seurauksena. Materiaali voi saavuttaa kapillaarisen kyllästyspitoisuuden ainoastaan ollessaan kosketuksissa vapaaseen veteen. Tällöinkin materiaaliin jää huokosia, jotka eivät täyty vedellä. Kuvan 2 kohta 7 kuvaa materiaalin maksimikosteutta, joka saavutetaan ainoastaan, jos materiaalin huokosilma imetään pois ja sen

jälkeen materiaali upotetaan veteen, jolloin kaikki materiaalin huokokset täyttyvät vedellä. (Vinha 2011)



Kuva 3.2. Materiaalin tasapainokosteuskäyrä. (Vinha 2011)

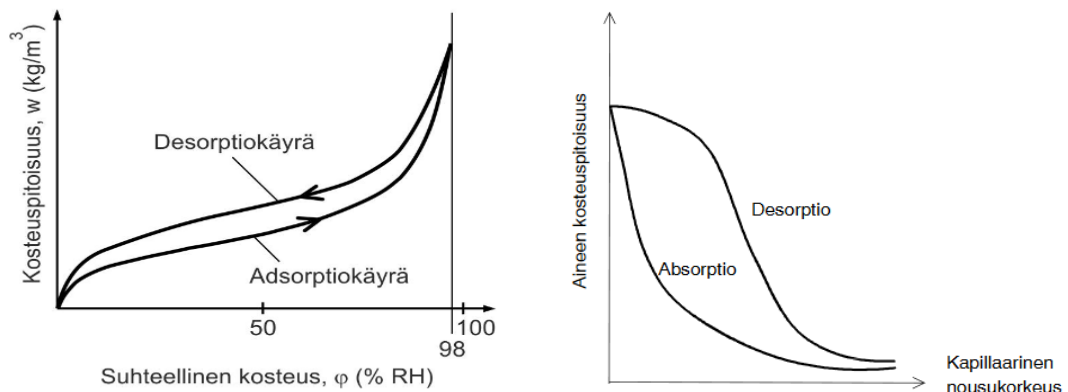
Materiaalin tasapainokosteuskäyrät eroavat huomattavasti toisistaan riippuen määritetäänkö käyrä kuivuvasta vai kostuvasta kappaleesta. Tätä ilmiötä kutsutaan hystereesiksi. (Hagentoft 2001) Hystereesissä materiaalin kosteuspitoisuus on erilainen riippuen siitä, kuivuuko (desorptio) vai kastuuko (adsorptio) materiaali, vaikka materiaalin huokosilman suhteellinen kosteus on yhtä suuri. (Kuva 3.3)

Leivon ja Rantalán (2002) mukaan Sandberg (1987) esittää, että hystereesi tapahtuu sen vuoksi, että kostuvan materiaalin huokosiin jää ilmaa, joiden poistuminen liukene-malla veteen on hidasta. Lisäksi hystereesiä lisää se, että huokosten muodon vaikutuk-sesta kuivuminen tapahtuu pienemmässä ilman kosteudessa verrattuna kastumiseen.

Vinha (2011) toteaa, että hystereesi tapahtuu sen vuoksi, että huokosverkostossa on sen verran suuria huokosia, että kapillaarikondenssi ei täytä niitä. Materiaalin kuivussa vesi voi jäädä korkeammassa kosteuspitoisuudessa täyttyneisiin suurempiin huokosiin. Jos vedellä täyttyneet huokokset ovat yhteydessä muuhun huokosverkostoon vain ohuempien huokosten kautta, niin ohuemmissa huokosissa vesi pysyy kapillaarivoimien avulla huokosissa ja estää suuremman huokosen sisältämän veden poistumista huokosesta. Tällöin huokosissa oleva kosteus pääsee kuivumaan diffuusiolla ja kapillaarisen siirtymän avulla, kun ympäröivän ilman suhteellista kosteutta alennetaan. Kuitenkin käytännössä materiaalin tasapainokosteus on käyrien välimaastossa, koska tasapainokosteus muuttuu olosuhteiden vaihdellessa. (Vinha 2011)

Kapillaarista kastumista ja kuivumista kuvataan omalla tasapainokosteuskäyrällä, koska materiaalin kosteuspitoisuuden kuvaaminen hygroskooppisella alueella ei ole havainnollistavaa, koska materiaalin huokosilman suhteellinen kosteus on lähes 100 % RH. Tyyppillisesti kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä esitetään huokosalipaineen, huokosten säteen tai kapillaarisen nousukorkeuden funktiona. (Vinha 2011)

Kapillaarisessa absorptiossa ja desorptiossa (Kuva 3.3) on todettu myös tapahtuvan hystereesiä. Leivon ja Rantalan (2002) mukaan tämä johtuu monimutkaisen kapillaariverkoston kytkeytymisestä toisiinsa ja kapillaarihuokoskäytävien säteen muutoksista.



Kuva 3.3. Vasemmalla hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä (Vinha 2011) ja oikealla kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä (Leivo & Rantala 2002)

4. KOSTEUDEN SIIRTYMINEN

Kosteuden siirtymiseen tarvitaan aina jokin voima, esimerkiksi painovoima, paine-ero tai pitoisuuseron muodostama osapaine-ero, jonka avulla kosteus siirtyy. Kosteus voi siirtyä kaikissa olomuodoissa, joista jokaisella olomuodolla on ominaisen siirtymismuoto tai muodot. Lisäksi kosteus voi siirtyä yhtä aikaa monella eri tavalla.

Leivon ja Rantalan (2000) mukaan maanvastaisen betonilaattarakenteen kosteustekniseen käyttäytymiseen vaikuttavat merkittävimmät kosteudensiirtomekanismit ovat seuraavat:

- Diffuusio
- Kapillaarinen siirtyminen
- Konvektio
- Veden painovoimainen siirtyminen

Lisäksi Vinha (2011) mainitsee, että merkittävä kosteuden siirtymismuoto on pintadiffuusio. Lisäksi muita siirtymismuotoja ovat termodiffuusio, liukenemalla tapahtuva diffuusio, effuusio, osmoosi ja elektrokineettinen siirtyminen. Björkholtz (1997) toteaa, että termodiffusiolla ja effuusiolla ei ole rakennusfysikaalisessa tarkastelussa merkitystä.

4.1 Veden painovoimainen siirtyminen

Vesi siirtyy gravitaatiovoiman aiheuttaman potentiaalivuoksi pääasiassa alaspäin, vaikka suunta voi olla osittain myös sivusuuntainen. Veden painovoimaiseen siirtymisen nopeuteen ja veden määrään vaikuttavat vettä läpäisevän materiaalin rakeiden ja huokosten koko sekä muoto. Esimerkiksi karkearakeisessa sorassa vesi siirtyy painovoimaisesti paljon nopeammin kuin pienirakeisessa savessa. (Leivo ja Rantala, 2002) Veden painovoimainen siirtymismuoto aiheuttaa valtaosan rakennusten kosteusvaurioista, koska siirtyvän kosteuden määrät ovat suuria ja kertyvät nopeasti. Tämän takia veden painovoimainen siirtyminen on otettava huomioon rakenteiden suunnittelussa ja toteuttamisessa. (Vinha 2011)

4.2 Kosteuden konvektio

Kosteuden konvektio tarkoittaa ilman sisältämän vesihöyryn siirtymistä ilmavirtausten mukana, joka on analoginen ilmiö lämmön konvektiolle. Konvektion vaikuttavia tekijöitä on esitetty Luvussa 2.2.

Kosteuden konvektiolla voi olla rakenteelle sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia riippuen siitä, kuinka ilma liikkuu rakennusvaipan sisä- ja ulkopinnan välillä. Ilmavirtausten ollessa ulkoa sisäänpäin ilman lämpötila kohoaa, jolloin ilman kyky sitoa vesihöyryä kasvaa. Ilmavirtausten ollessa ulkoa sisäänpäin konvektiolla voi olla rakenteita kuivattava vaikutus. Ilman virtausten ollessa sisältä ulospäin ilman lämpötila laskee, jolloin sen kyky sitoa vesihöyryä vähenee ja rakenteen vesihöyrypitoisuus voi kasvaa. (Björkholtz 1997)

Kosteuden konvektiosta voi aiheutua kondenssia eli vesihöyryn tiivistyminen vedeksi. Tällöin pinnan lämpötila on alhaisempi, kuin ohi virtaavan ilman kastepistelämpötila. Tyypillisesti kosteuden kondenssia aiheuttaa kylmäsiilat ja ilmansulun puutteellisuus, joka mahdollistaa ilmavirtaukset sisältä ulos. Kondenssin syntymisen riskiä lisää sisäilman ylipaineisuus, jolloin ilmavirtaukset sisäilmasta rakenteeseen lisääntyvät ilmavuotoreittejä pitkin.

Konvektiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys g_{conv} [kg/(m²s)] lasketaan kaavasta 4.1, kun tiedetään siirtynyt ilmamäärä ja vesihöyrypitoisuuden erotus (Vinha 2011)

$$g_{conv} = r_a(v_1 - v_2) \quad (4.1)$$

missä

r_a on ilmavirran tiheys [m³/(m²s)]

v_1 ja v_2 on vesihöyrypitoisuudet eri puolilla rakennetta [kg/m³]

Yllä oleva kaava ottaa huomioon vaipan yli virtaavan ja konvektiovirtauksen tilalle tulevan korvausilman, joka sisältää myös vesihöyryä. Raossa tai epätiiviyyskohdassa tapahtuvan kosteuden konvektion lisäksi kosteus liikkuu myös diffuusiolla, kun vesihöyryä adsorboituu huokosrakenteeseen, mutta se on usein niin pientä, että sitä ei tarvitse huomioida.

4.3 Diffuusio

Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, jossa kaasujen osapaine-erot pyrkivät tasaantumaan niin, että kaasumolekyylit liikkuvat korkeammasta pitoisuudesta matalampaan. Esimerkiksi sisäilman ja ulkoilman vesihöyry pyrkii tasaantumaan yleensä lämpimästä kylmään, koska lämpimässä ilmassa on usein enemmän vesihöyryä. (Siikanen, 2014)

Kaasumolekyylien pitoisuusero aiheuttaa potentiaalieron, jonka voiman avulla kaasumolekyylit siirtyvät. Kaasumolekyylien välillä oleva potentiaaliero voidaan ilmoittaa vesihöyrypitoisuuden tai osapaineen erona. Rakennusteknisessä suunnittelussa diffuusiolla

tarkoitetaan usein vesihöyryn liikkumista rakenteen läpi. (Siikanen, 2014, Björkholtz 1997 ja Vinha 2019)

Materiaalin läpi tapahtuva vesihöyryn diffuusiovirtaus on riippuvainen materiaalin vesihöyrynläpäisevyydestä δ [m^2/s], joka kuvaa ominaisuutta päästä lävitseen vesihöyryä. Vesihöyrynläpäisevyyteen vaikuttaa muun muassa materiaalin tiheys, lämpötila ja huokosilman suhteellinen kosteus. Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys kasvaa, kun materiaalin lämpötila kasvaa (Siikanen 2014, Vinha 2011). Materiaalin huokosilman suhteellisen kosteuden kasvaessa pienet huokokset täyttyvät ensin vedellä ja osa kosteuden siirtymisestä tapahtuu kapillaarisesti (Luku 3.2)

Materiaalin vesihöyrynvastus Z_μ [s/m] tai Z_p [$\text{m}^2\text{sPa}/\text{kg}$] kuvaa aineen vesihöyryn virtausta vastustavaa ominaisuutta. Vesihöyrynvastus Z_μ [s/m] voidaan määrittellä vesihöyrypitoisuuseron avulla. Toisaalta vesihöyrynvastus Z_p [$\text{m}^2\text{sPa}/\text{kg}$] voidaan määrittää myös vesihöyryn osapaine-eron avulla. Vesihöyrynvastukset Z_μ ja Z_p saadaan kaavoilla 4.2 ja 4.3: (Vinha 2011)

$$Z_\mu = \frac{d}{\delta_\mu} \quad (4.2)$$

$$Z_p = \frac{d}{\delta_p} \quad (4.3)$$

Diffuusiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys g [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$] voidaan laskea Fickin lain (4.4) avulla (Fick 1885)

$$g = -\delta_v \Delta v = -\left(\delta_v \frac{\Delta v}{\partial x}, \delta_x \frac{\Delta v}{\partial y}, \delta_z \frac{\Delta v}{\partial z}\right) \quad (4.4)$$

missä

δ_v	on	vesihöyrynläpäisevyys [m^2/s]
x, y, z	on	kosteusvirran suuntakoordinaatit [m]

Toisaalta kosteusvirran tiheys voidaan laskea myös vesihöyryn osapaine-eron avulla kaavalla 4.5:

$$g = -\delta_p \nabla p = -\left(\delta_v \frac{\Delta p}{\partial x}, \delta_x \frac{\Delta p}{\partial y}, \delta_z \frac{\Delta p}{\partial z}\right) \quad (4.5)$$

missä

δ_p	on	vesihöyrynläpäisevyys [m^2/s]
x, y, z	on	kosteusvirran suuntakoordinaatit [m]

Kun tilannetta tarkastellaan yksiulotteisesti yhteen suuntaan Fickin kaava voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$g = -\delta_v \frac{dv}{dx} \quad (4.6)$$

$$g = -\delta_p \frac{dp_v}{dx} \quad (4.7)$$

Kosteusvirran tiheys materiaalin läpi voidaan laskea materiaalin vesihöyrynläpäisykerroimen avulla W_v avulla kaavalla 4.8. (Vinha 2011)

$$g = W_v(v_1 - v_2) \quad (4.8)$$

missä

$v_1 - v_2$ on vesihöyrypitoisuus ero rakenteen yli

Lopulta materiaalissa diffuusiolla siirtynyt kosteus siirtyy materiaalia ympäröivään ilmaan, jos ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuus on pienempi kuin materiaalin pinnan vesihöyrypitoisuus. Ilmaan siirtyvän kosteusvirran tiheys materiaalin pinnasta voidaan laskea seuraavalla kaavalla 4.9 (Vinha 2011),

$$g = \beta_v(v_s - v_a) \quad (4.9)$$

missä

v_s on pinnan vesihöyrypitoisuus [kg/m^3],

v_a on sisäilman vesihöyrypitoisuus [kg/m^3].

Pinnan kosteudensiirtokerroin β_v saadaan Lewisin yhtälöstä 4.10 (Vinha 2011),

$$\beta_v = \frac{h_{conv}}{\rho_a c_{pa}} \quad (4.10)$$

missä

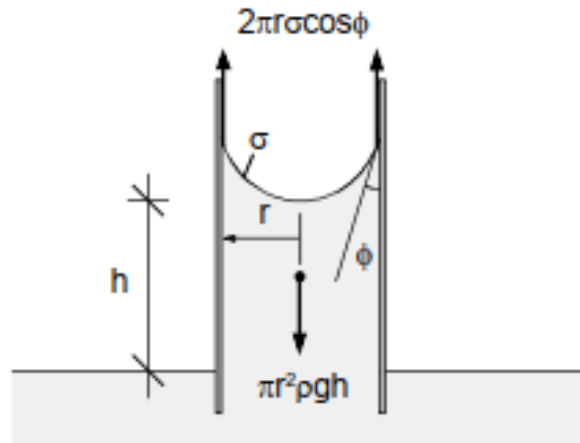
h_{conv} on pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

4.4 Kapillaarinen siirtyminen

Kosteuden kapillaarinen siirtyminen tarkoittaa kosteuden vaaka- tai pystysuuntaista siirtymistä materiaalin huokosissa vapaasta veden pinnasta. Kuitenkin kapillaarista kosteuden siirtymistä voi tapahtua ilman vesikosketusta, materiaalin kosteuspitoisuuden ollessa riittävän korkea (Vinha 2011). Materiaalin täytyy olla rakenteeltaan huokoinen ja huokosverkoston yhtenäinen, jotta materiaali kykenee siirtämään kosteutta kapillaarisesti (Vinha et. al 2005).

Vesi siirtyy huokosverkostossa huokosalipaineen avulla, joka syntyy kaareutuvan veden pintaan syntyvän pintajännityksen seurauksena. Vesi pyrkii nousemaan huokosten reunoja pitkin ylös sisäisen koheesion sekä nesteiden ja huokosseinämien välisen adheesion avulla, jolloin veden pinta kaareutuu ja muodostaa meniskuksen.

Kapillaarista kosteuden siirtymistä vastustavat kitkavoimat ja painovoima. Kosteuden kapillaarinen siirtyminen pysähtyy, kun kohonneisiin vesimassoihin kohdistuvat kapillaarivoimat ovat yhtä suuret kapillaarista siirtymistä vastustavien voimien kanssa (Kuva 4.1). Materiaalin kapillaarisesti sitovaa ja huokosissa sijaitsevaa kosteutta kutsutaan kapillaarivedeksi, jonka nousukorkeutta vapaan veden pinnasta kutsutaan kapillaariseksi nousukorkeudeksi. (Leivo & Rantala 2002).



Kuva 4.1. Ylöspäin tapahtuvassa kapillaarisessa siirtymässä huokosalipainetta vastustava voima on veden hydrostaattinen paine. (Vinha 2011)

Huokosalipaine s [Pa] voidaan ratkaista kaavalla 4.11 (Vinha 2011),

$$s = \frac{2\sigma}{r} \cos \theta \quad (4.11)$$

missä

σ on pintajännitys [N/m]

r on huokosputken säde [m]

θ on reunakulma vesipinnan meniskuksen ja putken seinämän välillä [°].

Lisäksi huokosalipaine voidaan määrittää kaavalla 4.12 (Vinha 2011),

$$s = p_g - p_w \quad (4.12)$$

missä

p_g on vallitseva ilmanpaine [Pa]

p_w on huokosputken veden aiheuttama hydrostaattinen paine [Pa].

Laskennallisesti määritetty kapillaarinen nousukorkeus ei kuitenkaan vastaa aina todellisuutta, koska materiaalit eivät ole täysin homogeenisia. Veden kapillaarinen siirtyminen pysähtyy ensimmäiseen liian isoon huokoseen, jossa huokosalipaineen suuruus ei riitä

siirtämään vettä eteenpäin (Vinha 2011). Kapillaarinen nousukorkeus h [m] voidaan määrittää kaavalla 4.13, kun oletetaan meniskuksen reunakulman olevan likimain 0° (Vinha 2011),

$$h = \frac{2\sigma}{\rho_w g r} \quad (4.13)$$

missä

σ	on	veden pintajännitys [N/m]
ρ_w	on	veden tiheys [1000 kg/m ³]
g	on	putoamiskiihtyvyys [9,81 m/s ²]
r	on	huokosputken säde [m].

Kapillaarista siirtymistä voidaan kuvata Darcyn lain 4.14 avulla, jolloin voidaan laskea kapillaarisesti siirtyvä kosteusvirran tiheys g [kg/m²s], jossa potentiaalina on huokosalipaine p_c [Pa] (Leivo & Rantala, 2002),

$$g = \frac{k dp_c}{\eta dx} \quad (4.14)$$

missä

k	on	veden permeabiliteetti [kg/m]
η	on	veden viskositeetti.

Veden kapillaarisen siirtymän tunkeutumissyvyyttä x [m] materiaalissa voidaan arvioida materiaalin kokeellisesti määritetyn veden tunkeutumiskertoimen B_w [m/ \sqrt{s}] avulla, jonka arvo riippuu meniskin muodosta, pintajännityksestä, kosketuskulmasta ja nesteen viskositeetista. Tunkeutumissyvyys lasketaan kaavalla 4.15 (Leivo ja Rantala, 2002).

$$x = B_w \sqrt{t} \quad (4.15)$$

Veden kapillaarisessa siirtymisessä absorboituneen veden kokonaismäärä W [kg/m²] voidaan arvioida kaavan 4.16 avulla (Leivo ja Rantala, 2002),

$$W = A_w \sqrt{t} \quad (4.16)$$

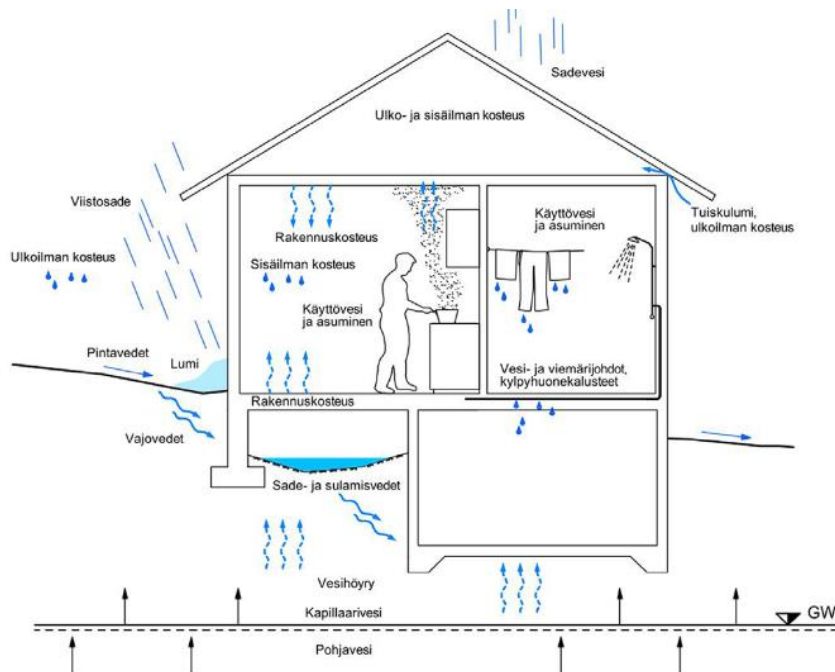
missä

A_w	on	materiaalin veden imeytymiskerroin [kg/(m ² / \sqrt{s})].
-------	----	---

4.5 Kosteuslähteet

Rakenteisiin kohdistuu sekä sisä- että ulkopuolisia kosteuslähteitä Kuva mukaisesti, jossa eri kosteuslähteistä rakenteisiin voi tulla kosteutta kaikissa veden olomuodoissa. Maanvastaisen alapohjarakenteen kannalta merkittävimmät kosteuslähteet ovat pohja-

veden diffuusio ja kapillaarinen siirtyminen, pinta- ja vajovedet, rakennusaikainen kosteus sekä sisäpuoliset kosteuslähteet (Leivo ja Rantala 2002). Muita kosteuslähteitä tässä diplomityössä ei käsitellä tarkemmin.



Kuva 4.2. Rakennuksen sisä- ja ulkopuoliset kosteuslähteet (Pitkäranta et. Al. 2016)

Pinta vedet syntyvät pääosin sade- ja sulamisvesistä, joista pääosa haihtuu takaisin ulkoilmaan maanpinnalta, osa valuu pois pintavesinä vesistöön ja osa imeytyy maaperään vajovetenä. Pinta vedet voivat kulkeutua kohti rakennusta piha-alueen kallistusten ollessa puutteelliset. Pinta vedet aiheuttavat tällöin kosteusrasitusta vajovetenä ja paineelisenä vetenä rakennuksen perustuksiin ja sitä kautta alapohjarakenteisiin. (Kuva) Vajovedet liikkuvat painovoiman aiheuttaman potentiaalinvaihtelun vaikutuksesta maaperässä. Vajovedestä osa haihtuu vesihöyryksi maaperän huokosiin ja osa kulkeutuu pohjavedeksi. Lisäksi rakennuksen ympärillä vajovesi poistuu rakennuksen salaojajärjestelmän avulla ja sitä kautta kosteusrasitus alapohjarakenteeseen vähenee. (Leivo ja Rantala 2000, Siikanen 2014)

Pohjavesi on vettä, joka esiintyy maa- ja kallioperässä maanpinnan alapuolella. Pohjaveden korkeuteen rakennuksen alapuolella vaikuttavat sadevesistä muodostuvan vajoveden määrä, salaojajärjestelmä ja pohjaveden purkautumismäärä avovesistöihin. Pohjavettä muodostuu maanpinnan pintavesistä, jotka imeytyvät maaperään vajovetenä. Vajoveden määrään vaikuttaa maaperän vedenläpäisevyyskyky, esimerkiksi karkearaikaisessa maaperässä pinta vedet imeytyvät helposti maaperään ja sitä kautta pohjaveden pinta nousee. Pohjaveden korkeussijainti vaihtelee paikallisesti. Korkeussijainti riippuu muun muassa sateen määrästä ja maaperän routimisesta, joiden takia pohjaveden

pinta on alimmillaan lopputalvesta. Tällöin maaperän routa on estänyt pintavesien imeytymisen maaperään. Maaperän roudan sulamisen jälkeen pohjaveden pinta nousee tyypillisesti korkeimmilleen. (Leivo ja Rantala 2000).

Pohjavesialueella maa-aineksen huokostilavuus on täysin kyllästynyt vedellä, joten pohjavesi siirtyy maaperässä ylöspäin pääosin kapillaarisesti tyypillisesti alapohjarakenteen kapillaarikatkerrokseen asti. Kapillaarisen siirtymisen pysähtyttyä pohjaveden kosteus siirtyy alapohjarakenteeseen vesihöyryn diffuusiolla. Pohjavedestä muodostuvaan kosteusrasituksen määrään vaikuttavat merkittävästi pohjaveden pinnan korkeus rakennuksen alapohjaan nähden ja ympäröivien rakenteiden kuten salaojien toimivuus. (Siikanen. 2014)

Rakennuksen sisäpuolinen kosteusrasitus koostuu ulkoilman kosteuspitoisuudesta ja asumisen aiheuttamasta kosteuslisästä. Asumisen aiheuttama kosteusrasitus syntyy muun muassa ruuan laitosta, veden käytöstä ja ihmisistä itsestä. Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän tehtävänä on poistaa sisäilman epäpuhdasta ja kosteaa ilmaa sekä tuoda tilalle kuivaa ja puhdasta ilmaa, jolloin sisäilman kosteuspitoisuus laskee.

5. RADON

5.1 Yleistä

Radon on mauton, hajuton ja näkymätön radioaktiivinen kaasu. Radonia (^{222}Rn) syntyy uraanin (^{238}U) hajoamisen välituotteena maankuoressa ja kiviaineksessa, minkä jälkeen radon hajoaa poloniumiksi ^{218}Po , joka muutaman välivaiheen jälkeen hajoaa vakaaksi lyijyksi ^{206}Pb (Arvela et al. 2012). Radonpitoisuus ilmaistaan yksiköllä Bq/m^3 , joka tarkoittaa yhden radonatomien hajoamista sekunnissa tilavuusyksikköä kohden. Radonin hajoamistuotteet säteilevät alfahiukkasia, jotka lisäävät säteilyannosta päätyessään sisäilman mukana ihmisen keuhkoihin, ja sitä kautta myös lisäävät riskiä sairastua keuhkosyöpään. (STUK 2021)

Sisäilman merkittävimpana radonlähteenä toimii maaperä, josta radon voi kulkeutua maanvastaisten rakenteiden läpi ja epätiivien kohtien kautta maaperästä sisäilmaan. Maaperän huokosilman radonpitoisuus Suomessa on tyypillisesti 20 000–100 000 Bq/m^3 . Lisäksi sisäilman radonlähteenä toimivat rakennusmateriaalit, erityisesti betonirakenteet, jotka sisältävät radonlähteenä toimivaa kiviainesta. Rakennusmateriaalit eivät kuitenkaan yksin aiheuta radonpitoisuuden ylittäviä arvoja. Sisäilman radonpitoisuutta voi nostaa myös porakaivoveden käyttö asunnossa, jolloin radonia vapautuu käytettävästä vedestä. (Arvela et al. 2012)

Suomessa rakennusten sisäilman radonpitoisuutta on tutkittu alueellisesti Suomen säteilyturvakeskusten toteuttamien otantatutkimusten avulla. Vuonna 2010 toteutetussa tutkimuksessa tarkasteltiin Suomessa tehtyjä sisäilman radonmittauksia, joiden perusteella laadittiin Suomen radonkartasto. Tutkimuksen perusteella suurimmat radonpitoisuudet ovat Itä-Uudenmaan, Päijät-Hämeen, Kymenlaakson, Kanta-Hämeen, Pirkanmaan ja Etelä-Karjalan maakunnissa. Kyseisissä maakunnissa sijaitsevilla pientaloissa yli 30 prosentissa on mitattu sisäilman radonpitoisuudeksi yli 200 Bq/m^3 , joka ylittää sisäilman sallitun radonpitoisuuden raja-arvon. Maakunnat sijaitsevat sellaisilla alueilla, joissa maalajina on tyypillisesti sora tai hiekka, minkä lisäksi näissä maakunnissa on suuria harjumuodostumia, joissa tyypillisesti mitataan suurimmat sisäilman radonpitoisuudet. Myös kallion päälle perustetuissa rakennuksissa mitataan suuria radonpitoisuuksia. (Arvela et al. 2010)

Suomessa sisäilman radonpitoisuutta mitataan usein radonpurkeilla, joiden toiminta perustuu radonin hajoamistuotteiden lähettämään alfasäteilyyn. Alfasäteily jättää radonmittauspurkissa olevaan muovikalvoon jälkiä, joiden määrä voidaan laskea kalvon sähkökemiallisen tai kemiallisesti käsittelyn jälkeen. (STUK 2021)

Radonpurkkimittauksen keston on oltava vähintään kaksi kuukautta mutta luotettavuuden kannalta suositellaan, että mittauksen kesto olisi kolme kuukautta. Radonpurkkimittaukset toteutetaan syyskyyän ja toukokuun välisenä aikana, jolloin radonpitoisuudet ovat suurimmillaan. (STUK 2021)

5.2 Radonin siirtyminen

5.2.1 Konvektio

Radonin merkittävin siirtymistapa maaperästä sisäilmaan on konvektio, jonka teoria on esitetty luvussa 2.2.

Sisäilman radonpitoisuuden nouseminen konvektion avulla yli sallittujen raja-arvojen, ei välttämättä vaadita kuin pieni epätiiviyiskohta maanvastaisessa rakenteessa. Revon (2016) mukaan täyttökerroksesta sisäilmaan kulkeutuvien epäpuhtauksien määrä kasvaa huomattavasti, kun alapohjarakenteen epätiiviyiskohdassa rako on yli 1 mm leveä.

Konvektiolla kulkeutuvan radonin määrä on tyypillisesti suurimmillaan talviaikaan, jolloin sisä- ja ulkoilman välillä vallitseva paine-ero on suurimmillaan suuren lämpötilaeron vuoksi. Sisäilman radonturvallisuuden kannalta merkittävintä on estää radonpitoisten ilmavirtausten kulkeutuminen maaperästä sisäilmaan. (Arvela et. al 2003)

Konvektiolla siirtyvän radonin määrä sisäilmassa voidaan laskea kaavalla 5.1:

$$S_f = \left(\frac{Q_{maaperä}}{V} \right) C_s \quad (5.1)$$

missä

- S_f on sisäilman radonpitoisuus [Bq/(m³s)]
- Q_{maa} on ilman tilavuusvirta epätiiviyiskohdassa [m³/s]
- V on tutkittavan tilan tilavuus [m³]
- C_s on maaperän ilman radonpitoisuus [Bq/m³].

5.2.2 Diffuusio

Radon siirtyy muiden kaasujen lailla diffuusiolla, johon vaaditaan radonpitoisuuksien ero. Radonin diffuusiosta radonkaasu kulkeutuu suuremmasta pitoisuudesta alempaan ta-

soittaen pitoisuuserot. (Viljanen 1986) Diffuusiolla siirtyvän radonin määrä riippuu rakenteen diffuusiokerroimesta, paksuudesta ja rakenteen yli muodostuvasta radonpitoisuuserosta.

Rakenteen diffuusiokerroin on kokeellisesti määritettävä kerroin, joka kuvaa kaasun virtausnopeutta rakenteessa. Lisäksi radonin diffuusiosta on otettava huomioon virtausaika, koska radonin hajoaminen vähentää diffuusiovirtausta. Radonin diffuusiovirran tiheys q [Bq/m²h] rakenteen läpi voidaan laskea seuraavalla yleisellä siirtymisyhtälöllä (5.2) (Lehtoviita & Viljanen, 1986),

$$q = \frac{dC}{dt} = \frac{D_e}{\varepsilon} \Delta C^2 - \lambda C + \Phi \quad (5.2)$$

missä

D_e	on	huokoiseen aineen tehokas diffuusiokerroin [m ² /h]
ε	on	materiaalin huokoisuusluku
ΔC	on	radonin pitoisuusero tarkasteltavan materiaalin yli [Bq/m ³]
λ	on	hajoamisvakio [1/h]
Φ	on	huokoisen materiaalin radonin tuotto. [Bq/(m ² h)]

Diffuusiovirtauksen määrä rakenteen läpi voidaan ratkaista myös analyttisellä ja numeerisella menetelmällä. Analyttisellä laskentamenetelmällä voidaan määrittää stationääritilassa homogeenisen puoliäärettömän aineen yksiulotteinen radonpitoisuusjakauma sekä kappaleen pinnalta tapahtuva ekshalaatio eli pinnalta vapautuva radonin määrä. Lisäksi analyttisellä menetelmällä voidaan määrittää rakenteen läpi tapahtuva radonvirta stationääri- ja epästationääritilassa. (Lehtoviita & Viljanen, 1986) Numeerisesti radonläpäisevyys voidaan laskea differenssi- ja elementtimenetelmällä. Differenssimenetelmä sopii yksiulotteisten ja epästationääristen tapausten laskentaan. Elementtimenetelmä sopii kaksiulotteisten laskentatapausten ratkaisuun.

Lehtoviita & Viljanen (1986) mukaan betonin pinnalta tapahtuva radonekshalaatio voidaan määrittää seuraavalla analyttisellä ratkaisukaavalla (5.3),

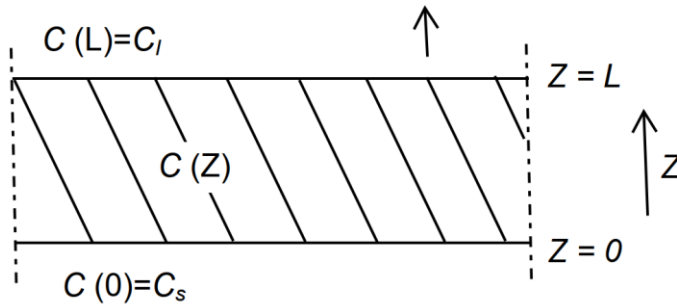
$$E_d = \sqrt{\varepsilon \lambda D_e} \left(\frac{\phi}{\lambda} \frac{\cosh \frac{L}{r} - 1}{\sinh \frac{L}{r}} + \frac{C_s}{\sinh \frac{L}{r}} - C_I \frac{\cosh \frac{L}{r}}{\sinh \frac{L}{r}} \right) \quad (5.3)$$

missä

E_d	on	pinnan radonin ekshalaatio [Bq/(m ² s)]
ε	on	materiaalin huokoisuus [-]
λ	on	hajoamisvakio [1/h]
ϕ	on	huokoisen materiaalin radonin tuotto [Bq/m ³ s]
D_e	on	materiaalin diffuusiokerroin [m/s]

- r on diffuusiomatka [m]
 L on materiaalin paksuus [m]
 C_s on radonpitoisuus materiaalin yläpinnassa [Bq/m^3]
 C_l on radonpitoisuus materiaalin alapinnassa [Bq/m^3].

Ratkaisukaavan 5.3 reunaehdot määritetään kuvan 5.1 mukaan (Lehtoviita & Viljanen, 1986).



Kuva 5.1 Kaavan 5.3 reunaehdot. (Lehtoviita & Viljanen, 1986)

Radon siirtyy huokoisen materiaalin läpi myös effuusiolla eli Knudsenin diffuusiolla. Effuusio kuvaa kaasumolekyylien liikettä hyvin pienissä huokosissa, jolloin huokosten halkaisijat ovat pienemmät kuin molekyylin vapaa matka diffuusiossa. Effuusiota tapahtuu erityisesti betonirakenteiden geelihuokosissa, joiden halkaisija on noin 1×10^{-6} mm. Materiaalin effuusiokerroin D_k [m^2/s] voidaan määrittää laskennallisesti seuraavalla kaavalla: (Henry et. al 1967)

$$D_k = \frac{2}{3}rv = 2D_a \frac{r}{l} \quad (5.4)$$

missä

- r on materiaalin huokosten säde [m]
 v on molekyylin nopeus [m/s]
 D_a on molekyylidiffuusiokerroin [m^2/s]
 l on molekyylin vapaa matka [m]

Minkin L. (2001) mukaan termodiffuusio on yksi merkittävimmistä radonin siirtymistavoista betonin läpi. Termodiffuusio aiheutuu kaasukomponenttien erottumisesta, joka on seurausta vallitsevasta lämpötilaerosta (Lehtoviita & Viljanen, 1986). Lämpötilaeron seurauksena kevyet molekyylit siirtyvät suuremman lämpötilan suuntaan ja raskaat ilman molekyylit pienemmän lämpötilan suuntaan (Vinha 2011). Minkenin (2001) mukaan tämä aiheuttaa myös radonmolekyylien liikettä betonin geelihuokosissa.

Termodiffuusiolla kulkeutuva kaasuvirran tiheys J [kg/(m²s)] materiaalihuokosen läpi voidaan laskea kaavalla 5.5 (Minken 2003),

$$J = \frac{4r^3P}{3lT} \sqrt{\frac{\pi\mu}{2TR}} \Delta T \quad (5.5)$$

missä

r	on	huokosen säde [m]
P	on	huokosessa vallitseva paine [Pa]
l	on	huokosen pituus lämpötilagradientin suuntaan [m]
T	on	huokosessa vallitseva lämpötila [K]
μ	on	kaasun moolimassa [mol/kg]
ΔT	on	lämpötilaero materiaalihuokosen alussa ja lopussa [°C]
R	on	kaasuvakio [8,314 x10 ¹¹ J/(Kmol)]

Kaavoissa 5.4 ja 5.5 ei ole kuitenkaan otettu huomioon radonkaasulle ominaista hajoaamista, joka vähentää rakenteen läpi tapahtuvaa diffuusiiovirtausta.

5.3 Radonin torjuminen

Radonin torjumisen pääasiallisena tehtävänä on estää sisäilman radonpitoisuuden kasvaminen yli radonpitoisuuden raja-arvojen. Suomessa rakennusten radontorjuntaan on laadittu ohjekortti RT-103123 (Rakennustieto Oy, 2019), jonka tarkoituksena on ohjeistaa maanvastaisten rakenteiden radonturvallisessa suunnittelussa ja toteutuksessa.

Rakennuksen radonturvallisuus perustuu maanvastaisten rakenteiden yhtenäisyyteen ja ilmatiivyyteen. Tyypillisesti maanvastaisissa rakenteissa käytetään runkorakenteena betonia, jonka ohjeistuksen mukaan täytyy olla vähintään 80 mm paksu estääkseen riittävästi sisäilman radonpitoisuuden kasvun. Maanvastaisen betonilaatan valun jälkihoidolla varmistetaan, ettei laattaan pääse syntymään halkeamia kuivumiskutistumisen johdosta. Betonilaatan hiushalkeamat lisäävät radonin kulkeutumista sisäilmaan konvektion ja diffuusion avulla.

