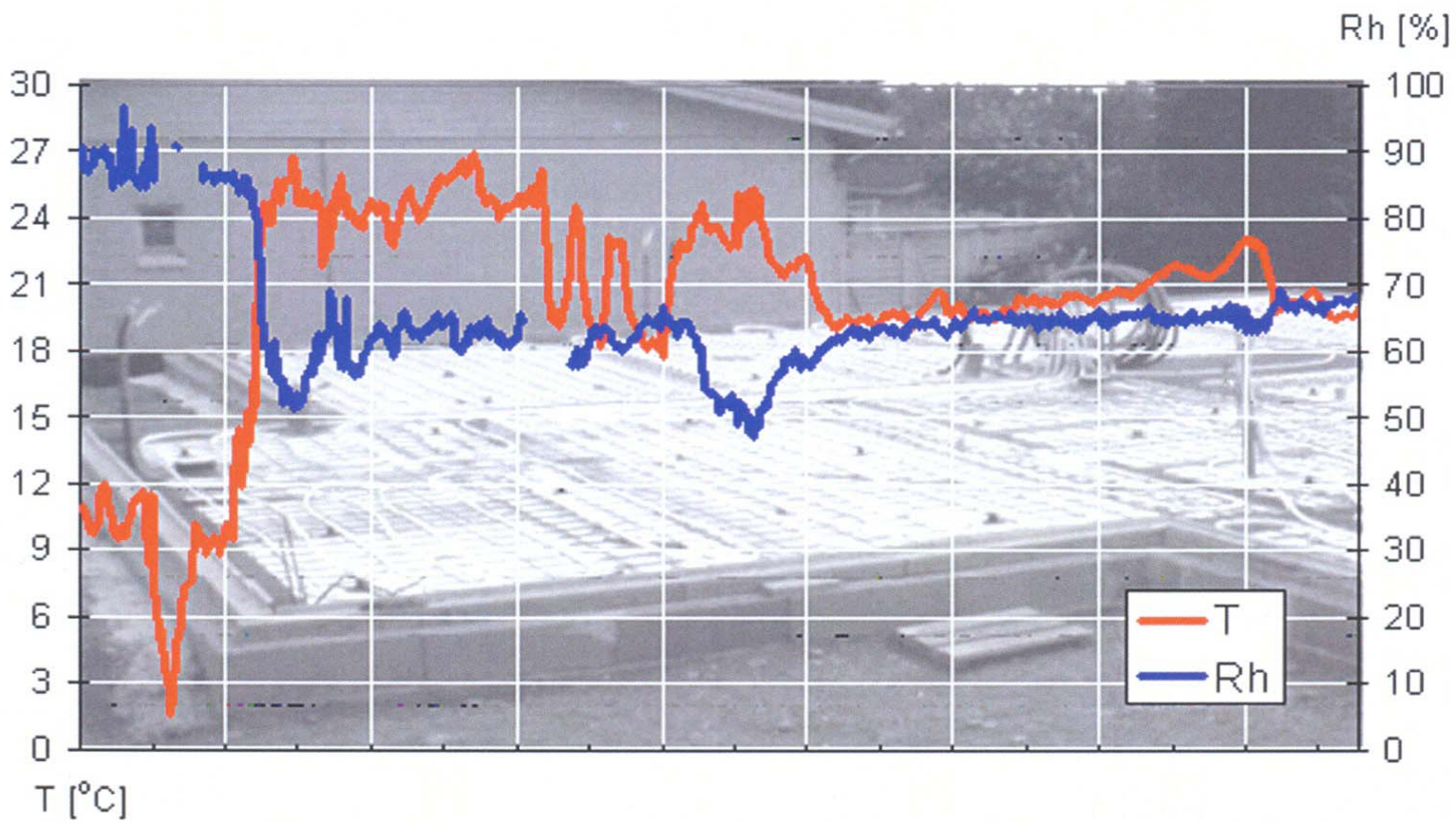




Virpi Leivo, Jukka Rantala

## Lattialämmitetyn alapohjarakenteen rakennusfysikaalinen toiminta



Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan osasto. Talonrakennustekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 128  
Tampere University of Technology. Department of Civil Engineering. Structural Engineering Laboratory. Research report 128

Virpi Leivo, Jukka Rantala

## **Lattialämmitetyn alapohjarakenteen rakennusfysikaalinen toiminta**

Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan osasto. Talonrakennustekniikan laboratorio

Tampere 2005

ISBN 952-15-1359-4 (nid.)  
ISBN 978-952-15-2708-1 (PDF)  
ISSN 1459-4102

## ALKUSANAT

Julkaisu on tutkimushankkeen 'Lattialämmityksen rakennusfysikaalinen toiminta' loppuraportti. Tutkimus on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Talonrakennustekniikan laboratoriossa professori Ralf Lindbergin johdolla. Julkaisun ovat kirjoittaneet DI Virpi Leivo ja TkL Jukka Rantala.

Tutkimuksen rahoittajina ovat toimineet Teknologian kehittämiskeskus Tekes, sekä Lohja Rudus Oy, NCC Finland Oy, Thermisol Oy, SPU-Systems Oy, H+H Siporex Oy, Upofloor Oy ja Linterm Oy.

Tutkimuksen johtoryhmätyöskentelyyn ovat osallistuneet:

Pentti Lumme	Lohja Rudus Oy, johtoryhmänpuheenjohtaja
Tapio Kilpeläinen	Thermisol Oy
Tapio Kaskela	H+H Siporex Oy
Pasi Käkelä	H+H Siporex Oy
Tapani Tuominen	SPU –Systems Oy
Mervi Huhtelin-Lahti	NCC Finland Oy
Matti Salo	Upofloor Oy
Björn Lindgren	Linterm Oy
Mats Lindgren	Linterm Oy
Lasse Pöyhönen	TEKES
Ralf Lindberg	TTY
Virpi Leivo	TTY
Jukka Rantala	TTY

Kiitämme rahoittajia ja kaikkia projektiin osallistuneita heidän työpanoksestaan.

Tampereella 2.5.2005

*Kirjoittajat*



## TIIVISTELMÄ

Lattialämmitetyn alapohjan alapuolisen maan lämpötilakenttään vaikuttavat laatan lämpötila, ulkolämpötila ja perusmaan lämpötila sekä lämmityselementin alapuolisen rakenteen lämmönvastus, routa- ja sokkelieristyksen lämmönvastukset ja maan lämmönvastus. Ulkolämpötila vaikuttaa pohjamaan lämpötilaan merkittävästi vain noin 1,5... 2 metrin etäisyydelle ulkoseinälinjasta, keskemällä rakennusta lämpötilaan vaikuttaa pääasiassa laatan lämpötila. Johtuen ulkolämpötilan vaikutuksesta rakennuksen reuna-alueen lämpötilaan, pohjamaan lämpötiloissa rakennuksen reuna- ja keskialueella on eroa. Mitä vähemmän rakennuksen sokkelissa on lämmöneristystä, sitä viileämmäksi rakennuksen reuna-alueen lämpötila putoaa talvella. Pohjamaan lämpötila vaikuttaa merkittävästi rakenteen kosteustekniseen toimintaan sekä energiatalouteen.

Lämmitetyn betonilaatan ja pohjamaan välille muodostuu suurempi lämpötilagradientti kuin lämmittämättömässä ja tästä syystä laatta kuivuu myös alaspäin, mikäli laatan alapuolella ei ole vesihöyrynvastuskerroksia. Koska pohjamaa rakennuksen reuna-alueella on varsinkin talvella viileämpi, laatta kuivuu hieman nopeammin rakennuksen reuna- kuin keskialueella.

Lattialämmitetyssä alapohjassa maahan johtuvat lämpöhäviöt ovat aina suurempia kuin lämmittämättömässä johtuen laatan korkeammasta lämpötilasta ja -gradientista. Teoreettisesti lämpövuoto lämmityksessä laatussa maahan on noin 30% suurempi kuin lämmittämättömässä, kun molemmissa on sama laatan alapuolinen lämmöneristys. Jos halutaan, että lämmityksessä laatussa lämpövuoto maahan on samansuuruinen kuin lämmittämättömässä lämmöneristettä on lisättävä. Laatan lämpötilan ollessa keskimäärin +25 °C, energiataloudellinen lämmöneristeen lämmönvastus  $R$  on 4,0...5,5 m<sup>2</sup> K/W, joka vastaa EPS-lämmöneristeellä eristepaksuutta noin 150...200 mm.

Kosteudenliikkeet betonilaatassa ovat hitaita ja muutaman päivän laatan lämmittäminen ei kuivata laattaa paljoakaan. Pisteittäisesti (esim. vesikiertoinen lattialämmitys) lämmitetyn betonilaatan kosteuskentässä on selvä ero lämmityselementtien läheisyydessä (noin 50 mm päähän) ja elementtien keskellä. Laatan kuivuminen alkaa lämmityselementin läheisyydestä ja jatkuu jonkin verran nopeampana kuivumisjakson ajan. Riippuen laatan lämpötilasta ja muista kuivumisolosuhteista (sisäilman ja pohjamaa lämpötilasta ja kosteudesta) kriittiseltä syvyydeltä (40% laatan paksuudesta) lämmityselementin läheltä ja elementtien keskeltä mitatuissa suhteellisen kosteuden arvoissa voi olla jopa yli 5 RH%:n ero. Rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta on oleellista, että laatta pinnoitetaan riittävän kuivana. Mallinnusten mukaan lämmitetyn betonilaatan kosteustekninen toiminta lämmityselementtien keskellä noudattaa melko hyvin lämmittämättömän laatan teoreettista toimintaa. Tästä syystä on tärkeää määritellä pinnoittamiskriteeri lämmityselementtien keskeltä, ei niiden viereltä.

Lattialämmitetyn rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisin on laatan pinnoittaminen. Pinnoittamisen jälkeen lämmitetyssä laatussa pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus nousee nopeammin ja saavuttaa maksimitasonsa aiemmin kuin lämmittämättömässä laatussa. Mitä korkeampi on laatan lämpötila heti pinnoittamisen jälkeen, sitä korkeammalle pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus nousee.



## SISÄLLYSLUETTELO

### ALKUSANAT

### TIIVISTELMÄ

### SISÄLLYSLUETTELO

1	LATTIALÄMMITYS SUOMALAISESSA RAKENTAMISESSA .....	9
1.1	Lattialämmitysjärjestelmät .....	9
1.1.1	Vesikiertoinen lattialämmitys .....	10
1.1.2	Sähköinen lattialämmitys .....	10
1.1.3	Ilmakiertoinen lattialämmitys .....	11
1.1.4	Muut lattialämmitysmuodot .....	11
1.1.5	Lattialämmityksen säätö ja mitoitus .....	11
1.2	Lattialämmitetyn rakenteen rakennesuositukset .....	14
1.2.1	Maanvastainen alapohja .....	14
1.2.2	Tuulettuva alapohja .....	14
1.2.3	Välipohja .....	15
1.2.4	Lattialämmityksen asennus ja käyttöönotto .....	15
1.2.5	Lattian pinnoitemateriaalit .....	16
2	MAANVARAISEN LÄMMITETYN ALAPOHJARAKENTEEN LÄMPÖTILAKENTTÄ	18
2.1	Materiaalien lämpökäyttäytyminen ja lämpöparametrit .....	18
2.1.1	Rakennekerrosmateriaalit .....	20
2.1.2	Täyttö- ja pohjamaakerrokset .....	20
2.2	Lämpötilakentän muodostuminen .....	23
2.2.1	Häiriintymättömässä pohjamaassa vallitseva lämpötilakenttä .....	25
3	MAANVARAISEN LÄMMITETYN ALAPOHJARAKENTEEN KOSTEUSKENTTÄ	27
3.1	Materiaalien kosteuskäyttäytyminen ja materiaaliparametrit .....	27
3.1.1	Huokoisen materiaalin kuivuminen ja tasapainokosteus .....	27
3.1.2	Kosteusvirran perusyhtälöt .....	28
3.1.3	Betonirakenteen kuivuminen .....	29
3.1.4	Kuivumisen teoreettinen tarkastelu .....	36
3.2	Kosteuskentän muodostuminen .....	38
3.3	Maanvastaisen alapohjan kosteuskäyttäytyminen, teoreettiset mallinnukset .....	39
3.3.1	Käytetyt laskentaohjelmat ja –mallit .....	39
3.3.2	Yleistä maanvastaisen betonilaatan kuivumisesta .....	41
3.3.3	Lämmitetty laatta .....	45
4	LATTIALÄMMITYKSEN ENERGIANKULUTUS .....	57
4.1	Rakennuksen energiankulutus, laskentamenetelmä .....	57
4.1.1	Lattialämmityksen aiheuttamat lämpöhäviöt, laskentamenetelmä .....	57
4.2	Teoreettiset laskelmat .....	58
4.2.1	Alapohjan lämpöhäviöt .....	58
4.2.2	Rakennuksen lämmöntarve .....	59
4.2.3	Lattialämmitetyn laatan lämpötilan vaikutus lämpöhäviöihin .....	61
5	KENTTÄMITTAUKSET .....	62
5.1	Koekohteet .....	62
5.1.1	Kohde A .....	63
5.1.2	Kohde B .....	71
5.1.3	Kohde C .....	75
5.1.4	Kohde D .....	79
5.2	Kenttämittausten tulokset .....	85
5.2.1	Kohde A .....	85



5.2.2	Kohde B.....	91
5.2.3	Kohde C .....	93
5.2.4	Kohde D .....	98
5.3	Kenttämittaustulosten yhteenveto ja vertailu.....	99
6	PAIKALLA VALETUN ALAPOHJALAATAN KUIVUMINEN - LABORATORIOKOKKEET .....	111
6.1	Koejärjestelyt .....	111
6.2	Mittaustulokset.....	113
6.2.1	Lämmitetty laatta ja muovimatto.....	114
6.2.2	Lämmitetty laatta ja parketti.....	115
6.2.3	Lämmittämätön laatta ja muovimatto.....	117
6.2.4	Lämmittämätön laatta ja parketti .....	118
6.3	Vertailulaskelmat.....	119
6.3.1	Laatan kuivuminen ennen pinnoitteen asentamista.....	119
6.3.2	Laatan kosteuskäyttäytyminen pinnoittamisen jälkeen.....	122
6.4	Tulosten tarkastelu.....	125
7	LATTIALÄMMITETYN ALAPOHJARKENTEEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSKÄYTTÄYTYMISEN TARKASTELU .....	129
7.1	Lattialämmityksen vaikutus pohjamaan lämpötilaan ja lämpöhäviöihin maahan....	129
7.2	Pohjamaan lämpötilan vaikutus kosteuskäyttämiseen .....	132
7.3	Lattialämmityksen vaikutus betonilaatan kuivamiseen.....	132
8	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	135
	LÄHTEET.....	137

## 1 LATTIALÄMMITYS SUOMALAISESSA RAKENTAMISESSA

Lattialämmitys on merkittävästi yleistynyt Suomessa viimeisten vuosien aikana, erityisesti pientaloissa. Yhtenäisiä ohjeita lämmitetyn rakenteen rakenteista ei ole kuitenkaan olemassa.

### 1.1 Lattialämmitysjärjestelmät (Anttila 2003)

Lämmönjakotapoja eli keinoa, jolla lämpö siirretään huoneilmaan, voivat olla esimerkiksi lattialämmitys, kattolämmitys, patterilämmitys tai ikkunalämmitys. Lämmönjakotavan valinta huonetilaan riippuu muun muassa siitä, kuinka laadukas lämmitysjärjestelmä halutaan, tilojen käyttötarkoituksesta, huonetilan sijainnista rakennuksessa, muista lämmityslaitteista, lämpöenergian varaamistarpeesta sekä ennen kaikkea rakentajan henkilökohtaisista mieltymyksistä. Lattialämmitystä nimitetään usein myös säteilylämmitykseksi, koska säteilylämmönsiirron osuus kokonaislämmönsiirrosta on suuri, noin 50...60 % (Seppänen 1995). Lattialämmitystä voidaan käyttää yksinään rakennuksen lämmönjakotapana tai se voidaan yhdistää muiden lämmönjakotapojen, esimerkiksi pattereiden, rinnalle. Lattialämmitys voidaan asentaa myös jälkikäteen, esimerkiksi uusittaessa kylpyhuoneen lattiapinnoitetta. Lattialämmitys voidaan asentaa betoni-, puu- ja levyrakenteisiin lattioihin. Erilaiset lattiarakenteet vaikuttavat tapaan, jolla lämmityspotket ja –kaapelit asennetaan.

Lattialämmitysmuotoja ovat suora, osittain varaava ja varaava lattialämmitys. Raja eri järjestelmien välillä ei ole kovinkaan selvä ja lämmitysjärjestelmän käyttäjä vaikuttaa ohjaustoimenpiteillään, mihin ryhmään hänen lämmitysjärjestelmänsä kuuluu.

Suorassa lattialämmityksessä pidetään joko laatan tai huoneilman lämpötila tasaisena. Suora lattialämmitys ei tarvitse lisälämmittämiä. Vaikka sähköinen lattialämmitys olisi mitoitettu ja suunniteltu toimimaan suorana, voidaan energiankulutusta painottaa yöajalle betonirakenteisissa lattioissa muuttamalla lattialämmityksen asetusarvoja. Suorassa lattialämmityksessä ei laatan lämpötila laske päivän aikana niin alas kuin varaavassa lattialämmityksessä, vaan pysyy huoneen lämmöntarvetta vastaavalla tasolla (Rautiainen 1997). Suoraa lattialämmitystä käytetään aina puu- ja levyrakenteisissa lattioissa, koska niiden lämpökapasiteetti on niin pieni, ettei niihin voida varata lämpöenergiaa (Tirkkonen 1995).

Osittain varaava lattialämmitys on päällä ainoastaan yöllä ja tasaavilla lämmittimillä pidetään huoneilman lämpötila halutulla tasolla, kun lattiasta saatava teho ei enää riitä. Tilat, joita käytetään myös oleskeluun, edellyttävät tarkoin asettelussaan pysyvää huonelämpötilaa. Kun lattialämmitystä näissä tiloissa käytetään osittain varaavana ja yökytkentäisenä, voidaan patterilämmitys asentaa tasaamaan huonetilaan syntyvää lämpötehovajetta lattian jäähtyessä iltaan mennessä. Varsinkin kovilla pakkasilla huoneilman lämpötila pyrkii laskemaan illalla liian matalaksi, jolloin lisälämmittimet kytkeytyvät päälle ja huoneilman lämpötila pysyy asetteluarvossaan. Täydentävät lämmittimet on myös mahdollista jättää pois ja kytkeä lattialämmitys päiväkäyttöiseksi.

Varaavaa lattialämmitystä käytetään vain sähköisen lattialämmityksen yhteydessä betoni- tai ontelolaattalattioissa. Varaavassa käyttötavassa yöllä laattaan varataan energiaa lämpötilaa nostamalla ja päivällä laatta jäähtyy lähes huoneilman tasolle (Rautiainen

1997). Täysin varaavana lattialämmitystä voidaan käyttää lämpötilan tasaisuusvaatimuksen kannalta toisarvoisissa tiloissa, kuten autotalleissa ja varastoissa. Tällöin sallitaan muutamaa asteen päivittäinen lämpötilan vaihtelu lattian pinnassa.

### 1.1.1 Vesikiertoinen lattialämmitys

Vesikiertoisen lattialämmityksen lämmöntuottomuodoksi soveltuu mikä tahansa lämmitysmuoto kuten öljy, kaukolämpö, sähkö, lämpöpumppu (LVI 13-10261, 1996). Lattialämmitysputkina käytetään happidiffuusiosuojalla varustettua muoviputkea tai muovipinnoitettua kupariputkea. Jakorunkojen ja –säätimien, venttiilien, liittimien yms. lattialämmitysverkostoon liittyvien varusteiden ja osien tulee olla sinkkikadon kestävä messinkiä tai muuta syöpymätöntä ainetta. Taulukossa 1.1 on vesikiertoiselle lattialämmitykselle ohjeellisia suositus-, vähimmäis- ja enimmäisarvoja (LVI 13-10261, 1996).

Taulukko 1.1. Lattialämmityksen ohjeellisia suositus-, vähimmäis- ja enimmäisarvoja (LVI 13-10261, 1996).

	Suositusarvo	Vähimmäisarvo	Enimmäisarvo
Menoveden lämpötila [°C]	35...50 <sup>1)</sup>	25...30 <sup>1)</sup>	50 <sup>1)</sup>
Meno-/paluueden lämpötilaero [°C]	5...10 <sup>1)</sup>		
Lattian pintalämpötila [°C]	25...27 <sup>2)</sup>	23 <sup>2)</sup>	30 <sup>2)</sup>
Putkien asennusväli [mm]	150...200	50	300
Yhden lattialämmityspiirin painehäviö [kPa]	15...20		
Asennussyvyys [mm]	40	30	70
Kiertoveden virtausnopeus			
- muoviputki [ <sup>m</sup> / <sub>s</sub> ]	0,3	0,1	1,0
- kupariputki [ <sup>m</sup> / <sub>s</sub> ]	0,3	0,1	0,8

1) Riippuu lattiarakenteesta

2) Laskennallinen raja-arvo, riippuu lattianpäällysteestä, huonetilan käyttötarkoituksesta ja keskimääräisistä lämpöhäviöistä

- tiloissa, joissa säännöllisesti työskennellään seisten, lattian pintalämpötila on  $\leq +25$  °C
- asuinhuoneiden lattian pintalämpötila on  $\leq +25...+27$  °C
- kylpyhuoneissa, WC:ssä, uimahalleissa ja tiloissa, joita käytetään harvoin, lattian pintalämpötila on  $\leq +30$  °C
- varastoissa, autotalleissa yms. tiloissa lattian pintalämpötilana voidaan käyttää vähimmäisarvoa + 23 °C, jos lämpötehtävyksen salli.

### 1.1.2 Sähköinen lattialämmitys

Sähköinen lattialämmitys voidaan tehdä käyttämällä kaapeleita tai valmiita kaapelielementtejä. Varsinkin pitkiä lämmityskaapeleita asennettaessa on siirrytty käyttämään pääasiassa valmiita kaapelielementtejä, joihin alku- ja loppupääte sekä kylmäkaapeli on tehty valmiiksi. Kukin kaapelielementti on omassa laatikossaan ja pitkät kaapelit on yleensä kelattu kertakäyttökeloille asennustyön helpottamiseksi. Pelkkä sähköinen lattialämmitys soveltuu hyvin huoneeseen, jossa ylläpidetään suhteellisen

korkeaa lämpötilatasoa, oleskellaan vain vähän aikaa kerrallaan tai joissa lämpötilan säädön tarkkuudelle ei aseteta huippuluokan tarkkuusvaatimuksia, esimerkiksi pesutilat ja toisarvoiset tilat (Tirkkonen 1995).

### 1.1.3 Ilmakiertoinen lattialämmitys

Ilmakiertoisessa lattialämmityksessä lämmin ilma kiertää betonilaatan sisään valetuissa putkissa. Kyseessä on suljettu uudelleenkiertävä ilmalämmitysjärjestelmä. Ilmaa ei oteta sisään eikä sitä päästetä pois. Ilmakiertoisen lattialämmityksen lämmöntuottomuodoksi soveltuu mikä tahansa lämmitysmuoto kuten öljy, kaukolämpö, sähkö, lämpöpumppu. Lämmityspotken halkaisija on noin 100 mm. Järjestelmään kuuluu kanavien lisäksi lämmitysyksikkö. Se on valettu laatan sisään ja sitä huolletaan tarkistusluukun kautta. Lämmitysyksikössä on lämmityskennosto ja puhallin. Lämmitin kehittää tarvittavan lämmön. Lämmityskennosto voi koostua sähkövastuksista tai vesipatterista lämmitysmuodosta riippuen.

### 1.1.4 Muut lattialämmitysmuodot

Sähköinen lattialämmitys voidaan tehdä myös käyttämällä erilaisia lattialämmityskelmuja ja -folioita. Lämmityskelmut muodostuvat kahden kaksoismuovikalvon väliin laminoidusta metallifoliosta tai hiilestä. Metallia sulaa noin +140°C lämpötilassa. Lattialämmityskelmujen vakioleveys on 600 mm, tilauksesta on saatavissa muitakin leveyksiä. Kelmuja valmistetaan 60, 90 ja 120 W/m<sup>2</sup> tehoisina (Kara 1994).

### 1.1.5 Lattialämmityksen säätö ja mitoitus

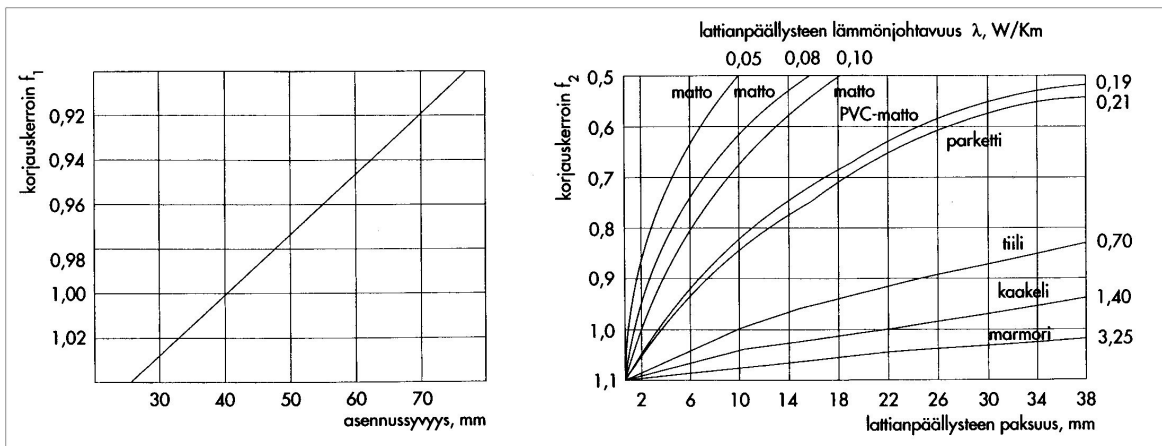
Lattiasta huoneilmaan siirtyvä lämpöteho on suoraan verrannollinen lattian pinnan ja huoneilman väliseen lämpötilaeroon. Mitä suurempi lämpötilaero on, sitä suurempi teho siirtyy huonetilaan. Vastaavasti lämpötilaeron pienentyessä pienenee myös lattiasta huoneilmaan siirtyvä lämpöteho. Lattialämmitystä voidaan säätää huonekohtaisesti joko lattian tai huoneilman lämpötilan mukaan tai keskitetyillä säätöjärjestelmillä. Valintaan vaikuttavat viihtyvyystekijät sekä lattialämmityksen käyttötapa ja tehomitoitus.

Asunnon lämmitysjärjestelmät tulisi suunnitella siten, että lämpötila on optimaalinen tai jopa niin, että tilojen käyttäjä voi valita lämpötilan mieleisekseen. Lattialämmityksellä voidaan kattaa koko lämmöntarve, ellei lattian pintalämpötilaa jouduta nostamaan viihtyvyyden tai lattian pinnoitemateriaalin kannalta liian korkeaksi, yli +29°C:een. Näin ollen jos sisäilman lämpötila on +21°C, voi lattian pinnan ja huoneilman välinen lämpötilaero olla suurimmillaan +8°C (Rautiainen 1997). Uusissa pientaloissa lämpöhäviöt ovat yleensä 40...60 W/m<sup>2</sup>. Tällöin useimmissa tapauksissa lattialämmitys riittää huoneen ainoaksi lämmönlähteeksi. Mikäli huoneen lämpöhäviöt ovat tätä suurempia, tarvitaan usein tasaavia lämmittämiä.

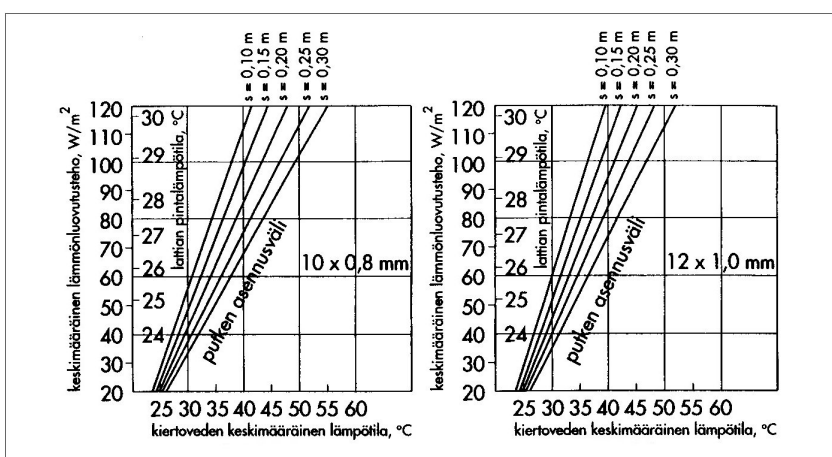
Lattialämmityksen suunnittelun perusta on mitoitustilanne eli vuoden kylmin vuorokausi. Nämä niin sanotut mitoitusvuorokauden lämpötilat ovat taulukoituna paikkakuntaakohtaisesti. Huonekohtainen lämmöntarve lasketaan RakMK osan D5, Rakennuksen lämmityksen tehon- ja energiantarpeen laskenta (RakMK D5, 2003), mukaan. Lämpöhäviöt koostuvat pääasiassa vaipan läpi ulkoilmaan johtuvasta lämpötehosta sekä ilmanvaihdon aiheuttamista lämpöhäviöistä. Lämmityksellä korvataan huoneessa johtumis- ja ilmanvaihtohäviöinä syntynyt lämmöntarve. Lämpöhäviölaskelmat tulee tehdä aina huonekohtaisesti, kuten myös lattialämmityspotkistojen, -kaapelien ja –

elementtien mitoitus (Tirkkonen 1995). Lämmöntarve jaetaan huoneen vapaalla lattiapinta-alalla, jolloin saadaan keskimääräinen lämmöntarve lattianeliötä kohden. Lattialämmityksen mitoittaminen aloitetaan yleimmästä kerroksesta.

Vesikiertoisessa lattialämmityksessä valitaan lämpöhäviöiden laskemisen jälkeen mitoituslämpötilat. Tämän jälkeen tehdään korjaukset asennussyvyydestä ja lattiapäällysteestä johtuen esimerkiksi LVI-kortissa 13-10261 (LVI 13-10261, 1996) olevilla taulukoilla, joita on esitetty kuvassa 1.1. Tämän jälkeen valitaan lattialämmityspotkien asennusväli käyttämällä esimerkiksi taulukoita. Kuvassa 1.2 on esitetty joitakin käyrästäjä (LVI 13-10261, 1996) muoviputkien asennusvälien määrittämiseen, kun asennussyvyys on putken keskeltä lattiapintaan 40 mm, huonelämpötila on +20°C, alapohjan keskilämpötila on +5°C, alapohjan lämmöneristys  $\geq 50$  mm ja lattiapäällysteenä on muovilaatta. Tämän jälkeen määritellään eri piirien vesivirrat ja suunnitellaan huonetilojen lattialämmityspiirit. Lopuksi mitoitetaan runkoputkisto, säätöventtiilit, paisunta- ja varolaitteet, pumpput, lämmönlähteet yms. laitteet.



Kuva 1.1 Asennussyvyyden ja lattiapäällysteen korjauskertoimet (LVI 13-10261, 1996).

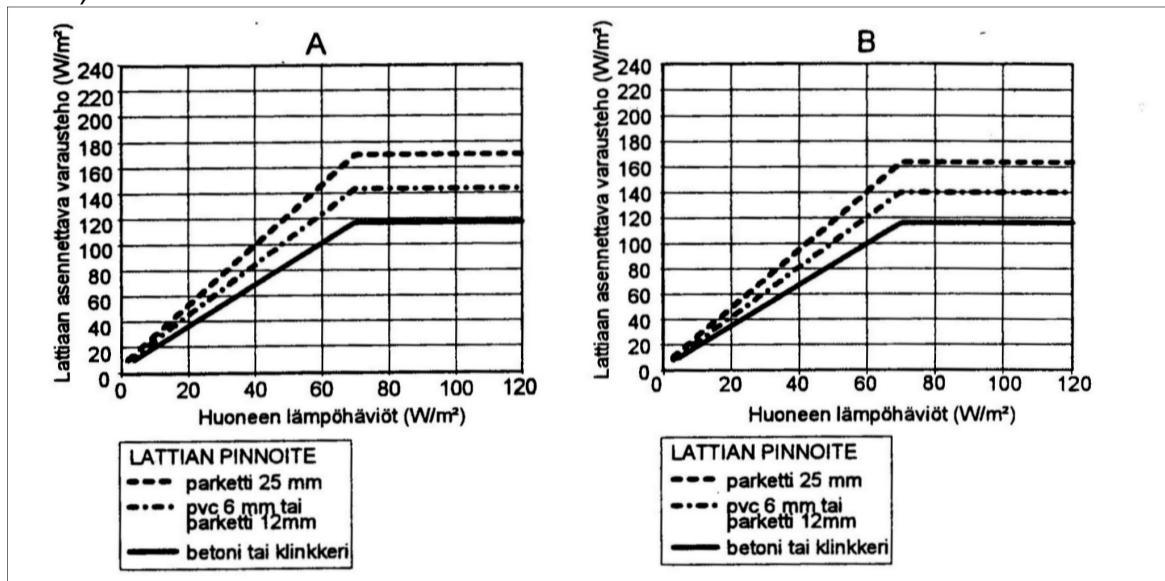


Kuva 1.2 Muoviputkien asennusväli, kun putket on asennettu maanvaraiseen betonilaattaan (asennussyvyys putken keskeltä lattiapintaan on 40 mm, huonelämpötila on +20°C, alapohjan keskilämpötila on +5°C, alapohjan lämmöneristys  $\geq 50$  mm ja lattiapäällysteenä on muovilaatta) (LVI 13-10261, 1996).

Vesikiertoinen lattialämmitys betonilatioissa voidaan myös mitoittaa standardien (SFS-EN 1264-2, 1998) ja (SFS 1264-3, 1998) mukaan. Näissä standardeissa on annettu tarkemmat kaavat vesikiertoisen lattialämmityksen mitoittamiseen kuin (LVI 13-10261, 1996). Standardissa (SFS-EN 1264-2, 1998) lasketaan lämpövirran suuruutta. Lämpövirran suuruuteen vaikuttavat lämmitysputkien asennusväli, etäisyys lämmitysputkista lattian pintaan, lattian ja lattiapinnoitteen lämmönjohtavuus, lämmitysputken halkaisija sekä lämpötila lämmitysputkistossa ja huoneessa.

Monilla vesikiertoisen lattialämmityksen toimittajalla on omat käyrästönsä lattialämmityksen mitoittamiseen. Nämä käyrästöt yleensä perustuvat joko ohjeeseen (LVI 13-10261, 1996) tai standardiin (SFS-EN 1264, 1998).

Sähköisen lattialämmityksen mitoittamiseksi on olemassa myös valmiita käyrästöjä. Jotkut käyrästöt eivät ota huomioon lämmittiminä toimivien rakenteiden, kuten alapohjien, läpi tapahtuvia lämpöhäviöitä. Joissakin käyrästöissä on valmiiksi otettu huomioon lattialämmityksestä maaperään tai alakertaan suuntautuva lämpöteho (Tirkkonen 1995). Kuvassa 1.3 on mitoituskäyrästö maanvaraiseen betonilattiaan asennettavan varaustehon määrittämiseksi huoneen lämpöhäviöiden perusteella, kun betonilaatan paksuus on 100 mm ja laatan alla on joko 100 mm tai 200 mm polystyreeniä lämmöneristeenä (Tirkkonen 1992).



Kuva 1.3 Maanvaraiseen betonilattiaan asennettavan varaustehon määrittäminen huoneen lämpöhäviöiden perusteella, kun betonilaatan paksuus on 100 mm ja laatan alla on a) 100 mm b) 200 mm polystyreenieristys (Tirkkonen 1992).

Pelkästään yöllä päällä olevan varaavan lattialämmityksen teho mitoitetaan 2...2,5 kertaa lämpöhäviöiden suuruiseksi. Varaavan lattialämmityksen tehon tulee olla suuruusluokkaa 70...120  $W/m^2$  (Rautiainen 1997).

Tuulettuvan alapohjan lattialämmityksen teho mitoitetaan noin 1,5 kertaa lämpöhäviöiden suuruiseksi. Jos huoneen lämpöhäviöt ylittävät 70  $W/m^2$ , lattialämmitystä on täydennettävä muilla lämmittimillä, jotta lattian pintalämpötila ei nouse liikaa (Rautiainen 1997).

## 1.2 Lattialämmitetyn rakenteen rakennesuositukset (Anttila, 2003)

### 1.2.1 Maanvastainen alapohja

Maanvaraisen lattiarakenteen, jossa on lattialämmitys, lämmöneristyksen suuruudesta annetaan erilaisia suosituksia. Uusissakaan lämmöneristysmääräyksissä (RakMK C3, 2003) ei lattialämmitylle alapohjalle vaadita suurempaa lämmöneristävyttä kuin lämmittämättömälle. LVI-ohjekortin (LVI 13-10261, 1996) mukaan reuna-alueille asennetaan 150 mm:n ja muualla 100 mm:n umpisoluihin polystyreenilevy tai vastaava lämmöneristys. Jotkut lattialämmityksen toimittajat suosittelevat alapohjaan 150...200 mm paksuista lämmöneristettä. Monet lattialämmityksen valmistajat eivät kuitenkaan ota kantaa lämmöneristeen paksuuteen tai on maininta, että lämmöneriste mitoitetaan tapauskohtaisesti vallitsevien olosuhteiden mukaan. SFS-standardin (SFS-EN 1264-4, 1998) minimiarvo eristeen lämmönvastukselle maanvaraisessa alapohjassa on 1,25 m<sup>2</sup>K/W. Jos pohjaveden pinta on alle viiden metrin päässä, on arvoa kasvatettava. Ruotsissa pidetään yleisenä suosituksena, että alapohjaan laitetaan eristettä lattialämmityksen yhteydessä 250 mm.

Vastaavasti mahdollisen höyrynsulun asentamisesta lattialämmitettyyn alapohjaan on erilaisia suosituksia. Joissakin lähteissä (Rautiainen 1997, Tirkkonen 1996) esitetään sähköisessä lattialämmityksessä asennettavaksi lämmöneristeen ja betonin väliin rakennuspaperi, joissakin lähteissä (Kara 1994, Mäkinen 1998) sekä useimpien kaapelien toimittajien mukaan muovikalvo RT-kortin (RT 73-10616, 1996) mukaan betoni valetaan suoraan lämmöneristeen päälle. Vesikiertoisessa lattialämmityksessä lähteen (LVI 13-10261, 1996) tai valmistajien mukaan betoni valetaan suoraan lämmöneristeen päälle, samoin ilmakiertoisessa lattialämmityksessä.

Vesikiertoisessa lattialämmityksessä on putkien asennussyvyyden suositusarvo 40 mm, minimiarvo on 30 mm ja maksimiarvo on 70 mm. Ilmakiertoisessa lattialämmityksessä betonilaatta on paksumpi, noin 190 mm. Ilmakiertoisessa lattialämmityksessä betonipeite putken pintaan on vähintään 30 mm. Sähköisessä lattialämmityksessä betonilaatan paksuus on noin 100 mm. Valettaessa laatta kahdessa osassa on runkovalun paksuus 50 mm. Varaavassa lattialämmityksessä ei laatan paksuntaminen tästä enemmän sanottavasti lisää varauskykyä, paksuntaminen vain huonontaa huonelämpötilan säädön nopeutta.

### 1.2.2 Tuulettuva alapohja

Tuuletetussa alapohjassa on puulattian eristykseen kiinnitettävä erityistä huomiota. Vesikiertoisessa lattialämmityksessä puulattiassa putket asennetaan yleensä heti lattiapäällysteen tai lattialevyn alapuolelle. Tasaisen lämmönjakautumisen varmistamiseksi käytetään lämpöä takaisin heijastavaa levyä tai –kalvoa, joka voi olla erillään tai liitetty asennuslevyyn. Puurakenteisessa alapohjassa voidaan tehdä erikoispintavalu, jonka päälle asennetaan lattianpäällyste.

Sähköisessä lattialämmityksessä lämmöneristeet asennetaan kahdessa osassa siten, että alimmaisiksi asennetaan pääeriste. Sen päälle asennetaan vielä noin 50 mm:n kuumuutta kestävä lisäeristemateriaali, jonka päälle asennetaan metalliverkko. Verkon tehtävänä on toimia lämmityskaapelien kiinnitysalustana, estää kaapelia vajoamasta eristeen sisälle sekä tasata lämmityskaapeleista lattian alapintaan saatavaa lämpötehoa (Tirkkonen

1995). Lämmöneristeen päälle voidaan haluttaessa levittää alumiinifolio parantamaan lämmön siirtymistä (Mäkinen 1998).

Tuulettuvaan alapohjaan vesikiertoisen lattialämmityksen yhteyteen lähde (LVI 13-10261, 1996) ja lattialämmityksen toimittajat suosittelevat höyrinsulun asentamista eristeen yläpuolelle ennen lattialämmityspotkia. Sähköisen lattialämmityksen yhteydessä useat sähköisen lattialämmityksen toteuttamiseen liittyvät lähteet (Kara 1994, Mäkinen 1998, Rautiainen 1997 ja Tirkkonen 1995) ja kaapeleiden toimittajat eivät mainitse höyrinsulkua.

Taulukossa 1.2 on SFS-standardin (SFS-EN 1264-4, 1998) antamat minimiarvot lämmönvastukselle tuulettuvassa alapohjassa.

*Taulukko 1.2 Lämmönvastuksen minimiarvot tuulettuvassa alapohjassa (SFS-EN 1264-4, 1998).*

	Ulkopuolinen suunnittelulämpötila $T_d \geq 0^\circ\text{C}$	Ulkopuolinen suunnittelulämpötila $0 > T_d \geq -5^\circ\text{C}$	Ulkopuolinen suunnittelulämpötila $-5^\circ\text{C} > T_d \geq -15^\circ\text{C}$
Lämmönvastus [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]	1,25	1,50	2,00

### 1.2.3 Välipohja

Lämpötehon jakaantuminen ylä- ja alakertaan on suuresti riippuvainen välipohjan yläpinnan eli yläkerran lattiapinnoitteen sekä alapinnan eli alakerran katon rakenteista. Jos välipohjia ei eristetä, siirtyy huomattava osa lattialämmityksen tehosta alakertaan. Tällöin välipohjan lattialämmitys toimii samalla alakerran kattolämmityksenä ja alakerran lämpötilan säädössä voi tulla vaikeuksia. Mitä paremmin eristävä lattiapinnoite on, sitä enemmän lämpötehoa suuntautuu alakertaan. Vastaavasti välipohjan alapinnan ollessa eristävää materiaalia, saadaan lämpötehoa yläkertaan enemmän verrattuna tapaukseen, jossa alapinta olisi vähemmän eristävää materiaalia. Haluttaessa välttyä alakertaan suuntautuvasta lämpötehosta, asennetaan välipohjaan lämmöneristys. Eristeen paksuun on yleensä 30...50 mm (Tirkkonen 1995).

Välipohjan lattialämmitys toteutetaan samalla lailla kuin alapohjankin, eristekerros on vain ohuempi. Kun välipohja on eristetty, ei alakerran lattialämmitystä suunniteltaessa tarvitse ottaa huomioon yläkerrasta tulevaa lämpötehoa (Tirkkonen 1995).

SFS-standardin (SFS-EN 1264-4, 1998) minimiarvo lämmönvastukselle välipohjissa on  $1,25 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , jos alapuolella on lämmittämätön tai ajoittain lämmitetty huone. Jos huonetta lämmitetään jatkuvasti, on lämmönvastuksen minimiarvo  $0,75 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ .

### 1.2.4 Lattialämmityksen asennus ja käyttöönotto

Suurin suositeltava lattialämmityspotkien ja –kaapeleiden asennusväli on 300 mm jotta lattiapinta lämpenee tasaisesti. Jos reuna-alueella, jonka leveys on noin 1 metri, on paljon suuria ikkunapintoja, erkereitä ynnä muita, voidaan asentaa niin sanottu reunavyöhyke. Tälle alueelle lämmityspotket ja kaapelit asennetaan tiheämpään, vesikiertoisessa lattialämmityksessä reuna-alue voidaan toteuttaa myös erillisenä putkipiirinä.



Vesikiertoisessa lattialämmityksestä putket viedään jakotukilta ensin sinne, missä lämmönluovutustarpeet ovat suurimmillaan (LVI 13-10261, 1996).

Lattialämmitysputket asennetaan betonilattiaan yleensä spiraalijakoa käyttäen. Silloin meno- ja paluuputki ovat aina vuorotellen rinnakkain. Tällöin lattian pintalämpötila on mahdollisimman tasainen. Puu ja levyrakenteisessa lattiassa putket asetetaan lattiarakenteesta johtuen rivijaolla.

Lattialämmityksen käyttöönotossa on tärkeää edetä riittävän hitaasti. Betonivalun annetaan kuivua riittävästi ennen lämmön kytkemistä, yleensä vähintään kolme viikkoa (LVI 13-10261, 1996). Betonilattioiden ohjeellinen jälkihoitoaika on 7...14 vuorokautta +20°C:ssa. Lämmitysputkia ja -kaapeleita ei saa käyttää valun jälkeen lattian kovettumisen eikä kuivumisen alkuvaiheessa kuivumisen nopeuttamiseksi (Roiha, 1996). Tämän jälkeen valitaan vesikiertoisessa lattialämmityksessä menoveden lämpötilaksi noin +20°C, jota pidetään päällä muutama päivä. Tämän jälkeen nostetaan menoveden lämpötilaa 2...4°C kerrallaan muutaman viikon aikana, kunnes päästään normaaliin käyttölämpötilaan (LVI 13-10261, 1996). Sähköisessä lattialämmityksessä betonilaatan lämpötilaa aletaan nostamaan vähitellen noin 5°C/päivä (Tirkkonen 1995). Päälystyskelpoisuus on aina todettava kosteuden mittauksilla (Roiha 1996).

### 1.2.5 Lattian pinnoitemateriaalit

Lattian pinnoitemateriaali valitaan lähinnä mieltymysten ja huonetilan käyttövaatimusten mukaan. Pinnoite kuitenkin vaikuttaa oleellisesti lattialämmityksen käyttäytymiseen ja lattialämmityksen säätötapaan. Pinnoite, jolla on alhainen lämmönjohtavuus, luovuttaa lattialaattaan varatun lämmön hitaasti huoneilmaan. Tällaisia pinnoitteita ovat muun muassa lattialaudat, parketit, kokolattiamatot, paksut muovimatot sekä laminaatit. Ne soveltuvat hyvin ratkaisuihin, joissa pyritään lämmön varaamiseen. Parketin maksimilämpötilaksi valmistajat ilmoittavat yleensä noin +28°C (Rautiainen 1997). Taulukossa 1.3 on esitetty eri pinnoitemateriaalien lämmönjohtavuuksia (Tirkkonen 1992).

*Taulukko 1.3 Eri pinnoitemateriaalien lämmönjohtavuuksia (Tirkkonen 1992).*

Materiaali	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]	Paksuus [mm]
Parketti	0,13	12 ja 25
PVC-muovi	0,07	6
Klinkkeri	1,05	8
Solumuovi	0,054	50...200

*Taulukko 1.4 Erilaisten lattian pinnoitteiden yli olevia keskimääräisiä lämpötilaeroja kahdeksan tunnin varausjakson jälkeen, kun kaapeliteho on 25 W/m, asennusväli 250 mm, laatan paksuus 100 mm ja kaapelisyvyys 50 mm (Tirkkonen 1992).*

Pinnoite	Klinkkeri 8 mm	Parketti 12 mm	Parketti 25 mm	Muovimatto 6 mm
Lämpötilaero, °C	0,2	2,3	4,6	2,1

Taulukossa 1.4 on erilaisten pinnoitteiden keskimääräisiä lattiapinnan ja välittömästi pinnoitteen alapuolen lämpötilaeroja kahdeksan tunnin varausajan lopussa, kun kaapeliteho on 25 W/m, asennusväli on 250 mm, laatan paksuus on 100 mm ja kaapeleiden asennussyvyys on 50 mm (Tirkkonen 1992). Lämpötilaeroihin vaikuttaa myös laatan alapuolinen eristys.

Taulukon 1.4 perusteella pienen lämpövastuksen omaavan pinnoitteen, esimerkiksi klinkkerin, lattiatermostaatin asetusarvo tulee asetella hyvin lähelle todellista lattian pintalämpötilaa. Mikäli käytetään suuren lämpövastuksen omaavaa pinnoitemateriaalia, esimerkiksi parkettia, tulee termostaatti asettaa suorassa lattialämmityksessä 2...4 °C:tta todellista lattian pintalämpötilaa suuremmaksi, varaavassa lattialämmityksessä 4...7°C:tta korkeammaksi riippuen parketin paksuudesta (Tirkkonen 1992).

## 2 MAANVARAISEN LÄMMITETYN ALAPOHJARAKENTEEN LÄMPÖTILAKENTTÄ

### 2.1 Materiaalien lämpökäyttäytyminen ja lämpöparametrit

Lämpöenergia siirtyy maa- ja rakennusmateriaaleissa johtumalla, ilman ja veden konvektion vaikutuksesta sekä veden faasimuutosten yhteydessä. Lämpösäteilyn osuus lämpöenergian siirtymisessä on yhtenäisistä rakennemassoista koostuvien alapohjarakenteiden yhteydessä yleensä merkityksetön ja jätetään tarkasteluissa huomiotta. Normaalien olosuhteiden vallitessa johtuminen materiaalien kiinteässä olomuodossa olevien molekyylien tai vesimassoja välityksellä on selvästi merkittävin energian siirtymismekanismi.

Kaikki rakenne- ja maamateriaalit ovat komposiittimateriaaleja, jotka koostuvat kiinteiden 'kantavien' molekyyli-rakenteiden lisäksi niiden väliin jäävistä avoimista huokosista, jotka puolestaan sisältävät vettä nesteinä ja kaasuna, sekä ilmaa. Kiinteiden materiaalien, nesteiden ja kaasujen lämmönjohtokyvyllä on suuria eroja, johtuen materiaalien huomattavista tiheysmuutoksista faasirajojen ylittyessä. Etenkin ilman lämmönjohtavuus suhteessa kiinteisiin materiaaleihin ja nesteisiin, esimerkiksi veteen, on huomattavasti alhaisempi. Huokoisen materiaalin vesipitoisuuden kasvaessa huokosilmaa korvautuu nestemäisellä vedellä. Materiaalin suhteellinen kosteus ja vesipitoisuus vaikuttavatkin huomattavasti useimpien huokoisten materiaalien johtumista sääteleviin lämpöparametreihin: *lämmönjohtavuuteen ja ominaislämpökapasiteettiin*.

#### **Ominaislämpökapasiteetti $c$**

Ominaislämpökapasiteetti ilmoittaa suljetun materiaaliyksikön tarvitseman energiamäärän, joka nostaa massayksikön lämpötilaa yhdellä asteella. Ominaislämpökapasiteetti on intensiivinen suure, joka ilmoitetaan energiamääränä yhtä massayksikköä ja astetta kohden [ $\text{J}/\text{m}^3 \text{K}$ ]. Komposiittimateriaalin lämpökapasiteetti voidaan ilmoittaa sen eri materiaaliosien lämpökapasiteettien summana (2.1):

$$C = \chi_1 c_1 \rho_1 + \chi_2 c_2 \rho_2 + \dots + \chi_n c_n \rho_n \quad (2.1)$$

missä

$C$  = komposiittimateriaalin ominaislämpökapasiteetti tilavuusyksikköä kohden [ $\text{J}/\text{m}^3 \text{K}$ ]

$\chi_i$  = materiaalin  $i$  tilavuusosa  $\left( \sum_{i=1}^n \chi_i = 1 \right)$

$c_i$  = materiaalin  $i$  ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J}/\text{kg}$ ]

$\rho_i$  = materiaalin  $i$  tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

#### **Lämmönjohtavuus $\lambda$**

Lämmönjohtavuus  $\lambda$  [ $\text{W}/\text{m K}$ ] ilmoittaa materiaaliyksikön läpi kulkeutuvan energiamäärän tehon vallitsevan potentiaalilin eli materiaaliyksikön eri puolilla vallitsevan lämpötilaeron suhteessa. Komposiittimateriaalin lämmönjohtavuuden arviointi on huomattavasti vaikeampaa kuin lämpökapasiteetin laskeminen. Eri materiaalien tilavuusosajako ei ole enää ainoa määrittävä tekijä, vaan materiaalin rakenne eli kiinteiden partikkelien muoto, koko ja järjestäytyneisyys sekä mm. veden jakautuminen huokosrakenteissa vaikuttavat oleellisesti materiaalin lämmönjohtavuuteen. Useiden rakennusmateriaalien

lämmönjohtavuuksina käytetään empiirisesti muuttuvissa kosteusolosuhteissa määritettyjä arvoja. Tämä on perusteltua etenkin esivalmistettujen rakennusmateriaalien, kuten eristys- ja pinnoitemateriaalien yhteydessä, joissa materiaalin raaka-aineita ja rakennetta voidaan valvotusti pitää tasalaatuisina. Sen sijaan alapohjarakenteisiin liittyvien paikalla rakennettujen rakennekerrosten, kuten massiivisten betonilaattojen ja täyttö- ja salaojituserrosten, lämpöparametrien arviointi on hankalampaa.

Betonin lämmönjohtavuuden arviointiin on kehitetty joitakin massan vesi-sementti -suhteeseen perustuvia empiirisiä kaavoja, joita voidaan mittaustulosten puuttuessa käyttää ohjeellisina arvoina (Kim et al., 2003). Rakeisten maamateriaalien lämmönjohtavuuksien arviointiin on puolestaan esitetty useita empiirisiä ja analyttisiä laskentamenetelmiä, joilla massan huokoisuudesta ja vesipitoisuudesta riippuen massan lämmönjohtavuutta voidaan arvioida vaihtelevalla tarkkuudella.

### ***Huokoisten materiaalien kosteus- ja vesipitoisuus***

Normaaleissa ympäristöolosuhteissa kaikissa huokoisissa rakenne- ja maamateriaaleissa on vettä sekä nesteinä että vesihöyrynä. Materiaalin yksittäiset huokokset ovat yleensä kytköksissä toisiinsa ja muodostavat koko rakenteen läpäisevän huokosverkoston, jossa ilma, vesihöyry ja vesi voivat kulkeutua materiaalissa vallitsevan potentiaali- eli pitoisuuseron vaikutuksesta. Potentiaalierona voi toimia esimerkiksi vesihöyryn osapaine-ero, kuten diffuusiosta, tai vedenpaine-ero, kuten kapillaarisessa kulkeutumisessa.

Materiaalin kosteus- ja vesipitoisuus riippuu sen ympäristön olosuhteista. Tietyissä ilman suhteellisessa kosteudessa materiaaliin jää tietty määrä nestemäistä vettä. Tätä vallitsevan suhteellisen kosteuden ja materiaalin vesipitoisuuden välistä suhdetta kutsutaan hygroskooppiseksi tasapainokosteudeksi. Yleensä ilman suhteellisen kosteuden kasvaessa materiaaliin tiivistyvän veden määrä kasvaa ja päinvastoin. Hygroskooppinen tasapainokosteus on materiaalikohtainen suure, joka riippuu jossain määrin myös vallitsevasta lämpötilasta.

Huokoiset rakennusmateriaalit ovat usein myös kapillaarisia materiaaleja. Kapillaarisuus tarkoittaa materiaalin kykyä kuljettaa vettä vapaan veden pinnasta huokosrakenteessaan kapillaaristen voimien vaikutuksesta. Kapillaarisuudessa ohueen huokostiehyeeseen nousevan vesipatsaan yläpintaan muodostuu painovoiman ja huokosen seinämien vetovoiman vaikutuksesta kupera pinta, ns. meniski, jonka kaarevalla pinnalla vedenpaine on huomattavasti alempi kuin vesilähteen pinnan tasolla. Mitä ohuempi huokonen on, sitä kaarevammaksi meniskin pinta muodostuu ja sitä suurempi on alipaine vedenpinnassa. Tätä alipainetta kutsutaan kapillaariseksi imuksi, ja se nostaa vettä huokosessa kunnes meniskiin muodostunut alipaine vastaa huokosessa nousevan vesipatsaan yläpintaan kohdistuvaa painovoimaa. Tätä tasapainokorkeutta, johon vesipatsas kapillaaristen voimien vaikutuksesta huokosessa voi nousta, kutsutaan kapillaariseksi nousukorkeudeksi. Monilla rakennusmateriaaleilla, kuten betonilla, huokosten läpimitta on hyvin pieni ja tästä johtuen kapillaarinen nousukorkeus erittäin suuri. Karkearakeisilla maamateriaaleilla huokokset muodostuvat yleensä selvästi suuremmiksi ja kapillaarinen nousukorkeus on rajallinen. Alapohjien yhteydessä tätä käytetään hyväksi mm. kapillaarikatkoeroksissa, joissa riittävän paksulla karkearakeisella murske- tai sorakerroksella katkaistaan pohjamaasta nouseva kapillaarisen veden nousu ennen sen kulkeutumista varsinaisiin rakennemateriaaleihin.

### 2.1.1 Rakennekerrosmateriaalit

#### **Betoni**

Betonin lämmönjohtavuus riippuu voimakkaasti sen runkoainesten mineralogisesta koostumuksesta ja sekoitussuhteesta, hienoaineksen määrästä runkoainesseoksessa, käytetyn sementin määrästä (vesi-sementti –suhteesta) sekä vallitsevasta lämpötilasta ja kosteuspitoisuudesta. Kirjallisuudesta (Kim et al. 2003) löytyy laskentakaava, joka antaa muuntokertoimen  $\lambda_{RH}$  betonimassan lämmönjohtavuudelle vallitsevan kosteustilan: vesi-sementti –suhteen ja suhteellisen kosteuden, funktiona (2.2):

$$\lambda_{Rh} = 0.8 \times [1.62 - 1.54 \times (w/c)] + 0.2 \times Rh \quad (2.2)$$

Laskentakaavan mukaan betonin, jonka vesi-sementti -suhde on  $w/c = 0,4$  lämmönjohtavuus pienenee noin 10 % laatan kuivumisprosessin aikana suhteellisen kosteuden laskiessa 40 % ( $Rh = 100 \% \rightarrow 60 \%$ ). Suuremman vesi-sementti -suhteen omaavilla betoneilla lämmönjohtavuuden muutos on merkityksettömän pieni (Kim et al. 2003).

Eristemateriaaleista tässä yhteydessä käsitellään lähinnä tyypillisiä alapohjaratkaisuissa käytettyjä materiaaleja, lähinnä polystyreeniä.

#### **EPS** (Expanded polystyrene)

Kirjallisuudesta löytyy joitakin laskentakaavoja EPS eristeiden lämmönjohtavuuksille muuttuvissa kosteustiloissa. McFadden (McFadden 1988) on esittänyt seuraavaa EPS eristeen vesipitoisuuden perusteella määritettävää empiiristä funktiota (2.3):

$$\lambda_{EPS} = \lambda_0 + 0,0089 \cdot (w\%) \quad (2.3)$$

joka antaa lämmönjohtavuuden vesipitoisuuden tilavuusosien perusteella (kaavan kertoimilla lämmönjohtavuus saadaan muodossa  $\lambda_{EPS} = \text{BTU-in./hr-sq ft-}^\circ\text{F}$ ). McFaddenin kokeiden perusteella eristeen kastuminen kuivasta vesipitoisuuteen  $w = 20$  tilavuusprosenttia eristeen lämmönjohtavuus kaksinkertaistuu. Alapohjan alapuolisen eristekerroksen vesipitoisuus ei kuitenkaan ole erityisen korkea. Eräiden kenttäkokeiden perusteella (Esch 1986) 15 vuotta toimineeseen EPS eristeeseen tierakenteen eristyskerroksessa oli imeytynyt vain 1,168 tilavuus-% vettä. Lattiarakenteen eristekerroksen vesipitoisuutena ainakin sen elinkaaren alkuvaiheessa voidaan pitää sen tasapainokosteutta kyllästyskosteudessa  $Rh = 100 \%$ . Selvitysten perusteella (Hedenblad 1996) tämä pitoisuus on noin  $w = 0,6 \text{ kg/m}^3$ .

### 2.1.2 Täyttö- ja pohjamaakerrokset

Rakeisen maamateriaalin lämpökapasiteetti voidaan määrittää kuten minkä tahansa komposiittimateriaalin, mikäli sen eri osamateriaalien; kiinteiden partikkelien, veden ja ilman, tilavuusosat ja ominaislämpökapasiteetit tunnetaan. Sen sijaan rakeisen maamateriaalin lämmönjohtavuus on vaikeammin arvioitavissa.

Maa rakentuu erillisistä kiinteistä mineraalipartikkeleista, maarakeista, jotka tiivistetyssä massassa ovat kosketuksissa vain erittäin pienten kontaktipintojen välityksellä. Kiinteiden rakeiden väliin jäävät tilat muodostavat toisiinsa kytköksissä olevien huokosten verkoston, joka kuivassa tilassa ovat täynnä ilmaa. Ilman lämmönjohtavuus verrattuna mineraalirakeisiin on erittäin pieni, joten uunikuivan maamassan lämmönjohtavuus muodostuu lähes yksinomaan kiinteiden rakeiden välisten kontaktipintojen kautta johtuvasta energiasta. Kuivan karkearakeisen maamateriaalin lämmönjohtavuus onkin huomattavan alhainen. Tilanne muuttuu nopeasti, jos huokosverkostoon joutuu vettä. Pieninä määrinä vesi sitoutuu ohuiksi kerroksiksi huokosverkoston seinämiin maarakeiden pinnalle ja erityisesti rakeiden välisten kontaktipintojen läheisyyteen, jossa toisiaan lähestyvät seinämät muodostavat ahtaita taskuja. Koska veden lämmönjohtavuus on huomattavasti suurempi kuin ilman, on näiden kontaktipintojen ympärille syntyvien vesitaskujen vaikutus massan lämmönjohtavuuteen erittäin merkittävä. Ne moninkertaistavat hyvin lämpöä johtavien rakeiden välisten kontaktipintojen alan, mikä näkyy välittömästi myös massan lämmönjohtavuudessa. Vesipitoisuuden kasvaessa ilma korvautuu huokosverkostossa vähitellen kokonaan ja kasvattaa samalla massan lämmönjohtavuutta. Suurimmat lämmönjohtavuudet maamassasta voidaankin mitata täysin kyllästyneessä tilassa.

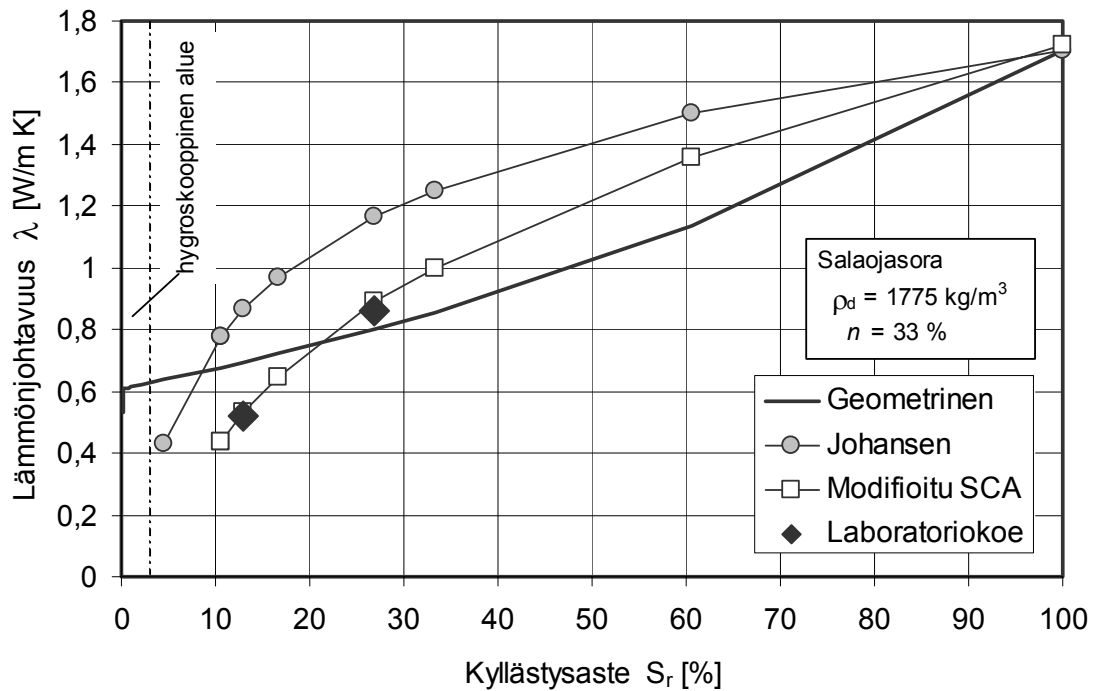
Kiinteiden partikkeleiden mineraalikoostumuksella ja erityisesti kvartsipitoisuudella on huomattava merkitys maan kokonaislämmönjohtavuudelle. Kvartsin lämmönjohtavuus on 3 – 4 kertaa suurempi kuin muiden tavallisten maamineraalien (taulukko 1.2). Hyvä estimaatti mineraaliryhmien lämmönjohtavuudelle saadaan jakamalla kiviaines kahteen tilavuusosaan, joista toinen edustaa kvartssia ja toinen muita kiviaineksen mineraaleja ja määrittämällä keskimääräinen geometrinen lämmönjohtavuus näiden kahden tilavuusosan avulla. Johansenin (Johansen, 1975) esittämä kiven kvartsipitoisuuteen ja keskimääräiseen geometriseen laskentamenetelmään perustuva likimääräkaava graniittipohjaisten mineraalien lämmönjohtavuudelle on seuraava (2.4):

$$\lambda_2 = 2^{(1-q)} \cdot 7.7^q \tag{2.4}$$

missä  $q$  on mineraalin kvartsipitoisuus.

*Taulukko 2.1 Tavallisten maamineraalien lämmönjohtavuuksia (Horai, 1971).*

Mineraali	Lämmönjohtavuus (W/m K)
Kvartsi	7,7
Mikrokliini	2,5
Plagioklaasi	1,9 (keskiarvolukema)
Biotiitti	2,0
Muskoviitti	2,3



Kuva 2.1 Salaojasoran laskennallinen lämmönjohtavuus määritettynä analyttisellä geometrisella menetelmällä ja kahdella empiirisellä menetelmällä (Johansenin sekä modifioitu SCA –menetelmä) verrattuna laboratoriokokeiden tuloksiin.

Taulukossa 2.2 on esitetty joidenkin maalajien tyypillisiä lämpöparametrien arvoja (Sundberg, 1988). Jäätyneen maan arvot tarkoittavat maan täysin jäätynyttä tilaa, jossa ei ole lainkaan sulassa tilassa olevaa vapaata vettä.

*Taulukko 2.2 Joidenkin maalajien tyypillisiä lämpöparametreja (Sundberg, 1988).*

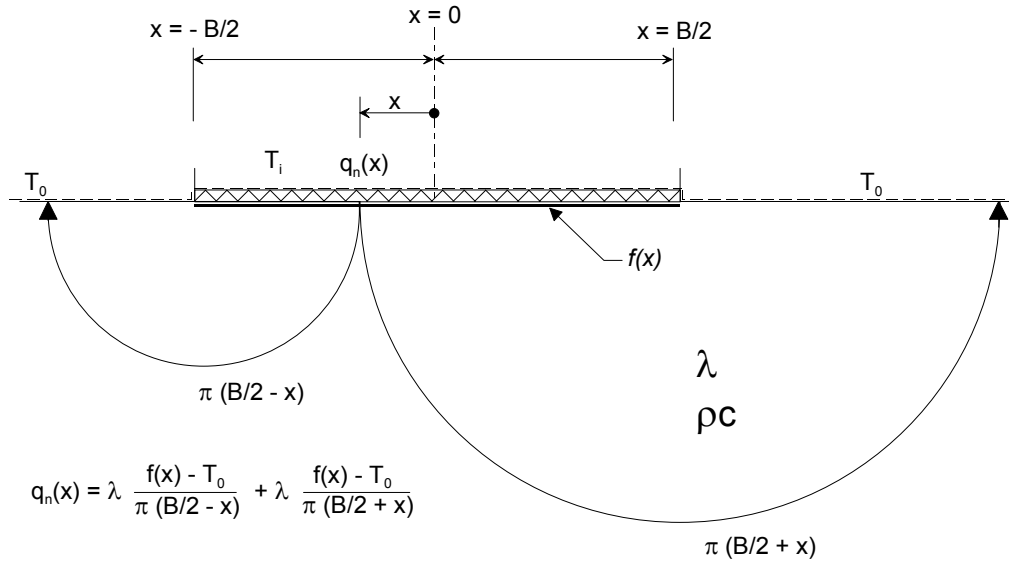
Maalaji	Lämmönjohtavuus W/m K		Ominaislämpökapasiteetti tilavuusyksikköä kohden $\times 10^6$ J/m <sup>3</sup> K		Latentti lämpö $\times 10^8$ J/m <sup>3</sup>
	jäätynyt	sula	jäätynyt	sula	
Savi	0,88...1,1	2,0...2,2	3,0...3,6	2,0	2,1...2,5
Kuivakuorisavi	1,1...1,4	1,7...2,3	2,6...3,0	1,7...2,0	1,1...1,6
Silttinen savi	1,1...1,5	2,3...2,8	2,9...3,3	2,0	1,5...2,0
Siltti	1,2...2,4	2,3...3,2	2,4...3,3	2,0	0,8...2,0
Hiekka, sora pohjavedenpinnan alapuolella	1,5...2,6	2,7...3,3	2,5...3,2	2,0	0,8...2,0
Hiekka, sora pohjavedenpinnan yläpuolella	0,4...1,1	0,4...1,0	1,2...1,7	1,1...1,6	0,1...0,3
Moreeni pohjavedenpinnan alapuolella	1,5...2,5	2,3...2,7	2,2...3,0	2,0	0,3...1,5
Hiekkamoreeni pohjavedenpinnan alapuolella	0,6...1,8	0,5...1,6	1,3...1,9	1,2-1,5	0,1...0,8
Turve pohjavedenpinnan alapuolella	0,6	1,7	4,0	2,0	3,1...3,2
Turve pohjavedenpinnan yläpuolella	0,2...0,5	0,4...1,5	0,7...3,2	0,5...1,7	0,6...2,4

## 2.2 Lämpötilakentän muodostuminen

Lämmitetyn rakenteen alapuolisen maamassan lämpötilaan vaikuttavia tekijöitä ovat rakenne- ja maakerrosten lämpöparametrien lisäksi sitä ympäröivät reunalämpötilat: rakennuksen sisälämpötila tai lämmitetyn laatan lämpötila, ulkoilman lämpötila sekä pohjamaan lämpötila. Tarkasteltaessa

Useiden käytössä olevien teorioiden pohjana on kahden vaikuttavan lämpötilan periaate, jossa pohjamaa toimii lähinnä ulko- ja sisälämpötiloja yhdistävänä massana. Teorian mukaisesti lämpövuoto lämmitetystä alapohjalaatasta kulkeutuu kuvan 2.2. mukaisesti kahta puolikaaren muotoista vuokenttä pitkin lämmitetystä alapohjalaatasta ulkoilmaan. Kaaren pituus ja maamassan lämpöparametrit, staattisessa tilanteessa lämmönjohtavuus, määrittävät lämpövuon suuruuden. Laatan reunaa lähestyttäessä toisen puolikaaren pituus pienenee ja lämpövuoto sisä- ja ulkolämpötilojen välillä kasvaa. Näissä teorioissa alapohjalaatan lämmönvastus otetaan yleensä huomioon lisäämällä lämpövuon kaaren pituuteen rakenne- ja eristekerrosten lämmönvastusta vastaavan maamassan paksuus, ns. ekvivalentti kokonaispaksuus  $d_t$ . Tämä teoria on omaksuttu myös standardissa SFS EN ISO 13370, jossa menetelmällä lasketaan heikosti eristettyjen alapohjalaattojen lämpöhäviöt pohjamaan läpi kaavalla 2.5.





Kuva 2.2 Lämpövuon muodostuminen sisä- ja ulkolämpötilojen välillä.

$$U_0 = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_t} \cdot \ln\left(\frac{\pi B'}{d_t} + 1\right) \quad (2.5)$$

Normissa joudutaan kuitenkin muuttamaan laskentamenetelmän teoriapohjaa laatan eristepaksuuden kasvaessa, sillä eristekerrosta vastaavan ekvivalentin maakerroksen osuus kaaren kokonaispituudesta kasvaa nopeasti vallitsevaksi ja näin lasketun eristekerroksen alapuolisen pohjamaan lämpötila putoaa hyvin alhaisiin lukemiin laatan laitaosilla. Lukuisien kirjallisuudesta löydettyjen kenttämittauskokeitten (Thomas and Rees 1999, Adjali et al. 2000a, Yoshino et al. 1992, Roots 2000) ja numeeristen mallinnusten (Rees et al. 1999, Adjali et al. 2000, 2000b, Deru and Kirkpatrick 2001, Zhou et al. 2001, Yoshino et al. 1992) perusteella laatan alapuolisen pohjamaan lämpötila säilyy kuitenkin melko korkeana ympäri vuoden. Normissa (SFS EN ISO 13370) hyvin eristetyn laatan ( $d_t \geq B'$ ) lämpövuoto lasketaan tasaisena koko laatan leikkauksen alalle, jossa maamassan 'kaaren' osuus pysyy vakiona ja määritetään tutkittavan poikkileikkauksen tehokkaan leveyden  $B'$  ja laatan ekvivalentin paksuuden  $d_t$  avulla (2.6):

$$U_0 = \frac{\lambda}{0,457 \cdot B' + d_t} \quad (2.6)$$

Kaavat (2.5) ja (2.6) antavat keskimääräisen lämmönläpäisyarvon  $U_0$  tasaisesti eristetyn laatan koko alalle, josta erikseen vähennetään lisäeristysten, kuten routaeristysten ja pysty- tai vaakasuuntaisen lisäreunaeristysten vaikutus kokonaislämmönjohtumisessa. Alapohjalaatan kosteusteknisissä laskelmissa on kuitenkin tiedettävä laatan alapuolisen täyttökerroksen lämpötilajakauma muuttuvissa olosuhteissa. Tarve yksinkertaistetulle menetelmälle alapohjalaatan alapuolisen lämpötilajakauman määrittämiseksi on siis olemassa.

## 2.2.1 Häiriintymättömässä pohjamaassa vallitseva lämpötilakenttä

Rakentamattomien pintamaakerrosten lämpötilaan vaikuttavat maan sisältä tulevat lämpövirrat sekä ulkopuoliset energialähteet, merkittävimpana auringon säteily. Maankuoren sisäosista nousevat lämpövirrat juontuvat osittain Maan syntyhistoriaan ja planeettamme sulaan ytimeen, mutta huomattava määrä lämpöä syntyy myös maankuoressa itsessään radioaktiivisen hajoamisen ja erilaisten oksidoitumisprosessien tuloksena. Tämän radiogeenisen lämmön osuus lämpövirrasta riippuu vallitsevista geologisista olosuhteista ja voi vaihdella 30...70 %. Suomessa mitatut maankuoren lämpövuon kokonaisarvot vaihtelevat välillä 20...50 W/m<sup>2</sup> keskimääräisen lämpötilagradientin ollessa  $dT/dz = 12,6$  °K/km (Järvinen ja Puranen 1979).

Ulkoisten lämpölähteiden kuten auringon säteilyn vaikutus pohjamaan lämpötilaan rajoittuu maan pintaosiin. Sää ja ilmasto, eli auringon säteilymäärät ja ilman lämpötilat aiheuttavat alueellisia eroja maan pintalämpötiloissa. Paikallisia eroja synnyttävät maastonmuodot, maanpinnan ominaisuudet sekä pintamaan lämpöparametrit. Vuotuinen lumipeite vähentää talvella auringon säteilyn tunkeutumista maaperään. Samaan aikaan se kuitenkin toimii eristekerroksen tavoin eristämässä maan pintakerroksia kylmästä talvi-ilmasta. Kasvillisuus toimii samaan tapaan, mutta sen vaikutus on ympärivuotinen. Sekä lumi- että kasvillisuuskerros tasaavat ulkoisten lämpölähteiden aiheuttamia lämpöhuippuja maan pintaosissa ja samalla niillä on merkittävä vaikutus maanpinnan kosteusolosuhteisiin ja edelleen maanpinnan lämpöparametreihin.

Lämpötilamuutoksia homogeenisen maakerroksen pintaosissa syklisen muuttuvan pintalämpötilan vaikutuksesta voidaan laskea kaavan (2.3) avulla (kuva 2.2). Mikäli tutkittavan maakerroksen lämmönjohtavuus  $\lambda$ , ominaislämpökapasiteetti  $c$  ja massa  $\rho$  tunnetaan, maamassan lämpötila syvyydellä  $z$  ajan hetkellä  $t$  on (2.7):

$$T_p(z,t) = \bar{T} + \hat{T} \cdot e^{-z/\delta} \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{t_0} - \frac{z}{\delta}\right) \quad (2.7)$$

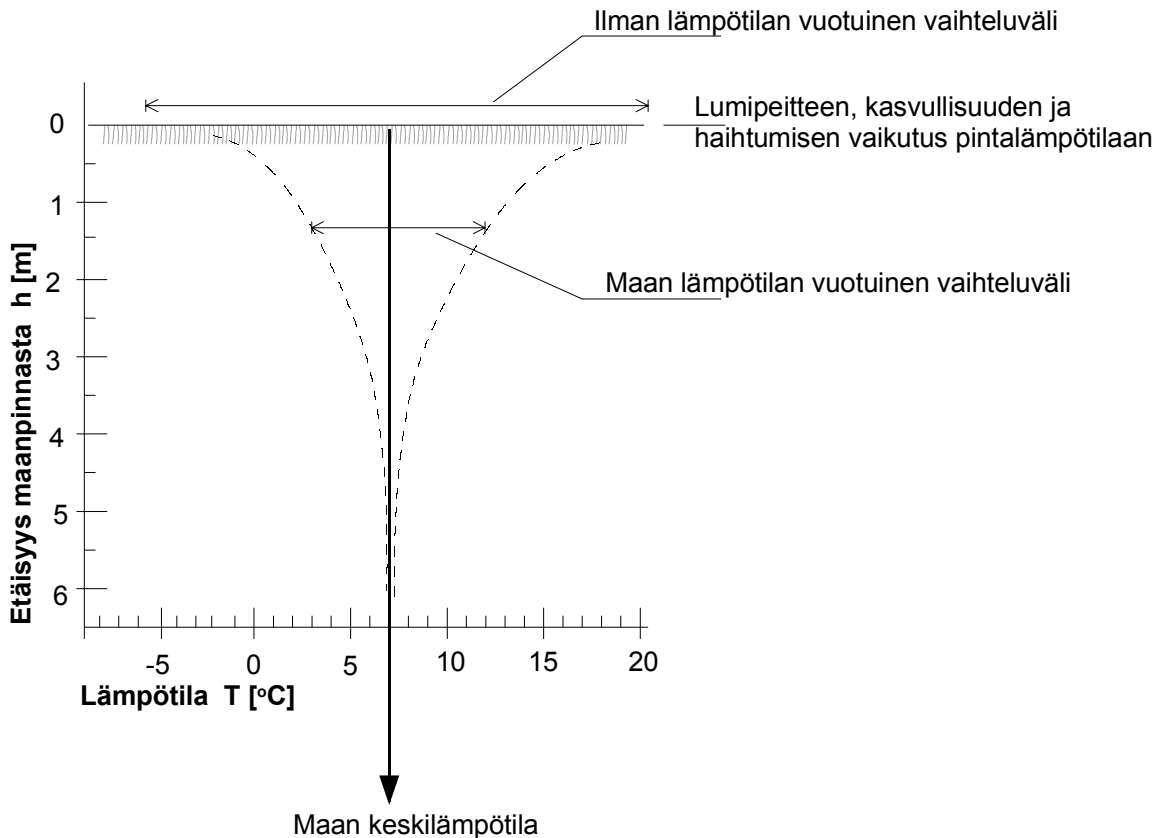
missä  $T_p(0,t)$  on vallitseva pintalämpötila ajan hetkellä  $t$  ja  $1/t_0$  pintalämpötilan syklin frekvenssi (yleensä  $t_0 = 1$  vuosi = 31 536 000 s). Lämpötilan muutos maamassassa vaimenee syvyyden funktiona kertoimen (2.8) mukaisesti:

$$e^{-z/\delta} \quad (2.8)$$

missä tunkeutumissyvyys  $\delta$  saadaan pintalämpötilan syklinpituuden  $t_0$  ja maamassan lämpöparametrien avulla (2.9):

$$\delta = \sqrt{\frac{a \cdot t_0}{\pi}} \quad (2.9)$$

missä  $a$  on maamassan terminen diffusiviteetti ( $a = \lambda/\rho c$ ).



Kuva 2.3 *Ulkoilman vuotuisten lämpötilamuutosten vaikutus maan pintaosien lämpötiloihin syvyyden  $z$  funktiona (William & Gold 1976).*

Kuvan 2.3 mukainen maan pintaosien keskimääräinen lämpötila vastaa yleensä alueen ulkoilman vuotuisesta keskilämpötilaa. Alueilla, joissa talviaikaan on paksu lumipeite, pintamaan keskilämpötila voi olla selvästi korkeampi kuin ilman vuotuinen keskilämpötila.

Vuodenaikaisvaihtelun lisäksi ilman lämpötilaan vaikuttavat vuorokauden vaihtelut ja lukuisat lyhytjaksoiset säähän liittyvät muutokset. Näiden vaikutus rajoittuu pintamaan kaikkein ylempiin kerroksiin vuorokautisten lämpötilamuutosten vaikuttaessa noin 0,5 metrin syvyyteen ja pitempijaksoistenkin sääilmiöiden vain noin 1 metrin syvyyteen maanpinnasta. Näin ollen tutkittaessa lämpötilamuutoksia pohjamaassa lämmitetyn alapohjarakenteen alapuolella voidaan ulkoilman osalta keskittyä pitempikestoisiin syklisiin muutoksiin. Yleisesti käytössä ovat paikkakunnan kuukausittaisista keskilämpötiloista muodostuvat vuotuiset lämpötilakäyrät.

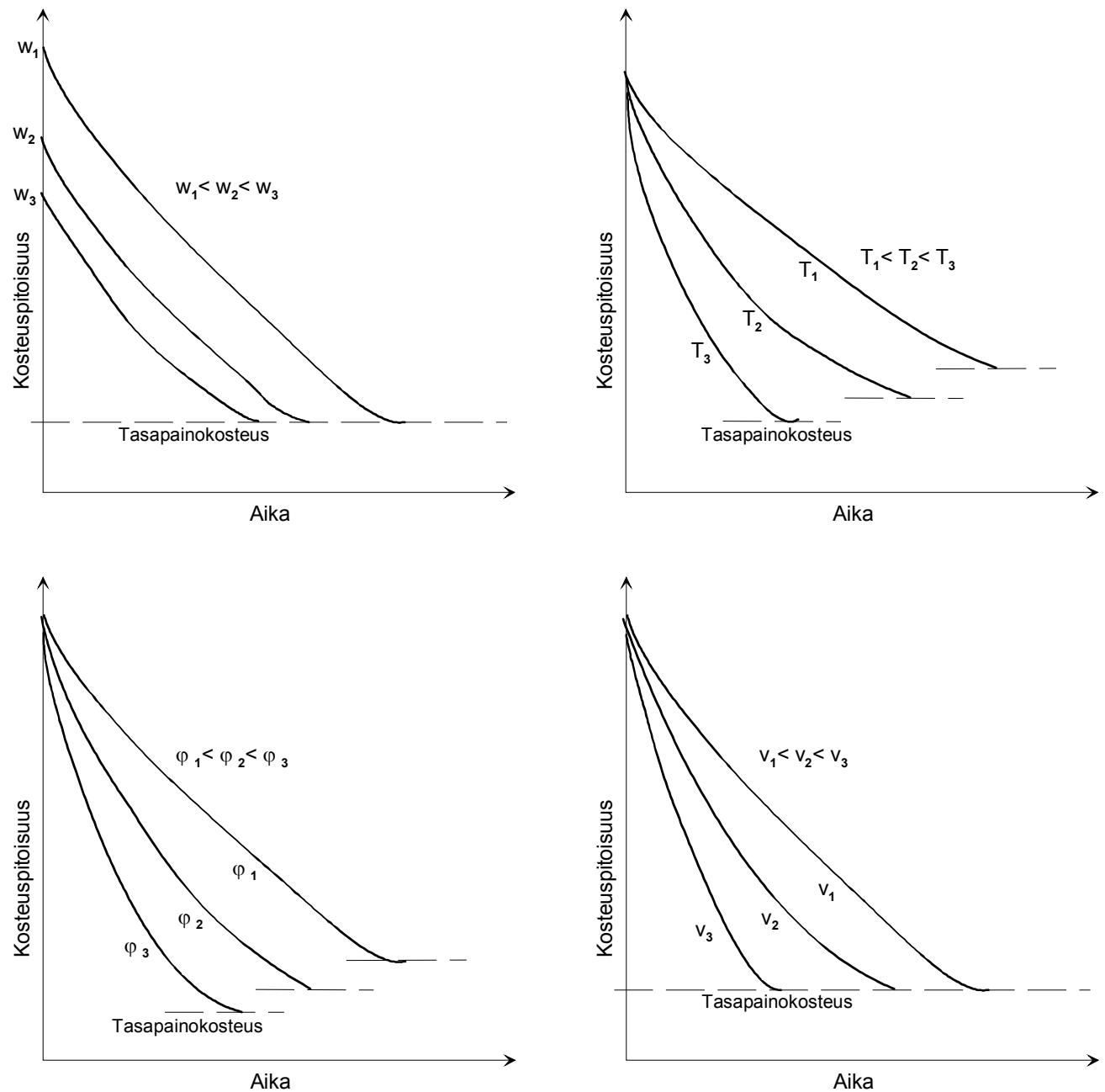
Tarkasteltaessa alapohjalaatan lämpötilakenttää on pohjamaakerrosten valtava massa ja suhteellisen tasainen lämpötila otettava huomioon omana rajalämpötilanaan täyttökerrosten lämpötiloja tarkasteltaessa. Rajalämpötila voidaan ulottaa melko syvälle alapohjalaatan alle: normi SFS EN ISO 13370 esittää syvyydeksi vähintään 2,5 kertaa tutkittavan laatanosan leveyttä määritettäessä lämpötilajakaumaa numeerisilla menetelmillä.

### 3 MAANVARAISEN LÄMMITETYN ALAPOHJARAKENTEEN KOSTEUSKENTTÄ

#### 3.1. Materiaalien kosteuskäyttäytyminen ja materiaaliparametrit

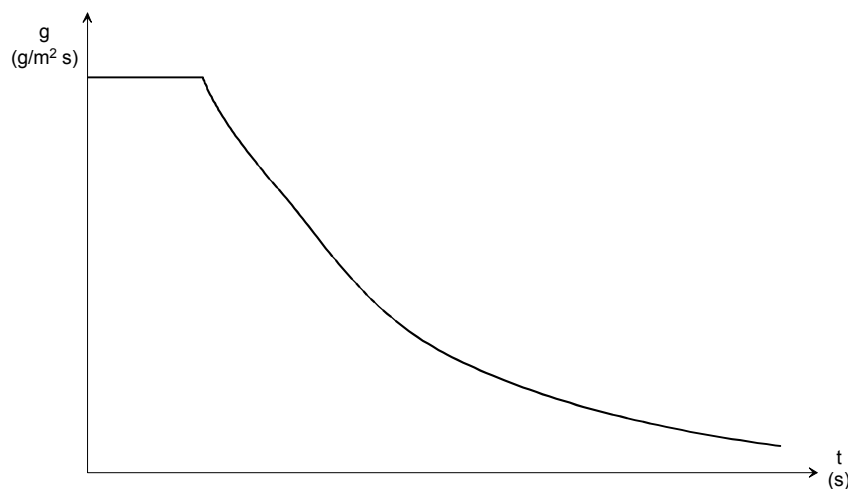
##### 3.1.1 Huokoisen materiaalin kuivuminen ja tasapainokosteus

Huokoisessa materiaalissa, kuten betonissa, tasapainokosteuspitoisuus ja kuivumisaika sen saavuttamiseen riippuvat kuvan 3.1 mukaisesti alkukosteudesta ( $w$ ), ympäröivän ilman lämpötilasta ( $T$ ) ja suhteellisesta kosteudesta ( $\varphi$ ) sekä ilmavirran nopeudesta ( $v$ ).



Kuva 3.1. Huokoisen materiaalin tasapainokosteuden ja kuivumisajan riippuvuus eri tekijöistä (Pihlajavaara 1964).

Rakenteen kuivumisessa voidaan erottaa kolme vaihetta (Kuva 3.2). Vaiheessa 1 (suora käyrä) rakenteen pinta on vedellä kyllästynyttä ja pinnalla on vesikalvo ja haihtumista voi tapahtua vain veden pinnasta ja kosteusvirta on tasainen. Vaiheen pituus riippuu materiaalin vapaan veden määrästä ja esimerkiksi betonilla se on yleensä hyvin lyhyt. Seuraavissa vaiheissa 2 ja 3 rakenteen pinnasta haihtuu diffuusiolla keskeltä kulkeutuvaa kosteutta, nämä vaiheet usein yhdistetään tarkastelussa. Vaiheessa 2 rakenteessa on vielä jossakin paikassa kyllästyskosteuspitoisuuden yli olevaa kosteutta, vaiheessa 3 kosteuspitoisuus on alle kyllästyskosteuden. Rakenteen kuivuminen hidastuu (kuva 3.2), koska haihtuminen pinnasta on nopeampaa kuin diffuusio rakenteen keskeltä pinnalle.



Kuva 3.2 Periaatekuva rakenteen kuivumisesta.

### 3.1.2 Kosteusvirran perusyhtälöt

Diffuusioteorian perustana on yleinen Fick'n lakina tunnettu massavirran yhtälö:

$$g = -D \frac{dv}{dx} \quad (3.1)$$

missä  $v$  on kosteuspitoisuus (vesihöyrypitoisuus) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] ja  $D$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] on diffusiviteetti. Toinen yleinen kaavan (3.1) esitysmuoto:

$$g = -\delta_v \frac{dv}{dx} \quad (3.2)$$

missä  $\delta_v$  on vesihöyrynläpäisevyys [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]. Kaava (3.2) voidaan esittää myös siten, että muuttujana kosteuspitoisuuden  $v$  asemasta on vesihöyrynosapaine  $p$  [ $\text{Pa}$ ] tai vesipitoisuus  $w$  [ $\text{kg}/\text{kg}$ ]. Diffusiviteetin ( $D$ ) ja vesihöyrynläpäisevyyden välillä on seuraava yhteys:

$$\delta_v = \frac{D}{\mu} \quad (3.3)$$

missä  $\mu$  on materiaalikohtainen kerroin.

Kosteusdiffusiviteetti ( $D_w$ ) määritellään seuraavasti:

$$D_w = \frac{\delta_v \cdot v_s(T)}{dw / d\varphi} \quad (3.4)$$

Tällöin Fick´n kaava voidaan esittää muodossa:

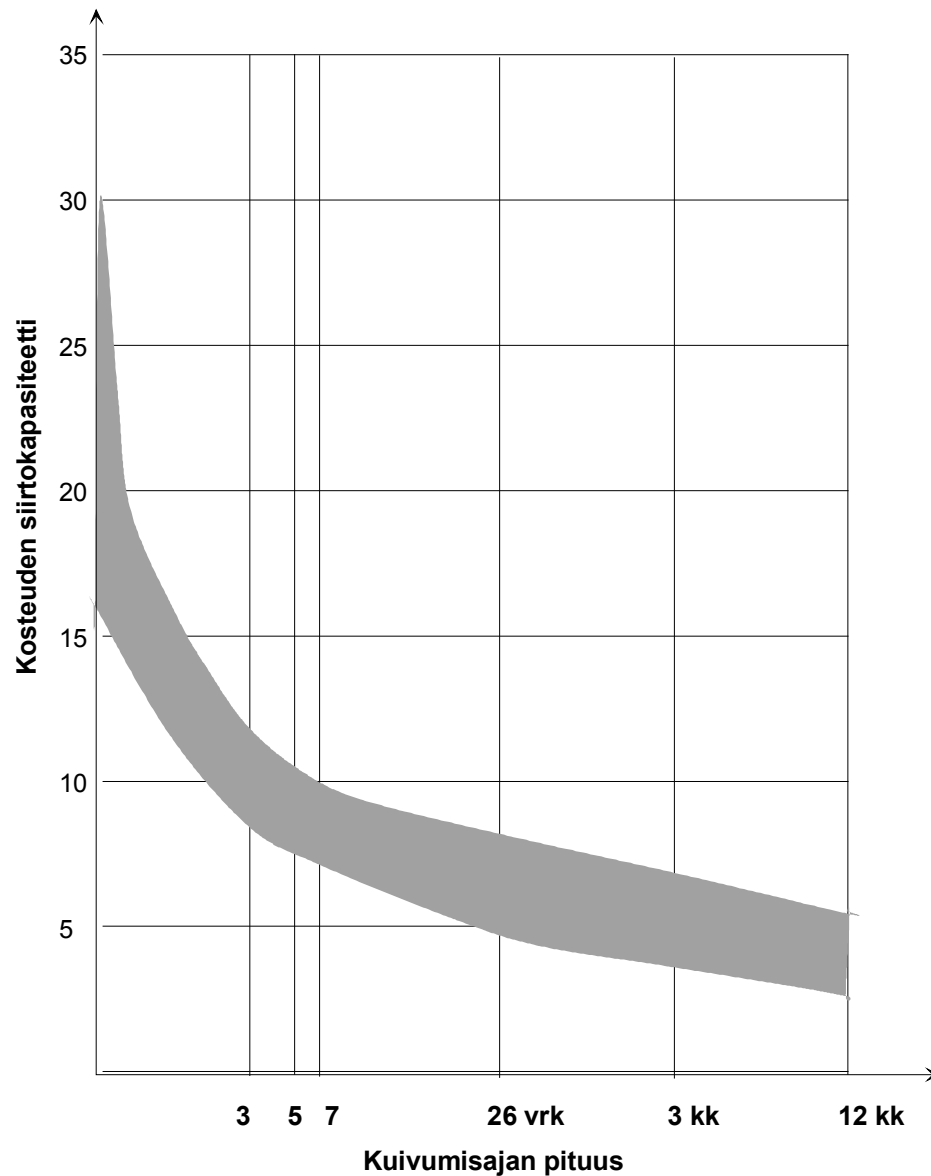
$$g = -D_w \frac{dv}{dx} \quad (3.5)$$

Fick´n massavirtayhtälö vuodelta 1855 on analoginen Fourier´n vuonna 1822 esittämän lämmönsiirtymisen perusyhtälön kanssa.

### 3.1.3 Betonirakenteen kuivuminen

Yleisesti voidaan todeta, että betonilaatan kuivuminen tasapainotilaan maanvastaisessa alapohjarakenteessa kestää yleensä useita vuosia. Esimerkiksi tutkimuksessa (Roots & Sandberg 2002) tehtyjen simulointien mukaan 100 mm paksun lämmitetyn alapohjalaatan kuivuminen kosteustasapainoon kesti eristepaksuudesta ja laatan lämpötilasta riippuen 5...12 vuotta. Rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kuitenkin on yleensä oleellisinta ajanjakso laatan pinnoittamisen jälkeen. Toisaalta lämpötila- ja kosteusolosuhteet rakenteen eri puolilla vaihtelevat voimakkaasti vuodenaikojen mukaan, joten rakenteen kosteustasapainotila on jossakin määrin harhaanjohtava käsite. Kosteustasapainolla ymmärretään tässä tilaa, jossa rakenteesta on poistunut kaikki ylimääräinen rakennusaikainen kosteus ja rakenteen kosteuskäyttäytymistä ohjaavat rakenteen eri puolilla vallitsevat olosuhteet.

Betonirakenteen kuivuminen noudattaa edelle esitettyä yleistä huokoisen rakenteen kuivumiskuvaajaa. Kuivumisen hidastumista betonirakenteessa selittää edellä esitetyn pinnan kuivumisen lisäksi se, että kovettuessaan betonin huokosrakenne muuttuu pienempihuokoiseksi, jolloin diffuusio ja haihtuminen hidastuu (kuva 3.3).



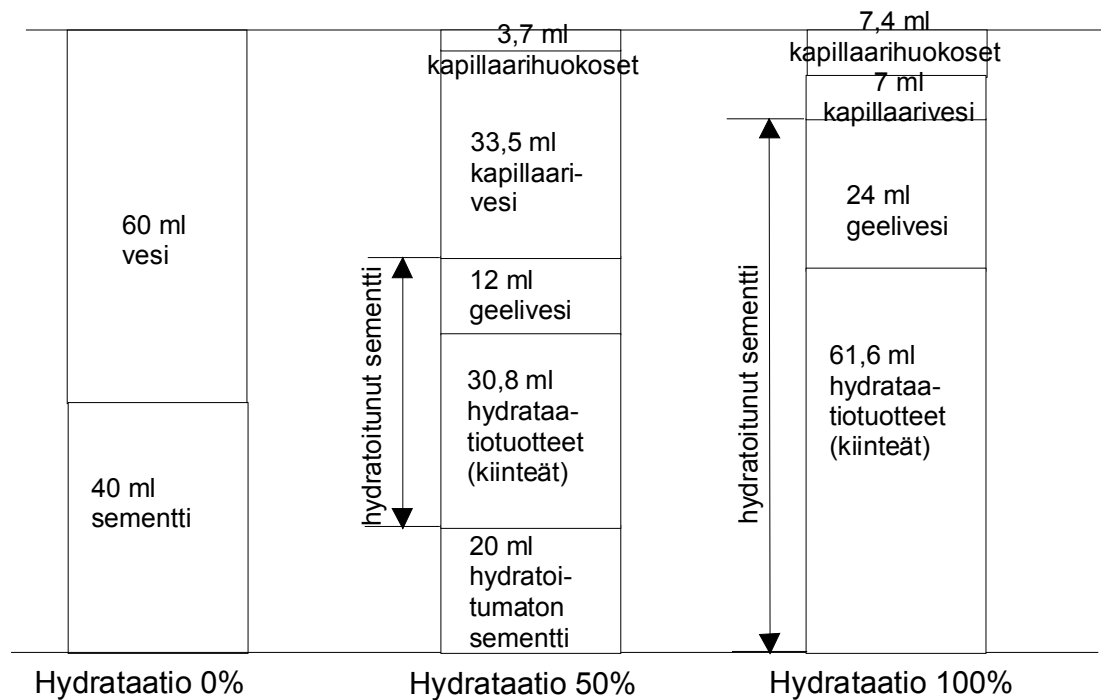
Kuva 3.3 *Betonin kosteudensiirtokyvyn (kosteudenläpäisevyyden) riippuvuus rakenteen kuivumisajasta (Hedenblad 1997).*

Betonin kuivumisominaisuuksiin vaikuttaa keskeisesti hydrataatio betonin ikääntyessä. Sementtiin sitoutuvan veden määrä ( $w_n$ , [kg/m<sup>3</sup>]) on likimäärin kaavan 3.6 mukainen.

$$w_n = 0,25 \alpha C \quad (3.6)$$

missä C on sementtipitoisuus [kg/kg] ja  $\alpha$  hydrataatioaste.

Hydrataatiossa sementistä ja vedestä muodostuu kalsiumsilikaattihydraattigeeliä (C-H-S). Kuvassa 3.4 on esitetty hydrataatioon osallisten ainesosien tilavuusosuudet hydrataation eri vaiheissa. (Neville 1995)



Kuva 3.4 Hydrataation ainesosien tilavuusosuudet hydrataation eri vaiheissa (Neville 1995).

Hydrataatio on hidastuva reaktio: ensimmäisten 28 vuorokauden kuluessa sementtipartikkelin pinnasta hydratoituu noin  $4 \mu\text{m}$  ja vuoden kuluessa noin  $8 \mu\text{m}$  (Neville 1995). Betonin, jonka vesi-sementtisuhte (w/c) on yli 0,4 hydrataatio voi olla täydellinen ( $\alpha=1$ ), mutta se kestää monta vuotta. Betonin hydrataatio lakkaa kun betonin huokosten suhteellinen kosteus (RH) alenee alle 80%:n.

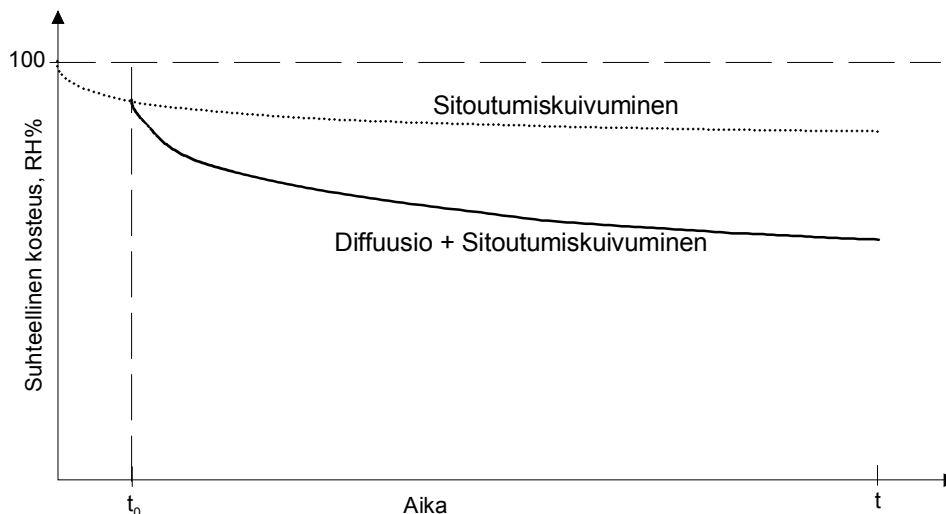
Hydrataation edetessä kapillaarihuokosten tilavuus pienenee hydrataatio tuotteiden täyttäessä huokosia, koska niiden tilavuus on kaksi kertaa suurempi kuin sementin tilavuus. Aika, jolloin hydrataatio tuotteet täyttävät huokokset, siten että yhtenäinen kapillaariverkosto katkeaa riippuu taulukon 3.1 mukaisesti vesi-sementtisuhteesta (Neville 1995). Yli 0,7 vesi-sementtisuhteella yhtenäisen kapillaariverkoston katkeaminen on mahdotonta.



**Taulukko 3.1.** Hydrataatioaika, jolloin kapillaariverkosto segmentoituu (Neville 1995).

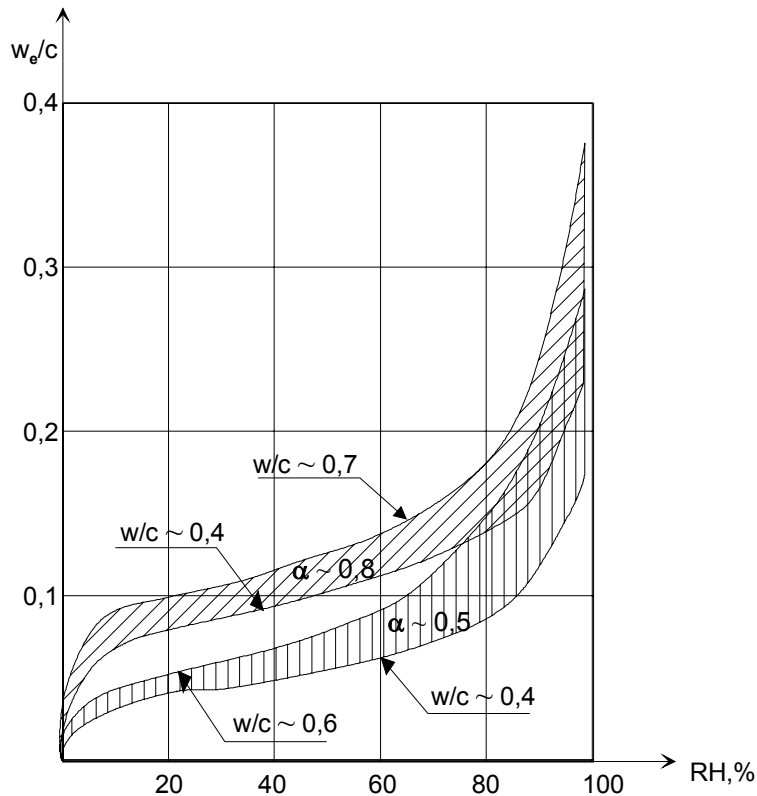
Vesi-sementtisuhde (w/c)	Tarvittava aika
0,40	3 päivää
0,45	7 päivää
0,50	14 päivää
0,60	6 kuukautta
0,70	1 vuosi
yli 0,70	ei koskaan

Tuoreen betonin kuivumisominaisuudet riippuvat betonin hydrataatioasteesta. Toisaalta hydrataation edetessä betonin tasapainokosteus- ja vesihöyrynläpäisevyysominaisuudet muuttuvat, toisaalta hydrataatiossa sitoutuu vettä eli rakenne kuivuu. Ilmiötä kutsutaan sitoutumiskuivumiseksi, englanniksi self-desiccation. Betonin kuivumista sitoutumiskuivumisen ja vesihöyryn diffuusion vaikutuksesta on havainnollistettu kuvassa 3.5 (Kim, Lee 1999). Sitoutumiskuivumisen vaikutus kuivumiseen on suurin korkealujuusbetoneissa, joissa on pieni vesi-sementtisuhde. Kuivumismekanismit voidaan erottaa ainoastaan laboratorio-olosuhteissa. Rakennusfysikaaliset lämmön- ja kosteudensiirtymistä mallintavat ohjelmat ottavat yleensä huomioon vain diffuusiolla tapahtuvan kosteuden siirtymisen, tästä syystä teoreettiset mallinnukset betonin kuivumisesta voivat antaa hieman todellista hitaamman kuivumisajan.



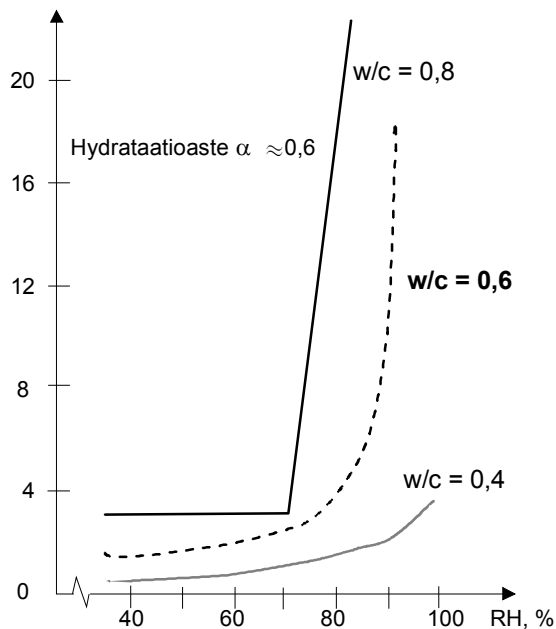
**Kuva 3.5.** Tuoreen betonin kuivuminen sitoutumiskuivumisen ja diffuusion vaikutuksesta (Kim, Lee 1999).

Lähteessä (Nilsson 1980) on tutkittu hydratoitumisasteen vaikutusta betonin kuivumiseen. Tutkimuksessa on koottu eri lähteistä yhteenveto betonin tasapainokosteuden riippuvuudesta betonin vesi-sementtisuhdesta ja hydratoitumisasteesta (Kuva 3.6). Kuvasta nähdään, että betonin tasapainokosteus kasvaa betonin hydratoitumisen edetessä. Kuvassa 3.7 esitetään tutkimuksessa tehtyjen 'kuppi-kokeiden' pohjalta määritelty betonin vesihöyrynläpäisevyys kolmella eri vesi-sementtisuhdeella hydrataatioasteen ollessa 0,6.



**Kuva 3.6** *Betonin tasapainokosteuden riippuvuus hydrataatioasteesta  $\alpha$ . Lämpötila +20 °C.  $w_e$  = tasapainokosteus (Nilsson 1980).*

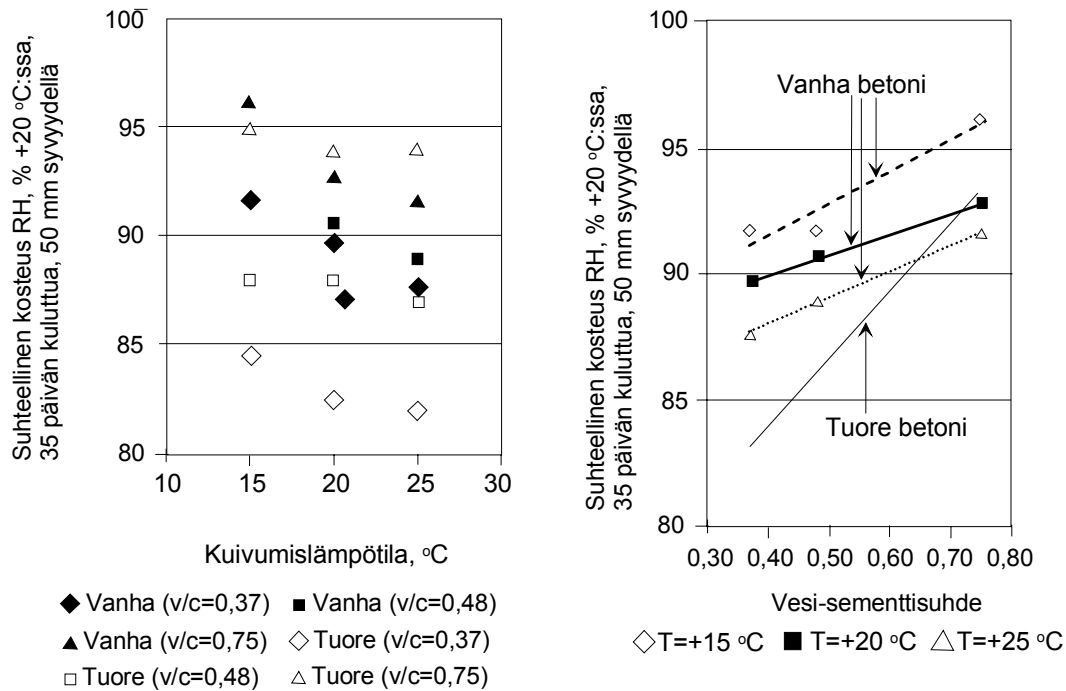
$k, 10^{-12} \text{ kg/m s Pa}$



**Kuva 3.7** *Betonin vesihöyrynläpäisevyyden riippuvuus vesi-sementtisuhteesta ( $w/c$ ), hydrataatioaste 0,6 (Nilsson 1980).*

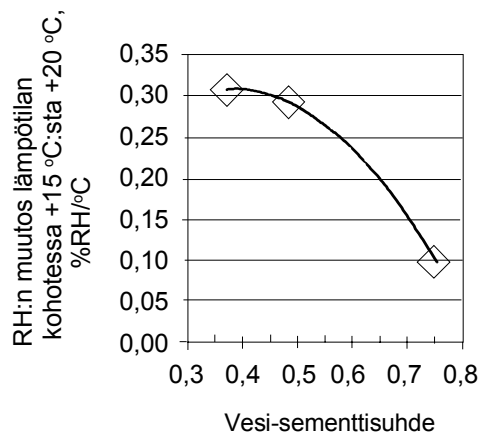
Lähteessä (Persson 2003) on laboratoriossa mitattu 250 mm paksun, molempiin suuntiin kuivuvan betonilaatan kuivumisnopeutta eri ikäisissä betoneissa. Myös kuivumislämpötilaa ja betonin vesi-sementtisuhdetta on varioitu tutkimuksessa. Kuvassa 3.8 esitetään betonista 35 vuorokauden kuivumisajan jälkeen mitattu  $RH +20 \text{ °C}$ :ssa sekä heti valun jälkeen tuoreessa

että vanhassa, 200 vuorokauden ikäisessä betonissa eri vesi-sementtisuhteissa. Lisäksi vanhan betonin kuivumislämpötila on ollut +15, +20 tai +25 °C:tta.

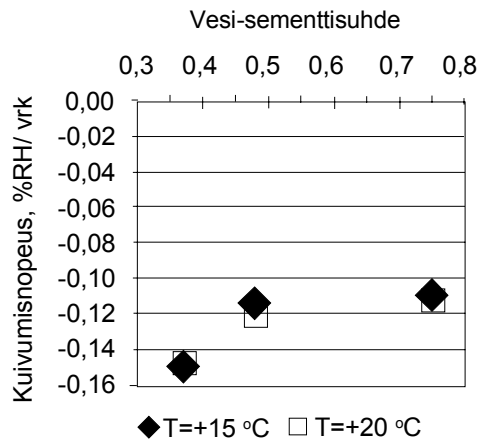


**a.** **b.**  
Kuva 3.8 Vesi-sementtisuhteeltaan erilaisten betonien kuivumisnopeuden riippuvuus betonin iästä ja vanhassa betonissa kuivumislämpötilasta, mittaustulokset (a) ja niiden perusteella määritellyt riippuvuusikäyrät (b) (Persson, 2003).

Kuvasta 3.8 voidaan todeta, että tuoreen betonin kuivuminen on nopeampaa kuin vanhan betonin, erityisesti alhaisilla vesi-sementtisuhteilla. Samoin kuvasta 3.8b voidaan nähdä betonin kuivattamislämpötilan kuivamista nopeuttava vaikutus. Kuvien 3.9 ja 3.10 mukaan kuivumislämpötilan nostaminen vaikuttaa eniten betonissa, jonka vesi-sementtisuhte on pieni.



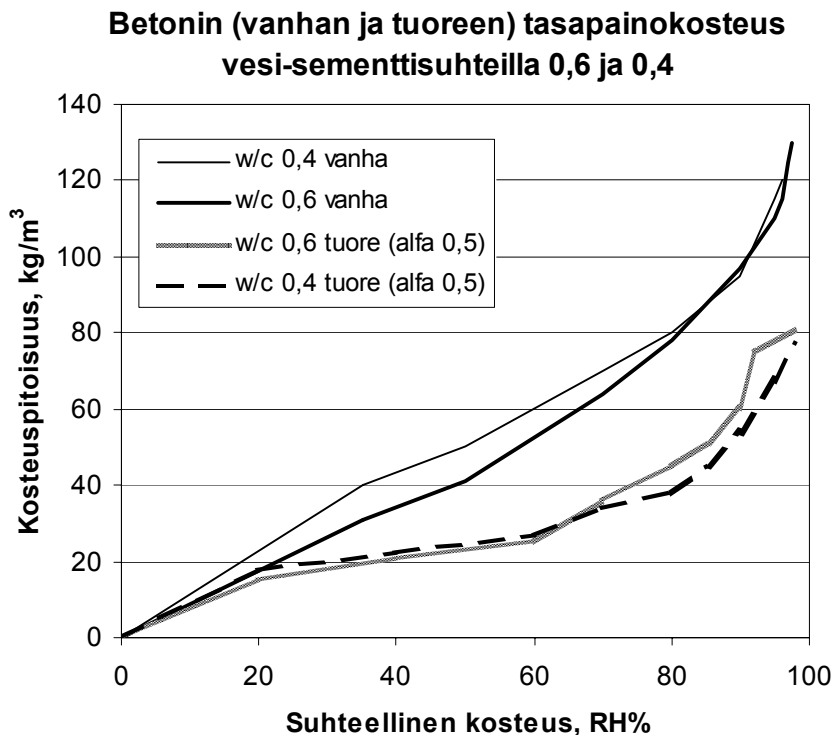
Kuva 3.9 Lämpötilan muutoksen +15°C → +20°C vaikutus betonin RH:hon eri vesi-sementtisuhteissa (Persson 2003).



Kuva 3.10 Betonin kuivumisnopeuden riippuvuus vesi-sementtisuhteesta +15 ja +20°C:n lämpötiloissa (Persson 2003).

### Tuoreen ja vanhan betonin tasapainokosteus- ja vesihöyrynvastusominaisuudet

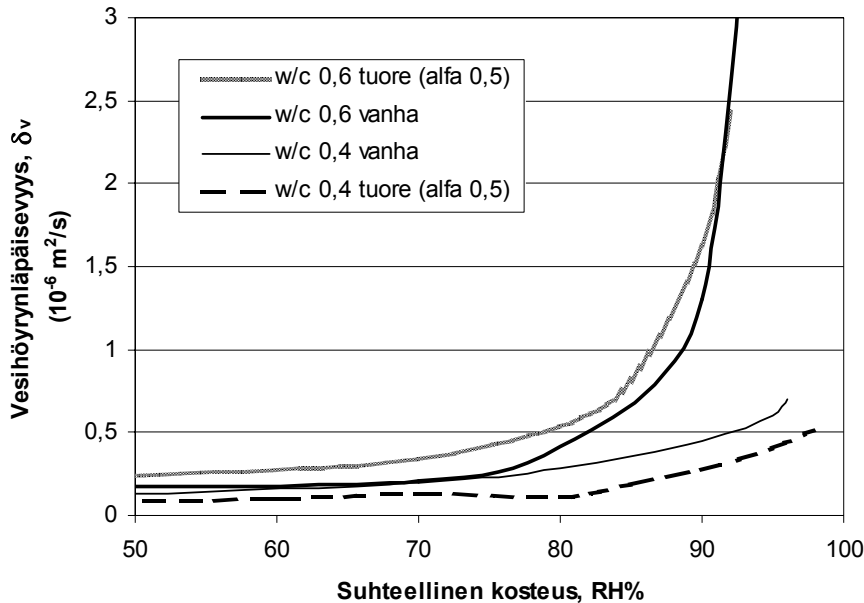
Kuvaan 3.11 on koottu eri lähteistä (Hedenblad 1996, Nilsson 1980) vesi-sementtisuhteeltaan 0,4 ja 0,6 olevan tuoreen ja hydratoituneen betonin tasapainokosteuskäyrät ja kuvaan 3.12 vesihöyrynläpäisevyyskäyrät.



Lähteet: vanha (hydratoitunut) betoni Hedenblad, 1996  
 tuore (hydratoitumisaste  $\alpha=0,5$ ) Nilsson 1980

Kuva 3.11 Tuoreen ja vanhan betonin tasapainokosteuskäyrät, w/c= 0,4 ja 0,6.

### Betonin (vanhan ja tuoreen) vesihöyrynläpäisevyys vesi-sementtisuhteilla 0,6 ja 0,4

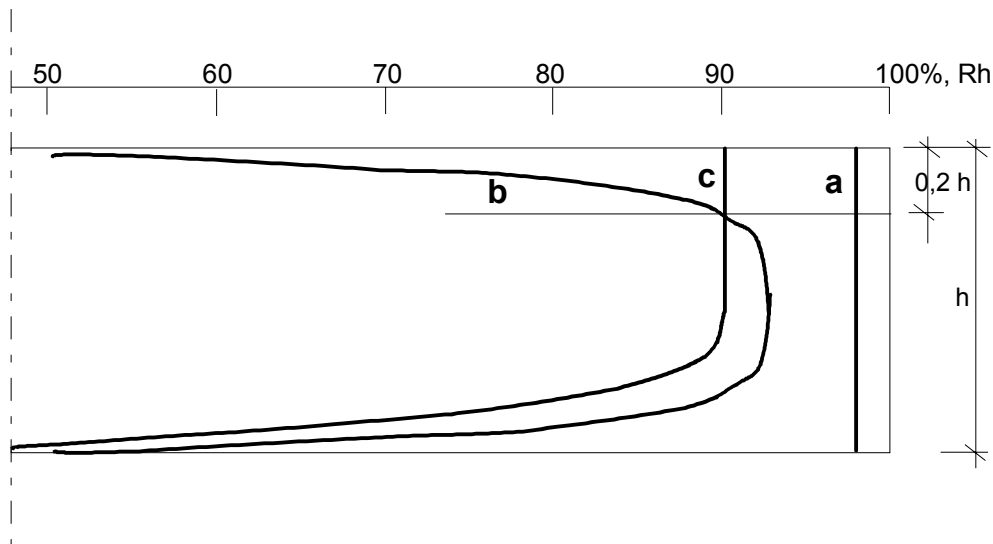


Lähteet: vanha (hydratoitunut) betoni Hedenblad, 1996  
tuore (hydratoitumisaste  $\alpha=0,5$ ) Nilsson 1980

Kuva 3.12 Tuoreen ja vanhan betonin vesihöyrynvastuskäyrät, w/c= 0,4 ja 0,6.

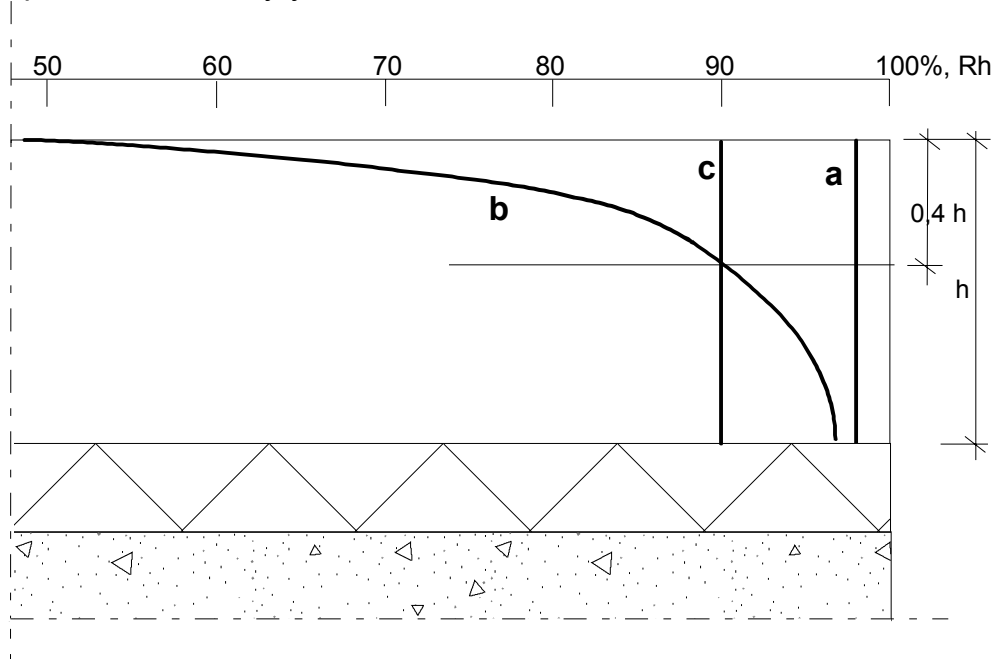
#### 3.1.4 Kuivumisen teoreettinen tarkastelu

Kuvissa 3.13 ja 3.14 on esitetty teoreettisesti, kuinka betonilaatan kosteusjakauma muuttuu pinnoitteen asentamisen jälkeen. Kuvassa 3.13 tarkastellaan molemmiin puolin kuivuvaa betonilaattaa. Kuivuminen alkaa rakenteen pinnoista, rakenteen keskiosan pysyessä pitkään kosteana (käyrä b). Pinnoittamisen jälkeen (käyrä c) betonin kosteuspitoisuus pinnoitteen alla ja laatan yläosassa suurenee, laatan alaosan jatkaessa kuivumista alaspäin. Tietystä laatan pisteessä kosteuspitoisuus ennen ja jälkeen pinnoittamisen on sama. Tätä pistettä, joka on yleisesti määritelty molemmiin puolin kuivuvan laatan tapauksessa 1/5-pisteeksi laatan paksuudesta, suositellaan kosteuden mittauspisteeksi määriteltäessä rakenteen pinnoittamiskriteerin täyttäminen. Tutkimusten mukaan (Persson 2003) tämän ekvivalentin mittaussyvyyden tarkka paikka olisi noin 15%:n syvyydellä laatan paksuudesta, jolloin siis yleisesti käytetty mittaussyvyys sisältää jonkin verran 'turvamarginaalia'. Käytännössä tämän tasapainopisteen tarkka sijainti riippuu myös käytettävän pinnoitteen vesihöyryntiivyydestä, kuivumisolosuhteista ja betonilaadusta, erityisesti betonin vesi-sementtisuhteesta.



**Kuva 3.13** Laatan kosteusjakauma ennen (a) ja jälkeen (b) kuivattamisen sekä pinnoitteen asentamisen jälkeen (c), laatta kuivaa molempiin suuntiin.

Kuvassa 3.14 on vastaavasti tarkasteltu vain yhteen suuntaan kuivuvan betonilaatan kosteusjakaumia. Tässä tapauksessa ekvivalenttina mittaussyvyytenä käytetään yleisesti 40%:n syvyyttä laatan paksuudesta. Tutkimusten mukaan (Persson 2003) todellinen kriittinen mittaussyvyys on hieman pienempi, noin 33% laatan paksuudesta, joten syvyys on 'varmalla puolella'. Kuvassa 3.14 esitetty kosteusjakauma ja suositeltu kosteuden mittaussyvyys ovat jonkin verran varmalla puolella myös siksi, että maanvarainen laatta kuivuu jonkin verran myös alaspäin, jos laatan alapuolella ei ole höyrynsulkua.



**Kuva 3.14** Laatan kosteusjakauma ennen (a) ja jälkeen (b) kuivattamisen sekä pinnoitteen asentamisen jälkeen (c) laatan kuivuessa vain yhteen suuntaan.