Sisäilman radonpitoisuuden kannalta maanvastaisen rakenteen liittymien ilmatiiviyys on sisäilman radonpitoisuuden kannalta tärkeää. RT-103123-ohjekortissa (2019) esitetään maanvastaisten rakenteiden rakenneliittymien, läpivientien ja liikuntasauvojen suunnitteluratkaisut uudisrakentamisessa, joilla estetään radonin kulkeutuminen sisäilmaan. Rakenneliittymien tiivistämisessä käytetään esimerkiksi ilmanläpäisevyydeltään tiiviitä kumibitumikermikaistoja niin, ettei rakenneliittymiin muodostu epätiiviyyskohtia rakenteen mahdollisten liikkeiden takia. Läpivientien tiivistämisessä käytetään tyypillisesti elastista saumamassaa tai erityisiä läpivientikappaleita.

Toinen tehokas tapa radonin torjumisessa on maanvastaisen alapohjarakenteen täyttökerroksen huokosilman tuuletus. Tuuletusjärjestelmän tarkoituksena on tuulettaa täyttökerroksen huokosilmaa imemällä sieltä ilmaa pois. Tuuletusjärjestelmällä voidaan vähentää korkeamman radonpitoisuuden alueilla 50 % sisäilman radonpitoisuudesta. Tuuletusjärjestelmä parantaa alapohjarakenteen kosteusteknistä toimivuutta laskemalla täyttökerroksen huokosilman suhteellista kosteutta. (RT 103123, 2019)

Tutkimuksen (Arvela et al 2010) perusteella sisäilman radonpitoisuudet ovat keskimäärin suuremmat vanhemmassa rakennuskannassa verrattuna uudempaan rakennuskantaan. Tämä viittaa siihen, että tarkentuneet radonsuojauksen suunnitteluohjeet ovat parantaneet alapohjarakenteiden ilmatiiviyttä ja sitä kautta alentaneet sisäilman radonpitoisuutta.

Korjausrakentamisessa sisäilman radonpitoisuutta voidaan laskea kolmella eri menetelmällä; alapohjan tuuletuksella, radonkaivolla, rakenteiden ilmatiiviyttä parantavalla korjaksella sekä ilmanvaihdon parantamisella tai näiden yhdistelmällä. Tehokkaimpia radonkorjausmenetelmiä ovat radonimuri ja radonkaivo, joiden tarkoituksena on imeä ilmaa pistemäisesti maanvastaisen alapohjarakenteen täyttökerroksesta. Tällä menetelmällä on onnistuttu vähentämään sisäilman radonpitoisuutta 70–90 %. (Arvela et Al. 2012)

Sisäilman radonpitoisuutta voidaan vähentää merkittävästi estämällä ilmavirtaukset maapohjasta sisäilmaan tiivistyskorjausten avulla. Tyypillisesti rakenteiden ilmatiiviyttä parannetaan tiivistämällä rakenneliittymiä ja läpivientejä esimerkiksi vedeneristemassoilla tai elastisilla saumamassoilla. Ongelmaksi tiivistyskorjauksissa muodostuu yleensä se, että kaikkia epätiiviyksikohtia ei pystytä luotettavasti tiivistämään tai ei ymmärretä tiivistyslaajuutta, jolloin vuotoilmavirtaukset etsivät tiivistetyn raon sijaan uuden vuotoreitin. Laaja-alaisilla tiivistyskorjauksilla on saavutettu 30–50 % alenemat sisäilman radonpitoisuuksissa. (Arvela et Al. 2012)

Sisäilman radonpitoisuutta voidaan hallita merkittävästi parantamalla rakennuksen ilmanvaihdon toimivuutta, jos ilmanvaihto toimii puutteellisesti. Ilmanvaihtoa parantamalla sisäilma vaihtuu useammin, jolloin sisäilman radonpitoisuus ei pääse nousemaan korkealle. Erityisesti painovoimaisen ilmanvaihdon vaihtaminen koneelliseen ilmanvaihtoon alentaa sisäilman radonpitoisuutta huomattavasti ilmanvaihtuvuuden parantuessa, kunhan huolehditaan, ettei tehdä tiloja liian alipaineiseksi (Arvela et Al. 2012). Lisäksi ilmanvaihtoa parantamalla hallitaan rakennuksen painesuhteita paremmin, jolloin ilmavirtaukset vähenevät maaperästä vähentäen samalla myös sisäilmaan kulkeutuvaa radonin määrää.

5.4 Määräykset ja ohjeistukset

Radonturvallisuus otetaan huomioon uudisrakentamista koskevissa asetuksissa, määräyksissä ja ohjeistuksissa. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa (1044/2018) ionisoivasta säteilystä säädetään asunnon radonpitoisuuden viitearvoksi 300 Bq/m² ja työpaikan radonpitoisuuden viitearvoksi 300 Bq/m², jos työaika on yhtä suuri tai suurempi kuin 600 tuntia vuodessa. Uudisrakennuksessa radonpitoisuuden viitearvoksi säädetään 200 Bq/m³.

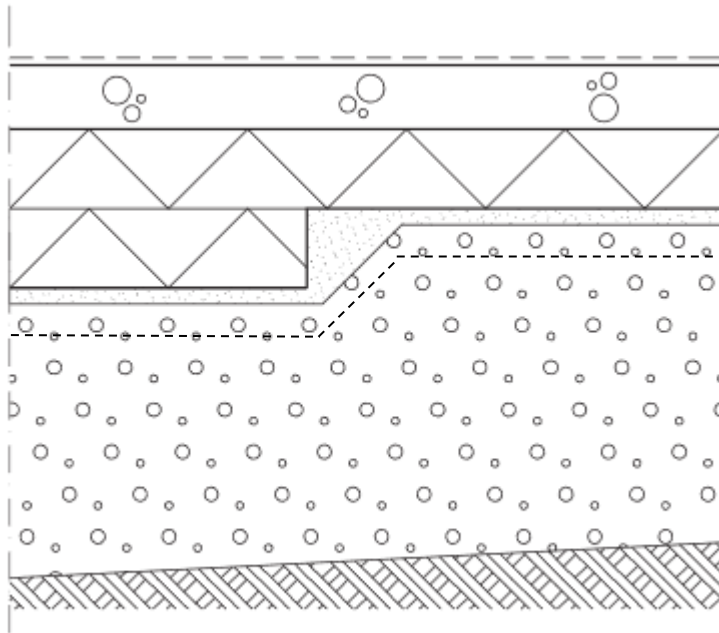
Uudisrakentamisessa rakennushankkeeseen ryhtyvällä on velvollisuus huolehtia, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan siten, että sen sisäilma on sekä terveellinen että turvallinen. Rakennuksesta ei myöskään saa aiheutua vaaraa terveydelle esimerkiksi sisäilman epäpuhtauksien takia. (Maankäyttö- ja rakennuslaki, 117 c §, 1999) Säteilylain 859/2012 157 §:ssä todetaan myös, että rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava sekä suunnittelu- että rakennusvaiheessa siitä, että sisäilman radonpitoisuus on mahdollisimman pieni.

Ympäristöministeriön asetuksessa (465/2014 4 §) todetaan, että suunnittelussa ja toteutuksessa täytyy ottaa huomioon rakennuspaikan radonriskit. Lisäksi radonin haitallinen vaikutus sisäilman laatuun täytyy estää soveltuvalla rakenteella ja/tai toimenpiteellä.

Rakennukseen kohdistuvien korjausten yhteydessä on otettava huomioon sisäilman radonpitoisuus ja tehdä radonpitoisuuksia alentavia korjaustoimenpiteitä. Uudisrakennuksen tai olemassa olevan rakennuksen radonkorjausten jälkeen suositellaan suoritettavaksi vähintään kaksi kuukautta kestävä radonmittaus, jolla varmistetaan sisäilman radonpitoisuus. (Ympäristöministeriö 2018)

6. MAANVASTAINEN ALAPOHJARAKENNE

Maanvastainen alapohjarakenne on Suomessa yleisin käytetty alapohjarakenne. Tyypillisesti maanvastainen alapohjarakenne koostuu pintarakenteesta, betonilaatasta, lämmöneristekerroksesta, täyttökerroksesta ja perusmaasta (Kuva 6.1). Nykyisten lämmöneristysvaatimusten (C3, Rakennusten lämmöneristys, 2010) mukaan lämmöneristyspaksuus täytyy olla vähintään 100 mm ja reuna-alueilla 150 mm, kun käytetään polystyreeniä lämmöneristeinä. Lisäksi lämmöneriste suositellaan sijoitettavaksi betonilaatan alapuolelle. Alapohjarakenteen täyttökerroksena on tyypillisesti kapillaarikatkona toimiva karkearakeinen maa-aines, kuten salaojasora tai sepeli. Vanhoissa rakenteissa alapohjarakenteessa kapillaarikatkona toimi lämmöneristekerros, koska täyttökerroksessa tyypillisesti käytettiin hyvin kapillaarisesti kosteutta siirtävää hienoa hiekkaa. (RAKMK C2, 1998 ja RT 83-11009, 2010) Tyypillisesti alapohjarakenteen betonilaatassa suositellaan käytettäväksi C20/25 lujuusluokan betonia, sekä betonilaatan paksuus on tyypillisesti 80–120 mm (Betoniteollisuus ry, 2022).



Kuva 6.1. Maanvastaisen alapohjarakenteen leikkauspiirustus periaatetasolla. (RT-83-11009, 2010)

6.1 Kosteus- ja lämpötekniinen toimivuus

Maanvastaisen alapohjarakenteen kosteus- ja lämpötekniiset olosuhteet eroavat huomattavasti muista rakenteista. Rakenne on kosketuksissa täyttökerrokseen, jonka huokosilman suhteellinen kosteuden oletetaan lähes aina olevan 100 % RH. (Leivo ja Rantala 2000)

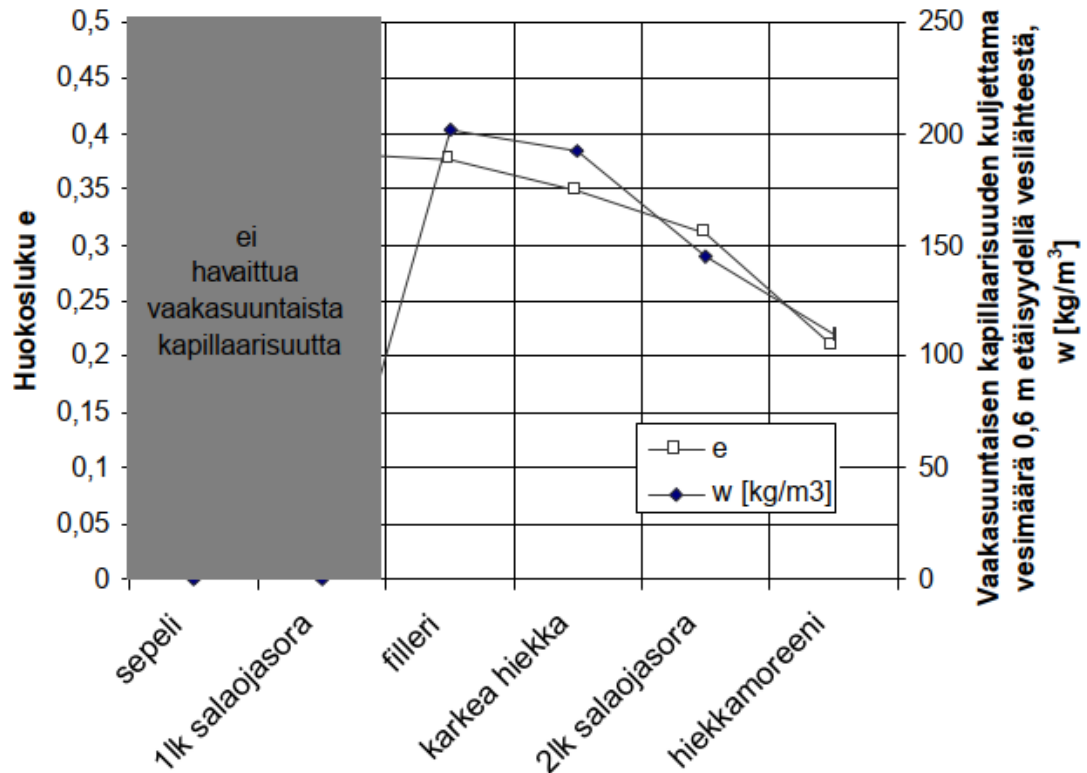
Maanvastaisen alapohjarakenne tulee suunnitella siten, että rakenne kykenee luovuttamaan luvussa 4.5 esitetyt kosteusrasitukset ympäröivään sisäilmaan ja että rakenteen kriittinen kosteuspitoisuus mahdollisesti kosteuserkän pintarakenteen alapinnassa ei ylity ja aiheuta vaurioita alapohjarakenteen pintarakenteissa. Lisäksi rakenne tulee suunnitella niin, että rakenteen kuivuminen on mahdollista kaikissa tilanteissa. (Leivo ja Rantala 2002)

6.1.1 Täyttökerros

Täyttökerroksen kosteuspitoisuus on yksi merkittävimmistä tekijöistä maanvastaisen alapohjarakenteen kosteustekniisen toimivuuden kannalta. Täyttökerroksen kosteuspitoisuus muodostuu kapillaarisesti ja diffuusiolla siirtyvästä kosteudesta. (Leivo ja Rantala, 2000)

Kapillaarisesti kosteus voi siirtyä täyttökerroksessa sekä pysty- että vaakasuunnassa. Leivo ja Rantala (2000) esittävät, että kosteuden vaakasuuntainen kapillaarinen siirtymä on huomattava kosteuslisä täyttö- ja salaojakerroksessa. Vaakasuuntaista kapillaarista kosteuden siirtymistä tapahtuu maa-aineksessa samaan aikaan pystysuuntaisen siirtymän kanssa.

Kuvan 6.2. mukaisesti vaakasuuntaisen kapillaarisen kosteuden siirtyminen on voimakainta ja nopeinta melko karkeilla maa-aineksilla, kuten esimerkiksi fillerillä (hienolla hiekalla) ja karkealla hiekalla. Kapillaarisen kosteuden siirtyminen on vähäisintä karkealla sepelillä ja 1 luokan salaojasoralla, joilla ei havaittu laisinkaan vaakasuuntaista kapillaarista kosteuden siirtymää. Lisäksi karkealla sepelillä ja 1 luokan salaojasoralla havaittiin ainoastaan viiden senttimetrin pystysuuntainen kapillaarisen kosteuden siirtymä. Tämän johdosta alapohjarakenteen täyttökerroksessa suositellaan käytettävän kapillaarikatko-kerroksena karkeaa sepeliä tai I luokan salaojasoraa. (Leivo ja Rantala, 2000)



Kuva 6.2. Eri täyttömateriaalien vaakasuuntaisen kapillaarisuuden kuljettama vesimäärä 0,6 m etäisyydeltä vapaasta vesilähteestä. (Leivo ja Rantala, 2000)

Täyttömateriaalin huokosten täytyessä vedellä materiaalin lämmönjohtavuus kasvaa, koska veden lämmönjohtavuus on huomattavasti suurempi verrattuna ilmaan. Tällöin täytön lämmönjohtavuus voi kasvaa yli satakertaiseksi (Leivo & Rantala 2000). Karkearakeisten maa-ainesten huokosilman määrä on huomattavasti suurempi ja toisaalta vesimäärä pienempi verrattuna hienorakeisempiin täyttömateriaaleihin. Tämän johdosta karkearakeiset täyttömateriaalit ovat lämmöneristyskyvyltään parempia, eivätkä johda lämpöä niin hyvin verrattuna hienorakeisiin maa-aineksiin. (Leivo & Rantala 2000)

Täyttökerroksen huokosilman vesihöyry ei ole kovin merkittävä kosteusrasitus maanvastaiseen alapohjarakenteeseen verrattuna kapillaarisesti siirtyvään kosteuden määrään. Nykyisin suositeltavissa täyttömateriaaleissa sepelissä ja salaojasorassa kosteuspitoisuus on 0,5...1,0 paino-% suhteellisen kosteuden ollessa 100 % RH, joka vastaa noin 10...20 kg/m³ vesimäärää. Vastaavasti hienorakeisimmilla materiaaleilla suhteellisen kosteuden ollessa 100 % RH vastaava kosteuspitoisuus täyttökerroksen huokosissa voi olla yli 100 kg/m³. Tämän johdosta täyttömateriaaleina suositellaan käytettävän sepeliä tai karkearakeista salaojasoraa, joiden huokosiin sitoutunut vesimäärä on huomattavasti pienempi, kuin hienorakeisimmilla täyttömateriaaleilla. (Leivo & Rantala, 2000)

Toinen olennainen tekijä maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta on täyttökerroksen lämpötila. On todettu, että maapohjan lämpötilan noustessa diffuusiolla siirtyvä kosteusrasitus kohti alapohjarakennetta kasvaa. (Leivo ja Rantala 2002)

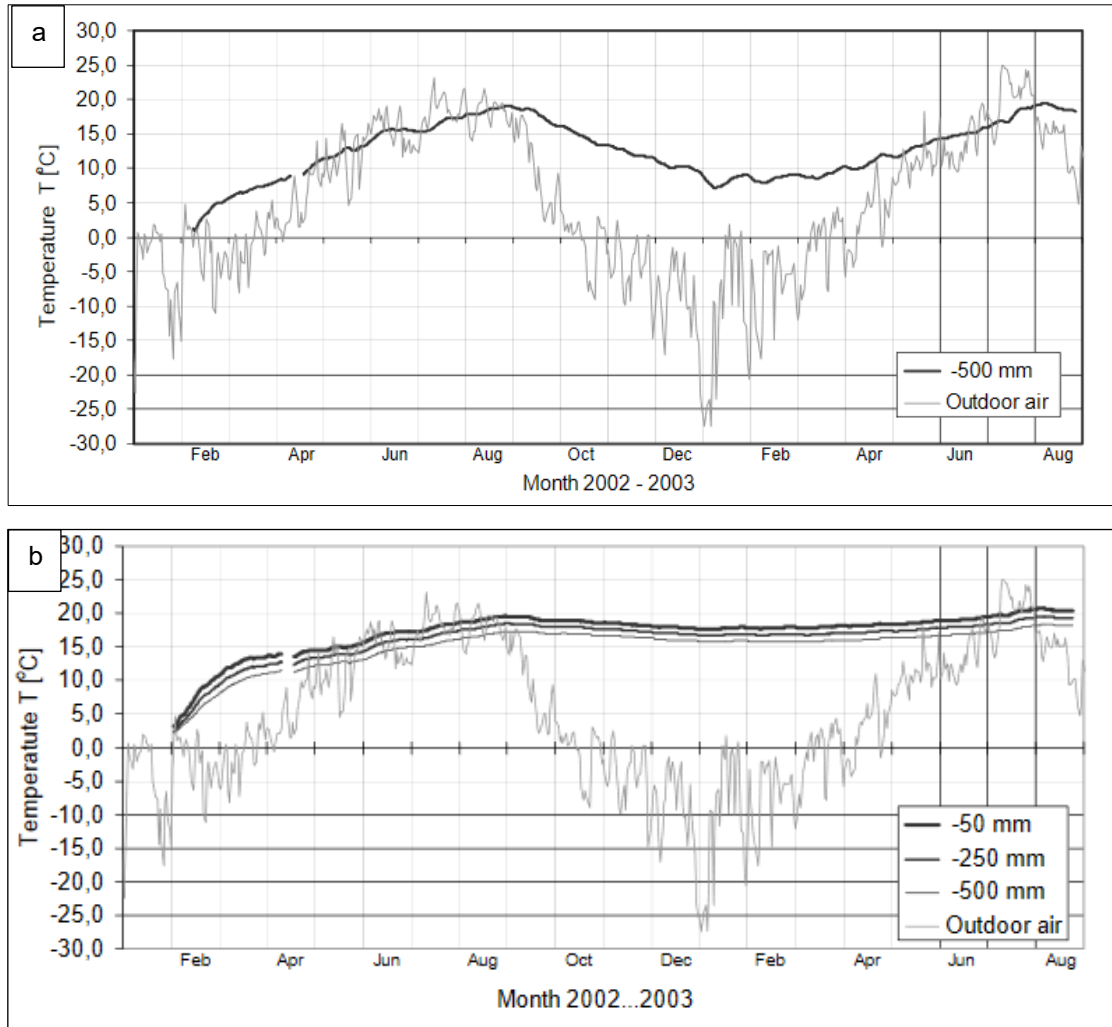
Leivo ja Rantala (2000) toteavat, että diffuusiovirtauksen suunta muuttuu alapohjarakennetta kohden rakenteesta riippumatta maapohjan lämpötilan saavutettua 10 °C. Kyseinen lämpötila saavutetaan tyypillisesti parin vuoden kuluessa rakentamisesta. Kyseisen lämpötilan saavuttamisnopeuteen vaikuttaa merkittävästi maapohjan lämpötila rakennusaikana. Maapohjan lämpötilan noustessa vesihöyryn osapaine kasvaa sisäilmaan nähden, jonka johdosta diffuusiovirtauksen määrä voimistuu lämpötilan kasvaessa.

Täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuutta voidaan vähentää maapohjaan asennetuilla tuuletusjärjestelmillä, joiden tarkoitus on vähentää täyttökerroksen radonpitoisuutta. Kettusen (2004) suorittamien kenttämittausten perusteella täyttökerroksen huokosilman suhteellinen kosteus oli ainakin hetkellisesti 50–60 % RH, jolloin alapohjarakenteeseen kohdistuva kosteusrasitus oli hyvin vähäinen. On kuitenkin muistettava, että tuuletusjärjestelmä voi hetkellisesti lisätä täyttökerroksen kosteusrasitusta kesäaikaan, jolloin lämmin ja kostea ulkoilma tiivistyy täyttökerrokseen vedeksi.

Mittauksessa todettiin betonilaatan alapinnan suhteellisen kosteuden olevan huomattavasti alhaisempi, kuin yläpinnan suhteellisen kosteuden. Kenttämittauksen perusteella tuuletusjärjestelmä parantaa olennaisesti maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusteknistä toimivuutta. (Kettunen, 2004)

Täyttökerroksen lämpötilaan ulkoseinän vierustalla vaikuttaa kolme tekijää; sisälämpötila, ulkolämpötila ja maapohjan lämpötila. Rakennuksen keskellä maanvastaisen betonilaattarakenteen ja eristeen alla olevaan täyttökerroksen lämpötilaan vaikuttavat ainoastaan sisälämpötila ja alapohjarakenteen lämmöneristyskyky. (Rantala 2005)

Ulkoseinälinjojen läheisyydessä täyttökerroksen lämpötilan vaihtelut eri vuodenaikoina ovat suuremmat. Ulkoilman lämpötilan vaikutus alapohjarakenteen täyttökerroksen lämpötilaan vaikuttaa noin kaksi metriä ulkoseinälinjalta rakennuksen keskusta. Rantalan (2005) suorittamassa kenttätutkimuksissa talvikaudella täyttökerroksen lämpötilaero ulkoseinän lähellä olevan mittauspisteen (Kuva 6.3 a) ja keskellä laattaa olevan mittauspisteen (Kuva 6.3 b) välillä oli noin 10 ° C. Mittauksen perusteella voidaan todeta, että ulkoilman lämpötilalla on merkittävä vaikutus täyttökerroksen lämpötilaan ulkoseinälinjojen läheisyydessä.



Kuvat 6.3 a ja b. Täyttökerroksen lämpötilavaihtelut ulkoilmaan nähden ulkoseinälinjan lähellä (a) ja keskellä rakennusta (b) (Rantala 2005)

Ulkoilman lämpötilan lisäksi täyttökerroksen lämpötilaan vaikuttavat rakennuksen perusmuurin lämmöneristys ja routaeriste. Tutkimuksessa on todettu, että rakennuksen routaeristeen lämmöneristyskyvyn parantamisella ei ole niin suurta merkitystä täyttökerroksen lämpötilaan, kuin perusmuurin lämmöneristyskyvyn parantamisella. (Rantala 2005)

6.1.2 Lämmöneristekerros

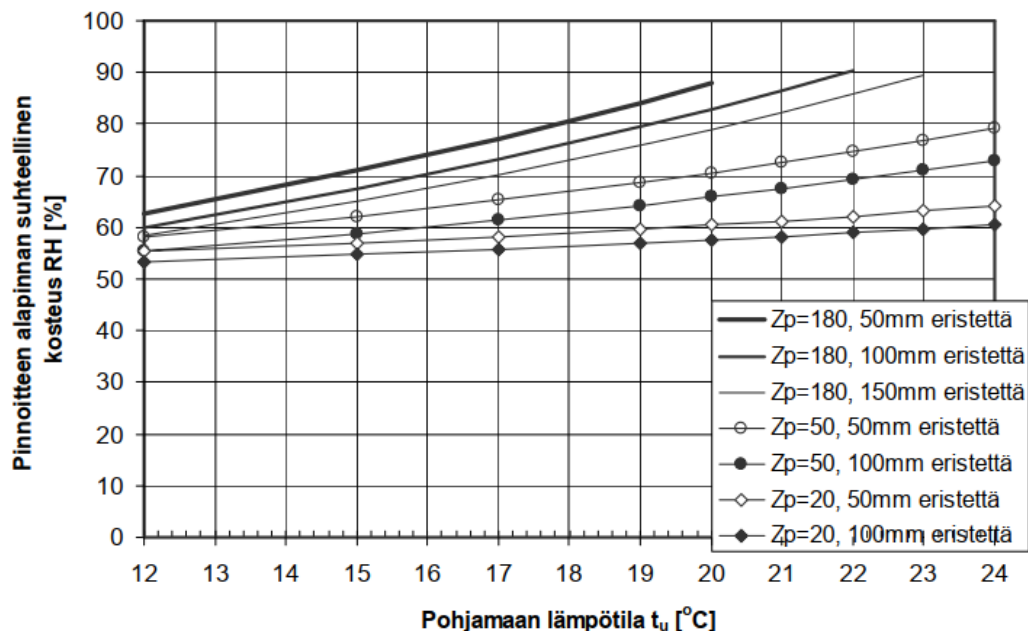
Maanvastaisen alapohjarakenteen lämmöneristeellä on kaksi tehtävää; vähentää rakennuksen lämpöhäviötä maaperään ja siten estää täyttökerroksen lämpenemistä sekä estää maaperän kosteuden diffuusiovirtausta maanvastaiseen betonilaattaan. (Leivo ja Rantala, 2002)

Harderupin (1993) mukaan alapohjarakenne toimii kosteusteknisesti hyvin, kun betonilaatan ja maapohjan lämpötilaeroksi muodostuu vähintään kolme astetta ($> 3\text{ °C}$), jolloin alapohjarakenteen rakennekerrosten kriittinen kosteuspitoisuus ei ylitä normaaleissa

käyttöolosuhteissa. Tämä lämpötilaero saavutetaan, kun lämmöneriste asennetaan kauttaaltaan betonilaatan alle (Leivo ja Rantala 2002). Rantalan (2005) mukaan alapohjarakenteen täyttökerroksen lämpötila on sitä matalampi, mitä parempi alapohjarakenteen lämmöneristyskyky on.

Kuvassa 6.4. on arvioitu alapohjarakenteen lämmöneristyskyvyn kasvattamisen vaikutusta pintarakenteen alapinnan suhteelliseen kosteuteen stationääritilassa käsinlaskumenetelmien avulla.

Laskennallisessa mallinnuksessa alapohjarakenteen lämmöneristyskykyä kasvattamalla pintamateriaalin alapinnan suhteellinen kosteus laskee, koska kosteusvirta maaperästä kohti sisäilmaa pienenee. Mallinnuksen perusteella eristepaksuutta kasvattamalla kaksinkertaiseksi pintamateriaalin alapinnan suhteellinen kosteus laskee 5 %-yksikköä (Leivo ja Rantala 2002).

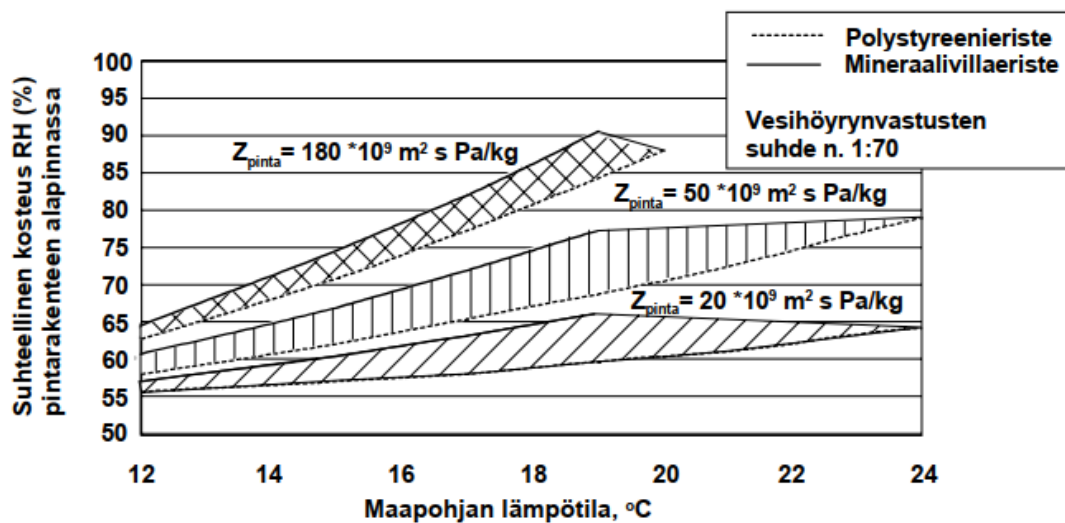


Kuva 6.4. Alapohjarakenteen lämmöneristeen paksuuden, pinnoitteen vesihöyrynläpäisevyyden ja pohjamaan lämpötilan vaikutus alapinnan suhteelliseen kosteuteen (Leivo ja Rantala 2002a)

Alapohjarakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta lämmöneristeellä täytyy olla myös pieni vesihöyrynläpäisevyys. Leivon ja Rantalan (2002) tutkimuksen mukaan pienen vesihöyrynläpäisevyyssarvon omaavaa polystyreeni -eristettä käytettäessä pintarakenteiden alapinnan suhteellinen kosteus on 5...10 %-yksikköä pienempi, kuin käytettäessä vesihöyryä läpäisevää mineraalivillaeristettä. vaikka eristeiden lämmöneristyskyky on yhtä suuri. (Kuva 6.5.) Polystyreenillä on noin 70 kertaa mineraalivillaa suurempi vesihöyrynvastus, jolloin alapohjarakenteeseen kohdistuva kosteusrasitus on huomattavasti pienempi verrattuna lämmöneristeinä käytettävään mineraalivillaan (Leivo ja Rantala 2002)

Mineraalivillan lämmöneristyskyky heikkenee huomattavasti enemmän materiaalin huokosilman suhteellisen kosteuden kasvaessa verrattuna polystyreeniin. Tämä johtuu siitä, mineraalivilla huomattavasti huokoisempuna materiaalina sitoo itseensä enemmän kosteutta, mikä kasvattaa materiaalin lämmönjohtavuutta heikentäen lämmöneristyskykyä. Lisäksi laskennallisessa mallinnuksessa huomattiin, että mineraalivillaeristeessä kosteus tiivistyy rakenteeseen pienemmässä lämpötilassa. (Leivo ja Rantala 2002 & McFadden 1988)

Materiaalitoimittaja Parocin kosteusoppaan (2019) mukaan kivivillaa voidaan käyttää maanvastaisten alapohjarakenteiden lämmöneristeinä, kun eristeen toinen puoli on lämmitetty. Ojasen (2017) tutkimuksessa alapohjarakenteen lämmöneristeen ollessa kivivilla, betonilaatan kuivumisaika tasolle 85 % RH oli yli kaksi kertaa lyhyempi, kuin lämmöneristeen ollessa polystyreeni. Kuitenkin avohuokoista lämmöneristeen kastuessa materiaali toimii otollisena kasvualustana mikrobikasvustolle. Tämän johdosta avohuokoista lämmöneristettä ei suositella käytettävän maanvastaisen rakenteen lämmöneristeenä (Pitkäranta 2016).

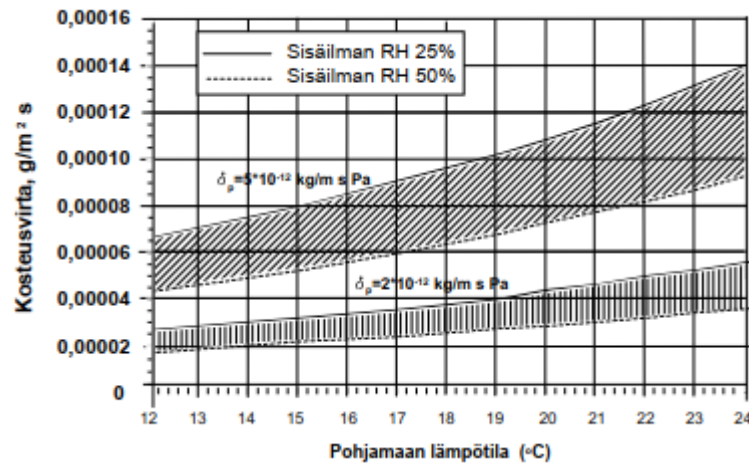


Kuva 6.5. Lämmöneristemateriaalin, maapohjan lämpötilan [°C] ja pintamateriaalin vesihöyrynvastuksen [Z_{pinta}] vaikutus pintarakenteen alapinnan suhteelliseen kosteuteen. (Leivo ja Rantala, 2002a)

6.1.3 Betonilaatta

Heti rakentamisen jälkeen alapohjarakenteen suurin kosteusrasitus on betonilaatan sisältämä rakennuskosteus. Kosteuspitoisuus on korkea laatan kuivumisvaiheessa, jolloin kuivumista tapahtuu sekä sisäilmaan että täyttökerrokseen (Rantala ja Leivo 2008). Rakennusvaiheessa on tärkeää varmistaa mittaamalla betonilaatan riittävän alhainen kosteuspitoisuus suhteessa pintamateriaalin vesihöyrynläpäisevyyteen.

Merikallio (2007) toteaa, että maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta on tärkeää käyttää korkealujuuksista betonia ja alhaista vesi-sementti-suhdetta. Näillä tavoin voidaan vaikuttaa betonin huokosrakenteeseen ja sitä kautta vesihöyrynläpäisevyyteen. Leivon ja Rantalan (2002) laskennallisessa mallinnuksessa betonilaatan vesihöyrynläpäisevyyttä pienentämällä vähennettiin merkittävästi kosteusvirtaa rakenteen läpi. (Kuva 6.6)



Kuva 6.6. Betonilaatan vesihöyrynläpäisevyyden, sisäilman suhteellisen kosteuden ja pohjamaan lämpötilän vaikutus betonilaatan (80 mm) läpi tulevaan kosteusvirtaan diffuusiolla (Leivo ja Rantala, 2002a)

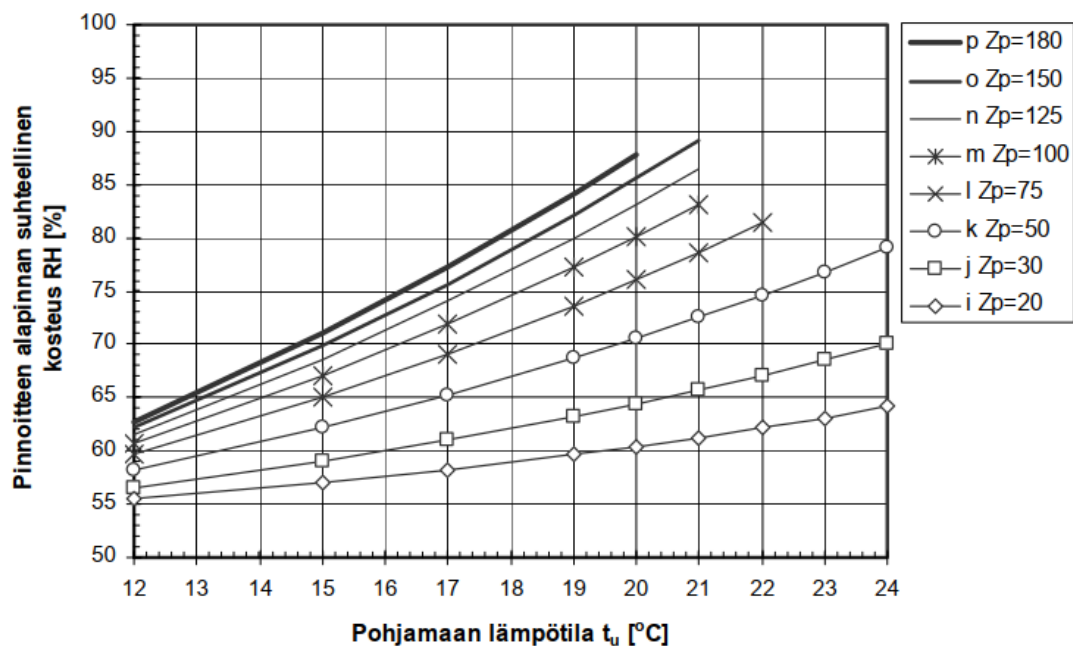
6.1.4 Pintarakenne

Merikallion (2009) mukaan Leivo ja Rantala (2003) jaottelee pintarakenteet karkeasti vesihöyrynläpäisevyyden perusteella; vesihöyryä läpäiseväksi tai vesihöyrytiiviiksi. Vesihöyryä läpäisevän pintarakenteen vesihöyrynvastus on keskimäärin $50 \cdot 10^9$ sPa/kg, jonka suhteellinen diffuusiovastuskerroin s_d on noin 10 m. Vesihöyrytiiviin pintarakenteen vesihöyrynvastus on keskimäärin $150 \dots 180 \cdot 10^9$ sPa/kg, jonka suhteellinen diffuusiovastuskerroin s_d on noin 30...35 m.

Pintarakenteen tehtävä on luovuttaa alapohjarakenteeseen kohdistuva kosteusrasitus sisäilmaan siten, että kosteusvaurioita ei synny. Mikäli tämä kosteusrasitus on suurempi, kuin pintarakenteen kyky läpäistä kosteutta, pintarakenteen alapinnan kosteus nousee vaurioitumisen kannalta kriittisen korkealle. Tämän johdosta pintarakenteen vesihöyrynläpäisevyydellä on merkittävä vaikutus maanvastaisen alapohjarakenteen kosteustekniselle toimivuudelle (Merikallio 2009)

Kuva 6.7. (Leivo ja Rantala, 2002a) nähdään pintarakenteen vesihöyrynvastuksen vaikutus pintarakenteen alapinnan suhteelliseen kosteuteen. Alapinnan suhteellinen kosteus kasvaa pintamateriaalin vesihöyryvastuksen kasvaessa, jolloin alapohjarakenne ei kykene riittävässä määrin luovuttamaan kosteutta rakenteesta ympäröivään ilmaan.