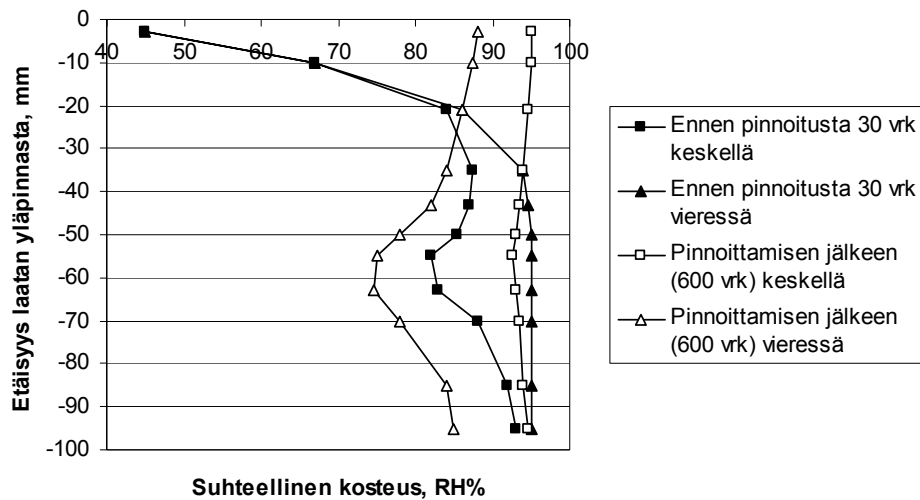
### 3.2 Kosteuskentän muodostuminen

Tutkimuksessa (Sjöberg et al. 2002) on laskennallisesti määritelty lämmitettyyn betonilaattaan muodostuvat lämpötila- ja kosteusjakaumat. Laskennat on tehty 100 mm paksulle laatalle, jossa 60 mm syvyydellä 250 mm jaolla on lämmitysputkia, joiden lämpötila on +31 tai 34°C. Laatan ylä- ja alapuolisiksi olosuhteiksi on oletettu 20°C ja RH 50%, laatan kuivuminen alaspäin on estetty. Mallinnusten mukaan lämmitysputkien väliin muodostuu kuvan 3.15 esittävä lämpötilajakauma.

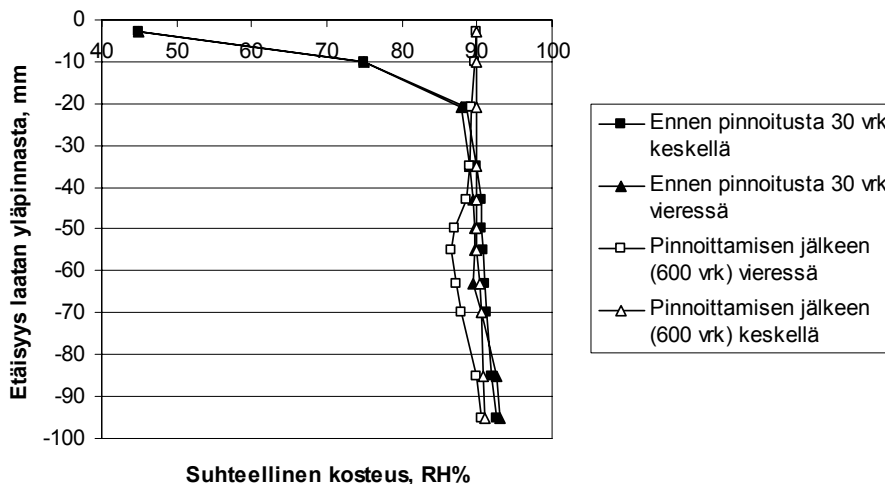
m	0,01	0,01	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,01	0,01
0,006	29,9	29,9	29,8	29,6	29,3	29	28,8	28,5	28,3	28,1	28	27,9	27,9	28	28	28,1	28,3	28,4	28,4	28,4	28,4
0,012	30,1	30,1	30	29,8	29,5	29,2	28,9	28,7	28,4	28,3	28,1	28,1	28,1	28,1	28,2	28,3	28,4	28,5	28,6	28,6	28,6
0,018	30,4	30,4	30,3	30	29,7	29,4	29,1	28,8	28,6	28,4	28,3	28,2	28,2	28,2	28,2	28,3	28,4	28,6	28,7	28,7	28,7
0,025	30,7	30,7	30,5	30,2	29,9	29,5	29,2	28,9	28,7	28,5	28,4	28,3	28,3	28,3	28,3	28,5	28,6	28,7	28,9	28,9	28,9
0,032	31	31	30,8	30,5	30,1	29,7	29,4	29,1	28,8	28,6	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,6	28,7	28,9	29,1	29,2	29,2
0,039	31,5	31,5	31,2	30,7	30,3	29,8	29,5	29,2	28,9	28,8	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	28,7	28,9	29,1	29,3	29,5	29,5
0,046	32,1	32,1	31,6	31	30,4	30	29,6	29,3	29,1	28,9	28,7	28,7	28,7	28,7	28,8	29	29,3	29,6	29,9	29,9	29,9
0,053	32,9	32,9	32	31,2	30,6	30,1	29,7	29,4	20,1	29	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,9	29,1	29,4	29,8	30,3	30,3
0,06	34	34	32,3	31,4	30,7	30,2	29,8	29,5	29,2	29	28,9	28,8	28,8	28,8	28,9	29	29,2	29,5	30,1	31	31
0,067	34	34	32,4	31,5	30,8	30,3	29,9	29,6	29,3	29,1	29	28,9	28,9	29	29,1	29,3	29,6	30,1	31	31	31
0,074	33,1	33,1	32,3	31,5	30,8	30,4	29,9	29,6	29,3	29,1	29	28,9	28,9	29	29,1	29,3	29,6	30,1	30,5	30,5	30,5
0,081	32,6	32,6	32,1	31,4	30,9	30,4	30	29,6	29,4	29,2	29	29	29	29	29,2	29,4	29,6	30	30,2	30,2	30,2
0,088	32,3	32,2	31,9	31,4	30,9	30,4	30	29,7	29,4	29,2	29	29	29	29	29,1	29,2	29,4	29,6	29,9	30	30
0,094	32,1	32,1	31,8	31,3	30,8	30,4	30	29,7	29,4	29,2	29	29	29	29	29,2	29,4	29,6	29,8	29,9	29,9	29,9
0,1	32	32	31,8	31,3	30,8	30,4	30	29,6	29,4	29,2	29	29	29	29	29,2	29,3	29,6	29,8	29,9	29,9	29,9

Kuva 3.15 Lämmitysputkien väliin muodostuva lämpötilakenttä (Sjöberg et al. 2002).

Rakenteen kosteusjakauman mallinnuksessa on käytetty kahta teoriaa olettaen kosteuden siirtymisen tapahtuvan joko vain vesihöyrynä diffuusiolla tai sekä vesihöyrynä diffuusiolla että vetenä kapillaarisesti. Kuvassa 3.16 on esitetty kosteusjakaumat lämpöputkien lähellä ja putkien välissä 30 vuorokauden iässä, ennen suhteellisen vesihöyryntiiviin pinnoitteen asentamista ja 600 vuorokautta pinnoittamisen jälkeen laskentaolettamuksella, että kosteuden siirtyminen tapahtuu diffuusiolla. Vastaavasti kuvassa 3.17 on esitetty vastaavat kosteusjakaumat kun on oletettu kosteuden siirtyvän sekä diffuusiolla että kapillaarisesti. Kuvista 3.16 ja 3.17 nähdään, että kosteusjakaumat lähellä, noin 5 mm päässä lämmitysputkista ja lämmitysputkien keskellä eroavat jyrkästi toisistaan tapauksessa, jossa kosteus siirtyy vain diffuusiolla, kapillaarisuus tasoittaa eroa jossakin määrin. Lisäksi kuvista 3.16 ja 3.17 voidaan nähdä, että kapillaarisen kosteuden siirtymisen ottaminen huomioon tasoittaa laatan kosteusjakaumia.



Kuva 3.16 Betonilaatan kosteusjakauma ennen ja jälkeen pinnoitteen asentamisen. Kosteuden on oletettu siirtyvän diffuusiolla (Sjöberg et al. 2002).



Kuva 3.17 Betonilaatan kosteusjakauma ennen ja jälkeen pinnoitteen asentamisen. Kosteuden on oletettu siirtyvän sekä diffuusiolla että kapillaarisesti (Sjöberg et al. 2002).

### 3.3 Maanvastaisen alapohjan kosteuskäyttäytyminen, teoreettiset mallinnukset

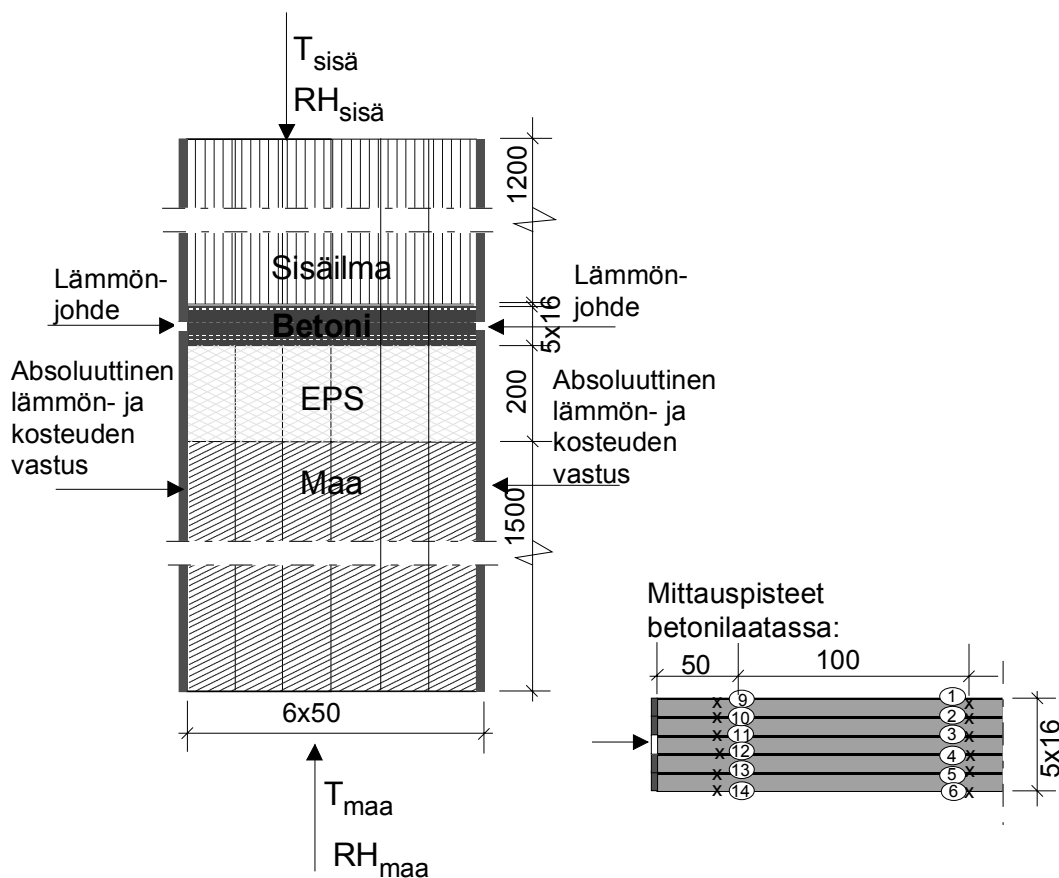
#### 3.3.1 Käytetyt laskentaohjelmat ja -mallit

Haluttaessa tarkastella betonilaatan kosteusjakaumaa eri tapauksissa kosteusvirran perusyhtälön (Fick'n kaavan) yleinen ratkaisu ei onnistu käsinlaskentamenetelmillä. Useita yleisiä (vaippa)rakenteen lämpötilan ja kosteuden analysointiohjelmaa on kehitetty, joista eräs on saksalainen Fraunhofenin yliopistossa kehitetty WUFI ("Wärme- und Feuchtetransport instationär"; Transient Heat and Moisture Transport). Ohjelmalla voidaan



simuloida rakenteen, pääasiassa seinärakenteiden lämpötila- ja kosteusmuutoksia erilaisissa olosuhteissa. Ohjelmasta on olemassa sekä yksi- että kaksidimensioinen versio. Seuraavat tarkastelut on tehty yksidimensioisella WUFI 3.0:lla ja 2-dimensioisella WUFI-2D v2.1:llä.

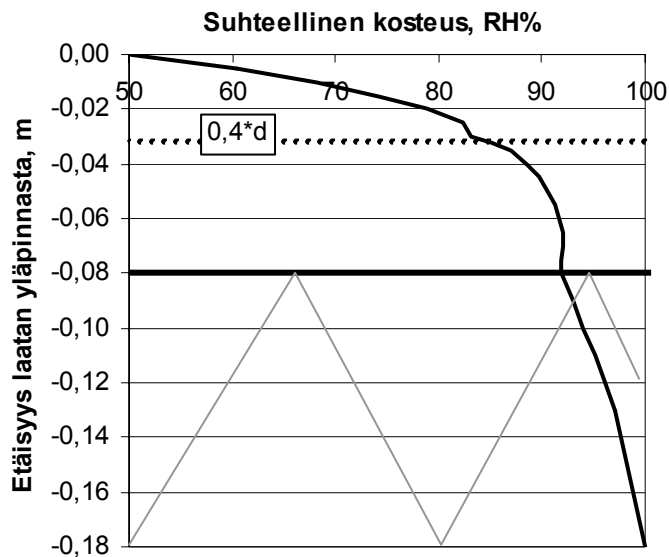
Yksidimensioisella ohjelmaversiolla tarkasteltiin maanvastaisen betonilaatan kuivumista yleisesti sekä sisäilmaolosuhteiden ja pinnoitteen vesihöyrynläpäisevyyden vaikutusta laatan kuivumiseen lämmittämättömässä laatussa. WUFI-2D-ohjelmalla tarkasteltiin pisteittäisen (esim. vesikiertoinen lattialämmitys) lämmityksen aiheuttamaa lämpötila- ja kosteuskenttää. Alapohjarakenne muodostuu 80 mm betonilaatasta, jonka alla on 150 tai 200 mm EPS lämmöneristekerros. Betonilaatan puoliväliin lämmitetyssä perustapauksessa on oletettu 16 mm paksuinen lämmityselementti 300 mm välein. Käytetty malli on esitetty kuvassa 3.18 ja materiaaliarvot luvussa 5.3. Laskennassa on tarkasteltu vain diffuusiolla tapahtuvaa kosteudenliikettä, mahdollinen kapillaarinen kosteudensiirtyminen on jätetty pois. Betonilaatan puoliväliin elementin reunoilta johdetaan lämpöä, joka kuvastaa lämmityselementtiä. Laskennassa käytetyt pohjamaan lämpötilat on vastaavat keskimääräistä pohjamaan lämpötilakenttää.



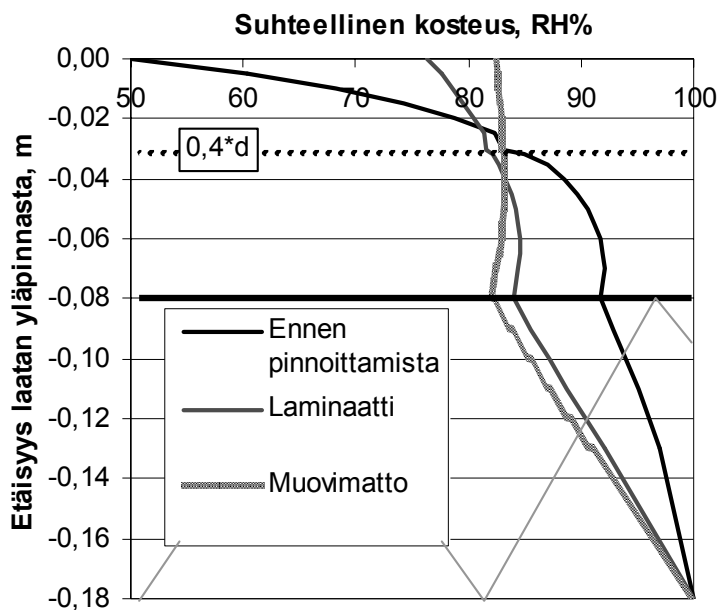
Kuva 3.18 2D-malli ja mittauspisteet.

### 3.3.2 Yleistä maanvastaisen betonilaatan kuivumisesta

Seuraavassa tarkastellaan betonilaatan kuivumista ilman lattialämmitystä. Tarkastelut on tehty WUFI 1D-ohjelmalla. Alapohjarakenteena on käytetty 80 mm paksua betonilaattaa, jonka alla on 100 mm EPS-lämmöneristettä. Pohjamaan lämpötilaksi on oletettu tasainen +14°C ja RH 100%. Sisäilman lämpötilaksi on oletettu +20°C ja RH 50%. Betonilaatan valun jälkeen laatta alkaa kuivamaan pääasiassa yläpinnasta alkaen. Myös laatan alapinta kuivuu jossakin määrin. Kuivumisen edetessä jossakin vaiheessa on saavutettu tilanne, jossa kriittisellä syvyydellä (0,4\* laatan paksuus) betonin suhteellinen kosteus on 85 RH% (kuva 3.19). Tätä raja-arvoa pidetään pinnoittamiskriteerinä. Pinnoittamisen jälkeen laatan yläpinnan kosteus alkaa kohota. Esimerkissä laatta on pinnoitettu joko suhteellisen vesihöyryntiiviillä tai läpäisevämmällä pinnoitteella. Vesihöyrynvastusten suhteeksi on oletettu on noin 1:90. Tiiviillä pinnoitetun laatan yläpinnan kosteus nousee kuvan 3.20 mukaisesti maksimissaan noin RH 82%:iin ja läpäisevämmällä noin 76%:iin. Teoreettisesti pinnoittamiskriteeri ja kriittinen mittaussyvyys (luku 3.1.4) on määritelty olettaen, että pinnoittamisen jälkeen laatan yläpinnan suhteellinen kosteus nousee enimmillään samalle tasolle kuin kriittiseltä syvyydeltä (maanvastaisen alapohjan tapauksessa 0,4\* laatan paksuus) ennen pinnoittamista mitattu suhteellinen kosteus. Esimerkkilaskennassa tiiviillä pinnoitetussa laatussa kosteustekninen toiminta ennen ja jälkeen pinnoittamisen vastaa hyvin teoreettista olettamusta. Läpäisevällä pinnoitteella laatan yläpinnan suhteellinen kosteus pinnoittamisen jälkeen pysyy alhaisemmalla tasolla.



Kuva 3.19 Alapohjarakenteen kosteusjakauma ennen pinnoittamista.



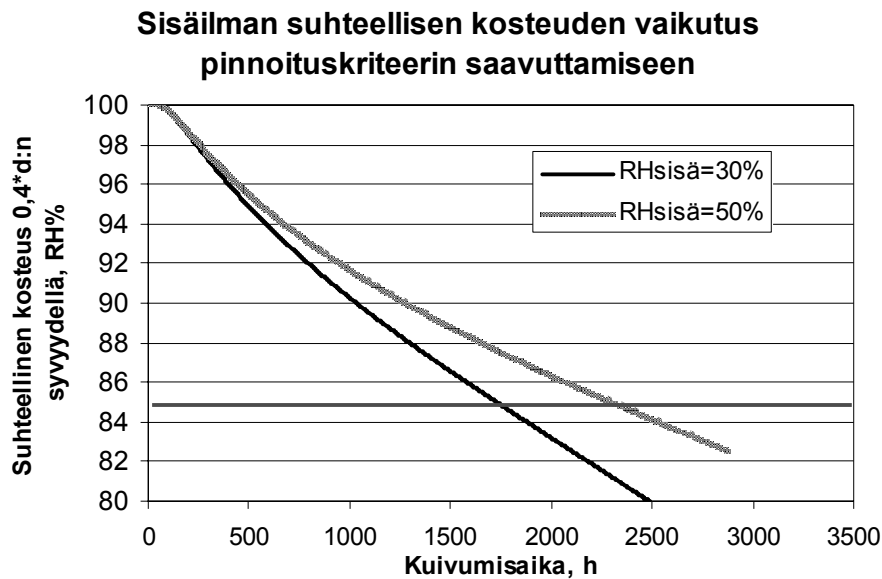
Kuva 3.20 Alapohjarakenteen kosteusjakauma ennen pinnoittamista sekä tiivillä muovimatolla että laminaatilla pinnoittamisen jälkeen.

### Sisäilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaikutus betonilaatan kuivumiseen

#### Sisäilman suhteellisen kosteuden vaikutus

Seuraavassa tarkastellaan edelleen lämmittämätöntä 80 mm paksua betonilaattaa, jonka alla on 150 mm EPS-lämmöneristettä (lämmönvastus  $R=4,05 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ). Pohjamaan lämpötilaksi oletetaan tässä tapauksessa tasainen  $+12^\circ\text{C}$  (ja RH 100%) ja sisäilman lämpötilaksi tasainen  $+20^\circ\text{C}$ . Sisäilman suhteelliseksi kosteudeksi oletetaan RH30% tai 50%.

Tarkastellaan aluksi betonilaatan kuivumista pinnoittamiskriteeriä vastaavaan suhteelliseen kosteuteen (RH85%) kriittisellä syvyydellä eli  $0,4 \cdot$ laatan paksuudessa ( $=32 \text{ mm}$ ). Kuvan 3.21 mukaisesti jos sisäilman suhteellinen kosteus on RH30%, laatta kuivuu noin 24 vuorokautta nopeammin pinnoituskriteeriä vastaavaan kosteuteen kuin jos sisäilman suhteellinen kosteus on 50%.

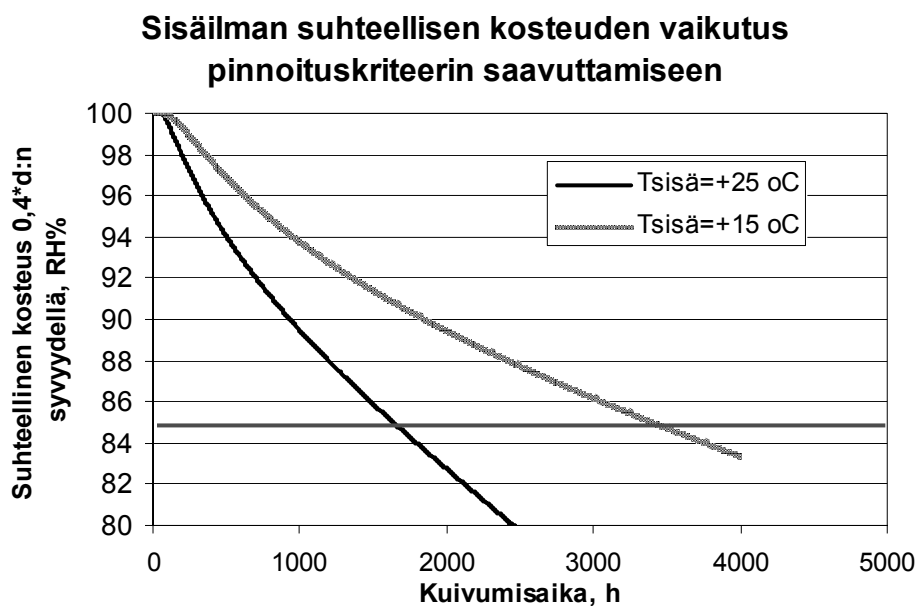


Kuva 3.21 Betonilaatan kuivuminen kriittisellä syvyydellä (0,4\*d).

### Sisäilman lämpötilan vaikutus betonilaatan kuivumiseen

Seuraavassa tarkastellaan sisäilman lämpötilan vaikutusta betonilaatan kuivumiseen. Oletetaan, että sisäilman lämpötila on +15 tai +25 °C ja sisäilman suhteellinen kosteus kaikissa tapauksissa RH 50%.

Betonilaatan kuivuminen (kuva 3.22) pinnoittamiskriteeriä vastaavaan kosteuteen kestää tapauksessa, jossa sisäilman lämpötila on +25°C noin 68 vuorokautta ja tapauksessa, jossa sisäilma on +15°C noin 142 vuorokautta. Ero on siis merkittävä 74 vuorokautta.

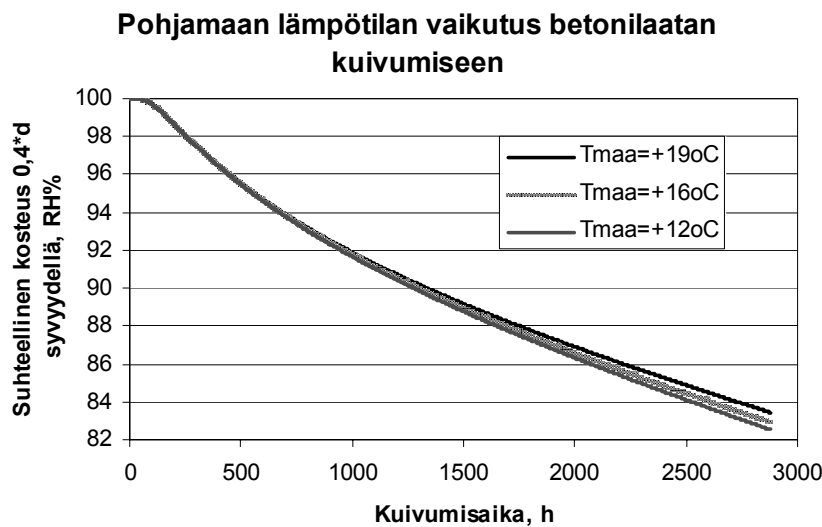


Kuva 3.22 Betonilaatan kuivuminen pinnoittamiskriteeriä vastaavaan suhteelliseen kosteuteen, sisäilman lämpötila +15 tai +25°C.

## Pohjamaan lämpötilan vaikutus

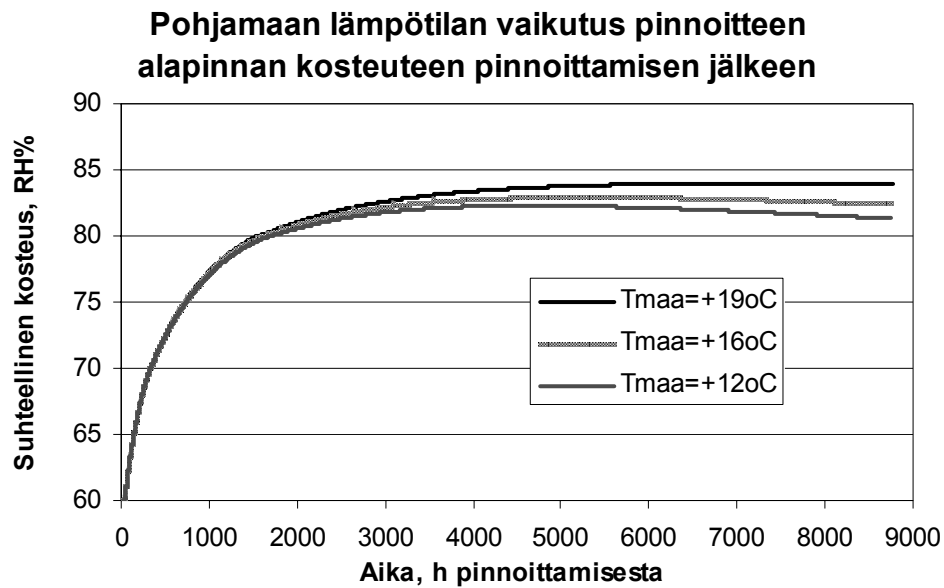
Edellä esitetyissä tarkasteluissa on oletettu sekä sisäilmaan että pohjamaahan tasaiset olosuhteet. Käytetyt pohjamaan lämpötilat vastaavat tavanomaisesti routaeristetyn pientalon laatan alapuolelle muodostuvaa keskimääräistä lämpötilakenttää rakennuksen keskialueella. Riippuen rakentamisajankohdasta ja rakennuksen lämmityksen aloitusajankohdasta betonilaatan kuivumisvaiheessa pohjamaaa ei ole välttämättä vielä saavuttanut kyseistä keskimääräistä lämpötilatasoa. Seuraavassa tarkastellaan pohjamaan lämpötilan vaikutusta betonilaatan kosteuskäyttäytymiseen lämmittämättömässä laatasta. Sisäilman lämpötilaksi oletetaan tasainen +20°C ja RH50%, pohjamaan lämpötilaksi oletetaan +12, +16 tai +19°C. Rakenne on lämmittämätön 80 mm betonilaatta, jonka alla 150 mm EPS-eristettä.

Tarkastellaan ensin betonilaatan pinnoittamiskriteerin saavuttamista pohjamaan lämpötilan vaihdellessa +12...+19°C. Kuivumisajassa, jolloin kriittisellä syvyydellä on saavutettu RH85%:n taso ei ole merkittävä eroa (kuva 3.23). Jos pohjamaaa on +19°C, pinnoittamiskriteeri saavutetaan noin 7 vuorokautta myöhemmin kuin jos pohjamaan lämpötila olisi +12°C.



Kuva 3.23 Pohjamaan lämpötilan vaikutus betonilaatan kuivumiseen.

Pinnoitettaessa laatta suhteellisen vesihöyryntiiviillä muovimatolla ( $Z_v = 1500 \cdot 10^3 \text{ s/m}$ ), pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus (kuva 3.24) nousee hieman korkeammalle jos pohjamaan lämpötila on +19°C. Ero kosteustasossa on noin melko pieni, vain 1,7 RH%. Jos kosteusteknisiä tarkasteluja tehdään rakenteen toiminnan varmistamiseksi valitulla pinnoite- ja lämmöneristeratkaisulla, oletamus, että pohjamaaa on lämmennyt keskimääräiseen tasapainolämpötilaan antaa 'varmalla' puolella olevan tuloksen. Tästä syystä seuraavissa tarkasteluissa pohjamaahan on oletettu aina tasaiset olosuhteet, jotka vastaavat teoreettisia tavanomaisesti routaeristetyille alapohjalle laatan keskialueelle määriteltyjä keskimääräisiä lämpötiloja.



Kuva 3.24 Pohjamaan lämpötilan vaikutus pinnoitteen alapinnan suhteelliseen kosteuteen pinnoittamisen jälkeen.

### 3.3.3 Lämmitetty laatta

Seuraavassa tarkastellaan lämmitettyä betonilaattaa, paksuudeltaan 80 mm, jonka alla on 150 tai 200 mm EPS-lämmöneristettä ja jossa on lattialämmityskaapelit 300 mm välein. Tarkasteltava poikkileikkaus on lämmityskaapelien keskellä ellei erikseen ole muuta ilmoitettu.

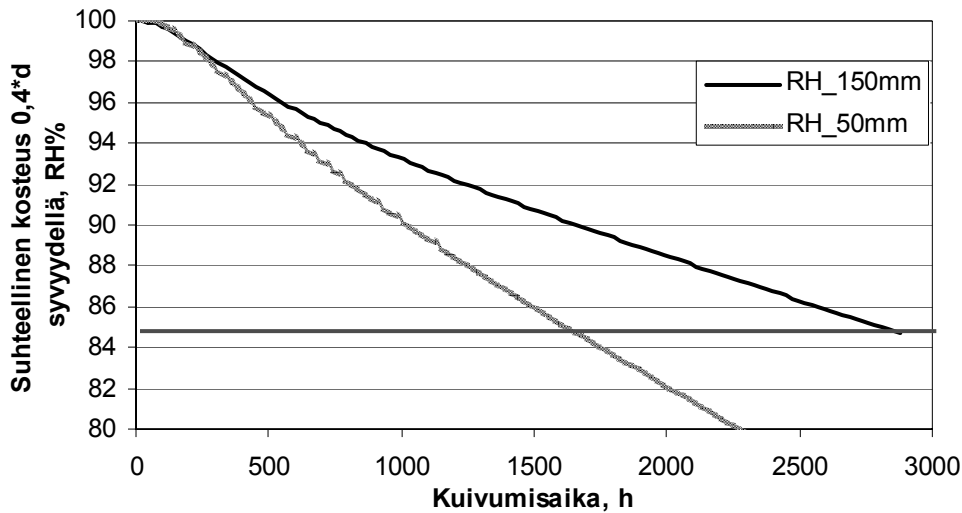
#### Pisteittäisen lämmittämisen vaikutus laatan lämpö- ja kosteusjakaumaan

Tarkastellaan aluksi 2-ulotteisesti laatan pisteittäisen lämmittämisen vaikutusta laatan kuivumiseen. Rakenne on esitetty kuvassa 3.18. Lämmöneristepaksuus tässä tapauksessa on 150 mm EPS ( $R=5,41 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ). Laskennassa tarkastellaan kahta poikkileikkausta lämmityselementin lähellä (50 mm) ja elementtien keskellä (150 mm). Lämmityselementin lämpötilaksi oletetaan noin  $+30^\circ\text{C}$ . Laskennassa sisäilman raja-arvoina on tasainen lämpötila  $T_s=+20^\circ\text{C}$  ja suhteellinen kosteus  $\text{RH}=50\%$  sekä maan arvoina tasainen lämpötila  $T_{\text{maa}}=+19^\circ\text{C}$  ja  $\text{RH}=100\%$  suhteellinen kosteus.

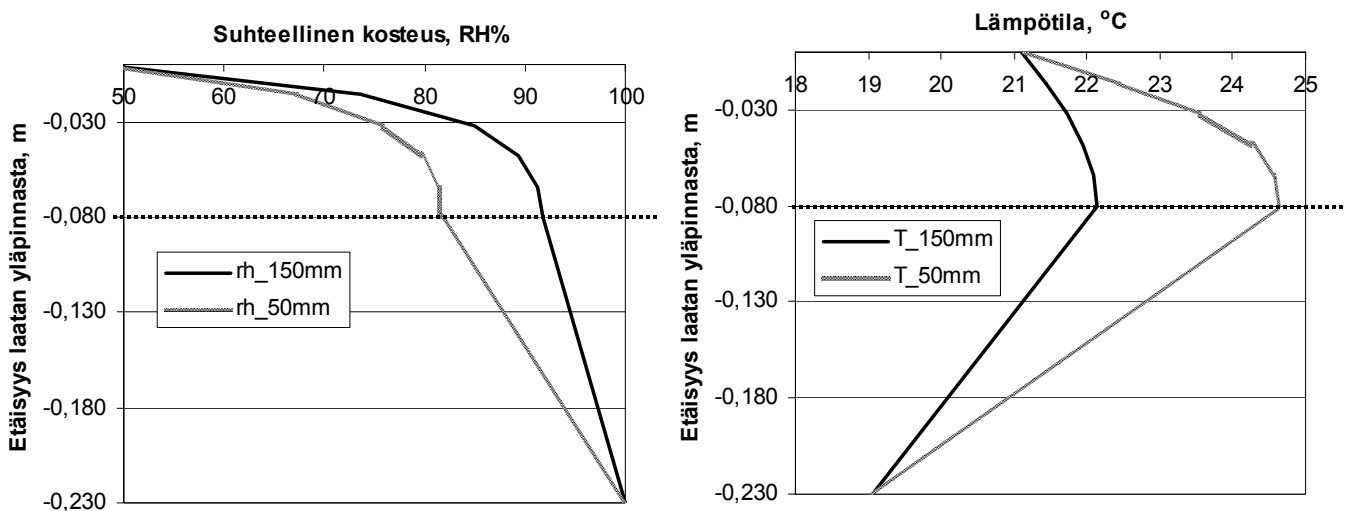
Kriittisellä syvyydellä laatan (32 mm) suhteellinen kosteus muuttuu kuivumisen edetessä kuvan 3.25 mukaisesti. Silloin kun 50 mm etäisyydellä pinnoituskriteerin mittaussyvyydellä,  $0,4 \cdot d$ , suhteellinen kosteus on laskenut 85%:n tasolle, 150 mm päässä lämmityspotkesta suhteellinen kosteus on vielä 90%. 150 mm etäisyydellä lämmityspotkista suhteellinen kosteus laskee 85%:n tasolla vasta noin 50 vuorokautta myöhemmin. Lämpötila- ja kosteusjakauma laatasta riippuu suuresti tarkasteltavan poikkileikkauksen etäisyydestä lämmityspotkesta kuvan 3.26 esittämällä tavalla. Kuvassa 3.26 on esitetty rakenteen lämpötila- ja kosteusprofiili kun 150 mm päässä

lämmityselementistä kriittisellä syvyydellä on saavutettu 85%:n suhteellinen kosteus.

### Pinnoituskriteerin saavuttaminen 50 mm ja 150 mm etäisyydellä lämmitysputkesta



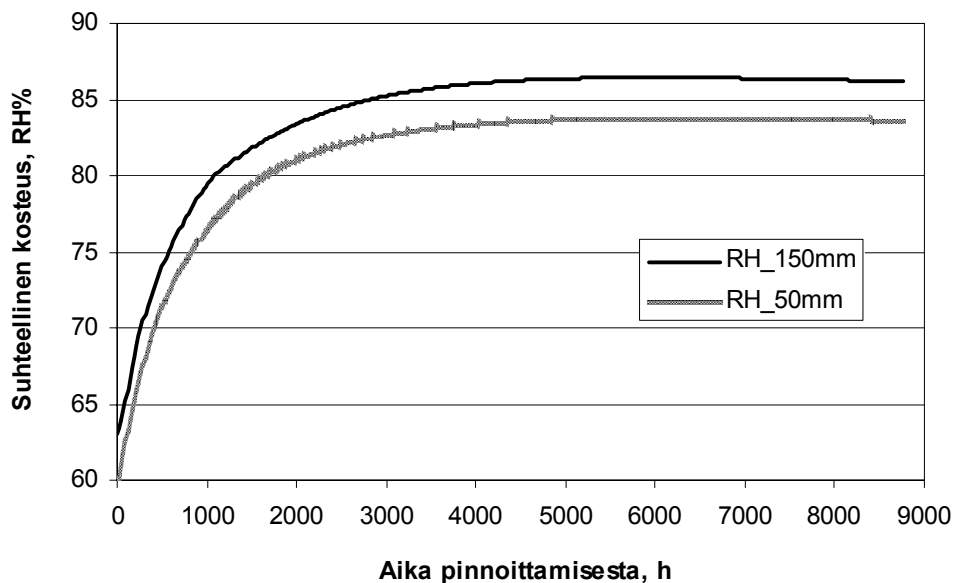
Kuva 3.25 Laatan suhteellinen kosteus 32 mm syvyydellä 50 ja 150 mm päässä lämmityselementistä. Lämmityselementin lämpötila n. +30°C.



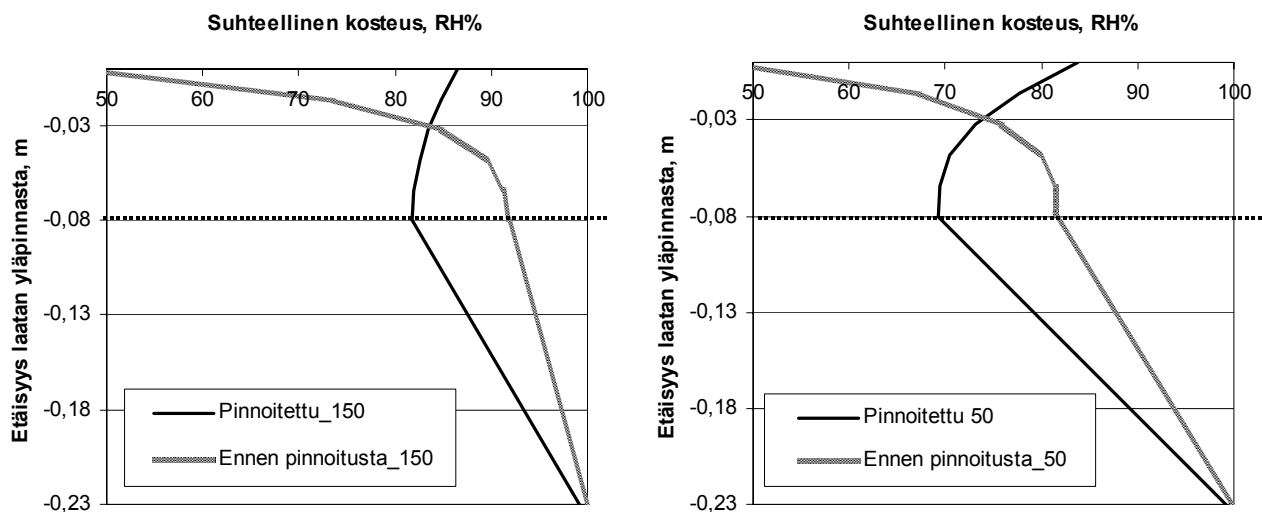
Kuva 3.26 Lämpötila- ja kosteusjakauma kun 150 mm päässä lämmityselementistä  $RH_{krit}=85\%$ .

Jos laatta pinnoitetaan suhteellisen vesihöyryntiiviillä pinnoitteella kun 150 mm päässä lämmityselementistä 32 mm syvyydellä on 85%, pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus muuttuu kuvan 3.27 mukaisesti. Suhteellinen kosteus nousee maksimissaan 150 mm päässä noin RH 83,7%:iin ja 50 mm päässä noin 86,4%:iin. Kuvassa 3.28 on esitetty kosteusprofiilit alapohjassa ennen pinnoittamista ja ajanhetkellä, jolloin pinnoitteen alapinnassa on maksimaalinen suhteellinen kosteus. Kuvasta 3.28 voidaan todeta, että yleinen oletus ennen pinnoittamista kriittisellä syvyydellä mitatun

suhteellisen kosteuden ja pinnoitteen alapinnan korkeimman kosteuspitoisuuden yhteydestä pitää melko hyvin paikkansa lämmityselementtien keskellä olevassa poikkileikkauksessa (150 mm).



Kuva 3.27 Pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus, pinnoitettu kun 150 mm päässä lämmityselementistä  $RH_{krit}=85\%$ .

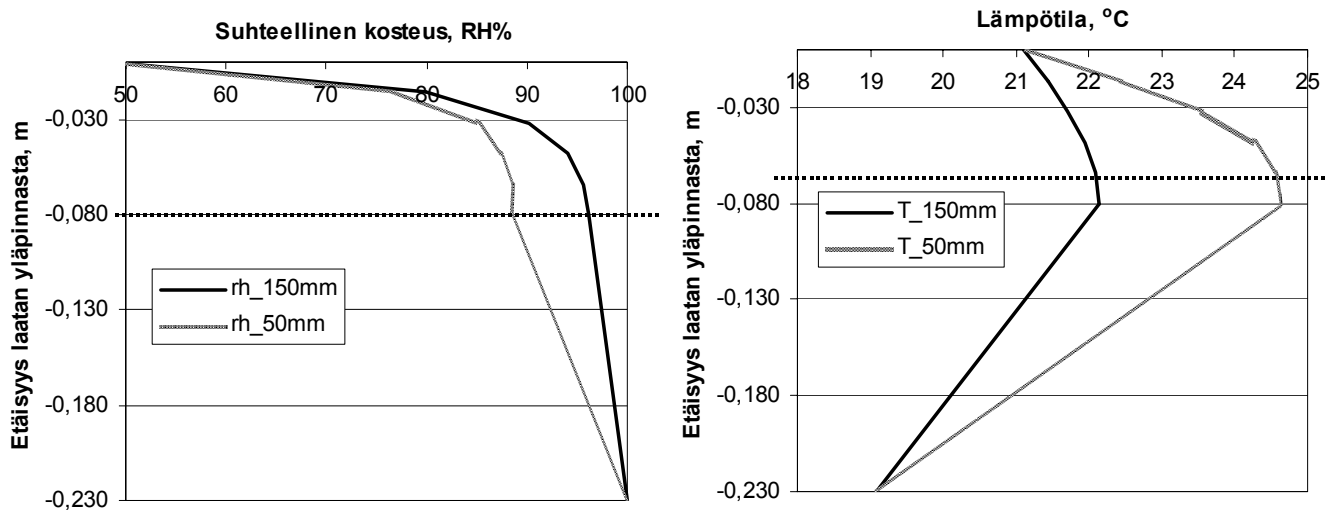


Kuva 3.28 Kosteusprofiilit ennen pinnoittamista ja silloin kun pinnoitteen alla  $RH_{max}$ , pinnoitettu kun 150 mm päässä lämmityselementistä  $RH_{krit}=85\%$ .

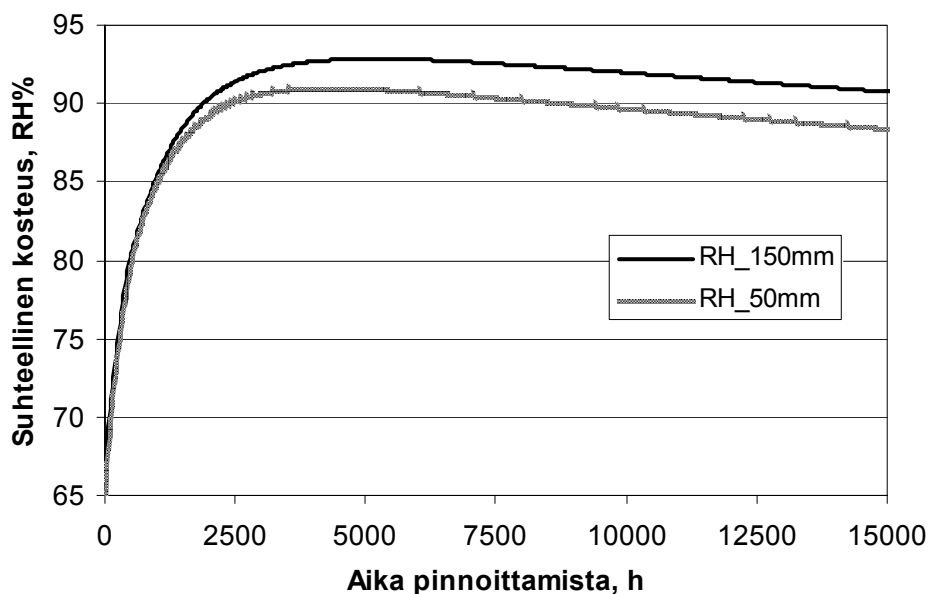
Kuten kuvasta 3.25 voidaan todeta pinnoittamiskriteerin mittauspaikalla on lämmitetyssä laatussa suuri merkitys. Tarkastellaan edellä esitettyä tapausta, mutta oletetaan, että pinnoittamiskriteeri on määritelty 50 mm päässä lämmityselementistä olevasta pisteestä. Tuolloin rakennepoikkileikkauksissa on kuvan 3.29 esittämät lämpötila- ja kosteusjakaumat. Lämmityselementtien keskellä (150 mm) on tuolloin vielä noin 90%:n suhteellinen kosteus. Suhteellisen vesihöyryntiiviillä muovimatolla pinnoittamisen jälkeen pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus nousee kuvan 3.30 esittämällä



tavalla. Jos laatta pinnoitetaan 50 mm etäisyydeltä lämmitysputkesta mitatun pinnoittamiskriteerin mukaan pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus, erityisesti lämmitysputkien keskellä voi nousta liian suureksi, kuvan 3.30 mukaan tasolle RH 92,9%. Samoin lähempänä, noin 50 mm etäisyydellä lämmitysputkesta pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus voi nousta yli 90%:n. Aika, jonka pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus lämmitysputkien välissä on yli 90% on lähes 2 vuotta, noin 680 vrk ja kosteusvaurioriski on ilmeinen.



Kuva 3.29 Lämpötila- ja kosteusjakauma kun 50 mm päässä lämmityselementistä  $RH_{krit}=85\%$ .



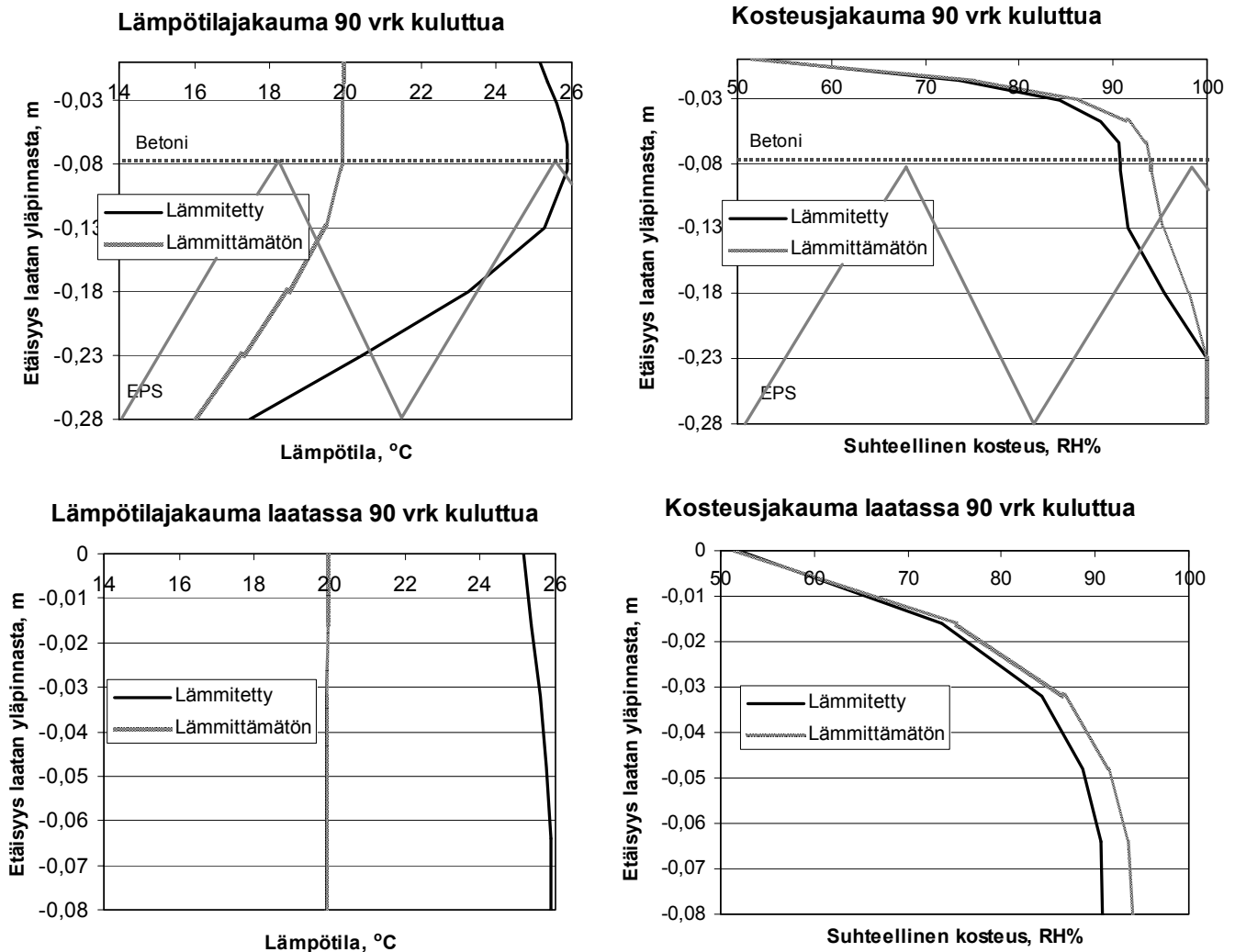
Kuva 3.30 Pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus, pinnoitettu kun 50 mm päässä lämmityselementistä  $RH_{krit}=85\%$ .

## Lämmitetyn ja lämmittämättömän laatan vertailu

Seuraavassa verrataan edellä esitettyä lämmitettyä laattaa lämmittämättömään laattaan.

Tarkastellaan 2-ulotteisesti kuinka laatan lämmittäminen vaikuttaa laatan kuivumiseen. Alapohjarakenne muodostuu 80 mm betonilaatasta, jonka alla on 200 mm EPS-eristettä. 2D-mallina käytetään edellä esitettyä, kuvassa 3.18 esitettyä mallia lämmitettynä ja ilman lämmitystä. Tarkastelun aluksi 1 kuukauden ajan laatta on lämmittämätön, jonka jälkeen lämmityselementin lämpötila nostetaan  $+30^{\circ}\text{C}$ :seen. Laskennassa sisäilman raja-arvoina on tasainen lämpötila  $T_s=+20^{\circ}\text{C}$  ja suhteellinen kosteus noin RH 50% sekä maan arvoina tasainen lämpötila  $T_{\text{maa}}=+17^{\circ}\text{C}$  ja RH=100% suhteellinen kosteus. Lämmityksen kytkeminen päälle nostaa rakenteen betonilaatan yläpinnan lämpötilan  $+25^{\circ}\text{C}$ :seen. Tarkasteltava poikkileikkaus on mallin keskellä eli lämmitetyssä tapauksessa lämmityselementtien välissä (150 mm päässä elementistä). Lämmittämättömän laatan alapuolisen maan lämpötila on noin  $T_{\text{maa}}=+16^{\circ}\text{C}$  ja lämmitetyn  $T_{\text{maa}}=+17^{\circ}\text{C}$ . Vastaavasti laatan yläpuolisen sisäilman lämpötila lämmittämättömässä laskentatapauksessa on noin  $T_{\text{sisä}}=+20^{\circ}\text{C}$  ja lämmitetyssä  $T_{\text{sisä}}=+25^{\circ}\text{C}$ , molemmissa tapauksissa sisäilman suhteellinen kosteus on noin  $\text{RH}_{\text{sisä}}=50\%$ .

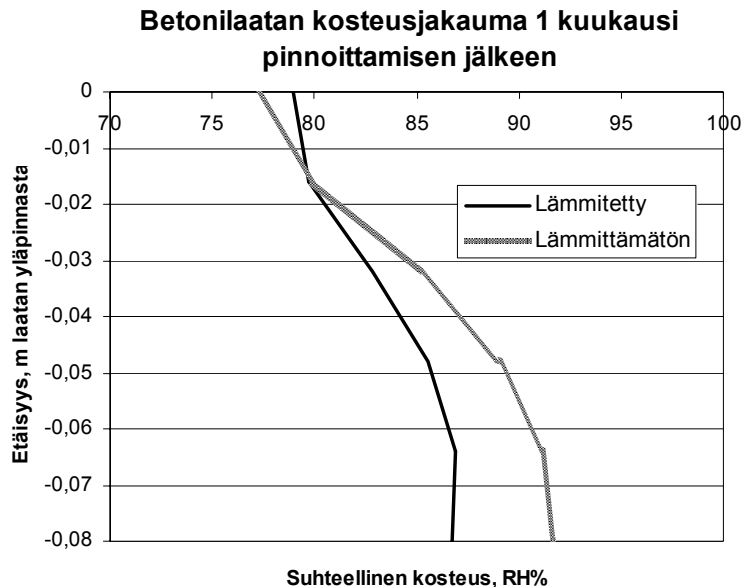
Tarkastellaan ensin betonilaatan kuivumista pinnoittamattomana 90 vuorokauden ajan, jolloin lämmitettyyn ja lämmittämättömään alapohjarakenteeseen ja betonilaattaan muodostuvat kuvan 3.31 lämpötila- ja kosteusjakaumat. Tuolloin betonilaatassa 32 mm syvyydellä (=kriittinen mittaussyvyys) suhteellinen kosteus lämmittämättömässä laatussa on noin RH87% ja lämmitetyssä noin RH84%. Lämmitetty laatta on saavuttanut RH87%:n suhteellisen kosteuden noin 83 vuorokaudessa. Tässä tapauksessa siis laatan lämmittäminen nopeutti laatan kuivumista noin yhdellä viikolla.



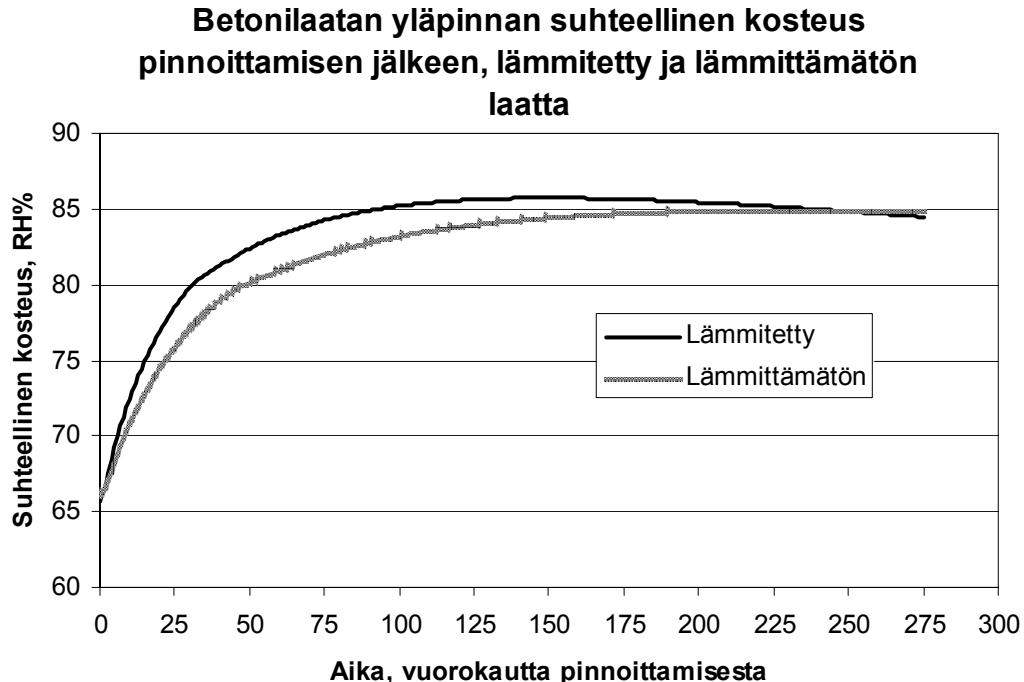
**Kuva 3.31** Lämmitettyyn ja lämmittämättömään alapohjarakenteeseen (80 mm betoni + 200 mm EPS) ja erityisesti betonilaattaan muodostuva lämpötila- ja kosteusjakauma 90 vuorokauden kuivumisajan kuluttua.

Molemmat laatat pinnoitetaan suhteellisen vesihöyryntiivillä muovimatolla ajanhetkellä, jolloin molemmissa kriittisellä syvyydellä on RH87%:n suhteellinen kosteus eli lämmittämätön 90 vuorokautta ja lämmitetty 83 vuorokautta valusta. Kuukauden kuluttua pinnoittamisesta laattoihin on muodostunut kuvan 3.32 esittämä kosteusjakauma. Kuvasta 3.32 voidaan nähdä, että lämmitetyn laatan yläpinnan suhteellinen kosteus pinnoittamisen jälkeen nousee nopeammin kuin lämmittämättömän johtuen korkeamman lämpötilan aiheuttamasta suuremmasta kosteuspotentiaalista. Kuvassa 3.33 esitetään laatan yläpinnan suhteellisen kosteuden muuttuminen pinnoittamisen jälkeen. Lämmitetyn laatan yläpinnan suhteellinen kosteus nousee maksimissaan noin RH 86%:iin eli noin 1 RH%:n korkeammaksi kuin lämmittämättömässä. Tästä syystä lämmitetyn betonilaatan tapauksessa tulee kiinnittää erityistä huomiota pinnoituskriteerin saavuttamiseen ennen pinnoitusta. Kosteusteknisen toiminnan kannalta on myös tärkeää valita oikea mittauspaiikka ja -syvyys pinnoituskriteerin todentamisessa. Kuvan mukaan

lämmitetyn laatan yläpinta saavuttaa suhteellisen kosteuden maksiminsa noin 150 vuorokauden kuluttua pinnoittamisesta, lämmittämättömässä maksimikosteus saavutetaan noin 100 vuorokautta myöhemmin. Lämmittämätön laatta pysyy kauemmin kosteana, lämmitetty kuivuu nopeammin saavutettuaan maksimikosteuden.



Kuva 3.32 Betonilaatan kosteusjakauma 1 kuukausi pinnoittamisen jälkeen, lämmitetty ja lämmittämätön laatta.



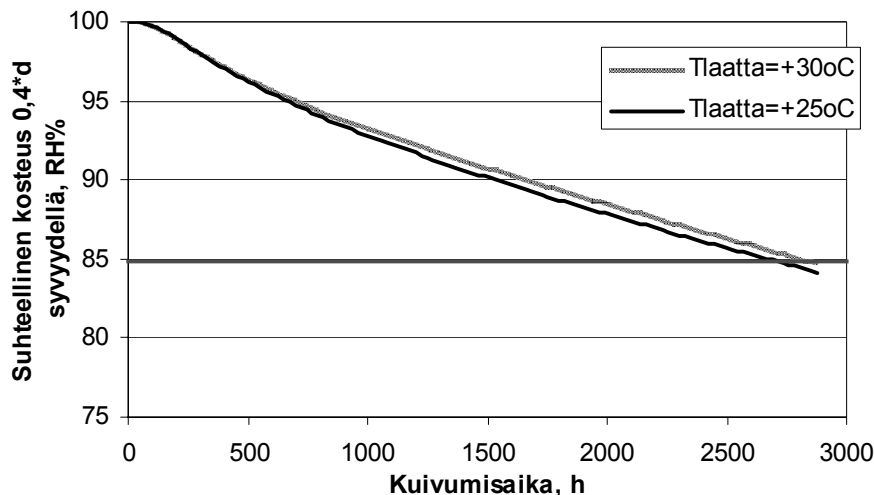
Kuva 3.33 Betonilaatan yläpinnan suhteellinen kosteus, lämmitetty laatta pinnoitettu 83 vrk iässä, lämmittämätön 90 vrk.

## Lämmitetyn laatan lämpötilan ja sisäilman suhteellisen kosteuden vaikutus

Seuraavissa tarkasteluissa lämmöneristyksenä on käytetty 150 mm EPS-lämmöneristettä ( $R= 4,05 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ). Muuten käytetty laskentamalli ja alapohjarakenne ovat samat kuin edellä.

Oletetaan aluksi laatan lämpötilaksi  $+25^\circ\text{C}$  tai  $+30^\circ\text{C}$  ja sisäilman suhteelliseksi kosteudeksi RH50%. Pohjamaan lämpötilaksi tapauksessa, jossa laatan lämpötila on  $+25^\circ\text{C}$  on oletettu noin  $+16^\circ\text{C}$  ja vastaavasti kun laatan lämpötila on  $+30^\circ\text{C}$ , pohjamaan lämpötila on  $+19^\circ\text{C}$ . Tarkastellaan betonilaatan kuivumista pinnoittamiskriteeriä (RH85%) vastaavaan suhteelliseen kosteuteen kriittisellä syvyydellä. Tässä tapauksessa kuvan 3.34 mukaan laatan lämpötilan nosto 5:llä  $^\circ\text{C}$ -asteella nopeuttaa laatan kuivumista pinnoittamiskriteeriin vain noin 6 vuorokaudella. Lämpötilan kuivumista nopeuttava vaikutus on suhteellisen pieni, koska laatan pintalämpötila nousee ja kun ilman suhteellinen kosteus pysyy samana, kosteusvirta laatasta ylöspäin ei suurene kovin paljon. Toisaalta laatan lämpötilan nosto nostaa myös rakenteen alapuolisen maan lämpötilaa, jolloin laatan kuivuminen alaspäin hidastuu.

**Laatan lämmityksen vaikutus pinnoituskriteerin saavuttamiseen (RH<sub>sisä</sub>=50%)**

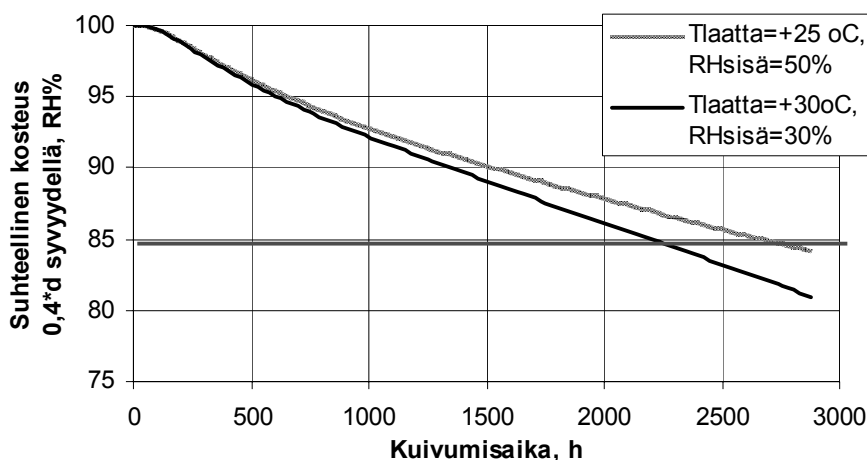


**Kuva 3.34** Betonilaatan suhteellinen kosteus 32 mm syvyydellä. Laatan lämpötila  $+25^\circ\text{C}$  tai  $+30^\circ\text{C}$  ja sisäilman suhteellinen kosteus RH50%.

Pelkkä laatan lämpötilan nosto ei siis nopeuta merkittävästi laatan kuivumista pinnoittamiskriteeriä vastaavalla laatan syvyydellä.

Jos samalla nostetaan laatan lämpötilaa  $+25^\circ\text{C}$ :stä  $+30^\circ\text{C}$ :een ja alennetaan sisäilman suhteellista kosteutta RH50%:sta RH30%:iin kuvan 3.36 mukaisesti pinnoittamiskriteeri saavutetaan noin 20 vuorokautta aiemmin.

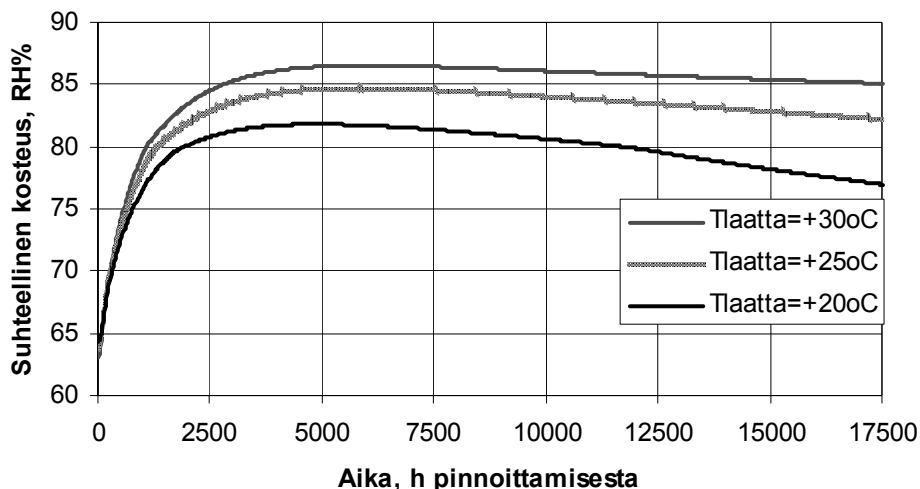
### Laatan lämpötilan ja sisäilman suhteellisen kosteuden vaikutus pinnoituskriteerin saavuttamiseen



Kuva 3.36 Laatan lämpötilan ja sisäilman suhteellisen kosteuden vaikutus pinnoittamiskriteerin (RH85%) saavuttamiseen.

Tarkastellaan seuraavaksi laatan lämpötilan vaikutusta betonilaatan kosteusjakaumaan pinnoittamisen jälkeen. Laatan lämpötila on +20 (=lämmittämätön), +25 tai +30°C ja sisäilman suhteellinen kosteus RH50%. Kukin laatta on pinnoitettu suhteellisen vesihöyryntiiviällä muovimatolla ajanhetkellä, jolloin laatan suhteellinen kosteus kriittisellä syvyydellä on noin RH85%. Pinnoittamisen jälkeen kuvan 3.37 mukaisesti laatan yläpinnan suhteellinen kosteus alkaa kohota. Kuvasta voidaan todeta, että mitä korkeampi laatan lämpötila on pinnoittamisen jälkeen, sitä korkeammalle laatan yläpinnan suhteellinen kosteus nousee. Tästä syystä välittömästi pinnoittamisen jälkeen laatan lämpötilaa ei tulisi nostaa kovin korkeaksi, erityisesti jos laatta on pinnoitettu vesihöyryntiiviällä pinnoitteella.

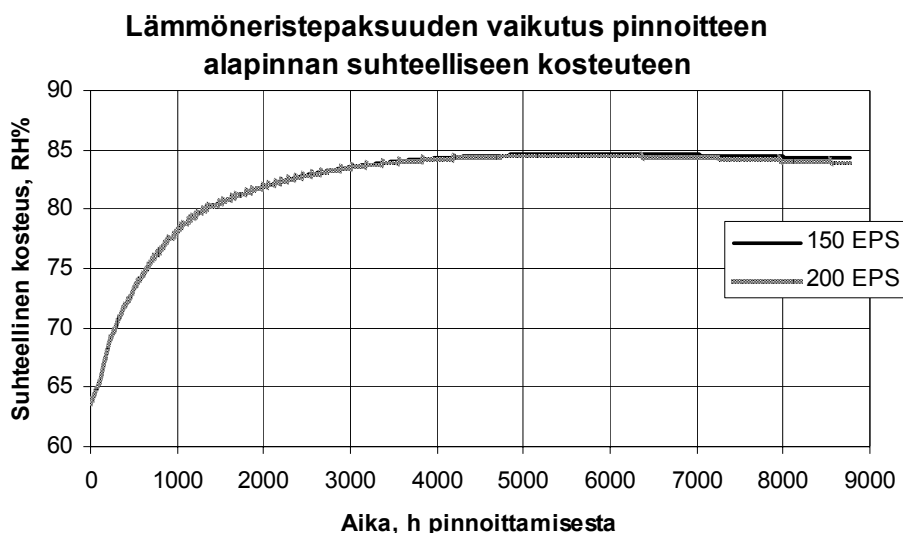
### Laatan lämpötilan vaikutus pinnoitteen alapinnan kosteuteen (RHsisä=50%)



Kuva 3.37 Laatan lämpötilan vaikutus betonilaatan yläpinnan suhteelliseen kosteuteen pinnoittamisen jälkeen.

## Lämmönerityksen vaikutus laatan kuivumiseen

Seuraavassa tarkastellaan laatan alapuolisen lämmöneristeen vaikutusta laatan kuivumiseen. Lämmöneristeenä on joko 150 mm tai 200 mm EPS-lämmöneristettä. Sisäilman suhteellinen kosteus on molemmissa tapauksissa RH50%. Pohjamaan lämpötilaksi on oletettu tapauksessa, jossa 150 mm EPS +16°C ja vastaavasti 200 mm EPS:n tapauksessa +14°C. Laatan lämpötilaksi oletetaan tasainen +25°C. Tarkasteltaessa betonilaatan kuivumista pinnoittamiskriteeriin (RH85%) lämmöneristepaksuudella ei ole merkitystä: molemmat laatat kuivuvat kriittiseltä syvyydeltä pinnoittamiskriteeriä vastaavaan suhteelliseen kosteuteen yhtä nopeasti, koska sisäilman olosuhteet pääasiassa määräävät laatan yläosan ja kriittisellä syvyydellä tapahtuvan kuivumisen. Suhteellisen vesihöyryntiiviillä muovimatolla pinnoittamisen jälkeen molempien laattojen yläpinnan suhteellinen kosteus nousee samaa tahtia (kuva 3.38). Vasta lähellä pinnoitteen alapinnan suurinta suhteellista kosteustasoa muodostuu hieman eroa: laatassa, jossa on 150 mm lämmöneristettä laatan yläpinnan suhteellinen kosteus nousee maksimissaan noin 84,7 RH%:iin, kun vastaavasti kun on 200 mm eristettä suhteellinen kosteus jää noin 0,2 RH% alhaisemmalle tasolle.



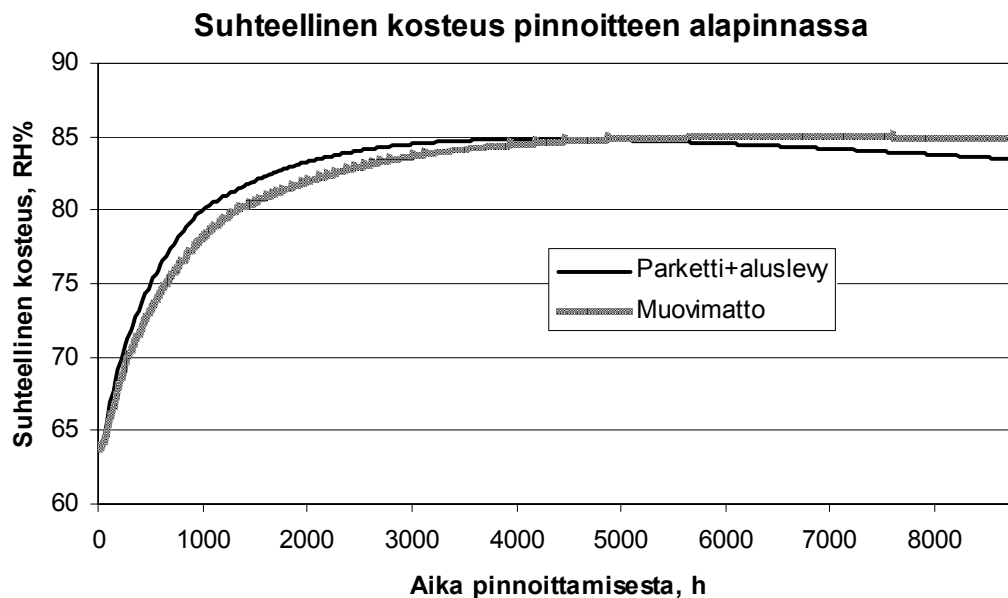
Kuva 3.38 Lämmöneristepaksuuden vaikutus pinnoitteen alapinnan suhteelliseen kosteuteen.

## Pinnoitteen lämmönjohtavuuden vaikutus betonilaatan kosteuskäyttäytymiseen

Tarkastellaan pinnoitteen lämmönjohtavuus- ja vesihöyrynläpäisevyysominaisuuksien vaikutusta betonilaatan kuivumiseen. Tarkastellaan betonilaattaa, paksuudeltaan 80 mm, jonka alla tasainen lämmöneristekerros, EPS 150 mm ( $R=4,05 \text{ m}^2 \text{ W/K}$ ). Sisälämpötilaksi oletetaan tasainen  $T_{\text{sisä}}=+20^\circ\text{C}$ , ja suhteelliseksi kosteudeksi  $\text{RH}_{\text{sisä}}=50\%$ . Maan lämpötilaksi oletetaan tasainen  $T_{\text{maa}}=+17,5^\circ\text{C}$ . Lämmitettyyn betonilaattaan oletetaan lämpötilaksi  $T_{\text{laatta}}=+25^\circ\text{C}$ . Tarkastellaan betonilaatan yläpinnan suhteellista kosteutta sen jälkeen kun laatta on pinnoitettu joko muovimatolla tai aluslevyllisellä parketilla. Muovimatton lämmönvastukseksi on

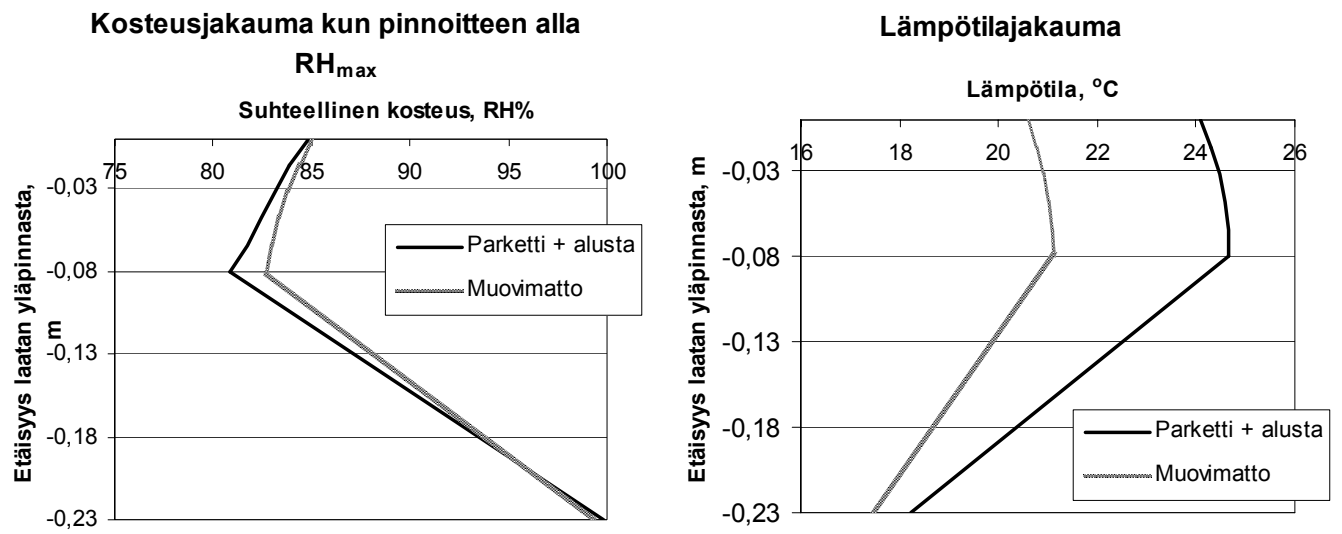
oletettu 0 ja parketti (12 mm) ja aluslevy-yhdistelmälle  $R=0,156 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ . Muovimaton vesihöyrynvastuksena on käytetty on  $Z_v=1500 \cdot 10^3 \text{ s/m}$  ja parkettiyhdistelmälle  $Z_v=3333 \cdot 10^3 \text{ s/m}$  (alusmateriaalille on oletettu muovikalvon vesihöyrynvastus).

Tarkastellaan pinnoitteen alapinnan suhteellisen kosteuden muutosta pinnoittamisen jälkeen. Kuva 3.39 mukaisesti pinnoittamisen jälkeen parketin (aluslevyn) alla suhteellinen kosteus nousee nopeammin kuin muovimaton alla. Tämä johtuu siitä, että parketin alla olevan betonilaatan lämpötila on jonkin verran korkeampi kuin muovimaton alla johtuen parketin lämmönvastuksesta. Toisaalta parketin alla saavutetaan maksimikosteusjakauma nopeammin kuin muovimaton alla. Kuvassa 3.40 on esitetty kosteusjakaumat alapohjarakenteessa kun pinnoitteen alla suurin suhteellinen kosteus pinnoittamisen jälkeen sekä vastaava lämpötilajakauma. Kuvasta voidaan todeta, että betonilaatan yläpinta on hieman kuivempi parketilla pinnoitetussa laatasta, koska laatan lämpötila on korkeampi, vaikka parketin ja alusmateriaalin on vesihöyrynvastus on suurempi.



Kuva 3.39 Pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus muovimatolla ja parketilla (+aluslevy) pinnoittamisen jälkeen.





Kuva 3.40 Kosteusjakauma pinnoittamisen jälkeen sekä vastaava lämpötilajakauma.

## 4 LATTIALÄMMITYKSEN ENERGIANKULUTUS

Lattialämmitys lisää maaperään suuntautuvia lämpöhäviöitä, koska tilan lämmityksen tarvitsema lämpöteho tuotetaan betonilaatan sisällä. Patterilämmityksessä laatta sen sijaan toimii lisäeristeenä huoneilman ja pohjamaan välillä. Ruotsissa tehdyissä tutkimuksissa on selvinnyt, että lattialämmitys lisää lämmönkulutusta. Eräässä tutkimuksessa saatiin lämmönkulutuksen lisäykseksi jopa 30 % (Harrysson 1992). Tässä tutkimuksessa oli kuitenkin epävarmuustekijöitä, kuten se, että vertailurakennukset olivat erilaisia ja niiden ominaisuudet vaihtelivat. Lisäksi perheiden koot olivat erilaisia. Toisessa tutkimuksessa todettiin, että lattialämmitys lisää lämmönkulutusta 12...15 % (Roots 1998), kun alapohjan lämmöneristyskerros on ohut. Pintamateriaalin valinta vaikuttaa jossakin määrin myös lämpöolosuhteisiin ja energiankulutukseen. Jos pintamateriaalina on parketti, kasvavat lämpöhäviöt maaperään, koska parketti pidättää lämpöä. Esimerkki hyvästä pintamateriaalista, joka helposti päästää lävitseen lämpöä sisäilmaan, on muovimatto tai klinkkeri.

### 4.1 Rakennuksen energiankulutus, laskentamenetelmä

Rakennuksen kokonaisenergiankulutus muodostuu huoneilojen lämmitysenergian kulutuksesta, taloussähkön kulutuksesta sekä käyttöveden lämmittämiseen tarvittavasta energiasta. Huoneilojen lämmitysenergian tarve eli lämmöntarve muodostuu lämmön johtumisesta ulkovaipan läpi sekä koneellisen ja vuotoilman mukana poistuvasta energiasta aiheutuvista häviöistä, joita vähentää ikkunoiden kautta tulevasta auringon säteilystä ja sisäisistä lämmönlähteistä, kuten laitteista ja ihmisistä aiheutuva sisäinen lämpöenergia.

Rakennuksen energiankulutus voidaan laskea Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan D5 Rakennusten lämmitysten tehon- ja energiantarpeen laskentaohjeen mukaan tai jollakin muulla yleisesti hyväksytyllä laskentamenetelmällä. Rakennusten ja niiden järjestelmien energiankulutuksen laskentaa käsittelevät eurooppalaiset standardit ovat valmistumassa ja osin valmistuneet. Rakennuksen lämmöntarpeen D5:lle vaihtoehtoinen laskentamenetelmä on EN ISO 13790 (EN ISO 13790). Eurooppalaisessa standardisarjassa on standardi maaperään johtuvien lämpöhäviöiden laskentaan (EN ISO 13370).

#### 4.1.1 Lattialämmityksen aiheuttamat lämpöhäviöt, laskentamenetelmä

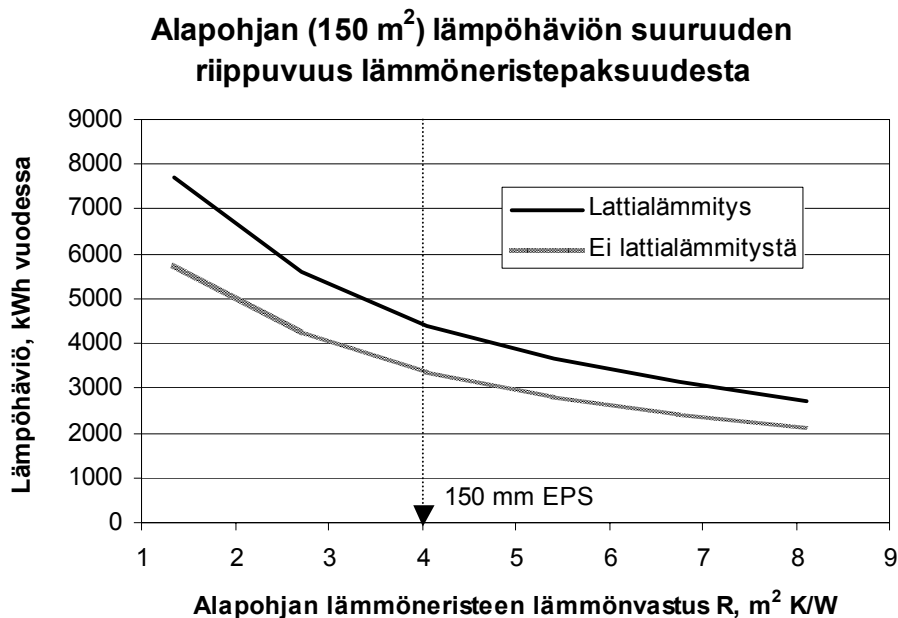
Eurooppalaisen standardin EN ISO 13790 (EN ISO 13790) laskentamenetelmä perustuu luvussa 2 esiteltyyn kuvan 2.2 esittämään malliin alapohjan lämpöhäviöistä. Mallin mukaan lämpövirta alapohjasta maahan ja ulkoilmaan on ympyräkaaren muotoinen. Lämpöhäviön laskentamenetelmässä laatan ja sokkelirakenteen lämpövastus esitetään ns. ekvivalenttisina paksuuksina muuttaen ko. paksuudet sellaisiksi, jotka ne olisivat jos lämmönjohtuvuus olisi sama kuin pohjamaan. Lämpövirran 3-dimensioinen luonne otetaan huomioon laskentamenetelmässä käyttämällä ns. karakterista pituutta ( $B'$ ).

## 4.2 Teoreettiset laskelmat

Seuraavassa tarkastellaan teoreettisesti lattialämmitetyn alapohjan lämpöhäviötä sekä lattialämmityksen vaikutusta rakennuksen kokonaisenergian kulutukseen. Tarkasteltava esimerkkirakennus on 10x15 m<sup>2</sup> 1-kerroksinen pientalo, joka täyttää Suomessa voimassa olevat lämmöneristys- ja ilmanvaihtomääräykset (RakMK C3, 2003 ja D2, 2003).

### 4.2.1 Alapohjan lämpöhäviöt

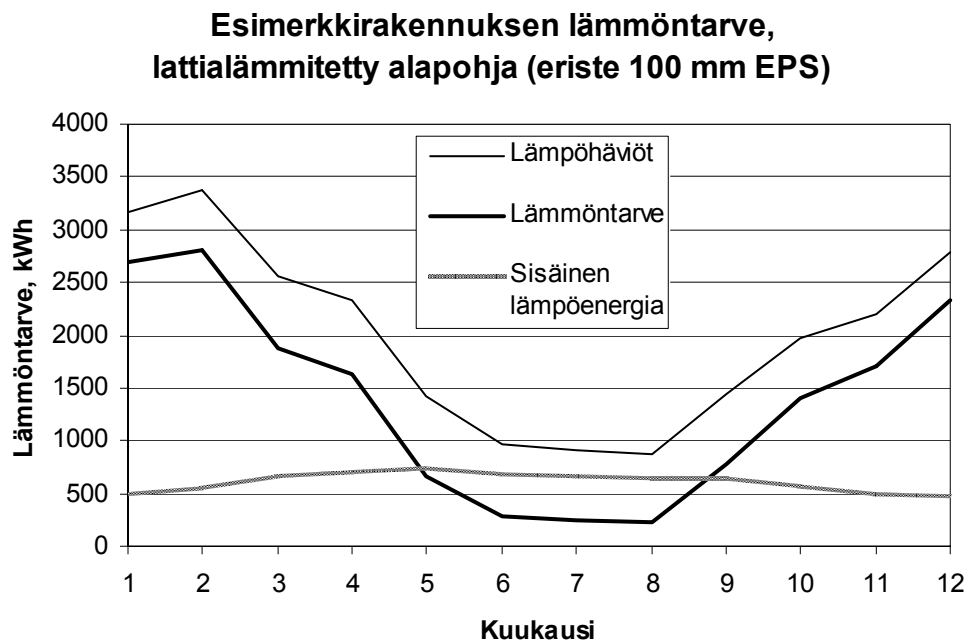
Tarkasteltava alapohja muodostuu 80 mm betonilaatasta, jonka alla on EPS lämmöneristekerros (50...200 mm). Rakennuksen sokkelissa on 50 mm EPS lämmöneristys pystysuorassa ja sokkelin ulkopuolisena lämmöneristeenä on 1000 mm leveä 50 mm paksu EPS-eriste ( $R=1,35 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ). Lämmöneristysputket ovat betonilaatan puolella välissä. Lämmitetyn alapohjan lämpötilan oletetaan vaihtelevan +20...+30°C vuoden aikana (keskiarvo +25°C), sisälämpötilan oletetaan olevan tasainen +21 °C. Lämmittämättömän alapohjan laatan lämpötilaksi oletetaan tasainen +20°C. Ulkolämpötilana laskelmissa käytetään Jyväskylän tilastollisia vuotuisia keskiarvoja. Alapohjan lämpöhäviöt laskettiin kuukausittain standardissa EN ISO 13370 esitetyillä epästationääritilan kaavoilla. Laskelmissa varioitiin laatan lämmöneristeen lämmönvastusta  $R$ , välillä 1,35...8,11 m<sup>2</sup> K/W (vastaavat EPS-eristeellä eristepaksuuksia 50...300 mm). Kuvassa 4.1 on esitetty alapohjan lämpöhäviön riippuvuus lämmöneristepaksuudesta sekä lämmitetyllä että lämmittämättömällä alapohjalla. Kuvasta voidaan todeta, että laskelmien mukaan lattialämmitys lisää alapohjan lämpöhäviötä 33...31% lattialämmittämättömään verrattuna, eniten heikommin lämpöeristetyssä alapohjassa.



Kuva 4.1 Alapohjan lämpöhäviön riippuvuus lämmöneristepaksuudesta standardin EN ISO 13370 mukaan, lämmitetty ja lämmittämätön alapohja.

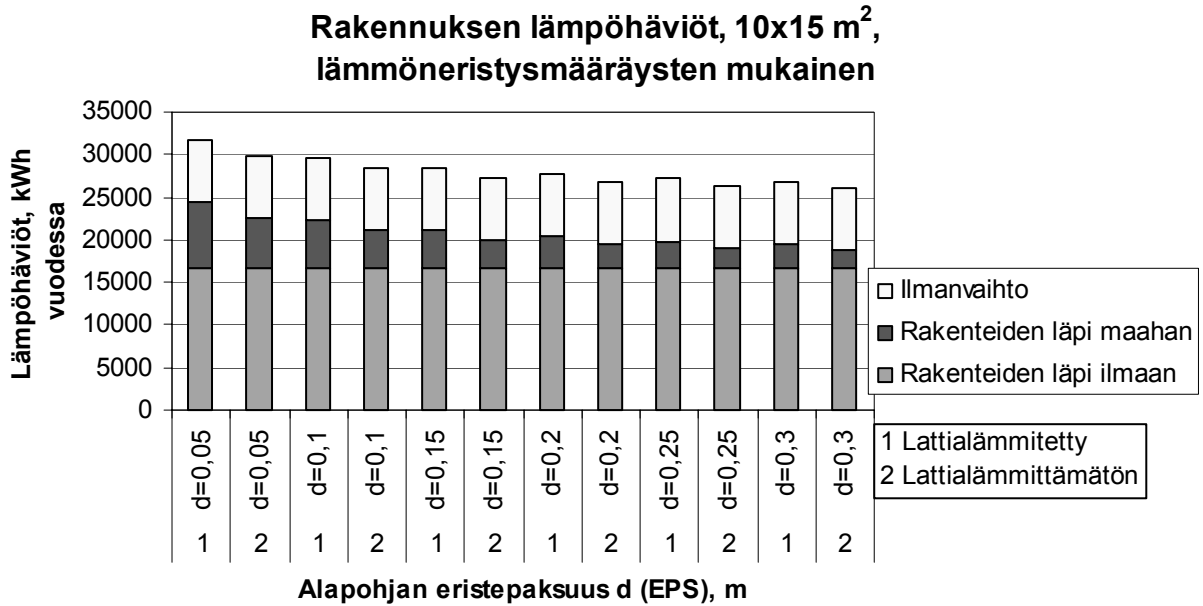
## 4.2.2 Rakennuksen lämmöntarve

Rakennuksen lämmöntarpeen määrittämiseksi lasketaan lämpöhäviöt rakennuksen vaipan läpi johtumisesta eriteltynä ilmaan ja maahan johtuvaan lämpöön ja ilmanvaihdosta sisältäen hallitsemattoman ilmanvaihdon eli vuotoilmanvaihdon sekä sisäiset lämpöenergiat auringon säteilystä ja sisäisistä lämmönlähteistä. Lämmöntarve määritellään vähentämällä lämpöhäviöistä sisäinen lämpöenergia. Kuvassa 4.2 on esitetty lämmöntarve sekä lämpöhäviöt ja sisäinen lämpöenergia kuukausittain.



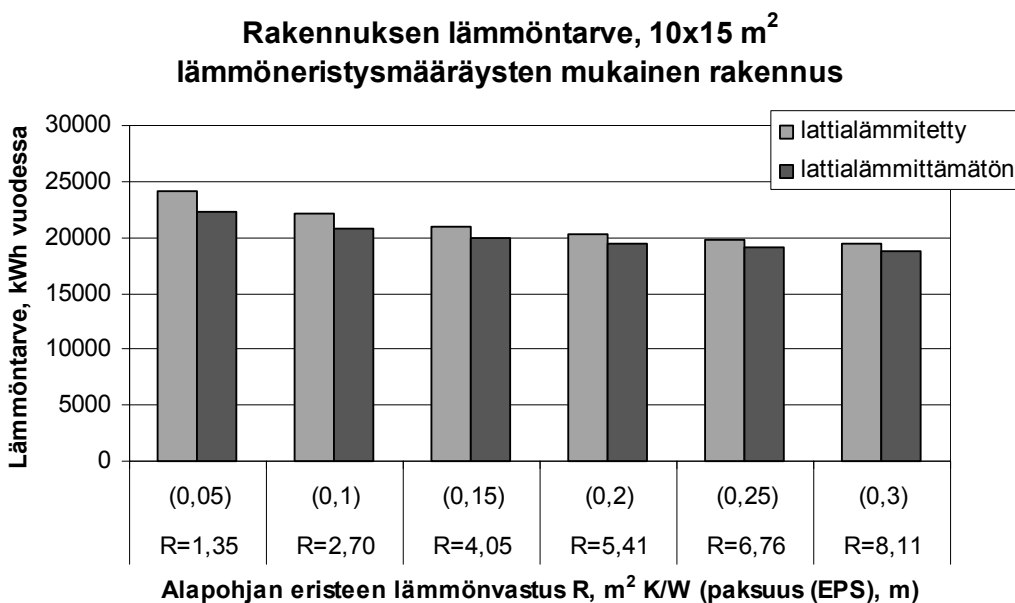
*Kuva 4.2 Esimerkkirakennuksen kuukausittainen lämmöntarve (=lämpöhäviöt– sisäinen lämpöenergia) sekä lämpöhäviöt ja sisäinen lämpöenergia.*

Kuvassa 4.3 on esitetty rakennuksen vuotuinen lämpöhäviö johtumisena maahan, ilmaan sekä häviöinä ilmanvaihtoon lattialämmitetyllä ja lattialämmittämättömällä rakennuksella alapohjan lämmöneristeen lämmönvastuksen vaihdellessa 1,35...8,11 m<sup>2</sup> K/W (50...300 mm EPS). Alapohjan lämpöhäviöiden osuus kaikista lämpöhäviöistä vaihtelee lämmitetyllä alapohjalla 24...10% lämmöneristepaksuuden vaihdellessa 50...300 mm. Vastaavasti lämmittämättömällä alapohjalla alapohjan lämpöhäviöiden osuus vaihtelee 19...8%:iin.



Kuva 4.3 Rakennuksen lämpöhäviöt lattialämmitetyssä ja lämmittämättömässä rakennuksessa.

Kuvassa 4.4 on esitetty rakennuksen vuotuinen lämmöntarve (= lämpöhäviöt – sisäinen lämpöenergia). Kuvasta nähdään, että lattialämmityksen vaikutus rakennuksen lämmöntarpeeseen ei ole merkittävä, esimerkiksi lattialämmitys lisää lämmöntarvetta 8...3% alapohjan lämmöneristeen lämmönvaston vaihdellessa 1,35...8,11 m<sup>2</sup> K/W (50...300 mm EPS). Huomattavaa kuitenkin on, että uusilla kiristetyillä lokakuussa 2003 voimaan tulleilla U-arvovaatimuksilla saavutetaan esimerkkirakennuksessa on 21%:n energiasäästö tapauksessa, jossa lattialämmitetyssä alapohjassa molemmissa tapauksissa on 100 mm EPS-lämmöneriste. Tässä tapauksessa lattialämmitys vähentää ¼-osan tavoitellusta energiasäästöstä.



Kuva 4.4 Rakennuksen vuotuinen lämmöntarve.

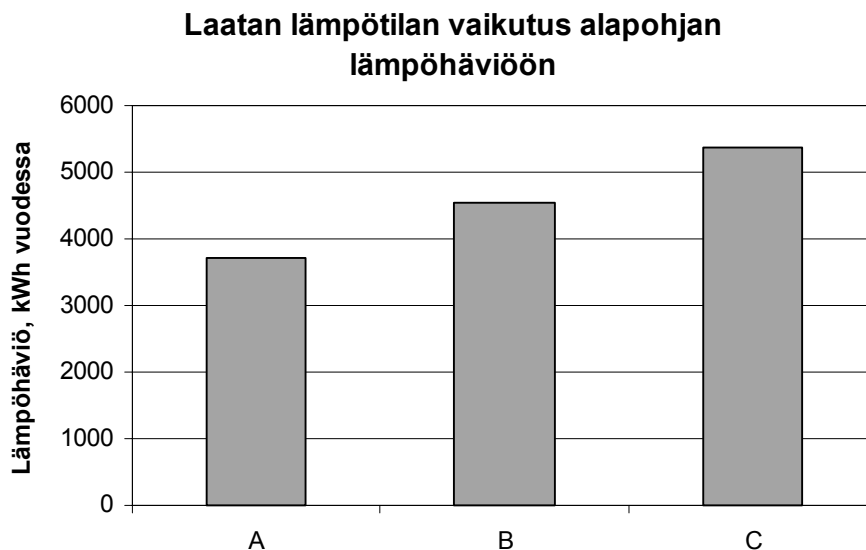
### 4.2.3 Lattialämmitetyn laatan lämpötilan vaikutus lämpöhäviöihin

Tarkastellaan edelleen samaa 10x15 m<sup>2</sup> rakennusta, jonka lämmitetyssä alapohjassa on 200 mm EPS-lämmöneristettä ( $R=5,41 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ) ja varioidaan laatan kuukausittaista lämpötilaa taulukon 4.1 esittämällä tavalla.

Taulukko 4.1 Laskentatapaukset A, B ja C.

Tapaus	Laatan lämpötila, keskiarvo °C	Lämpötilan vaihtelu
A (=kuten edellä)	25	20...30
B	30	25...35
C	35	30...40

Vuotuinen lämpöhäviö (W) eri laskentatapauksissa on esitetty kuvassa 4.5. Kuvasta voidaan todeta, että jos laatan keskilämpötila nousee 5 °C:tta alapohjan lämpöhäviö kasvaa noin 22%. Jotta laatussa pystytään pitämään alhainen lämpötila, rakennuksen vaipan eli seinien ja yläpohjan lämpöhäviöt tulisi olla mahdollisimmat pienet, jolloin lattialämmityksestä tarvittava lämpöteho on vähäinen (= tarvittava laatan lämpötila alhainen).



Kuva 4.5. Laatan lämpötilan vaikutus alapohjan lämpöhäviöön.

## 5 KENTTÄMITTAUKSET

Tutkimuksen yhteydessä suoritettiin pitkäaikaisia seurantamittauksia neljässä uudisrakennuskohteessa, joissa kaikissa mitattiin sekä lattialämmitettyjen alapohjalaattojen lämpötiloja ja kosteuspitoisuuksia että laatan alapuolisten maakerrosten lämpötilajakaumaa. Suurimmassa osassa tutkimuskohteista oli maanvarainen alapohja, joissa lattialämmitysjärjestelminä oli sekä vesi- että ilmakiertoisia ratkaisuja. Lisäksi tutkittiin yhtä ryömintätilaista lattialämmitettyä pientaloa, jonka kantavana alapohjarakenteena käytettiin höyrykarkaistua kevytbetonilaatasta (Siporex). Kohteita käsitellään anonymisti, mutta kohteiden rakenteet ja materiaalit on selostettu mahdollisimman tarkasti kunkin kohteen esittelyn yhteydessä. Kaikki koekohteet sijaitsivat Etelä-Suomessa Pirkanmaalla ja pääkaupunkiseudulla.

Seurantamittauksissa maakerrosten lämpötilamittauksissa käytettiin termolankoja. Laatan kosteus- ja lämpömittauksissa käytettiin puolijohdeantureita, joita varten laattaan asennettiin ennen valua erilliset suojaputket. Näin laatan mittaasantureita voitiin vaihtaa ja kalibroida uudelleen pitkän seurantajakson aikana. Puolijohdeanturit kalibroitiin ennen asentamista ja jokaisen vaihtokerran yhteydessä olosuhdekaapissa, jonka kosteuspitoisuutta kontrolloitiin kylläisten suolojen avulla.

Yksittäiset mittaasanturit yhdistettiin kaapeloinnilla tietokoneohjattuun tiedonkeruulaitteistoon, joka käsitti erillisen data-loggerin ja kannettavan tietokoneen. Kaikissa mittauskohteissa asennetut anturit luettiin automaattisesti kolmesti päivässä kahdeksan tunnin välein.

Kohteiden sisäilmaolosuhteita mitattiin erillisen mittausloggerin avulla, joka rekisteröi säännöllisin väliajoin huoneilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden. Useimmissa kohteissa sisäilmalukemat kerättiin muita mittauslukemia useammin, keskimäärin kerran tunnissa.

Koekohteissa ei mitattu ulkoilman olosuhteita kohdetta D lukuunottamatta. Muiden kohteiden osalta turvaututtiin Ilmatieteenlaitokselta hankittuun paikkakuntakohtaiseen säädäntään, joka käsitti vuorokauden keskimääräiset lämpötilat ja ilmankosteudet.

### 5.1 Koekohteet

Tutkimuksessa seurattiin pitkäaikaisesti neljää erillistä kohdetta, joista yhdessä oli instrumentoituina kaksi erillistä asuntoa. Kohteiden joukossa oli kolme tyypillistä maanvaraista lattialämmitettyä alapohjaa sekä yksi ryömintätilainen lattialämmitetty alapohja. Yksittäisten rivi-, pari- ja omakotitalojen lisäksi koekohteena oli suuripinta-alainen lattialämmitetty hallirakennus. Kolmessa kohteessa käytettiin vesikiertoista lattialämmitystä ja yhdessä ilmakiertoista lämmönjakolaitteistoa.

**Kohde A** on maanvaraisen laatan omaava vesikiertoisella lattialämmityksellä lämmitetty paritalo, jonka toisen asunnon alapohjassa käytettiin  $h_e = 200$  mm EPS -eristettä ja toisessa osassa  $h_e = 120$  mm polyuretaanieristettä alapohjan alapuolisena lämpöeristeenä. Muutoin alapohja- ja perustusrakenteet ja käytetyt materiaalit rakennuksen molemmissa osissa ovat samankaltaiset.

**Kohde B** on rivitalo, jonka maanvaraisessa betonisessa alapohjalaatassa oli alapuolinen EPS eristys  $h_e = 150$  mm ja vesikiertoinen lattialämmitys.

**Kohde C** on ryömintätilainen omakotitalo, jonka kantavana alapohjarakenteena on Siporex-laatasto, jonka yläpuolella 50 mm EPS lämmöneristekerros ja 50 mm pintalaatta, jossa on vesikiertoinen lattialämmitys.

**Kohde D** on hallirakennus, jonka alapohjaratkaisuna käytettiin ilmalämmitteistä massiivilaattaa ja  $h_e = 160$  mm alapuolista EPS eristystä (ns. Legalett –perustus).

### 5.1.1 Kohde A

Kohde A on kivirakenteinen paritalo Pirkanmaalla. Kohteen alapohjarakenteena on maanvarainen massiivibetonilaatta, johon on asennettu vesikiertoinen lattialämmitys. Kohteen pohja- ja leikkauspiirrokset on esitetty kuvissa 5.1 ja 5.2.

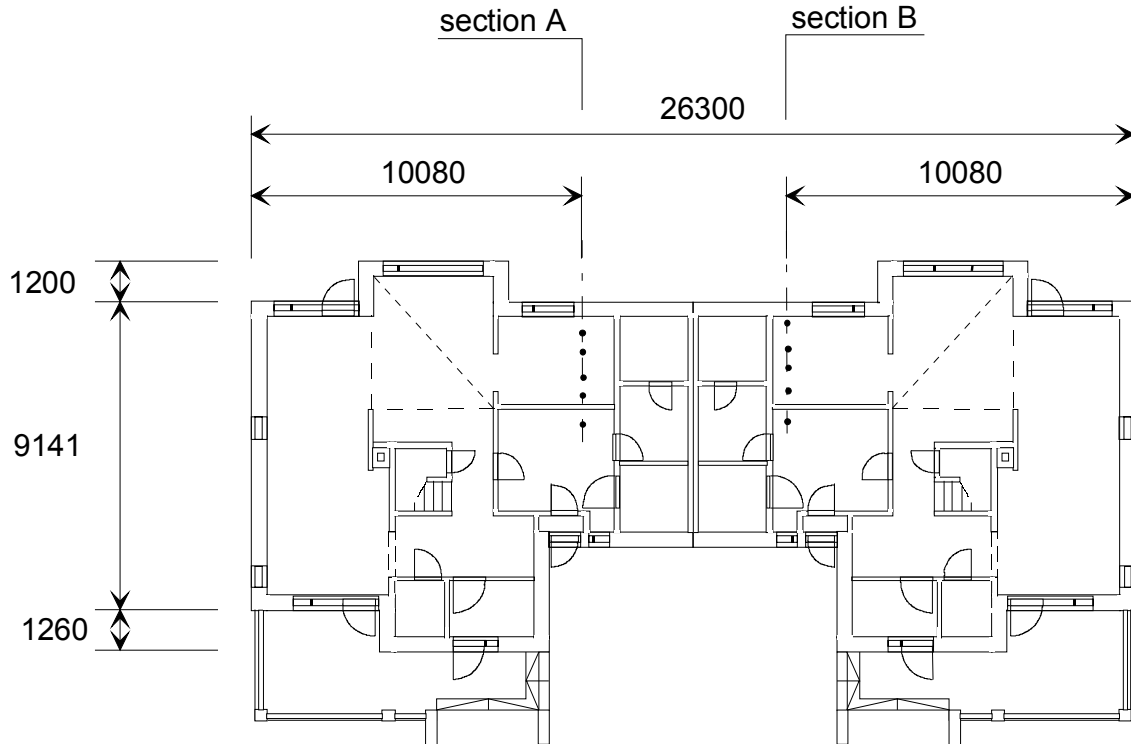
#### 5.1.1.1 Rakenteet

Kuvassa 5.1 on esitetty paritalon A pohjapiirros ja kahden instrumentoidun rakenneleikkauksen sijainnit huoneistoissa. Huoneistojen kantavat vaipparakenteet ovat samankaltaiset. Rakennuksen ulko- ja väliseinät ovat Siporex –harkkorakenteita ja ulkoseinissä on ulkopuolinen polyuretaanieristys.

Rakennuksen perustuksina ovat paikallavaletun betonianturan varaan muuratut halkaistut korkeat lämpöharkkosokkelit, joiden lämmönläpäisyarvo on  $U_{sokkeli} = 0,28$  W/m<sup>2</sup> K (kuva 5.2). Sokkeliä kiertää rakennuksen 1 metrin levyinen ulkopuolinen routaeristyskerros ( $U_{routa} = 0,37$  W/m<sup>2</sup> K). Sokkelin kokonaiskorkeus on noin 800 mm ja se on täytetty tiivistetyllä sora- ja murskekerroksella. Alapohjalaatan eristys on erotettu täyttömurskeesta  $h=200$  mm korkuisella kapillaarikatkokerroksella. Rakennuksessa käytetyt maamateriaalit ja niistä määritetyt parametrit on käsitelty tarkemmin seuraavassa kappaleessa 5.1.1.2. Huoneistojen rakenteet poikkeavat toisistaan vain alapohjalaatan lämmöneristekerroksen osalta. Huoneistossa A laatan alapuolisena eristeenä on käytetty  $h_e = 200$  mm paksuista EPS –eristystä, jolloin alapohjalaatan nimellinen lämmönläpäisyarvo laatan lämmitysputkiston ja täyttökerroksen välille on  $U_{laatta} = 0,18$  W/m<sup>2</sup> K. Huoneistossa B laatan eristeenä on  $h_e = 120$  mm paksuinen polyuretaanikerros ja U – arvo  $U_{laatta} = 0,22$  W/m<sup>2</sup> K. Rakennuksen laatan ja ulkoseinälinjan välisen leikkauksen rakennekerrokset ja lämpöparametrit on esitetty kuvassa 5.2.



Huoneistojen alapohjalaatta on  $h_{laatta} = 80$  mm paksu paikalla valettu massiivilaatta, jonka vesi-sementtisuhte on  $w/c \approx 0,70$ . Raudoitukseen laatan poikkileikkauksen puoliväliin on kiinnitetty lämmitysjärjestelmän kiertovesiputkisto (kuva 5.8 ja 5.9).



Kuva 5.1 Kohteen A pohjapiirros ja instrumentoitujen mittauslinjojen sijainnit.

**laatta, asunto B:**

betoni 40 mm,  $\lambda = 1,7$  W/m K  
SPU 120 mm,  $\lambda = 0,027$  W/m K  
 $U = 0,22$  W/m<sup>2</sup> K

**laatta, asunto A:**

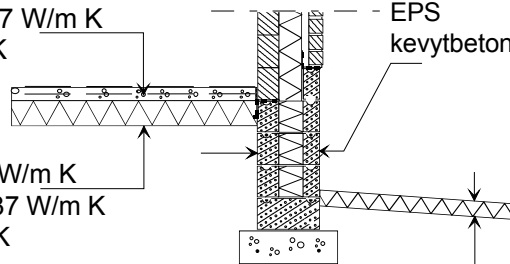
betoni 40 mm,  $\lambda = 1,7$  W/m K  
EPS 200 mm,  $\lambda = 0,037$  W/m K  
 $U = 0,18$  W/m<sup>2</sup> K

**routaeristys:**

EPS 100 mm,  $\lambda = 0,037$  W/m K  
 $U = 0,37$  W/m<sup>2</sup> K

**sokkeli:**

kevytbetoniharkko 100 mm,  $\lambda = 0,24$  W/m K  
EPS 100 mm,  $\lambda = 0,037$  W/m K  
kevytbetoni 100 mm,  $\lambda = 0,24$  W/m K  
 $U = 0,28$  W/m<sup>2</sup> K



**Kapillaarikatkokerros:**  $\lambda = 0,70$  W/m K

**Täyttö:**  $\lambda = 1,00$  W/m K

Pohjamaa:  $\lambda = 1,32$  W/m K

Kuva 5.2 Kohteen A perustusleikkaus ja liittyvien rakenteiden ja rakennekerrosten lämpötekniset parametrit.

Huoneistossa A laatan pinnoitteena mittauslinjan yläpuolisessa huonetilassa (kirjasto) on käytetty 0,2 mm rakennusmuovia, parketinaluspahvia ja 7 mm ohutpuuparkettia. Pinnoitemateriaalien ja -yhdistelmien vesihöyrynläpäisevyydet ja lämmönjohtavuudet määritettiin TTY:n Talonrakennustekniikan laboratoriossa standardien EN ISO 12572 ja EN ISO 8301 mukaisilla mittausmenetelmillä. Mittausten tulokset on esitetty taulukossa 5.1. Vesihöyrynvastusarvo on määritelty kolmella eri pinnoitteen alapuolisella suhteellisen kosteuden arvolla (RH 75, 86 ja 97%), yläpuolisen suhteellisen kosteuden pysyessä vakiona RH 33%. Taulukossa vesihöyrynvastus annettu näissä kolmessa mittauspisteessä järjestyksessä RH 75%, RH 86% ja RH 97%.

*Taulukko 5.1 Kohteen A huoneiston A pinnoitemateriaalien kosteus- ja lämpöparametrit.*

Materiaali tai materiaaliyhdistelmä	Vesihöyrynvastus $Z_v, *10^3$ [s/m]	Lämmönvastus, $R (=d/\lambda), [m^2 K/W]$	Huomautuksia
Ohutpuuparketti + aluspahvi	31, 33, 25 (75, 86, 97%)	*0,044	*laskennallinen
Rakennusmuovi	3333 **	0	**lähde: (Björkholz 1992)

Huoneistossa B mittauslinjan yläpuolisen laatanosan pinnoitteena käytettiin 2,9 mm parketinalusmateriaalia (muovikalvojen välissä pieniä polystyreenirakeita) ja 14 mm lukkoponttiparkettia. Pinnoitemateriaaleille määritetyt lämpö- ja kosteusparametrit on esitetty taulukossa 5.2.

*Taulukko 5.2 Kohteen A huoneiston B pinnoitemateriaalien kosteus- ja lämpöparametrit.*

Materiaali tai materiaaliyhdistelmä	Vesihöyrynvastus $Z_v, *10^3$ [s/m]	Lämmönvastus, $R (=d/\lambda), [m^2 K/W]$	Huomautuksia
Parketti + alusta	112, 123, 143 (75, 86, 97%)	0,169 *	*laskennallinen

### 5.1.1.2 Rakennettujen maakerrosten materiaalit

Rakennettujen maakerrosten osalta selvitettiin laboratoriokokein massojen rakeisuudet, huokoisuudet ja kapillaarisesti nousevat vesimäärät 300 mm korkuisilla näytteillä.

#### **Kapillaarikatkokerros**

Maanvaraisen laatan eristekerroksen alapuolelle tiivistetty > 200 mm kerros tasarakeista soraa (käyrä D, kuva 5.3), joka toimii kapillaarisen nousun katkaisevana kerroksena. Alle 1 mm rakeiden osuus massasta oli alle 3 painoprosenttia. Massan huokoisuus keskitiiviissä tilassa oli  $n = 39 \%$ ,  $\gamma_d = 16,1 \text{ kN/m}^3$ .

#### **Täyttösora**

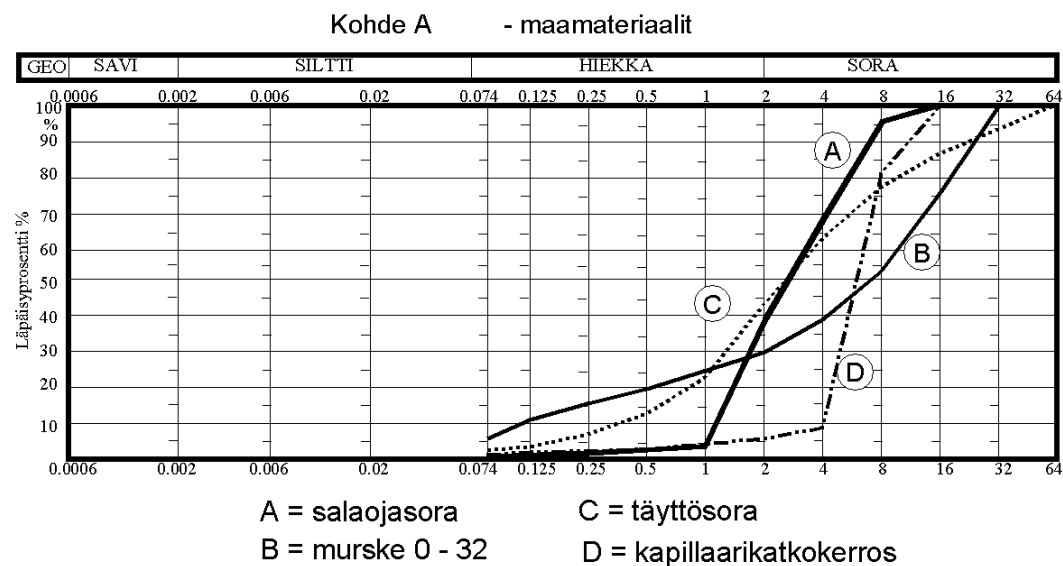
Maanvarainen alapohjalaatta on perustettu 1-2metrin paksuisen täyttökerroksen varaan. Täyttösorassa alle 1 mm rakeiden osuus oli varsin suuri, noin 22 % (käyrä C, kuva 5.3). Massan huokoisuus keskitiiviissä tilassa oli  $n = 30 \%$ ,  $\gamma_d = 18,3 \text{ kN/m}^3$ .

#### **Salaojitussora**

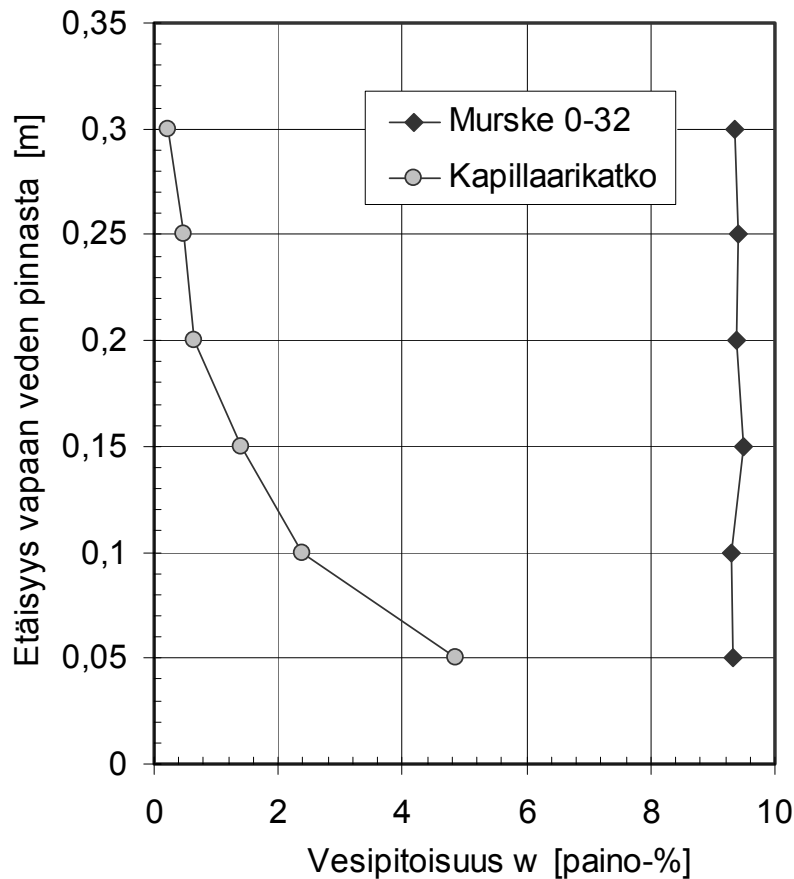
Rakennuksen vierustäyttönä käytetyn salaojitussoran rakeisuuskäyrä on esitetty käyrällä A kuvassa 5.3. Materiaali täyttää 1 luokan salaojitussoran vaatimukset (RIL 126, 1979). Löyhässä tilassa massan kuivatiheyden ollessa  $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ , soran huokoisuus oli  $n \approx 40 \%$  ja keskitiiviissä tilassa, kun  $\gamma_d = 17,4 \text{ kN/m}^3$ , massan huokoisuus oli  $n \approx 34 \%$ .

#### **Murske 0 – 32**

Mursketta on käytetty anturan alapuolisena tukikerroksena. Murskeessa 0-32 alle 1 mm läpimittaisten rakeiden osuus tutkitussa näytteessä oli melko suuri, noin 25 % massan kokonaispainosta (käyrä B, kuva 5.3). Massan kapillaarisuudeksi 300 mm korkeudella vesipinnan tasosta mitattiin noin 9,5 painoprosenttia, mikä keskitiiviissä vastaa vesimäärää  $w \approx 190 \text{ kg/m}^3$  (kuva 5.4). Keskitiiviissä tilassa massan kuivatiheyden ollessa  $\gamma_d = 19,8 \text{ kN/m}^3$  murskeen huokoisuus oli  $n \approx 25 \%$ .



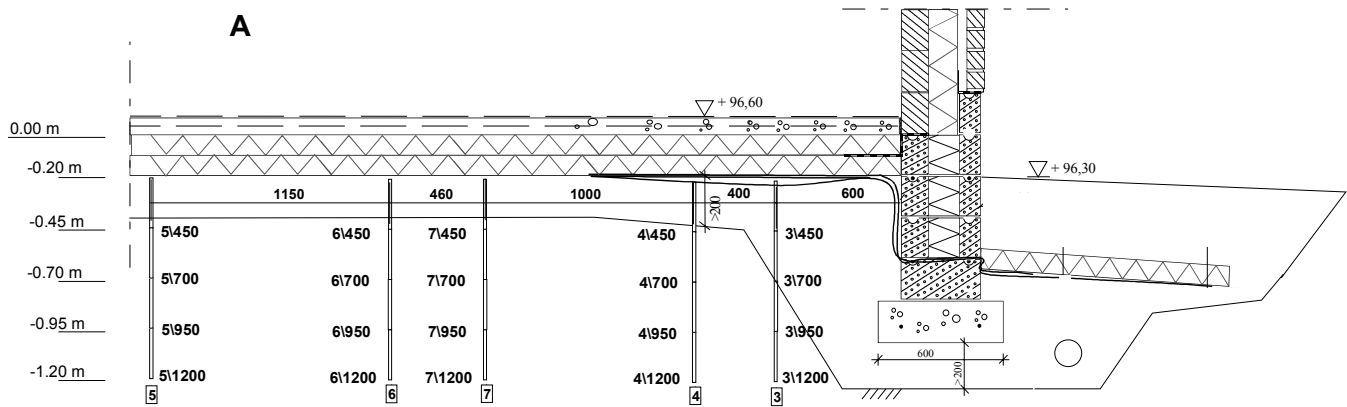
Kuva 5.3 Kohteen A maamateriaalien rakeisuuskäyrät määritettyinä yksittäisistä noin 2 kilon näyte-eristä.



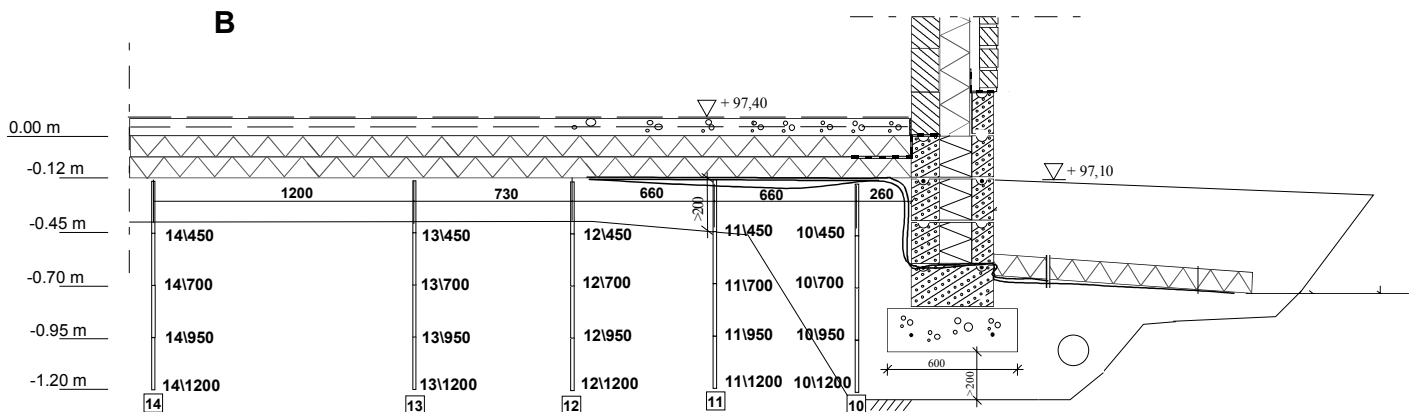
Kuva 5.4 Maamateriaaleilla suoritettujen kapillaarisuuskokeiden tulokset. Kokeet suoritettiin 0,4 m korkeisiin putkiin sullotuilla näytteillä, joihin veden annettiin nousta kapillaarisesti 7 vrk ajan. Murskeesta (0-32) mitatut vesipitoisuudet  $w \approx 9,5$  paino-% vastaavat vesimäärää  $w \approx 190 \text{ kg/m}^3$ . Kapillaarikatkokorokkeen nostama vesimäärä korkeudella  $h = 0,2 \text{ m}$  oli enää  $w = 0,6$  paino-% eli  $w \approx 10 \text{ kg/m}^3$ , joka vastaa keskimäärin hygroskooppista tasapainokosteutta RH 100%:ssa.

### 5.1.1.3 Instrumentoinnit

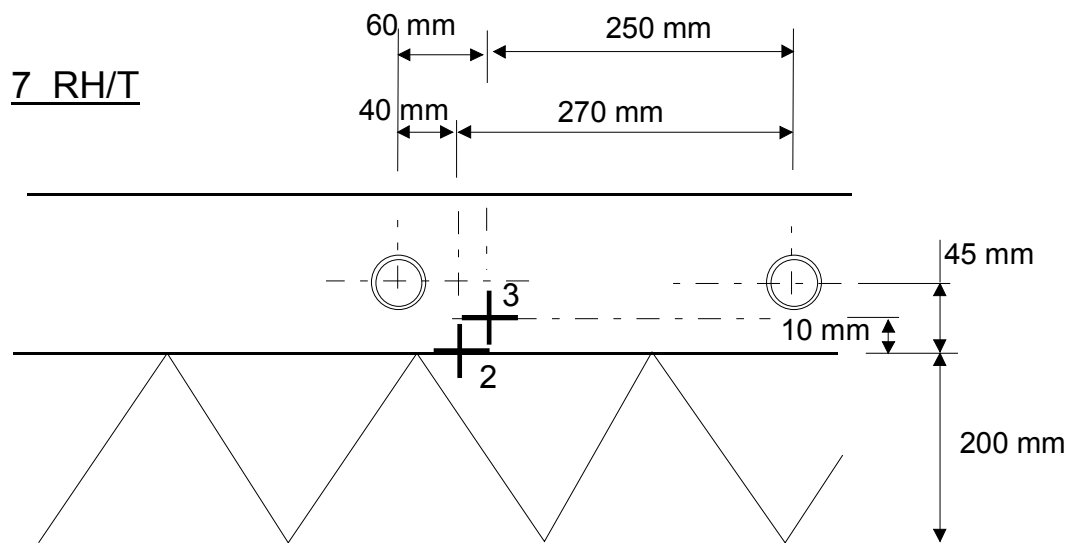
Rakennusvaiheessa laattaan ja alapuoliseen täyttökerrokseen asennettiin lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaavat anturit. Laatan alapuoliseen täyttökerrokseen sekä rakennusosaan A että B asennettiin yhteensä 40 kpl lämpötila-antureita kuvien 5.5 ja 5.6 mukaisesti. Lisäksi molempien rakennusosien laattoihin asennettiin ennen valua suojaputket lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaavien antureiden varalle samoihin mittauspisteisiin täyttökerroksen lämpötilamittauspisteiden kanssa (kuva 5.7). Laatan mittausantureiden sijainnit ja korkeustasot viereisten lämmitysputkistojen suhteen eri mittauspisteissä vaihtelivat jonkin verran pisteiden välillä, paikat määriteltiin tarkoin ennen laatan valua.