Heikosti lämmöneristetyssä tai lämmöneristämättömässä alapohjarakenteessa riski kosteuden nousemiselle on suurempi, kuin hyvin lämmöneristetyssä alapohjarakenteessa. Tämän johdosta lämmöneristämättömässä tai heikosti lämmöneristetyssä maanvastaisessa alapohjarakenteessa ei suositella käytettäväksi vesihöyrytiivistä lattiamateriaalia. (Merikallio et. al 2007)



Kuva 6.7. Pintamateriaalin vesihöyrynvastuksen ja pohjamaan lämpötilan aiheuttaman kosteusvirran vaikutus pintamateriaalin alapinnan suhteellisen kosteuteen. (Leivo ja Rantala 2002a)

Maanvastaisen alapohjarakenteen kosteustekniset puutteet ilmenevät tyypillisesti ensimmäisenä pintamateriaalin vaurioina. Pintamateriaalin vauriot aiheutuvat yleensä alapohjarakenteen rakennusaikaisesta, maaperästä nousevasta tai vesivahingosta aiheutuvasta kosteudesta. Betonin sisältämä kosteus voi aiheuttaa pintamateriaalin irtoamista, kupruilua, värjäytymistä, mikrobikasvua sekä kemiallisia hajoamisreaktioita. (Merikallio, 2009)

Korkean kosteuspitoisuuden on nähty lisäävän VOC-yhdisteiden emissioita, joiden kulkeutuminen sisäilmaan heikentää sisäilman laatua, jos rakennuksen ilmanvaihto ei pysty pitämään pitoisuuksia riittävän alhaisena. (Järnström, 2005). Alapohjarakenteen korkea

kosteuspitoisuus voi aiheuttaa lattiapäällysteen liimoissa kemiallista hajoamista. Kemiallisen reaktion johdosta liiman ominaisuudet muuttuvat ja tartunta alustaan heikkenee, jonka johdosta lattiapäällyste voi irrota alustastaan. Lisäksi kemiallisessa reaktiossa voi syntyä kaasuja, jolloin tiiviiseen lattiapäällysteeseen muodostuu kupruilua. (Dively, 1994)

Alapohjarakenteen pintamateriaalissa tapahtuu primääri- ja sekundääriemissioita, jotka voivat aiheuttaa muun muassa hajuhaittoja tai hengitystieoireita. Primääriemissiot ovat peräisin rakennusmateriaalin jääneistä liuotinjäännöksistä, lisäaineista tai reagoimattomista raaka-aineista. Uuden materiaalin primääriemissiot voivat tapahtua suoraan materiaalin pinnalta tai diffuusiolla materiaalin läpi, jonka suuruuteen vaikuttavat esimerkiksi materiaalin lämpötila, sen pinnassa tapahtuva ilman vaihtuvuus ja materiaalin vesihöyrynvastus. (Wolkoff 1998)

Sekundääriemissiot ovat rakennusmateriaalin kemiallisesti ja fysikaalisesti sitoutuneita orgaanisia yhdisteitä, jotka vapautuvat ja muodostuvat reaktioissa poikkeavan olosuhteen vuoksi, esimerkiksi kosteuden tai lämmön vaikutuksesta. (Wolkoff 1999) Betonilaa-
tan kosteuden kasvaessa näkyvien vaurioiden lisäksi on huomattu, että kiinnitysliimassa ja muovimaton pehmittimissä tapahtuu kemiallinen reaktio. Tällöin materiaalista haihtuu orgaanisia VOC-yhdisteitä, kuten 2-etyyliheksanolia ja ammoniakkaa. (Järnström, 2005)

Yksi olennaisin ero primääri- ja sekundääriemission välillä on ilmiöiden ajallinen kehitys. Primääriemissiolle on ominaista, että emission suuruus pienenee ajan funktiona ja se vaikuttaa sisäilman laatuun korkeintaan yhden vuoden ajan. Sekundääriemissiolle tyypillistä on, että emissiot jatkuvat tasaisesti jopa vuosien ajan, jos olosuhteet mahdollistavat VOC-yhdisteiden muodostumisen. (Wolkoff 1999)

6.1.5 Sisäilma

Sisäilman suhteellinen kosteus vaikuttaa alapohjarakenteen kosteustekniseen toimintaan. Sisäilman kyky vastaanottaa alapohjarakenteesta kosteutta riippuu sisäilman omasta suhteellisesta kosteudesta. Suhteellisen kosteuden ollessa alhainen sisäilma pystyy vastaanottamaan enemmän kosteutta alapohjarakenteesta, jolloin lattiamateriaalin alapinnan ja betonin suhteellinen kosteus laskee. (Leivo & Rantala, 2002)

Tämän lisäksi sisäilman vesihöyrypitoisuus vaikuttaa alapohjarakenteen läpi siirtyvään kosteusvirtaan. Sisäilman vesihöyrypitoisuuden kasvaessa kosteusvirran määrä laskee verrattuna kosteusvirtaan, kun sisäilman vesihöyrypitoisuus on matala (Kuva 9.) Tämä johtuu siitä, että vesihöyrypitoisuusero rakenteen yli on pienempi, jolloin diffusiovirtaus pienenee. (Leivo & Rantala, 2002)

6.1.6 Lattialämmitetty alapohjarakenne

Maanvastaisen alapohjarakenteen lattialämmitys toteutetaan tyypillisesti vesi- sekä ilmakehällä tai sähköisellä järjestelmällä. Lattialämmitysjärjestelmän lämmityselementti (putkisto tai sähkökaapeli) asennetaan valun yhteydessä betonilaattaan tyypillisesti vähintään 40 mm lattiapinnan alapuolelle.

Lattialämmitetyssä alapohjarakenteessa betonilaatan lämpötila lämmityskaudella voi olla noin 5...7 °C korkeampi verrattuna lämmittämättömään betonilaattaan. Heikosti eristetyssä alapohjarakenteessa pohjamaan lämpötila voi nousta jopa 8 °C korkeammaksi verrattuna lämmittämättömään alapohjarakenteeseen. Tämän johdosta lattialämmitetyn alapohjarakenteen lämmöneristeenä suositellaan käytettäväksi 150...200 mm paksua solumuovilämmöneristekerrosta, joka estää mahdollisimman tehokkaasti pohjamaan lämpötilan nousua. Riittävää lämmöneristekerrospaksuutta käyttäen pohjamaan lämpötila kasvaa noin 2 °C korkeammalle lämmittämättömään alapohjarakenteeseen verrattuna. (Leivo & Rantala, 2005)

Lattialämmitetty betonilaatta luovuttaa kosteutta myös alaspäin varsinkin heti rakennusajan jälkeen. Betonilaatta kuivuu sitä enemmän alaspäin, mitä suurempi lämpötilaero betonilaatan ja pohjamaan välille syntyy. Heti rakentamisen jälkeen lämpötilaero voi olla suurimmillaan, jos rakentaminen on tapahtunut kylminä talvikuukausina, jolloin ulkoilma on viilentänyt täyttökerroksen lämpötilaa. (Leivo & Rantala, 2005)

Lämpötilaeroa kasvattaa vielä talviaikaan kylmä ulkoilma, jolloin ulkoilma viilentää pohjamaata ulkoseinien läheisyydessä noin 2 metrin leveydellä. Tällöin betonilaatta toimii hetkellisesti kahteen suuntaan kuivuvana rakenteena, jos lämmöneriste on vesihöyryä läpäisevää. Tällöin betonilaatan kosteuspitoisuus voi olla alhaisempi lähellä ulkoseiniä. (Leivo & Rantala, 2005)

Lattialämmitetty betonilaatta luovuttaa tehokkaammin kosteutta sisäilmaa kohden betonilaatan korkeamman lämpötilan takia. Betonilaatan kuivumisnopeuteen vaikuttaa betonin lämpötila, jolloin lattialämmityksen tehostamisella voidaan nopeuttaa betonin kuivumista. Lattialämmitetyssä betonilaatassa betonin kuivumisessa on eroavaisuuksia riippuen lämmityselementin etäisyydestä. Lattialämmityspotken kohdalla betoni alkaa kuivumaan nopeammin verrattuna betoniin, joka on lattialämmityspotkien välissä. Tämän johdosta lattialämmitetyssä rakenteessa betonin kosteuspitoisuus tulee mitata lattialämmityspotkien välistä. Lämmitetty betonilaatta kuivuu päällystettäväksi nopeammin verrattuna lämmittämättömään betonilaattaan. (Leivo & Rantala, 2005)

Betonilaatan pinnoittamisen jälkeen pintarakenteen alapinnan suhteellinen kosteus nousee nopeammin verrattuna lämmittämättömään betonilaattaan lämpötilagradientin ollessa suurempi lattialämmityksessä rakenteessa. Vesihöyrytiivin lattiapäällysteen alapinnan suhteellinen kosteus saattaa nousta liian korkeaksi, jos betonilaattaa lämmitetään (>25°C) voimakkaasti pinnoittamisen jälkeen. (Leivo & Rantala, 2005)

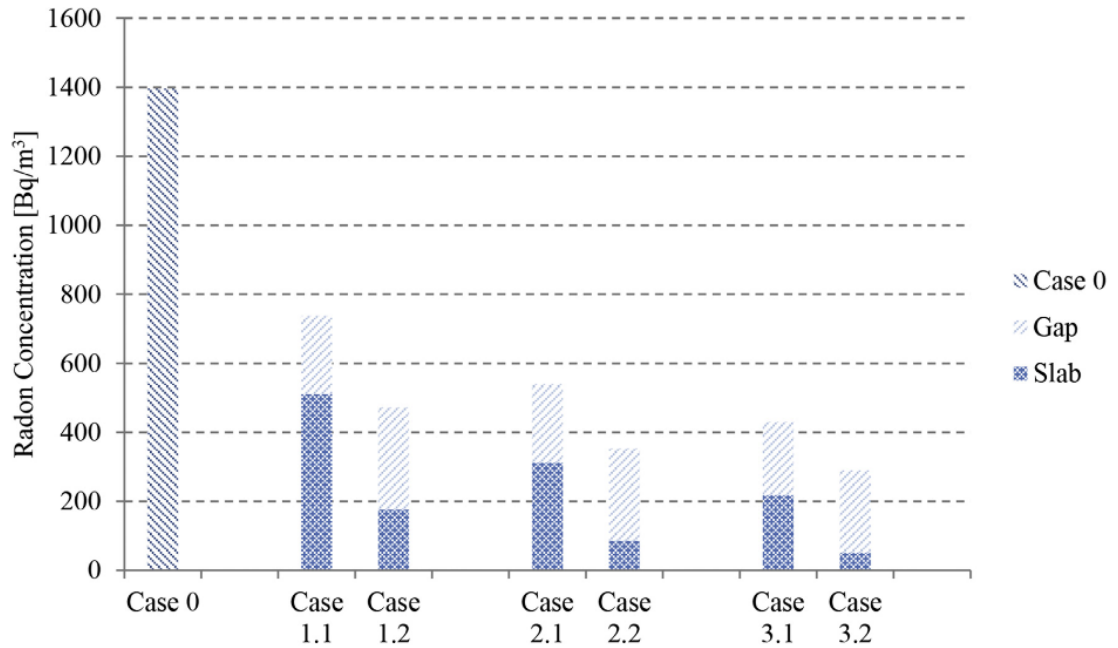
6.2 Radontekninen toimivuus

Luvun 5.2 mukaisesti radonilla on kaksi siirtymistapaa; diffuusio ja konvektio, joista konvektiota pidetään sisäilman radonpitoisuuden kannalta merkittävimpänä. Tässä luvussa diffuusiolla tarkoitetaan aina radonin diffuusiota, vaikka sitä ei erikseen mainita kaikissa yhteyksissä.

Normaalin radonpitoisuuden alueilla maanvastaisen alapohjarakenteen radonturvallisuus perustuu betonilaatan ilmatiivyyteen, estäen radonin kulkeutumisen ilmavirtausten mukana sisäilmaan. Maaperän radon kulkeutuu konvektiolla ilmavirtauksen mukana alapohjarakenteen epätiiveistä liittymistä, läpivienneistä sekä halkeamista sisäilman ja alapohjarakenteen täytön välisen paine-eron seurauksena. Lisäksi radonia voi kulkeutua myös konvektiolla hyvin ilmaa läpäisevien materiaalien läpi, kuten maakostean betonin läpi. Suomalaisessa rakennuskannassa ei kuitenkaan tämän tyyppisiä rakennusmateriaaleja käytetä. (Viljanen et. Al 1986, Gulabyants et. al 2020 ja Urosevic & Nikezic, 2003)

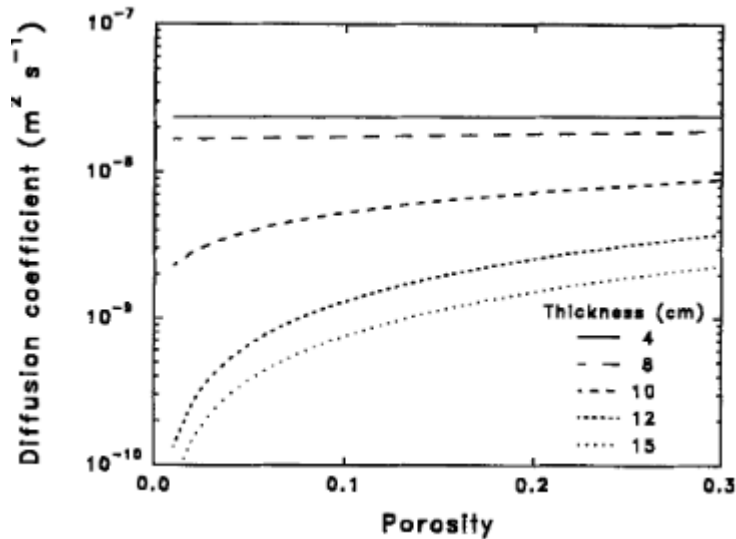
6.2.1 Betonin huokosrakenne

Betonilaatan paksuudella ja tiiveydellä on merkittävin vaikutus radonin diffuusiiovirtauksen suuruuteen maanvastaisen alapohjarakenteen läpi. Munoz et. Al (2017) tutkimuksessa (kuva 6.8.) on osoitettu laskennallisesti mallintamalla, että betonilaatan paksuutta kasvattamalla voidaan vähentää merkittävästi betonilaatan läpi tunkeutuvan radonin määrää kahdella eri radonin diffuusiokertoimella. (Munoz et. Al 2017)



Kuva 6.8. Betonilaatan paksuuden ja radon diffuusiokertoimen vaikutus betonilaatan läpi tulevaan radonin määrään. Tutkimuksessa betonilaatan paksuudet olivat Case 1: 50 mm, Case 2: 100 mm ja Case 3: 150 mm. Betonin diffuusiokertoimena käytettiin $D_1=2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ja $D_2=5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. (Munoz et. Al 2017)

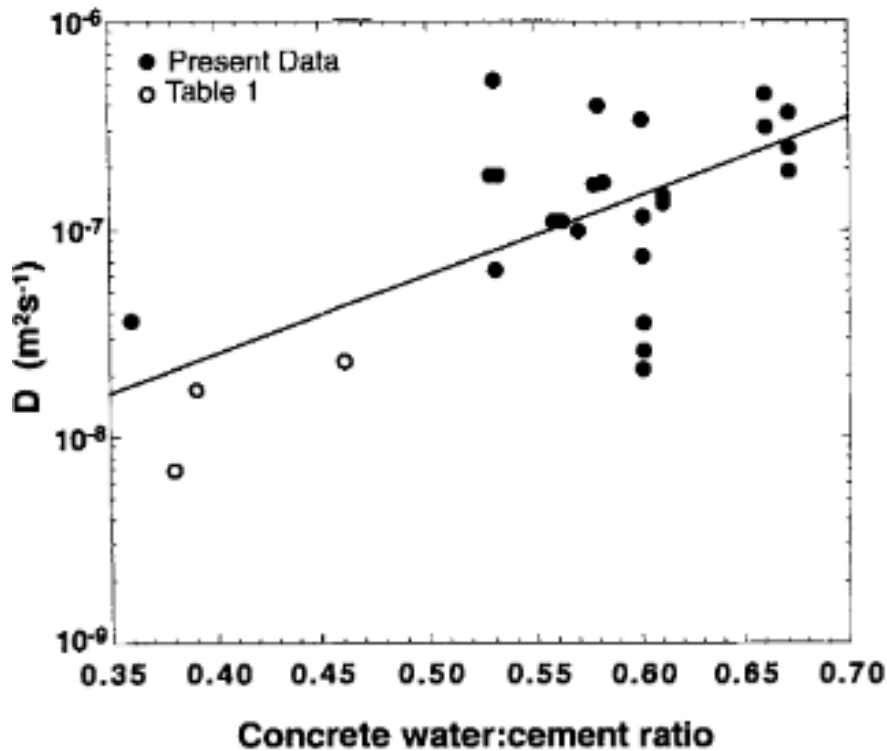
Klink et. Al (1999), Renken & Rosenberg (1995) ja Keller et. al (2001) tekemien tutkimusten mukaan radonin diffuusiovirtauksen määrä betonin läpi on riippuvainen betonin huokosrakenteesta. Betonilaatan huokosten määrää vähentämällä ja huokoskokoa pienentämällä voidaan hallita paremmin betonilaatan läpi tunkeutuvan radonin määrää. Klinkin (1999) mukaan maaperästä tulevaa radonin määrää voidaan vähentää 10 % käyttämällä tiheää betonia alapohjarakenteen betonilaattana. Kuva 6.9. nähdään betonilaatan huokoisuuden (porosity) vaikutus betonilaatan diffuusiokertoimeen. Toisaalta Gadd ja Borak (1995) toteavat laskennallisen mallinnuksen perusteella, että betonin huokoisuudella on vain vähän vaikutusta betonin diffuusiokertoimeen.



Kuva 6.9. Laskennallinen mallinnus betonin huokoisuuden vaikutuksesta betonin radon-diffuusiokertoimeen. (Gadd ja Borak, 1995)

Vesi-sementtisuhteella on merkittävä vaikutus betonin huokosrakenteeseen. Korkean vesi-sementtisuhteen omaava betoni sisältää enemmän vettä suhteessa sementtiin, jolloin lujittuneeseen betoniin muodostuu enemmän kapillaarihuokosia ja yhtenäinen kapillaariverkosto. Kapillaariverkosto on yhtenäinen, kun betonin vesi-sementtisuhte on yli 0,7. Vesi-sementtisuhteen ollessa 0,4 hydratoituneeseen betoniin ei jää ollenkaan kapillaarihuokosia. (BY 201, 2018).

Betonin vesi-sementtisuhteella on myös nähty riippuvuus betonin diffuusiokertoimeen laboratoriokokein. Rogersin et. al (1994) mukaan vesi-sementtisuhdetta pienentämällä voidaan pienentää betonin radon-diffuusiokerrointa (6.10). Lisäksi Rankenin ja Rosenbergin (1995) tutkimuksessa tehtiin samat havainnot, että vesi-sementtisuhteen ja diffuusiokertoimen välillä on riippuvuus. Tutkimuksessa betonin vesi-sementtisuhdetta pienentämällä havaittiin, että myös betonin diffuusiokerroin pienenee, jolloin radonläpäisevyys betonin läpi myös pienenee. Georgescun (2012) mukaan betonin vesi-sementtisuhte on merkittävin tekijä, joka vaikuttaa betonin radonin läpäisevyyteen.



Kuva 6.10. Vesi-sementtisuhteen vaikutus betonin radondiffuusiokerrotimeen (Rogers. et al 1994)

Tutkimuksin on myös todettu, että betonin tiheys vaikuttaa samalla tavalla betonin diffuusioläpäisevyyteen kuin vesi-sementtisuhte. Betonin tiheyttä kasvattamalla saavutetaan betonille alhaisempi diffuusiokerroin, jolloin radonläpäisevyys betonin läpi pienenee. (Rogers et. al 1994 ja Georgescun, 2012) Tämä riippuvuus betonin tiheyden ja diffuusiokerroimen välillä johtuu siitä, että betonin tiheyttä voidaan kasvattaa vesi-sementtisuhteen avulla. Alhainen vesi-sementtisuhte vähentää kapillaarihuokosten määrää, jolloin betonin sementtikiven osuus suhteessa ilmahuokosiin on suurempi ja tällöin betonin tiheys kasvaa.

Betonin diffuusiokerroimeen voidaan merkittävästi vaikuttaa betonin sideaineilla (Ranken ja Rosenberg 1995). Tutkimuksen mukaan lentotuhkan käyttö sementin osittain korvaavana ainesosana lisää diffuusiolla kulkeutuvan radonin määrää. Toisaalta Kumarin ja Chauhanin (2015) tutkimuksessa tutkittiin lentotuhkan käytön vaikutusta sementtilaastin radondiffuusiokerroimeen. Tutkimuksessa todetaan, että lentotuhkan käyttö vähentää laastin radondiffuusiokerrointa. Lentotuhkaa lisäämällä laastin radondiffuusiokerroin pieneni 80 % laastin huokoisuusluvun pienennyttyä. Kuitenkin lentotuhkan lisääminen nostattaa laastin omaa radontuottoa, jolloin kokonaisvaikutus jää pienemmäksi. (Kumar ja Chauhan 2015)

6.2.2 Betonin kosteuspitoisuus

Betonin kosteuspitoisuudella on nähty vaikutusta betonin diffuusioläpäisevyyteen Cozmutan et. al. (2003) suorittamassa tutkimuksessa, jossa tutkittiin betonikoekappaleiden diffuusiokerrointa. Betonisyliinterit upotettiin kokeen aluksi veteen ja sen jälkeen koekappaleita aloitettiin kuivaamaan. Betonin vesipitoisuuden laskiessa betonin diffuusiokerroin mitattiin laboratoriokeella, jossa radonlähde asennettiin sylinterin sisään ja sylinterin ylä- ja alapää tiivistettiin radontiiviisti. Tutkimuksen tuloksina saatiin selville yhteys betonin kosteuspitoisuuden ja radonin diffuusiokertoimen välillä. Betonin kosteuspitoisuuden laskiessa huomattiin, että betonin diffuusiokerroin ja radonläpäisevyys kasvoi.

Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden vaikutusta betonin radondiffuusioläpäisevyyteen. Cozmutan et. al. (2003) suorittamassa tutkimuksessa tutkittiin betonin suhteellisen kosteuden vaikutusta betonin diffuusioläpäisevyyteen ja betonin omaan radonin tuottoon laskennallisesti mallintamalla. Mallinnuksessa betonilaatan kosteuspitoisuutta muutettiin muuttamalla ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuutta ja sitä kautta vaikutettiin betonin huokosilman kosteuspitoisuuteen. Betonilaatan alapuolinen radonpitoisuus pidettiin koko ajan samalla tasolla. Mallinnuksessa käytetyn betonilaatan paksuus oli 200 mm ja vesi-sementtisuhde 0,48.

Mallinnuksessa huomattiin, että suhteellisen kosteuden laskiessa betonin läpi tuleva radonin määrä kasvoi lineaarisesti betonin suhteellisen kosteuden laskiessa 100 % RH:sta 20 % RH:een. Kuitenkin radonin diffuusiovirtaus betonin läpi oli hyvin vähäistä, eikä suhteellisen kosteuden muutoksen vaikutuksella ollut merkitsevää vaikutusta pinnan radonekshalaatioon. (Cozmuta et. Al 2003)

Betonin huokosilman vesihöyrypitoisuuden kasvaessa vesihöyrymolekyylit täyttävät huokosten tilavuudesta suuremman osan, jolloin radonmolekyyliden on vaikeampi tunkeutua betonin huokosia pitkin betonin läpi, koska radon absorboituu veteen. Betonin kuivuneessa huokosilmasta poistuu kosteutta ja sitä kautta radonmolekyylejä ei enää liukene niin paljon, jolloin enemmän radonmolekyylejä ajautuu betonin läpi. (Cozmuta et. al 2003 ja Fournier et. al 2005)

Ikääntyneen betonin radonläpäisevyyden kasvamisesta on näyttöä kahdesta tutkimuksesta. Nielsen et. Al (1997) tutkimuksessa mitattiin yli kaksi vuotta kuivuneiden betonikappaleiden radonläpäisevyyttä ja verrattiin niitä vasta valettujen koekappaleisiin radonläpäisevyyksiin. Mittauksissa huomattiin, että kuivuneiden koekappaleiden radonläpäisevyys oli kasvanut huomattavasti, noin 0,16 %-yksikköä per päivä. Nielsen esittää, että betonin radonläpäisevyys kasvoi betonin rakennusaikaisen kosteuden poistuttua.

Lisäksi Rogers et. Al (1995) tutkimuksessa todettiin, että 12 vuoden ikäisen betonin radondiffuusiokerroin oli 1,6 kertaa suurempi vastaavaan tuoreempaan betoniin nähden.

Martialayn (1987) tutkimuksessa betonin ilmanläpäisevyys kasvoi merkittävästi ensimmäisen 10 vuoden aikana. Rogersin ja Nielsonin (1991) tutkimuksessa betonin radon- ja ilmanläpäisevyydellä on havaittu vastaavuuksia. Näissä kahdessa tutkimuksessa esitetään, että radon- ja ilmanläpäisevyyden kasvaminen on seurausta betonin rakennusaikeisen kosteuden poistumisesta ja hiushalkeilusta.

6.2.3 Betonilaatan ilmatiiviys

Alapohjarakenteen radonteknisen toiminnan kannalta yksi merkittävimmistä tekijöistä on betonilaatan yhteneväisyys ja ilmatiiviys. Nielsonin et. al (1997) tutkimuksessa tutkittiin betonilaatan epätiiviyskohtien, kuten läpivientien, halkeamien vaikutusta radonin diffuusiokertoimeen. Tutkimuksen perusteella pienet halkeamat ja epätiiviyskohdat eivät vaikuta merkittävästi betonilaatan diffuusiokertoimeen, kun halkeamien koko on alle 0,2 mm. Samassa tutkimuksessa todettiin, että epätiiviyti liittymät ja läpiviennit lisäävät radonin tunkeutumista betonilaatan läpi merkittävästi, mikä johtuu radonin kulkeutumisesta konvektiolla ja diffuusiolla halkeamien, epätiiviyden liittymien ja läpivientien kautta sisäilmaan.

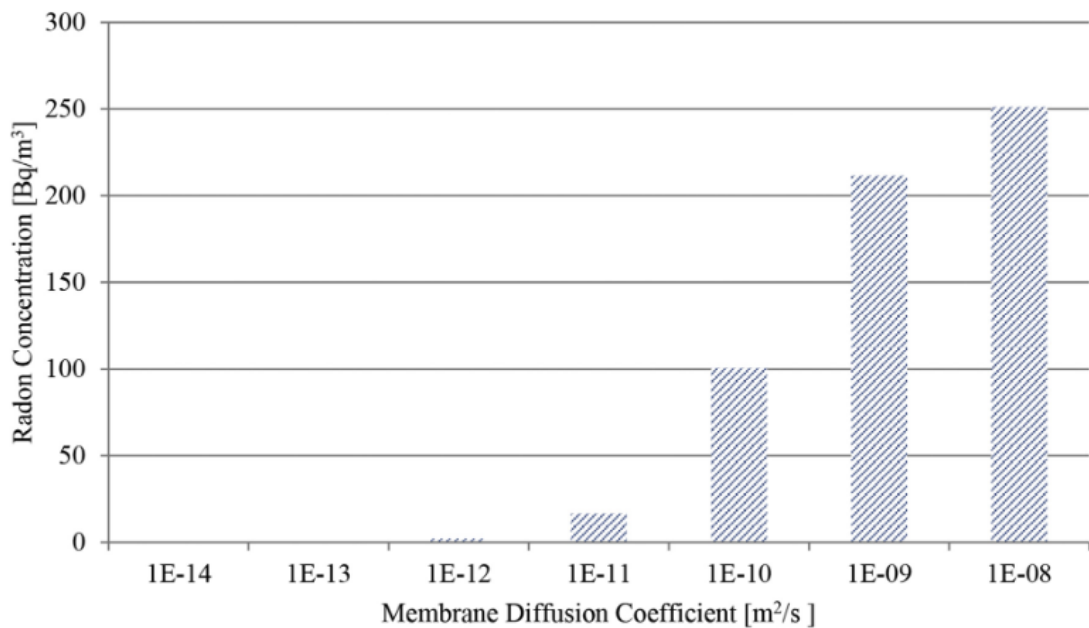
Kronqvistin (1989) tutkimuksessa tarkasteltiin halkeaman vaikutusta betonilaatan radontiiveyteen. Radonläpäisevyyskokeiden perusteella betonilaatan läpi tunkeutuva radonin määrä on kymmenkertainen verrattuna hyvin tiivistettyyn betoniin. Tämän perusteella on tärkeää huolehtia tuoreen betonin jälkihoidosta varmistamalla betonilaatan hallittu kuivuminen.

6.2.4 Pintarakenne

Maanvastaisen alapohjarakenteen radonteknistä toimivuutta voidaan parantaa pintarakenteiden avulla. Polyvinyylidikloridista (PVC) valmistettujen muovimattopäällysteiden radonläpäisevyys on huomattavasti pienempi betoniin verrattuna. PVC-lattiapäällysteiden diffuusiokerroin kokeellisesti määritettynä on luokkaa 17×10^{-12} m/s (Jiranek & Kacmari-kova, 2019), kun taas betonin vastaava diffuusiokerroin on noin 4×10^{-7} m/s (Rogers et al. 1995) Kokeellisesti määritettyjen diffuusiokertoimien perusteella tiiviillä lattiapäällysteellä voidaan vähentää maanvastaisen alapohjarakenteen läpi kulkeutuvan radonin määrään.

PVC-muovimatto on rakenteeltaan homogeeninen ja hyvin tiivis materiaali. Tämän johdosta muovimattojen radonläpäisevyys on huomattavasti pienempi verrattuna huokoisiin

materiaaleihin. PVC-muovista valmistetut lattiapäällysteet ovat Suomessa hyvin yleisiä varsinkin julkisissa rakennuksissa. Nämä lattiapäällysteet parantavat alapohjarakenteen radonteknistä toimivuutta hidastamalla radonin tunkeutumista alapohjarakenteen läpi ja sitä kautta vähentävät sisäilman radonin määrää. Munoz et. Al (2017) tekemän laskennallisen tarkastelun perusteella PVC-muovin kaltaisella lattiapäällysteellä pystytään rajoittamaan sisäilmaan päätyvään radonin määrää huomattavasti (Kuva 6.11). Tarkastelussa todettiin, että sisäilman radonpitoisuus saatiin laskettua 250 Bq/m^3 :sta alle 50 Bq/m^3 :een, kun alapohjarakenteessa käytetään muovimaton kaltaista lattiapäällystettä.



Kuva 6.11 Alapohjarakenteen lattiapäällysteen radondiffuusiokerroimen vaikutus sisäilman radonpitoisuuteen. (Munoz et Al. 2017)

6.2.5 Lämmöneristekerros

Alapohjarakenteen polystyreeni -lämmöneristeen radonlöpäisevyydestä ei ole tutkimustietoa kattavasti saatavilla. Polystyreenin radondiffuusiokerrointa on mitattu diplomityössä. Mittauksessa polystyreenille määritettiin viisi kertaa suurempi diffuusiokerroin, kuin 20 MPa lujuuden omaavalle betonille. Tämän mittaustuloksen perusteella polystyreenillä ei ole niin merkittävää vaikutusta alapohjarakenteen radonlöpäisevyyteen kuin betonilla. (Kronqvist 1991)

Nykyisissä alapohjarakenteissa lämmöneristyspaksuudet ovat kasvaneet huomattavasti, jolloin myös lämmöneristyskerros vastustaa paremmin radonin tunkeutumista kohti sisäilmaa. Tämän lisäksi lämmöneristyskerroksen paksuuden kasvamisen johdosta lämmöneristelevyjä asennetaan useampi kerros, jolloin levyjen saumat limittyvät.

6.2.6 Täyttökerros

Alapohjarakenteen radonteknisen toiminnan yksi merkittävimmistä tekijöistä on täyttökerroksen huokosilman radonpitoisuus. Maaperän radonpitoisuudessa on paljon alueellisia eroja (Luku 5.1)

Alapohjarakenteen täyttökerroksen huokosilman radonpitoisuuteen merkittävin vaikuttava tekijä on maaperän ilmanläpäisevyys. Hyvin ilmaa läpäisevissä maaperissä radon pääsee helpommin kulkeutumaan kohti maanpintaa diffuusion ja konvektion avulla. Tutkimuksessa on todettu, että maaperän hyvä ilmanläpäisevyys on yksi merkittävimmistä syistä sisäilman korkealle radonpitoisuudelle. (Mäkeläinen et. al 2001)

Maaperän radonpitoisuuteen vaikuttavat myös maaperän kyllästyskosteuspitoisuus ja lämpötila. Tutkimuksen (Arvela et. Al 2015) mukaan maaperän kyllästyskosteuspitoisuuden kasvaessa myös radonpitoisuus kasvoi. Maaperän veden kyllästyspitoisuuden kasvaessa 30 %:sta 70 %:een radonpitoisuus kaksinkertaistui 1 metrin syvyydellä maanpintaan nähden. Lisäksi Arvelan et. Al (2015) mittaustuloksissa maaperän radonpitoisuus kasvoi 10–20 % keväällä maanpinnan lumikerrosten sulaessa.

Lisäksi on tutkittu, että maaperän lämpötilan kasvaessa maaperän radonpitoisuus kasvaa, mikä lisää lämpimänä kesä kautena maaperän radonpitoisuutta. Lämpötilan vaikutus maaperän radonpitoisuuteen on merkittävin, kun maaperän huokostilavuuden kosteuspitoisuus on korkea. Maaperän huokosten kyllästyskosteuspitoisuuden ollessa 30–50 % maaperän lämpötilalla ei todettu merkittävää vaikutusta maaperän radonpitoisuuteen. (Arvela et al 2015)

7. TUTKIMUSMENETELMÄT

7.1 Maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusmittaustulosten tarkastelu

Tässä tutkimusosassa tarkasteltiin Vahanan Rakennusfysiikka Oy:n tekemien kosteus-, sisäilma- ja rakenneteknisten kuntotutkimusten ja kosteusvaurioselvitysten kosteusmittaustuloksia, sekä Helsingin kaupungin kiinteistöihin tehtyjä kosteusmittaustuloksia

Mittaustulosten avulla selvitettiin minkälaisiin suhteellisiin kosteuksiin alapohjarakenteet ovat tasaantuneet pitkällä aikavälillä käytännössä. Lisäksi selvitettiin miten kirjallisuudessa esitetyt eri tekijät vaikuttavat maanvastaisen alapohjarakenteen kosteustekniseen toimintaan ja onko niillä tilastollista korrelaatiota alapohjarakenteen kosteustekniseen toimintaan. Tässä diplomityössä tarkasteltiin seuraavia tekijöitä; pintarakenteen vesihöyrynläpäisevyys, alapohjarakenteen ikä mittaushetkellä, eristekerroksen paksuus, täyttömateriaali sekä ulkoseinän ja maanpinnan läheisyys.

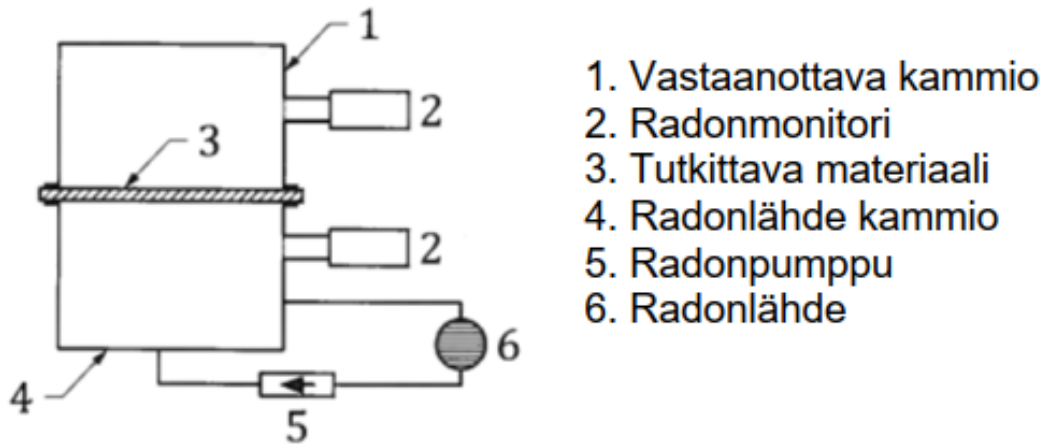
Mittaustuloksia täydennettiin tätä diplomityötä varten tehdyillä kosteusmittauksilla, jotka tehtiin porareikämenetelmällä RT-kortin RT 103333 (2021) mukaan. Täydentävät kosteusmittaukset kohdistuivat pääosin 2000-luvulla rakennettuihin rakennuksiin, joista oli hyvin vähän valmista mittausdataa. Kosteusmittausten tarkoituksena oli myös kartoittaa mahdolliset näytteenottokohdat laboratoriokokeita varten.

7.2 Radonläpäisevyyden laboratoriokokeet

Laboratoriokokeet suoritettiin normin E DIN ISO 11665-10 (VDE 0493-1-6660):2013 mukaan. Normi on alun perin tarkoitettu ohjeistamaan vedeneristeiden diffuusiokertoimien määrittämiseen aktiivisen radonpitoisuusmittauksen avulla. Normi ohjeistaa diffuusiokerroksen määrittämisen kolmella eri tavalla, epästationäärisessä (menetelmä A) tai stationäärisessä tilanteessa (B). Kolmas tapa (C) on mitata materiaalin radonläpäisevyys tuulettamalla yläkammiota tasaisesti, jolloin diffuusiovirtaus koekappaleen läpi on tasainen. Tässä diplomityössä materiaalin diffuusiokerroin määritettiin menetelmällä B, Vahanan Rakennusfysiikka Oy:n kehittämällä koejärjestelyllä (Kuva).

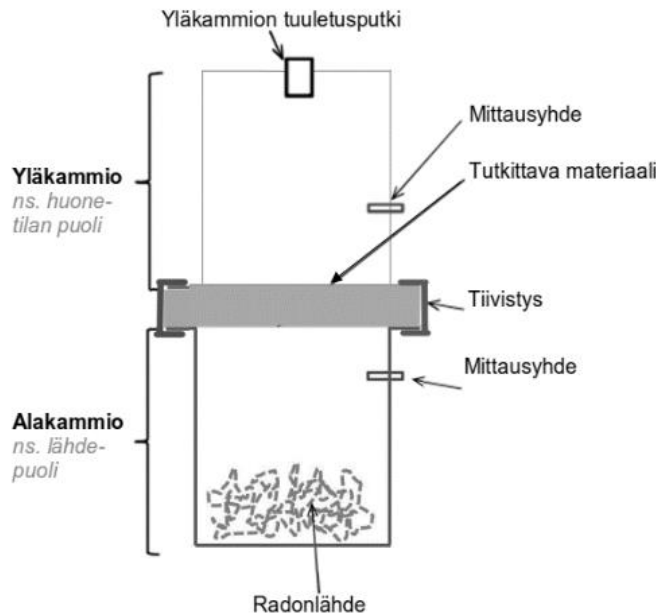
Kuvassa 7.1 esitetyn testimenetelmän periaatteena on tiivistää tutkittava materiaali kahden ilmatiiviin alumiinisen tai ruostumattomasta teräksestä valmistetun kammion väliin. Kammioden tilavuus normin mukaan täytyy olla vähintään $0,5 \text{ dm}^3$ ja pinta-ala $0,5 \text{ dm}^2$. Diplomityössä käytetyn kammion tilavuus on $12,8 \text{ dm}^3$ ja pinta-ala on 9 dm^2 , mikä lisää

testauksen luotettavuutta huomattavasti, varsinkin, kun testataan todellisesta lattiasta irti sahattuja betonikappaleita.



Kuva 7.1. Normin E DIN ISO-11665-10:2013–08 mukainen mittausjärjestelmä

Normin mukaisesta testimenetelmästä poiketen, diplomityön koejärjestelyssä radonlähde lisätään suoraan radonlähteen kammioon (Kuva), eikä radonpitoista ilmaa pumpata kammioon. Diplomityössä alakammion radonpitoisuus oli koekappaleesta riippuen $400\,000\text{--}960\,000\text{ Bq/m}^3$. Alakammion radonpitoisuutta seurataan normin mukaisesti hetkellisellä mittauksella kerran päivässä noin kahden viikon ajan niin, että alakammion radonpitoisuus oli tasaantunut.



Kuva 7.2. Periaatepiirustus diplomityössä käytetystä koejärjestelystä (Kettunen 2021)

Normin mukaan kammioiden radonpitoisuutta mittaavan radonmonitorin täytyy mitata vähintään 500 Bq/m^3 pitoisuus ja mittaustarkkuuden täytyy olla tarkempi kuin 10 %. Diplomityössä radonpitoisuutta mitattiin Alphaguard DF2000 -radonmonitorilla, joka täytti normin asettaman vaatimuksen mittaustarkkuudessa. Monitorin mittaasepäätarkkuus on laitteen kalibroijan mukaan 4,8 % ja laitevalmistajan mukaan 4,2 %. Kalibrointi suoritetaan radonmonitorille kahden vuoden välein. Lisäksi kokemusperäisesti on todettu, että pieniä radonpitoisuuksia mitattaessa thoronpitoisuus aiheuttaa mittaasepäätarkkuutta. Thoronpitoisuuden aiheuttama mittaasepäätarkkuus minimoitiin jättämällä ensimmäisiä mittaustuloksia huomioimatta, joissa radonpitoisuus oli alhainen.

Normin mukaan kammioiden välistä paine-eroa täytyy seurata paine-eromittarilla, jonka mittausalueena on vähintään $\pm 1 \dots 150 \text{ Pa}$. Varsinaisen läpäisevyysmittauksen aikana kammioiden välinen paine-ero tulee olla $< 5 \text{ Pa}$. Normin mukainen paine-ero saavutettiin asentamalla kammioihin radontiiviit paineentasauspussit. Paineentasauspussit oli valmistettu alumiinipaperista ja niiden tilavuus oli noin 3 litraa.

Mittaushuoneessa täytyy lisäksi olla ilman suhteellisen kosteuden, lämpötilan, paineen ja radonpitoisuuden jatkuvat seurantamittalaitteet. Normin mukaan mittaushuoneessa lämpötilan täytyy olla $22 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhteellisen kosteuden $40 \pm 10 \text{ \% RH}$. Mittausten aikana olosuhdehuoneen lämpötila oli $20 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhteellinen kosteus $50 \pm 3 \text{ \% RH}$.

Radonlähteen puoleisen kammion (alakammio) radonpitoisuuden tasaantumisen aikana, yläkammiota tuuletetaan normin mukaisesti koneellisesti ja tuuletus lopetetaan alakammion radonpitoisuuden tasaannuttua. Alakammion radonpitoisuuden tasaannuttua, suoritetaan varsinainen radonläpäisevyysmittaus mittaamenetelmä B:n mukaan. Normin mukaan vastaanottavan kammion ilmatilaa tuuletetaan puhtaalla ilmalla, jonka jälkeen kammio suljetaan. Kammion sulkemisen jälkeen ensimmäinen radonpitoisuusluku voidaan ottaa aikaisintaan 10 minuutin jälkeen. Normin mukaan vastaanottavan kammion radonpitoisuus mitataan vähintään neljä kertaa. Diplomityössä vastaanottavan kammion radonpitoisuus mitattiin vähintään yhdeksän kertaa.

Yläkammion mittaustuloksille sovitetaan suora, josta määritetään lineaarisen regression kulmakerroin p , joka on kammion pitoisuusmuutos $C [\text{Bq/m}^3/\text{h}]$. Radonpitoisuuden kolmakertoimelle määritetään korrelaatiokerroin R , jonka täytyy olla normin mukaan vähintään 0,9.

Normin mukaan mittauksen aikana alakammioille määritetään keskimääräinen radonpitoisuus. Diplomityössä alakammion radonpitoisuus määritettiin ennen ensimmäistä mitausta ja kolmannen mittauksen jälkeen, joista määritettiin keskiarvo. Normin mukaan

alakammion radonpitoisuus pitää mitata vähintään 12 tunnin välein, jonka välissä varsinaiset läpäisevyysmittaukset suoritettiin.

Yläkammion radonpitoisuuden muutoksen avulla määritetään pinnan radonekshalaatio E kaavalla 7.1, jonka avulla määritetään materiaalin tehokas diffuusiokerroin D_e .

$$E = \frac{\Delta C V}{\Delta t A} = p \frac{V}{A} \quad (7.1)$$

missä

E on pinnan radon ekshalaatio [Bq/m²h]

ΔC on radonpitoisuuden muutos [Bq/m³]

V on kammion tilavuus [m³]

Δt on ajan muutos [h]

A on kammion pinta-ala [m²]

p on radonpitoisuuden muutosnopeus.

Tutkittavan materiaalin tehokas diffuusiokerroin D_e määritetään iteroimalla kaavasta 7.2. Iteroinnin lähtöarvo saadaan kaavasta 7.3:

$$E = -D_e \frac{\Delta C}{b} \quad (7.2)$$

$$E = D_e r \frac{C_a}{\sinh(rb)} \quad (7.3)$$

missä

D_e on tehokas diffuusiokerroin [m²/h]

r on diffuusiomatkan käänteisluku [1/m]

C_a on radonpitoisuus alakammiossa [Bq/m³]

b on tutkittavan materiaalin paksuus [m].

Iterointia jatketaan noin 10 kierrosta, jonka jälkeen voidaan määrittää rakenteen tehokas diffuusiokerroin D_e . Mittaus suoritettiin yhdelle koekappaleelle kolme kertaa, joista määritettiin keskiarvo. Koekappaleille määritetyt diffuusiokertoimet on esitetty luvussa 8.2.5

7.2.1 Koekappaleiden irrotus

Koekappaleet hankittiin Tampereen kaupungin kiinteistöistä. Kohteet ovat 2000-luvulla rakennettuja rakennuksia, joissa on alapuolelta lämmöneristetty maanvastainen alapohjarakenne. Kohteissa suoritettiin kosteusmittauksia porareikämenetelmällä RT-kortin RT-103333 (2021) mukaan, millä varmistettiin betonilaatan kosteusjakauma ja sen sopivuus laboratoriokokeita varten.

Koekappaleita irrotettiin yhteensä neljä kappaletta kahdesta eri kiinteistöstä. Koekappaleiden koko on 31x48 cm, joka määräytyi laboratorion kokeissa käytettyjen kammioiden koon mukaan. Koekappaleet irrotettiin timanttisahaamalla kuivamenetelmällä (7.3).



Kuva 7.3. Koekappaleen irrotus timanttisahaamalla.

Koekappaleen irrotuksen jälkeen koekappaleet käärittiin ilmatiiviisti muoviin, jolla minimoitiin koekappaleen tasaantuminen ympäröivän ilman kosteuspitoisuuteen. Seuraavana päivänä koekappaleet siirrettiin vakiokosteushuoneeseen, jossa ilman suhteellisenä kosteutena oli 50 % RH.

Timanttisahauksesta aiheutuvan lämpövirran vaikutusta koekappaleen kosteuskenttään arvioitiin mittaamalla betonin leikkauspinnan suhteellista kosteutta näytepalamenetelmällä RT-kortin RT-103333 (2021) periaatteen mukaan. Leikkauspinnan kosteusmittauksen mittaussyvytydet määräytyivät ennen koekappaleen irrotusta tehtyjen kosteusmittausten perusteella. (Kuva 7.4)



Kuva 7.4. Koekappaleen irrotuksen jälkeen betonilaatan leikkauspinnasta irrotettiin betonipaloja näytepalakosteusmittausta varten.

7.2.2 Koekappaleiden käsittely ja tiivistäminen

Koekappaleiden yläpinnan maalipinnoite hiottiin pois betonihiomakoneella puhtaalle betonipinnalle kuivamenetelmällä. Lisäksi koekappaleen alapinnan isoimmat polystyreenikappaleet poistettiin betonin pinnasta ja tiivistettävät pinnat hiottiin puhtaalle betonipinnalle. (Kuva 7.5)



Kuva 7.5. Hiottu koekappale.

Kammioiden laipat kiinnitettiin ja tiivistettiin betonikappaleeseen radontiiviillä silikonilla. Silikonin kuivuttua koekappaleiden sivujen radon- ja ilmatiivyyttä parannettiin TKR-pinnoitteella valmistajan työohjeiden mukaisesti: Ensimmäiseksi koekappaleen sivustat sivellään TKR-pinnoitteen peruspinnotteella, joka toimii varsinaisen tiivistysmateriaalin pohjusteena. Peruspinnotteen jälkeen koekappaleiden sivustat sivellään TKR-pinnoitteella kahteen kertaan. Pinnoitteen jälkeen koekappaleiden sivustat ja kammion liittymät teipattiin kaksinkertaisella alumiiniteipillä. (Kuva 7.6)



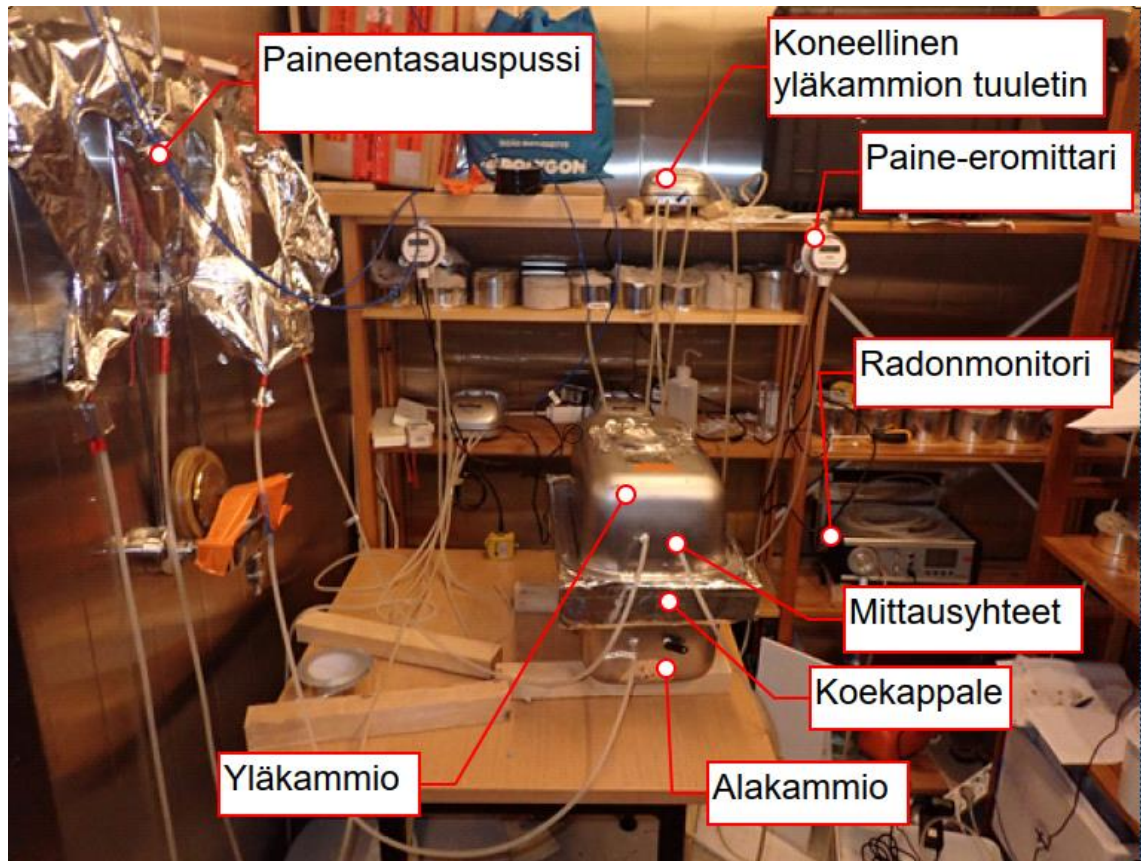
Kuva 7.6 Kammioiden kiinnitys koekappaleisiin vaiheittain. Kammio kiinnitetään ja tiivistetään ensimmäiseksi koekappaleeseen silikonilla. Molempien kammioiden kiinnittämisen jälkeen betonikappaleiden sivupinnat sekä ylä- ja alapinnat kammioiden reunaan asti tiivistetään TKR-pinnoitteella. Viimeiseksi kammioiden sivustat tiivistetään kaksinkertaisella alumiiniteipillä. Mittausyhteet tiivistettiin kammioihin silikonilla.

Ala- ja yläkammioihin porattiin reiät yhteensä neljälle mittausyhteelle. Mittausyhteisiin liitettiin paineentasauspussi, paine-eromittari sekä radonmonitorin puhallus ja imujohdot. Pikaliittimet tiivistettiin kammioon silikonilla ja tiivisteillä ilma- ja radontiiviisti.

Kammioiden ilmatiiviys tarkasteltiin ensin merkkiainekokeella, jossa merkkiainekaasu laskettiin kammioiden sisään, jonka jälkeen tarkkailtiin mahdollisia vuotoreittejä. Merkkiainekokeen jälkeen suoritettiin painekoe, muodostamalla kammioihin + 50 Pa ylipaine. Ilmatiiviyttä tarkkailtiin seuraamalla, kuinka nopeasti kammion ja sisäilman välinen painero tasoittuu. Mittauksen perusteella kammioille määritettiin ilmavuotoluvut, jotka esitetään liitteessä 2.

7.2.3 Mittausjärjestelyt

Radonläpäisevyysskoheet suoritettiin olosuhdehuoneessa, jossa ilman suhteellinen kosteus oli 50 % RH ja lämpötila 20 °C. Mittaukset suoritettiin kuvan 7.7. mukaisesti.



Kuva 7.7. Mittausjärjestelyt.

Ennen radonlähteen lisäämistä alakammioon, mitattiin koekappaleiden betonin oma radontuotto. Betonin oma radontuotto mitattiin samalla menetelmällä, kuin varsinaiset radonläpäisevyysmittaukset. Mittauksen jälkeen radonlähde lisättiin alakammioon kammiossa olevan reiän kautta, joka suljettiin radontiiviillä alumiiniteipillä radonlähteen lisäämisen jälkeen. Alakammion radonpitoisuutta seurattiin mittaamalla pitoisuus kerran päivässä noin kahden viikon ajan. Alakammion radonpitoisuuden seurantamittauksien tulokset on esitetty liitteessä 6. Mittausten perusteella radonpitoisuuden tasaannuttua, suoritettiin varsinaisen radonläpäisevyysmittaus. Yläkammion ilmatilaa tuuletettiin koneellisesti alakammion radonpitoisuuden tasaantumisen ajan.

Radonläpäisevyysmittaus aloitettiin mittaamalla alakammion radonpitoisuus. Tämän jälkeen radonmonitorin radonpitoisuuden annettiin tasaantua riittävän alhaiseksi, jotta mittalaitteen mittaustarkkuus on riittävällä tasolla mitattaessa yläkammion radonpitoisuutta. Tuulettamisen jälkeen yläkammion radonpitoisuuden mittaaminen aloitettiin mittaamalla radonpitoisuus kammion tuuletuksen ollessa päällä. 30 minuutin jälkeen yläkammion tuuletus lopetettiin ja yläkammion ilmatila suljettiin. Yläkammion radonpitoisuuden nousua mitattiin vähintään 90 minuutin ajan. Mittauksen jälkeen yläkammion ilmatilaa ja radonmonitoria tuuletettiin vähintään kaksi tuntia, jonka jälkeen mittaus voitiin suorittaa uudelleen. Mittauksia suoritettiin kolme kertaa yhtä koekappaletta kohden.

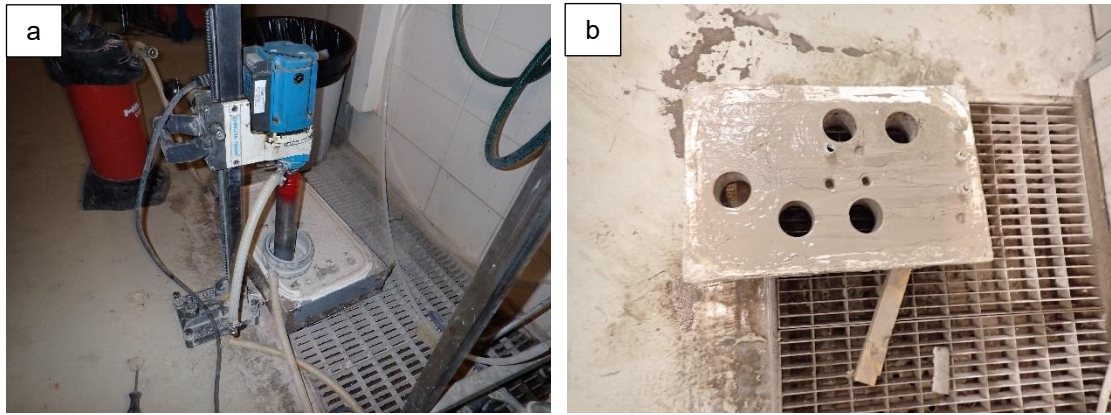
Radonläpäisevyyssmittausten jälkeen koekappaleiden kosteusjakauma selvitettiin porareikäkosteusmittauksin RT-kortin RT 103333 (2021) mukaan, jotta saatiin mahdollisimman tarkasti tietoon, mikä oli koekappaleiden suhteellinen kosteus juuri mittaushetkellä.

(Kuva 7.8)



Kuva 7.8 Koekappaleiden kosteusjakauman mittaaminen radonläpäisevyyssmittausten jälkeen porareikämenetelmällä

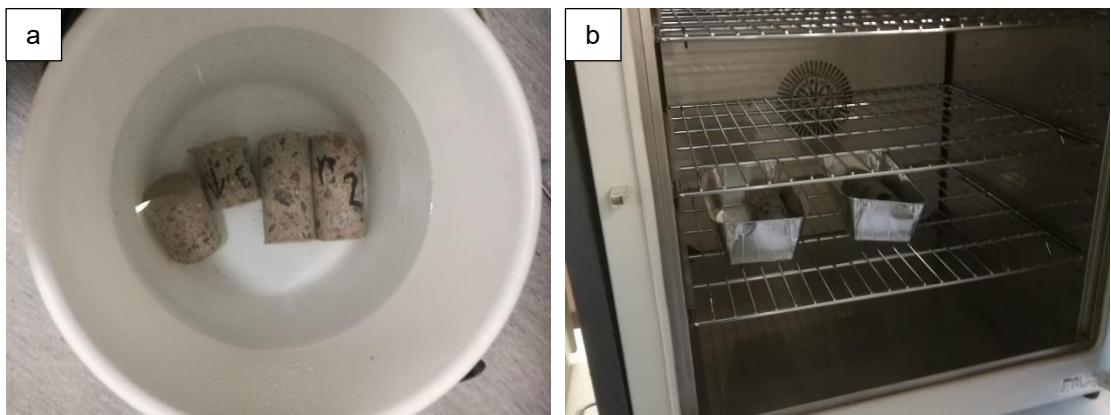
Lisäksi koekappaleista porattiin timanttiporaamalla näytteet ohuthieanalyysia, puristuslujuuskokeita sekä betonin huokoisuuden määrittystä varten, joiden avulla määritettiin koekappaleille betonin puristuslujuus ja huokosrakenne. (Kuvat 7.9 a ja b)



Kuvat 7.9 a ja b. Koekappaleista porattiin timanttiporaamalla poraliernäytteitä ohut-hieanalyysiä ja puristuslujuuskoetta varten.

Koekappaleiden huokoisuus määritettiin märkä-kuivapunnitus-menetelmällä, jossa näytteiden annettiin olla vesiupotuksessa neljä viikkoa. Tämän jälkeen näytteet punnittiin märkänä. Näytteitä kuivatettiin 80 °C lämpötilassa noin kaksi viikkoa, jonka jälkeen koekappaleiden huokoisuus määritettiin. (Kuvat 7.10 a ja b) Kapillaarihuokoisuusluku määritettiin kaavan 7.4 avulla.

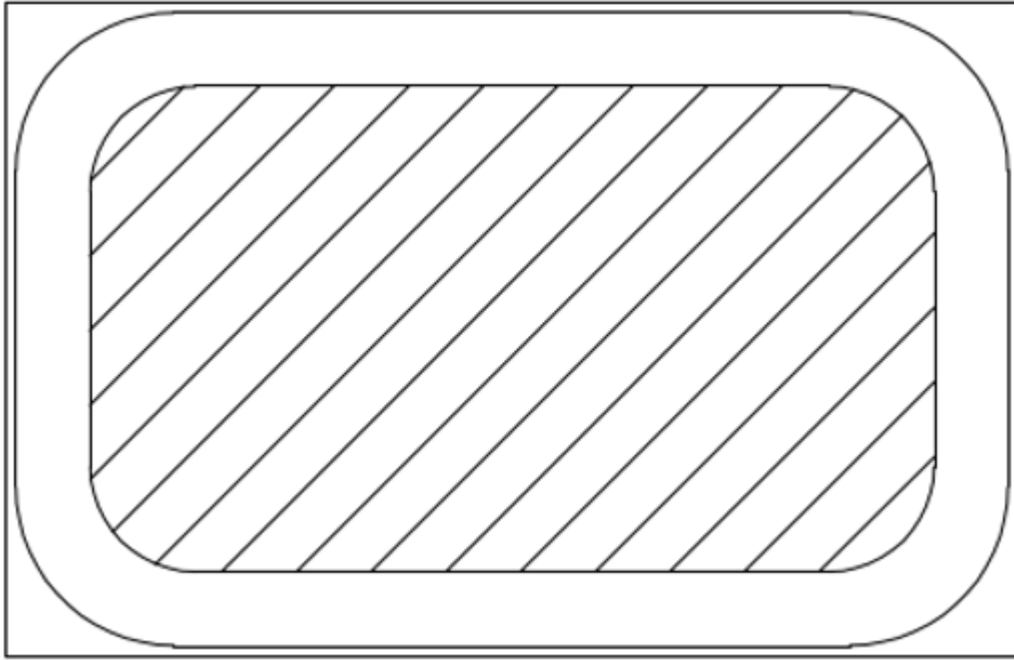
$$\varepsilon = \frac{(m_{\text{märkä}} - m_{\text{kuiva}}) \times \rho_{\text{vesi}}}{V_{\text{koekappale}}} \quad (7.4)$$



Kuvat 7.10 a ja b. Koekappaleista irrotetuista näytteiden avulla määritettiin betonin huokoisuus märkä-kuivapunnitusmenetelmällä.

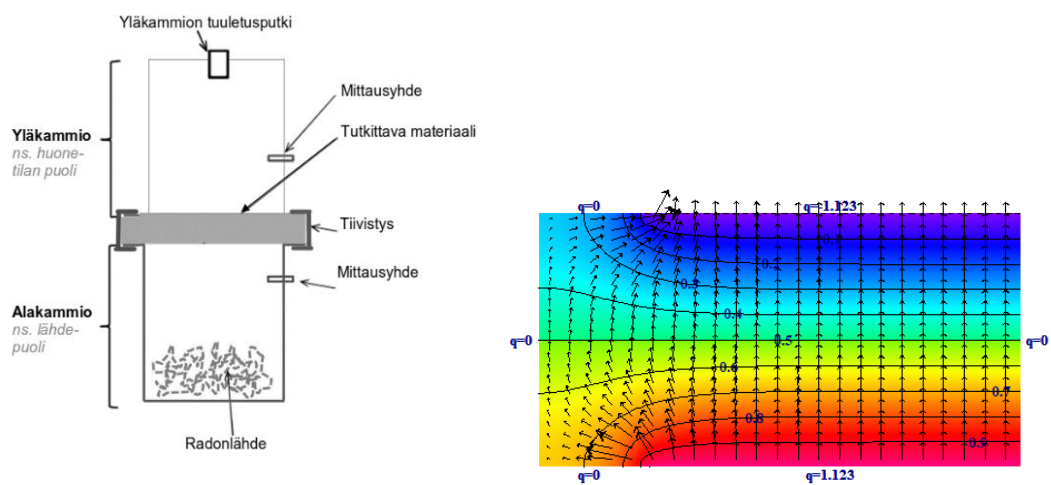
7.2.4 Koekappaleen ja kammion poikkileikkauksen aiheuttama mittausepävarmuus

Kammion pinta-ala kuvan 7.11 mukaisesti on 900 cm². Koekappaleen pinta-ala on noin 1500 cm². Tämä aiheuttaa tilanteen, että radon ei kulkeudu koekappaleen sivuilla kohti-suoraan.



Kuva 7.11. Vinoviivalla on kuvattu aluetta, josta radon pääsee ekshaloitumaan yläkammioon, jonka pinta-ala on 900 cm^2 ja koekappaleen pinta-ala on yhteensä 1500 cm^2 .

Tilanteen vaikutusta koekappaleen radonläpäisevyyteen on arvioitu mallintamalla, miten tilanne vaikuttaa lämpövirtaukseen samanlaisessa koejärjestelyssä kuvan 7.12 mukaisesti. Mallinnuksen mukaan yläpinnalta mitattava lämpövirta on 1,123 kertainen verrattuna koejärjestelyyn, jossa lämpövirta pääsee kulkeutumaan vain kohtisuoraan kappaleen läpi. Mallinnuksen perusteella radonin diffuusiovirtauksella on vastaavasti väljempi reitti koekappaleiden ulokkeiden kautta, jolloin koekappaleen läpi tapahtuva radonin kokonaisvirtaus kasvaa.



Kuva 7.12. Koekappaleen ja kammion välisen pinta-alaeron vaikutus diffuusiovirtaukseen koekappaleen läpi. Mallinnusohjelmalla mallinnettiin koejärjestelyt (vasen kuva) ja mallinnettiin lämpövirtaus koekappaleen läpi (oikea kuva).

Mallinnuksen perusteella koekappaleen tehollista pinta-alaa suurennettiin 12,3 % vastaamaan paremmin todellista tilannetta. Tämän perusteella laskennassa käytetty koekappaleen pinta-ala on $0,1008 \text{ m}^2$, kun todellisuudessa kappaleen tehollinen pinta-ala koejärjestelyssä on $0,09 \text{ m}^2$.

8. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä luvussa esitetään tärkeimmät tutkimustulokset. Luvussa 8.1 esitetään aineiston perusteella tehdyt havainnot alapohjarakenteen betonilaatan suhteelliseen kosteuteen vaikuttavista tekijöistä. Luvussa 8.2 esitetään laboratoriokokeissa saadut tutkimustulokset betonin radonläpäisevyydestä ja diffuusiokertoimesta.

8.1 Alapohjarakenteen kosteustekninen toimivuus

Lattiapäällysteet jaettiin luvun 6.1.4 mukaisesti vesihöyryläpäisevyyden perusteella vesihöyrytiivisiin ja -avoimiin päällysteisiin. Diplomityössä oli käytettävissä yhteensä 176 mittaustulosta, joista 112 mittaustulosta on tehty vesihöyrytiivillä lattiapäällysteellä ja 64 mittaustulosta on tehty vesihöyryavoimella lattiapäällysteellä. Mittaustulosten analysoinnista rajattiin pois sellaiset tulokset, joissa rakenne oli kosteusvaurioitunut, vesihöyrytiivis lattiapäällyste oli asennettu liian kostealle alustalle tai rakennuksesta oli useita mittapisteitä, jotka olivat samasta rakenteesta. Lisäksi kosteusmittaustulokset rajattiin niin, että rakennuksen rakentamisajankohdasta on kulunut vähintään kolme vuotta rakenteen kosteusmittaukseen. Tällä tavoin pyritään varmistamaan, että mahdollisimman paljon rakennusaikaisesta kosteudesta on poistunut rakenteesta. Lisäksi yksittäisissä tilanteissa osa mittaustuloksista rajattiin pois. Eri tilanteiden otoskoko (n) on merkitty jokaiseen kuvaan.

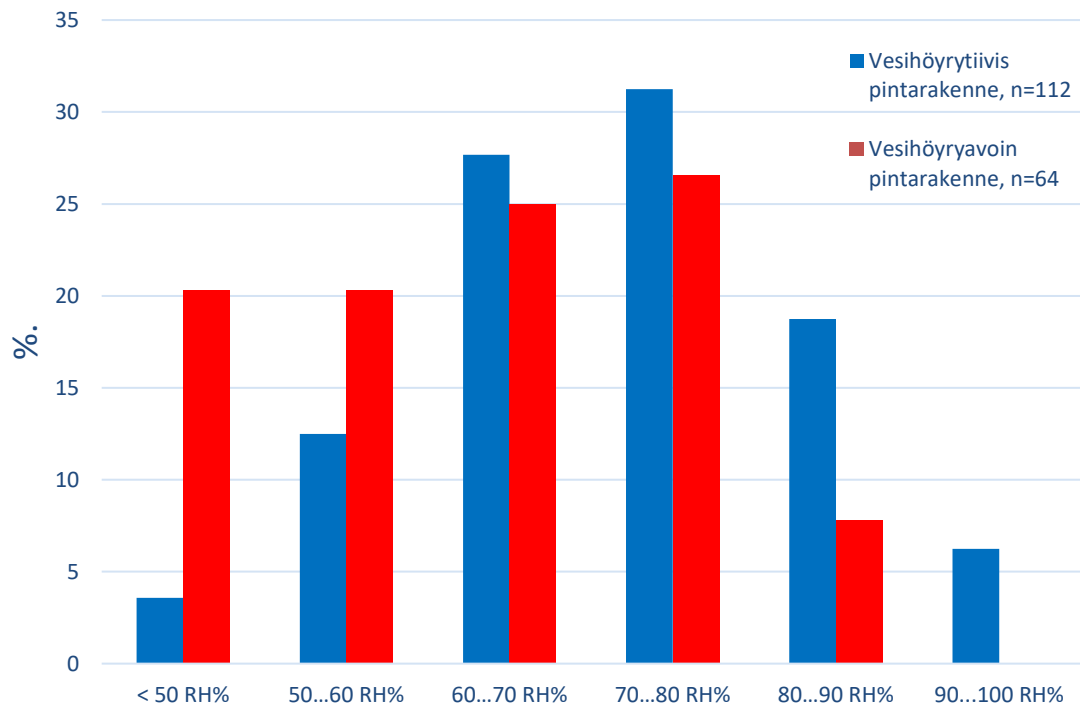
Tyypillisesti kuntotutkimuksissa alapohjarakenteen kosteusmittauksissa määritetään rakenteen kosteusjakauma, jolloin betonilaatan suhteellista kosteutta on mitattu useammalta syvyydeltä. Tässä luvussa esitetyissä kuvissa suhteellinen kosteus on määritetty betonilaatan alapinnasta, jossa se on tyypillisesti korkeampi yläpintaan nähden. Betonilaatan alapinnan suhteellista kosteutta käyttämällä minimoidaan sisäilman vesihöyrypitoisuuden vaikutus tulosten analysointiin, mikä on yksi vaikuttava tekijä betonilaatan suhteelliseen kosteuteen.

Kuntotutkimuksissa on tyypillistä, että kosteusmittaukset suoritetaan rakenteen kosteusteknisesti heikoimpaan kohtaan, jossa rakenteen kosteuspitoisuudet ovat korkeimmillaan. Lisäksi lähtökohtaisesti kosteusteknisesti hyvin toimiviin rakenteisiin ei välttämättä tehdä rakenteen kosteus- ja lämpötilajakauman määrittystä kuntotutkimusten yhteydessä, jolloin näiden mittaustulosten osuus mittausdatassa on pienempi. Tämän johdosta kosteusmittaustulokset painottuvat kosteusteknisesti heikosti toimiviin rakenteisiin.

8.1.1 Pintarakenteen vesihöyryvastuksen vaikutus

Pintarakenteen vesihöyrynläpäisevyyden vaikutusta maanvastaisen betonilaatan suhteellisen kosteuteen arvioitiin analysoimalla kosteusmittaustuloksia jakamalla pintarakenteet vesihöyryvoimiin ja -tiivisiin lattiapäällysteisiin.

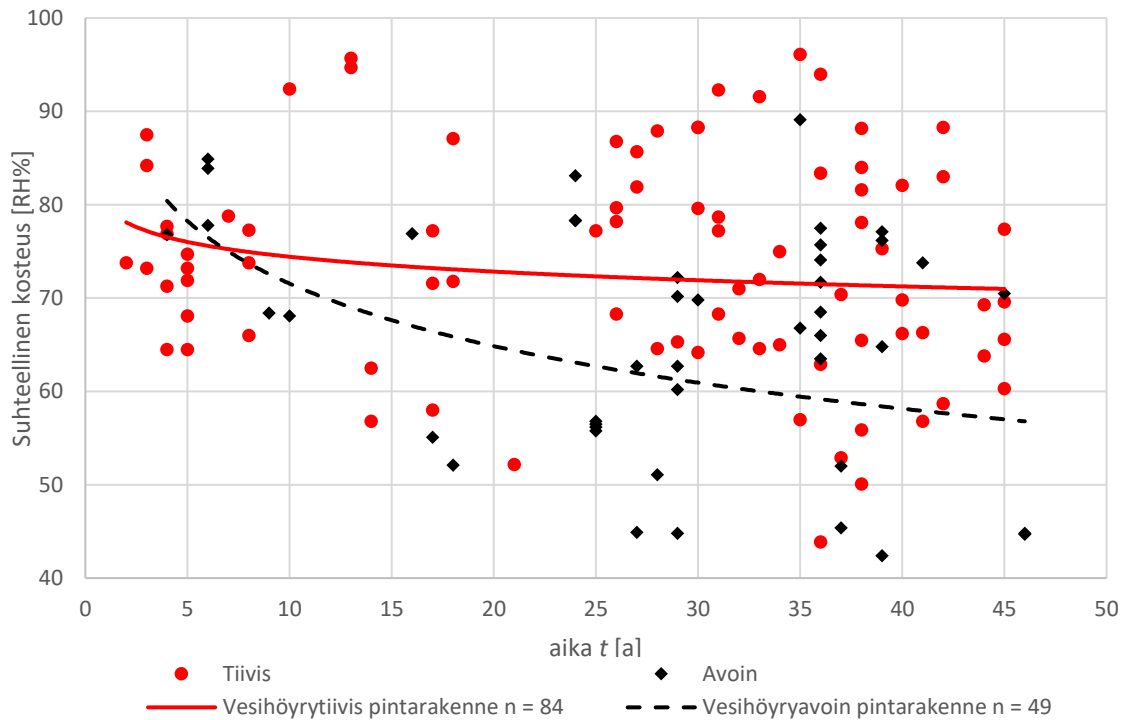
Aineiston perusteella vesihöyryvoimella pintarakenteella rakenteen suhteellinen kosteus tasaantuu lähes poikkeuksetta alle 80 % RH riippumatta lämmöneristepaksuudesta. Betonilaatan kosteuspitoisuus on yli 80 % RH ainoastaan 7 prosentilla mittaustuloksista, kun vastaava lukema vesihöyrytiivillä pintarakenteilla on 25 %-yksikköä. Vesihöyryvoimella päällystemateriaalilla betonilaatan kosteuspitoisuus on tasaantunut alle 60 % RH:een noin 40 prosentilla mittaustuloksista, kun vastaava osuus vesihöyrytiivillä lattiapäällysteellä on 16 prosenttia. (Kuva 8.1)



Kuva 8.1. Maanvastaisten betonilaattojen kuntotutkimusten yhteydessä mitattujen suhteellisen kosteuksien osuus prosenttiyksikköinä vesihöyrytiiville ja -avoimelle lattiapäällysteille.

Pintarakenteen vesihöyryvastus vaikuttaa merkittävästi alapohjarakenteen betonilaatan kosteuspitoisuuteen ja sen tasaantumisnopeuteen (Kuva 8.2). Aineiston perusteella vesihöyrytiivillä pintarakenteella betonilaatan suhteellinen kosteus pysyy keskimäärin yli 70 % RH tasolla riippumatta rakenteen tasaantumisajasta. Lisäksi betonilaatan suhteellinen kosteus pysyy koko tarkastelujakson yli 85 % RH merkittäväällä osalla mittaustulok-

sista. Vesihöyryvoimella pintarakenteella betonilaatan suhteellinen kosteus laskee tasaisesti tasaantumisaajan funktiona ja on noin 10 % RH-yksikköä matalemmalla tasolla verrattuna vesihöyrytiiviseen pintarakenteeseen 45 vuoden tarkastelujakson aikana. Lisäksi vesihöyryvoimella sekä -tiivillä pintarakenteella noin kymmenessä mittaustuloksessa betonilaatan suhteellinen kosteus on noin 50 % RH-tasolla.