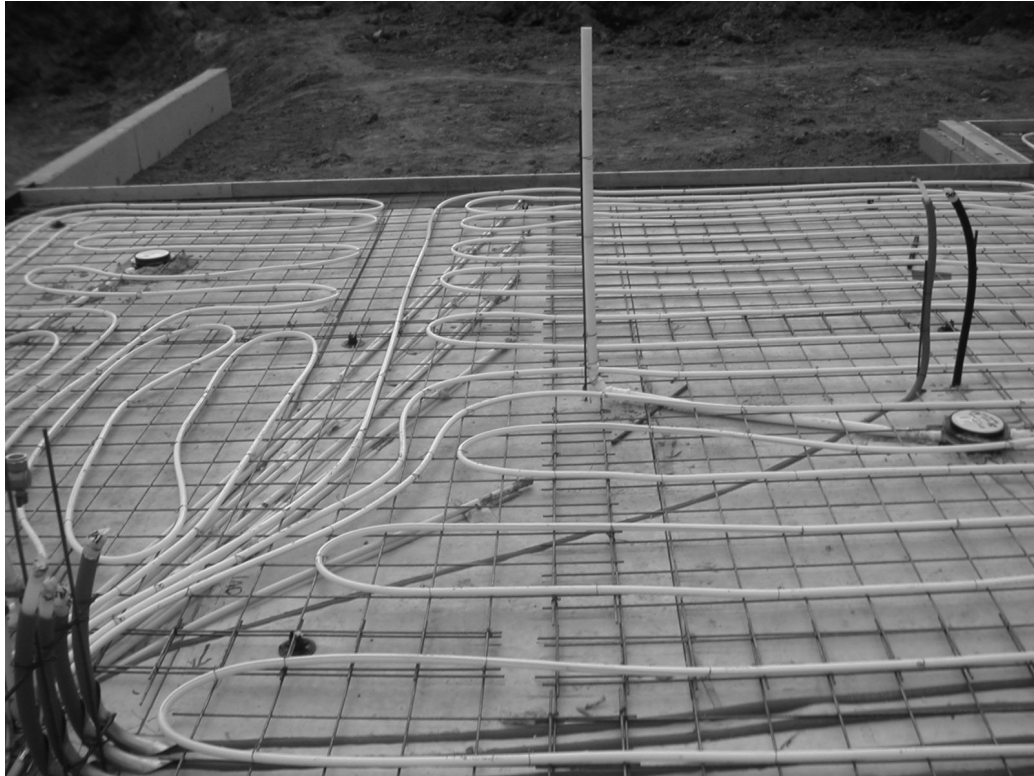
**Kuva 5.5** Kohteen A rakennusosan A lämpötila-antureiden sijoitus laatan alapuolisiin ja anturaan ympäröiviin täyttökerroksiin. Lattiarakenteessa  $h_e = 200$  mm EPS -eristys. Instrumentointi käsitti yhteensä  $5 \times 4 = 20$  mittauspistettä. Mittausantureina käytettiin termolankoja.



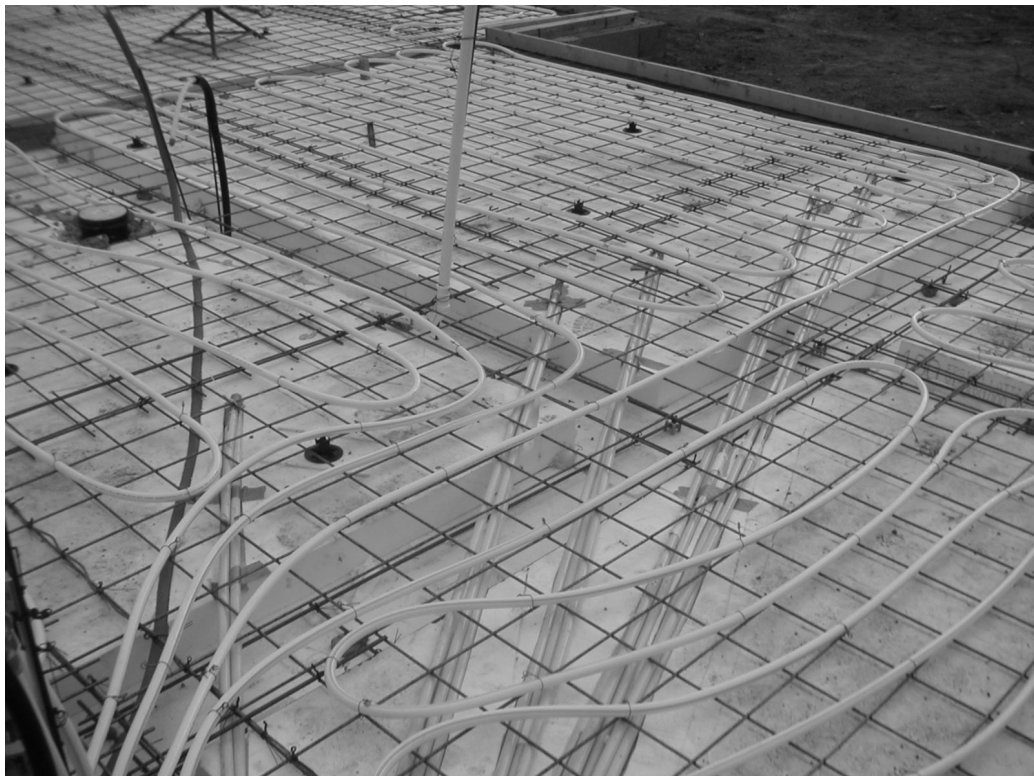
**Kuva 5.6** Kohteen A rakennusosan B lämpötila-antureiden sijoitus laatan alapuolisiin ja anturaan ympäröiviin täyttökerroksiin. Lattiarakenteessa  $h_e = 120$  mm polyuretaanieristys. Instrumentointi käsitti yhteensä  $5 \times 4 = 20$  mittauspistettä. Mittausantureina käytettiin termolankoja.



*Kuva 5.7 Laattaan sijoitettujen lämpötila- ja kosteusantureiden 2 ja 3 asemat vaakatasossa viereisten lämmitysputkien suhteen sekä korkeusasema laattassa mittauspisteessä 7. Laatan mittausantureiden sijainnit ja korkeustasot viereisten lämmitysputkistojen suhteen eri mittauspisteissä vaihtelivat jonkin verran pisteiden välillä, paikat määriteltiin tarkoin ennen laatan valua.*



Kuva 5.8

*Kohde A: B –talon HT/T –antureiden mittauslinja.*

Kuva 5.9

*Kohde A: A –talon HT/T –antureiden mittauslinja.*

## 5.1.2 Kohde B

Kohde B on rivitalo Pirkanmaalla, jossa alapohjaratkaisuna on alapuolelta lämpöeristetty lattialämmitetty maanvarainen laatta. Seurantakohteena on rivitalon päätyhuoneisto, jonka toista sivua rajoittavat taloyhtiön tekniset tilat sekä väestönsuoja (kuva 5.12).

### 5.1.2.1 Rakenteet

Rakennuksen ulkoseinät ja yläpohja ovat paikalla rakennettuja puurunkoisia ja mineraalivillaeristeisiä. Ulkoseinissä on tiiliverhous (kuva 5.11).

Rakennuksen sokkelirakenteena on paikalla valettu betonirakenteinen halkaistu sokkeli, jonka nimellinen lämmönläpäisyarvo on  $U_{sokkeli} = 0,24 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (kuva 5.12). Rakennuksen piirin kiertää yhtenäinen vaakasuuntainen routaeristys  $U_{routa} = 0,37 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Sokkelirakenne on täytetty tiivistetyllä täyttösoralla (kuva 5.12).

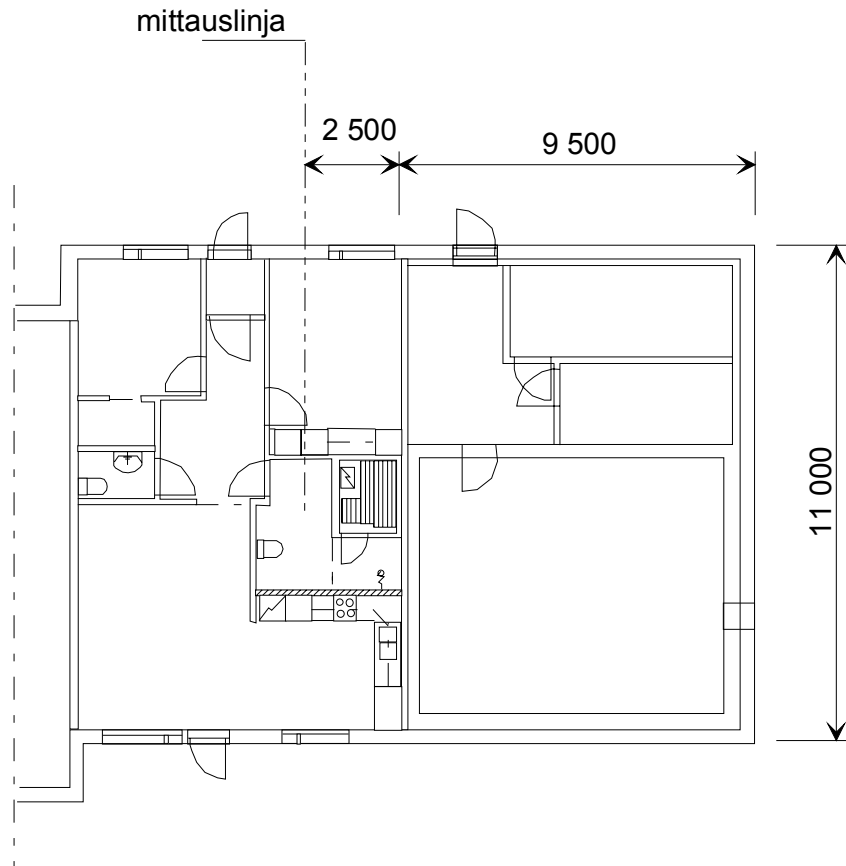
Kohteen B maanvaraisessa betonisessa alapohjalaatassa  $h_{laatta} = 80 \text{ mm}$  on alapuolinen EPS -eristys  $h_e = 150 \text{ mm}$  ja vesikiertoinen lattialämmitys (kuva 5.14). Laatan nimellinen lämmönläpäisyarvo lämmityselementin ja eristekerroksen alapinnan välillä on  $U_{laatta} = 0,25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (kuva 5.13).

Mittauslinjan yläpuolisen huonetilan (makuuhuone) pinnoitteena on 0,2 mm rakennusmuovi, laakerikerroksena parketinaluspahvi ja 14 mm parketti. Pinnoiteyhdistelmän sekä laatan tasoitemassan vesihöyrynläpäisevyydet määritettiin TTY:n Talonrakennustekniikan laboratoriossa ja ne on esitetty taulukossa 5.3.

Taulukko 5.3 Kohteen B pinnoitemateriaalien ja tasoitemassan vesihöyrynläpäisevyydet.

Materiaali tai materiaaliyhdistelmä	Vesihöyrynvastus $Z_v, *10^3 \text{ [s/m]}$	Vesihöyrynläpäisevyys $\delta_v, *10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$	Huomautuksia
Parketti + aluspahvi	71, 116, 125 (RH 75, 86, 97%)	-	
Muovikalvo 0,2 mm	3333 *	-	*lähde: (Björkholtz, 1992)
Tasoite	-	2,09 2,07 1,96 (RH75, 86, 97%)	





Kuva 5.11 Kohteen B pohjakuva ja instrumentoidun mittauslinjan sijainti.

**laatta:**

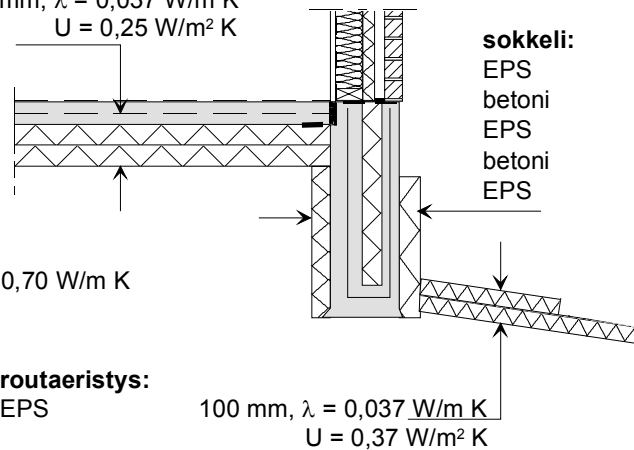
betoni

EPS

40 mm,  $\lambda = 1,7 \text{ W/m K}$

150 mm,  $\lambda = 0,037 \text{ W/m K}$

$U = 0,25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$



**sokkeli:**

EPS

betoni

EPS

betoni

EPS

50 mm,  $\lambda = 0,037 \text{ W/m K}$

80 mm,  $\lambda = 1,7 \text{ W/m K}$

50 mm,  $\lambda = 0,037 \text{ W/m K}$

50 mm,  $\lambda = 1,7 \text{ W/m K}$

50 mm,  $\lambda = 0,037 \text{ W/m K}$

$U = 0,23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

**Täyttösora :**

$\lambda = 0,70 \text{ W/m K}$

**routaeristys:**

EPS

100 mm,  $\lambda = 0,037 \text{ W/m K}$

$U = 0,37 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

**Pohjamaa (siltti):**

$\lambda = 1,37 \text{ W/m K}$

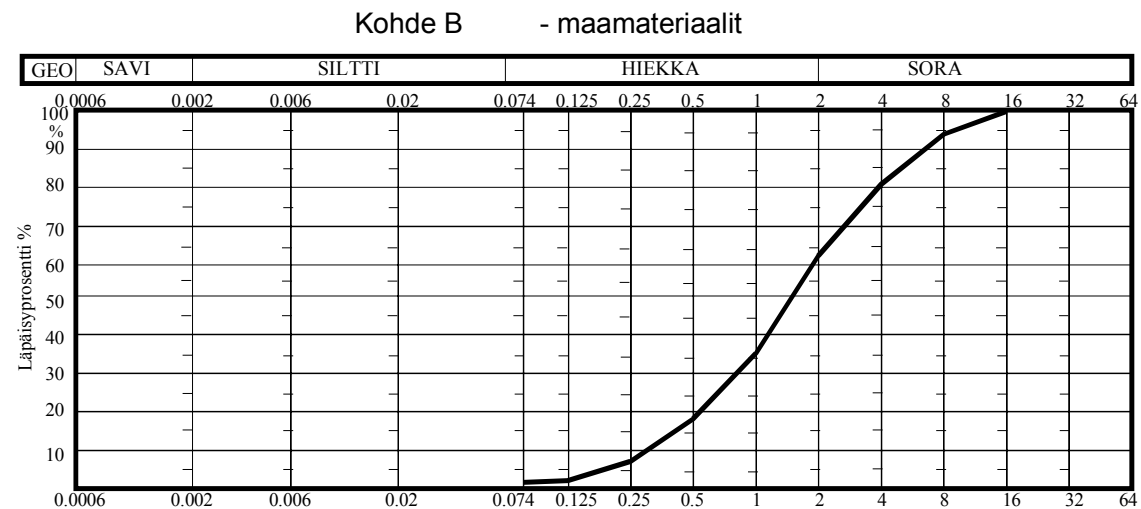
Kuva 5.12 Kohteen B perustusleikkaus ja liittyvien rakenteiden ja rakennekerrosten lämpötekniset parametrit.

### 5.1.2.2 Rakennettujen maakerrosten materiaalit

Rakennuksen täyttökerroksen osalta massasta määritettiin raekokojakauma sekä kuivapaino ja huokoisuus.

#### **Täyttösora**

Täyttösoran huokoisuus keskitiiviissä tilassa oli  $n = 31 \%$  ja kuivapaino  $\rho_d = 1820 \text{ kg/m}^3$ . Massan rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 5.13.

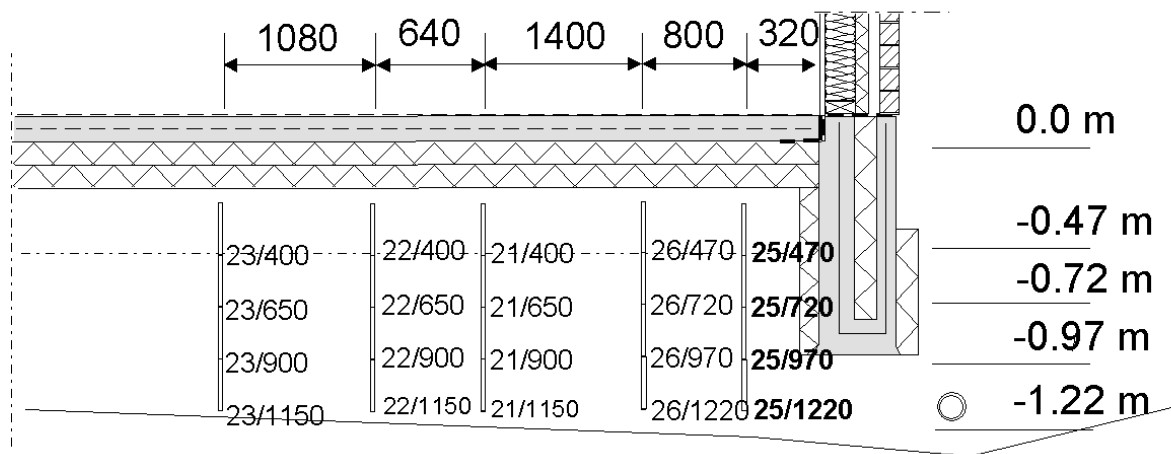


Kuva 5.13 Kohteen B täyttösoran rakeisuuskäyrä.

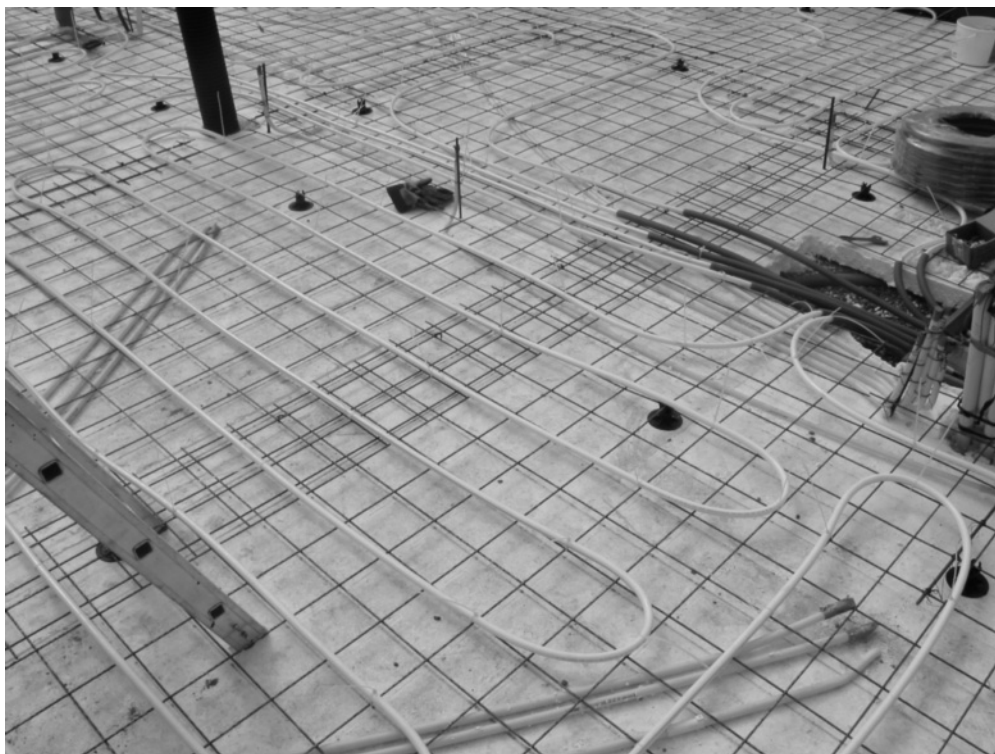
### 5.1.2.3 Instrumentoinnit

Kohteessa B mitattiin sekä alapohjalaatan alapuolisen täyttökerroksen että lämmitetyn lattialaatan lämpötiloja ja suhteellista kosteutta. Kuvissa 5.12 ja 5.14 on esitetty mittauslinjan sijainti rakennuksen alapohjassa sekä asennettujen lämpötila-antureiden korkeusasemat mittauslinjan leikkauksessa. Laatan suhteellista kosteutta ja lämpötilaa seurattiin pisteessä 22 (kuva 5.12).

Kuvassa 5.14 on esitetty täyttökerroksen lämpötila-antureiden korkeusasemat mittauslinjalla ja kuvassa 5.15 lämpö- ja kosteusantureiden asennuspaikat lämmitysputkien ja raudoituksen suhteen ennen laatan valua.



**Kuva 5.14** Kohteen B mittauspisteiden korkeusasemat mittauslinjalla. Taso 0.0 m = laatan alapinta. Mittausantureina käytettiin termolankoja. Laatan ja eristekerroksen lämpötilaa ja kosteutta mitattiin pisteessä 22, jossa mittausantureina käytettiin HT/T puolijohdeantureita.



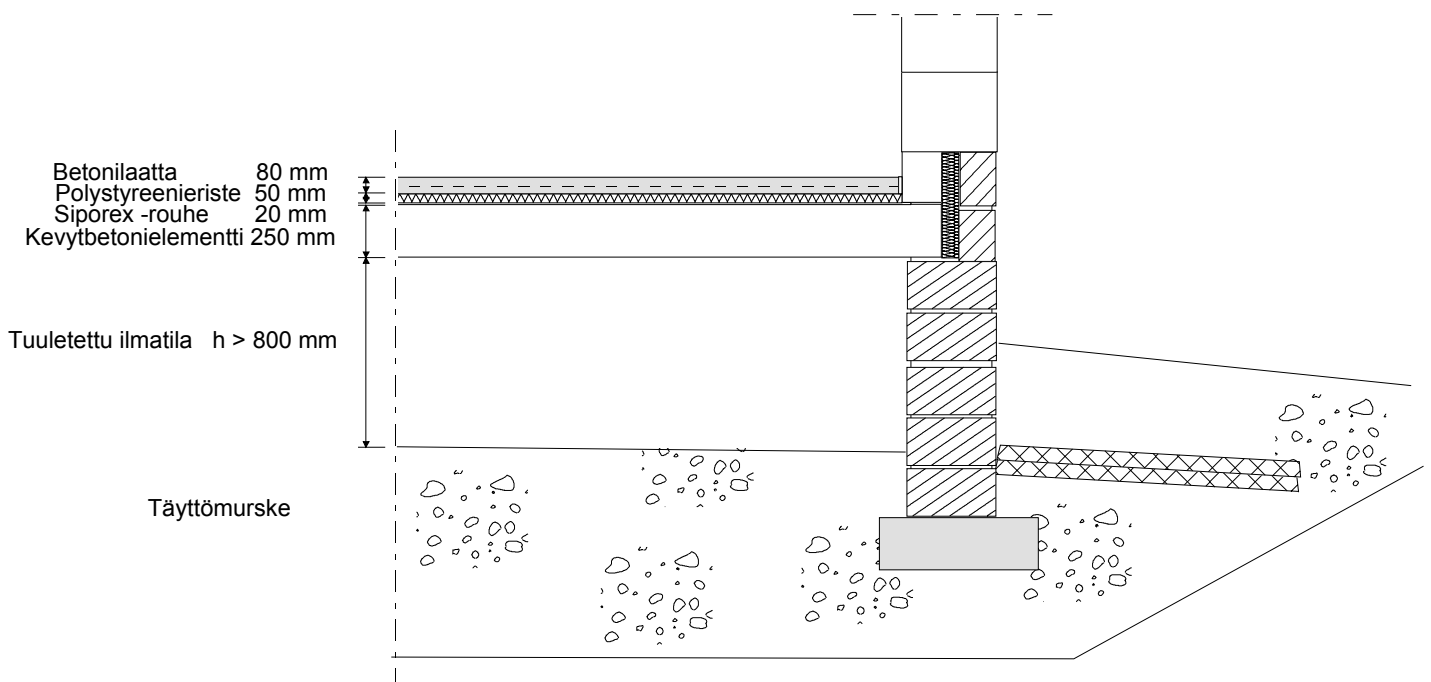
**Kuva 5.15** Kohteen B HT/T -antureiden mittauslinja.

### 5.1.3 Kohde C

Kohteena C oli 2-kerroksinen omakotitalo, jonka alapohjaratkaisu on ryömintätilainen yläpuolelta lämpöeristetty kantava Siporex-laatasto. Tilojen lämmitysjärjestelmä on vesikiertoinen lattialämmitys. Instrumentoidut laatanosat (makuuhuone, eteinen, kuva 5.19) sijaitsevat rakennuksen keskiosassa teknisten tilojen vieressä ja niiden yläpuoliset tilat olivat tavallisia asuintiloja.

#### 5.1.3.1 Rakenteet

Kohteen C kantava alapohjarakenne on yläpuolelta lämpöeristetty höyrykarkaistu kevytbetonielementti-laatasto, jonka yläpuoliseen pintalaattaan on asennettu vesikiertoinen lattialämmitys. Kohteen laataston ja ulkoseinän liitoksen leikkaus on esitetty kuvassa 5.16.



Kuva 5.16 Kohteen C kantavan alapohjalaataston ja ulkoseinänlinjan rakenneleikkaus.



Kuva 5.17 Yleiskuva kohteen C ryömintätilan olosuhteista ja instrumentoidusta mittauslinjasta.

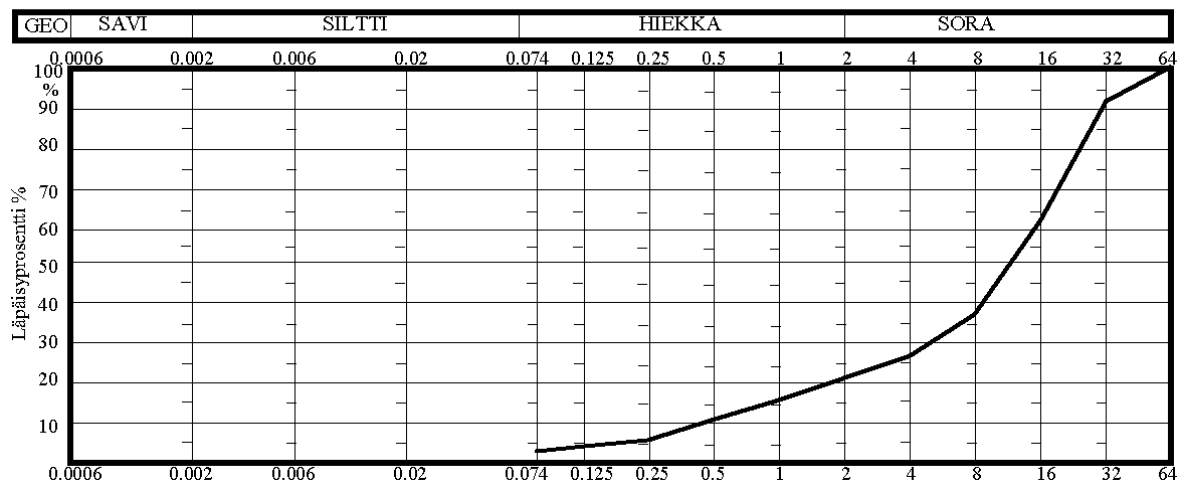
### 5.1.3.2 Rakennettujen maakerrosten materiaalit

Ryömintätilan pohjan täyttökerroksen murskeen rakeisuudet ja huokoisuudet määritettiin kaivunäytteistä laboratoriokokeiden avulla.

#### Täyttömurske

Ryömintätilan pohjan täyttömurskeessa alle 1 mm rakeiden osuus massassa oli noin 15 % (kuva 5.18). Täyttömurskeen huokoisuus keskitiiviissä tilassa oli  $n = 26 \%$ ,  $\gamma_d = 19,5 \text{ kN/m}^3$ .

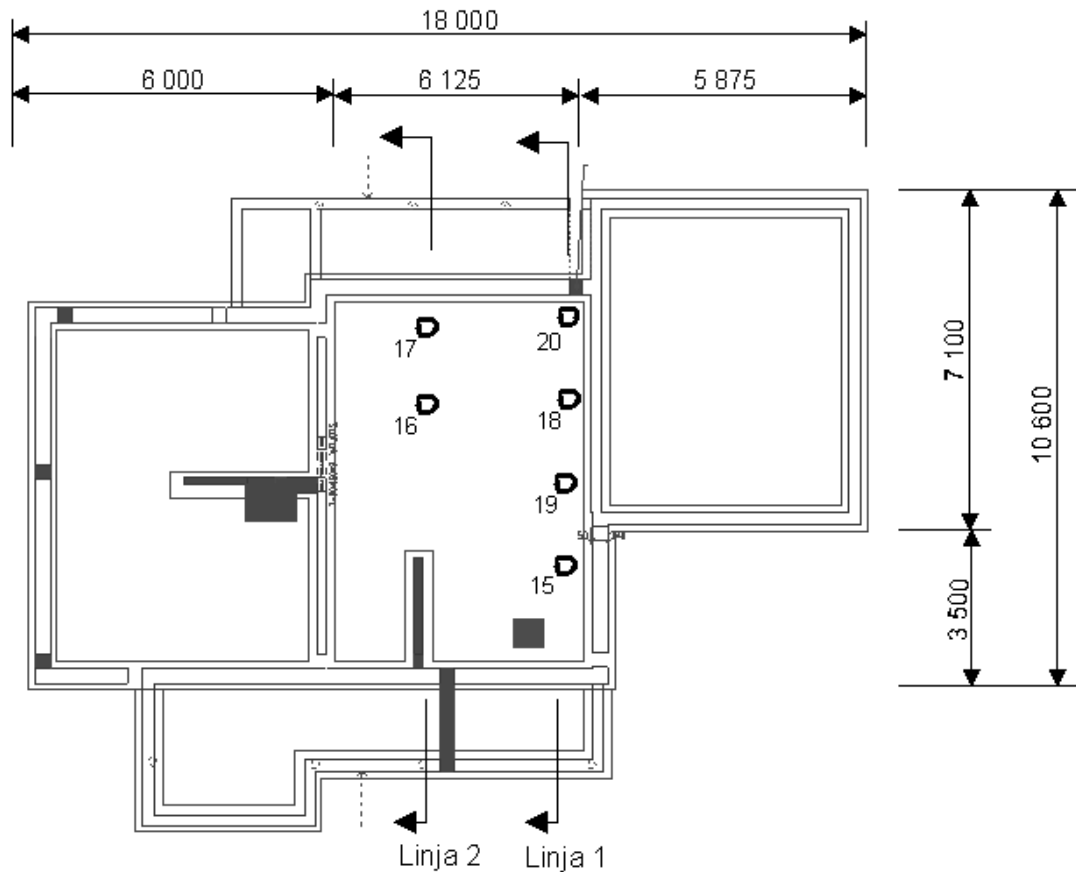
Kohde C - maamateriaalit



Kuva 5.18 Kohteen C ryömintätilan pohjan täyttömurskeen rakeisuuskäyrä.

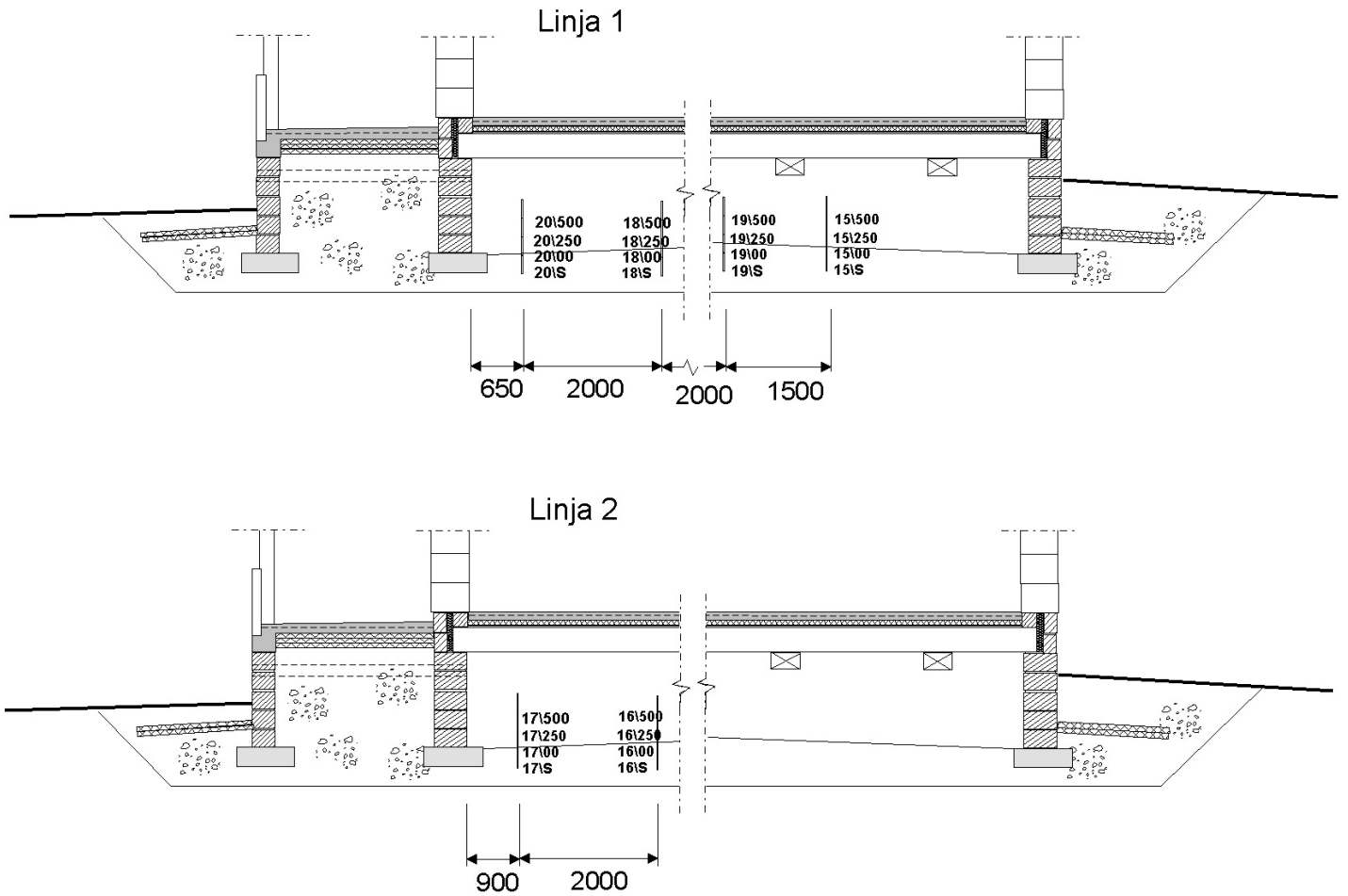
### 5.1.3.3 Instrumentoinnit

Kohteessa mitattiin sekä alapohjalaataston lämpö- ja kosteustilaa että alapuolisen ryömintätilan ja pohjamaan lämpötila- ja kosteusmuutoksia kahdessa mittauslinjassa kuvien 5.19 ja 5.20 mukaisesti.

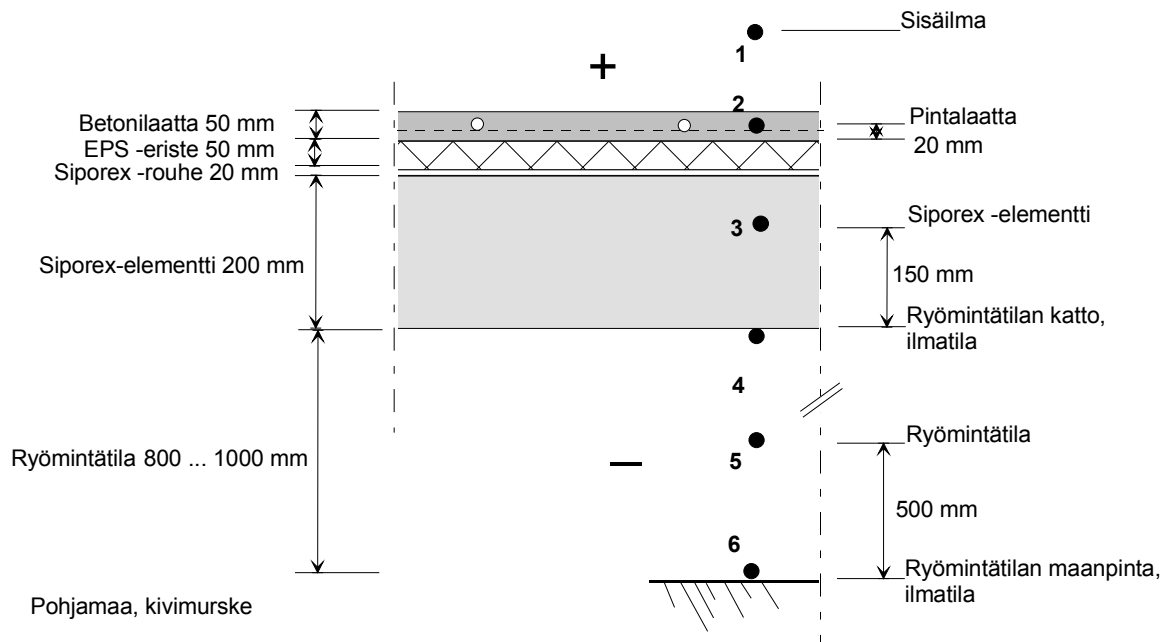


*Kuva 5.19 Kohteen C pohjapiirros sekä mittauslinjojen 1 ja 2 ja yksitäisten mittauspisteiden (pisteet 15 – 20) sijainnit rakennuksen ryömintätilassa. Jokaisessa mittauspisteessä tutkittiin sekä alapohjalaatan että ryömintätilan ja pohjamaan lämpötiloja ja suhteellisia kosteuksia.*

Kuvassa 5.20 on esitetty ryömintätilan ja pohjamaan lämpötila-antureiden positiot ja korkeusasemat tutkituissa leikkauksissa ja kuvassa 5.21 viiden asennetun kosteus- ja lämpötila-antureiden asemat alapohjalaatan leikkauksessa. Ryömintätilan pohjamaan lämpötila-anturien (koodi x/S) syvyys oli noin 250 mm ryömintätilan pohjan alapuolelle, anturi x/00 oli sijoitettu pohjan tasolle ja kaksi muuta ilmatilan lämpötila-anturia tasoille +250 mm ja +500 mm pinnan yläpuolelle. Tämän lisäksi lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin samoista mittauspisteistä pintalaatan keskeltä, Siporex – elementistä noin 150 mm elementin pohjan yläpuolelta sekä ryömintätilan ilmatilasta laatan alapinnasta ja ryömintätilan pohjan tasolta (kuva 5.21).



**Kuva 5.20** Kohteen C ryömintätilan lämpötila-antureiden sijainnit, linjat 1 ja 2. Mittausantureina käytettiin termolankoja. Alapohjalaataston lämpötilaa ja kosteutta mitattiin samoista pisteistä kolmelta tasolta puolijohdeantureilla.

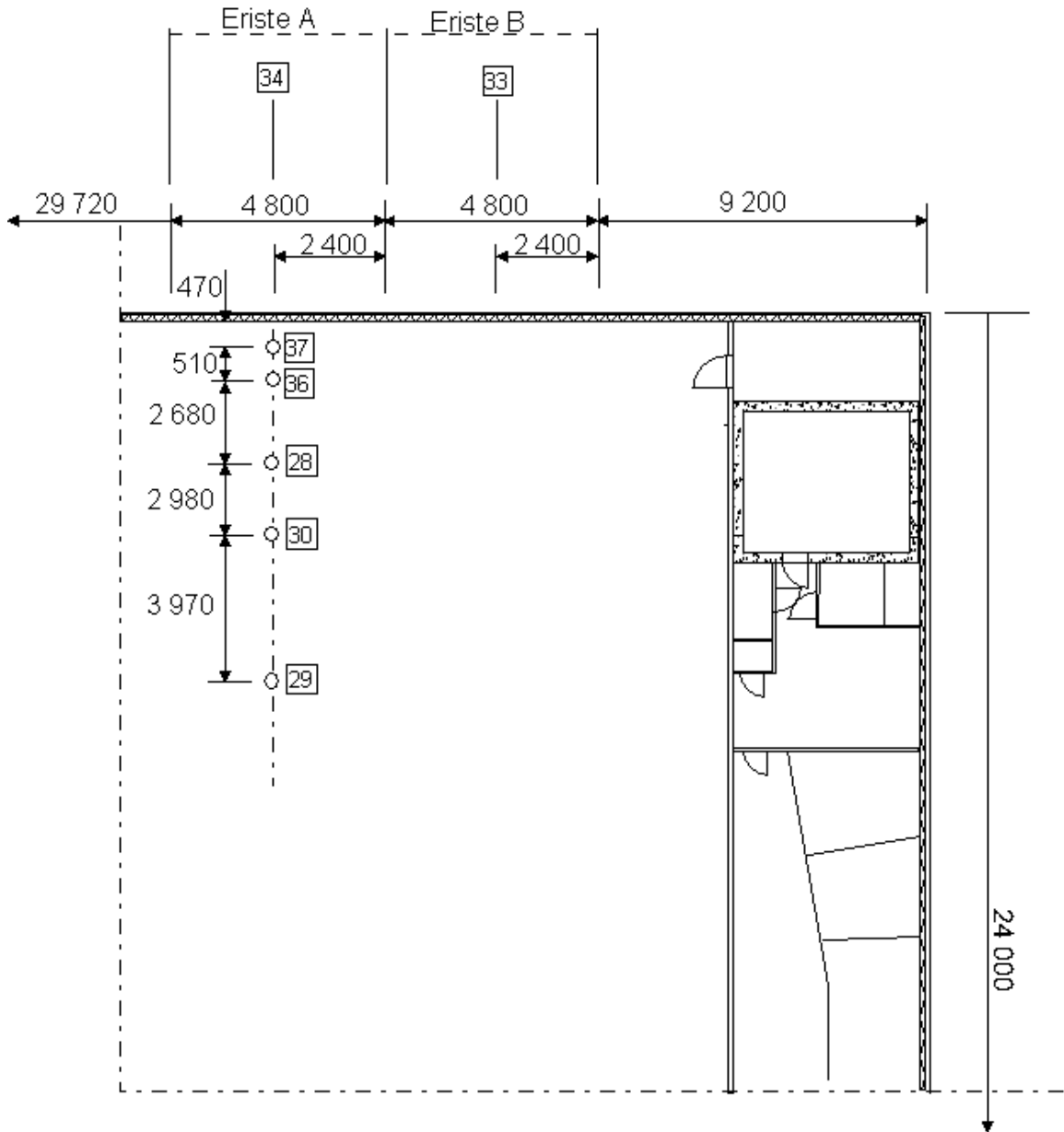


*Kuva 5.21 Kuuden asennetun kosteus- ja lämpötila-anturin korkeusasemat mittauspisteissä.*

#### 5.1.4 Kohde D

Kohde D on teollisuustuotantoon tarkoitettu hallirakennus, jonka alapohjaratkaisuna on maanvastaisesti valettu massiivinen paalulaatta ja lämmitysjärjestelmänä ilmakiertoinen lattialämmitys. Laatan instrumentoitu poikkileikkaus sijaitsee noin 15 metrin etäisyydellä hallin päädyistä (kuva 5.22). Hallin laatan kokonaisala on  $24 \times 48 \text{ m}^2$ .





Kuva 5.22 Kohteen D hallirakennuksen mittauspisteet. Rakennuksen pohjan kokonaisala oli  $24 \times 48 \text{ m}^2$ .

#### 5.1.4.1 Rakenteet

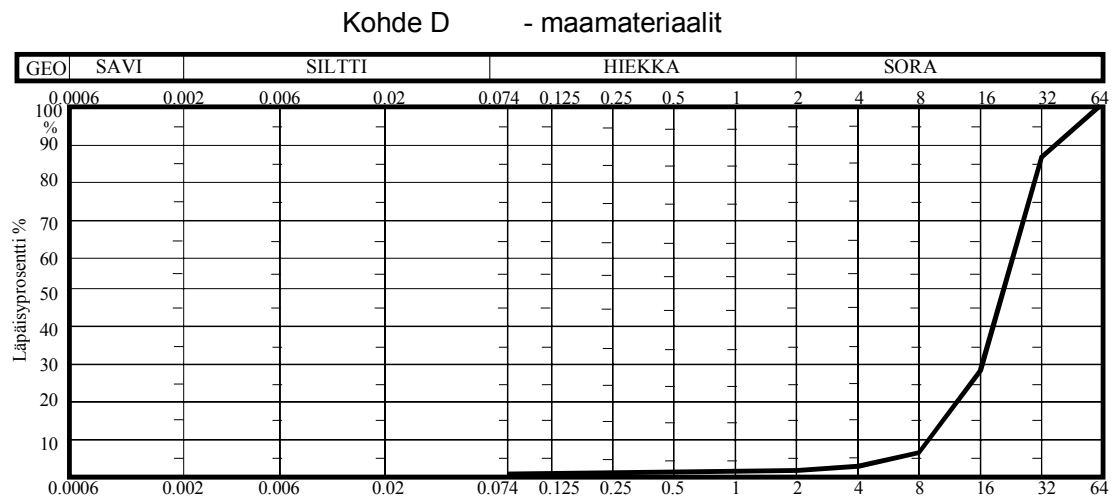
Hallirakennuksen alapohjaratkaisuna on ns. Legalett –lämpöperustus, jossa alapuolelta eristetyin massiivisen betonilaatan sisään asennettiin ilmakiertoinen lämmitysjärjestelmä (kuva 5.24). Kohteessa laatta on lisäksi paalutettu ja valettu maanvastaisesti noin  $h = 300 \text{ mm}$  murskekerroksen varaan. Murskekerroksen ja tasoitetun pohjamaan, tässä tapauksessa turpeen, väliin on levitetty suodatinkangas. Paaluhattuina toimivat raudoitettut alapuolelta eristetyt laatan paksunnokset. Laatan alapuolisena lämmöneristykseenä toimii  $h_i = 160 \text{ mm}$  EPS –levy. Massiivisen laatan paksuus on  $h_{laatta} = 300 \text{ mm}$ , paaluhattujen osalta jopa  $460 \text{ mm}$ .

Laatan alapinnan raudoitteisiin kiinnitettiin  $\varnothing = 100$  mm lämmönjakoputkisto (kuva 5.24).

Routaeristykseenä rakennuksen anturaa kiersi 1 metrin levyinen ja 100 mm paksuinen EPS-routalevyeristys. Rakennuksen alapohjan lämpö- ja kosteusmittausten ohessa tutkittiin myös kahden eri routaeristyslevyn lämmöneristysominaisuuksia kenttäolosuhteissa. Tätä varten alueille A ja B levitettiin tutkittavien levytyyppien koe-erät ja näiden alle alueiden puoliväliin asetettiin vaakasuoraan lämpötila-anturit (kuvat 5.22 ja 5.25 ; anturit 33 ja 34).

### 5.1.4.2 Rakennettujen maakerrosten materiaalit

Laatan alapuolisen murskekerroksen rakeisuus määritettiin laboratoriokokein näytteestä, joka otettiin tiivistetyn murskekerroksen yläosasta. Tästä johtuen hienoaineksen osuus näytteessä oli erittäin pieni. Murskeen huokoisuus oli  $n = 48$  %. Massan kuivapaino oli  $\rho_d = 1367$  kg/m<sup>3</sup>.



Kuva 5.23 Kohteen D murskekerroksen rakeisuuskäyrä.

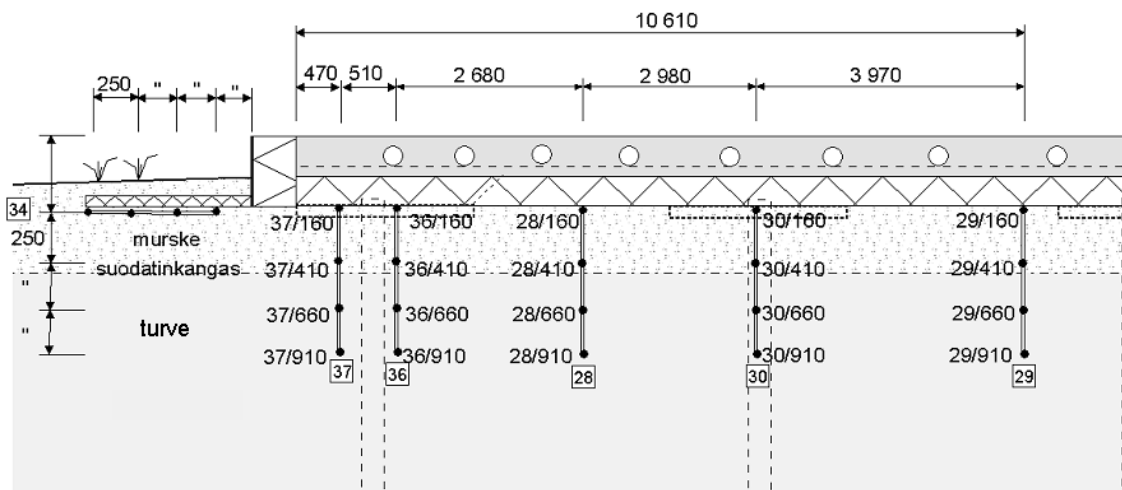


Kuva 5.24 Kohteen D pohjalaatan lämmitysputkistoa.

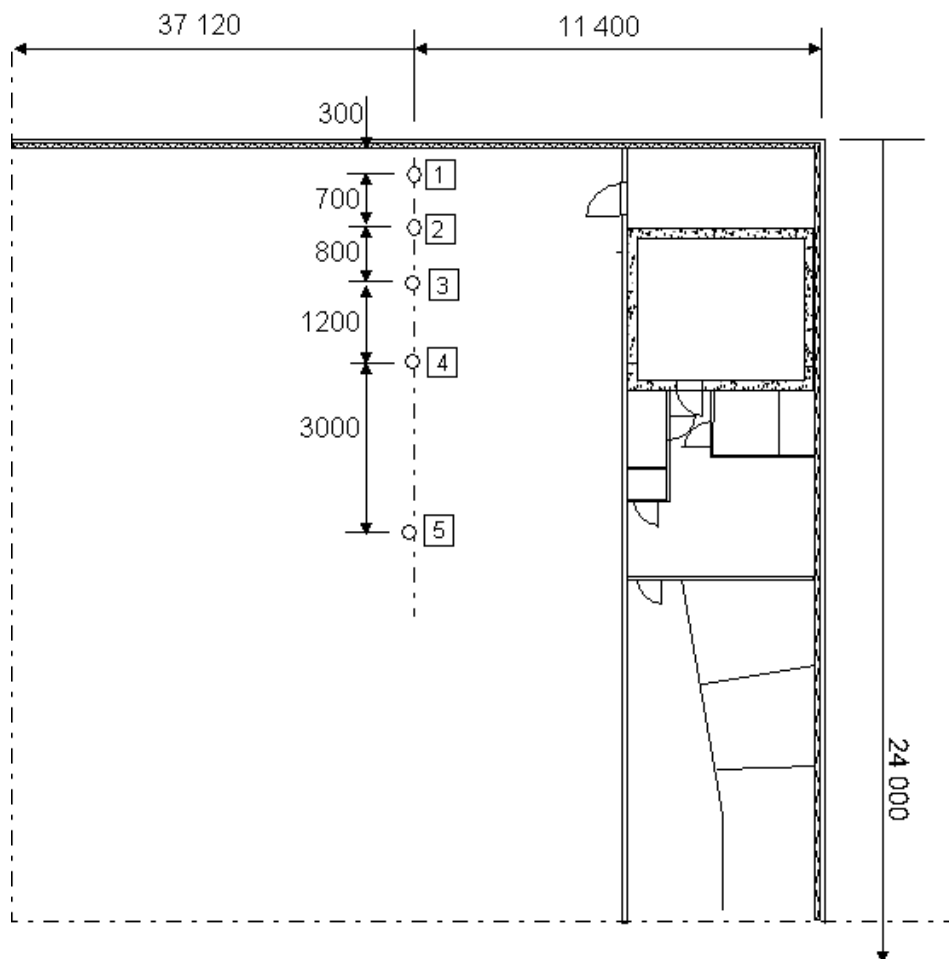
### 5.1.4.3 Instrumentoinnit

Murske- ja pohjamaakerrosten lämpötilamuutoksia mitattiin ennen eristekerroksen asentamista paikalle asennetuilla mittasauvoilla, joissa kussakin on neljä termolangoilla toteutettua mittauspistettä. Rakennuksen poikittaissuunnassa seurattiin yhden rakenneleikkauksen lämpötilamuutoksia viiden mittasauvan avulla, jotka on asennettu mittauslinjalle rakennuksen ulkolaidalta jännevälin keskelle (kuva 5.25). Lisäksi tutkittiin routaeristyslevyjen lämmöneristävyysominaisuuksia kahden samantyyppisen mittasauvan avulla, jotka oli asennettu vaakatasoon routaeristyslevyjen alle (kuvat 5.22 ja 5.25).

Laatan rakenneleikkauksen lämpötilaa ja suhteellista kosteutta seurattiin kuvan 5.26 mukaisessa leikkauksessa viidessä mittauspisteessä. Kaikissa pisteissä on laatan kahteen korkeustasoon ja eristekerroksen alapintaan asennettu suojaputket HT/T –antureilla. Yhteensä yksittäisiä lukemia saatiin tutkitusta laattaleikkauksesta 15 pisteestä. Kuvassa 5.27 näkyy mittauspisteiden 2 ja 3 suojaputkien sijoittelu ympäröivien lämmitysputkien suhteen.



Kuva 5.25 Kohteen D paalutetun alapohjan rakenneleikkaus ja pohjaan lämpötilamittauspisteiden korkeusasemat tutkitussa leikkauksessa.



Kuva 5.26 Kohteen D laatan seurantapisteiden sijainnit laatan pohjapiirroksessa. Kaikissa pisteissä 1 – 5 mitattiin laatan lämpötilaa ja kosteutta kahdessa tasossa.



*Kuva 5.27 Kohteen D mittauspisteiden 2 ja 3 HT/T –anturien suojaputkien sijainnit ympäröivien lämmitysputkilinjojen suhteen.*

## 5.2 Kenttämittausten tulokset

Koekohteissa suoritettujen seurantamittausten tulokset on seuraavissa kappaleissa esitetty koekohteittain sekä alapohjan ja täyttökerrosten lämpötilojen että laatan kosteusmittausten osalta.

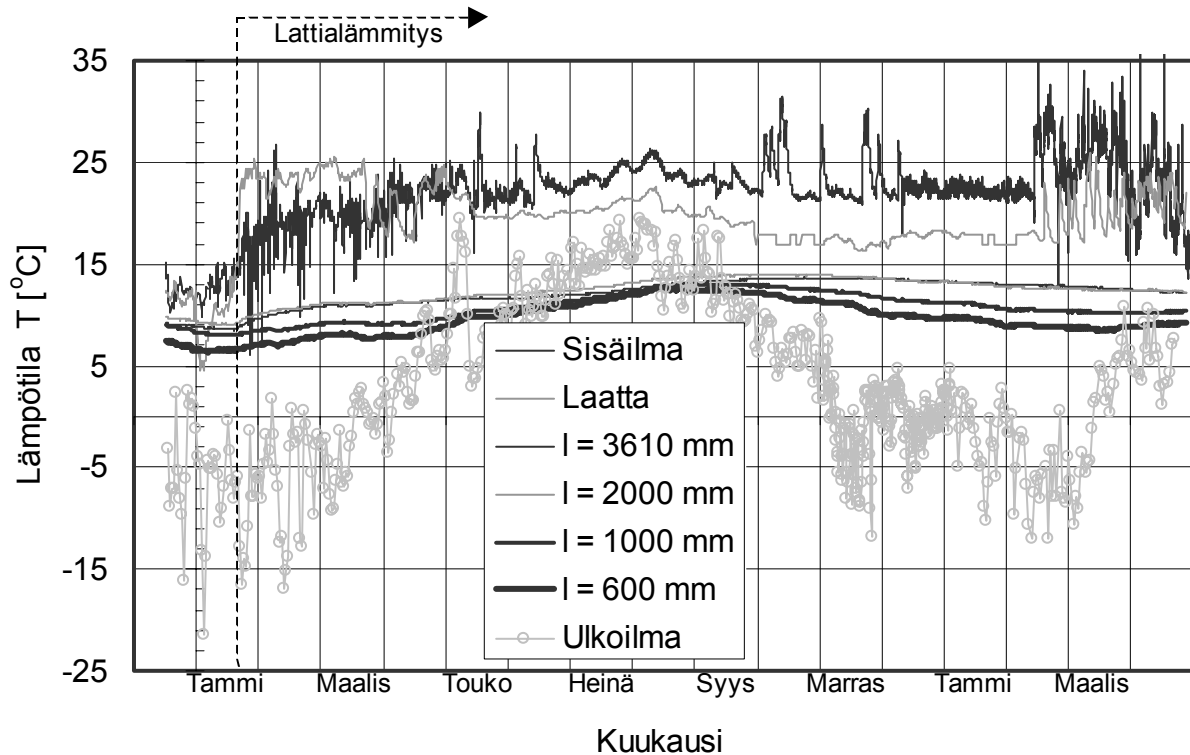
### 5.2.1 Kohde A

Kohteessa A molempien asuntojen alapohjalaatta valettiin 19.6.2003. Rakennuksen lämmitys aloitettiin kuumailmapuhaltajilla lokakuussa ja tätä lämmitystapaa jatkettiin koko alkutalven 2003-2004, kunnes lattialämmitys voitiin molemmissa huoneistoissa kytkeä päälle noin 20.1.2004. Instrumentoitujen rakennusleikkausten laatat pinnoitettiin huoneistossa B 23.3.2004 ja huoneistossa A 5.5.2004.

### Alapohjarakenteen lämpötilakenttä

Huoneisto A

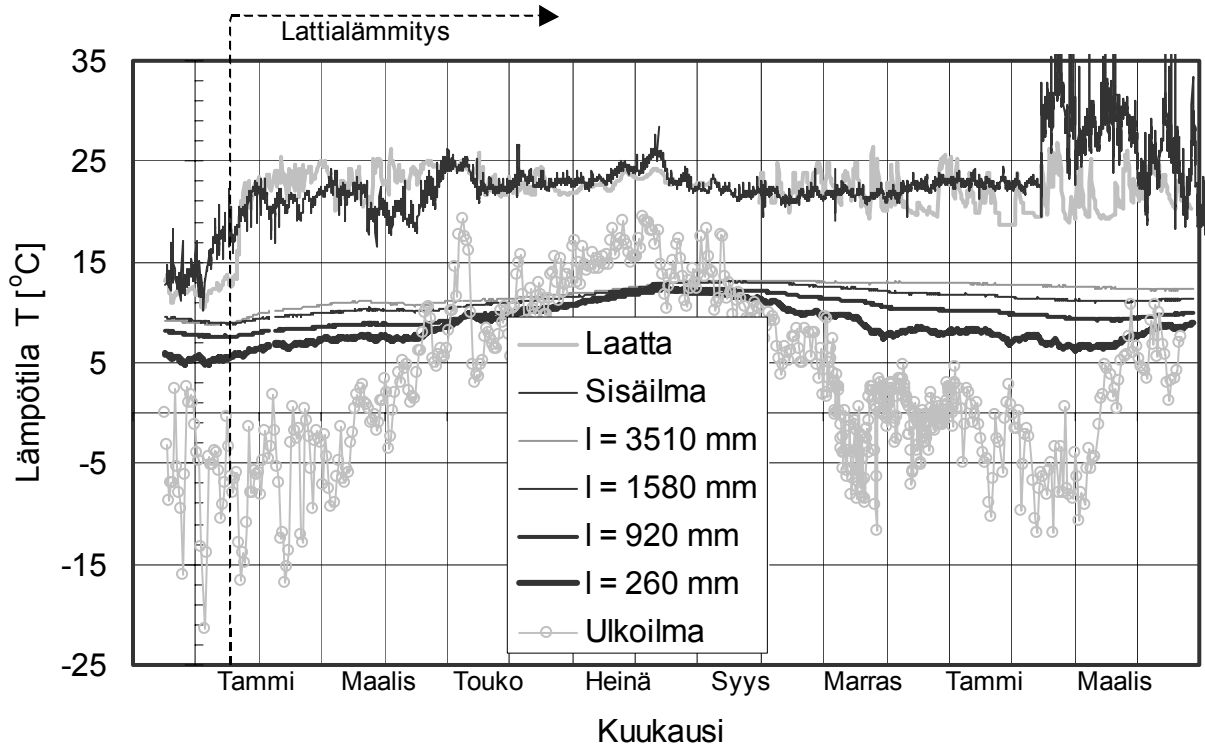
Kuvassa 5.28 on esitetty huoneiston A instrumentoidusta leikkauksesta mitatut täyttökerroksen lämpötilat kerroksen ylimmästä mittaustasosta (pisteet 3/345, 4/450, 6/450 ja 5/450, kuva 5.5) sekä laatan, sisäilman ja ulkoilman lämpötilat.



Kuva 5.28 Lämpötilakehitys kohteen A asunnon A täyttökerroksessa (I= etäisyys ulkoseinälinjasta).

*Huoneisto B*

Kuvassa 5.29 on esitetty huoneiston B instrumentoidusta leikkauksesta mitatut täyttökerroksen lämpötilat kerroksen ylimmästä mittaustasosta (pisteet 10/450, 11/450, 12/450 ja 14/450, kuva 5.6) sekä laatan, sisäilman ja ulkoilman lämpötilat.



*Kuva 5.29 Lämpötilakehitys kohteen A asunnon B täyttökerroksessa (I= etäisyys ulkoseinälinjasta).*

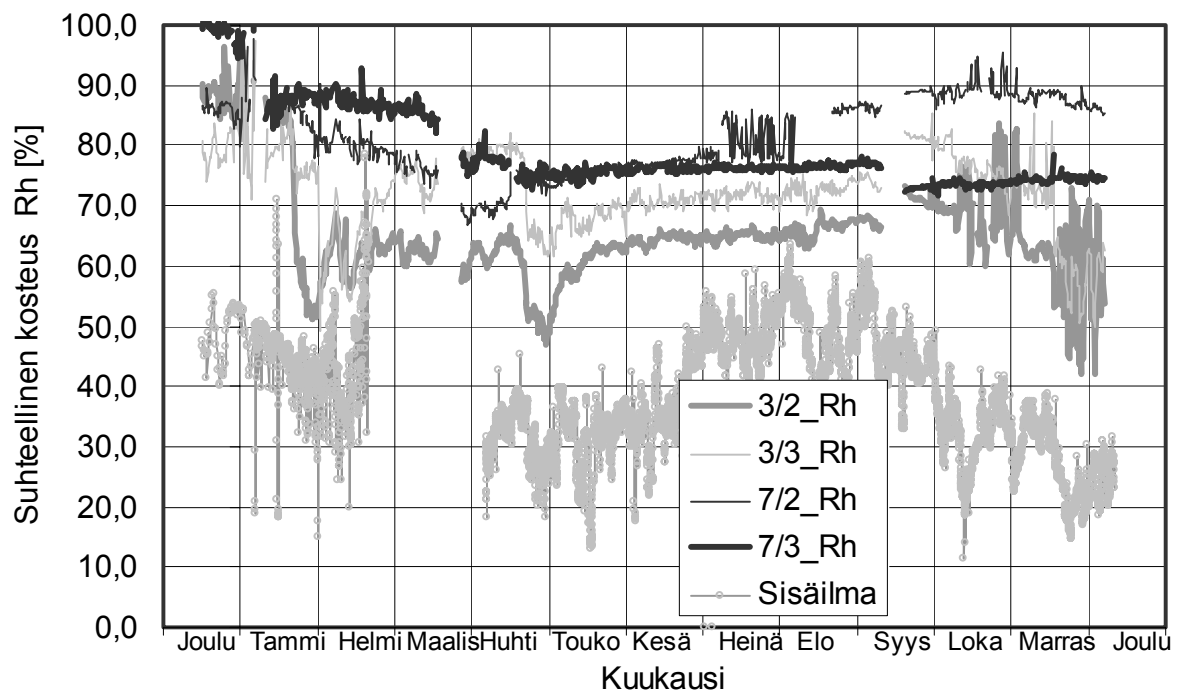
Mittaustulosten perusteella kohteen A täyttökerroksen yläosan lämpötila ulkoseinälinjalla vaihteli välillä  $T = +5 \dots +12,5^\circ\text{C}$ . Laatan keskellä vaihteluväli oli  $T = +9 \dots +14^\circ\text{C}$  (kuvat 5.28 ja 5.29). Lämpöelementtien alapuolisten laatanosien U-arvot olivat molemmissa alapohjissa lähes yhtä suuret ( $U_A = 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $U_B = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Mitatuissa lämpötiloissa asuntojen A ja B välillä ei ollut suuria eroja. Käytetyn eristemateriaalin vaikutus täyttökerroksen lämpötiloihin jäi merkityksettömäksi. Maksimilämpötilat saavutettiin molemmilla leikkauslinjoilla elokuun lopulla, jolloin täyttökerroksen pintaosien lämpötilajakauma oli lähes tasainen  $T = +12,5 \dots +14^\circ\text{C}$ .

## Betonilaatan lämpötila ja kosteus

Betonilaatan lämpötilaa ja kosteutta seurattiin viidessä rakennusleikkauksen pisteessä (kuva 5.5 ja 5.6). Jokaisessa pisteessä laatan lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin HT/T –antureiden avulla kahdessa tasossa, laatan alapinnassa ja sen alimmassa kolmanneksessa. Anturien sijainnit lämmityselementtien suhteen vaihtelivat tapauskohtaisesti.

### Huoneisto A

Kuvassa 5.30 on esitetty kohteen A huoneiston A leikkauksesta mitatut laatan suhteelliset kosteudet kahdesta tasosta laatan reunalla ja keskellä pisteissä 3 ja 7 (kuva 5.5). Laatan alimman kolmanneksen olosuhteita mittaavat anturit 3/3 ja 7/3, sekä laatan alapintaa anturit 3/2 ja 7/2. Lisäksi kuvassa on esitetty sisäilman suhteellisen kosteuden muutokset mittausjakson aikana.

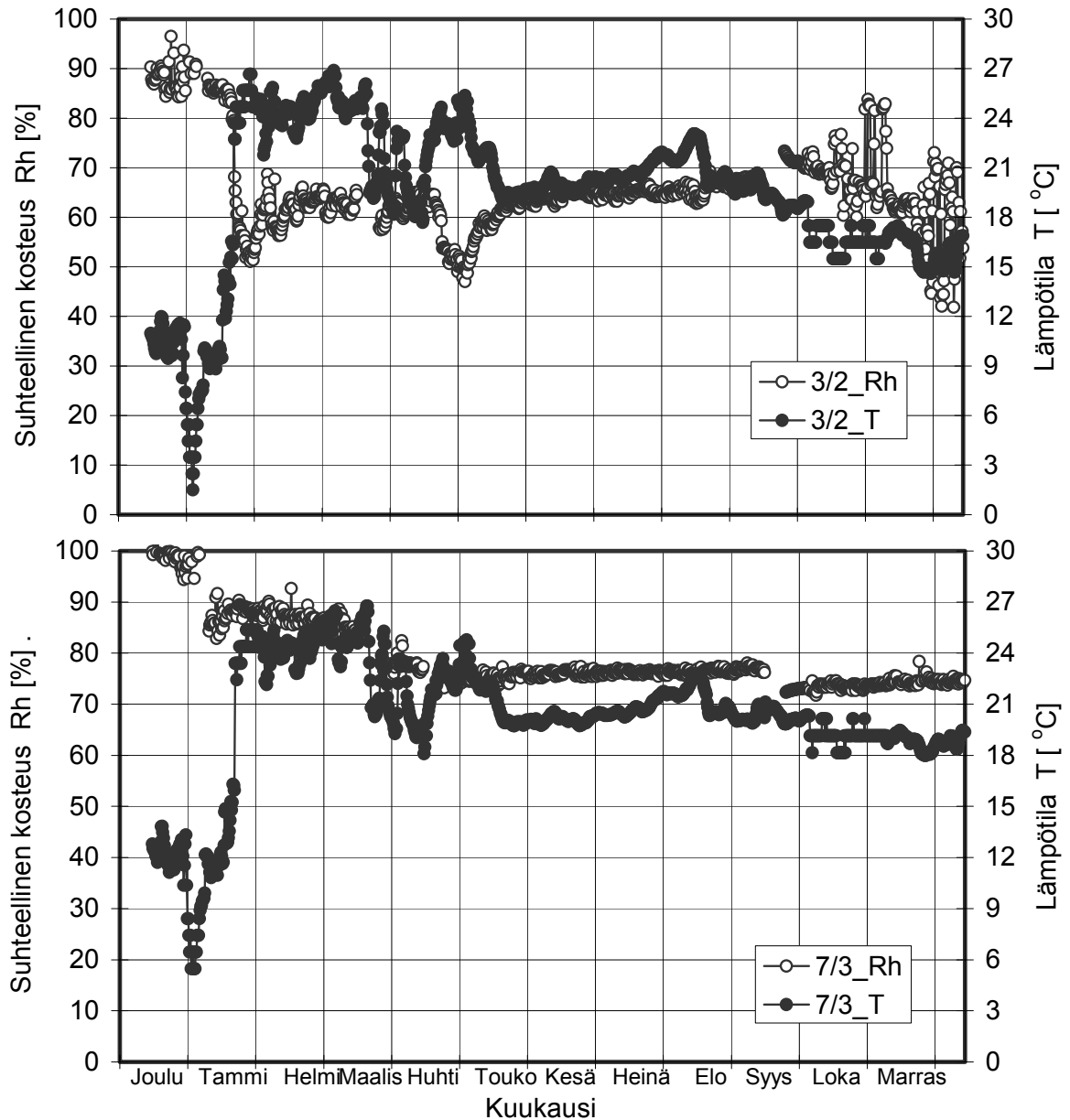


**Kuva 5.30** Laatan suhteellisen kosteuden kehittyminen kohteen A asunnon A seuratussa leikkauksessa laatan laidalla (pisteet 3/2 ja 3/3) sekä laatan keskiosassa (pisteet 7/2 ja 7/3), sekä sisäilman suhteellinen kosteus.

Kuvissa 5.31 on esitetty pisteiden 3/2 ja 7/3 suhteellisen kosteuden muutokset yhdessä lämpötilan muutosten kanssa. Mittauspiste 3/2 sijaitsi hyvin lähellä lämmityselementtiä etäisyyden lähimpään lämmityspotken seinämään ollessa vain noin 15 mm. Tämä näkyy selvästi mitatuissa Rh –lukemissa, joissa lämmitystehon nosto pudottaa jyrkästi mitattu suhteellisen kosteuden lukemia (kuva 5.31). Piste 7/3 sijaitsi laatan alapinnassa kahden lämmityslinjan välissä noin 150 mm etäisyydellä lähimpään lämmityspotken. Täällä lämmitystehon



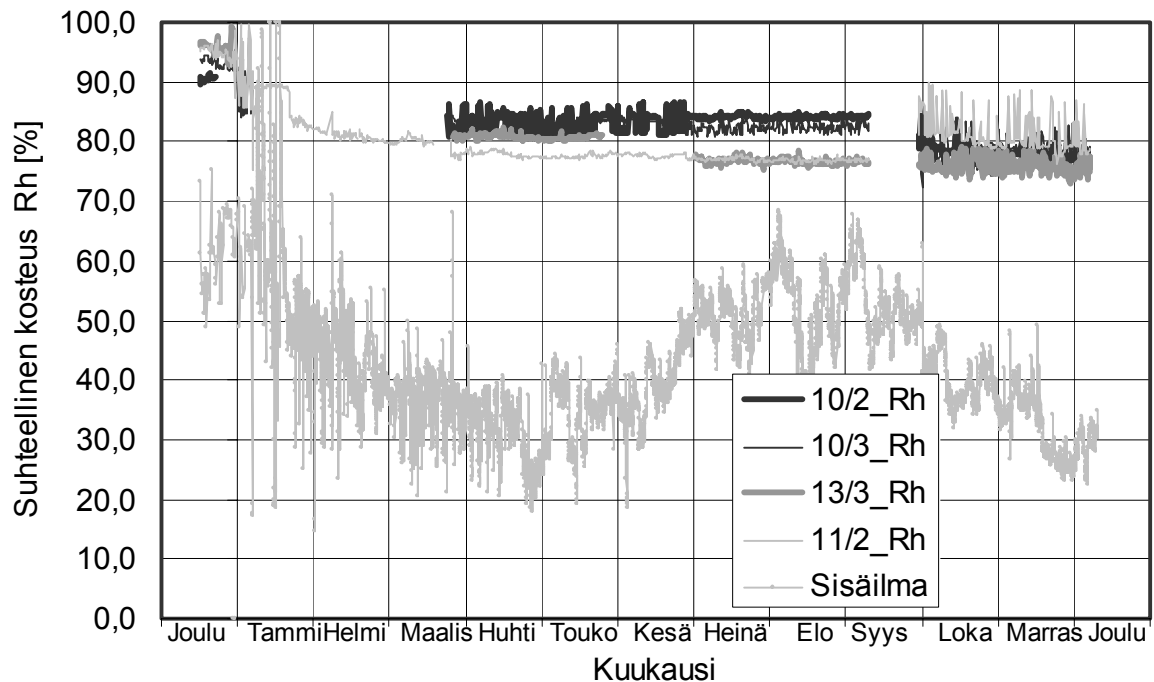
kohoaminen ei näy mitatuissa Rh -lukemissa, vaikka laatan lämpötilan muutos onkin yhtä suuri ja nopea kuin pisteen 3/2 kohdalla (kuva 5.31).



Kuva 5.31 Mittauspisteiden 3/2 ja 7/3 lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutokset ensimmäisen vuoden aikana.

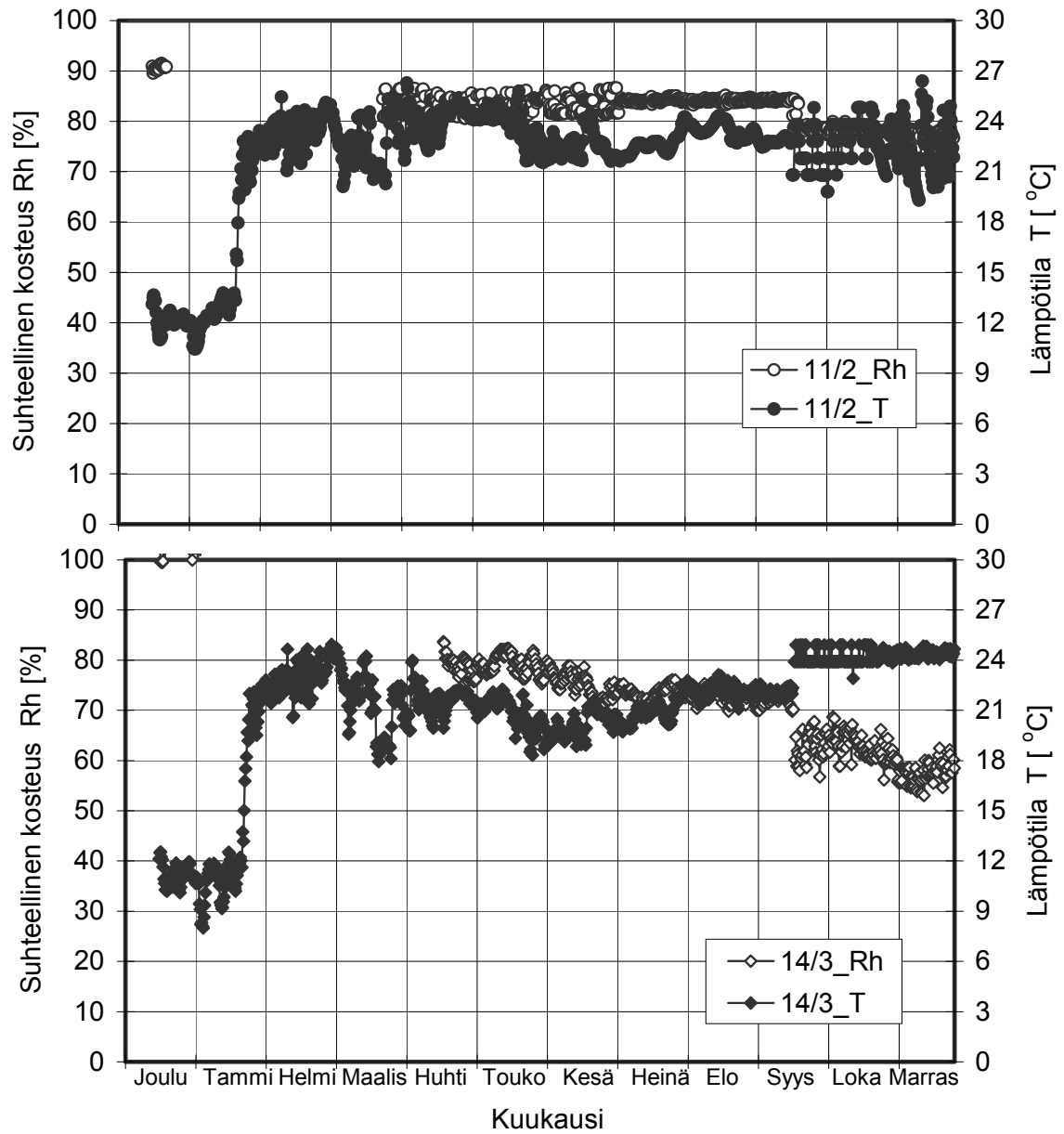
### Huoneisto B

Kuva 5.32 esittää kohteen A leikkauksesta B mitatut laatan lämpötilat ja suhteelliset kosteudet laatan leikkauksessa pisteissä 10, 11 ja 13 (kuva 5.6). Laatan alimman kolmanneksen olosuhteita mittaavat anturit 10/3 ja 13/3, sekä laatan alapintaa anturit 10/2 ja 11/2. Lisäksi kuvassa on esitetty sisäilman suhteellisen kosteuden muutokset mittausjakson aikana.



**Kuva 5.32** Laatan suhteellisen kosteuden kehittyminen kohteen A asunnon B seuratussa leikkauksessa laatan laidalla (pisteet 10/2 ja 10/3) sekä laatan keskiosassa (pisteet 11/2 ja 13/3), sekä sisäilman suhteellinen kosteus.

Kuvassa 5.33 on esitetty antureista 14/3 ja 11/2 mitatut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutokset mittausjaksolla. Anturi 14/3 sijaitsee muista linjan pisteistä poiketen kodinhoituhuoneen lämmönjakopiirin alueella ja lisäksi anturi oli suhteellisen lähellä lämmitysputkea. Tämä näkyy selvästi mitatuissa Rh –lukemissa, joissa lämpötilan nopea kohoaminen näkyi mitatun suhteellisen kosteuden laskuna (kuva 5.33). Piste 11/2 etäisyys lämpöputkesta oli suurempi, noin 90 mm, jolloin lämpötilamuutosten vaikutus mitattuihin RH –lukemiin jäi vähäiseksi (kuva 5.33).



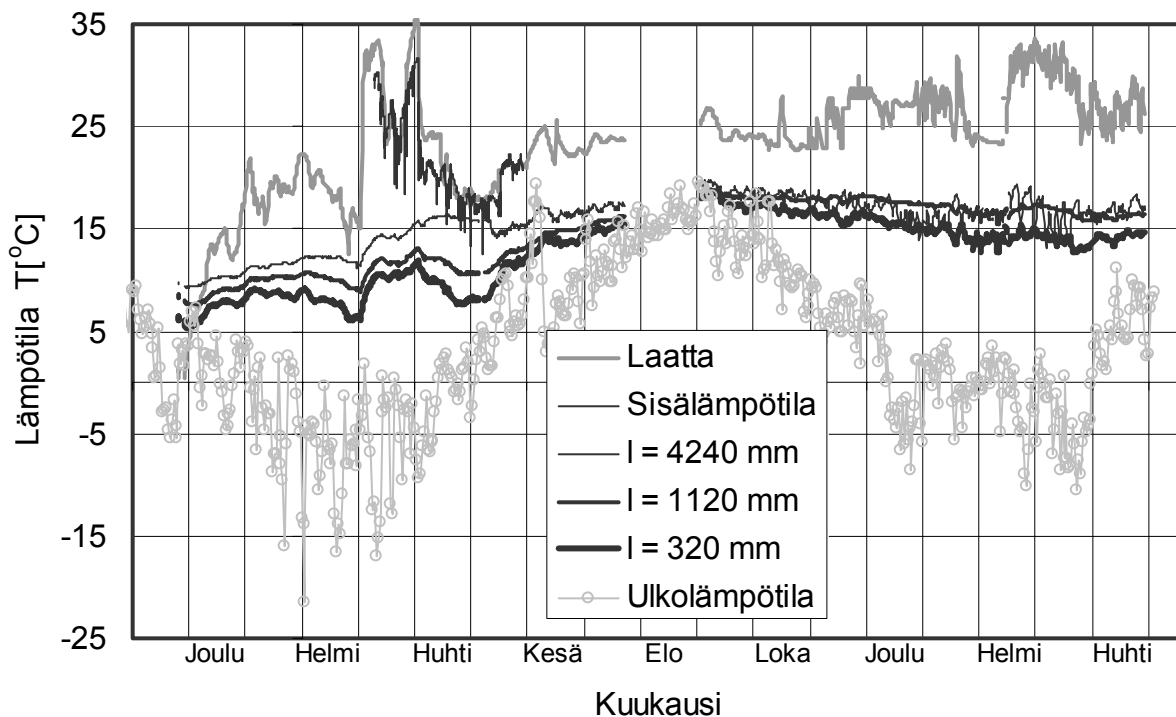
Kuva 5.33 Mittauspisteiden 11/2 ja 14/3 lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutokset ensimmäisen vuoden aikana.

## 5.2.2 Kohde B

Kohteen B alapohjalaatta valettiin 11.8.2003. Alkusyöksyllä rakennusta lämmitettiin vain ajoittain kuumailmapuhaltimilla, jolloin laatan lämpötila laski lokakuun lopulla hetkellisesti lähelle  $T = +0^{\circ}\text{C}$  astetta (kuva 5.34). Lattialämmitys kytkettiin päälle 7.11.2003. Instrumentoitu laatanosa pinnoitettiin 1.3.2004.

### Alapohjarakenteen lämpötilakenttä

Kuvassa 5.34 on esitetty kohteen B täyttökerroksen ylimmän mittauslinjan (anturit 25/470, 36/470, 23/400, kuva 5.13) lämpötilakehitys mittausjakson aikana yhdessä laatan mitatun lämpötilan sekä sisä- ja ulkoilman lämpötilojen kanssa.



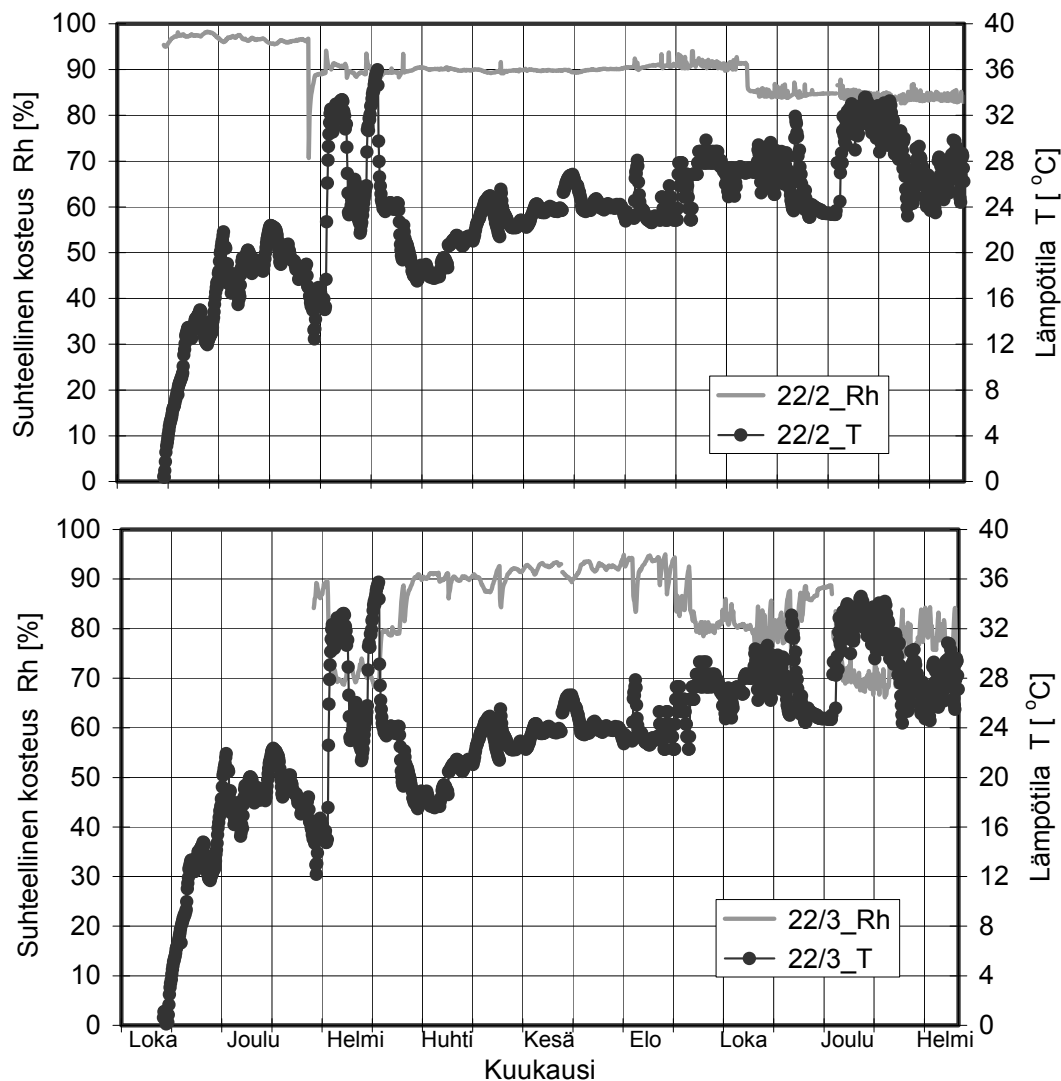
Kuva 5.34 *Lämpötilakehitys kohteen B täyttökerroksessa. Täyttökerroksen mittausanturit on yksilöity etäisyyksinä ulkoseinälinjasta ( $l = 320$  mm,  $l = 1120$  mm ja  $l = 4240$  mm).*

Kohteessa B täyttökerroksen lämpötila laatan reunaosissa vaihteli mittausjakson aikana  $T = +6 \dots +18^{\circ}\text{C}$  välillä ja laatan keskiosissa välillä  $T = +9 \dots +19^{\circ}\text{C}$ . Mitatut maksimilämpötilat saavutettiin elokuussa, jolloin laatan alapuolisen täyttökerroksen lämpötila oli varsin tasainen  $T = +18 \dots +19^{\circ}\text{C}$ .

## Alapohjalaatan lämpötila ja kosteus

Kohteessa B alapohjalaatan lämpötilaa ja kosteutta seurattiin pisteestä 22 (kuva 5.14) kahdessa pisteessä: laatan alapinnan tasossa (anturi 22/2) sekä laatan alimmassa kolmanneksessa (anturi 22/3).

Kuvissa 5.35 on esitetty antureista 22/2 ja 22/3 mitatut laatan lämpötilat ja suhteelliset kosteudet mittausjakson aikana. Molemmat anturit sijaitsivat hyvin lähellä lämmitysputkea, jolloin lämpötilan nopeat näkyvät myös mitatuissa suhteellisen kosteuden muutoksissa. Laatan alin kolmannes on yhä suhteellisen kostea noin vuoden kuluttua pinnoittamisesta kosteuden tasaannuttua tasolle  $R_h = 90 \dots 92 \%$ . Tämä johtunee laatan suhteellisen aikaisesta pinnoittamisesta ja parketin alle tutkittavassa asunnossa asennetusta rakennusmuovista. Laatan kuivuminen on tämän jälkeen ollut hyvin hidasta.



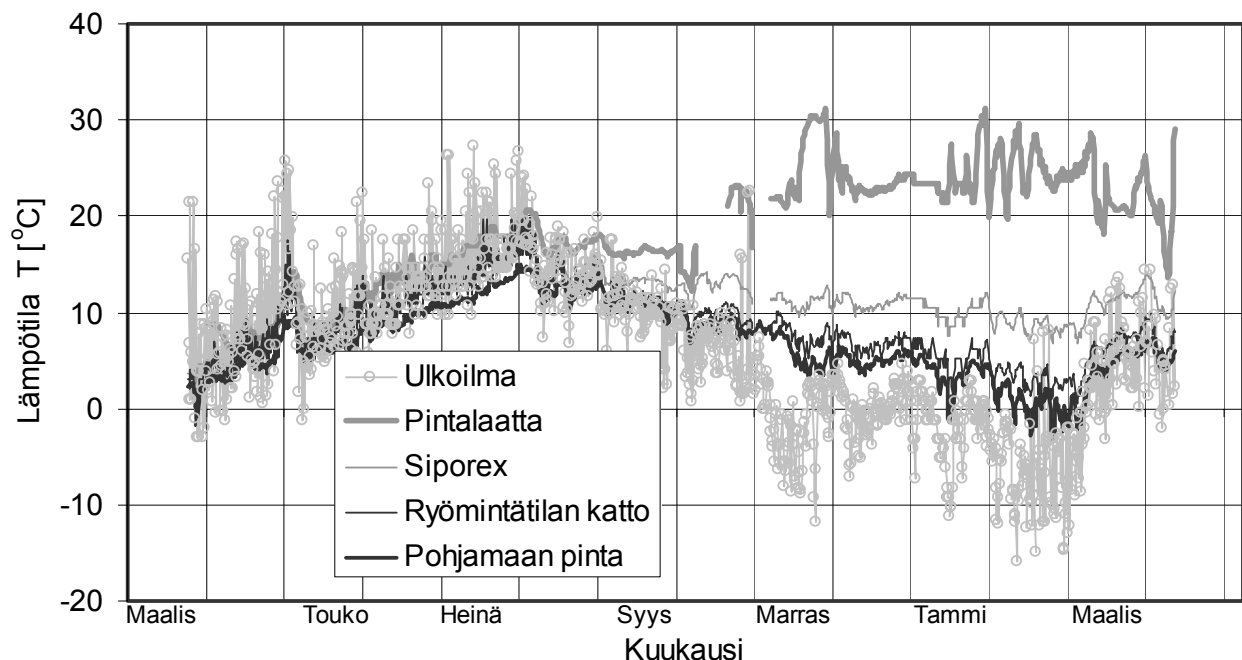
Kuva 5.35 Antureista 22/2 ja 22/3 mitattujen lämpötilojen ja suhteellisten kosteuksien muutokset mittausjakson aikana.

### 5.2.3 Kohde C

Kohteen C pintalaatta valettiin 25.3.2004 ja alapohjalaatan lattialämmitys on ollut ajoittain kytkettynä kesäkuusta 2004 lähtien. Lattia pinnoitettiin 5.8.2004.

#### Ryömintätilan lämpötila- ja kosteuskenttä

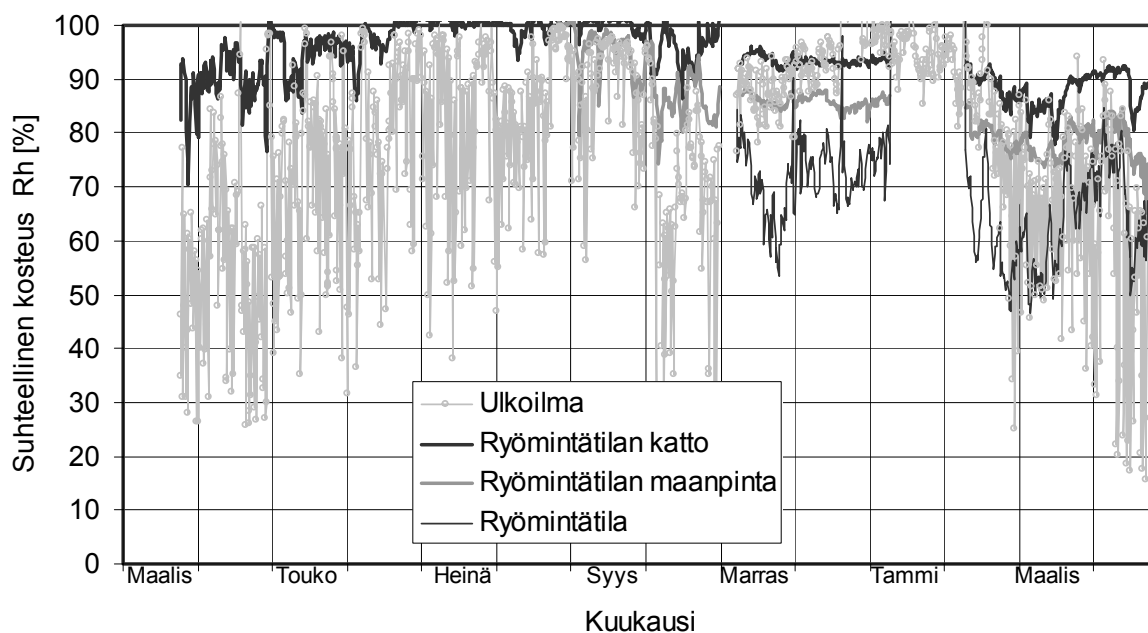
Kuvissa 5.36 ja 5.37 on esitetty alapohjarakenteesta ja ryömintätilasta mitatut lämpötilat ja suhteelliset kosteudet mittaussjaksolla 29.3.2004 – 26.4.2005 mittauspisteessä 20. Piste sijaitsee laatan ulkoreunalla ryömintätilan tuuletusaukon kohdalla hyvin tuulettetussa ryömintätilan osassa (kuva 5.19). Kuvassa 5.36 on esitetty ulkolämpötilojen lisäksi ryömintätilan ilman lämpötilat alapohjalaatan alapinnassa ja ryömintätilan pohjan tasolla, sekä betonisen pintalaatan ja Siporex -laattaelementin lämpötilat.



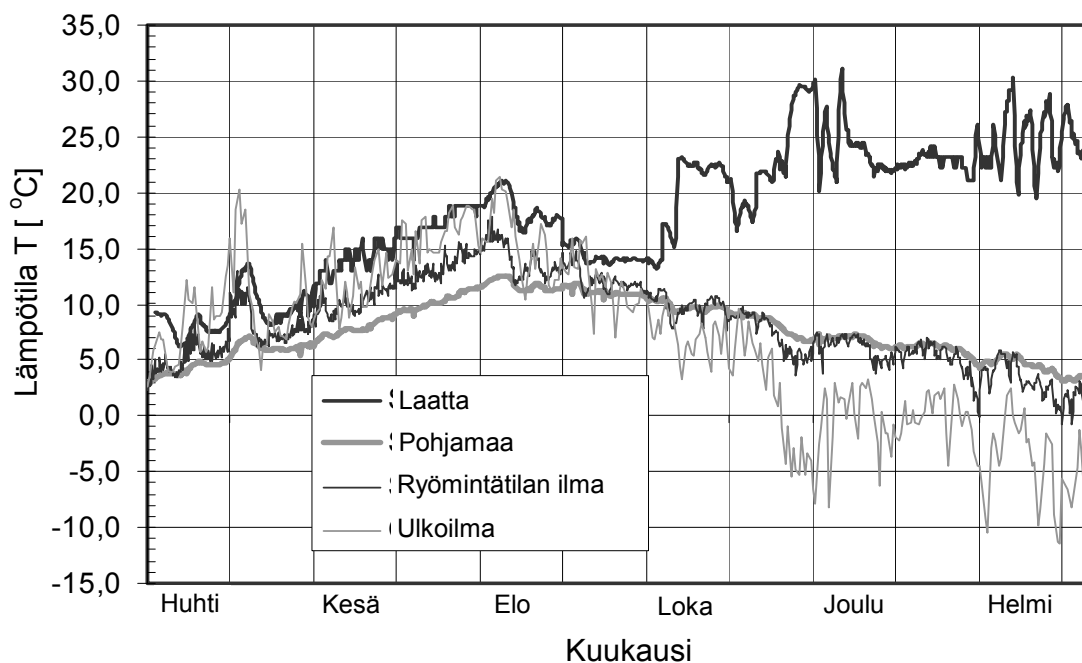
*Kuva 5.36 Ryömintätilan leikkauksesta 20 mitatut lämpötilat rakennekerroksissa: pintalaatan, Siporex -laattaelementin, ryömintätilan ilmatilan ja pohjamaan lämpötilat yhdessä mitattujen ulkolämpötilojen kanssa.*

Kuvissa 5.37 ja 5.38 on esitetty ryömintätilan katon ja maanpinnan suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehittyminen leikkauksessa 17. Ryömintätilan ilmakeuhuus on erittäin korkea kesäkuukausien ajan. Ryömintätilan katon suhteellinen kosteus pysyy kesäkuun ja lokakuun välisenä aikana lähes pysyvästi yli  $R_h > 90\%$ . Mittausjaksolle osunut kesä oli hyvin sateinen ja kostea, ja ulkoilman mitattu suhteellinen kosteuskin oli kesäkuukausina varsin korkea (kuva 5.37). Lisäkosteutta ryömintätilaan syöttää eristämätön maapohja, josta haihtuva kosteus piti maanpinnan

tasosta mitatun suhteellisen kosteuden  $R_h = 100\%$  koko kesäkauden kesäkuun lopusta lokakuun puoliväliin (kuva 5.37).



Kuva 5.37 Ryömintätilan leikkauksesta 17 mitatut ryömintätilan katon ja pohjamaan pinnan suhteelliset kosteudet mittausjakson aikana verrattuna ulkoilman suhteelliseen kosteuteen.



Kuva 5.38 Leikkauksesta 17 mitatut ryömintätilan ilman ja pohjamaan pinnan lämpötilat mittausjakson aikana.

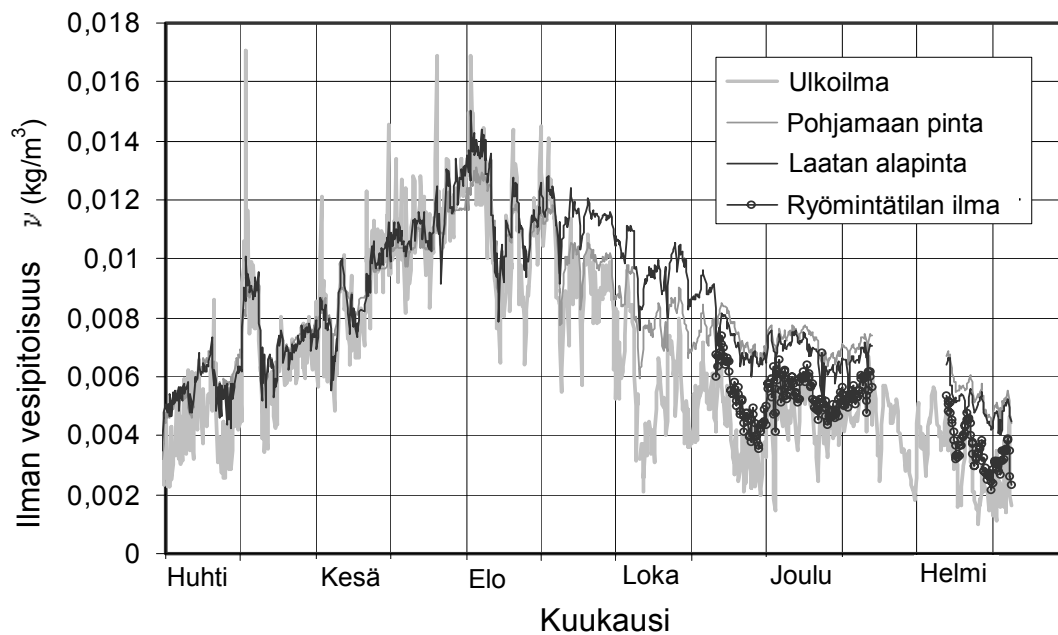
Mittaustulosten perusteella ryömintätilan kausittaiset lämpötilamuutokset jäävät selvästi alueen ulkolämpötilan muutoksia vähäisemmiksi. Talvella tammi-maaliskuussa ryömintätilan ilman keskilämpötila on noin 7 –astetta ulkolämpötilaa korkeampi. Lämpövuoto alapohjalaatan läpi nosti selvästi ryömintätilan ilman lämpötilaa lämmityskaudella, mutta myös koko talven sulana pysyneen pohjamaan pinnan lämpötila,  $T_{\min} = +2^{\circ}\text{C}$ , pysyi noin 0,7 –astetta ryömintätilan ilmanlämpötilaa korkeampana koko lämmityskauden ajan. Sekä alapohjalaatan alapinta että pohjamaan pinta toimivat ryömintätilan tuuletusilmaa lämmittävinä lämmönlähteinä talvikuukausina (kuva 5.38).

Kesällä alapohjalaatan alapinnan ja ryömintätilan ilman välinen lämpötilaero oli mittauksissa hyvin pieni. Sen sijaan pohjamaan pinnan ja ryömintätilan ilman lämpötiloissa on selvä ero. Loppukesällä pohjamaan pintalämpötila oli noin 1 –astetta alempi ja syvempien pohjamaakerrosten ( $h = 250 \text{ mm}$ ) lämpötila noin 3-astetta alempi kuin ryömintätilan ilman keskimääräinen lämpötila. Kesäkuukausina viileä pohjamaa alentaa selvästi ryömintätilan ilman lämpötilaa, joka jäi keskimäärin 4-astetta alemmaksi kuin kohteessa mitattu ulkoilman vuorokautinen keskilämpötila (kuva 5.38).

Kuvan 5.39 vertailu esittää kohteesta mitattuja ilman absoluuttisia vesipitoisuuksia ryömintätilan ylä- ja alapinnoilla, ryömintätilan ilmatilan puolivälissä sekä ulkoilmassa. Ilman sisältämä vesimäärä on suurin loppukesällä heinä-elokuussa, jolloin suurin osa ryömintätilan kosteudesta on peräisin ulkoilmasta. Koska ryömintätilan ilman lämpötila on lisäksi selvästi ulkoilman lämpötilaa alempi, pysyy tilan suhteellinen kosteus erittäin korkeana koko kesäkauden ajan. Tästä syystä lisäkosteutta ei pohjamaasta tai alapohjarakenteesta juurikaan pääse haihtumaan kyllästystilassa olevaan ryömintätilan ilmaan ja absoluuttiset kosteudet ryömintätilan pinnoilla vastaavat hyvin ulkoilman kosteuksia (kuva 5.39).

Talvella ulkoilman vesipitoisuus on selvästi alempi, mikä alentaa myös ryömintätilan ilman absoluuttista kosteutta (kuva 5.39). Samaan aikaan ryömintätilan ilman lämpötila pysyy selvästi keskimääräistä ulkolämpötilaa korkeampana, mikä edelleen alentaa ryömintätilan ilman suhteellista kosteutta (kuva 5.37). Sen sijaan ryömintätilan ilman absoluuttinen vesipitoisuus on selvästi ulkoilmaa korkeampi (kuva 5.39). Kosteuslisä johtuu haihtumisesta sekä sulan pohjamaan pinnasta että kuivuvasta yläpuolisesta Siporex-elementistä. Tämä on selvästi nähtävissä vertailtaessa ryömintätilan pinnoilta mitattuja korkeampia absoluuttisia kosteuspitoisuuksia ryömintätilan ilman keskimääräiseen vesipitoisuuteen (kuva 5.39). Ryömintätilan ilman vesipitoisuus on mittauskohteessa talvikuukausina keskimäärin 33 % korkeampi kuin ulkoilman vesipitoisuus samana ajankohtana.

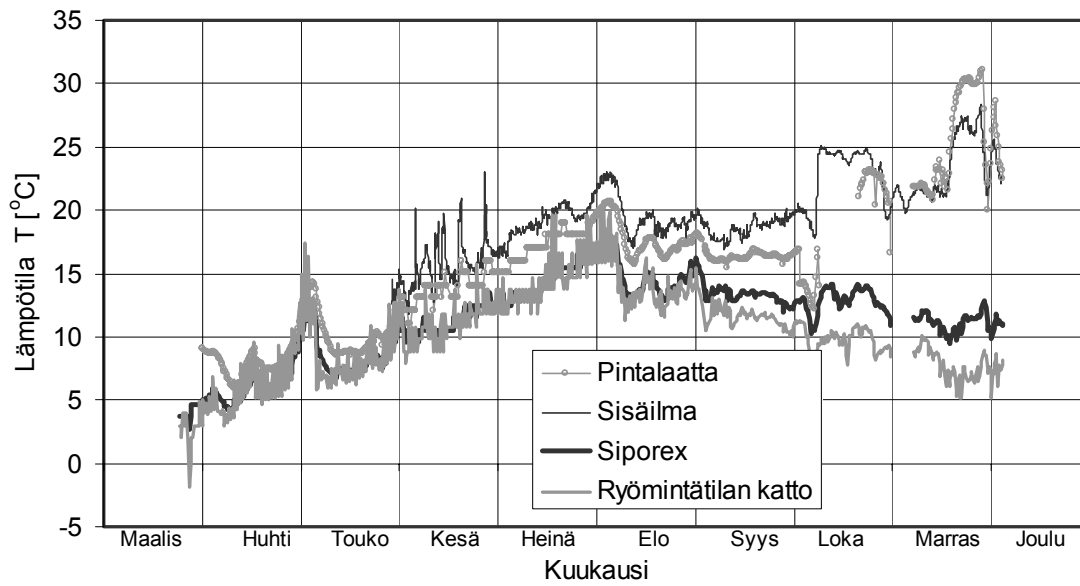




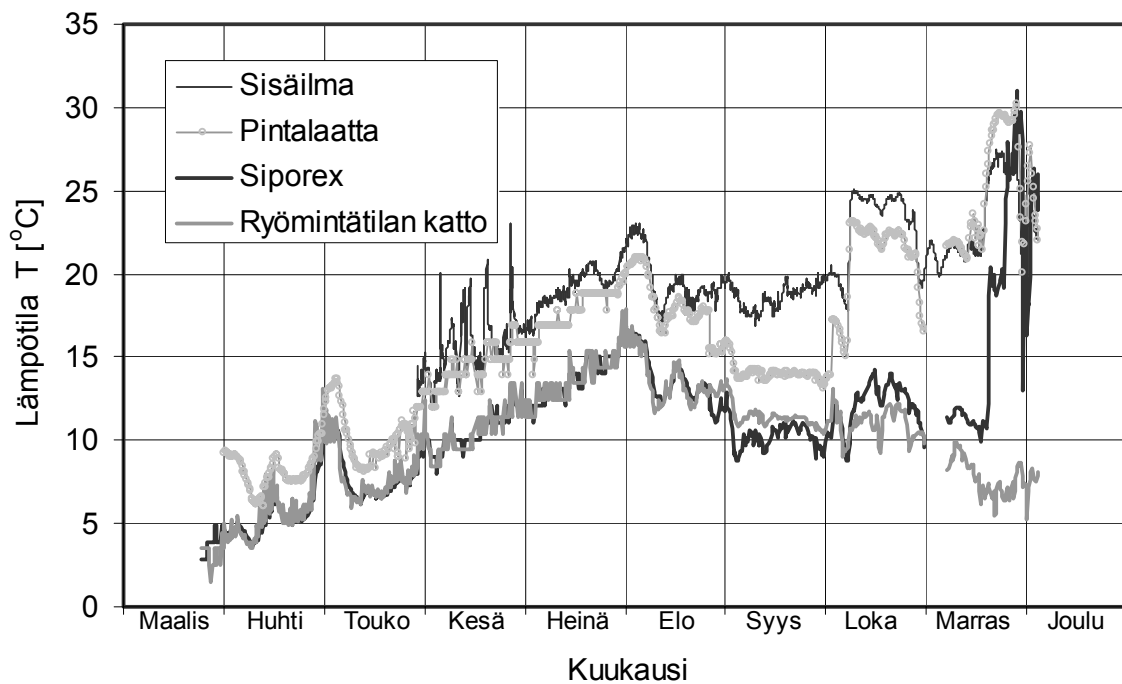
*Kuva 5.39 Ryömintätilan ilman absoluuttiset vesipitoisuudet alapohjalaatan alapinnassa, pohjamaan pinnassa ja ryömintätilan ilmatilan puolivälissä, sekä ulkoilman vesipitoisuus mittausjakson huhtikuun ja helmikuun välisenä aikana*

### Alapohjan lämpötila ja kosteus

Kuvissa 5.40 ja 5.41 on esitetty mittauspisteiden 20 ja 17 laatan rakenneleikkauksesta mitatut lämpötilat mittausjakson aikana. Pintalaatan lämpötiloja alettiin mitata viikon kuluttua laatan valusta maaliskuun lopussa. Pohjakerroksen lattialämmityksen tehoa nostettiin ensimmäisen kerran vasta lokakuun alussa, mikä näkyy selvästi pintalaatan ja sisäilman lämpötiloissa.



*Kuva 5.40 Laatan leikkauksesta 20 mitatut sisäilman, pintalaatan, Siporex-elementin ja ryömintätilan katon lämpötilat mittausjakson aikana.*



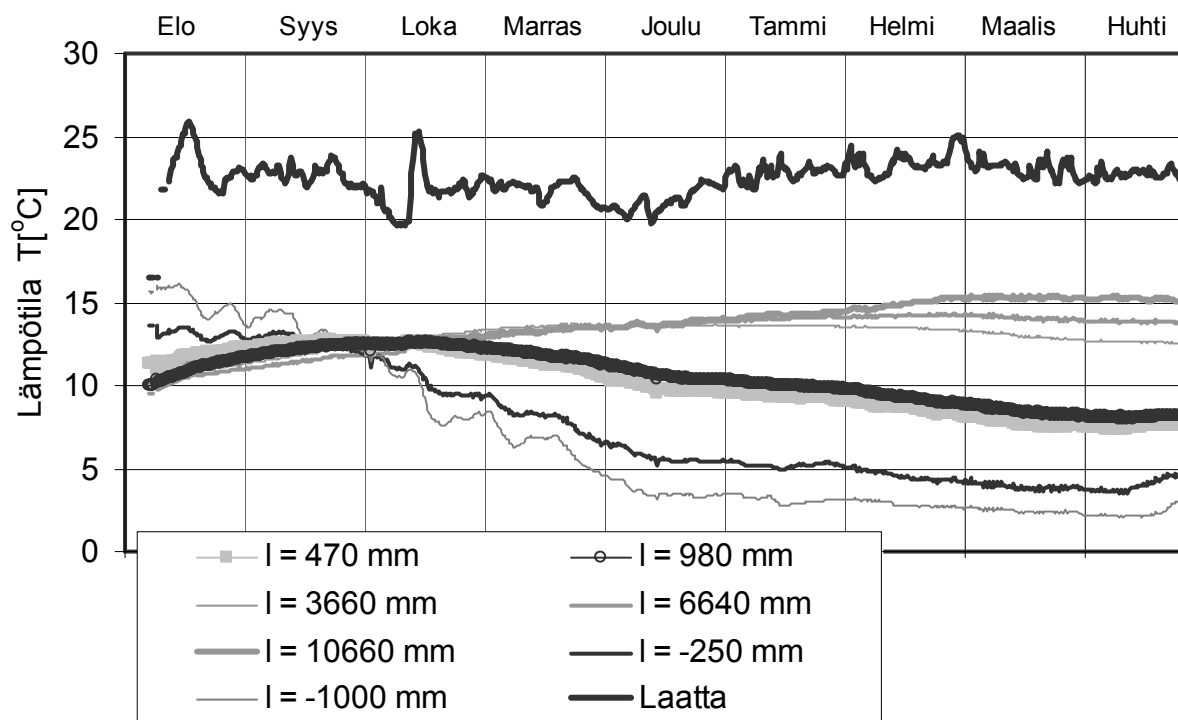
*Kuva 5.41 Laatan leikkauksesta 17 mitatut sisäilman, pintalaatan, Siporex-elementin ja ryömintätilan katon lämpötilat mittausjakson aikana.*

### 5.2.4 Kohde D

Kohteen D paalulaatta valettiin lokakuussa 2003. Laatta oli lämmittämätön ja suojaamaton koko talven 2003 – 2004. Elementtirakenteinen teollisuushalli pystytettiin kevään 2004 aikana. Tuotantolaitteisto asennettiin kesä-heinäkuussa 2004 ja tuotanto aloitettiin heinä-elokuun vaihteessa 2004. Tuotanto tuottaa jonkin verran lämpöä ja lattialämmitys kytkettiin päälle vasta alkuvuodesta 2005.

#### Alapohjarakenteen lämpötilakenttä

Kuvassa 5.42 on esitetty kohteen D instrumentoidun rakenneleikkauksen täyttökerroksen lämpötilat laatan eristekerroksen ja routaeristekerroksen alapinnassa. Lisäksi kuvassa on esitetty laatan lämpötilan muutokset samalla mittausjaksolla.



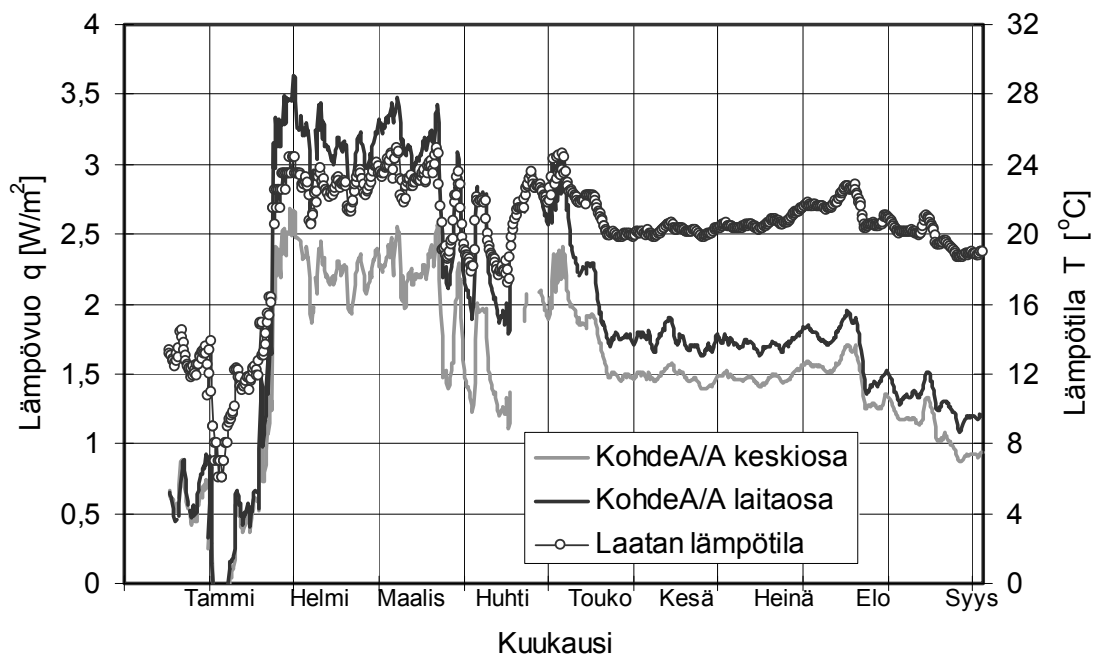
Kuva 5.42 Lämpötilamuutokset kohteen D täyttökerroksessa. Mittauspisteet on annettu etäisyyksinä laatan ulkoreunasta. Pisteet  $l = 470 \dots 10610$  mm ovat laatan eristekerroksen alapinnassa, pisteet  $l = -250$  mm ja  $l = -1000$  mm rakennusta ympäröivän routaeristyskerroksen alapinnassa (kuva 5.25). Laatan lämpötila on annettu laatan alapinnasta mitattujen lukemien keskiarvona.

### 5.3 Kenttämittaustulosten yhteenveto ja vertailu

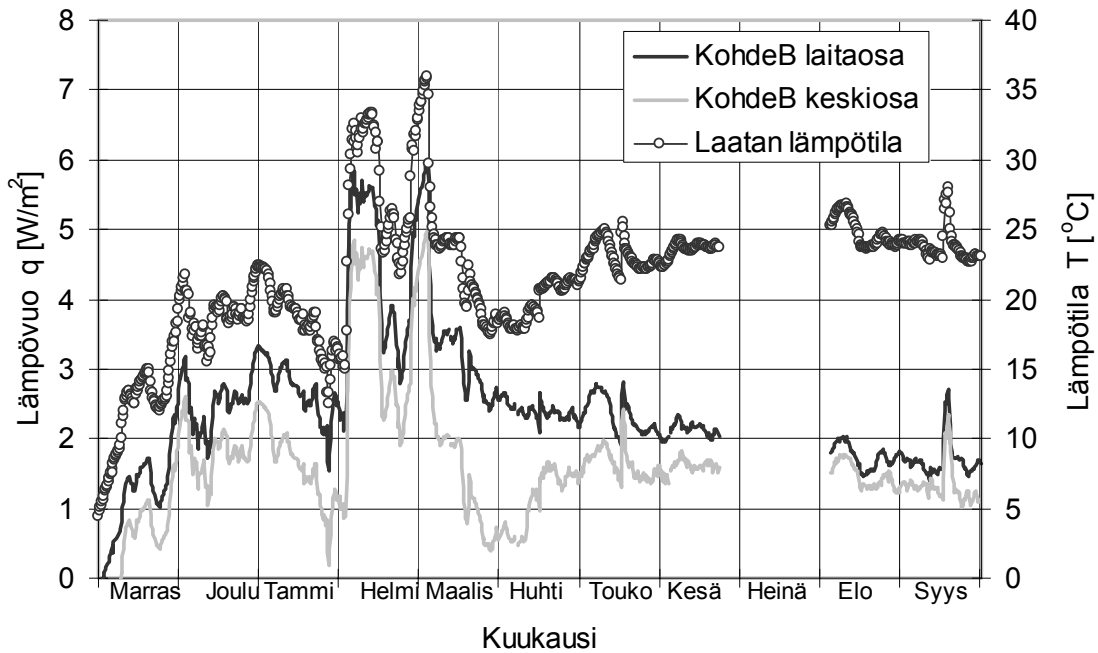
#### Maanvaraisten lämmitettyjen alapohjalaattojen lämpötilakenttä

Kohteet A ja B ovat tyypillisiä lattialämmitettyjä pientaloja, joissa halkaistu elementti- tai harkkosokkeli nousee jonkin verran ympäröivän maanpinnan yläpuolelle ja rakennusta ympäröivä routaeristys on sokkelin alareunan tasalla. Sokkelikaukalo on täytetty karkearakeisilla täyttö- ja kapillaarikatkomateriaaleilla, johon alapohjan eristyskerrokset ja maanvarainen massiivilaatta tukeutuvat.

Tällaisissa rakenteissa lämpötilajakauman muodostumiseen täyttökerroksessa lämmitetyn lattiarakenteen alapuolella vaikuttavat etenkin lattiarakenteen ja sokkelin lämmöneristävyys sekä täyttökerroksen ja pohjamaan lämpötekniset ominaisuudet. Kohteessa A /A laatan U –arvo oli noin 30 % pienempi kuin kohteessa B ja vastaavasti kesäkaudella mitatut täyttökerroksen maksimilämpötilat laatan keskiosalla olivat kohteessa B noin 20 % korkeammat kuin kohteessa A/A laatan lämpötilan ollessa molemmissa kohteissa noin  $T \approx +22^{\circ}\text{C}$ . Sokkelin lämmöneristävyys näkyy selvimmin talvikuukausina sokkelin viereisissä täyttölämpötiloissa. Ensimmäisen vajaan lämmityskauden aikana kohteesta A/B mitattu täytön lämpötila oli maaliskuun lopussa noin  $T_{\text{täyttö}} = +7,4^{\circ}\text{C}$  laatan lämpötilan ollessa  $T_{\text{laatta}} = 20,5^{\circ}\text{C}$ , kun taas kohteessa B täytön laitaosien lämpötila maaliskuussa oli  $T_{\text{täyttö}} = +10^{\circ}\text{C}$  laatan lämpötilan ollessa  $T_{\text{laatta}} = +20^{\circ}\text{C}$ . Kohteen B sokkelin U –arvo on noin 18 prosenttia pienempi kuin kohteessa A/B.



Kuva 5.43 Kohteen A/A laskennalliset lämpövuot ( $\Delta T/U$ ) alapohjalaatan eristekerroksen läpi laatan laita- ja keskiosassa, sekä laatan mitattu lämpötila.



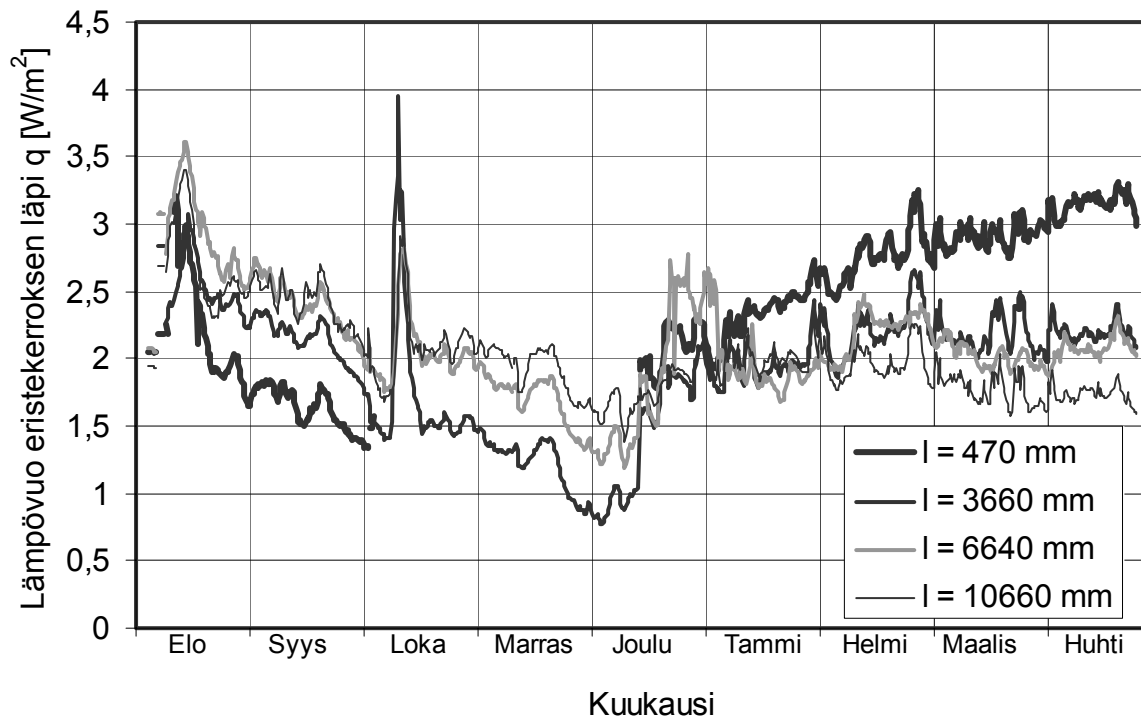
*Kuva 5.44 Kohteen B laskennalliset lämpövuot alapohjalaatan eristekerroksen läpi laatan laita- ja keskiosassa, sekä laatan mitattu lämpötila.*

Kausittaiset ulkolämpötilan vaihtelut vaikuttavat huomattavasti täyttölämpötiloihin laatan laitaosilla lähellä sokkelia. Talvikuukausina laatan keskiosissa täytön lämpötila voi olla useita asteita korkeampi kuin välittömästi sokkelin läheisyydessä. Tähän vaikuttavat sekä lämpövuot sokkelirakenteen läpi, mikä laskee huomattavasti täyttökerrosten lämpötiloja lähellä sokkelia, että lämpövuot laatan läpi lämmityskaudella, mikä puolestaan nostaa täytön lämpötilaa laatan keskiosissa. Täyttökerroksen massasta ja suhteellisen alhaisesta lämmönjohtavuudesta johtuen kausittaisten ulkolämpötilojen vaihtelut eivät ulotu kovin etäälle sokkeliseinästä, vaan rajoittuvat kaikissa seuratuissa tapauksissa noin 1,5 – 2 metrin matkalle ulkoseinälinjasta. Laatan keskiosissa laatan lämpötilan vaihteluilla on selvästi hallitseva rooli täyttökerroksen lämpötilamuutoksissa.

Kesällä lämpötilaerot täyttökerroksissa tasaantuvat laitaosien lämpötilojen noustessa ja keskiosien laskiessa lämmityskauden päättyessä. Kausivaihteluista johtuen täyttökerroksen keskimääräinen lämpötila laatan laitaosilla on selvästi alempi kuin laatan keskiosissa, myös pohja-alaltaan suhteellisen pienissä rakennuksissa, kuten omakotitaloissa. Täyttökerroksen epätasaisella lämpötilajakaumalla on vaikutusta myös laatan kosteuskäyttäytymiseen ja etenkin rakennuskosteuden kuivumiseen ensimmäisten lämmityskausien aikana.

Kuvassa 5.45 on esitetty kohteen D laatan eristekerroksen läpi kulkevat lämpövuot määritettyinä kenttämittaustuloksista. Kohteen lattialämmitys on kytketty päälle vasta joulukuun alussa, mikä näkyy selvästi laskennallisissa

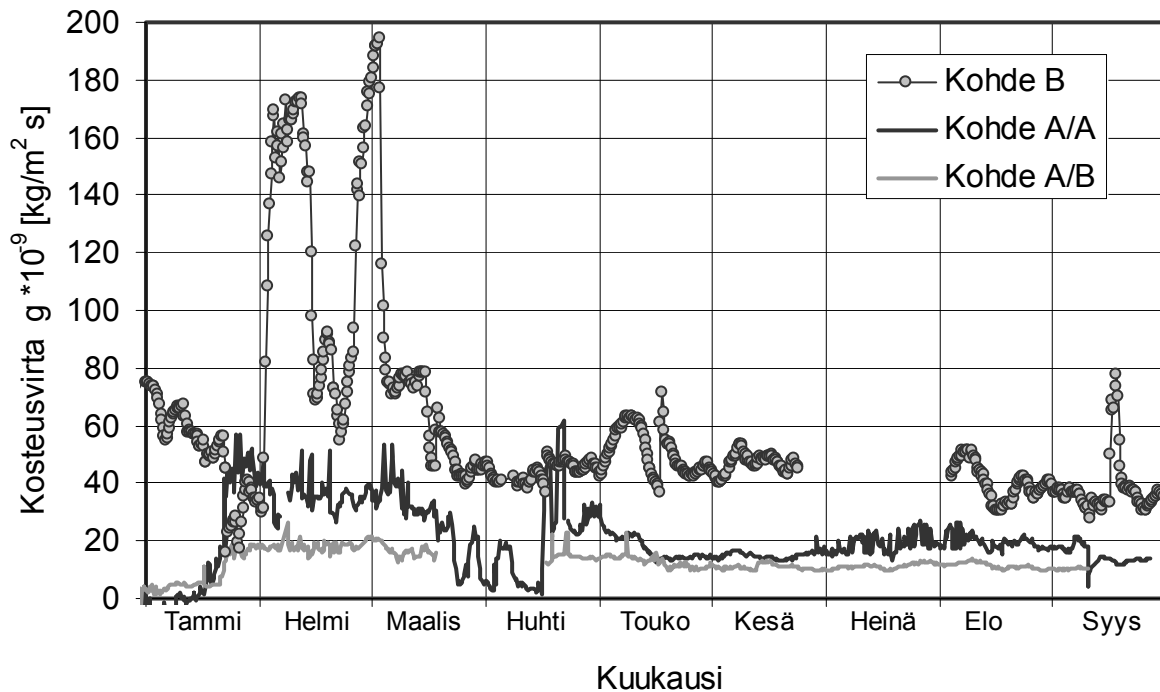
lämpöhäviöissä alapohjalaatan läpi. Lämpöhäviöt laatan reunalta ovat jälleen selvästi suuremmat kuin laatan keskeltä, vaikka mitatut laatan lämpötilat rakennuksen reunalla jäivätkin mittausjaksolla selvästi laatan keskiosien lämpötiloja alhaisemmiksi.