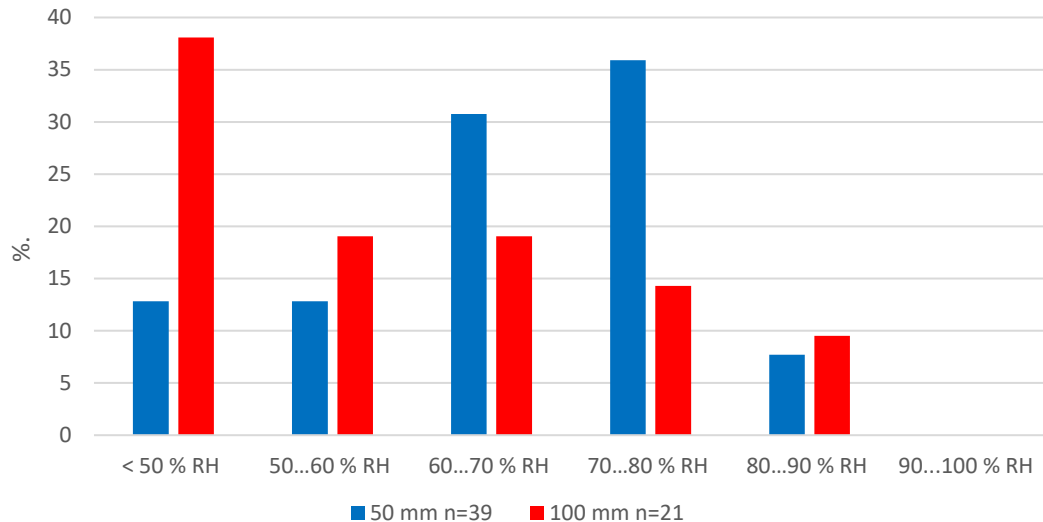


Kuva 8.2 Lattiapäällysteen vaikutus alapohjarakenteen betonilaatan suhteelliseen kosteuteen tasaantumisaajan funktiona.

8.1.2 Lämmöneristekerrospaksuuden vaikutus

Lämmöneristekerrospaksuuden vaikutusta betonilaatan suhteelliseen kosteuteen tarkasteltiin jaotteleamalla kosteusmittaustulokset lämmöneristekerroksen paksuuden ja pintarakenteen vesihöyrynvastuksen mukaan. Lisäksi tarkasteltiin lämmöneristekerroksen paksuuden vaikutusta täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuuteen.

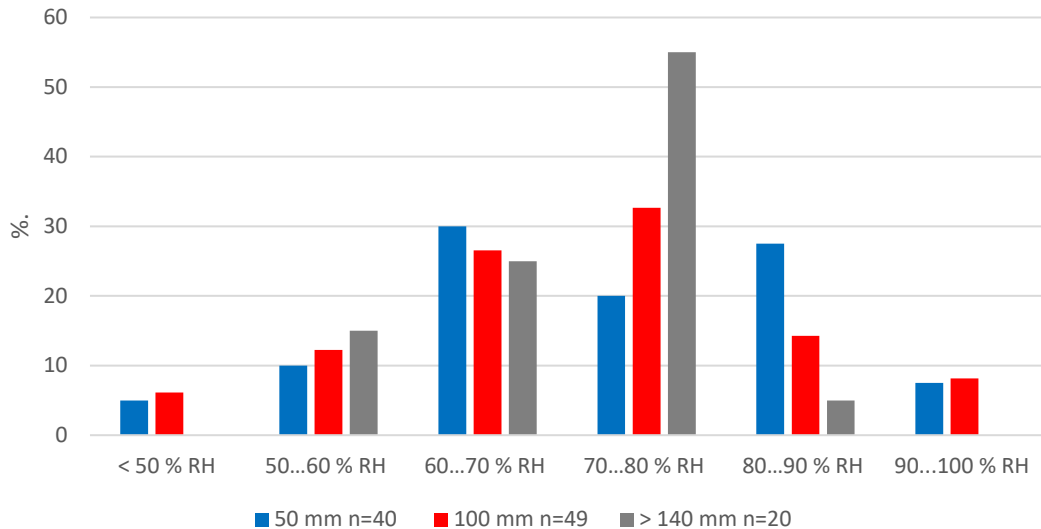
Kuvassa 8.3 nähdään, että alapohjarakenteen lämmöneristeen paksuus vaikuttaa huomattavasti betonilaatan kosteuspitoisuuteen vesihöyryvoimella pintarakenteella. Aineistosta kolmasosa (38 %) mittaustuloksista tasaantui alle 50 % RH kun lämmöneristekerroksen paksuutena on 100 mm. Kun alapohjarakenteen lämmöneristekerroksen paksuutena on 50 mm, aineiston perusteella suurin osa (66 %) alapohjarakenteiden betonilaattojen suhteellisista kosteuksista tasaantuu 60–80 % RH tasolle.



Kuva 8.3. Maanvastaisen betonilaatan tasaantuneiden suhteellisten kosteuksien prosenttiosuudet eri lämmöneristepaksuuksilla käytettävissä olevan aineiston perusteella päälystemateriaalin ollessa vesihöyryävoim.

Kuvan 8.4. perusteella voidaan todeta, että alapohjarakenne toimii kosteusteknisesti varmemmin, kun lämmöneristepaksuutta kasvatetaan pintarakenteen ollessa vesihöyrytiivis. Tämä huomataan siitä, että lämmöneristepaksuuden ollessa 50 mm, 35 %-yksikköä aineiston betonilaattojen suhteellisista kosteuksista on yli 80 % RH. Lämmöneristepaksuuden ollessa 100 mm, 22 prosenttia aineiston betonilaattojen suhteellisista kosteuksista on yli 80 % RH.

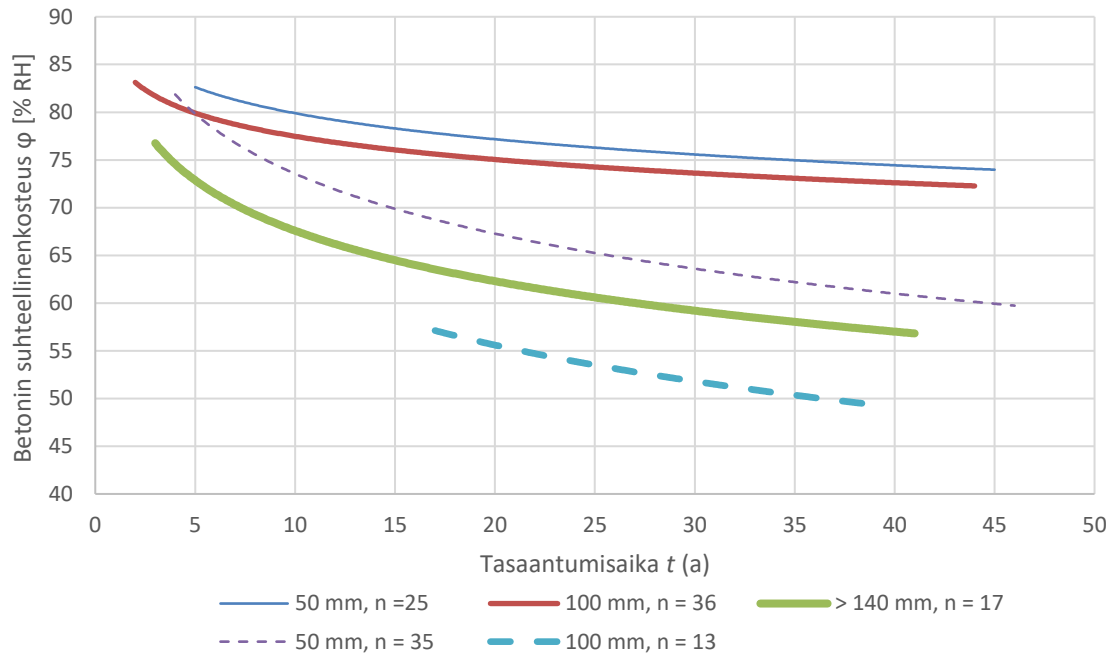
Lämmöneristepaksuuden ollessa yli 140 mm, ainoastaan 5 prosenttia aineiston betonilaattojen suhteellisista kosteuksista on yli 80 % RH. Suurin osa mittaustuloksista on 70...80 % RH tasolla lämmöneristepaksuuden ollessa yli 140 mm, mikä on huomattavasti suurempi määrä kuin lämmöneristepaksuuden ollessa 50 mm tai 100 mm. Tämä selittyy osittain sillä, että kuvassa 8.3 ei oteta huomioon betonilaatan ikää, mikä vaikuttaa suhteelliseen kosteuteen huomattavasti. Luonnollisesti lämmöneristysvaatimusten kiristyessä ajan saatossa alapohjarakenteet ovat iältään nuorempia lämmöneristepaksuuden ollessa yli 140 mm verrattuna rakenteisiin, joissa lämmöneristepaksuus on 50 mm tai 100 mm.



Kuva 8.4 Vesihöyrytiivin lattiapäällysteisen maanvastaisen betonilaatan suhteellisten kosteuksien prosentiosuudet eri lämmöneristepaksuuksilla käytettävissä olevan aineiston perusteella

Kuvan 8.5. perusteella vesihöyrytiivillä pintarakenteella maanvastaisen betonilaatan suhteellinen kosteus tasaantuu keskimäärin hitaammin, kuin vesihöyryavoimella päällystemateriaalilla varsinkin, kun lämmöneristepaksuus on 50 mm tai 100 mm. Lisäksi lämmöneristepaksuuden kasvattaminen keskimäärin nopeuttaa kosteuspitoisuuden tasaantumista ja laskee betonilaatan kosteuspitoisuutta, mikä näkyy sekä vesihöyryavoimella että -tiivillä pintarakenteella.

Lämmöneristekerrospaksuuden ollessa yli 140 mm nähdään merkittävä muutos betonilaatan suhteellisessa kosteudessa tasaantumisajan funktiona. Betonilaatan suhteellinen kosteus on huomattavasti alhaisemmalla tasolla verrattuna rakenteisiin, jossa lämmöneristepaksuus on pienempi. Lämmöneristekerroksen paksuuden kasvattamisen lisäksi samaan aikaan yleistyi karkearakeisten täyttökerrosmateriaalien käyttö, joiden yhteisvaikutuksesta rakenteen kosteustekninen toimivuus on parantunut merkittävästi.



Kuva 8.5. Pintarakenteen ja lämmöneristepaksuuden vaikutus betonilaatan suhteelliseen kosteuteen ajan funktiona. Yhtenäisellä viivalla merkityt käyrät ovat vesihöyrytiivitä lattiapäällysteitä ja katkoviivalla merkityt käyrät ovat vesihöyryavoimia lattiapäällysteitä.

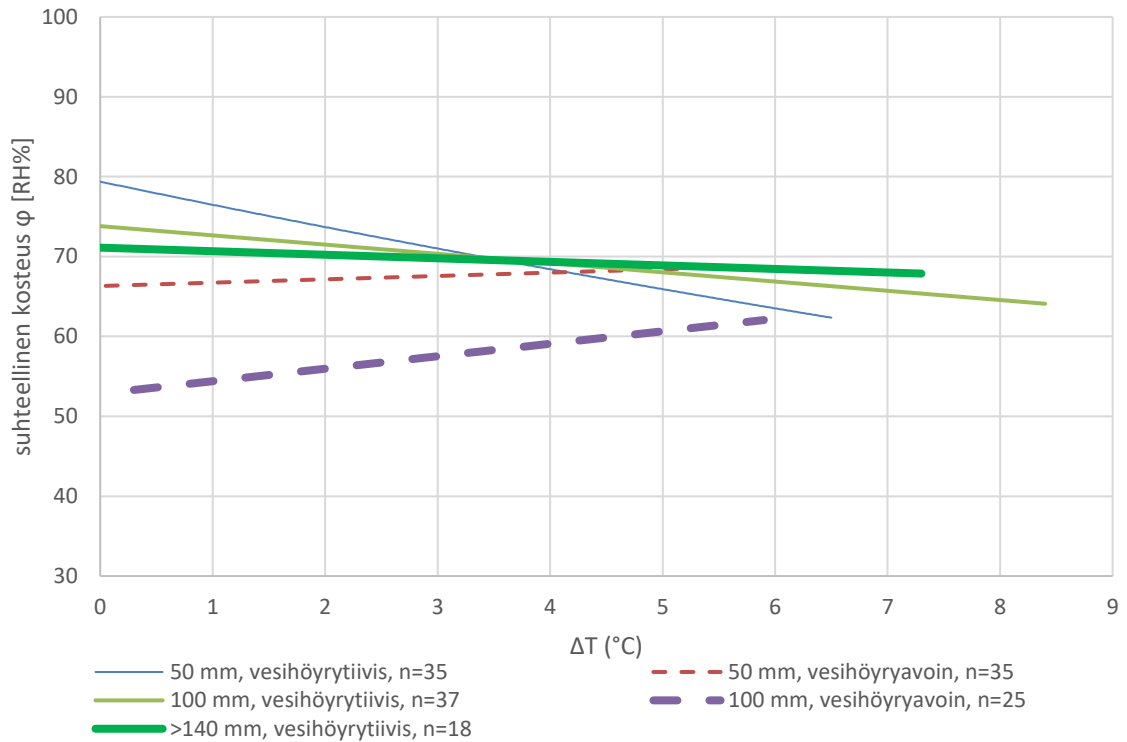
Lämmöneristekerrospaksuuden kasvattaminen vaikuttaa myös täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuuteen (Taulukko 8.1). Aineiston perusteella vesihöyrypitoisuus laskee lämmöneristekerroksen paksuuden kasvaessa täyttökerroksen huokosilmassa.

Taulukko 8.1. Lämmöneristekerroksen paksuuden vaikutus täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuuteen μ [g/m^3].

Lämmöneristepaksuus b [mm]	μ [g/m^3]	Otosmäärä n
50	14,0	33
100	12,8	23
>140 mm	12,4	6

8.1.3 Betonilaatan ja täyttökerroksen välisen lämpötilaeron vaikutus

Kuvassa 8.6 tarkastellaan betonilaatan ja täyttökerroksen välisen lämpötilaeron vaikutusta betonilaatan suhteelliseen kosteuteen.



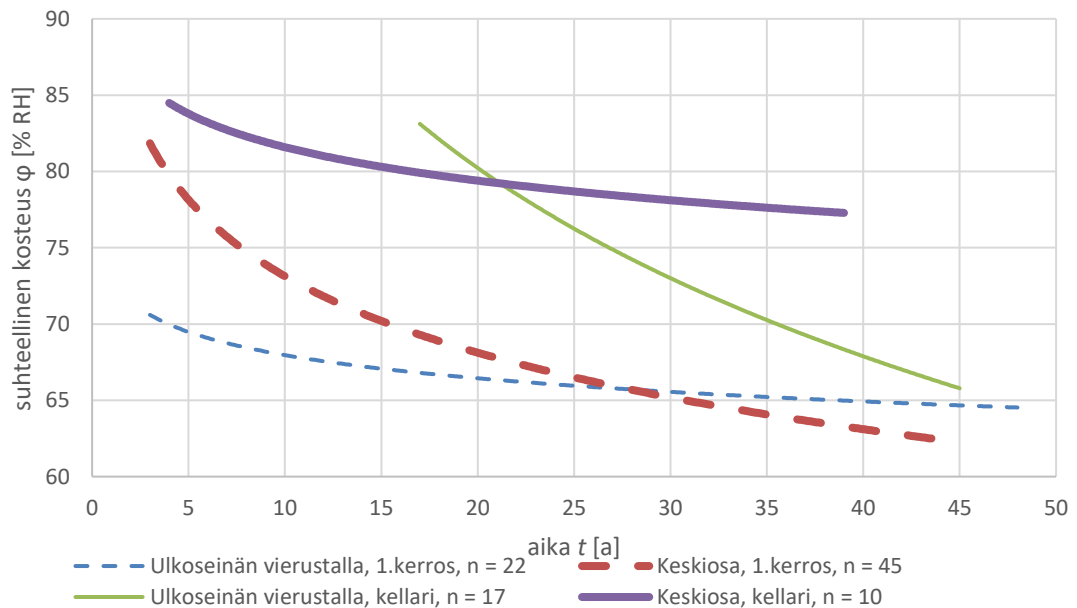
Kuva 8.6. Betonilaatan ja täyttökerroksen välisen lämpötilaeron vaikutus betonilaatan suhteelliseen kosteuteen eri lämmöneristekerroksen paksuuksilla ja pintarakenteella. Yhtenäinen viiva kuvaa vesihöyrytiivistä pintarakennetta ja katkoviiva vesihöyryvointia pintarakennetta.

Aineiston perusteella pintarakenteen ollessa vesihöyrytiivis, betonilaatan suhteellinen kosteus laskee keskimääräisesti betonilaatan ja täyttökerroksen välisen lämpötilaeron kasvaessa. Tämä ilmiö nähdään voimakkaimmin rakenteessa, jossa lämmöneristepaksuus on 50 mm. Ilmiö ei näy niin voimakkaasti lämmöneristekerroksen paksuuden kasvaessa. Tämän eroavuuden selittää osittain se, että kuvassa 8.6 ei oteta huomioon rakenteen ikää. Keskimäärin rakenteet, joissa lämmöneristekerrospaksuus on 50 mm tai 100 mm ovat huomattavasti vanhempia, jolloin rakenteessa on voinut poistua keskimäärin enemmän rakennusaikaista kosteutta, verrattuna uudempiin rakenteisiin.

Pintarakenteen ollessa vesihöyryvoin, betonilaatan suhteellinen kosteus ei laske lämpötilaeron kasvaessa, vaikka kirjallisuudessa esitetyn teorian mukaan näin tapahtuu. Osittain havaintoja selittää se, että suurin osa mittaustuloksista on tehty talvella, jolloin kylmä ulkoilma on viilentänyt täyttökerrosta kasvattaen rakenteen lämpötilaeroa. Lisäksi havainnon epävarmuutta lisää se, että rakenteen ikää ei ole otettu huomioon.

8.1.4 Ulkoilman vaikutus

Ulkoilman vaikutusta betonilaatan suhteelliseen kosteuteen tarkastellaan siten, että kosteusmittaustulokset on jaoteltu maanpäälliseen kerrokseen ja kellarikerrokseen sekä ulkoseinän vierustalla ja rakennuksen keskiosalla tehtyihin mittauksiin. Kuvassa 8.7 on tarkasteltu ulkoilman vaikutusta betonilaatan suhteelliseen kosteuteen vesihöyrytiivillä pintarakenteella.

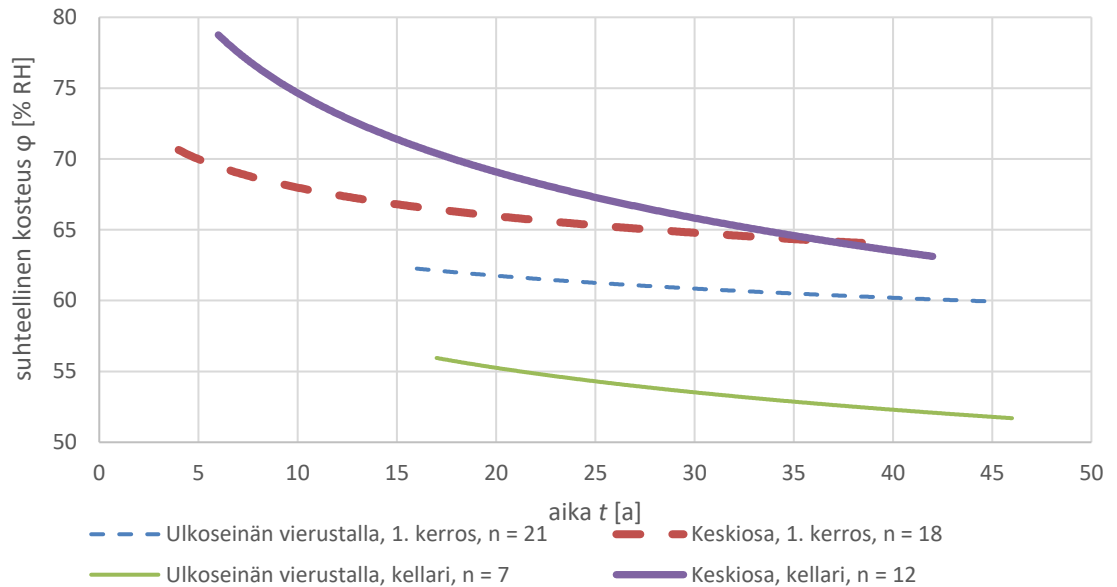


Kuva 8.7. Ulkoilman vaikutus betonilaatan suhteellisen kosteuteen riippuen rakenteen iästä vesihöyrytiivillä pintarakenteella.

Kuvasta 8.7 nähdään betonilaatan suhteellisen kosteuden olevan matalampi ja tasaantuvan nopeammin 1.kerroksessa. Lisäksi 1.kerroksen mittaustuloksista nähdään, että betonilaatan suhteellinen kosteus on keskimäärin alhaisempi ulkoseinän vierustalla, kuin keskellä rakennusta.

Kellarikerroksen suhteelliset kosteudet ovat selvästi korkeammat verrattuna 1. kerrokseen kaikissa tapauksissa. Ulkoseinän vierustan ja keskellä rakennusta sijaitsevien mittaustulosten välillä näkyy, että betonilaatan suhteellinen kosteus on keskimäärin alhaisempi ulkoseinän vierustalla. Kellarikerroksessa ulkoilman lämpötila ei vaikuta alapohjarakenteen kosteustekniseen toimintaan niin merkittävästi kuin 1.kerroksessa. Ulkoseinäliittymien läheisyydessä konvektiovirtaukset täyttökerroksesta sisäilmaan voivat alentaa täyttökerroksen kosteuspitoisuutta sekä nostaa täyttökerroksen ja betonilaatan välistä lämpötilaeroa. Tällöin betonilaattaan kohdistuva kosteusrasitus on pienempää, mikä voisi selittää osittain betonilaatan alhaiset suhteellisen kosteuden lukemat ulkoseinän vierustalla kuvissa 8.7 ja 8.8.

Kuvassa 8.8 on tarkasteltu ulkolämpötilan vaikutusta betonilaatan suhteelliseen kosteuteen pintarakenteen ollessa vesihöyryavoin. Kuvissa 8.7 ja 8.8 nähdään, että betonilaatan suhteelliset kosteudet painottuvat alemmalle tasolle pintarakenteen ollessa vesihöyryavoin myös kellarissa.



Kuva 8.8. Sijainnin ja kerroksen vaikutus vesihöyryavoimen lattiapäällysteen omaavan betonilaatan suhteellisen kosteuteen ajan funktiona.

Kuvassa 8.8 nähdään, että betonilaatan suhteellinen kosteus on keskimäärin alhaisempi ulkoseinän vierustalla verrattuna rakennuksen keskustaankin sekä 1.-, että kellarikerroksessa.

Lisäksi 1. kerroksessa betonilaatan suhteellinen kosteus on keskimäärin alhaisemmalla tasolla kellarikerrokseen verrattuna, lukuun ottamatta kellarikerroksen mittaustuloksia ulkoseinän vierustalla. Kellarikerroksessa ulkoseinän vierustalla suhteellinen kosteus on aineistossa huomattavasti alhaisemmalla tasolla. Osittain tämän selittää se, että yksittäisissä mittaustuloksissa betonilaatan suhteellinen kosteus oli 40 % RH. Nämä yksittäiset mittaustulokset laskevat otoksen keskimääräistä arvoa vähäisen otosmäärän johdosta.

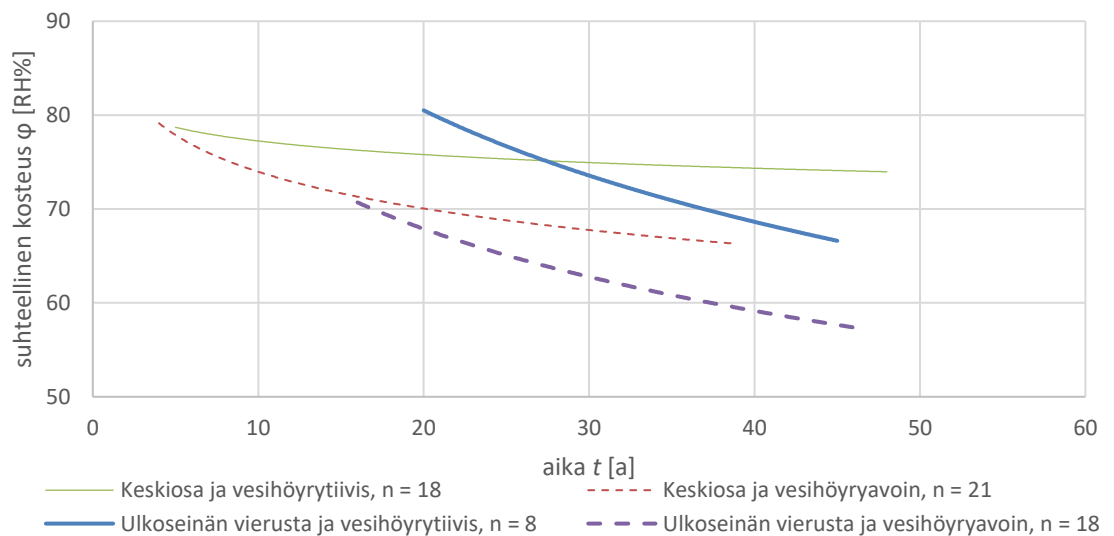
Täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuuksia vertailemalla 1.- ja kellarikerroksen välillä nähdään, että kellarikerroksessa vesihöyrypitoisuus on keskimäärin suurempi, kuin 1. kerroksessa lukuun ottamatta kellarikerroksen ulkoseinän vierustan mittaustuloksia, jossa vesihöyrypitoisuus on kaikista pienin. Tämän tuloksen selittää osittain pieni

otosmäärä, jolloin yksittäisten mittaustulosten merkitys tulokseen on merkittävä. Aineistossa havaittiin yksittäisiä mittaustuloksia, joissa täyttökerroksen vesihöyrypitoisuus on alle 5 g/m^3 kellarikerroksessa ulkoseinän vierustalla. Lisäksi on mahdollista, että lattiaseinäliittymän ilmavirtaukset täyttökerroksesta sisäilmaan voivat vähentää täyttökerroksen vesihöyrypitoisuutta ulkoseinien vierustoilla. (Taulukko 8.2)

Taulukko 8.2. Täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuudet μ [g/m^3] 1.- ja kellarikerroksessa.

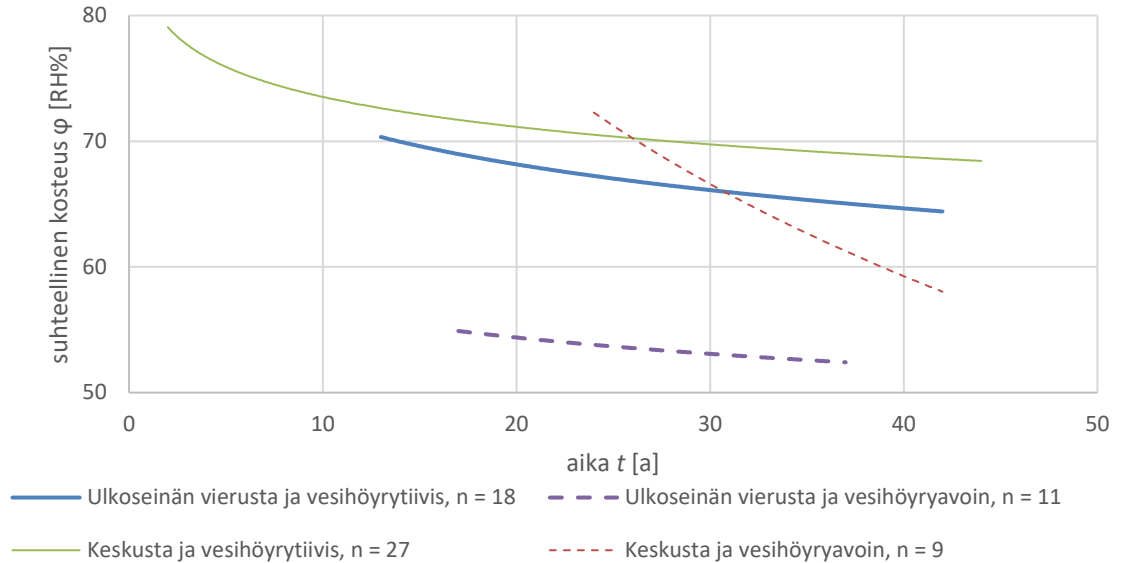
		μ [g/m^3]	Otosmäärä n
1. kerros	Rakennuksen keskusta	13,0	39
	Ulkoseinän vierusta	11,8	32
Kellari	Rakennuksen keskusta	13,6	26
	Ulkoseinän vierusta	10,6	20

Kuvissa 8.9 ja 8.10 tarkastellaan ulkoilman vaikutusta betonilaatan suhteelliseen kosteuteen lämmöneristepaksuuden ollessa 50 mm (Kuva 8.9) sekä 100 mm (Kuva 8.10)



Kuva 8.9 Ulkoilman ja päällystemateriaalin vaikutus betonilaatan suhteellisen kosteuden ajan funktiona lämmöneristepaksuuden ollessa 50 mm.

Lämmöneristepaksuuden ollessa 50 mm huomataan, että ulkoseinän vierustalla betonilaatan suhteellisen kosteuden tasaantumisnopeus on nopeampi verrattuna rakennuksen keskustan betonilaatan suhteelliseen kosteuteen sekä vesihöyrytiivillä, että -avoimilla pintarakenteilla. Lisäksi keskimäärin betonilaatan suhteellinen kosteus on alhaisempi ulkoseinän vierustalla verrattuna betonilaattaan rakennuksen keskiosissa (Kuva 8.9)



Kuva 8.10. *Ulkoseinän läheisyyden ja päällystemateriaalin vaikutus suhteellisen kosteuden ajan funktiona lämmöneristepaksuuden ollessa 100 mm.*

Mittaustulosten perusteella nähdään, että 100 mm lämmöneristepaksuudella betonilaatan suhteellinen kosteus tasaantuu matalammalle tasolle verrattuna betonilaataan, jonka alapuolella lämmöneristepaksuus on 50 mm riippumatta ulkoilman vaikutuksesta tai pintarakenteen vesihöyrynvastuksesta.

Kuvassa 8.10 huomataan myös se, että ulkoseinän vierustalla betonilaatan suhteellinen kosteus on alhaisempi rakennuksen keskiosaan nähden riippumatta pintarakenteen vesihöyrynvastuksesta. Vesihöyryavoimella pintarakenteella betonilaatan suhteellisessa kosteudessa on suurempi ero ulkoseinän vierustan ja rakennuksen keskiosan välillä verrattuna vesihöyrytiiviseen päällystemateriaaliin.

Ulkoseinän vierustalla täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuus on keskimäärin alhaisempi, kuin rakennuksen keskiosassa (Taulukko 8.3.). Lämmöneristekerrospaksuuden ollessa yli 140 mm, täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuus on aineiston perusteella samalla tasolla sekä ulkoseinän vierustalla, että rakennuksen keskiosassa. Tämä selittyy osittain siksi, että ulkoseinän vierustan mittaustulokset ovat pääosin mitattu syksyllä, jolloin täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuudet ovat suurimmillaan.

Taulukko 8.3. Ulkolämpötilan vaikutus täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuus eri lämmöneristekerrospaksuuksilla.

Lämmöneristepaksuus <i>b</i> [mm]		μ [g/m ³]	Otosmäärä <i>n</i>
50	Rakennuksen keskiosa	13,96	33
	Ulkoseinän vierusta	11,17	20
100	Rakennuksen keskiosa	12,84	23
	Ulkoseinän vierusta	11,015	20
>140 mm	Rakennuksen keskiosa	12,44	6
	Ulkoseinän vierusta	12,62	9

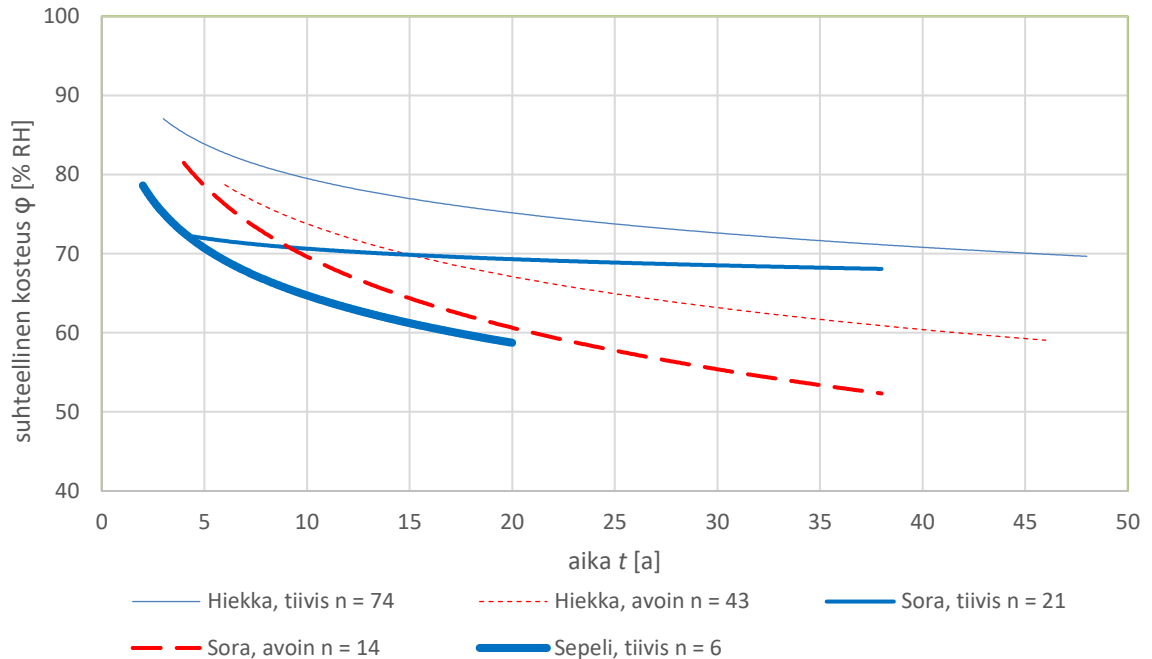
Taulukossa 8.4 nähdään, että vuodenajalla ja sitä kautta ulkoilman lämpötilalla on vaikutus täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuuteen ulkoseinän vierustalla. Ulkoseinän vierustalla täyttökerroksen vesihöyrypitoisuus on alhaisin talvella mitatuissa tuloksissa. Kesällä ja syksyllä vesihöyrypitoisuudet ovat suurimmillaan. Rakennuksen keskiosalla täyttökerroksen vesihöyrypitoisuudet ovat samalla tasolla ympäri vuoden riippumatta vuodenajasta.

Taulukko 8.4. Ulkoilman vaikutus täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuuteen μ [g/m³] eri vuodenaikoina tarkasteltuna.

Vuodenaika		μ [g/m ³]	Otosmäärä <i>n</i>
Talvi	Rakennuksen keskiosa	12,9	17
	Ulkoseinän vierusta	9,96	10
Kevät	Rakennuksen keskiosa	12,325	8
	Ulkoseinän vierusta	11,233	6
Kesä	Rakennuksen keskiosa	13,63	9
	Ulkoseinän vierusta	12,928	5
Syksy	Rakennuksen keskiosa	13,45	15
	Ulkoseinän vierusta	13,713	10

8.1.5 Maanvastaisen alapohjarakenteen täyttökerroksen vaikutus

Kuvassa 8.11 esitetään betonilaatan suhteellinen kosteus tasaantumisaian funktiona eri täyttömateriaaleille; hiekalla, soralla ja sepelillä. Vesihöyryvoimella pintarakenteella ja sepelitäytöllä olevia alapohjarakenteita ei ollut aineistossa saatavilla.



Kuva 8.11. Maanvastaisen alapohjarakenteen täyttömateriaalin vaikutus betonilaatan suhteelliseen kosteuteen vesihöyryvoimella ja -tiivillä pintarakenteella.

Kuvassa 8.11 nähdään betonilaatan suhteellisen kosteuden olevan korkeampi täyttömateriaalin ollessa hienorakeinen hiekka riippumatta pintamateriaalin vesihöyrynvastuksesta. Täyttökerroksen ollessa karkearakeinen sepeli, betonilaatan suhteellinen kosteus tasaantuu huomattavasti alhaisemmalle tasolle verrattuna hienorakeisempiin materiaaleihin. Tähän vaikuttaa osittain myös se, että sepeliä käytettäessä myös lämmöneristekerrospaksuudet ovat suuremmat verrattuna rakenteisiin, ja vastaavasti hiekkaa käytettäessä lämmöneristepaksuudet ovat pienemmät.

Täyttökerroksen ollessa sora ja päällystemateriaalin vesihöyrytiivis nähdään, että kosteuspitoisuus pysyy samalla tasolla riippumatta rakenteen iästä. Tämä selittyy osittain sillä, että aineistossa on mittaustuloksia, joissa betonilaatan suhteellinen kosteus on varsin alhainen alhaisesta rakenteen iästä riippumatta.

Täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuuksissa nähdään eroavuuksia täyttömateriaalista riippuen. Tuloksista nähdään, että vesihöyrypitoisuus on suurimmillaan täyttömateriaalin ollessa hiekka ja pienimmillään täyttömateriaalin ollessa sepeli (Taulukko 8.5). Tulosten analysointia vaikeuttaa pieni otosmäärä erityisesti sora- ja sepelitäyttökerroksilla.

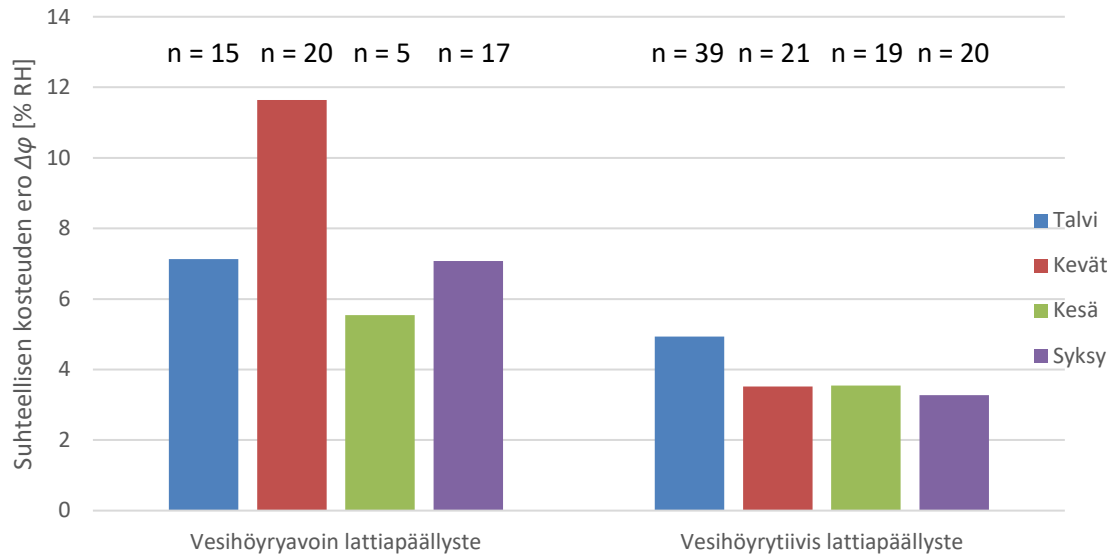
Taulukko 8.5. Täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuus μ [g/m³] eri maalajeilla rakennuksen keskiosassa.