Kuva 5.45 Kohteen D laskennalliset lämpövuot laatan eristekerroksen läpi neljässä pisteessä tutkitussa laattaleikkauksessa.

### Maanvaraisten lämmitettyjen alapohjalaattojen kosteusKenttä ja rakennuskosteuden kuivuminen

Kohteessa A rakennusleikkauksen A (kohde A/A) laatan eristekerros koostui  $h_e = 200$  mm paksusta EPS –kerroksesta, jonka nimellinen vesihöyrynvastus on  $Z_v \approx 177000$  m/s ( $\delta_v = 1,132 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s). Mittauksissa laatan alapinnan suhteellisen kosteuden lukemat ovat hieman alempia kuin ylempien antureiden (kuva 5.30). Tämä johtuu laatan kuivumisesta alaspäin. Eristekerroksen suhteellisen korkeasta vesihöyryn vastuksesta huolimatta lämmitetty laatta kuivuu myös alaspäin lämpötilagradientin eristekerroksen yli muodostuessa huomattavaksi. Ensimmäisellä lämmityskaudella lämpötilagradientti oli laatan keskellä noin 13 -astetta ja laatan laidalla 17 –astetta, laatan lämpötilan ollessa noin  $T = +25^\circ\text{C}$ . Lämpötilagradientin erosta johtuen laatan laitaosa kuivuu myös nopeammin, mitatuilla lämpötiloilla kosteusvirta eristekerroksen läpi laatan keskellä on keskimäärin noin 20 % pienempi kuin laitaosalla.



Kuva 5.46 Kolmen kohteen A/A, A/B ja B kosteusvirrat ( $\Delta v/Z_v$ ) alapohjalaatan eristekerroksen läpi laatan keskiosissa määritettynä kenttämittausten tuloksista. Täyttökerroksen suhteelliseksi kosteudeksi on oletettu  $R_h = 100\%$ .

Kohteen A leikkauksessa B kohde (B/B) eristekerroksena toimi  $h_e = 120$  mm paksu polyuretaanikerros, jonka vesihöyrynvastus on  $Z_v = 632000$  m/s ( $\delta_v = 0,19 \times 10^{-6} m^2/s$ ). Vaikka muodostuva lämpötilagradientti eristekerrosten yli on molemmissa tutkituissa poikkileikkauksissa samaa luokkaa, leikkauksen B eristekerroksen vesihöyrynvastus on huomattavasti suurempi kuin leikkauksessa A ( $Z_B/Z_A = 3,5$ ), eikä laatta pääse juurikaan kuivumaan alaspäin. Tästä syystä mittauspisteiden 10 antureiden lukemien välillä laatan alimmassa kolmanneksessä ja laatan alapinnassa ei ole juurikaan eroja (kuva 5.33), eikä laatan laitaosa ole mittausjakson aikana kuivunut keskiosia nopeammin.

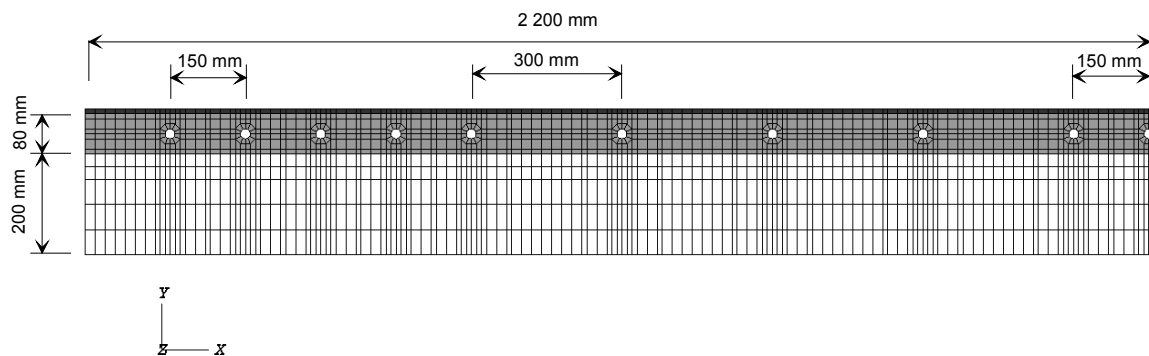
Kohteessa B laatan EPS -eristekerroksen paksuus on  $h_e = 150$  mm, jolloin kerroksen nimellinen vesihöyrynvastus on  $Z_v = 133000$  m/s. Lyhyttä intensiivistä kuivatusjaksoa lukuunottamatta helmi – maaliskuussa 2004 laatan lämpötila ensimmäisen lämmityskauden aikana oli keskimäärin alle  $T = +20^\circ C$  -astetta. Tästä ja pienemmästä eristekerrospaksuudesta johtuen muodostuva lämpötilagradientti eristekerroksen yli oli selvästi alempi kuin esimerkiksi kohteessa A/A vaihdellen loppusyksyn 8 -asteesta loppupalven muutamaan asteeseen. Keskimääräinen kosteusvirta laatasta pohjamaahan onkin laatan keskiosissa kohteessa B noin 2,5 kertaa suurempi kuin kohteessa A/A eristekerroksen alemmasta vesihöyrynvastuksesta huolimatta ( $Z_{A/A}/Z_B = 1,33$ ,  $g_{A/A}/g_B = 2,5$ ). Vaikka keskitalven lyhyt korkean laattalämpötilan jakso kuivattikin tehokkaasti mitattuja laatan alapinnan

kosteuksia (kuvat 5.37, 5.38 ja 5.39), oli kuivatusjakso varsin lyhyt ja kohteen pinnoitus suoritettiin aiemmin kuin kohteissa A/A ja A/B. Tästä syystä kohteen B laatan alapinnan kosteustaso jäi ensimmäisen lämmityskauden jälkeen arvoon  $R_h = 90\%$ , kun se esimerkiksi kohteessa A/A oli noin  $R_h = 75\%$ . Kesäkauden aikana viileä laatta ei kohteessa B kuivu juurikaan lisää. Myös ylöspäin kuivuminen on vähäistä, koska parketin alla on rakennusmuovi.

Nopeat lämpötilan muutokset pudottavat selvästi mitattuja suhteellisen kosteuden arvoja lähellä lämpöputkia olevissa mittausantureissa (anturit 3/2 ja 3/3 kohde A/A, anturi 22/3 kohde B). Ilmiö havaittiin vain antureissa, jotka sijaittivat korkeintaan 50 mm etäisyydellä lämmitysputkistoista. Kauempana lämmitysputkista olevissa antureissa samaa ilmiötä ei enää havaita vaikka betonin lämpötilan muutos näissä pisteissä on käytännössä yhtä nopea. Erityisen hyvin ilmiö näkyy kohteessa A/A pisteessä 3/2, jossa lattialämmityksen kytkeminen tammikuun puolessa välissä nostaa nopeasti laatan lämpötilaa lähes 18 –astetta (kuva 5.31). Samaan aikaan samasta pisteestä mitattu suhteellinen kosteus putoaa jyrkästi jopa 35 %:  $R_h = 85\% \rightarrow 50\%$ . Samankaltainen ilmiö havaittiin muissakin lähelle lämmityselementtejä asennetuissa antureissa.

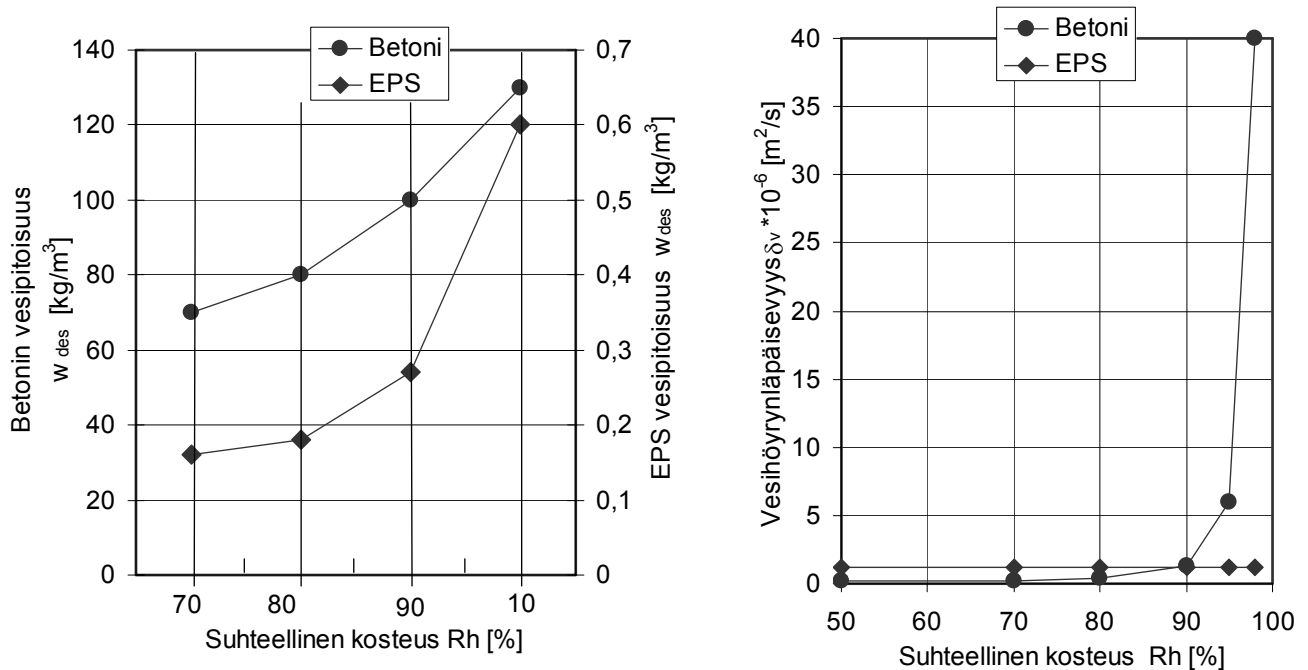
### **Lämmityselementtien vaikutuksesta betonilaatan kuivumiseen**

Lämmityselementin vaikutusta laatan kuivumiseen ja suhteellisten kosteuksien muutoksiin elementin ympärillä tutkittiin numeerisesti elementtimenetelmällä. Kohteen A asunnon A laattapoikkileikkaus mallinnettiin kuvan 5.47 esittämällä 2D –elementtiverkolla käyttäen betonin ja EPS –eristeen kosteusparametreina kuvan 5.48 mukaisia vesihöyrynläpäisevyys- ja tasapainokosteuskäyriä, sekä lämpöparametreina taulukon 5.4 arvoja.



**Kuva 5.47** Elementtimallinnuksessa käytetty referenssikohteen A asunnon A laattapoikkileikkausta kuvaava verkko. Verkko koostui 1730 neliöelementistä ja sen vapausasteiden kokonaismäärä oli  $DOF = 1932$ .





Kuva 5.48 Mallinnuksessa käytetyt betonin ja EPS -eristeen tasapainokosteus- ja vesihöyryn läpäisevyyskäyrät.

Taulukko 5.4 Mallinnuksessa käytetyt betonin ja EPS -eristeen lämpöparametrit

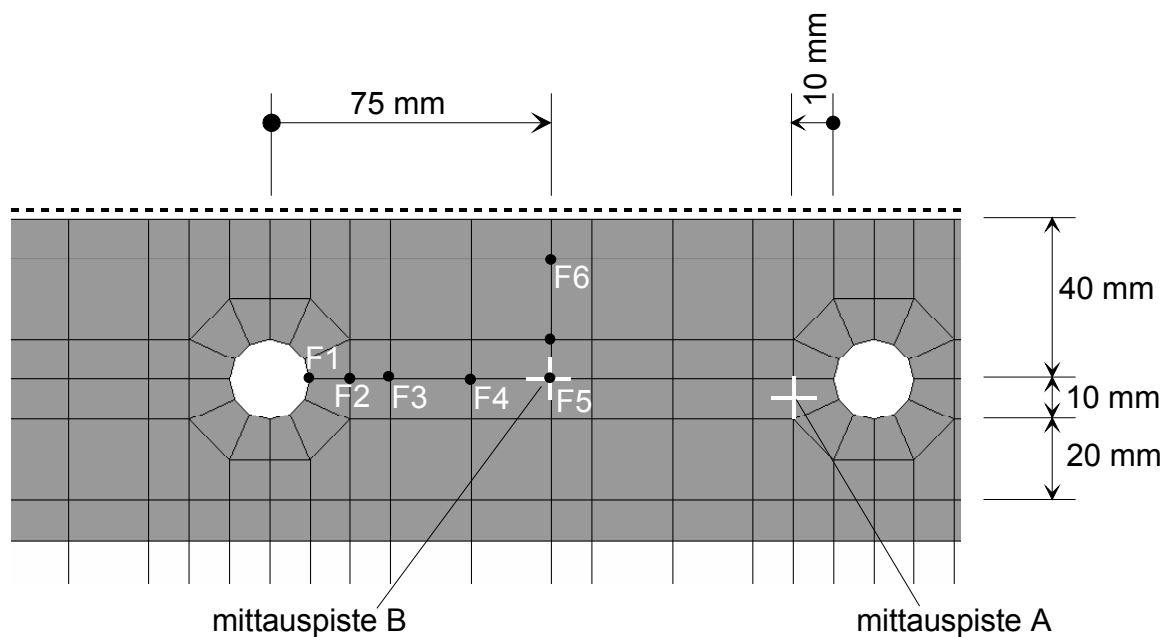
Materiaali	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/m K]	Lämpökapasiteetti $\rho c$ [MJ/m³ K]	Tilavuuspaino $\rho$ [kg/m³]
Betoni	1,7	2,0	2300
EPS	0,037	0,019	16

Laatan ylä- ja alapuolisina lämpö- ja kosteusolosuhteina käytettiin kenttämittauksista mitattuja lukemia. Kuvassa 5.55 on esitetty mallin tutkittujen pisteiden (F1 ... F6) sekä mittausdatan referenssipisteiden sijainnit laattaan asennettujen lämpökanavien suhteen. Mallissa putkien lämpöteho käytettiin kenttämittauksissa mitattuja laatan lämpötiloja.

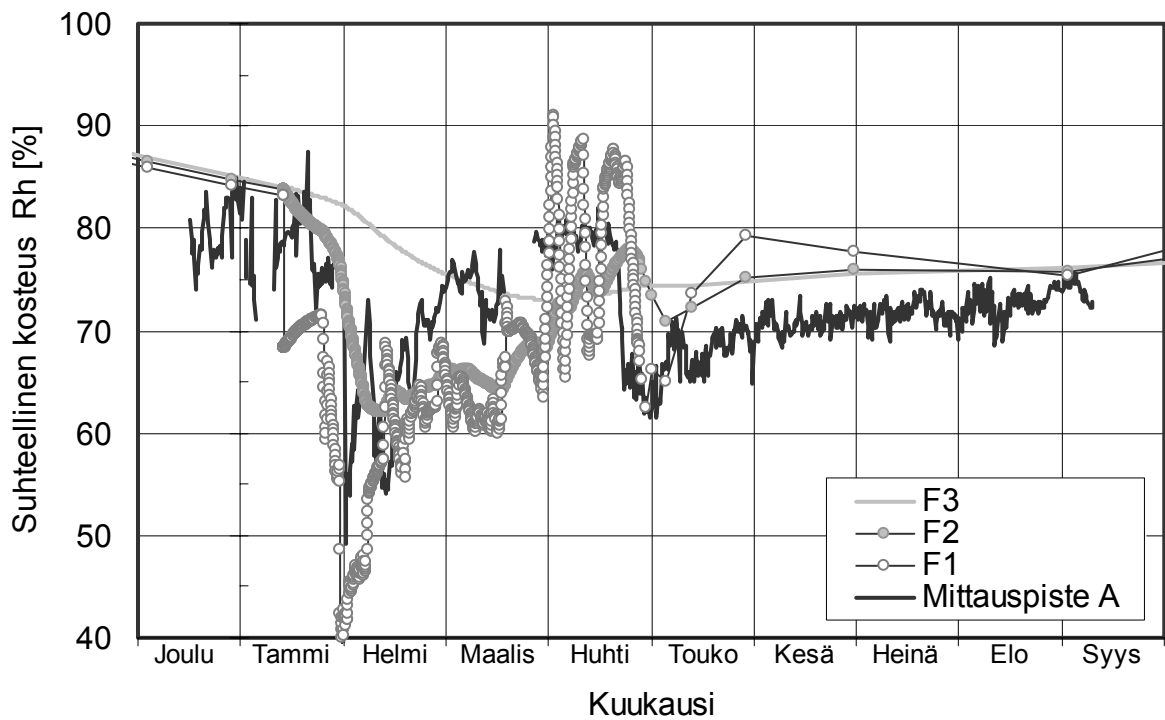
Kuvassa 5.49 on esitetty vertailu kenttämittauksikokeiden (mittauspiste A) sekä simuloinneilla mitattujen (pisteet F1...F3) laatan suhteellisten kosteuksien välillä lattialämmityksen kytkemisen jälkeen. Mallinnus tukee kenttämittausten tuloksia, joissa nopea lämmitystehon nousu lämmityskauden alussa pudotti nopeasti betonin suhteellista kosteutta lämmityselementin välittömässä läheisyydessä (mittauspiste A ja pisteet F1 ... F3, kuva 5.50). Elementin viereisten pisteiden suhteellinen kosteus putosi nopeasti yli 40 % välillä  $R_h = 85\% \rightarrow 40\%$  elementin lämpötilan kohotessa muutamassa tunnissa noin  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$  -astetta. Vaikka laatan lämpötila kohosi lähes yhtä nopeasti myös

elementtien välisellä alueella, suhteellisen kosteuden muutos vaimenee nopeasti etäisyyden lämmityselementtiin kasvaessa. Mallissa piste F3 on 20 mm etäisyydellä lämmitysputken seinämästä, mutta suhteellisen kosteuden kokonaismuutos jää vajaaseen 10 % ja muutosnopeus on huomattavasti hitaampi verrattuna lähempänä putkea sijainneisiin pisteisiin (pisteet F1 ja F2). Lämmityselementtien keskellä 70 mm etäisyydellä putken seinämästä (pisteet F5 ja mittauspiste B, kuva 5.51) ei lämmityksen kytkemisen aiheuttamaa laatan suhteellisen kosteuden muutosta enää havaita. Ajan kuluessa laatan kosteuspitoisuus tasoittuu uudelleen lämmityselementin ympärillä, vaikka lämpöteho ja elementin lämpötila ei sanottavammin putoaisikaan.

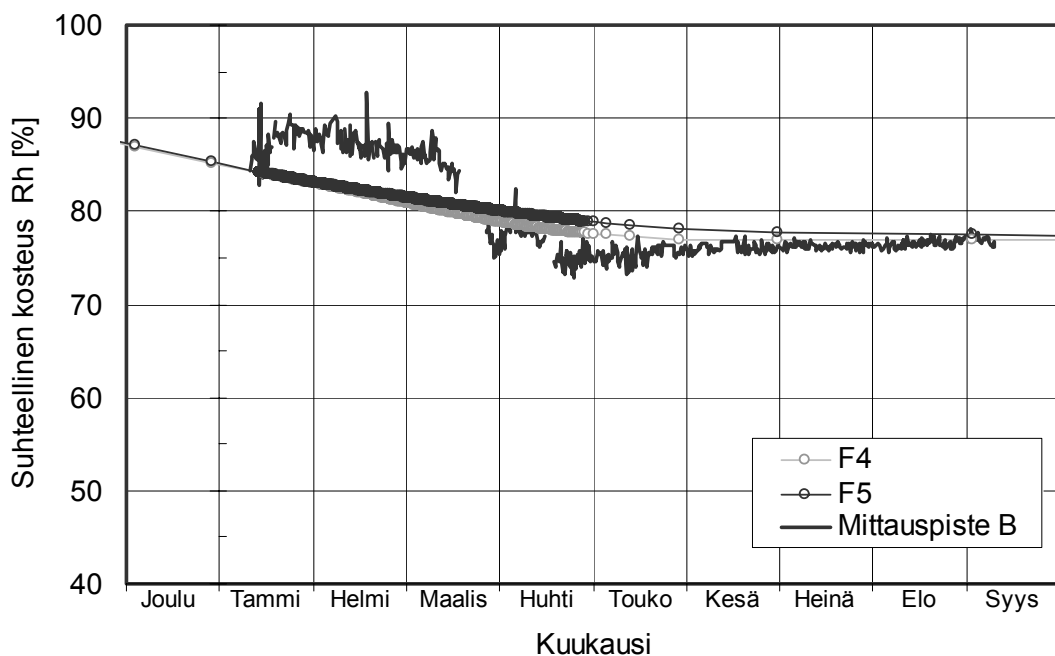
Lämmityselementin ympärille syntyvää kuivempaa vyöhykettä on kuvattu kuvassa 5.53 suhteellisen kosteuden tasapainokosteuskäyrillä, jotka on määritetty mallista tammikuun lopussa ennen lämmityksen aloittamista, helmikuun alussa 1 viikko lämmityksen aloittamisen jälkeen ja maaliskuun alussa noin 1 kuukausi lämmityksen aloittamisen jälkeen. Mittaushetkien sijoittuminen laatan lämmityshistoriaan on esitetty kuvassa 5.52.



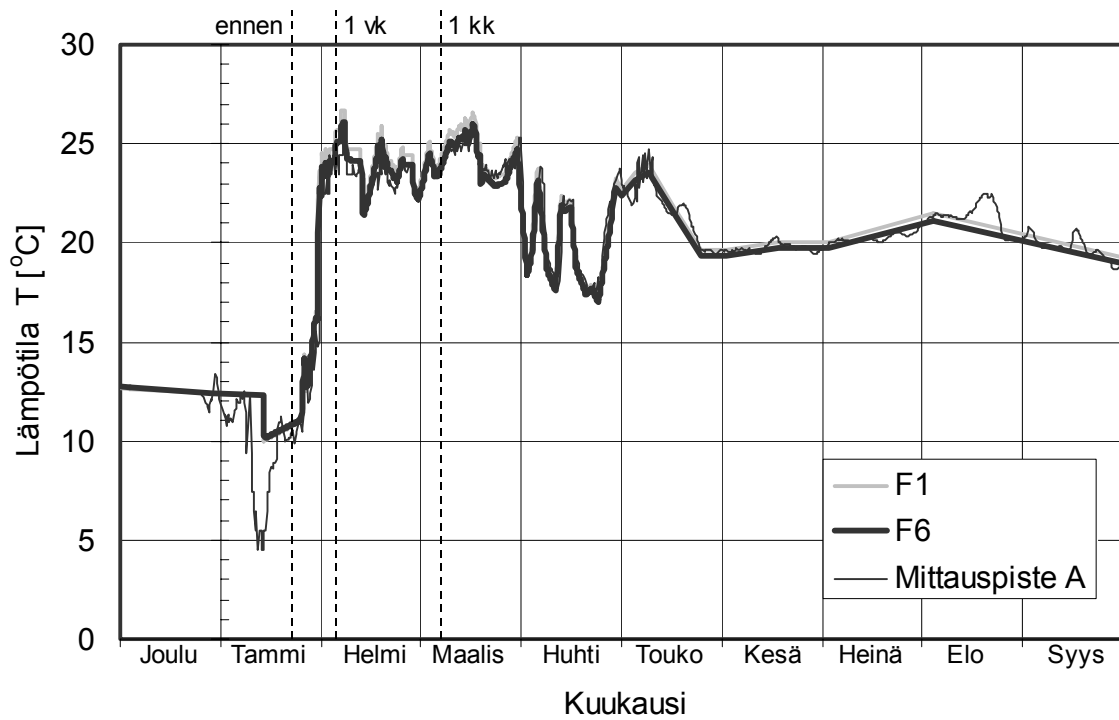
*Kuva 5.49 Mallin tutkittujen pisteiden (F1...F6) ja vertailudatan mittauspisteiden (mittauspisteet A ja B) sijainnit lämmitysputkiston suhteen.*



Kuva 5.50 Betonin suhteellisen kosteuden muutokset lähellä lämmityselementtiä. Mallinnuksen pisteet F1, F2 ja F3 sekä kenttämittauspisteen A tulokset (kuva 5.49).



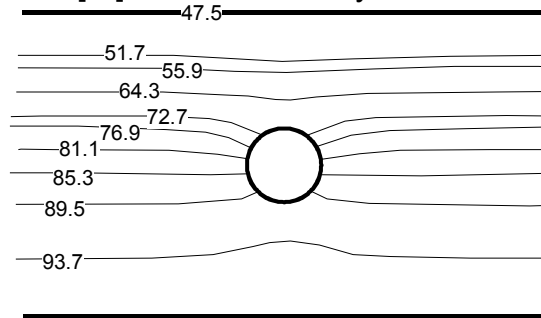
Kuva 5.51 Betonin suhteellisen kosteuden muutokset lämmityselementtien keskellä. Mallinnuksen pisteiden F5 ja F6, sekä kenttämittauspisteen B tulokset (kuva 5.49).



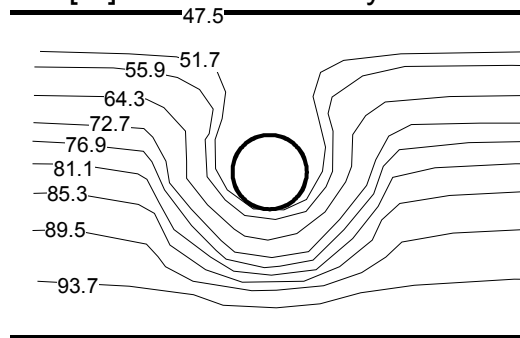
Kuva 5.52 Laatan lämpötilamuutokset mallin kahdessa pisteessä (F1 ja F6) sekä kenttämittauksista mitatut laatan lämpötilan muutokset (mittauspiste A).

## Laatan suhteellisen kosteuden jakaumat lämmitysputken ympärillä

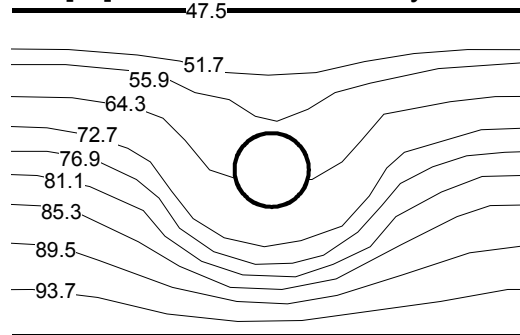
Rh [%] - ennen lämmityksen aloittamista



Rh [%] - 1 viikko lämmityksen aloittamisen jälkeen



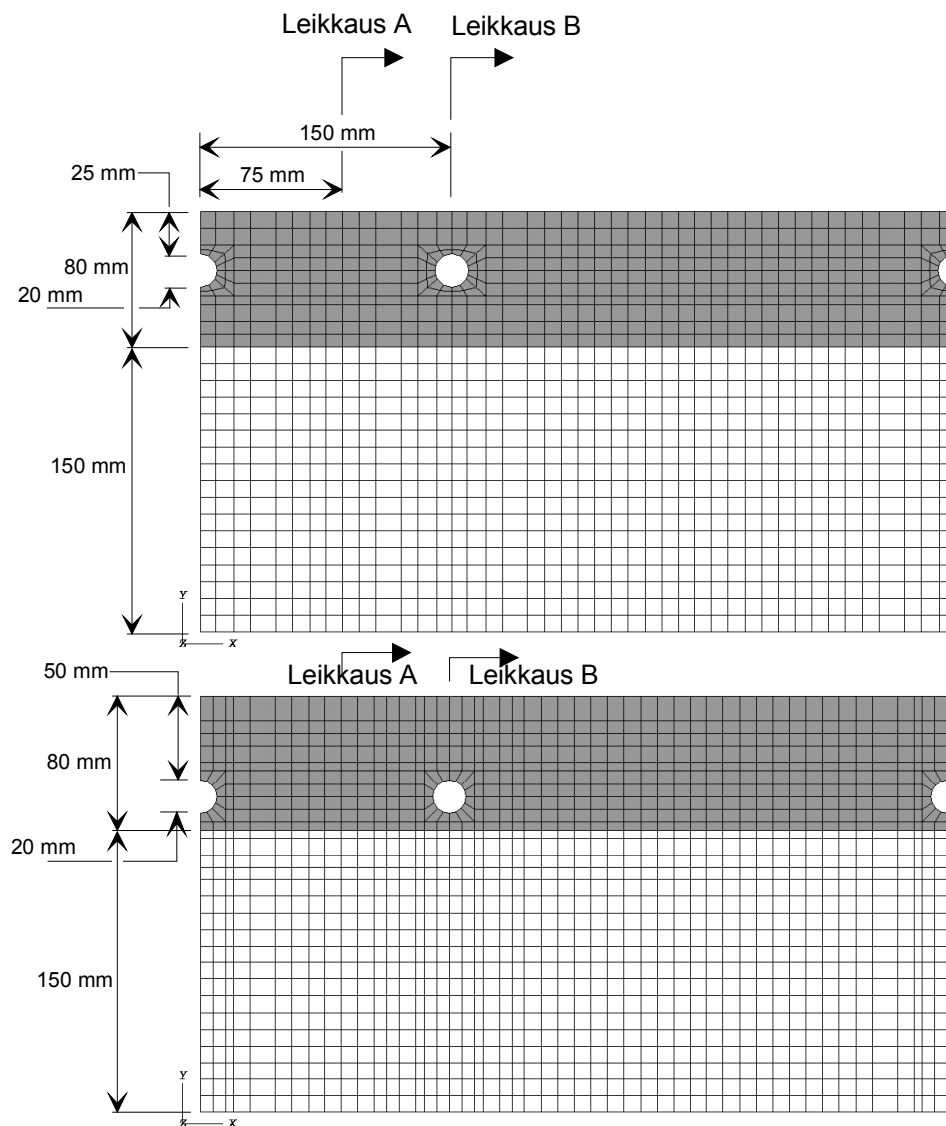
Rh [%] - 1 kuukausi lämmityksen aloittamisen jälkeen



**Kuva 5.53** Suhteellisen kosteuden jakautumat laatussa lämmityselementin ympärillä ennen lattialämmityksen kytkemistä, 1 viikko lämmityksen kytkemisen jälkeen ja 1 kuukausi lämmityksen kytkemisen jälkeen.

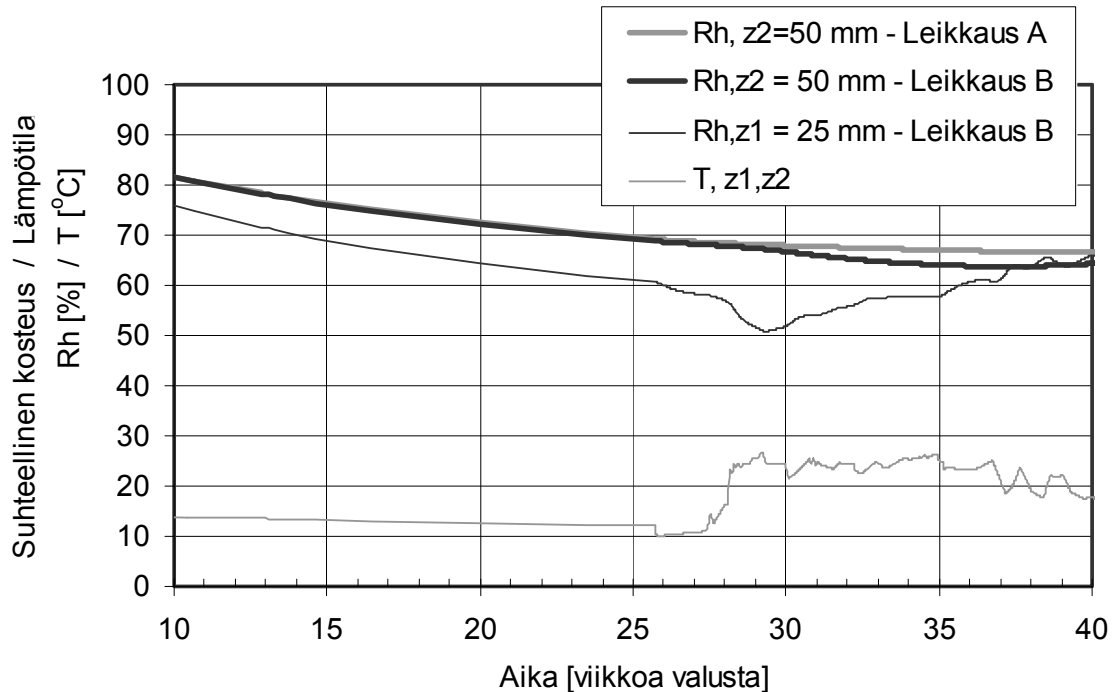
### **Lämmönjakoputkiston asennussyvyyden vaikutuksesta laatan kuivumiseen**

Lämmönjakoputkiston asennussyvyyden vaikutusta laatan kuivumiseen tarkasteltiin numeerisesti kaksiulotteisessa laattaleikkauksessa, jossa  $h = 80$  mm betonilaattaan on asennettu  $\varnothing = 20$  mm lämmitysputkisto kahteen eri syvyyteen siten, että putkiston yläpinta on  $z_1 = 35$  mm tai  $z_2 = 50$  mm syvyydelle laatan yläpinnasta (kuva 5.54). Betonilaatan alapuolella on  $h = 150$  mm eristyskerros (EPS). Mallien materiaaliparametreina käytettiin kohteen A/A laatan simuloinneissa käytettyjä arvoja (taulukko 5.4, kuva 5.48) ja olosuhteita.



**Kuva 5.54** Lämmönjakoputkiston asennussyvyyden vaikutus laatan kuivumiseen. Tutkittujen poikkileikkausten 2D -mallit. Lämmönjakoputken yläpinnan syvyys laatan pinnasta  $z_1 = 25$  mm ja  $z_2 = 50$  mm.

Simuloinneissa laatan lämmitystehon muutokset sekä sisäilman ja pohjamaan olosuhteet vastasivat toisiaan. Kuvassa 5.55 on esitetty lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutokset lämmityspotken yläpuolella 20 mm syvyydellä laatan yläpinnasta sekä kahden lämmityspotken välissä.



Kuva 5.55 *Betonin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutokset lämmityspotken yläpuolella  $z = 20$  mm syvyydellä laatan yläpinnasta molemmissa tutkituissa leikkauksissa ( $z_1 = 25$  mm ja  $z_2 = 50$  mm).*

Lämmityspotken asennussyvyys vaikuttaa selvästi betonin kuivumiseen ja kosteuspitoisuuteen välittömästi putken yläpuolella. Vaikutus on näkyvä jo ennen lämmityskauden alkua vertailtaessa kahta tutkittua tapausta  $z_1 = 25$  mm ja  $z_2 = 50$  mm (kuva 5.55). Syvyysuunnassa laatan keskivaiheille asennetun lämmityspotken yläpuolella betoni kuivuu selvästi nopeammin tiiviin putken estäessä kosteuden siirtymisen syvemmistä betonikerroksista laatan pintaosiin. Putkien ollessa asennettuina laatan alapintaan laatan pintakerrosten kuivumisessa ei ole juurikaan eroja putkien yläpuolisen ja putkien välisen laatanosan välillä ( $Rh, z_2$  leikkaus A ja B, kuva 5.55). Viikoilla 28 ja 29 lämmityskauden alkaminen korostaa laatan epätasaista kuivumista matalaan asennettujen lämmityspotkien osalta. Lämmityspotken ympäristössä tapahtuva voimakas suhteellisen kosteuden aleneminen vaikuttaa hyvin lähelle laatan pintaosia kapealla alueella lämmityselementin yläpuolella. Syvään asennettujen putkien yhteydessä ilmiö ei ulotu kovin voimakkaana laatan pintaosiin, jossa laatan kuivuminen jatkuu melko tasaisena koko laatan alueella.

## 6 PAIKALLA VALETUN ALAPOHJALAATAN KUIVUMINEN - LABORATORIOKOKKEET

Paikallavaletun alapohjalaatan rakennuskosteuden kuivumista ja pinnoituskriteerejä tutkittiin laboratorio-olosuhteissa suoritettujen koejärjestelyjen avulla. Näissä kokeissa alapuolelta lämpöeristetty betonilaatta rakennettiin jäähdytetyn ja eristetyin maamassan päälle ja laatan kuivumista seurattiin jatkuvilla mittauksilla useiden kuukausien ajan. Kokeissa rakennettiin kaksi identtistä yksikköä, joista toiseen oli asennettu laattaan sähkövastukset lattialämmityksen vaikutuksen simuloimiseksi.

Laatat pinnoitettiin ennalta määrätyn pinnoituskriteerin saavuttamisen jälkeen ja laatan kosteustasapainon muuttumista seurattiin edelleen jatkuvilla mittauksilla. Pinnoittaessa laatta jaettiin kahteen osaan, joista toisessa käytettiin melko vesihöyryntiivistä muovimattoa ja toisessa parkettia.

### 6.1 Koejärjestelyt

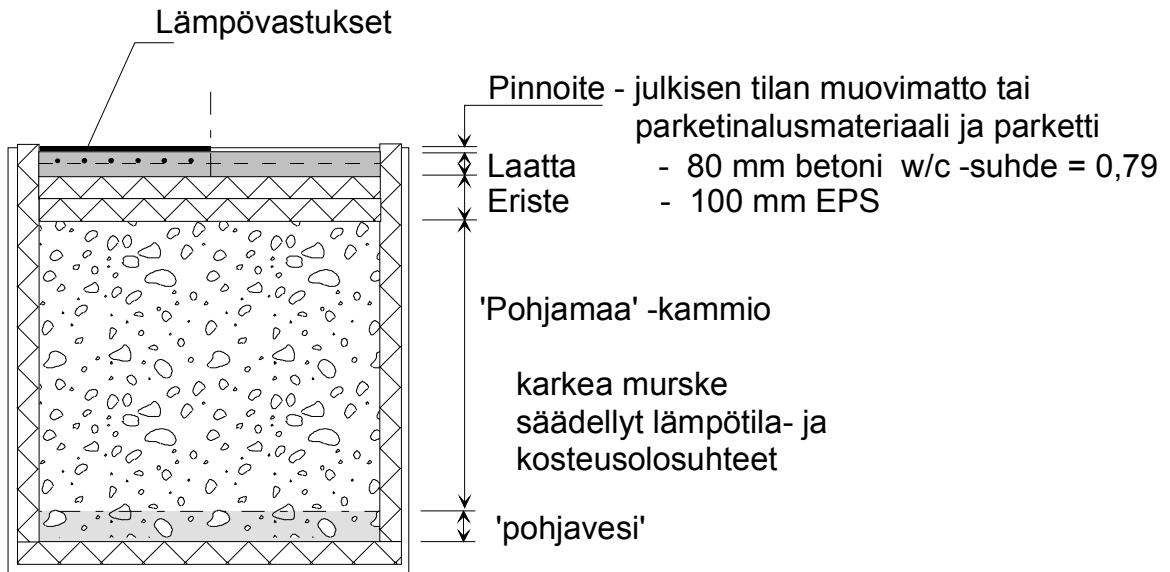
Koejärjestely on esitetty kuvassa 6.1. Yhdellä pinnoitemateriaalilla pinnoitetun laatanosan ala oli noin  $A = 0,5 \text{ m}^2$ . Eriste ja yläpuolinen laatta rakennettiin laidoiltaan polyuretaanieristeen 'arkun' sisään ja rakennekerrosten reunojen ja laitaeristeen välit tiivistettiin huolellisesti polyuretaanilla ja silikonilla. Arkun alaosan seiniin on asennettu jäähdytysputket, joilla arkun täyttönä käytetyn karkean murskeen lämpötilaa voitiin säädellä. Arkun pohjalle laskettiin muutaman senttimetrin korkuinen vesipatja, jonka lisäksi tilaan syötettiin aika ajoin lisää vettä riittävän korkean 'pohjamaan' ilmankosteuden ylläpitämiseksi. Pohjamaan lämpötilaksi valittiin keskimäärin  $T = +10^\circ\text{C}$  -astetta.

Laatan alapuolisena eristeenä käytettiin  $h_e = 100 \text{ mm}$  EPS -eristettä, joka rakennettiin kahdesta yhtenäisestä  $h = 50 \text{ mm}$  levyistä. Laatan korkeus on keskimäärin  $h_l = 80 \text{ mm}$ , ja sen keskellä on  $\varnothing 8 \text{ k/k-150 mm}$  verkkoraudoite, johon lämmitetyn laatanosan lämmityskaapelit on kiinnitetty (kuva 6.2).

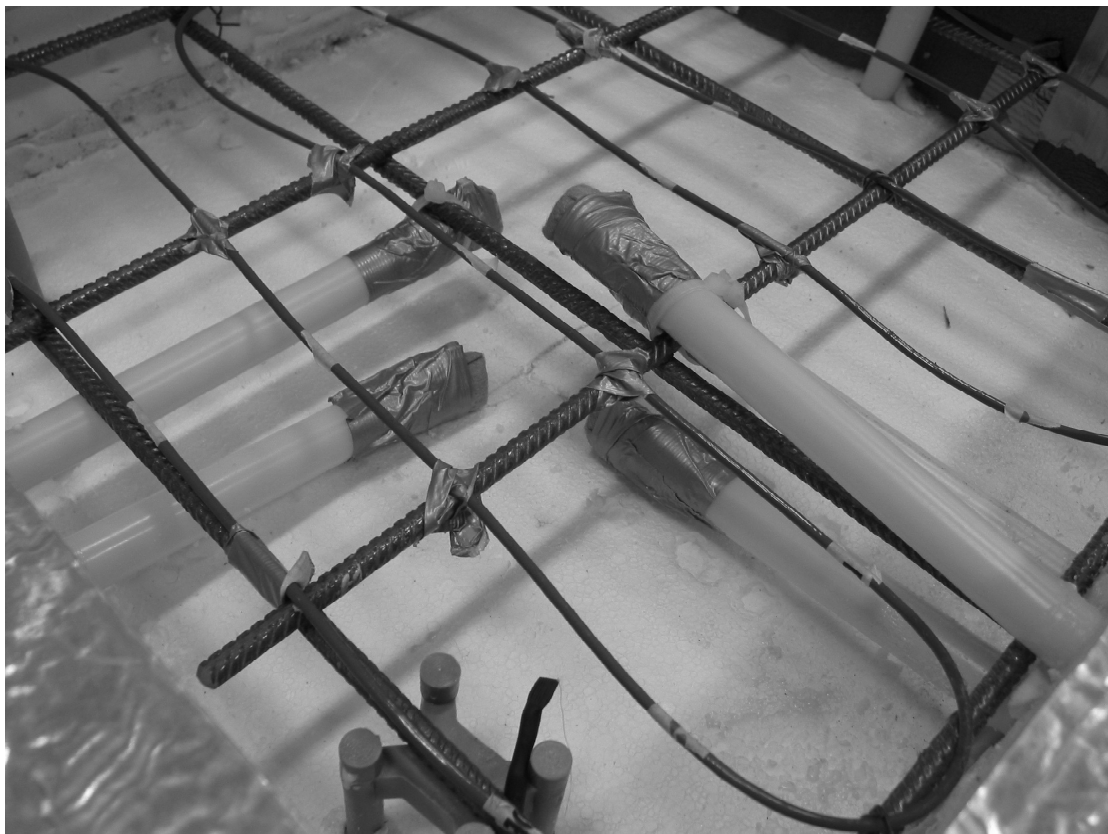
Kaikkiin neljään laatanosaan asennettiin suojaputket lämpö- ja kosteusantureita varten. Antureina käytettiin samanlaisia puolijohde-antureita kuin kenttämittauskohteissakin. Mittauspisteet sijoitettiin mahdollisimman keskelle tutkittavaa laatanosaa kuitenkin siten, että ne häiritisivät mahdollisimman vähän laatan käyttäytymistä tutkittavissa pisteissä (kuva 6.2). Korkeussuunnassa mittauspisteet sijoitettiin laatan alapintaan, laatan keskelle ja laatan yläpintaan.

Laatta valettiin tavanomaisen K30-lattiabetonin reseptillä valmistetusta massasta, jonka vesi-sementti -suhde on noin  $w/c = 0,79$ . Laatta tiivistettiin käsin junttaamalla ja pinta hierrettiin sileäksi.





Kuva 6.1 Laatan kuivumiskokeissa käytetty laboratoriolaitteisto.



Kuva 6.2 Lämmitetyn laatanosan lämmityskaapelien asennus laatan raudoitukseen sekä mittausputkien sijoitus laatan keskellä. Mittausputkiin asennettiin laatan valun jälkeen lämpötilaa ja ilmankosteutta mittaavat puolijohde-anturit.

Laatan olosuhteiden lisäksi seurattiin eristekerroksen alapinnan eli 'pohjamaan' lämpö- ja kosteustilaa sekä laatan yläpuolisen laboratorioilman olosuhteita erikseen jokaisen laatanosan yhteydessä.

Mittausdata kerättiin yksittäisistä antureista 0,5 – 6 tunnin välein riippuen laatan kuivumisvaiheesta ja mittauksen kuluessa havaituista kosteusmuutoksista. Automaattinen tiedonkeruulaitteisto sisälsi erillisen data-loggerin ja kannettavan tietokoneen.

Laatan pinnoitemateriaaleina käytettiin liimattua julkisen tilan 2 mm paksua muovimattoa sekä 2,9 mm parketinalusmateriaalia (muovikalvojen välissä polystyreenirakeita) ja 14 mm parkettia.

Laatan betonin sekä pinnoitemateriaalien, vesihöyrynläpäisevyydet määritettiin laboratoriokokein valun ja pinnoittamisen yhteydessä otetuista näytteistä. Lisäksi määritettiin käytetyn parkettirakenteen (alusta + parketti) lämmönvastus. Laboratoriokokeiden tulokset on esitetty taulukossa 6.1.

*Taulukko 6.1 Laatan kuivumista kartoittavissa laboratoriokokeissa käytettyjen materiaalien vesihöyrynläpäisevyydet.*

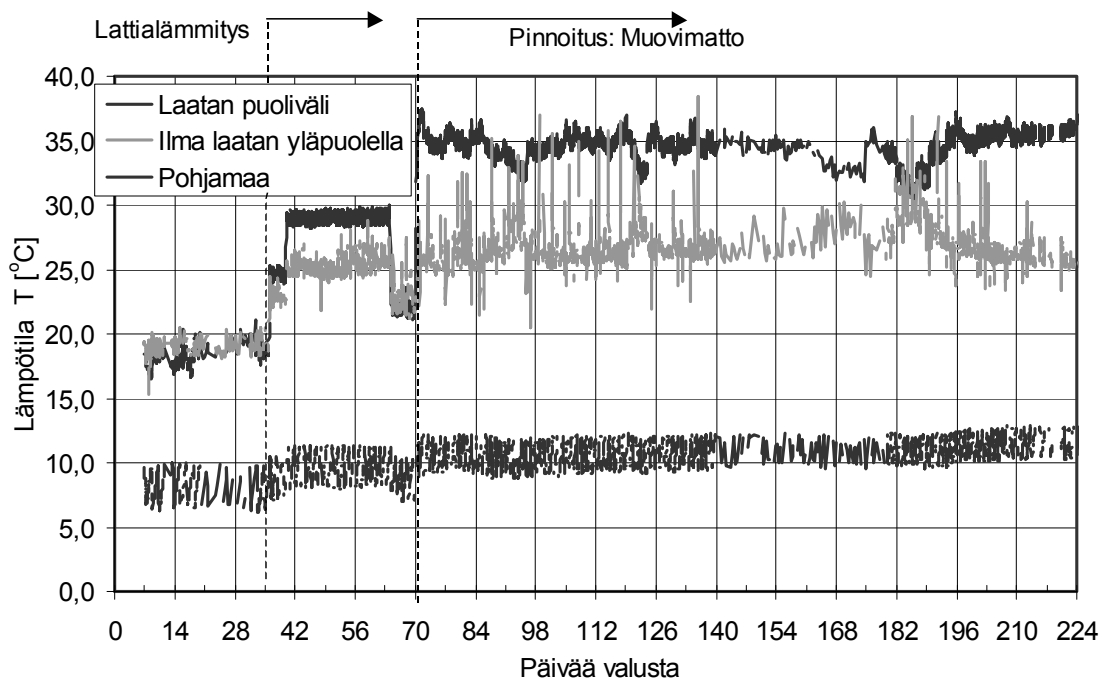
Materiaali tai materiaali-yhdistelmä	Vesihöyrynvastus $Z_v \cdot 10^3$ [s/m]	Vesihöyrynläpäisevyys $\delta_v \cdot 10^{-6}$ [m <sup>2</sup> /s]	Lämmönvastus $R (=d/\lambda)$ [m <sup>2</sup> K/W]
Betoni	-	2,76 4,19 4,45 (RH75%, 86%, 97%)	-
Muovimatto + liima	542, 416, 401 (RH75%, 86%, 97%)	-	-
Parketti + alusta	163, 197, 155 (RH75%, 86%, 97%)	-	0,169

## 6.2 Mittaustulokset

Mittaustuloksissa on esitetty kaikista neljästä laatanosasta mitatut lämpötilat ja kosteuspitoisuudet.

### 6.2.1 Lämmitetty laatta ja muovimatto

Kuvassa 6.3 on esitetty muovimatolla pinnoitetun lämmitetyn laatanosan lämpötilaseurannan tulokset. Lattialämmitys kytkettiin päälle 36 vuorokautta laatan valun jälkeen, jolloin termostaatti säädettiin noin  $+25^{\circ}\text{C}$  asteeseen ja edelleen 5 päivän kuluttua laatan lämpötilaa nostettiin edelleen noin  $+30^{\circ}\text{C}$  asteeseen. Lattialämmityksen kytkeminen nosti hieman myös pohjamaan lämpötilaa, joka kohosi noin  $+12^{\circ}\text{C}$  –asteeseen. Pohjamaan suuren kivimassan jäädyttäminen termostaattiohjauksella johti pohjamaan lämpötilan jatkuvaan vaihteluun viilennyssykyjen välillä, mutta tämä vaihtelu saatiin vaimennettua muutamaan asteeseen ja myöhemmin teoreettisissa kosteustarkasteluissa pohjamaan lämpötilana käytettiin pitkän aikavälin keskiarvoja.

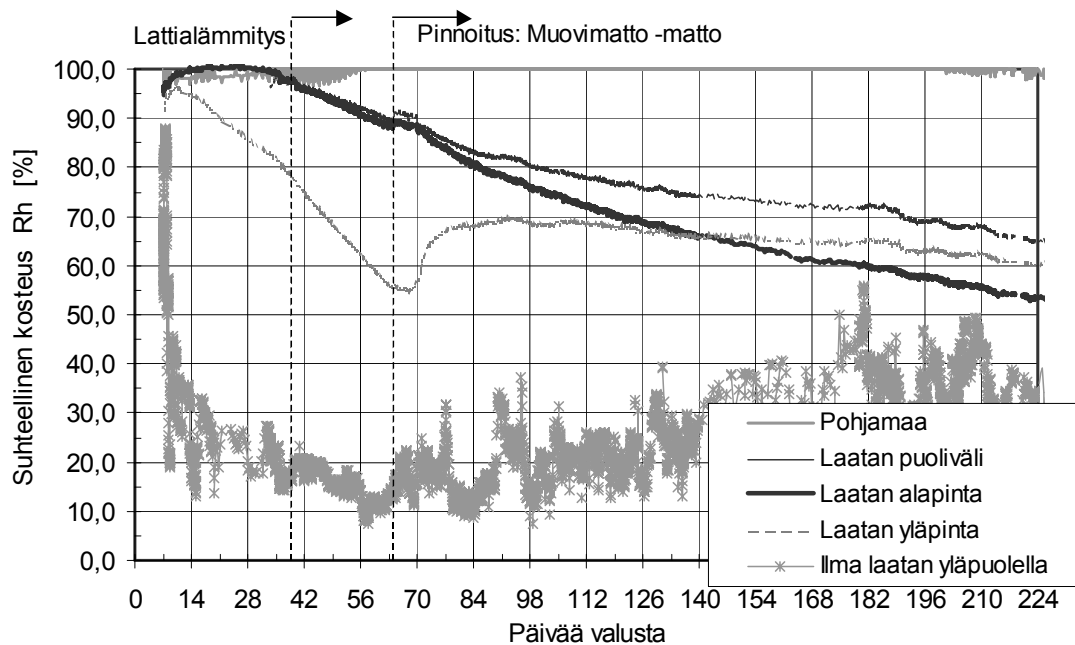


*Kuva 6.3 Muovimatolla pinnoitetun lämmitetyn laatanosan lämpötilaseurannan tulokset.*

Mitattuun sisäilman lämpötilaan laatan pinnan yläpuolella samoin kun koko lämpötilakenttään lämmityselementin yläpuolella vaikuttivat laatan lämpötilan lisäksi laboratoriotilan lämpötilan muutokset, joita kokeessa ei kuitenkaan seurattu kuin jaksoittain. Lämpötilaero laatan yläpinnan ja yläpuolisen ilman välillä kertoo kuitenkin vertailuarvona muihin koalueisiin verrattuna pinnoitteen lämmönvastuksesta ja sen vaikutuksesta lämpövuohon lämmityselementeistä sisäilmaan. Mitattu lämpötilaero ennen lattialämmityksen kytkemistä oli laatan yläpinnan ja yläpuolisen ilmakerroksen välillä noin  $\Delta T = -0,9^{\circ}\text{C}$ . Lattialämmityksen kytkemisen ja pinnoittamisen jälkeen ero oli  $\Delta T = 2^{\circ}\text{C}$ , kun laatan keskiosan lämpötila oli noin  $T = +30^{\circ}\text{C}$ .

Laatan sisäiset lämpötilaerot mittauksissa olivat hyvin pienet, alle  $1^{\circ}\text{C}$  –astetta.

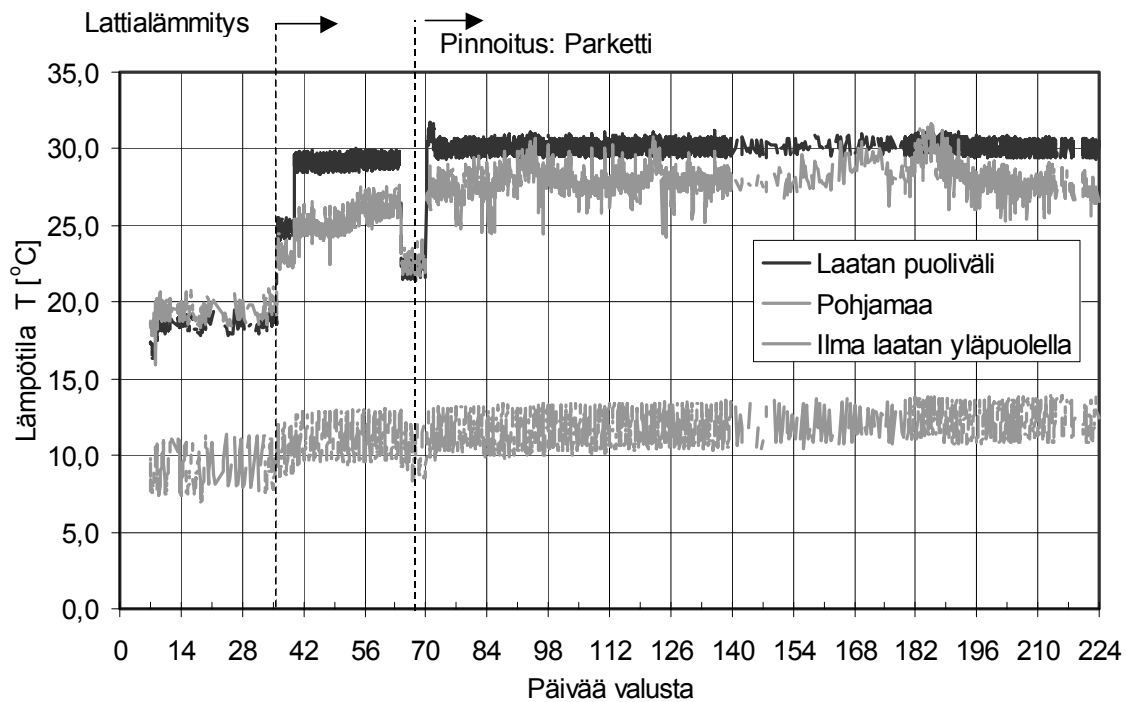
Kuvassa 6.4 on esitetty samaisesta laatanosasta mitatut suhteellisen kosteuden muutokset.



Kuva 6.4 Muovimatolla pinnoitetun lämmitetyn laatanosan kosteus seurannan tulokset.

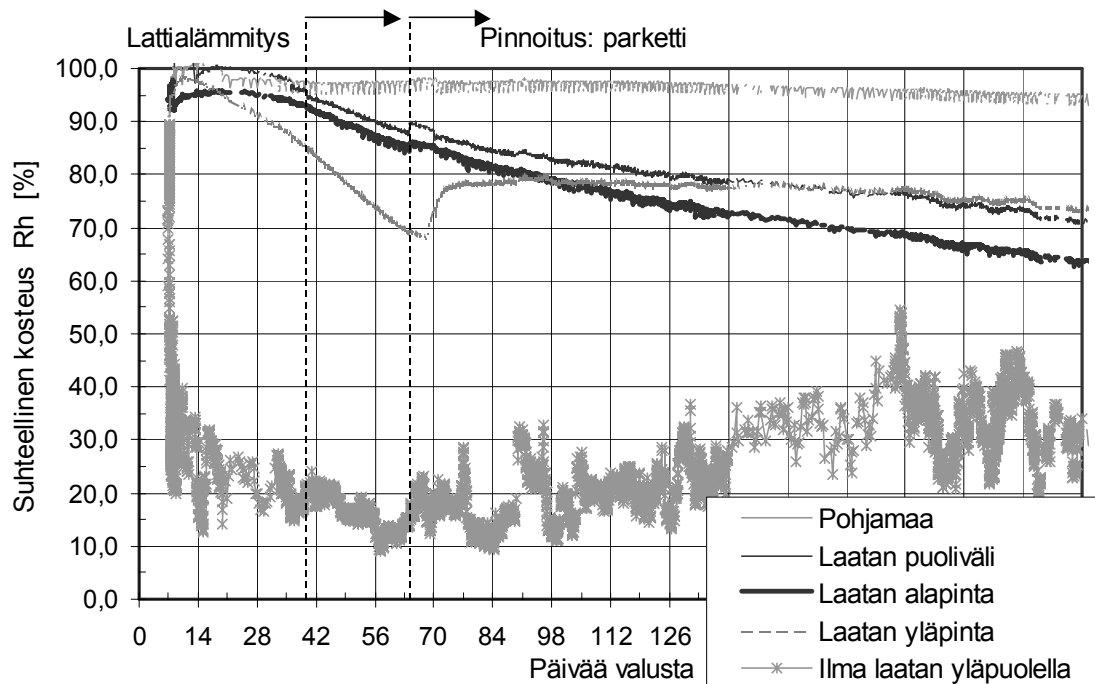
## 6.2.2 Lämmitetty laatta ja parketti

Kuvassa 6.5 on esitetty parketilla pinnoitetun lämmitetyn laatanosan lämpötilaseurannan tulokset. Tämä laatanosa on kytketty samaan lämmityspiiriin kuin muovimatolla pinnoitettu laatanosa, joten ennen pinnoitusta molemmista laatanosista mitatut lämpötilat vastasivat hyvin toisiaan. Sen sijaan pinnoittamisen jälkeen sama lämmitysteho, joka nosti muovimattopinnoitteisen laatan lämpötilan  $+30^{\circ}\text{C}$  -asteeseen, nosti parketilla pinnoitetun laatan lämpötilan  $+35^{\circ}\text{C}$  -asteeseen (kuva 6.5). Pohjamaan keskimääräiseksi lämpötilaksi mitattiin tämän laatanosan kohdalla lattialämmityksen kytkemisen jälkeen  $+11^{\circ}\text{C}$ .



Kuva 6.5 *Parketilla päällystetyn lämmitetyn laatanosan lämpötilaseurannan tulokset.*

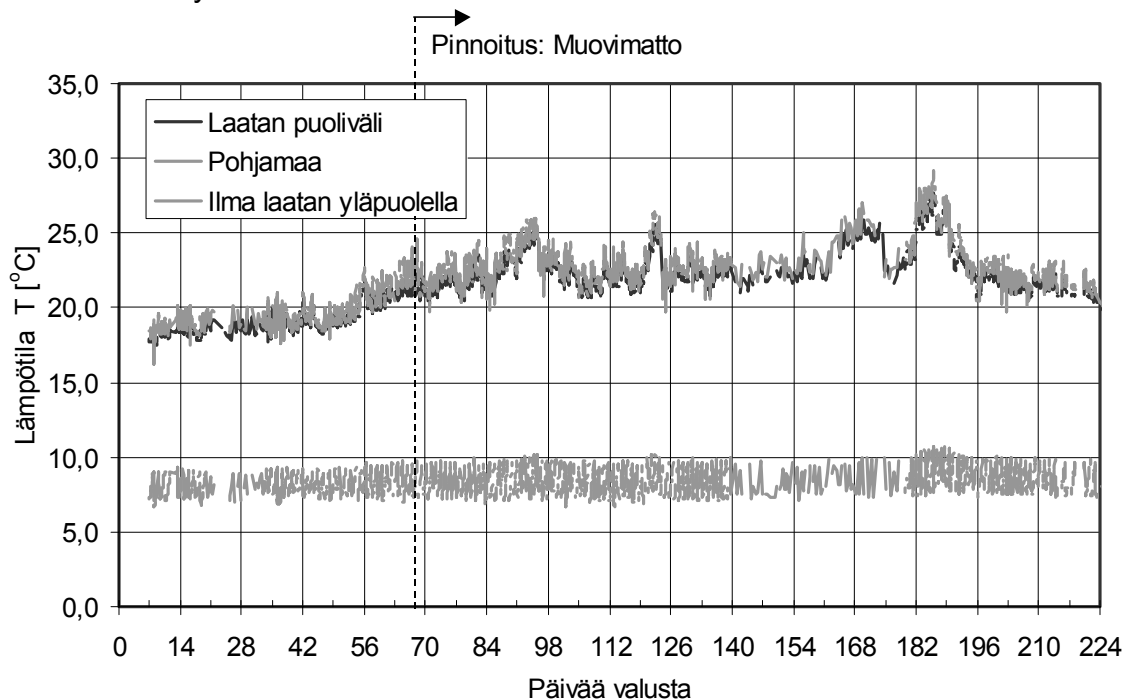
Lämpötilaero laatan yläpinnan ja ilman välillä ennen pinnoittamista oli noin  $\Delta T = -0,3^{\circ}\text{C}$  -asetta. Pinnoittamisen jälkeen, laatan lämpötilan noustua noin  $+35^{\circ}\text{C}$  asteeseen, mitattu lämpötila ero oli jopa  $\Delta T = 8^{\circ}\text{C}$  -astetta. Kuvassa 6.6 on esitetty parketilla pinnoitetun lämmitetyn laatanosan kosteus seurannan tulokset.