Täyttömateriaali	μ [g/m ³]	Otosmäärä <i>n</i>
Hiekka	13,6	47
Sora	12,8	13
Sepeli	11,7	5

8.1.6 Sisäilman vesihöyrypitoisuuden vaikutus betonilaatan kosteusjakaumaan

Sisäilman vaikutusta betonilaatan suhteelliseen kosteuteen sekä sen jakaumaan tarkasteltiin jakamalla aineisto mittaushetken perusteella vuodenaikoihin. Aineiston jakaminen vuodenaikoihin perustuu siihen, että sisäilman vesihöyrypitoisuus on hyvin riippuvainen ulkoilman vesihöyrypitoisuudesta.

Mittaustuloksista tarkasteltiin sitä, kuinka iso erotus betonilaatan ylä- ja alapinnan suhteellisen kosteuden arvoilla on ja sitä kautta arvioitiin kuinka paljon betonilaatalla on potentiaalia kuivua sisäilmaan päin (Kuva 8.12).



Kuva 8.12 Eri vuodenaikojen vaikutus betonilaatan kosteusjakaumaan. $\Delta\phi$ on määritetty betonilaatan ylä- ja alapinnan suhteellisen kosteuden välisenä erotuksena.

Käytettävissä olevassa aineistossa betonilaatan kosteusjakauma on suurimmillaan keväisin, kun pintarakenteena on vesihöyryvoin päällystemateriaali. Keväisin betonilaatan ylä- ja alapinnan välinen suhteellisen kosteuden ero on keskimäärin 12 % RH-yksikköä. Muina vuodenaikoina ero on keskimäärin 6–7 % RH-yksikköä.

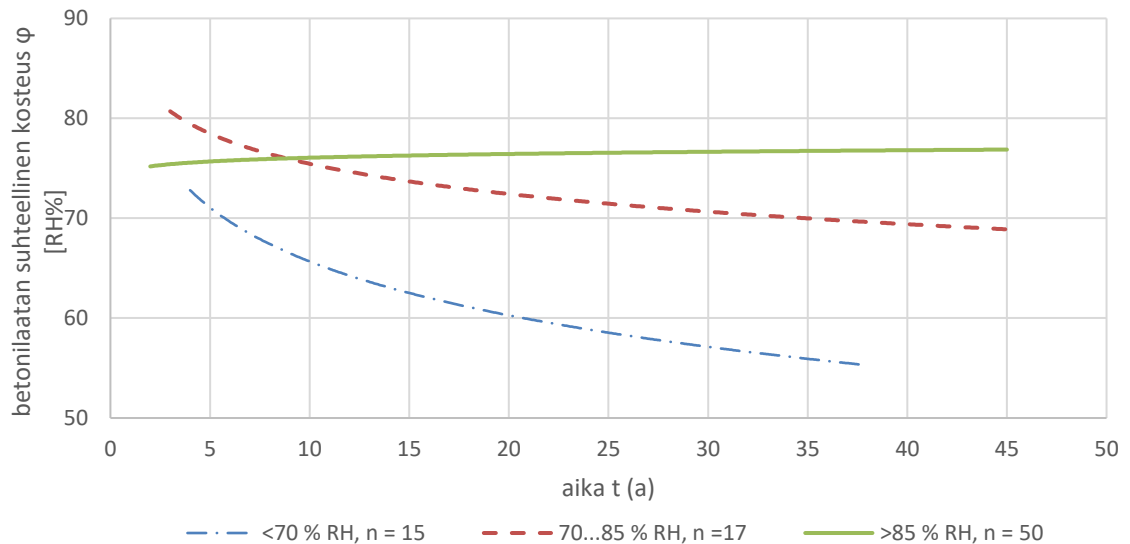
Kevään mittaustuloksista havaittu suuri kosteusjakauma selittyy suurimmaksi osaksi sillä, että betonilaatan yläpinta on pystynyt luovuttamaan kosteutta diffuusiolla sisäilmaan, sisäilman vesihöyrypitoisuuden ollessa alhainen talvikuukausina. Vuodenaajoista kesällä ja syksyllä sisäilman vesihöyrypitoisuus on keskimäärin suurempi, jolloin betonilaatta ei kykene luovuttamaan niin paljoa kosteutta yläpinnasta sisäilmaan. Tällöin betonilaatan ylä- ja alapinnan suhteellisten kosteuksien ero ei pääse muodostumaan niin suureksi. Lisäksi talvella mitattujen betonilaatan ylä- ja alapinnan suhteellisten kosteuksien ero on pienempi, kuin keväällä. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että betonilaatan olosuhteiden kestää muuttua, kun siirrytään syksystä talveen, jonka johdosta talvella suhteellisen kosteuden ero on oletettua pienempi. Epävarmuutta aineiston tarkasteluun aiheuttaa pieni otanta, jolloin yhden mittaustuloksen merkitys kasvaa kohtuuttoman suureksi, mikä aiheuttaa epävarmuutta analysointiin.

Vesihöyrytiivillä pintarakenteella betonilaatan suhteellisen kosteuden ero ylä- ja alapinnan välillä on keskimäärin 4 % RH-yksikköä ympärivuoden. Vesihöyrytiivis pintarakenne estää betonilaattaa luovuttamasta kosteutta sisäilmaan diffuusiolla, jolloin betonilaatan yläpinnan suhteellinen kosteus tasaantuu lähelle alapinnan suhteellista kosteutta.

Kuvan 8.12 tuloksien tulkinnassa aiheuttaa epävarmuutta se, että mittaustuloksissa ei ole otettu huomioon eri tilojen käyttötarkoitusten aiheuttamaa kosteuslisää, kuten märkätiloja tai muita käyttötiloja, joissa sisäilman kosteuslisä on suurempi verrattuna esimerkiksi varastotiloihin.

8.1.7 Täyttökerroksen huokosilman suhteellisen kosteuden vaikutus

Täyttökerroksen huokosilman suhteellisen kosteuden vaikutusta maanvastaisen alapohjarakenteen kosteustekniseen toimintaan arvioitiin jakamalla mittaustulokset täyttökerroksen huokosilman suhteellisen kosteuden mukaan ja vertaamalla niitä toisiinsa. Kaikki mittaustulokset ovat rakenteista, joissa päällystemateriaali on vesihöyrytiivis. (Kuva 8.13)



Kuva 8.13. Täyttökerroksen huokosilman suhteellisen kosteuden vaikutus betonilaatan suhteelliseen kosteuteen.

Täyttökerroksen huokosilman suhteellisen kosteuden ollessa korkea (>85 % RH) betonilaatan suhteellinen kosteus tasaantuu keskimäärin 75 % RH tasolle pitkällä aikavälillä. Kuitenkin merkittävässä osassa mittaustuloksista, betonilaattojen suhteelliset kosteudet ovat yli 85 % RH, jota pidetään lattiapäällysteiden vaurioitumisen kannalta kriittisenä kosteuspitoisuutena.

Kuvasta 8.13 nähdään, että täyttökerroksen huokosilman suhteellinen kosteus vaikuttaa merkittävästi betonilaatan suhteelliseen kosteuteen. Täyttökerroksesta kohdistuvan kosteusrasituksen ollessa pieni, betonilaatan kosteuspitoisuus tasaantuu alle 20 vuodessa

hyvin matalalle. Yksittäisissä mittaustuloksissa betonilaatan suhteellinen kosteus oli tasaantunut alle 50 % RH alle 20 vuoden ikäisessä rakenteessa.

Täyttökerroksen alhaisen huokosilman suhteellisen kosteuden mahdollistavat 2000-luvulla yleistyneet sepeletäytöt ja niihin asennettavat tuuletusjärjestelmät. Näiden tekijöiden vaikutuksesta täyttökerroksen olosuhteet pysyvät betonilaatan kuivumisen kannalta otollisena ja kosteusrasitus maapohjasta betonilaattaa kohdin on hyvin vähäinen tai jopa olematon. Tämä ilmiö on myös todettu kenttämittauksissa (Kettunen 2004). Tällöin vesihöyryavoimella ja -tiivillä pintarakenteella betonilaatta toimii kahteen suuntaan kuivuvana betonirakenteena, jolloin betonilaatan suhteellinen kosteus tasaantuu pitkällä aikavälillä täyttökerroksen suhteellisen kosteuden tasolle.

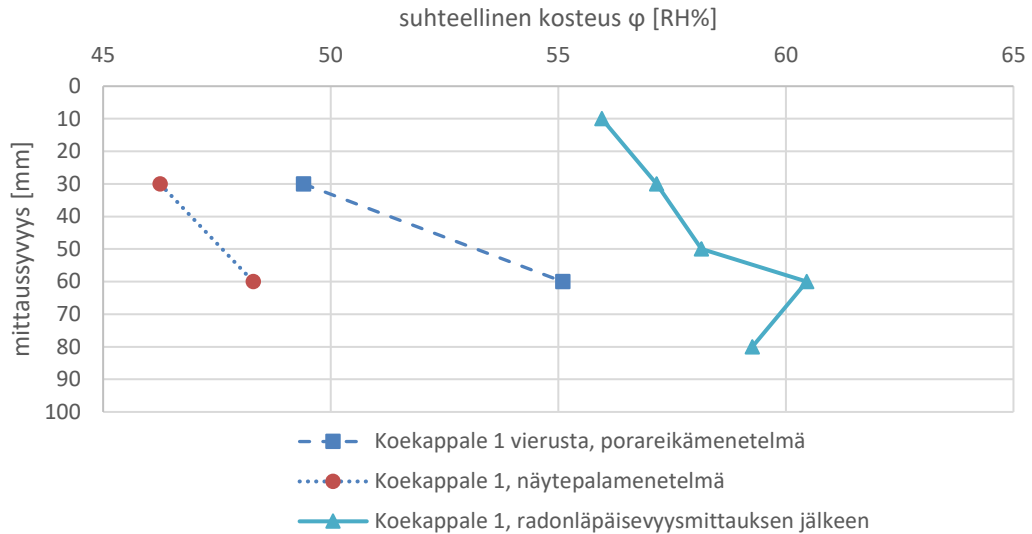
Käytettävässä olevan aineiston perusteella voidaan myös todeta, että yleinen olettaus, että täyttökerroksen suhteellinen kosteus on aina lähellä 100 % RH ei aina pidä paikkaansa, erityisesti uudemmissa alapohjarakenteissa.

8.2 Maanvastaisen betonilaatan radonläpäisevyys

Tässä luvussa esitetään maanvastaisesta betonilaatasta irrotetuille koekappaleille määritetyt suhteelliset kosteudet, puristuslujuudet, ohuthieanalyysien tulokset, betonin oma radontuotto sekä radonin diffuusiokertoimet.

8.2.1 Koekappaleiden kosteusjakaumat

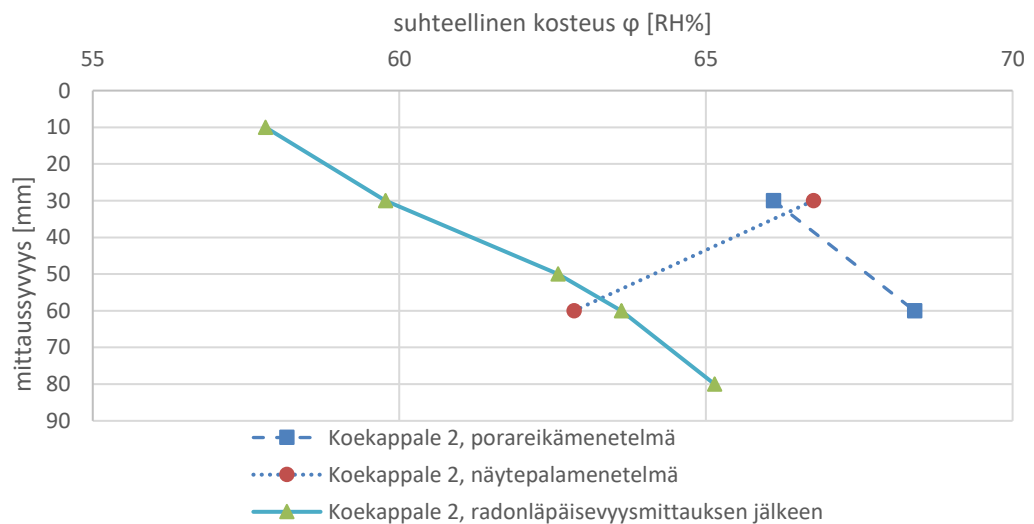
Koekappaleet 1 ja 2 on irrotettu samasta tilasta noin 2,5 metrin etäisyydeltä toisistaan, joiden paksuus oli noin 100 mm. Koekappaleet 3 ja 4 on irrotettu samasta tilasta noin 0,5 metrin etäisyydeltä toisistaan, joiden paksuus oli noin 55 mm. Koekappaleiden vierestä mitattiin betonilaatan kosteusjakauma porareikämenetelmällä kahdelta eri mittausyvyydeltä. Tilasta, josta koekappaleet 3 ja 4 irrotettiin, mitattiin betonilaatan suhteellisen kosteuden jakauma yhdestä mittapistestä; koekappaleiden 3 ja 4 välistä. Kuvissa 8.14, 8.15 ja 8.16 on esitetty betonilaatan suhteellisen kosteuden jakaumat irrotettujen koekappaleiden vierestä sekä irrotuksen yhteydessä koekappaleen leikkauspinnasta ja koekappaleiden kosteusjakaumat radonläpäisevyysmittausten jälkeen. Koekappaleiden kosteusjakaumat radonläpäisevyysmittausten jälkeen on esitetty koekappaleen reunan ja keskiosan mittauksen keskiarvona, koska mittaustuloksissa ei havaittu eroavaisuuksia koekappaleen reunan ja keskiosan suhteellisten kosteuksien välillä. Koekappaleille tehtyjen kosteusmittausten kosteusmittauspöytäkirjat on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 3.



Kuva 8.14. Koekappaleen 1 suhteellinen kosteuden jakauma radonläpäisevyyskokeen jälkeen, sekä betonilaatan suhteellinen kosteus koekappaleen 1 vierestä sekä näytepalamenetelmällä leikkauspinnasta.

Koekappaleen 1 suhteellinen kosteus mitattiin noin 1,5 kuukautta radonläpäisevyysmittausten jälkeen. Koekappaleen suhteellisen kosteuden mittaus myöhästyi diplomityön yhteydessä tehtyjen materiaalien radonläpäisevyyskokeiden vuoksi.

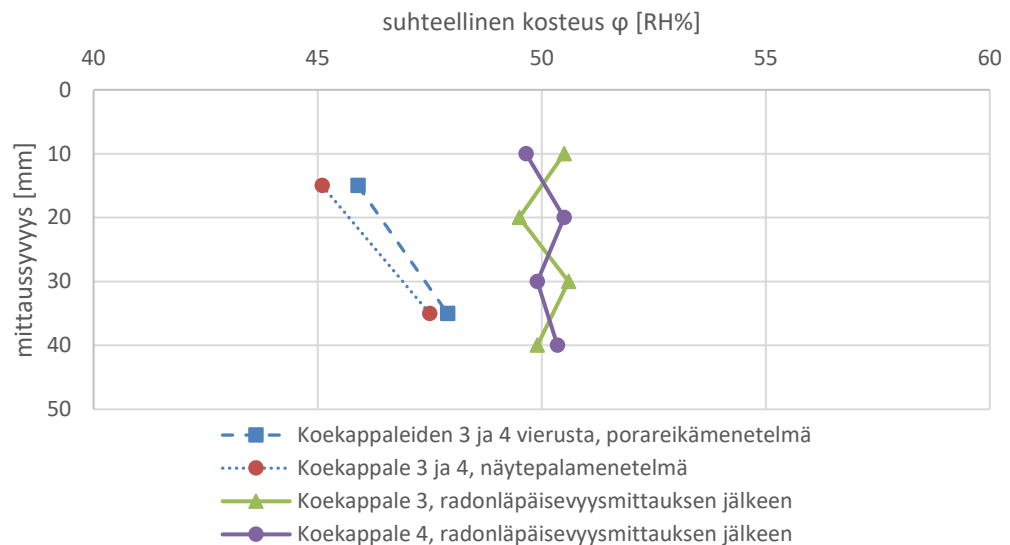
Kosteusmittausten perusteella koekappaleen suhteellinen kosteus on hieman korkeampi radonläpäisevyysmittauksen jälkeen tehdyissä kosteusmittauksissa verrattuna koekappaleen vierustalle ja leikkauspintaan tehtyihin kosteusmittauksiin. (Kuva 8.14)



Kuva 8.15. Koekappaleen 2 suhteellinen kosteus radonläpäisevyyskokeen jälkeen, sekä betonilaatan suhteellinen kosteus koekappaleen 2 vierestä sekä leikkauspinnasta.

Koekappaleen 2 kosteuspitoisuus mitattiin noin 1,5 kuukautta radonläpäisevyysmittausten jälkeen. Koekappaleen kosteuspitoisuuden mittaus myöhästyi diplomityön yhteydessä tehtyjen materiaalien radonläpäisevyyskokeiden vuoksi.

Kosteusmittausten perusteella koekappaleen kosteuspitoisuus on hieman matalampi radonläpäisevyysmittauksen jälkeen tehdyissä kosteusmittauksissa verrattuna koekappaleen vierustalle ja leikkauspintaan tehtyihin kosteusmittauksiin. (Kuva 8.15)



Kuva 8.16 Koekappaleiden 3 ja 4 suhteellisen kosteudet radonläpäisevyyskokeen jälkeen, sekä betonilaatan suhteellinen kosteus koekappaleen 3 ja 4 vierestä sekä leikkauspinnasta.

Koekappaleiden 3 ja 4 suhteelliset kosteudet mitattiin yksi viikko radonläpäisevyysmittausten jälkeen. Kosteusmittausten perusteella koekappaleen suhteellinen kosteus on hieman korkeampi radonläpäisevyysmittauksen jälkeen tehdyissä kosteusmittauksissa verrattuna koekappaleen vierustalle ja leikkauspintaan tehtyihin kosteusmittauksiin (Kuva 8.16). Mittaustulosten perusteella koekappaleiden 3 ja 4 suhteellinen kosteus on tasaantunut mittaushuoneen suhteelliseen kosteuteen.

8.2.2 Koekappaleiden puristuslujuudet

Koekappaleiden puristuslujuus määritettiin standardin ”SFS-EN 12504-1 Betonin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut koekappaleet. Näytteenotto, tutkiminen ja puristuslujuuden testaus mukaisesti”. Yhdestä koekappaleesta otettiin timanttiporaamalla kolme lieriönäytettä, joiden puristuslujuus testattiin Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratoriossa. Lieriönäytteet olivat halkaisijaltaan 50 mm. Koekappaleiden suorakulmaisuus ei täyttänyt

standardin vaatimuksia. Puristuslujuuskokeen tulokset on esitetty taulukossa 8.6 ja analyysivastaukset on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 8.6. Koekappaleiden puristuslujuudet kolmella eri mittauskerralla (σ_1 , σ_2 ja σ_3) ja niiden perusteella määritetyt keskiarvot (σ_{ka}).

	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ_3 [MPa]	σ_{ka} [MPa]
Koekappale 1	46,2*	44,8	51,0	47,3
Koekappale 2	53,2	53,9	55,8	54,3
Koekappale 3	46,0	43,7	44,3	44,7
Koekappale 4	42,6	44,6	41,2	42,8

Puristuslujuustuloksissa on hieman hajontaa koekappaleen eri mittaustulosten välillä, joka on tyypillistä työmaalla tiivistetylle betonille. Lisäksi on tyypillistä, että epähomogeenisen materiaalin huokosrakenteessa on isoa vaihtelua aiheuttaen hajontaa puristuslujuuskokeiden tuloksiin. Koekappaleen 1. ensimmäisen mittauksen poralieriön halkaisija ei täyttänyt standardia suurimman kiviainesrakeen suhteen.

8.2.3 Koekappaleiden huokoisuus

Ohuthietutkimuksen perusteella koekappaleen 1 betoni on rakenteeltaan hieman epähomogeenista johtuen vesi-sideainesuhteen (v/s) vaihtelusta. Yläpinnassa v/s on korkea ja syvemmällä v/s on pienempi. Betonin sideaineena on hienorakeista portlandsementtiä, jossa on seosaineena vähän kalkkikiveä ja masuunikuonaa. Sementtikiven määrä on tavanomainen. Betoni on huokostamatonta ja pienikokoisia tiivistyshuokosia on kohtalaisesti.

Koekappaleen 2 betoni on rakenteeltaan melko homogeenista. Sideaineena on hienorakeista portlandsementtiä, jossa seosaineena on vähän kalkkikiveä ja masuunikuonaa. Betoni on huokostamatonta ja pienikokoisia tiivistyshuokosia on kohtalaisesti. Ohuthieanalyysin perusteella koekappaleen 2 vesi-sideainesuhde on alhaisempi. Tällöin betonin huokoisuus on koekappaleessa 2 pienempi verrattuna koekappaleeseen 1.

Koekappaleen 3 ja 4 betoni on hieman epähomogeenista johtuen vesi-sideaineensuhteen vaihtelusta ja paikoitellen todetusta veden erottumisesta. Sideaineena on hienorakeista portlandsementtiä, jossa on seosaineena vähän kalkkikiveä ja masuunikuonaa. Sementin hydrataatioaste on melko korkea. Betoni on huokostamatonta ja pienikokoisia tiivistyshuokosia on kohtalaisesti. Ohuthieanalyysin perusteella koekappaleessa 4 on

enemmän ilmahuokosia verrattuna koekappaleeseen 3. Kokonaisuudessaan koekappaleiden ohuthieanalyysiraportit on esitetty liitteessä 1.

Koekappaleiden kapillaarihuokosten määrää arvioitiin märkä-kuivapunnitusmenetelmällä, jonka tulokset on esitetty taulukossa 8.7 ja liitteessä 7.

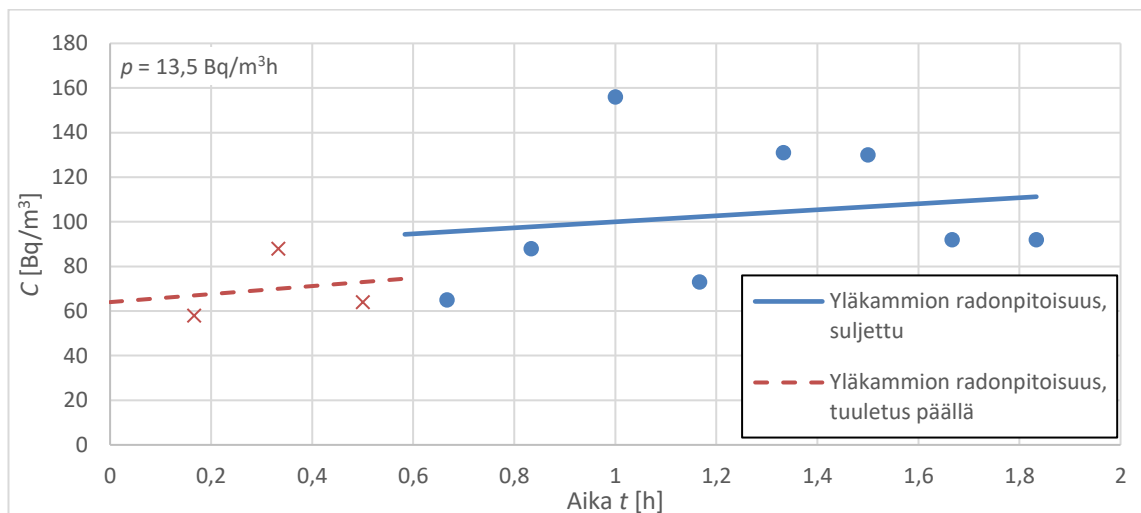
Taulukko 8.7. Koekappaleiden kapillaarihuokoisuus ϵ märkä-kuivapunnitusmenetelmällä määritettynä.

	Koekappale 1	Koekappale 2	Koekappale 3	Koekappale 4
ϵ	0,153	0,147	0,152	0,15

Koekappaleiden kapillaarihuokoisuus vastaa melko hyvin ohuthieanalyysissä tehtyjä havaintoja. Koekappaleen 2 kapillaarihuokoisuus on kaikista pienin, mikä havaittiin myös ohuthieanalyysissä sekä puristuslujuuskokeessa. Vastaavasti koekappaleen 1 kapillaarihuokoisuus eroaa hieman puristuslujuuskokeessa tehtyihin havaintoihin, mikä johtuu todennäköisesti betonin epähomogeenisesta huokosrakenteesta. Koekappaleiden 3 ja 4 kapillaarihuokosten määrä vastaa hyvin puristuslujuuskokeesta saatuja tuloksia ja ohuthieanalyysissä tehtyjä havaintoja.

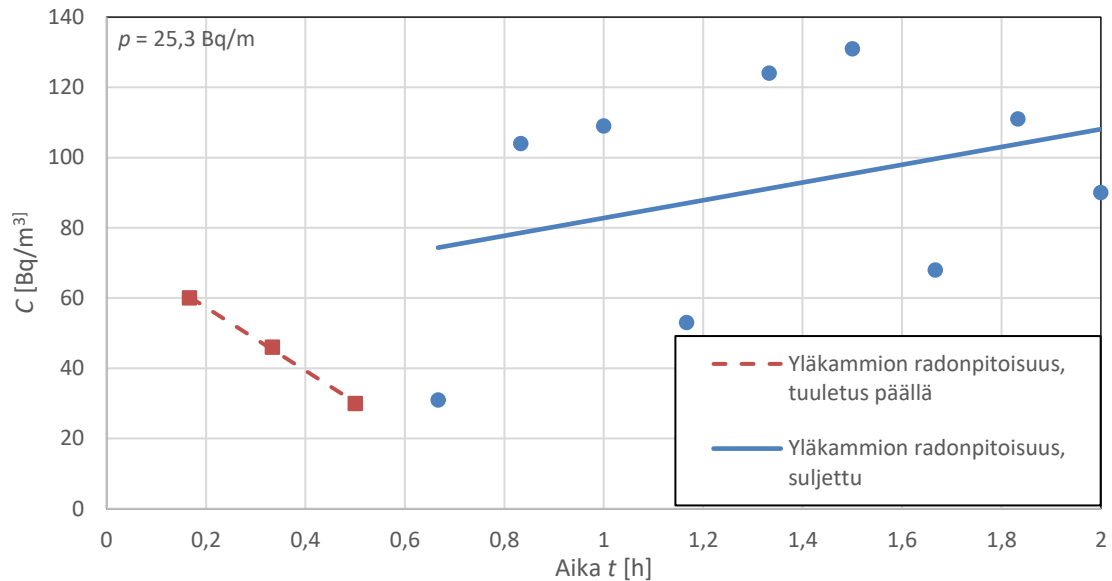
8.2.4 Koekappaleiden oma radontuotto

Koekappaleiden 1 ja 2 betonin oma radontuotto yläkammiossa on esitetty kuvassa 8.17 sekä koekappaleiden 3 ja 4 betonin oma radontuotto on esitetty kuvassa 8.18



Kuva 8.17. Koekappaleen 1 betonin oma radontuotto.

Koekappaleiden 1 ja 2 oma radontuotto on keskimäärin $13,5 \text{ Bq/m}^3\text{h}$ suoritettujen mittauksen perusteella.



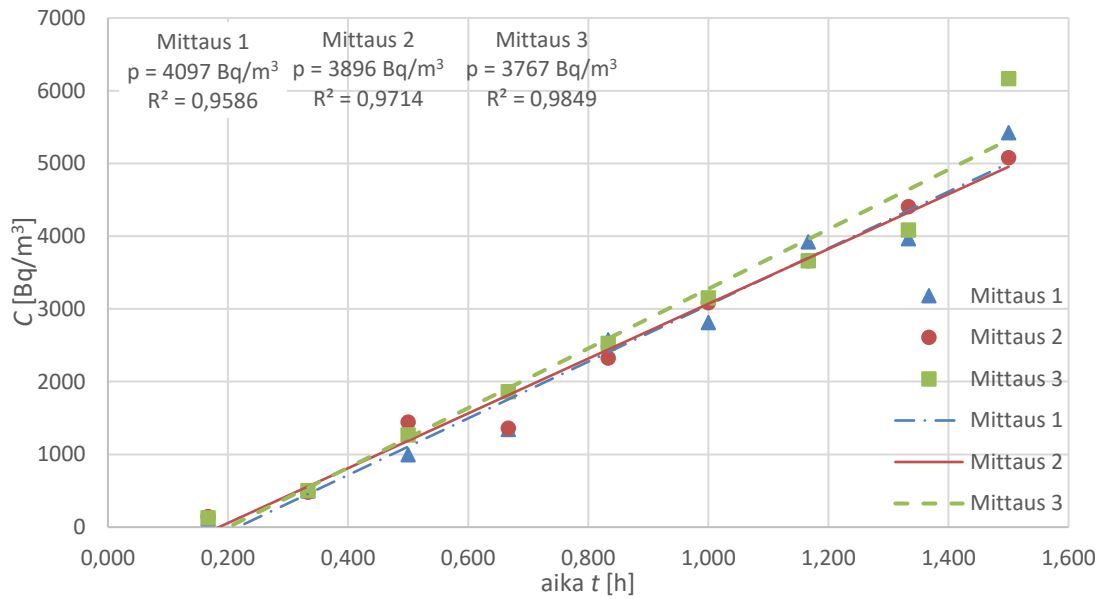
Kuva 8.18. Koekappaleen 4 betonin oma radontuotto

Koekappaleiden 3 ja 4 betonin oma radontuotto p on keskimäärin $25,3 \text{ Bq/m}^3\text{h}$ suoritettun mittauksen perusteella.

Koekappaleen oma radontuoton mittaus on suuntaa antava mittaus. Mittausten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että koekappaleen oma radontuotto on vähäistä, eikä se vaikuta diffuusiokerroimen mittaustarkkuuteen laboratoriomittauksissa.

8.2.5 Koekappaleiden diffuusiokerroin

Kuvissa 8.19–8.22 on esitetty yläkammion radonpitoisuus ajan funktiona yläkammion ilmatilan ollessa suljettuna. Mittaus suoritettiin jokaiselle koekappaleelle kolme kertaa. Mittaustulosten perusteella määritettiin yläkammiossa tapahtuva radonpitoisuuden nousunopeus. Kaavojen 7.1–7.3 avulla määritettiin betonille tehokas diffuusiokerroin D_e . Mittausten aikana laboratoriotilan sisäilman radonpitoisuus oli keskimäärin $100\text{--}200 \text{ Bq/m}^3$.



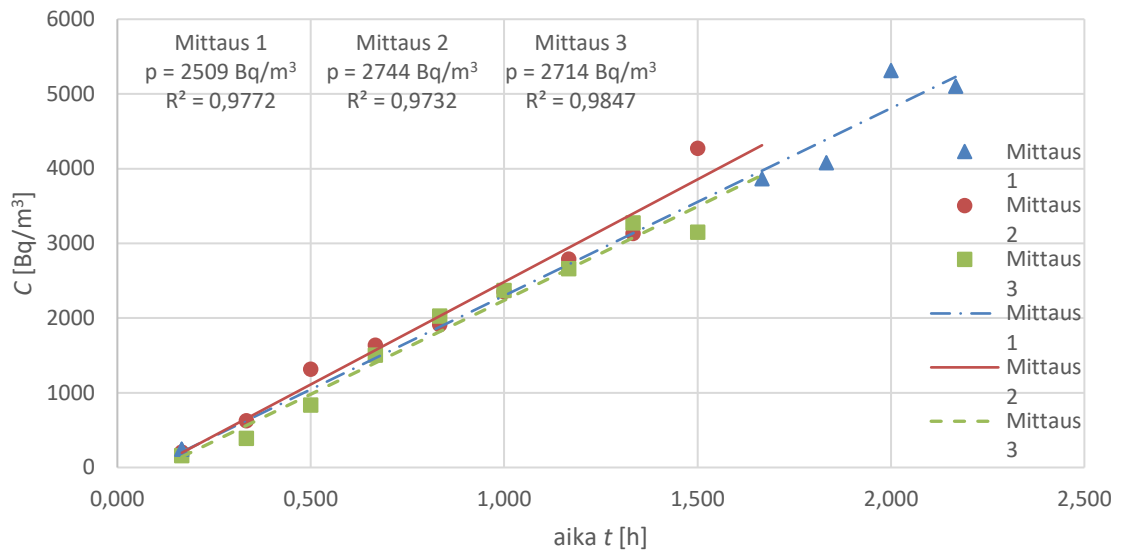
Kuva 8.19. Koekappaleen 1. yläkammion radonpitoisuus ajan funktiona kolmella eri mittauskerralla. Mittauskerroille on määritetty radonpitoisuuden muutoksen nousukulma p ja korrelaatiokerroin R^2 .

Taulukossa 8.8. esitetään koekappaleelle 1 määritetyt diffuusiokerroimet kolmella eri mittauskerralla ja niiden keskiarvo.

Taulukko 8.8. Koekappaleelle 1. määritetyt diffuusiokerroimet ja niiden keskiarvo.

Koekappale ja mittauskerta	Diffuusiokerroin [$\times 10^{-5}$ m ² /h]
1.1	9.93
1.2	9.61
1.3	10,3
Keskiarvo	9.93

Kuvassa 8.20 esitetään yläkammion radonpitoisuus ajan funktiona koekappaleelle 2 suoritettujen mittausten perusteella.



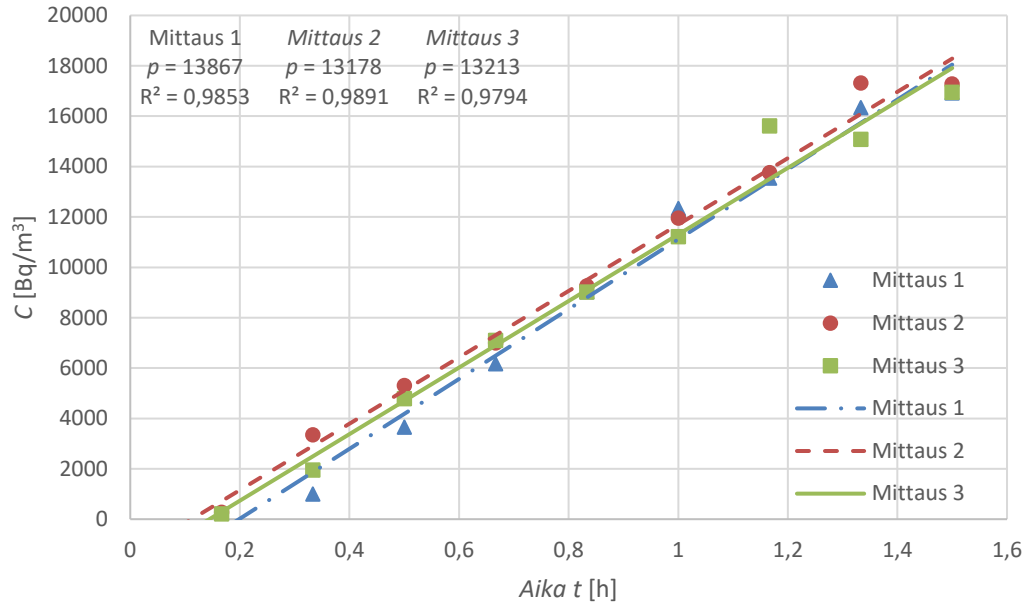
Kuva 8.20. Koekappaleen 2. yläkammion radonpitoisuus ajan funktiona kolmella eri mittauskerralla. Mittauskerroille on määritetty radonpitoisuuden muutoksen nousukulma ρ ja korrelaatiokerroin R^2

Taulukossa 8.9. esitetään koekappaleelle 2 määritetyt diffuusiokerroimet kolmella eri mittauskerralla ja niiden keskiarvo.

Taulukko 8.9. Koekappaleelle 2. määritetyt diffuusiokerroimet ja niiden keskiarvo.

Koekappale ja mittauskerta	Diffuusiokerroin [$\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{h}$]
2.1	3,41
2.2	3,66
2.3	3,69
Keskiarvo	3,60

Kuvassa 8.21 esitetään yläkammion radonpitoisuus ajan funktiona koekappaleelle 3 suoritettujen mittausten perusteella.



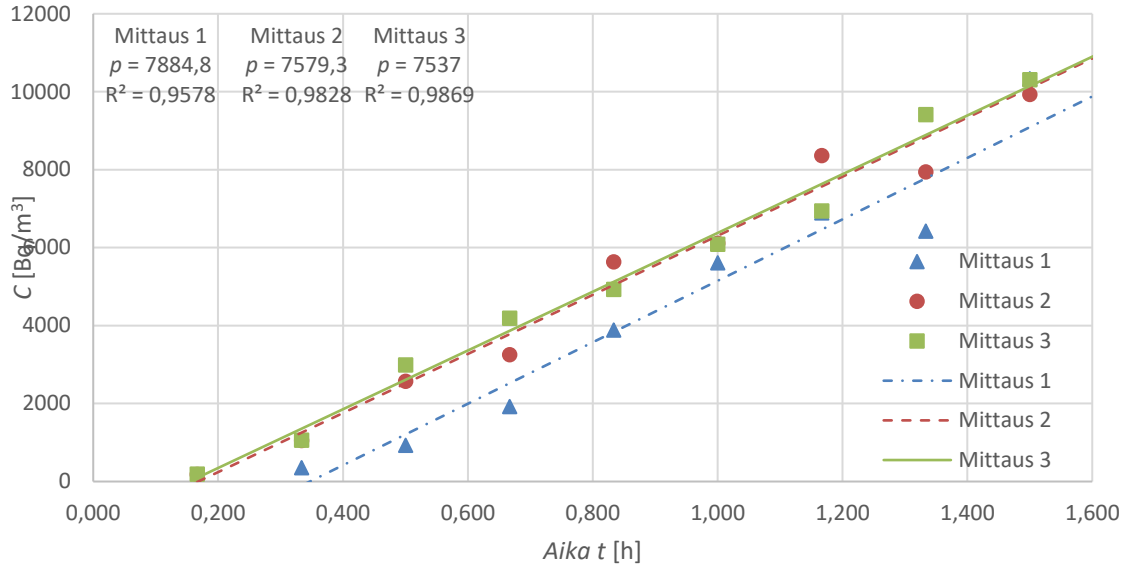
Kuva 8.21. Koekappaleen 3. yläkammion radonpitoisuus ajan funktiona kolmella eri mittauskerralla. Mittauskerroille on määritetty radonpitoisuuden muutoksen nousukulma p ja korrelaatiokerroin R^2

Taulukossa 8.10. esitetään koekappaleelle 3 määritetyt diffuusiokerroimet kolmella eri mittauskerralla ja niiden keskiarvo.

Taulukko 8.10. Koekappaleelle 3. määritetyt diffuusiokerroimet ja niiden keskiarvo.

Koekappale ja mittauskerta	Diffuusiokerroin [$\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{h}$]
3.1	18,1
3.2	17,2
3.3	17,3
Keskiarvo	17,6

Kuvassa 8.22 esitetään yläkammion radonpitoisuus ajan funktiona koekappaleelle 4 suoritetujen mittausten perusteella.



Kuva 8.22 Koekappaleen 4. yläkammion radonpitoisuus ajan funktiona kolmella eri mittauskerralla. Mittauskerroille on määritetty radonpitoisuuden muutoksen nousukulma p ja korrelaatiokerroin R^2 .

Taulukossa 8.11. esitetään koekappaleelle 4 määritetyt diffuusiokerroimet kolmella eri mittauskerralla ja niiden keskiarvo.

Taulukko 8.11. Koekappaleelle 4. määritetyt diffuusiokerroimet ja niiden keskiarvo.

Koekappale ja mittauskerta	Diffuusiokerroin [$\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{h}$]
4.1	17,3
4.2	16,6
4.3	16,5
Keskiarvo	16,8

Taulukossa 8.12. on esitetty kootusti kaikki olennaisimmat diffuusiokerroimen määrittämiseen tarvittavat mittau tulokset ja määritetyt diffuusiokerroimien arvot.

Taulukko 8.12. Yhteenvedo diffuusiokertoimen määrittämiseen tarvittavista mittaustuloksista ja koekappaleille määritetyistä diffuusiokertoimista.

	Koekappaleen paksuus [mm]	Alakammion radonpitoisuus [Bq/m ³]	Yläkammion radonpitoisuuden nousunopeus [Bq/m ³ h]	Yläpinnan radonekshalaatio [Bq/m ² h]	Diffuusiokerroin [$\times 10^{-5}$ m ² /h]
Koekappale 1	96	489 750	3700–4100	478...512	9,9
Koekappale 2	97	982 800	2500–2700	318...348	3,6
Koekappale 3	55	535 200	13 100–13 900	1673...1756	17,6
Koekappale 4	63	364 000	7500–7900	957...1001	16,8

Koekappaleiden 3 ja 4 määritetty diffuusiokerroin oli kaikista suurin 17×10^{-5} m²/h. Koekappaleiden 3 ja 4 suhteelliset kosteudet ja lujuudet olivat kaikista pienimmät, jotka selittävät diffuusiokertoimen eron koekappaleisiin 1 ja 2 nähden.

Koekappaleen 1 diffuusiokerroin oli $9,9 \times 10^{-5}$ m²/h, joka on pienempi kuin koekappaleilla 3 ja 4. Koekappaleen 1 betonin suhteellinen kosteus ja lujuus oli hieman korkeampi, mikä selittää diffuusiokertoimen eron. Koekappaleen 2 diffuusiokerroin oli $3,6 \times 10^{-5}$ m²/h, joka on kaikista pienin. Tämän selittää se, että koekappaleen suhteellinen kosteus ja lujuus ovat kaikista koekappaleista suurimmat. Lisäksi ohuthieanalyysissä havaittiin, että koekappaleen 2 v/s -suhde on pienempi, kuin 1. koekappaleella.

Ohuthieanalyysissä ja aistinvaraisessa tarkastelussa ei havaittu mitään viitteitä koekappaleiden halkeilusta, joka voisi selittää koekappaleiden välillä olevia diffuusiokertoimien eroja. Tämän perusteella voidaan todeta, että koekappaleiden eroavuudet johtuvat betonin huokosrakenteiden ja kosteuspitoisuuksien eroavaisuuksista.

Mittaustuloksista huomataan betonilaatan paksuuden merkitys diffuusiovirtauksen määrään. Diffuusiovirtauksen määrä (yläpinnan radonekshalaatio) koekappaleella 3 on noin viisinkertainen verrattuna koekappaleeseen 2, vaikka alakammion radonpitoisuus on noin puolet pienempi. Suurempi diffuusiovirtaus selittyy sillä, että koekappaleen 3 paksuus on noin kaksi kertaa pienempi kuin koekappaleella 2.

9. JOHTOPÄÄTÖKSET

9.1 Tutkimuksen onnistuminen

Tutkimusaineiston vähäisyys maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusteknisen toiminnan tarkastelussa aiheutti haasteita tutkimuksen onnistumisen kannalta. Maanvastaisen alapohjarakenteen kosteustekniseen toimintaan vaikuttavien muuttujien vaikutusta pystyttiin tarkastelemaan vain yksi tai kaksi muuttujaa kerrallaan vähäisen aineiston takia. Tämä aiheutti sen, että tarkastelussa mittaustulosten hajonta oli suurta, jolloin johtopäätösten ja tutkimustulosten luotettavuus heikkenee.

Laboratoriokokeita voidaan kokonaisuudessaan pitää onnistuneina. Betonin radonläpäisevyyskokeet suoritettiin kolme kertaa koekappaletta kohden ja mittauskertojen välillä ei tapahtunut suurta hajontaa. Lisäksi kaikki mittauskerrat ylittivät reilusti normin asettaman vaatimuksen, että korrelaatiokerroin R^2 on yli 0,9. Mittauskertojen välisen hajonnan ja korkean korrelaatiokertoimen perusteella mittausmenetelmä on hyvin toistettava ja luotettava mittaamaan betonin läpi kulkeutuvaa radonin diffuusiovirtausta.

Maanvastaiselle betonilaatalle on myös tyypillistä, että valamisen yhteydessä tehtävä tiivistys on voinut jäädä puutteelliseksi, jolloin betonin huokosrakenteen vaihtelut voivat olla isoja pienilläkin etäisyyksillä. Lisäksi puristuslujuuskokeissa käytettiin lieriön halkaisijana 50 mm, mikä lisää hieman mittauksen epävarmuutta. Osittain näiden johdosta puristuslujuuskokeissa eri mittauskertojen välillä on hajontaa.

Kuitenkin tutkimuksen luonteen kannalta betonin radonläpäisevyyteen vaikuttavien betonin huokosrakenteen ominaisuuksien määrittäminen puristuslujuuskokeen ja ohut-hieanalyysin avulla onnistui hyvin ja niitä voidaan pitää tutkimustulosten kannalta luotettavina.

9.2 Maanvastaisen alapohjarakenteen kosteustekninen toiminta

Tutkimustulosten perusteella pintarakenteen vesihöyrynvastus vaikuttaa merkittävästi alapohjarakenteesta mitattuihin betonin suhteellisiin kosteuksiin. Jokaisen eri muuttujan vaikutusta tarkasteltaessa havaittiin, että vesihöyryvointa pintarakennetta käytettäessä alapohjarakenne toimii kosteusteknisesti paremmin ja vikasietoisemmin. Lisäksi tutkimustulosten perusteella voitiin todeta, että betonilaatan kosteuspitoisuuden tasaantumisnopeus on nopeampi, kun alapohjarakenteessa käytetään vesihöyryvointa pintarakennetta.

Tutkimustulosten perusteella lämmöneristekerroksen paksuuden kasvattaminen parantaa maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusteknistä toimivuutta laskemalla betonilaatan suhteellista kosteutta. Lämmöneristekerros toimii rakenteessa vesihöyrynvastuksena ja sitä kautta sen kasvattaminen vähentää betonilaattaan kohdistuvaa vesihöyryn diffuusiovirtausta maaperästä.

Lämmöneristekerrospaksuus vaikutti myös täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuudessa Taulukossa 8.1. nähdään vesihöyrypitoisuuden laskevan lämmöneristepaksuuden kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että lämmöneristekerrospaksuuden kasvattaminen vähentää täyttökerrokseen kohdistuvaa lämpövuota ja sitä kautta täyttökerroksen lämpötila pysyy alempana. Täyttökerroksen ja betonilaatan välisen lämpötilaeron kasvaessa diffuusiovirtauksen suuruuteen vaikuttava vesihöyrypitoisuusero pienenee, jolloin vesihöyryn diffuusiovirtaus maaperästä vähenee.

Kuvissa 8.7–8.10 nähdään betonilaatan suhteellisen kosteuden olevan keskimäärin alhaisempi ulkoseinän vierustalla kuin rakennuksen keskustassa. Lisäksi ulkoseinän vierustalla täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuudet olivat alhaisemmat rakennuksen keskustaan nähden erityisesti ulkoilman lämpötilan ollessa alhainen talvikuukausina. Tällöin alapohjarakenteen diffuusiovirtauksen suunta voi muuttua hetkellisesti täyttökerroksen suuntaan, jolloin betonilaatta toimii kahteen suuntaan kuivuvana rakenteena ja toimii kosteusteknisesti paremmin rakennuksen keskiosaan nähden.

Vesihöyrytiivillä pintarakenteella tutkimustulosten mukaan betonilaatan kosteusjakauma tasapainotilassa on hyvin tasainen, eikä ylä- ja alapinnan suhteellisten kosteuksien välinen erotus ole kuin keskimäärin 4 % RH. Vesihöyryavoimella lattiapäällysteellä betonilaatan kosteusjakauman nähtiin olevan suurempi, noin 7–12 % RH vuodenajasta riippuen, jolloin betonilaatan kuivumispotentialiaali ylöspäin on suurempi. Betonilaatan ylä- ja alapinnan suhteellisten kosteuksien erotus oli suurimmillaan talvikuukausien jälkeen. Tällöin sisäilman vesihöyrypitoisuus on ollut matalalla, jolloin betonilaatan yläpinta on kyennyt luovuttamaan kosteutta diffuusiolla sisäilmaan riippuen pintarakenteen vesihöyrynvastuksesta.

Kuvassa 8.13 huomataan, että täyttökerroksen huokosilman suhteellisen kosteuden ollessa erittäin alhainen esimerkiksi täyttökerroksen tuuletusjärjestelmän ansiosta, betonilaatan suhteellinen kosteus voi tasaantua 50–60 % RH tasolle 15–20 vuoden aikana, vaikka rakenteessa on vesihöyrytiivis päällystemateriaali. Tämän tutkimustuloksen perusteella täyttökerrokseen asennettavien tuuletusjärjestelmien avulla voidaan parantaa huomattavasti maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusteknistä toimivuutta ja varmistaa, että betonin suhteellinen kosteus tasaantuu 50 % RH tasolle hyvin nopeasti.

Tämän johdosta uudis- ja korjausrakentamisessa on suositeltavaa asentaa maanvastaiseen alapohjarakenteeseen täyttökerroksen tuuletusjärjestelmä, jolla voidaan vähentää rakenteeseen kohdistuvaa kosteusrasitusta. On kuitenkin muistettava, että tuuletusjärjestelmän toimivuus varmistetaan käyttämällä riittävän karkeaa maa-ainesta kuten sepe-
liä. Hienorakeisimmilla maa-aineksilla kapillaarisesti kulkeutuva kosteus voi olla sen ver-
ran suuri, että tuuletusjärjestelmän kapasiteetti ei riitä poistamaan kosteutta täyttöker-
roksesta.

Tutkimustulosten perusteella voidaan todeta, että uusien määräysten mukaan tehty maanvastainen alapohjarakenne on kosteusteknisesti toimiva ja vikasietoinen. Uusien määräysten mukainen kapillaarikatko- ja lämmöneristekerros vähentävät huomattavasti rakenteeseen kohdistuvaa kosteusrasitusta. Lisäksi maaperän radonpitoisuuden vuoksi käytettävän maaperän tuuletusjärjestelmän takia, betonilaattaan kohdistuva maaperästä lähtöisin oleva kosteusrasitus on hyvin vähäinen.

Uusien määräysten mukaiseen maanvastaiseen alapohjarakenteeseen ei kohdistu niin isoa riskiä kosteusvaurioitumiselle käytettäessä vesihöyrytiivitä pintarakenteita, kunhan huolehditaan betonilaatan riittävästä kuivatuksessa ennen päällystämistä. Lisäksi maan-
vastaisten alapohjarakenteiden betonilaattojen suhteelliset kosteudet tulevat tasaantu-
maan pitkällä aikavälillä enenevässä määrin 50–60 % RH tasolle.

9.3 Betonilaatan kosteuspitoisuuden vaikutus radonläpisevyyteen

Taulukossa 9.1 on esitetty koekappaleiden keskeisimmät tutkimustulokset, kuten pu-
ristuslujuudet, tiheydet, suhteelliset kosteudet ja radonin diffuusiokerroimet.

Taulukko 9.1. Koekappaleille määritetyt puristuslujuudet, tiheydet, suhteelliset kosteu-
det ja diffuusiokerroimet

	Puristuslujuus σ [MPa]	Tiheys [kg/m ³]	Suhteellinen kosteus ϕ [% RH]	Diffuusioker- roin D_e [$\times 10^{-5}$ m ² /h]
Koekappale 1	47,3	2270	57	9,9
Koekappale 2	54,3	2287	63	3,6
Koekappale 3	44,7	2257	50	17,6
Koekappale 4	42,8	2213	50	16,8

Tutkimustuloksista nähdään, että koekappaleille määritetyissä diffuusiokertoimissa on eroja, jotka aiheutuvat betonin puristuslujuuksien ja suhteellisen kosteuksien eroavaisuuksista. Suurin diffuusiokerroin määritettiin koekappaleilla 3 ja 4, joiden puristuslujuudet ja suhteelliset kosteudet ovat kaikista pienimmät. Mittaustulosten perusteella voidaan olettaa, että betonin kosteuspitoisuuden ja lujuusluokan laskeminen lisäävät radonläpäisevyyttä.

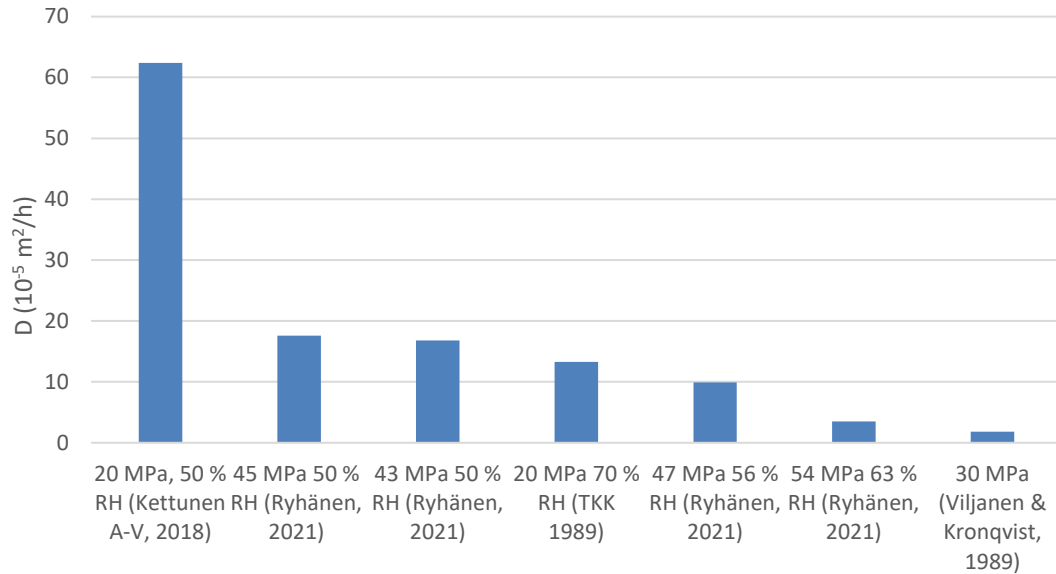
Betonin lujuuden ja suhteellisen kosteuden yhteisvaikutus nähdään myös koekappaleelle 2 määritetystä diffuusiokertoimesta, joka on kaikista pienin. Koekappaleen 2 puristuslujuus ja suhteellinen kosteus ovat kaikista suurimmat verrattuna muihin koekappaleisiin. Vertailemalla koekappaleen 2 diffuusiokerrointa muihin koekappaleisiin, nähdään betonin puristuslujuuden ja suhteellisen kosteuden kasvun vähentävän betonin läpi kulkeutuvaa radonin diffuusiovirtausta.

Mittaustuloksista nähdään, että pienelläkin betonin suhteellisen kosteuden muutoksella on merkitys betonin radonläpäisevyyteen. Tämä todennäköisesti selittyy sillä, että betonin huokosten vesimäärä voi muuttua paljonkin suhteellisen kosteuden muututtua hieman, mikä johtuu materiaalin hygroskooppisuudesta.

Suunnitelmissa koekappaleiden betonin lujuudeksi oli määritetty 30 MPa. Puristuslujuuskokeissa määritetyt betonin lujuudet olivat yli 40 MPa. Betonin lujuudet ovat kehittyneet 15 vuoden aikana yli noin 10 MPa suunnitteluarvoista vuosia jatkuvan betonin hydrataatioreaktion ansiosta. Luvussa 6.2 esitetyn mukaisesti ikääntyvän betonin lujuuden kehitys parantaa betonin radontiiveyttä.

Koekappaleille suoritetuista kosteusmittauksista nähdään, että uusien määräysten mukaisilla maanvastaisella alapohjarakenteilla betonin suhteellinen kosteus voi laskea yhä useammin lähelle 50 % RH noin 15 vuodessa, kun olosuhteet betonilaatan kuivumiselle on hyvät.

Kun verrataan tämän diplomityön tutkimustuloksia aiempiin tutkimuksiin nähdään että betonin puristuslujuudella ja suhteellisella kosteudella on merkittävä vaikutus betonin radonläpäisevyyteen (Kuva 9.1). Betonilla, jonka lujuus on 20 MPa ja suhteellinen kosteus 50 % RH (Kettunen A-V, 2018), radondiffuusiokerroin on moninkertainen verrattuna diplomityössä määritetyille betonin diffuusiokertoimille, joiden suhteellinen kosteus on samalla tasolla, ja puristuslujuudet ovat noin kaksi kertaa suuremmat. Edellä mainittujen mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että puristuslujuuden kasvattamisella voidaan vähentää merkittävästi betonin läpi tapahtuvaa radonin diffuusiovirtausta.



Kuva 9.1 Tutkimustulosten vertailu aiemmin tehtyihin mittauksiin.

Kuvassa 9.1. pienin diffuusiokerroin on betonilla, jonka lujuus on 30 MPa ja suhteellinen kosteus varsin korkea, koska betonin ikä tutkimushetkellä oli noin 3 kuukautta. Betonin iän perusteella voidaan olettaa, että betonin suhteellinen kosteus on korkeampi verrattuna tässä diplomityössä käytettyjen betonin suhteellisiin kosteuksiin. Tässä diplomityössä määritetyt diffuusiokertoimet ovat moninkertaisesti suurempia verrattuna Viljasen & Kronqvistin tekemän mittauksen diffuusiokertoimeen, vaikka puristuslujuus on noin 15 MPa alhaisempi. Näiden mittaustulosten perusteella betonin kuivuminen lisää betonin läpi tapahtuvaa radonin diffuusiovirtausta.

Teknillisen korkeakoulun (TKK, 1989) tekemässä mittauksessa betonin puristuslujuus oli alhaisempi ja suhteellinen kosteus korkeampi verrattuna tässä diplomityössä käytettyjen koekappaleiden vastaaviin ominaisuuksiin. TKK:n mittauksessa määritetty betonin diffuusiokerroin on samaa suuruusluokkaa, kuin tässä diplomityössä määritetyt diffuusiokertoimet. Näiden mittaustulosten perusteella betonin ikäännyttyä betonin suhteellinen kosteus laskee, jolloin radonläpäisevyys kasvaa. Samaan aikaan betonin ikäännyttyä betonin puristuslujuus kasvaa hydrataatioreaktion edetessä, jolloin radonläpäisevyys pienenee. Nämä kaksi ilmiötä kompensoivat toisiaan ja sitä kautta kokonaismuutos ikääntyvän betonin radonläpäisevyyteen jää vähäisemmäksi.

Diplomityön ja aiemmin tehtyjen tutkimustulosten perusteella voidaan todeta, että diffuusiolla kulkeutuva radon ei todennäköisesti aiheuta ongelmia sisäilman radonpitoisuuksissa, kun huolehditaan betonilaatan riittävästä lujuudesta ja tiiveydestä, eikä olla erityisen suuren maaperän radonpitoisuuden alueella. On mahdollista, että heikosti tiivistetyissä ja heikkolujuuksisissa betonilaatoissa betonilaatan läpi diffuusiolla tunkeutuva

radonin määrä voi aiheuttaa sisäilman radonpitoisuuksien kasvua yli sallittujen raja-arvojen.

10. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusteknistä toimivuutta ja miten se vaikuttaa betonin radonläpäisevyyteen. Maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusteknistä toimivuutta tarkasteltiin käymällä läpi kuntotutkimusten ja selvitysten yhteydessä tehtyjä kosteusmittauksia maanvastaisiin alapohjarakenteisiin. Lisäksi betonin suhteellisen kosteuden vaikutusta radonläpäisevyyteen tutkittiin laboratoriotutkimusten avulla.

Työn teoriaosuuden lähtötiedot hankittiin kirjallisuudesta sekä tieteellisistä julkaisuista. Maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusmittaustulokset hankittiin Vahanan Rakennusfysiikka Oy:n projekteista sekä Helsingin ja Tampereen kaupunkien kiinteistöihin tehdystä kuntotutkimuksista ja selvityksistä. Laboratoriotutkimusten koekappaleet hankittiin 15–20 vuotta vanhoista kiinteistöistä, jotta koekappaleiden betonin kosteuspitoisuus on hyvällä tarkkuudella hakenut tasapainon maaperän kosteuden ja ylöspäin pintarakenteiden läpi tapahtuvan kosteuden siirtymisen suhteen. Lisäksi tavoitteena oli, että betonin lujuus on kehittynyt siihen lujuuteen, mihin betonin lujuus vuosien kuluessa kehittyy pyssyessään kohtuullisen kosteana.

Nykyiset ohjeistukset maanvastaisen alapohjarakenteen toteuttamisessa ovat ohjanneet lämmöneristekerroksen paksuuden lisäämiseen ja karkearakeisen maa-aineksen käyttöön rakenteen täyttökerroksessa. Diplomityössä käytettävissä olevan aineiston perusteella näiden ohjeistusten noudattamisen yleistyminen rakennuskannassa ovat parantaneet maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteusteknistä toimivuutta. Lämmöneristekerrospaksuuden kasvattaminen on parantanut siinä määrin alapohjarakenteen kosteusteknistä toimivuutta, että tiiviiden lattiapäällysteiden käyttö maanpäällisissä kerroksissa on kosteusteknisesti turvallista, kunhan huolehditaan betonin riittävästä kuivuudesta päällystysvaiheessa. Kuitenkin kellaritiloissa tiiviiden lattiapäällysteiden käyttö on edelleen riskialtista maan lämpenemisen aiheuttaman suuremman kosteusrasituksen johdosta.

Lisäksi yhä useamman maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusteknistä toimivuutta parantaa yleistyneet täyttökerrosten tuuletusjärjestelmät. Tuuletusjärjestelmien avulla voidaan vähentää merkittävästi täyttökerroksen huokosilman suhteellista kosteutta, jolloin betonilaattaan alapuolelta kohdistuva kosteusrasitus on erittäin vähäistä. Tutkimustulosten perusteella betonilaatan suhteellinen kosteus tasaantuu 15–20 vuoden aikana

50–60 % RH:n tasolle, kun täyttökerroksen huokosilman vesihöyrypitoisuus pidetään alhaisena esimerkiksi tuuletusjärjestelmän avulla. Tämän johdosta uudis- ja korjausrakentamisessa on suositeltavaa asentaa tuuletusjärjestelmä täyttökerrokseen, jolla voidaan vähentää kosteusrasitusta.

Maanvastaisen alapohjarakenteen betonilaatan radonläpäisevyyteen vaikuttaa betonin kosteuspitoisuus sekä lujuus. Tutkimustulosten perusteella betonin kuivuminen kasvattaa radonläpäisevyyttä. Toisaalta betonin ikääntyessä betonin lujuus kasvaa hydrataatioreaktion edetessä. Diplomityön ja kirjallisuudessa esitettyjen tutkimustulosten perusteella betonin lujuuden nostaminen vähentää betonilaatan radonläpäisevyyttä, jolloin se kompensoi kuivumisen aiheuttamaa radondiffuusion kasvua betonin ikäännyttyä.

Kuitenkaan tutkimuksessa suoritettujen ja aiemmin tehtyjen mittausten perusteella ei pystytä varmuudella arvioimaan, kuinka paljon lujuuden kehitys kompensoi kuivumisen aiheuttamaa radonläpäisevyyden kasvua ja mikä näiden ilmiöiden kokonaisvaikutus on betonin radonläpäisevyyteen. Laboratoriomittauksin on kuitenkin saatu viitteitä siitä, että betonin radonläpäisevyys kasvaa betonin ikääntyessä, jolloin betonin lujuus kehittyy, mutta samaan aikaan betoni kuivuu.

Diplomityön ja kirjallisuudessa esitettyjen tulosten perusteella on epätodennäköistä, että maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusteknisen toimivuuden parantaminen aiheuttaa sisäilman radonpitoisuuden systemaattista kasvua sallittujen raja-arvojen yli, kunhan huolehditaan betonilaatan riittävästä lujuudesta ja betonin tiivistämisestä rakennusvaiheessa, eikä rakennus sijaitse maaperän korkean radonpitoisuuden alueella. On kuitenkin mahdollista, että heikosti tiivistetyissä ja heikkolujuuksisissa betonilaatoista diffuusiolla tunkeutuva radonin määrä voi aiheuttaa sisäilman radonpitoisuuden sallittujen raja-arvojen ylittymistä varsinkin silloin, jos alapohjarakenteen täyttökerroksessa radonpitoisuudet ovat tavanomaista korkeammat. Tämän johdosta alapohjarakenteen betonilaatassa ei ole suositeltavaa käyttää heikkolujuuksista betonia kuten C15/20 lujuusluokan betonia. Kuitenkin tärkein tapa vähentää sisäilman radonpitoisuutta on huolehtia alapohjarakenteen ilmatiivyydestä ja estää radonin kulkeutuminen sisäilmaan konvektiovirtausten kautta.

Betonin epähomogeenisen huokosrakenteen takia radonläpäisevyyksmittauksia tarvitaan lisää, jotta voidaan luotettavasti arvioida betonin kosteuspitoisuuden ja lujuuden vaikutuksia radonläpäisevyyteen. Lisäksi betonin radonteknisen toimivuuden kannalta olisi tärkeää selvittää, kuinka merkittävästi betonin radonläpäisevyys kasvaa betonin huokosilman vähäisestä vesihöyrypitoisuuden muutoksesta.

Jatkotutkimustarvetta kohdistuu myös maanvastaisen alapohjarakenteen kosteustekniseen toimivuuteen. Maanvastaisen alapohjarakenteen kosteusteknistä toimivuutta kannattaisi tarkastella lisää rakenteisiin suoritettujen kosteusmittausten avulla. Tarkasteluun tarvittaisiin huomattavasti suurempi otosmäärä kuin tässä diplomityössä oli käytettävissä, jotta eri muuttujien vaikutusta voidaan tarkastella luotettavimmin. Lisäksi jatkotutkimustarvetta on sen osalta, millainen vaikutus lattialämmityksellä on maanvastaisen alapohjarakenteen kosteustekniseen toimintaan, ja kuinka alas betonin suhteellinen kosteus voi tasoittua tässä tapauksessa.

LÄHTEET

- Arvela, H., Holmgren, O., Hänninen, P., 2015. Effect of soil moisture on seasonal variation in indoor radon concentration: Modelling and measurements in 326 Finnish houses. *Radiation Protection Dosimetry*, **168**(2), pp. 277-290.
- Arvela, H., Holmgren, O., Reisbacka, H. 2012. Asuntojen radonkorjaaminen. STUK-A252 Saatavissa (20.2.2019): <http://www.julkari.fi/handle/10024/124067>.
- Arvela, H., Mäkeläinen, I., Turtiainen, T., Valmari, T., Weltner, A., 2003 Radon sisäilmassa. Luku 4. Kirjassa: Säteily ympäristössä. Pöllänen R (toim.) Säteily- ja ydinturvallisuus -sarja, osa 2. Karisto, Hämeenlinna 2003: 110-161.
- Arvela, H., Mäkeläinen, I., Reisbacka H., Valmari, T., Suomen radonkartasto 2010. STUK-A245. Helsinki 2010, 89 s. + liitteet 46 s
- Betoniteollisuus ry, 2022. Saatavissa: <https://betoni.com/koti-betonista/rakennustapavaihtoehdot/paikallavalu/betonityypit-ja-oikean-betonin-valinta/>
- Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus: rakennusfysiikka. 2. painos, Rakennustieto Oy, Helsinki, 150 s
- BY 201. Betoniteknikan oppikirja, Helsinki: Suomen Betoniyhdistys, 2018.
- Cozmuta, I., Van Der Graaf, E. R., De Meijer, R.J., 2003. Moisture dependence of radon transport in concrete: Measurements and modeling. *Health physics*, **85**(4), pp. 438-456.
- Fournier, F., Groetz, J.-., Jacob, M., Crolet, J.M. and Lettner, J.M., 2005. Simulation of radon transport through building materials: Influence of the water content on radon exhalation rate. *Transport in Porous Media*, **59**(2), pp. 197-214.
- Gadd, M.S. and Borak, T.B., 1995. In-situ determination of the diffusion coefficient of ²²²Rn in concrete. *Health physics*, **68**(6), pp. 817-822.
- Georgescu, D.P., 2013. Influence of concrete characteristics on radon transport. Romanian Reports of Physics, 58(SUPPL.), pp. S148-S155.
- Gulabyants, L., Livshits, M., Kalaydo, A. and Kovler, K., 2020. Resistance of building foundation to radon penetration. *Journal of Building Physics*, 43(5), pp. 456-473.
- Hagentoft, C-E. 2001. Introduction to Building Physics. Studentlitteratur AB. 442s.
- JIRÁNEK, M. and KAČMAŘÍKOVÁ, V., 2019. Radon diffusion coefficients and radon resistances of waterproofing materials available on the building market. *Journal of environmental radioactivity*, 208-209.
- Kettunen A-V, 2018, Maanvastaisen alapohjarakenteiden radontekninen toiminta rakennuskorjausten muuttuessa, Sisäilmayhdistys ry. Saatavissa (13.5.2021): https://www.sisailmayhdistys.fi/pdf/Kettunen_Ari-Veikko.pdf
- Kettunen A-V, 2004, Maanvaraisen alapohjarakenteen tuulettaminen, Betonipäivät seminaariesitys. Ei saatavissa.
- Klink, T., Gaber, K., Schlattner, E. and Setzer, M.J., 1999a. Characterization of the gas transport properties of porous materials by determining the radon diffusion coefficient. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 32(224), pp. 749-754.

- Kronqvist, P., 1989. Rakennusaineen radonin diffuusioläpäisevyyden mittausmenetelmän kehittäminen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto. Espoo. 122 s.
- Kubissa, W. and Glinicki, M.A., 2017. Influence of internal relative humidity and mix design of radiation shielding concrete on air permeability index. *Construction and Building Materials*, 147, pp. 352-361.
- Lehtoviita T., Viljanen M., 1986. Radonin merkitys talonrakennustekniikassa. Radonin siirtymisen laskenta maanvastaisten rakenteiden läpi. Tekninen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos. 136s. Espoo.
- Leivo V., Rantala J. 2000. Maanvaraisten alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere. 127 s.
- Leivo V., Rantala J. 2002. Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 124 s.
- Leivo, V., Rantala, J 2002, Maanvastaiset alapohjarakenteet - kosteustekninen mitoittaminen ja korjaaminen. Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikka, Tampere. 32 s.
- Leivo, V., Rantala, J 2005, Lattialämmitetyn alapohjarakenteen rakennusfysikaalinen toiminta. Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikka, Julkaisu, (julkaisu 128),
- McFadden, T., 1988. Thermal performance degradation of wet insulations in cold regions. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2(1), 25-34s
- Merikallio, T. 2009. Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa. Teknillinen korkeakoulu, Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta. Rakennus- ja rakennustuotantotekniikan laitos. 136 s.
- Minkin, L. 2001. Thermodiffusion in concrete slab as a driving force of indoor radon entry. *Health Phys.* 80(2) pp.151–156.
- Minkin, L. 2003. Thermal diffusion of radon in porous media. *Radiation Protection Dosimetry Vol. 106, No. 3*, pp. 267–272
- Nielson, K.K., Rogers, V.C., Holt, R.B., Pugh, T.D., Grondzik, W.A. and DE Meijer, R.J., 1997. Radon penetration of concrete slab cracks, joints, pipe penetrations, and sealants. *Health physics*, 73(4), 668-678s
- Ojanen T., Moisture performance of stone wool insulation products, VTT-R-04783-17, 2017
- Kosteusopas Paroc kivivilla, Paroc Group Oy, 2019. 27s.
- Pitkäranta M., 2016, Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus, Ympäristöministeriö, Helsinki.
- Rantala, J. 2005, On Thermal Interaction between Slab-on-ground Structures and subsoil in Finland. Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikka, Julkaisu, (julkaisu 542),
- RakMK. 2018. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Pohjarakenteiden suunnittelu. Ympäristöministeriö.
- RIL 255-1-2014. (2014). Rakennusfysiikka I. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 500s
- Renken, K.J. and Rosenberg, T., 1995. Laboratory measurements of the transport of radon gas through concrete samples. *Health physics*, 68(6), pp. 800-808.
- Rogers, V.C., Nielson, K.K. and Holt, R.B., 1995a. Radon diffusion coefficients for aged residential concretes. *Health physics*, 68(6), pp. 832-834.

Rogers, V.C., Nielson, K.K., Holt, R.B. and Snoddy, R., 1994. Radon diffusion coefficients for residential concretes. *Health physics*, **67**(3), pp. 261-265.

Siikanen U. (2014). Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovelluksia. Rakennustieto Oy. 256 s.

Säteilyturvakeskus (STUK), 2021. Radon aiheuttaa keuhkosyöpää. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/radon/radon-aiheuttaa-keuhkosyopaa>

Säteilyturvakeskus (STUK), 2021. Radonin mittaaminen. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/radon/radonin-mittaaminen>

Viljanen M., Slunga E., Lehtoviita T. & Kanerva P. 1987. Radonin merkitys talonrakennustekniikassa. Radontekninen suunnittelu. Tekninen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos. 135s. Espoo.

Vinha J. 2011. RTEK-3511 Rakennusfysiikka. Luentomoniste. Tampereen teknillinen yliopisto. 520+246s

Vinha, J, Valovirta, I, Korpi, M, Mikkilä, A & Käkelä, P 2005, Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tutkimusraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan osasto, talonrakennustekniikan laboratorio, Tampere. 101 + 211 s.

LIITTEET

Liite 1: Ohuthietutkimus- sekä puristuslujuuskoeraportit

Liite 2: Kammioiden ilmatiiveyskoetulokset

Liite 3: Kosteusmittaukset radonläpäisevyysmittausten jälkeen

Liite 4: Kosteusmittaukset koekappaleiden vierustalta ennen koekappaleiden irrotusta

Liite 5: Kosteusmittaukset koekappaleiden leikkauspinnasta irrotuksen jälkeen

Liite 6: Alakammion radonpitoisuuden tasaantuminen ennen radonläpäisevyys mittauksia

Liite 7: Koekappaleiden punnitustulokset huokoisuuden määrittämisessä märkä-kuivamenetelmällä.

Tutkimusseloste TT 4392

Diplomityö
Laboratoriotutkimukset

01.10.2021

Tilaaajan tiedot

Tilaaaja Muuttuva asiakas
Osoite -
Postinumero -
Postitoimipaikka -
Yhteyshenkilön nimi
Yhteyshenkilön puhelin
Yhteyshenkilön sähköposti

Kohteen tiedot

TT-tunnus 4392
Nimi Diplomityö
Osoite
Postinumero
Kaupunki
Valmistumisvuosi
Tilauuskoodi
Tilauspäivämäärä 17.9.2021
Erityishuomiot

Tutkimukset

Tutkimus	Näytetunnukset	Tutkimuksia yht.
Ohuthietutkimus	4.2	1 kpl
Puristuslujuuden määrittäminen	4.1, 4.3, 4.4	3 kpl
Muita tutkimuksia:	Lisätietoa:	
Liite 1	Ohuthietutkimusraportti (5 sivua)	
Liite 2	Puristuslujuuden määrittämisraportti (2 sivua)	
Tutkimusraportti liitteineen	10 sivua	

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

Tämän tutkimusselosteen osittainen kopiointi on kielletty ilman Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n kirjallista lupaa

Näytteet

#	Tunnus	Rakenneosa	Pituus (min)	Pituus (max)	Leveys	Ilmansuunta	Tarkenne
1	4.1	betonilaatta	60	60	50		Koekappale 4
2	4.2	betonilaatta	57	57	50		Koekappale 4
3	4.3	betonilaatta	60	60	50		Koekappale 4
4	4.4	betonilaatta	65	65	50		Koekappale 4

Laboratorion yhteyshenkilöt

Vahanen Rakennusfysiikka Oy
Linnoitustie 5
FI-02600 Espoo
Puhelin: 0207 698 698
Fax: 0207 698 699

Projektinumero	HAL913
Yhteyshenkilön nimi	Tuomas Ryhänen
Sähköposti	Tuomas.Ryhanen@vahanen.com
Tilauksen kirjaajan nimi	Tuomas Ryhänen
Sähköposti	Tuomas.Ryhanen@vahanen.com

Diplomityö / Tuomas Ryhänen ohuthietutkimus

1 Näytteet ja tilaajan toimittamat tiedot

Tutkimuksia varten tilaaja toimitti neljä (4) poraamalla irrotettua näytettä, joiden tunnuksset ja irrotuskohdat olivat:

- Näyte 1.3, koekappale 1
- Näyte 2.1, koekappale 2
- Näyte 3.1, koekappale 3
- Näyte 4.2, koekappale 4

Näytteet liittyvät Tuomas Ryhäsen diplomityöhön.

Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratorion tietokantatunnus näytteille 1.3 ja 2.1 on TT 4361, näytteelle 3.1 TT 4367 ja näytteelle 4.2 TT 4392.

2 Tutkimukset

Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratoriossa näytteistä valmistettiin ohuthietutkimuksia varten petrografiset ohuthieet. Ohuthieiden koko on 25 x 75 mm.

Ohuthieet tehtiin näytteen yläpinnasta noin 65-75 mm:n syvyydelle.

Ohuthietutkimus on akkreditoitu menetelmä. Ohuthieiden preparointi- ja tutkimusmenetelmä on esitetty standardeissa ASTM C856/C856M-20 ja NT Build 381. Kiviainekset on luokiteltu Betonin kiviainekset 2018, BY 43 mukaisesti. Ohuthieet tutkittiin Leica DM2700P-polarisaatio- ja fluoresenssimikroskoopilla.

Tutkimukset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

3 Tulokset

Näyte 1.3, koekappale 1

Betoni on rakenteeltaan hieman epähomogeenista johtuen vesi-sementtisuhteen (v/s) vaihtelusta sekä paikoitellen veden erottumisesta.

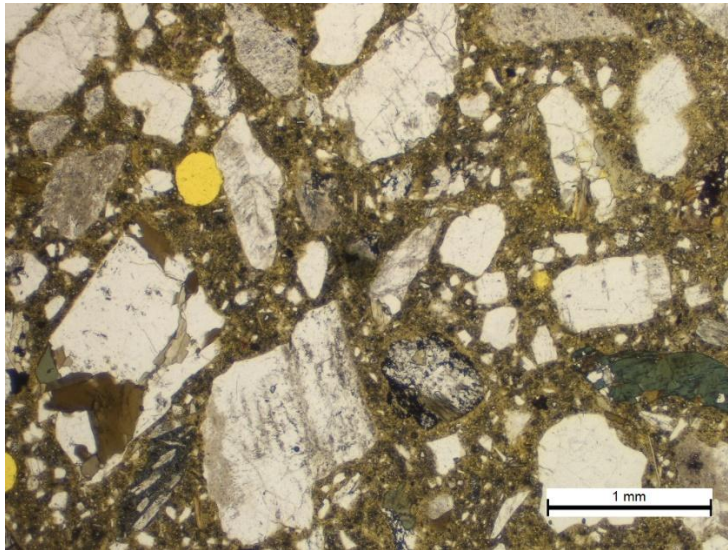
Karkea kiviaines on pääosin rapautumatonta graniittista kiveä ja pienessä määrin tummaa liusketta ja gneissiä. Kiviaineksen raemuoto on särmikäs - osittain pyöreä. Suurin raekoko on 16 mm. Hieno kiviaines on pääasiassa kvartseja ja maasälpää ja silikaattimineraaleista koostuvia kivilajifragmentteja. Hienon kiviaineksen joukossa on vähän, alle 1 % killemineraaleja. Kiviaineksen raekokojakautuma on jatkuva.

Betonin sementtikiven määrä (pasta-%) on tavanomainen. Sideaine on hienoraakeista portlandsementtiä, jossa on seosaineena vähän kalkkikiveä ja masuunikuonaa. Sementin hydrataatioaste on varsin korkea. Vesi-sementtisuhte (v/s) on

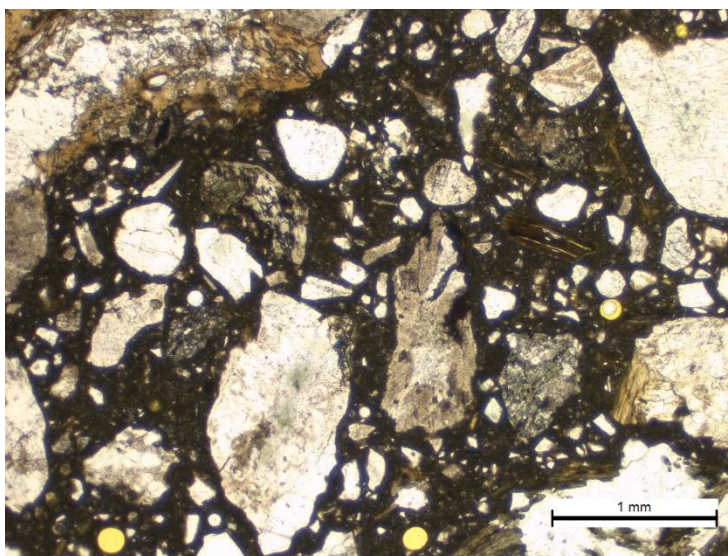
yläpinnassa noin 35 – 45 mm:n syvyydelle korkea ja paikoitellen on veden erottumisesta (kuva 1). Syvemmillä v/s on pienempi eikä erottumista todettu. Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta 3 - 4 mm:n syvyydelle.

Betoni on huokostamatonta. Pienikokoisia tiivistyshuokosia on kohtalaisesti hieman epätasaisesti jakautuneena. Betonin huokosissa ei ole kiteytyviä.

Betonissa ei ole säröilyä.



Kuva 1. Näyte 1.3. Betonin mikrorakenne. Kiviainesrakeet näkyvät vaaleina alueina, sementtikivi tummana matriisina ja huokokset keltaisina "paloina". Ohuthieen tekoa varten näyte on impregnoitu keltaista (fluoresoivaa) väriainetta sisältävällä epoksilla. Mitä keltaisempi sementtikiven väri ohuthieessä on, sitä enemmän siihen on imeytynyt väriainetta, eli sitä suurempi betonin kapillaarihuokoisuus ja vesi-sementtisuhte on. Paikoitellen on veden erottumista (hyvin keltaiset sementtikiven alueet) nähtävissä. Vertaa kuvaan 2.



Kuva 2. Näyte 2.1. Betonin mikrorakenne. Sementtikiven väri ohuthieessä on näytettä 1.3 tummempi, eli sementtikivi on tiiviimpää ja v/s on pienempi. Vertaa kuvaan 1.

Näyte 2.1, koekappale 2

Betoni on rakenteeltaan melko homogeenista.

Karkea kiviaines on pääosin rapautumatonta graniittista kiveä ja pienessä määrin tummaa liusketta ja gneissia. Kiviaineksen raemuoto on särmikäs - osittain pyöreä. Suurin raekoko on 16 mm. Hieno kiviaines on pääasiassa kvartsia ja maasälpää ja silikaattimineraaleista koostuvia kivilajifragmentteja. Hienon kiviaineksen joukossa on vähän, alle 1 % kiillemineraaleja. Kiviaineksen raekokajakautuma on jatkuva.

Betonin sementtikiven määrä (pasta-%) on tavanomainen. Sideaine on hienora-keista portlandsementtiä, jossa on seosaineena vähän kalkkikiveä ja masuunikuonaa. Sementin hydrataatioaste on varsin korkea. Vesi-sementtisuhte (v/s) on yläpinnassa noin 10 mm:n syvyydelle hieman korkeampi, kuin syvemmillä, jossa se on tasaisen pienempi (kuva 2). Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta 3 - 5 mm:n syvyydelle.

Betoni on huokostamatonta. Pienikokoisia tiivistyshuokosia on kohtalaisesti hieman epätasaisesti jakautuneena. Betonin huokosissa ei ole kiteytymiä.

Betonissa ei ole säröilyä.

Näyte 3.1, koekappale 1

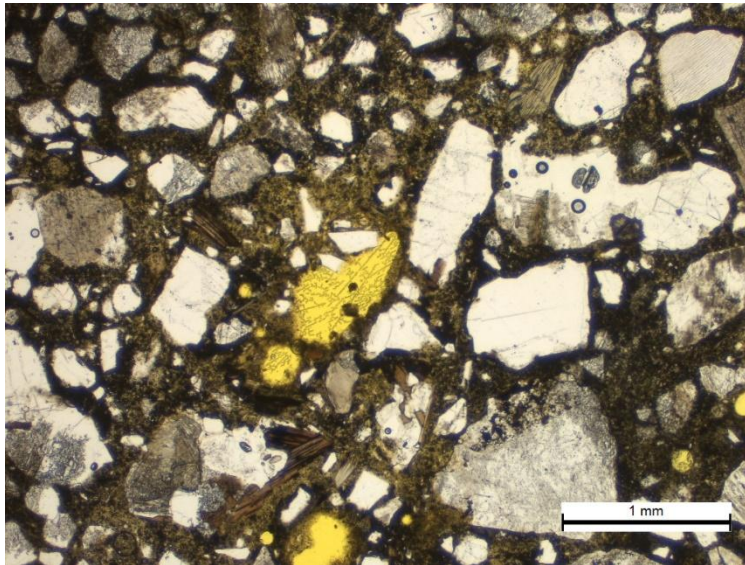
Betoni on rakenteeltaan hieman epähomogeenista johtuen vesi-sementtisuhteen (v/s) vaihtelusta ja paikoitellen todetusta veden erottumisesta.

Karkea kiviaines on pääosin rapautumatonta graniittista kiveä ja pienessä määrin tummaa liusketta ja gneissia. Kiviaineksen raemuoto on särmikäs - osittain pyöreä. Suurin raekoko on 8 mm. Hieno kiviaines on pääasiassa kvartsia ja maasälpää ja silikaattimineraaleista koostuvia kivilajifragmentteja. Hienon kiviaineksen joukossa on vähän, alle 1 % kiillemineraaleja. Kiviaineksen raekokajakautuma on jatkuva.

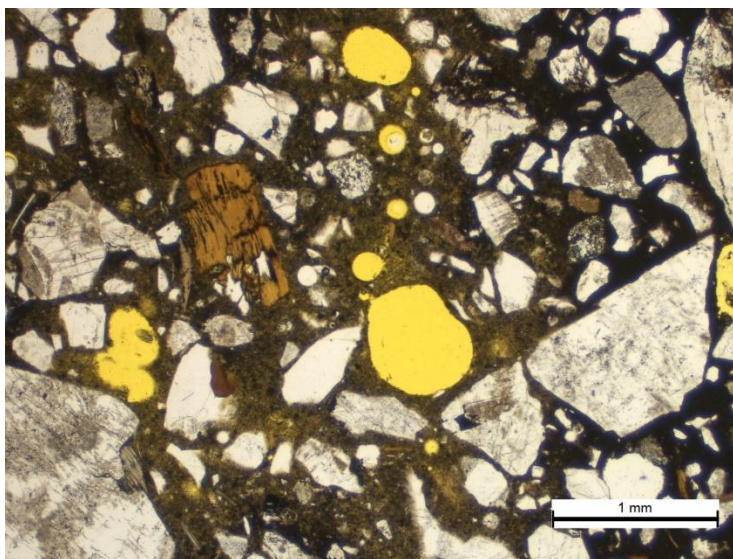
Betonin sementtikiven määrä (pasta-%) on tavanomainen. Sideaine on hienora-keista portlandsementtiä, jossa on seosaineena vähän kalkkikiveä ja masuunikuonaa. Sementin hydrataatioaste on melko korkea. Vesi-sementtisuhte (v/s) vaihtelee melko pienestä melko suureen koko näytteen alalla ja paikoitellen on veden erottumista (kuva 3). Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 20 mm:n syvyydelle.

Betoni on huokostamatonta. Pienikokoisia tiivistyshuokosia on kohtalaisesti hieman epätasaisesti jakautuneena. Betonin huokosissa ei ole kiteytymiä.

Betonissa ei ole säröilyä.



Kuva 3. Näyte 3.1. Betonin mikrorakenne. Vesi-sementtisuhte (v/s) vaihtelee melko pienestä (tummana näkyvät alueet pastassa) melko suureen (vaaleana näkyvät alueet pastassa) koko näytteen alalla ja paikoitellen on veden erottumista.



Kuva 4. Näyte 4.2. Betonin mikrorakenne. Vesi-sementtisuhte (v/s) vaihtelee melko pienestä (tummana näkyvät alueet pastassa) melko suureen (vaaleana näkyvät alueet pastassa) koko näytteen alalla ja paikoitellen on veden erottumista.

Näyte 4.2, koekappale 1

Betoni on rakenteeltaan hieman epähomogeenista johtuen vesi-sementtisuhteen (v/s) vaihtelusta ja paikoitellen todetusta veden erottumisesta.

Karkea kiviaines on pääosin rapautumatonta graniittista kiveä ja pienessä määrin tummaa liusketta ja gneissia. Kiviaineksen raemuoto on särmiäs - osittain pyöreä. Suurin raekoko on 8 mm. Hieno kiviaines on pääasiassa kvartssia ja maasälpää ja

silikaattimineraaleista koostuvia kivilajifragmentteja. Hienon kiviaineksen joukossa on vähän, alle 1 % kiillemineraaleja. Kiviaineksen raekokojakautuma on jatkuva.

Betonin sementtikiven määrä (pasta-%) on tavanomainen. Sideaine on hienora-keista portlandsementtiä, jossa on seosaineena vähän kalkkikiveä ja masuunikuonaa. Sementin hydrataatioaste on melko korkea. Vesi-sementtisuhte (v/s) vaihtelee melko pienestä melko suureen koko näytteen alalla ja paikoitellen on veden erottumista. Betoni on karbonatisoitunut yläpinnasta noin 10 mm:n syvyydelle.

Betoni on huokostamatonta. Pienikokoisia tiivistyshuokosia on kohtalaisesti hieman epätasaisesti jakautuneena. Betonin huokosissa ei ole kiteytyviä.

Betonissa ei ole säröilyä.

Espoossa 1.10.2021



Hannu Pyy, TkL
Erityisasiantuntija



Jaakko Sääntti, FM
Erityisasiantuntija

Vahanen Rakennusfysiikka Oy, Laboratorio on FINAS-akkreditointipalvelun akkreditoima testauslaboratorio T328, akkreditointivaatimus SFS-EN ISO/IEC 17025. Akkreditoinnin piiriin kuuluvat petrografinen ohuthieanalyysi, betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohuthieistä, betonin puristuslujuuden ja tiheyden määrittäminen sekä betonin poralieriöiden näytteenotto.

Tämän asiakirjan osittainen kopiointi on kielletty ilman Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n kirjallista lupaa.

Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratorio ei vastaa tilaajan toimittamien tietojen oikeellisuudesta.

1.10.2021

Tilaaaja: Tuomas Ryhänen
Tilaus: 20.9.2021
Tekijä: Vahanen Rakennusfysiikka Oy
Jere Pylkkänen, laborantti
Linnoitustie 5, 02600 Espoo
Puh: 044 7788 644
jere.pylkkanen@vahanen.com

BETONIN PURISTUSLUJUUDEN MÄÄRITYS RAKENNEKOEKAPPALEET

Testausmenetelmä

Betoin puristuslujuuden määritys rakenteesta irrotetulle rakennekoekappaleelle tehdään standardin SFS-EN 12504-1:2019 + AC:2020 (Betoin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut koekappaleet) mukaisesti.

Betoin tiheyden määritys tehdään standardin SFS-EN 12390-7:2019 + AC:2020 (Testing hardened concrete. Part 7: Density of hardened concrete) mukaisesti.

Betoin puristuslujuuden ja tiheyden määritykset ovat akkreditoituja testausmenetelmiä.

Testausmenetelmiin liittyvät muut standardit:

- SFS-EN 12390-1:2021 Testing hardened concrete. Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds
- SFS-EN 12390-3:2019 Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens
- SFS-EN 12390-4:2019 Testing hardened concrete. Part 4: Compressive strength. Specification for testing machines.

Näytetiedot ja tilaajan toimittamat tiedot

Kohde: **Diplomityö**
Näytteiden toimitus: Tilaaja toimitti 3 kpl poralieriöitä laboratorioon 20.9.2021.
Koekappaleiden tiedot: ks. taulukko 1
Porauspäivämäärä: -
Testauspäivämäärä: 29.9.2021

Toimenpiteet laboratoriossa ja testaus

Poralieriöt olivat saapuessa vailla kosteuden haihtumista estävää suojausta. Poralieriöitä säilytettiin ennen käsittelyä laboratorio-olosuhteissa 20 ± 5 °C.

Poralieriöistä sahattiin koekappaleet ja niiden päädyt hiottiin siten, että korkeuden ja halkaisijan suhde oli 1:1 standardin SFS-EN 12390-1:2021 mukaisesti.

Koekappaleita säilytettiin sahauksen ja hionnan jälkeen laboratorio-olosuhteissa 16-24 tuntia ennen koestusta.

1.10.2021

Koekappaleiden tiheydet määritettiin toimitustilassa käyttäen koekappaleen massan ja mittojen mitattuja arvoja. Halkaisijaltaan < 100 mm koekappaleiden koko on kuitenkin standardin vaatimusta pienempi, joten tiheysmäärittäminen on suuntaa antava.

Koekappaleiden pinnalta mitattuna betonin kiviaineksen maksimirakoko oli 10 mm.

Puristuslujuudet määritettiin standardin SFS-EN 12390-3:2019 mukaisesti. Puristuslujuuden testaus suoritettiin Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratorion Form + Test Alpha 3-3000 AR -laitteella.

Testaustulokset näytteistä on esitetty taulukossa 1.

Mahdolliset poikkeamat standardista tai poikkeamat koekappaleissa:

Koekappaleiden pienen testaus pinta-alan vuoksi koestuksessa käytettiin lisäniveltä.

Koekappaleille koestuksessa mitattu murtokuorma on alle koestuslaitteiston määritetyn mitta-alueen alarajan (200 kN). Näin ollen lujuudet ovat suuntaa antavia.

Koekappaleiden suorakulmaisuus ei täyttänyt standardin vaatimuksia.

Tulokset

Taulukko 1. Koekappaleiden puristuslujuudet.

tunnus	a) mitat, muoto (mm)	tiheys (kg/m ³)	murtokuorma (kN)	lujuus (MPa)
4.1	L 50x50	2200	83,6	42,6
4.3	L 50x49	2220	87,6	44,6
4.4	L 50x50	2220	80,8	41,2

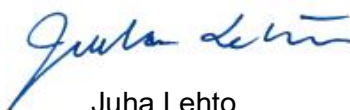
a) Mitat: Lieriönäytteissä (L) Ø x h.

Espoossa 30.9.2021

Vahanen Rakennusfysiikka Oy



Jere Pylkkänen
Laborantti



Juha Lehto
Asiantuntija

*Vahanen Rakennusfysiikka Oy, Laboratorio on FINAS-akkreditointipalvelun akkreditoima testauslaboratorio T328, akkreditointivaatimus SFS-EN ISO/IEC 17025. Akkreditoinnin piiriin kuuluvat petrografinen ohuthieanalyysi, betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohut-
hieistä, betonin puristuslujuuden ja tiheyden määrittäminen sekä betonin poralieriöiden näytteenotto.*

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.

Tämän asiakirjan osittainen kopiointi on kielletty ilman Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n kirjallista lupaa.

Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratorio ei vastaa tilaajan toimittamien tietojen oikeellisuudesta.

1.10.2021

Tilaaaja: Tuomas Ryhänen
Tilaus: 3.9.2021
Tekijä: Vahanen Rakennusfysiikka Oy
Jere Pylkkänen, laborantti
Linnoitustie 5, 02600 Espoo
Puh: 044 7788 644
jere.pylkkanen@vahanen.com

BETONIN PURISTUSLUJUUDEN MÄÄRITYS RAKENNEKOEKAPPALEET

Testausmenetelmä

Betoin puristuslujuuden määritys rakenteesta irrotetulle rakennekoekappaleelle tehdään standardin SFS-EN 12504-1:2019 + AC:2020 (Betoin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut koekappaleet) mukaisesti.

Betoin tiheyden määritys tehdään standardin SFS-EN 12390-7:2019 + AC:2020 (Testing hardened concrete. Part 7: Density of hardened concrete) mukaisesti.

Betoin puristuslujuuden ja tiheyden määritykset ovat akkreditoituja testausmenetelmiä.

Testausmenetelmiin liittyvät muut standardit:

- SFS-EN 12390-1:2021 Testing hardened concrete. Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds
- SFS-EN 12390-3:2019 Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens
- SFS-EN 12390-4:2019 Testing hardened concrete. Part 4: Compressive strength. Specification for testing machines.

Näytetiedot ja tilaajan toimittamat tiedot

Kohde: **Diplomityö**
Näytteiden toimitus: Tilaaja toimitti 3 kpl poralieriöitä laboratorioon 3.9.2021.
Koekappaleiden tiedot: ks. taulukko 1
Porauspäivämäärä: -
Testauspäivämäärä: 29.9.2021

Toimenpiteet laboratoriossa ja testaus

Poralieriöt olivat saapuessa vailla kosteuden haihtumista estävää suojausta. Poralieriöitä säilytettiin ennen käsittelyä laboratorio-olosuhteissa 20 ± 5 °C.

Poralieriöistä sahattiin koekappaleet ja niiden päädyt hiottiin siten, että korkeuden ja halkaisijan suhde oli 1:1 standardin SFS-EN 12390-1:2021 mukaisesti.

Koekappaleita säilytettiin sahauksen ja hionnan jälkeen laboratorio-olosuhteissa 16-24 tuntia ennen koestusta.

1.10.2021

Koekappaleiden tiheydet määritettiin toimitustilassa käyttäen koekappaleen massan ja mittojen mitattuja arvoja. Halkaisijaltaan < 100 mm koekappaleiden koko on kuitenkin standardin vaatimusta pienempi, joten tiheysmäärittäminen on suuntaa antava.

Koekappaleiden pinnalta mitattuna betonin kiviaineksen maksimirakekoko oli 7 mm.

Puristuslujuudet määritettiin standardin SFS-EN 12390-3:2019 mukaisesti. Puristuslujuuden testaus suoritettiin Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratorion Form + Test Alpha 3-3000 AR -laitteella.

Testaustulokset näytteistä on esitetty taulukossa 1.

Mahdolliset poikkeamat standardista tai poikkeamat koekappaleissa:

Koekappaleiden pienen testaus pinta-alan vuoksi koestuksessa käytettiin lisäniveltä.

Koekappaleille koestuksessa mitattu murtokuorma on alle koestuslaitteiston määritetyn mitta-alueen alarajan (200 kN). Näin ollen lujuudet ovat suuntaa antavia.

Koekappaleiden suorakulmaisuus ei täyttänyt standardin vaatimuksia.

Tulokset

Taulukko 1. Koekappaleiden puristuslujuudet.

tunnus	a) mitat, muoto (mm)	tiheys (kg/m ³)	murtokuorma (kN)	lujuus (MPa)
3.2	L 50x48	2260	90,3	46,0
3.4	L 50x49	2250	85,9	43,7
3.5	L 50x49	2260	87,0	44,3

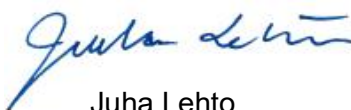
a) Mitat: Lieriönäytteissä (L) Ø x h.

Espoossa 30.9.2021

Vahanen Rakennusfysiikka Oy



Jere Pylkkänen
Laborantti



Juha Lehto
Asiantuntija

*Vahanen Rakennusfysiikka Oy, Laboratorio on FINAS-akkreditointipalvelun akkreditoima testauslaboratorio T328, akkreditointivaatimus SFS-EN ISO/IEC 17025. Akkreditoinnin piiriin kuuluvat petrografinen ohuthieanalyysi, betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohut-
hieistä, betonin puristuslujuuden ja tiheyden määrittäminen sekä betonin poralieriöiden näytteenotto.*

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.

Tämän asiakirjan osittainen kopiointi on kielletty ilman Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n kirjallista lupaa

Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratorio ei vastaa tilaajan toimittamien tietojen oikeellisuudesta.

1.10.2021

Tilaaaja: Tuomas Ryhänen
Tilaus: 31.8.2021
Tekijä: Vahanen Rakennusfysiikka Oy
Jere Pylkkänen, laborantti
Linnoitustie 5, 02600 Espoo
Puh: 044 7788 644
jere.pylkkanen@vahanen.com

BETONIN PURISTUSLUJUUDEN MÄÄRITYS RAKENNEKOEKAPPALEET

Testausmenetelmä

Betonin puristuslujuuden määrittäminen rakenteesta irrotetulle rakennekoekappaleelle tehdään standardin SFS-EN 12504-1:2019 + AC:2020 (Betonin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut koekappaleet) mukaisesti.

Betonin tiheyden määrittäminen tehdään standardin SFS-EN 12390-7:2019 + AC:2020 (Testing hardened concrete. Part 7: Density of hardened concrete) mukaisesti.

Betonin puristuslujuuden ja tiheyden määrittäykset ovat akkreditoituja testausmenetelmiä.

Testausmenetelmiin liittyvät muut standardit:

- SFS-EN 12390-1:2021 Testing hardened concrete. Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds
- SFS-EN 12390-3:2019 Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens
- SFS-EN 12390-4:2019 Testing hardened concrete. Part 4: Compressive strength. Specification for testing machines.

Näytetiedot ja tilaajan toimittamat tiedot

Kohde: Diplomityö
Näytteiden toimitus: Tilaaja toimitti 6 kpl poralieriöitä laboratorioon 31.8.2021.
Koekappaleiden tiedot: ks. taulukko 1
Porauspäivämäärä: -
Testauspäivämäärä: 29.9.2021

Toimenpiteet laboratoriossa ja testaus

Poraliöörit olivat saapuessa vailla kosteuden haihtumista estävää suojausta. Poraliöörit säilytettiin ennen käsittelyä laboratorio-olosuhteissa 20 ± 5 °C.

Poraliööristä sahattiin koekappaleet ja niiden päädyt hiottiin siten, että korkeuden ja halkaisijan suhde oli 1:1 standardin SFS-EN 12390-1:2021 mukaisesti.

Koekappaleita säilytettiin sahauksen ja hionnan jälkeen laboratorio-olosuhteissa 16-24 tuntia ennen koestusta.

1.10.2021

Koekappaleiden tiheydet määritettiin toimitustilassa käyttäen koekappaleen massan ja mittojen mittattuja arvoja. Halkaisijaltaan < 100 mm koekappaleiden koko on kuitenkin standardin vaatimusta pienempi, joten tiheysmäärittäksen tulos on suuntaa antava.

Koekappaleiden pinnalta mitattuna betonin kiviaineksen maksimiraekoko oli 19 mm.

Puristuslujuudet määritettiin standardin SFS-EN 12390-3:2019 mukaisesti. Puristuslujuuden testaus suoritettiin Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratorion Form + Test Alpha 3-3000 AR -laitteella.

Testaustulokset näytteistä on esitetty taulukossa 1.

Mahdolliset poikkeamat standardista tai poikkeamat koekappaleissa:

Koekappaleen 1.1 halkaisija ei täyttänyt kiviaineksen suurimman raekoon määrittäystä (= halkaisija vähintään 3 x maksimiraekoko).

Koekappaleiden pienen testaus pinta-alan vuoksi koestuksessa käytettiin lisäniveltä.

Koekappaleille koestuksessa mitattu murtokuorma on alle koestuslaitteiston määritetyn mitta-alueen alarajan (200 kN). Näin ollen lujuudet ovat suuntaa antavia.

Standardin mukainen suorakulmaisuusvaatimus täyttyi ainoastaan koekappaleiden 2.2 ja 2.5 osalta.

Tulokset

Taulukko 1. Koekappaleiden puristuslujuudet.

tunnus	a) mitat, muoto (mm)	tiheys (kg/m ³)	murtokuorma (kN)	lujuus (MPa)
2.2	L 49x51	2280	100,3	53,2
2.5	L 49x50	2280	101,6	53,9
2.6	L 49x51	2290	105,2	55,8
1.1	L 47x51	2250	80,1	46,2
1.2	L 49x50	2240	84,5	44,8
1.4	L 50x49	2320	100,2	51,0

a) Mitat: Lieriönäytteissä (L) Ø x h.

Espoossa 30.9.2021

Vahanen Rakennusfysiikka Oy



Jere Pylkkänen
Laborantti



Juha Lehto
Asiantuntija

Vahanen Rakennusfysiikka Oy, Laboratorio on FINAS-akkreditointipalvelun akkreditoima testauslaboratorio T328, akkreditointivaatimus SFS-EN ISO/IEC 17025. Akkreditoinnin piiriin kuuluvat petrografinen ohuthieanalyysi, betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohut-
hieistä, betonin puristuslujuuden ja tiheyden määrittäminen sekä betonin poralieriöiden näytteenotto.

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.

Tämän asiakirjan osittainen kopiointi on kielletty ilman Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n kirjallista lupaa. Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratorio ei vastaa tilaajan toimittamien tietojen oikeellisuudesta.

Liite 2 Kammioiden ilmatiiveyskoe

Kammioille tehtiin tiiveyskoe ennen radonläpäisevyyssmittauksen aloittamista. Suljettuun kammioon pumpattiin ylipaine, jonka jälkeen kammion paine-eron tasaantumista seurattiin noin 5 minuutin ajan. Mittausten perusteella kammioille määritetään vuotoilman määrä (tilavuusvirta) R_a [m^3/s] seuraavan kaavan avulla.

$$R_a = \frac{\partial p}{p_{kammio}} \times V_{kammio}$$

missä

∂p	on	kammion paine-eron muutos ajan funktiona [Pa/s]
p_{kammio}	on	kammion ilmanpaine [Pa]
V_{kammio}	on	kammion tilavuus [m^3]

Taulukko 1. Laboratoriokokeissa käytetyille kammioille määritetty ilmavuotoluvut R_a [m^3/s]

		∂p [Pas]	p_{kammio} [Pa]	V_{kammio} [m^3]	R_a [m^3/s]
Koekappale 1	Yläkammio	0,0335	101 357	0,0128	$4,23 \cdot 10^{-9}$
	Alakammio	0,129	101 350	0,0128	$1,63 \cdot 10^{-8}$
Koekappale 2	Yläkammio	0,0227	101 400	0,0128	$2,87 \cdot 10^{-9}$
	Alakammio	0,1549	101 350	0,0128	$1,96 \cdot 10^{-8}$
Koekappale 3	Yläkammio	0,21	101 350	0,0128	$2,65 \cdot 10^{-8}$
	Alakammio	0,0487	101 354	0,0128	$6,15 \cdot 10^{-9}$
Koekappale 4	Yläkammio	0,05268	101 352	0,0128	$6,65 \cdot 10^{-9}$
	Alakammio	0,1427	101 350	0,0128	$1,8 \cdot 10^{-8}$

Kammioiden ilmatiiveyttä testaavien painekokeiden perusteella voidaan todeta, että laboratoriokokeissa koekappaleisiin tiivistetyt kammiot ovat riittävän ilmatiiviitä, eikä se aiheuta epävarmuutta läpäisevyysskokeisiin.

Tuomas Ryhäsen diplomityö		Porattu 16.8.2021		20.8.2021	
Mittauskohta	Syvyys / Rakenne	Anturi nro.	t (°C)	RH (%)	abs (g/m ³)
Koekappale 1 reuna	Sisäilma	64	20,1	53,0	9,2
	10	69	20,0	54,4	9,4
	30	71	20,0	55,9	9,7
	50	62	20,0	58,3	10,1
	60	67	20,0	60,0	10,4
	80	63	20,0	57,8	10,0
					100,0
Koekappale 1 keskus	Sisäilma			100,0	
	10	72	19,8	57,5	9,8
	30	65	20,0	58,5	10,1
	50	70	19,9	57,9	10,0
	60	66	19,9	60,9	10,5
	80	61	20,0	60,7	10,5
					100,0
Koekappale 2 reuna	Sisäilma			100,0	
	10	59	20,1	57,9	10,1
	30	50	20,2	60,1	10,5
	50	60	20,2	62,7	11,0
	60	55	20,1	63,2	11,0
	80	54	19,8	66,9	11,4
					100,0
Koekappale 2 keskus	Sisäilma			100,0	
	10	57	19,8	57,7	9,9
	30	51	20,0	59,4	10,3
	50	58	19,9	62,5	10,7
	60	52	20,2	64,0	11,2
	80	49	19,9	63,4	10,9
					100,0
				100,0	
				100,0	

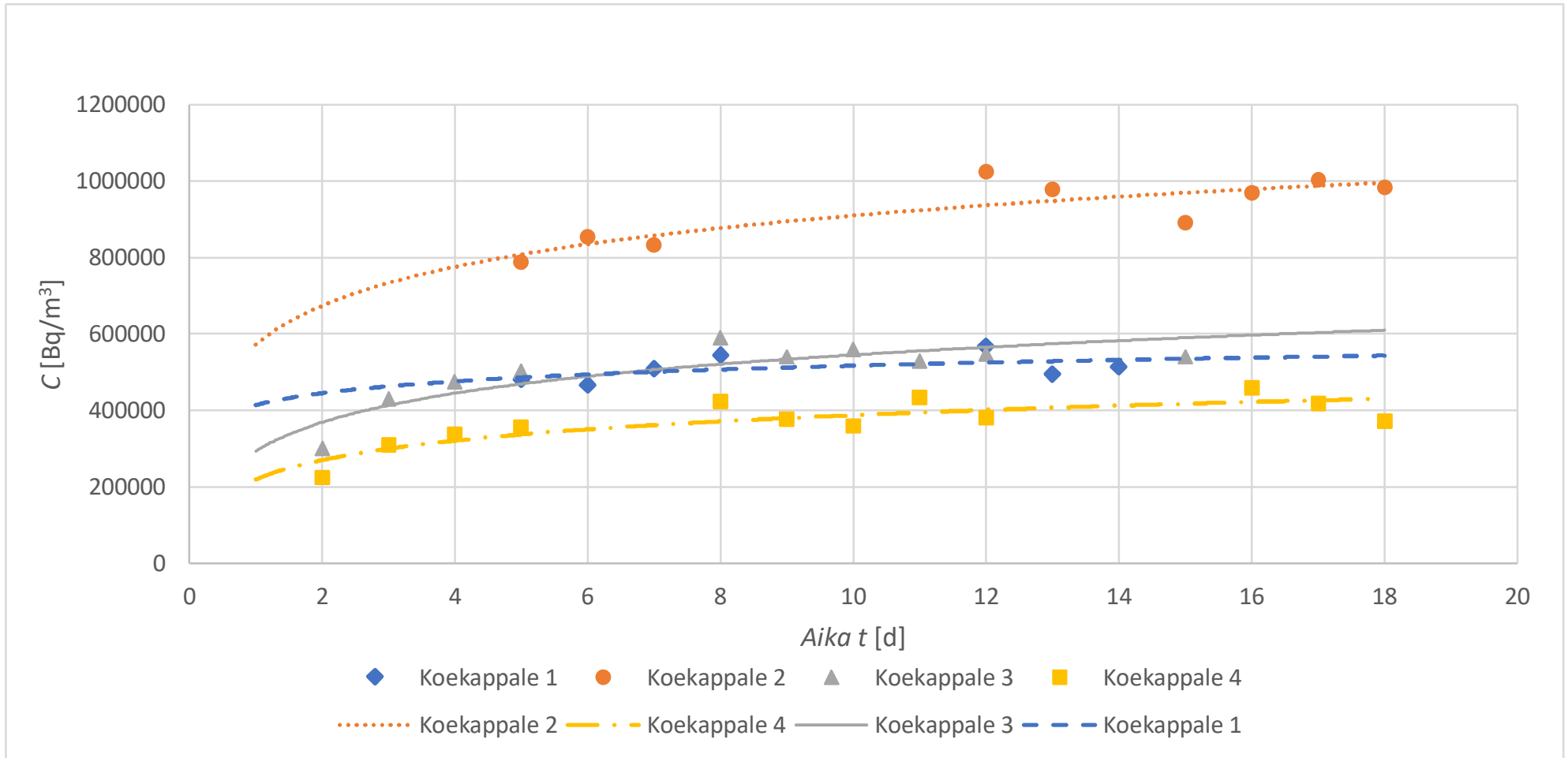
Kohde		Porattu 30.8.2021		2.9.2021	
Mittauskohta	Syvyys / Rakenne	Anturi nro.	t (°C)	RH (%)	abs (g/m ³)
Koekappale 3 keskus	Sisäilma			100,0	
	10	61	20,2	50,9	8,9
	20	69	20,2	50,6	8,9
	30	64	20,3	50,6	8,9
	40	63	20,2	49,4	8,6
				100,0	
				100,0	
				100,0	
Koekappale 3 reuna	Sisäilma			100,0	
	10	68	20,3	50,0	8,8
	20	70	20,2	48,4	8,5
	30	66	20,2	50,6	8,8
	40	62	20,3	50,4	8,9
				100,0	
				100,0	
				100,0	

Kohde		Porattu 14.9.2021		17.9.2021	
Mittauskohta	Syvyys / Rakenne	Anturi nro.	t (°C)	RH (%)	abs (g/m ³)
Koekappale 4 keskus	Sisäilma		20,0	100,0	17,3
	10	19	20,2	49,4	8,6
	20	20	19,9	50,4	8,7
	30	169	20,3	49,3	8,7
	40	168	20,4	50,2	8,9
				100,0	
				100,0	
				100,0	
				100,0	
Koekappale 4 reuna	Sisäilma			100,0	
	10	23	20,2	49,9	8,7
	20	21	20,1	50,6	8,8
	30	22	20,2	50,5	8,8
	40	24	20,4	50,5	8,9
				100,0	
				100,0	
				100,0	
				100,0	

Kohde		Porattu 30.8.2021		2.9.2021	
Mittauskohta	Syvyys / Rakenne	Anturi nro.	t (°C)	RH (%)	abs (g/m ³)
Koekappale 1 vierusta	Sisäilma	TA15	18,6	0,0	
	30	TA13	19,0	48,4	7,9
	60	TA12	18,0	49,4	7,6
	lämmöneriste	TA17	18,7	66,5	10,7
	seveli	TA19	15,0	91,3	11,7
				100,0	
				100,0	
Koekappale 2 vierusta	Sisäilma	TA1	20,8	75,5	13,7
	30	TA18	20,4	66,1	11,7
	60	TA10	20,5	68,4	12,2
	lämmöneriste	TA16	19,6	74,9	12,6
	seveli	TA11	16,7	94,6	13,5
				100,0	
				100,0	
Koekappale 3 ja 4 vierusta	sisäilma			100,0	
	15	TA9	21,5	45,9	8,7
	35	TA6	21,6	47,9	9,1
	lämmöneriste	TA16	20,6	48,7	8,7
	sora	TA7	17,6	60,1	9,0
				100,0	
				100,0	

Mittauskohta	Syvyys / Rakenne	Anturi nro.	t (°C)	RH (%)	abs (g/m ³)
Koekappaleen 1 leikkauspinta	Sisäilma	TA8	20,5	43,5	7,7
	30	TA13	21,1	46,3	8,5
	60	TA17	21,2	48,3	8,9
Koekappaleen 2 leikkauspinta	Sisäilma	TA8	20,5	43,5	7,7
	30	TA16	20,8	66,8	12,1
	60	TA18	21,2	62,9	11,7
Koekappaleiden 3 ja 4 leikkauspinta	Sisäilma	H6	22,1	61,0	11,9
	15	TA3	22,0	45,4	8,8
	35	TA9	22,0	46,9	9,1

Liite 6
Alakamion radonpitoisuuden
tasaantuminen ennen
radonläpäisevyyden mittauksia



Liite 7
Koekappaleiden punnitustulokset
huokoisuuden määrittämismerk-
kuivamenetelmän.