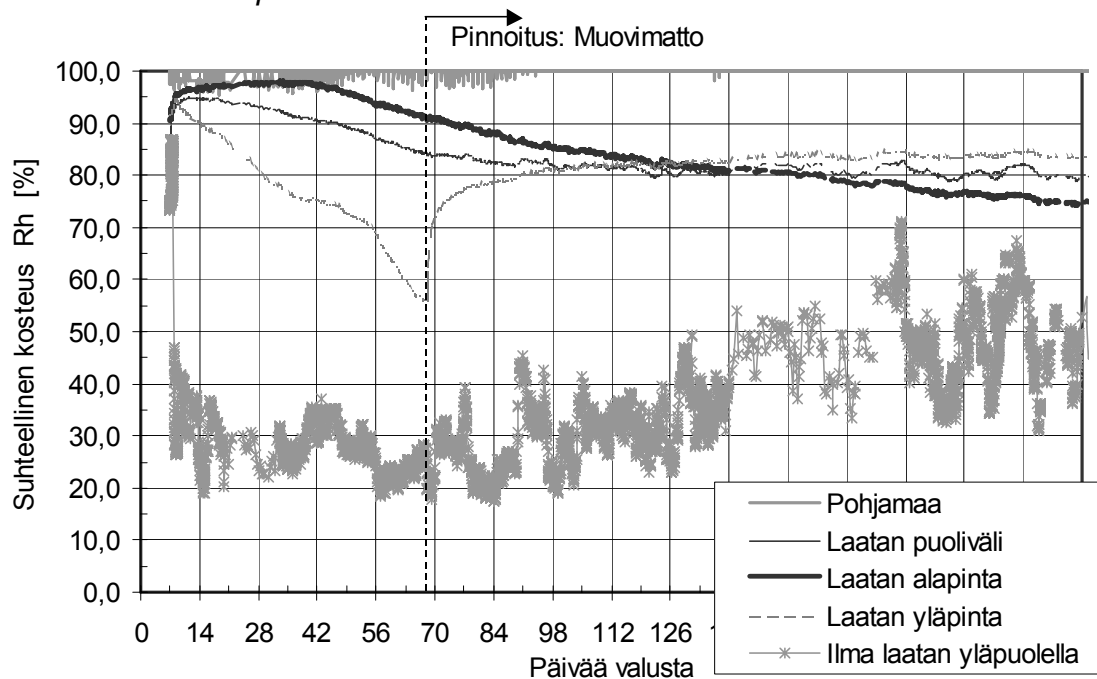
Kuva 6.6 *Parketilla pinnoitetun lämmitetyn laatanosan kosteus seurannan tulokset.*

### 6.2.3 Lämmittämätön laatta ja muovimatto

Kuvassa 6.7 on esitetty muovimatolla päällystetyn lämmittämättömän laatan osan lämpötilaseurannan tulokset. Pohjamaan keskimääräinen lämpötila koko seurantajakson aikana oli  $T = +9^{\circ}\text{C}$ . Ilman ja laatan lämpötilan hidas kohoaminen johtuu laboratoriotilan sisäilman lämpötilan kohoamisesta kevään edistyessä.



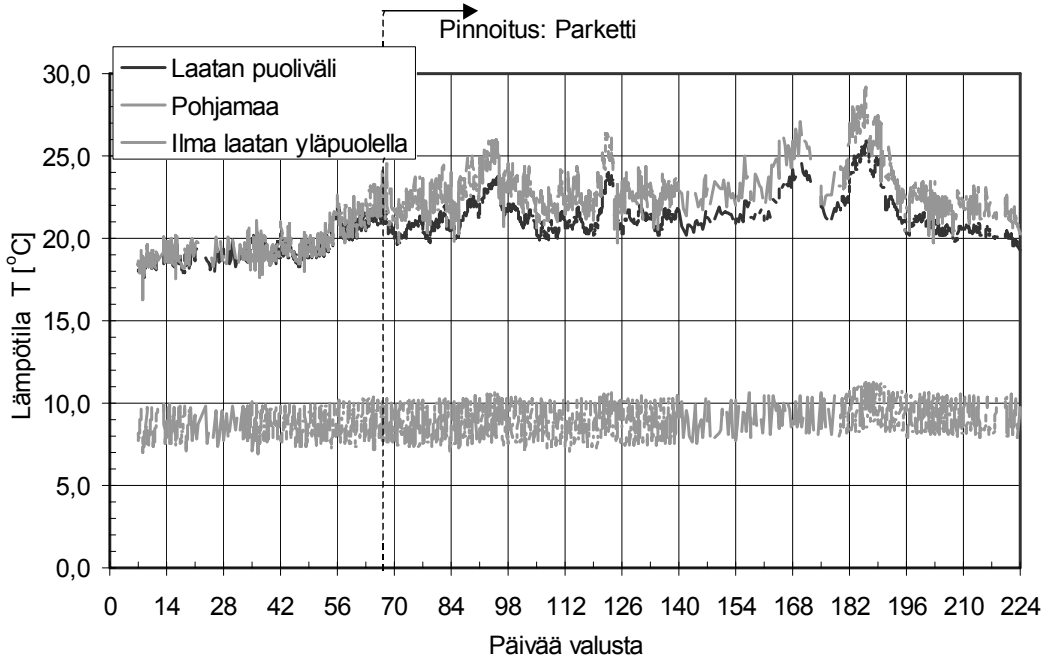
Kuva 6.7 Muovimatolla päällystetyn lämmittämättömän laatan osan lämpötilaseurannan tulokset.



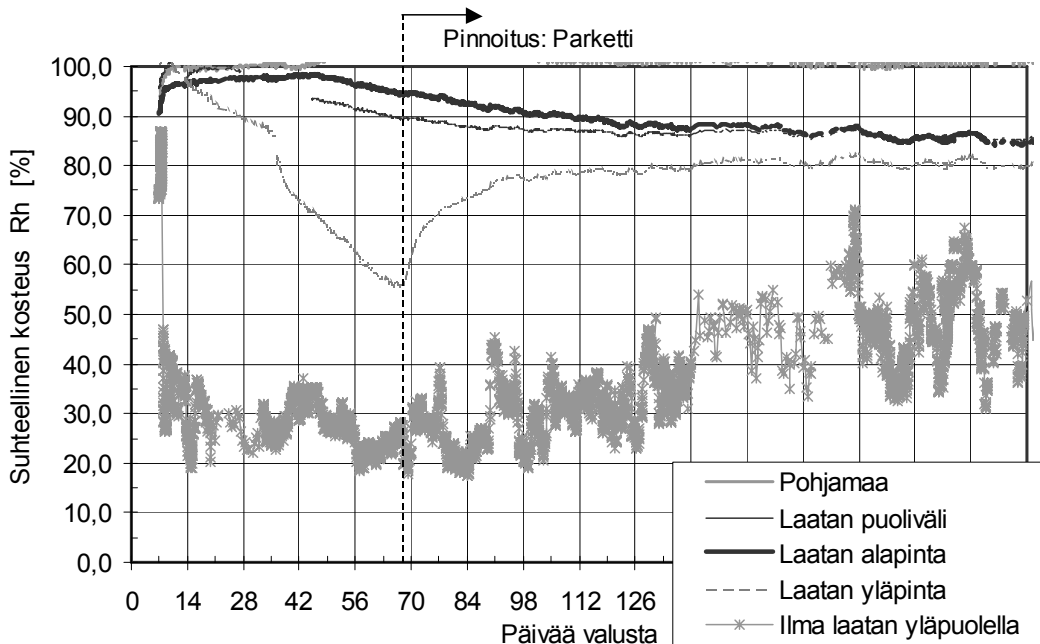
Kuva 6.8 Muovimatolla pinnoitetun laatan osan kosteusseurannan tulokset.

### 6.2.4 Lämmittämätön laatta ja parketti

Kuvassa 5.9 on esitetty parketilla pinnoitetun lattialämmittämättömän laatan osan lämpötilaseurannan tulokset. Pohjamaan lämpötila tällä laatan osalla on keskimäärin  $+9^{\circ}\text{C}$  -astetta. Laatan lämpötilan hidas kohoaminen johtui laboratorion sisäilman lämpötilan noususta keväällä. Tilassa oli useita suuria ikkunoita, joista aurinko pääsi paistamaan sisään.



Kuva 6.9 Parketilla päällystetyn lämmittämättömän laatan osan lämpötilaseurannan tulokset.



Kuva 6.10 Parketilla pinnoitetun lämmittämättömän laatan osan kosteusseurannan tulokset.

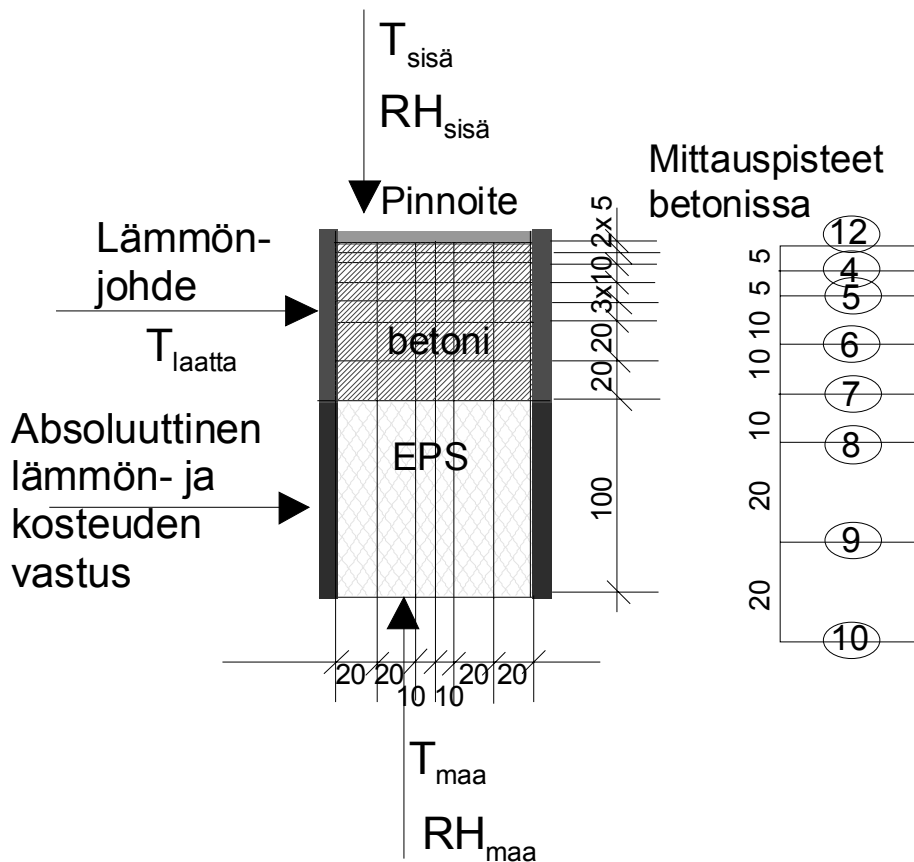
### 6.3 Vertailulaskelmat

Laboratoriokokeista määritettyjä mittaustuloksia on seuraavassa verrattu WUFI- laskentaohjelmalla määritettyihin tuloksiin.

Laboratoriokokeita mallinnettiin WUFI 2D-ohjelmalla kuvan 6.11 mukaisella laskentamallilla. Laskentaa varten määriteltiin käytetyille pinnoitteille (pinnoiteyhdistelmille) ja betonille vesihöyrynläpäisevyysominaisuudet ns. 'kuppikokeilla'. Muina materiaaliarvoina käytettiin ohjelmasta ja eri kirjallisuuslähteistä saatuja arvoja. Käytetyt materiaaliarvot on esitetty luvussa 5.3. Laskennassa lähtöarvoina käytettiin mittaustuloksista saatuja sisäilman ja pohjamaan lämpötila- ja suhteellisen kosteuden arvoja sekä lämmitetyn laatan tapauksessa laatan lämpötila-arvoja.

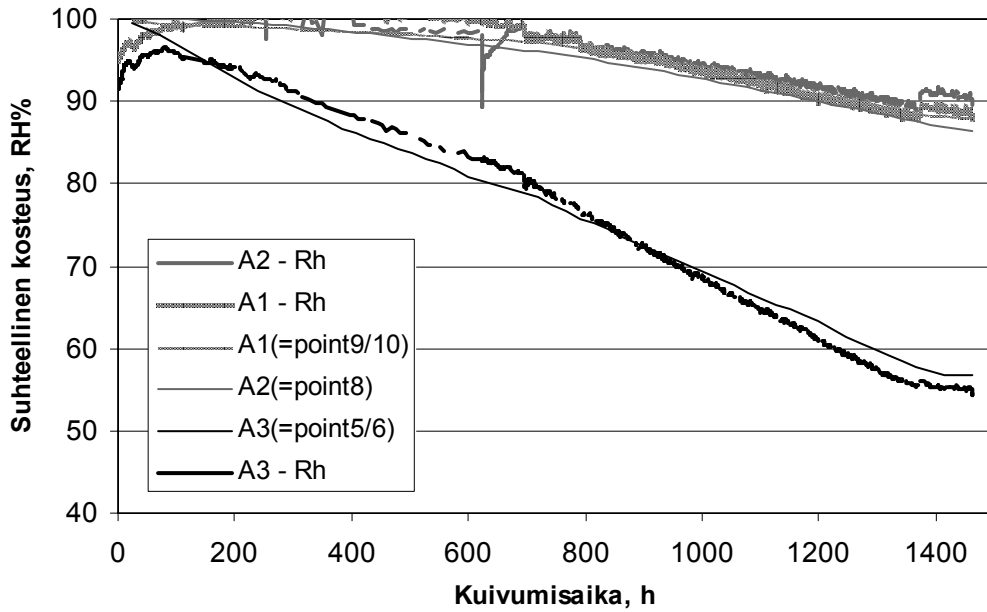
#### 6.3.1 Laatan kuivuminen ennen pinnoitteen asentamista

Tarkastellaan ensin lämmitetyn ja lämmittämättömän laatan kuivumista pinnoittamiskriteeriä vastaavaan kosteuteen. Kuvissa 6.12 ... 6.15 on esitetty laattojen mitatut suhteellisen kosteuden arvot kolmessa mittauspisteessä ja mallinnuksesta saadut arvot vastaavissa pisteissä. Kuvista voidaan todeta, että mallinnuksen tulos vastaa suhteellisen hyvin mittaustuloksia.

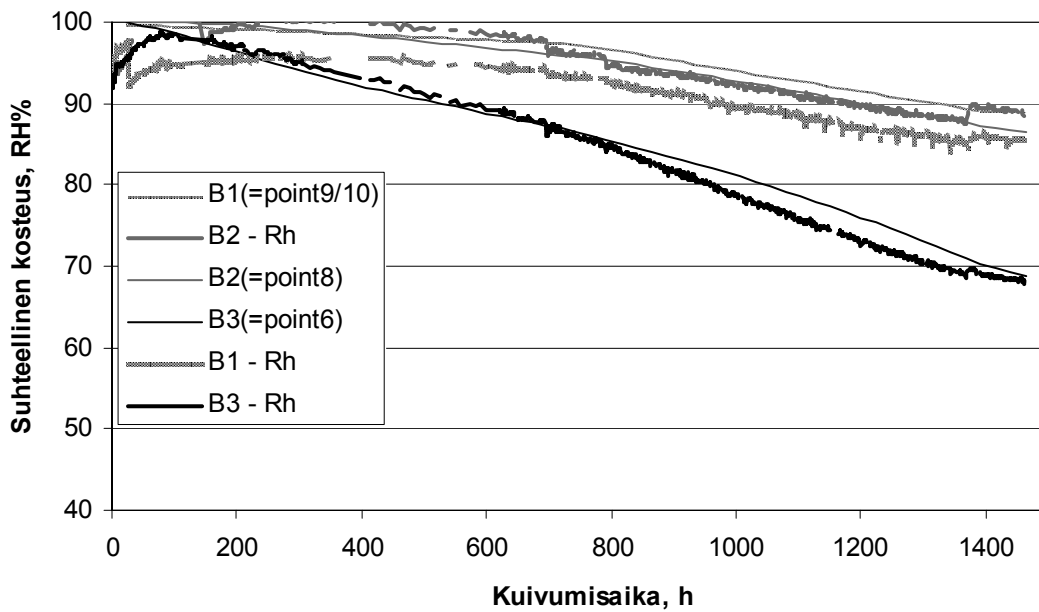


Kuva 6.11 WUFI-laskennassa käytetty malli.

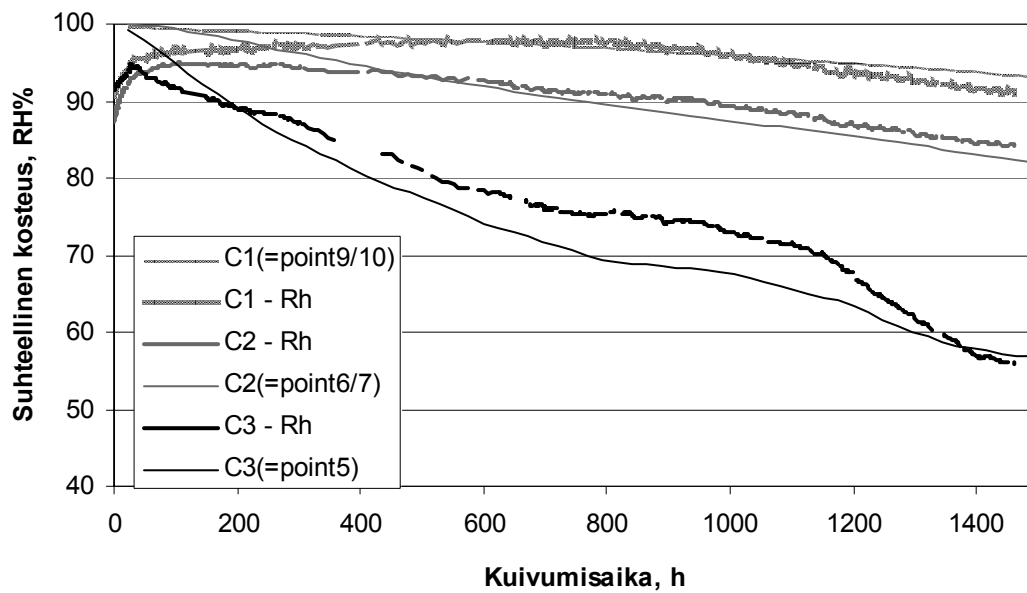




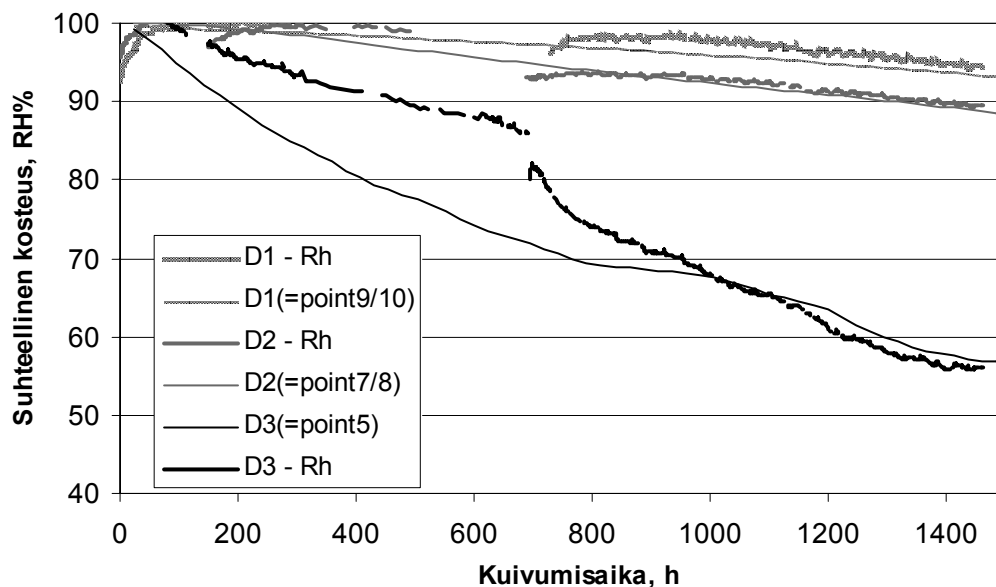
Kuva 6.12 Parketilla pinnoitettavan lämmitetyn laatanosan suhteellinen kosteus ennen pinnoittamista. Ohuet viivat laskennalliset arvot, paksut mitatut.



Kuva 6.13 Muovimatolla pinnoitettavan lämmitetyn laatanosan suhteellinen kosteus ennen pinnoittamista. Ohuet viivat laskennalliset arvot, paksut mitatut.



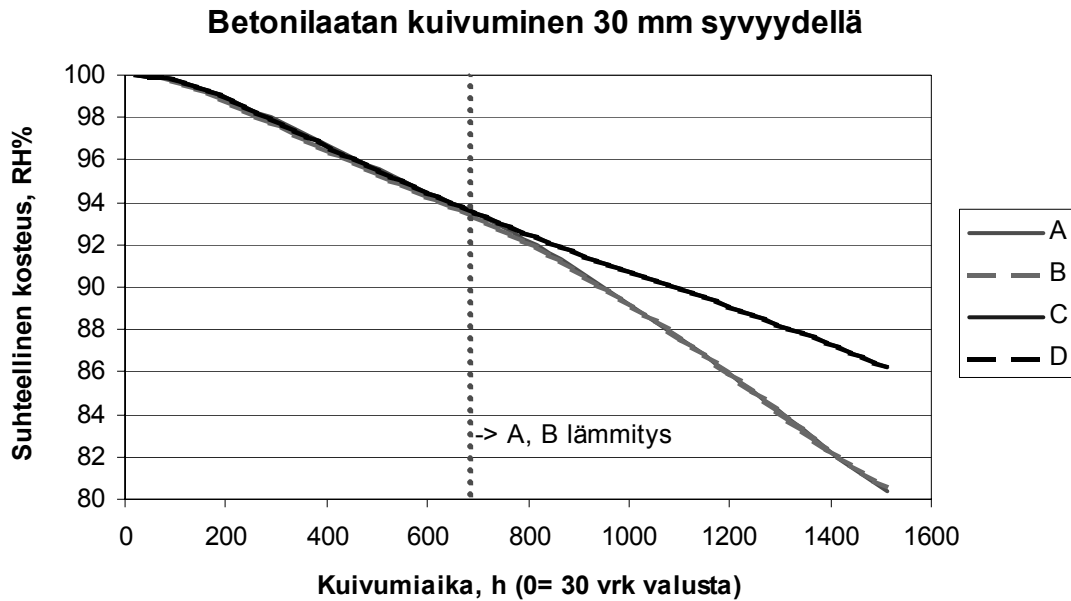
Kuva 6.14 Muovimatolla pinnoitettavan lämmittämättömän laatanosan suhteellinen kosteus ennen pinnoittamista. Ohuet viivat laskennalliset arvot, paksut mitatut.



Kuva 6.15 Parketilla pinnoitettavan lämmittämättömän laatanosan suhteellinen kosteus ennen pinnoittamista. Ohuet viivat laskennalliset arvot, paksut mitatut.

Teoreettisella mallinnusten mukaan betonilaatta kuivuu 30 mm syvyydeltä kuvan 6.16 esittämällä tavalla. Tarkasteltava piste on lähes teoreettinen pinnoittamiskriteerin mittaussyvyys ( $0,4 \cdot d = 32 \text{ mm}$ ). Kuvan mukaan betonilaatan kuivuminen on tasaista kunnes osaan A ja B kytketään lattianlämmitys päälle, jolloin kuivuminen nopeutuu. Laattojen kuivuttua 60 vuorokautta, tarkasteltavalla syvyydellä lämmittämättömässä laatussa on noin RH 85%:n suhteellinen kosteus ja lämmitetyssä noin 5,5 RH-% alhaisempi

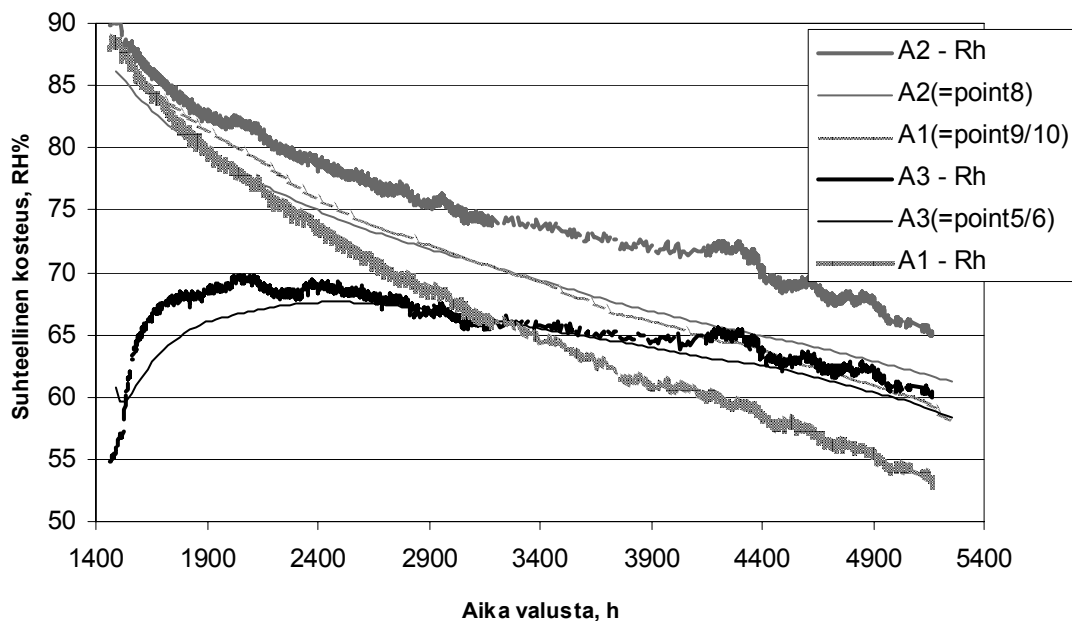
kosteus. Lämmitetty laatanosa on saavuttanut RH 86%:n kosteustason noin 14 vuorokautta aiemmin.



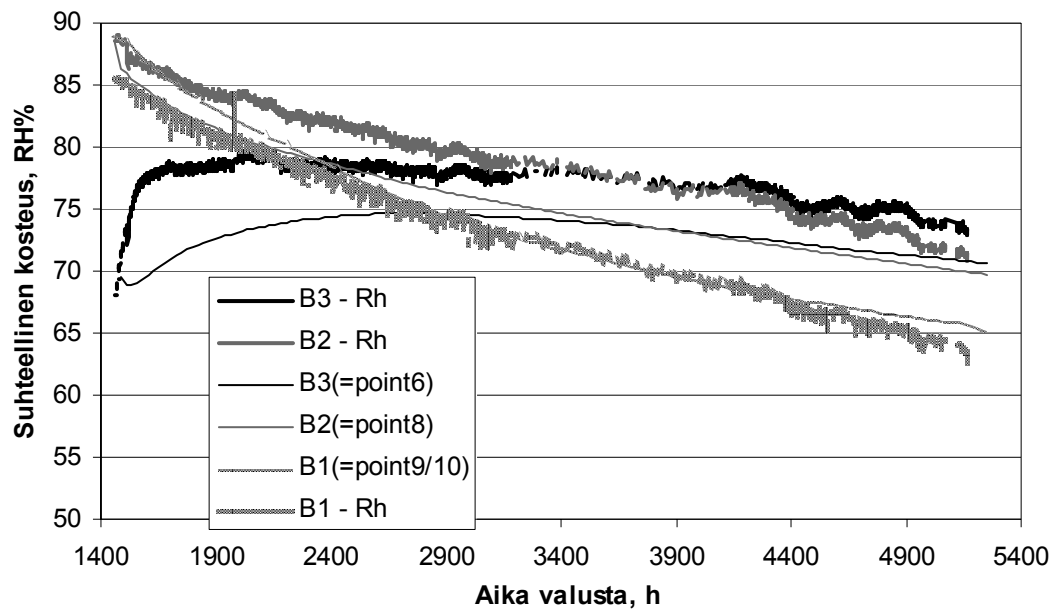
Kuva 6.16 Betonilaatan kuivuminen mallinnuksen mukaan 30 mm syvyydeltä ennen pinnoittamista.

### 6.3.2 Laatan kosteuskäyttäytyminen pinnoittamisen jälkeen

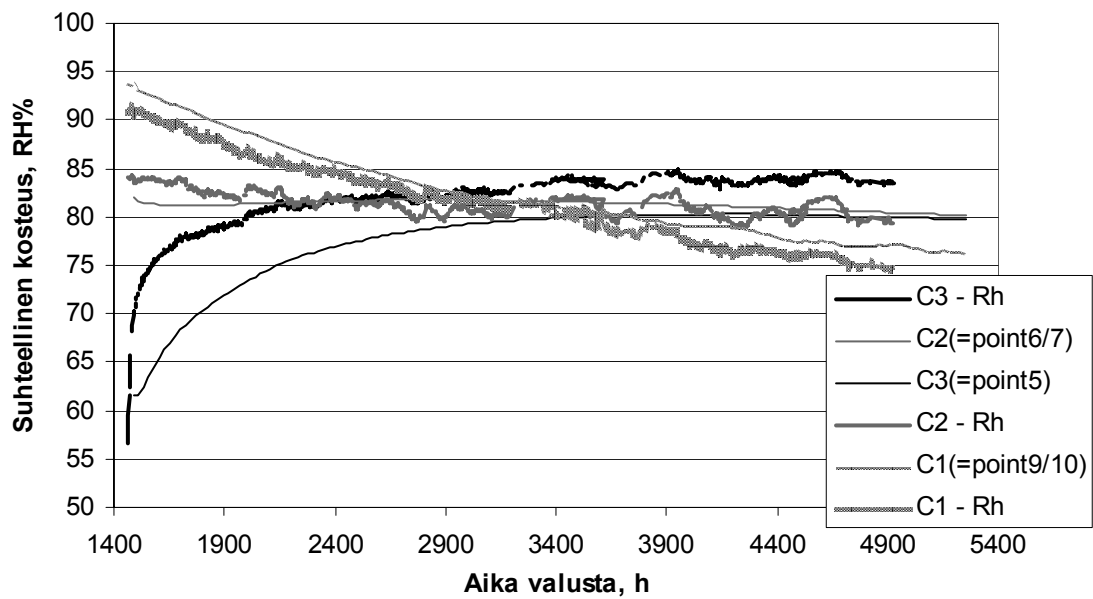
Kuvissa 6.17 ... 6.20 on verrattu laattojen mitattuja ja laskettuja suhteellisia kosteuksia pinnoittamisen jälkeen.



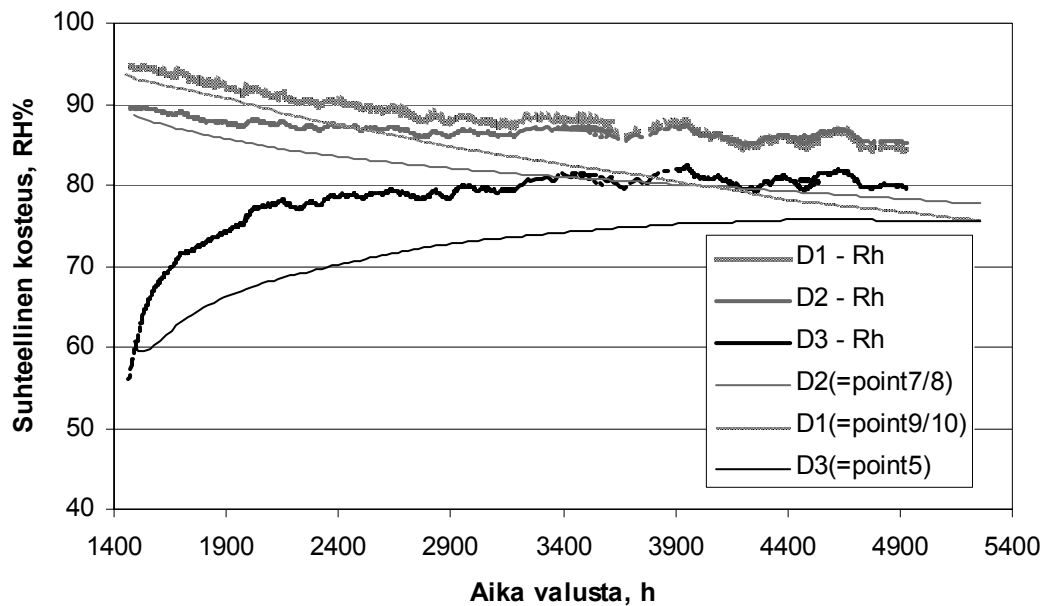
Kuva 6.17 Parketilla pinnoitetun lämmitetyn laatanosan suhteellinen kosteus pinnoittamisen jälkeen. Ohuet viivat laskennalliset arvot, paksut mitatut.



Kuva 6.18 Muovimatolla pinnoitetun lämmitetyn laatanosan suhteellinen kosteus pinnoittamisen jälkeen. Ohuet viivat laskennalliset arvot, paksut mitatut.



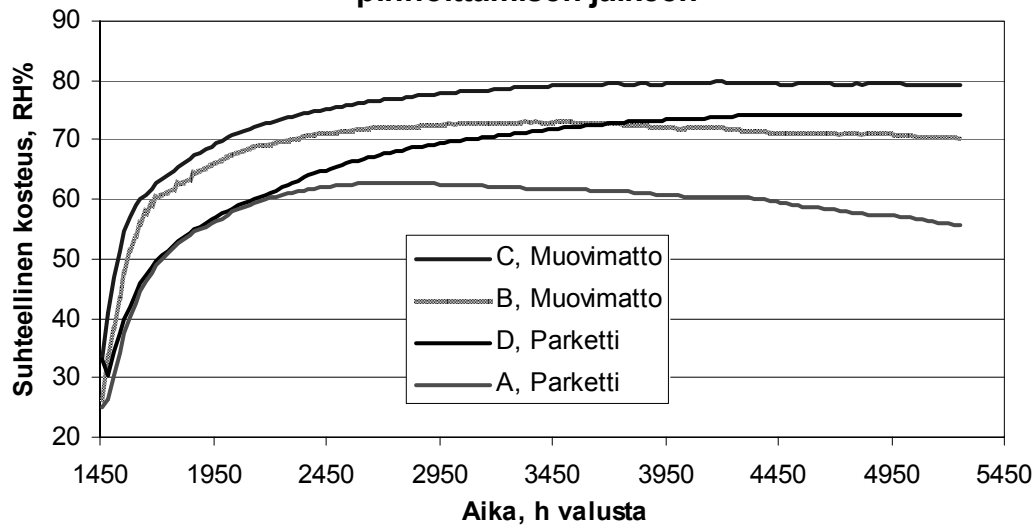
Kuva 6.19 Muovimatolla pinnoitetun lämmittämättömän laatanosan suhteellinen kosteus pinnoittamisen jälkeen. Ohuet viivat laskennalliset arvot, paksut mitatut.



Kuva 6.20 Parketilla pinnoitetun lämmittämättömän laatanosan suhteellinen kosteus pinnoittamisen jälkeen. Ohuet viivat laskennalliset arvot, paksut mitatut.

Teoreettisesti mallinnusten mukaan pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus muuttuu pinnoittamisen jälkeen kuvan 6.21 mukaisesti. Kuvasta voidaan todeta, että heti pinnoittamisen jälkeen vesihöyryntiiviimmän muovimaton alapinnan suhteellinen kosteus nousee nopeammin kuin parketin alla. Parketin alustoineen ja muovimaton vesihöyrynvastusten suhde on (1:1,76). Lämmitetyissä laatoissa pinnoitteiden alapinnan suhteellinen kosteus maksimissaan nousee alhaisemmalle tasolle (parketti: 62,8 RH%, muovimatto 73,1 RH%) kuin lämmittämättömissä (parketti 74,4 RH%, muovimatto 79,8 RH%). Lämmitetyissä laatoissa pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus saavuttaa myös korkeimman tasonsa nopeammin, 1 ... 3 kuukautta aiemmin.

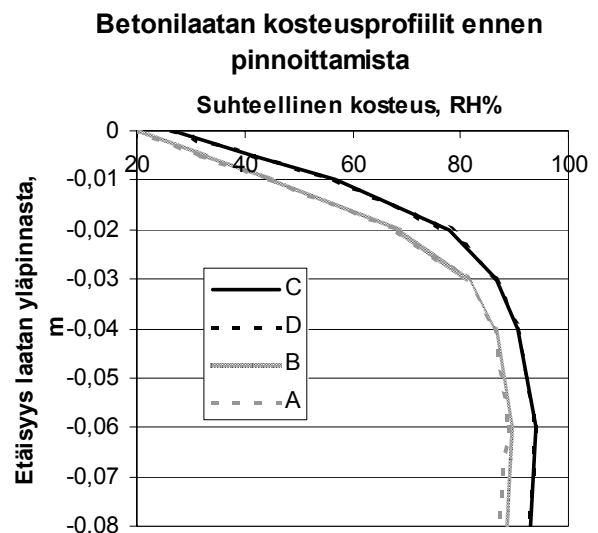
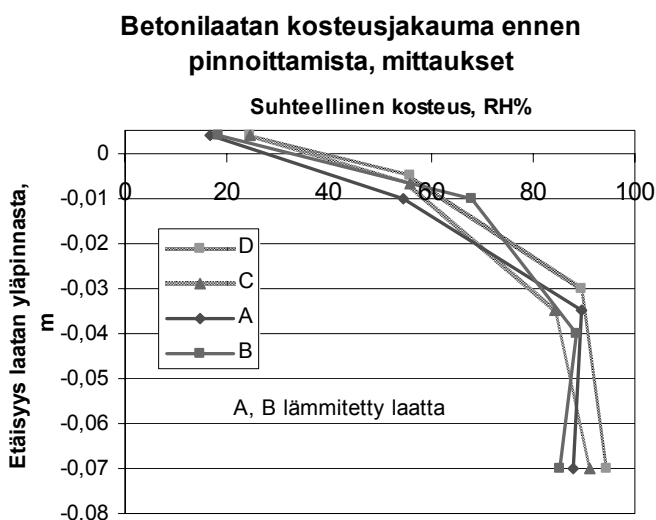
### Pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus pinnoittamisen jälkeen



Kuva 6.21 Pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus, lämmitetty (A, B) ja lämmittämätön laatta (C, D), WUFI-laskenta.

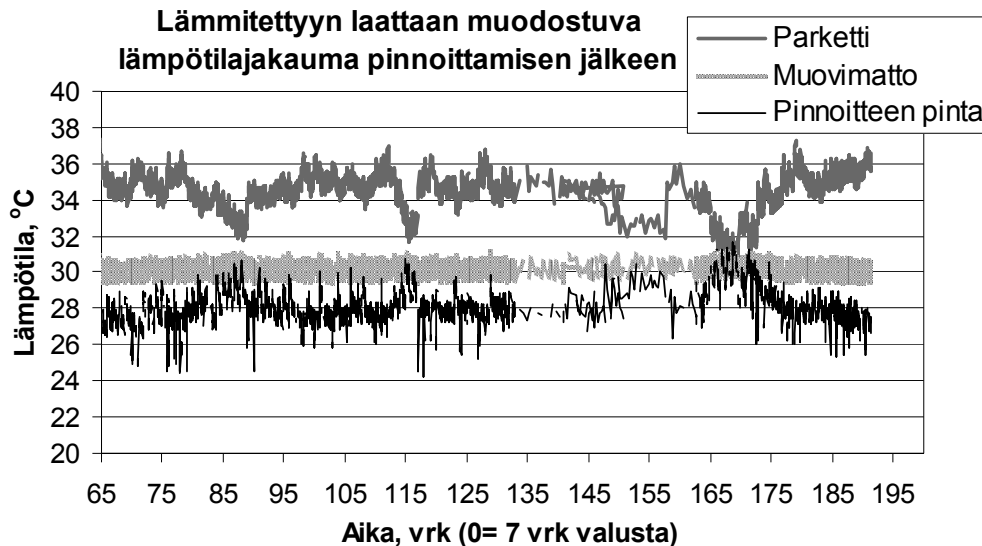
#### 6.4 Tulosten tarkastelu

Pinnoitushetkellä (60 vrk) betonilaatoista mitattiin ja teoreettisesti määriteltiin oli kuvan 6.22 mukaiset kosteusjakaumat. Kuvasta 6.22a nähdään lämmitetyn laatan alapinnan nopeampi kuivuminen lämmittämättömään laattaan verrattuna. Sen sijaan laatan yläosasta ja kriittiseltä syvyydeltä mitatuissa suhteellisissa kosteuksissa ei ole niin selvästi nähtävissä lämmitetyssä laatussa nopeampaa kuivumista mittauksissa. Vastaavasti teoreettisesti kuvan 6.22b mukaan koko lämmitetty laatta kuivuu nopeammin.



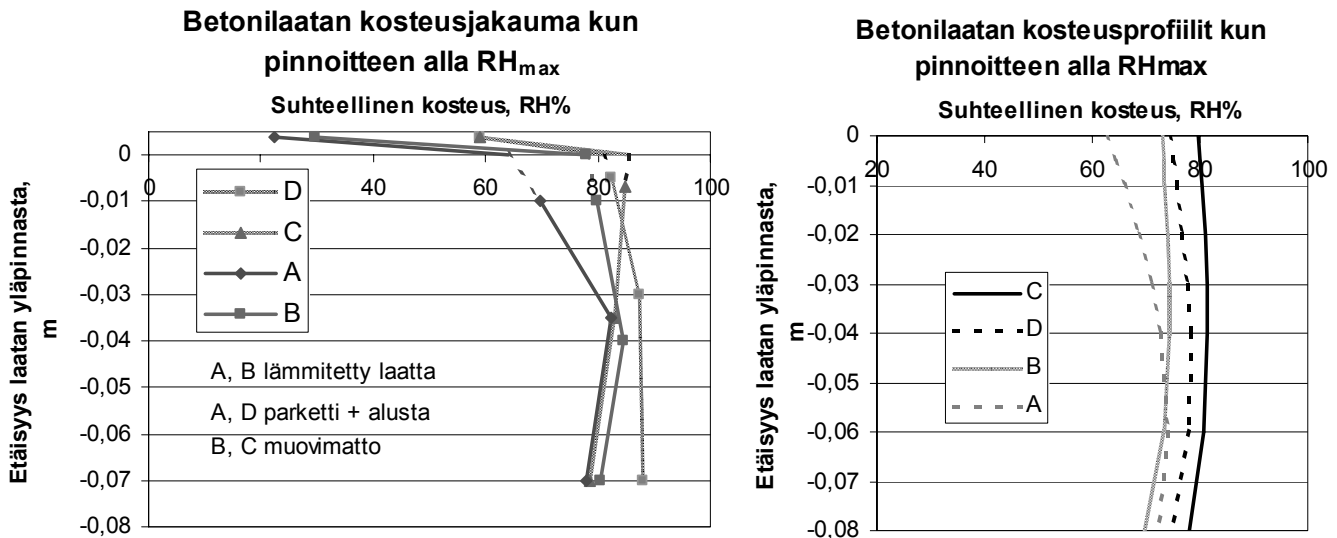
a. mittausten mukaan b. teoreettisesti  
 Kuva 6.22 Betonilaattojen kosteusjakaumat ennen pinnoittamista.

Pinnoittamisen jälkeen lämmitetyn laatan lämpöä nostettiin noin siten, että sekä parketilla että muovimatolla pinnoitetun laatan osan pintalämpötila oli keskimäärin  $+27...+28^{\circ}\text{C}$ . Parketilla alustoineen on suurempi lämmönvastus (n.  $6,41 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ) kuin muovimatolla (lähes 0), joten sillä laatan osalla tarvitaan korkeampi lämpötila ylläpitämään sama laatan pintalämpötila (kuva 6.23). Tällöin parketin alla olevan laatan lämpötila on yli  $4^{\circ}\text{C}$  korkeampi kuin muovimaton alla.



Kuva 6.23 Laatan lämpötila parketin ja muovimaton alla sekä laatan pintalämpötila mittausten mukaan.

Pinnoittamisen jälkeen laattojen ylimmän mittauspisteen suhteellinen kosteus alkaa nousta tiettyyn pitoisuuteen asti riippuen olosuhteista ja pinnan vesihöyrynvastuksesta. Molemmat pinnoitteet ovat suhteellisen vesihöyryntiiviitä ja kosteus nousee melko korkealle. Lämmitetyssä laatta suhteellisen kosteuden nousu on hieman nopeampaa ja saavuttaa korkeimman arvonsa nopeammin kuin lämmittämättömässä laatta. Tarkemmin eri pinnoitteiden alla muodostuva maksimikosteusjakauma mittausten mukaan ja teoreettisesti nähdään kuvasta 6.24.



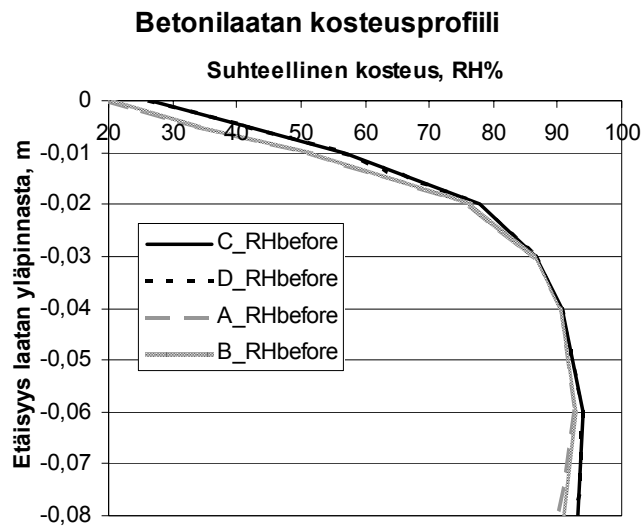
a. mittausten mukaan

b. teoreettisesti

Kuva 6.24 Betonilaattojen kosteusjakauma silloin, kun pinnoitteiden alapinnassa suurin suhteellinen kosteus.

Kuvasta 6.24 nähdään, että lämmitetyssä laatussa pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus maksimissaan jää jonkin verran alhaisemmaksi kuin lämmittämättömässä. Tiiviin muovimaton alla suhteellinen kosteus nousee myös hieman korkeammaksi kuin parketin, ero ei ole kovin suuri, koska parketin alla on suhteellisen vesihöyryntiivis alusmateriaali. Kuvan 6.24 mukaan teoreettisesti lämmitetyn parketin alapinnan suhteellinen kosteus nousee maksimissaan noin 11,5 RH% alhaisemmaksi kuin lämmittämättömän parketin alla. Vastaavasti muovimatolla ero on 6,7 RH%. Teoreettisesti pinnoittamisajankohdalla lämmitetty laatta oli hieman kuivempi (kuva 6.22b) kuin lämmittämätön. Jos teoreettisesti mallinnetaan tapaus, jossa lämmitetty laatta pinnoitetaan noin 14 vuorokautta aiemmin eli ajanhetkellä, jolla kriittisellä syvyydellä on sama RH kuin lämmittämättömässä, laatoissa pinnoitushetkellä on kuvan 6.25 esittämät kosteusprofiilit. Kuvan mukaan lämmitetyn laatan ala- ja yläpinta ovat hieman kuivemmat. Tässä tapauksessa pinnoittamisen jälkeen lämmitetyssä laatussa pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus pinnoittamisen jälkeen nousee hieman korkeammalle, mutta edelleen jää alemmalle tasolla kuin lämmittämättömässä. Ero muovimaton tapauksessa noin 1,8 RH% ja parketilla noin 6,2 RH%.





**Kuva 6.25** *Betonilaattojen kosteusprofiili kun 30 mm syvyydellä on RH 86%. Lämmitetyn laatan kuivumisaika 46 vuorokautta ja lämmittämättömän 60 vuorokautta.*

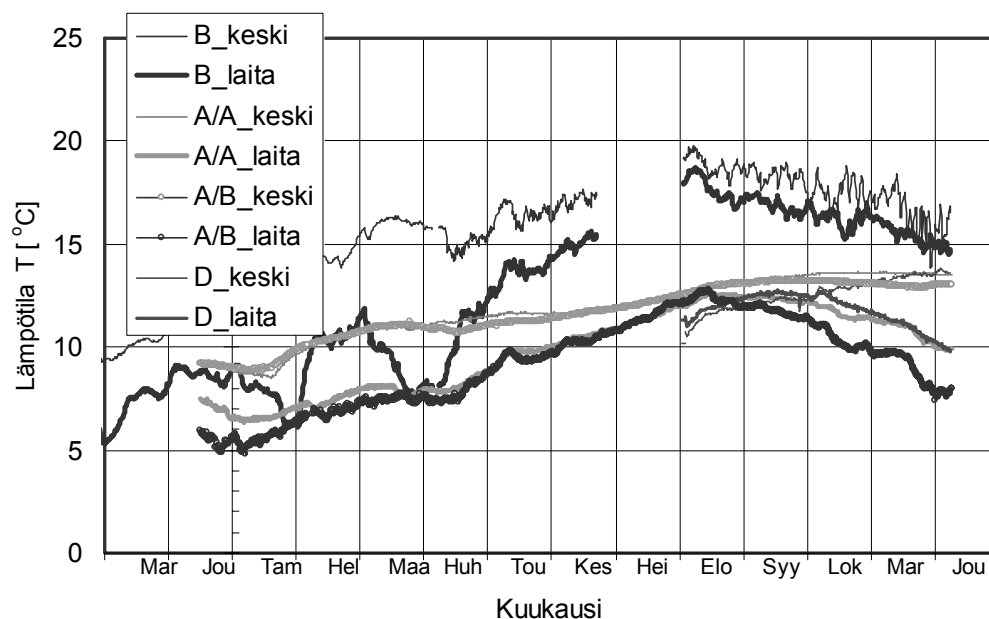
Tarkasteltaessa lattialämmityksen vaikutusta betonilaatan kuivumiseen ennen pinnoittamista ja pinnoittamiskriteerin saavuttamiseen voidaan todeta, että lämmityksen kuivamista nopeuttava vaikutus kriittisellä syvyydellä (maanvastaisen laatan tapauksessa 40% laatan paksuudesta) tässä tapauksessa oli noin 14 vuorokautta. Todellisessa alapohjassa vaikutus voi olla pienempi, koska alapuolisen maan lämmetessä laatan lämmittämisestä johtuen kosteusvirta maahan pienenee.

Pinnoittamisen jälkeen lämmitetyssä laatussa pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus nousee nopeammin kuin lämmittämättömässä. Vastaavasti lämmitetyssä laatussa pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus saavuttaa maksimiarvonsa nopeammin kuin lämmittämättömässä. Lämmitetyssä laatussa pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus maksimissaan jää jonkin verran, 5...10 RH-% riippuen pinnoitteen vesihöyry- ja lämmönvastuksesta alhaisemmaksi kuin lämmittämättömässä. Lämmitetyn laatan kosteusteknisen käyttäytymisen kannalta kriittisen vaihe on muutaman viikon ajanjakso pinnoittamisen jälkeen, jolloin pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus voi nousta korkeaksi jos laattaa lämmitetään voimakkaasti.

## 7 LATTIALÄMMITETYN ALAPOHJARKENTEEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSKÄYTTÄYTYMISEN TARKASTELU

### 7.1 Lattialämmityksen vaikutus pohjamaan lämpötilaan ja lämpöhäviöihin maahan

Uudessa rakennuksessa ennen rakennuksen lämmittämistä maanvastaisen alapohjan alapuolisen maan lämpötila voi olla lähes  $+0...+15^{\circ}\text{C}$ , riippuen rakentamisajankohdasta. Rakennuksen lämmityksen aloittamisen jälkeen maanvastaisen alapohjan alapuolinen maa alkaa lämmitä. Jossakin vaiheessa lämpövuot laatasta, ulkoilmasta ja perusmaasta ovat saavuttaneet tasapainon ja vaihtelut lämpötilassa johtuvat vain näiden raja-lämpötilojen muutoksista. Keskimäärin tämä käyttötilan lämpötilataso saavutetaan ensimmäisen lämmityskauden aikana. Tähän keskimääräiseen lämpötilaan vaikuttavat laatan, ulko- ja maan lämpötilan ohella laatan eristeen lämmönvastus, routa- ja sokkelieristyksen lämmönvastus sekä maan lämmönvastus. Kenttämittausten mukaan pohjamaan lämpötilakenttä ensimmäisellä varsinaisella lämmityskaudella vaihtelee eri lämmöneristysratkaisuissa kuvan 7.1 mukaisesti.

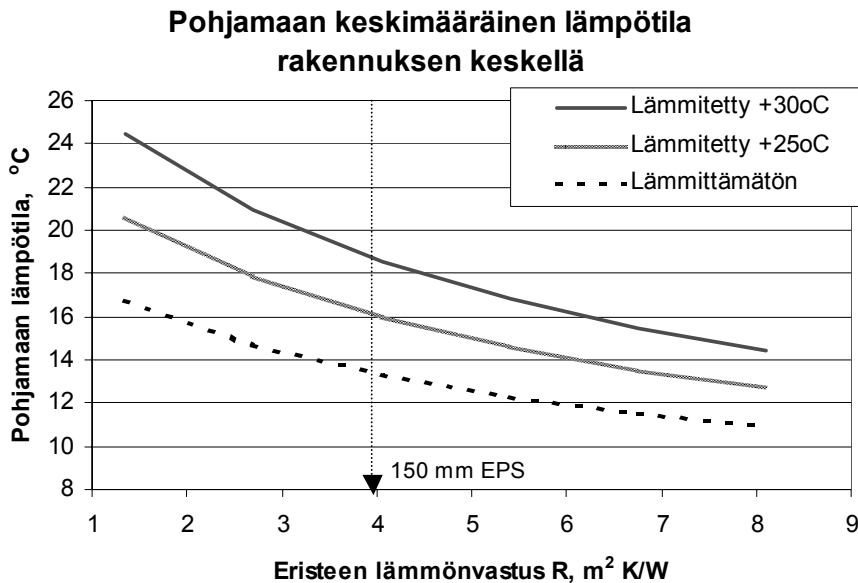


Kuva 7.1 Pohjamaan lämpötilan vaihtelut rakennuksen reunalla ja keskellä lämmityskauden aikana, kenttämittausten tulokset.

Ulkolämpötilasta pääasiassa johtuva vuodenaikaisvaihtelu pohjamaan lämpötilassa ulottuu mittausten mukaan vain 1,5...2 metrin päähän rakennuksen ulkoseinälinjasta. Keskemällä rakennusta maan lämpötilan vaihtelu johtuu pääasiassa laatan mahdollisista lämpötilan muutoksista.

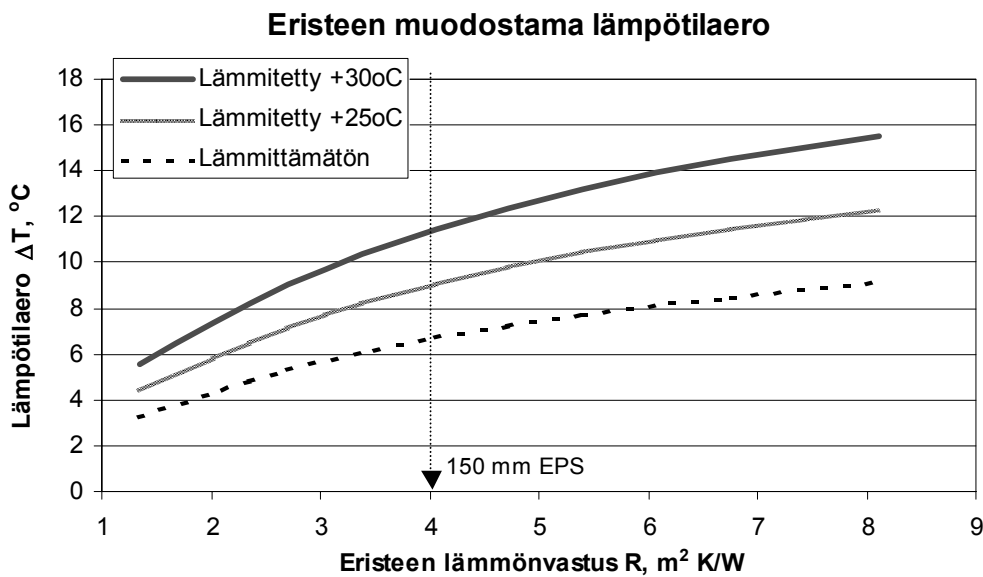
Koska lattialämmitetyssä ratkaisussa laatta on lämpimämpi kuin lämmittämättömässä, lämpövuot maahan on suurempi ja pohjamaa lämpenee enemmän. Kuvassa 7.2 on määritelty teoreettisesti laatan lämpötilan vaikutus pohjamaan lämpötilaan eri laatan lämmöneristepaksuuksilla runkosyvyydeltään 10 metrisessä rakennuksessa. Rakennuksessa on

tavanomaisesti routa- ja sokkelieristetty. Heikosti lämpöeristetyin ( $R=1,35 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , 50 mm EPS) laatan pohjamaan voi olla  $4...8^\circ\text{C}$  lämpimämpi laatan lämpötilan ollessa  $+25...+30^\circ\text{C}$  verrattuna lämmittämättömään laattaan.

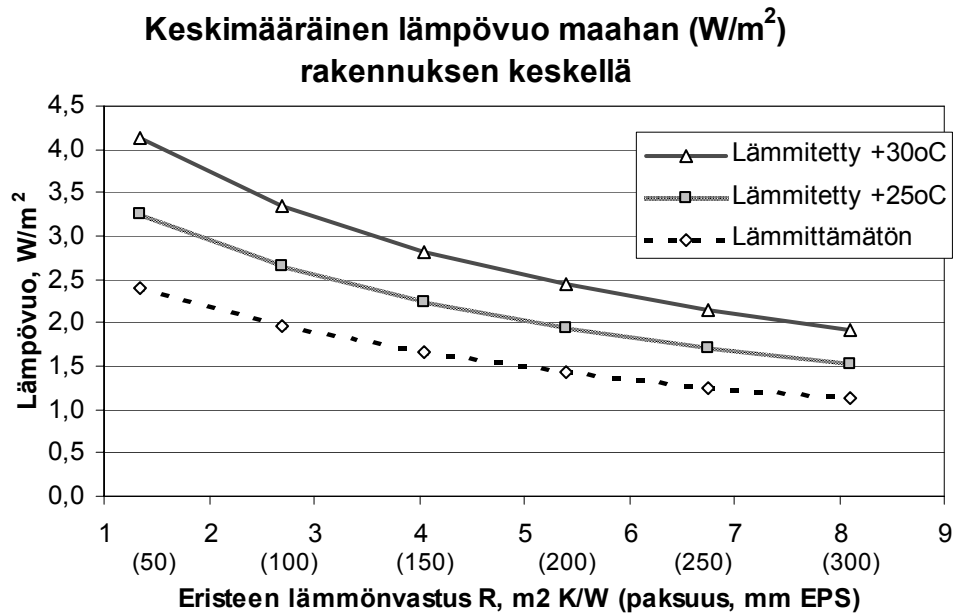


Kuva 7.2 Lattialämmityksen vaikutus pohjamaan lämpötilaan.

Laatan lämmöneriste muodostaa lämmitetyn laatan ja pohjamaan välille kuvan 7.3 mukaisen keskimääräisen lämpötilaeron rakennuksen keskellä. Lämpövuoto ( $\Delta T/R$ ,  $\text{W/m}^2$ ) riippuu lämpötilaerosta ( $\Delta T$ ) ja rakenteen lämmönvastuksesta ( $R$ ) kuvan 7.4 mukaisesti. Kuvasta 7.4 voidaan todeta, että lämmittäminen ( $+25^\circ\text{C}$ ) heikosti eristetyssä ( $R=1,35 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , 50 mm EPS) lisää lämpövuota maahan noin  $0,8 \text{ W/m}^2$  ja hyvin eristetyssäkin ( $R=6,76 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , 250 mm EPS) noin  $0,4 \text{ W/m}^2$ , prosentuaalisesti lämpövuoto kasvaa noin 35%.

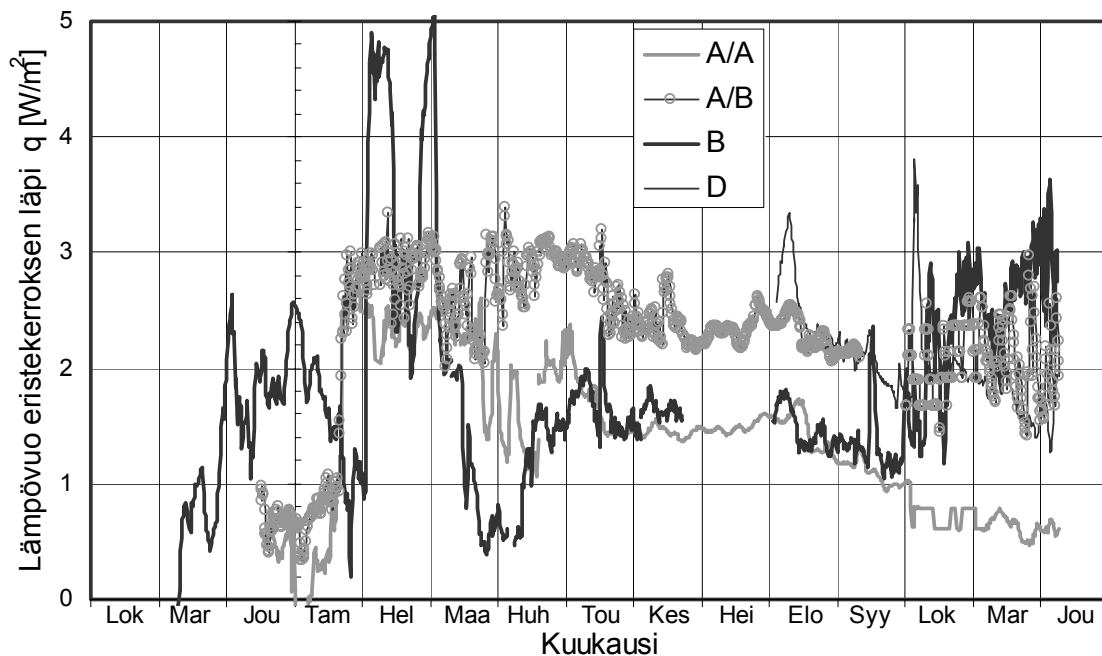


Kuva 7.3 Laatan lämmöneristeen muodostama teoreettinen keskimääräinen lämpötilaero rakennuksen keskellä.



Kuva 7.4 Teoreettinen keskimääräinen lämpövuoto maahan rakennuksen keskellä.

Kenttämittausten mukaan ensimmäisellä varsinaisella lämmityskaudella, jolloin pohjamaan lämpötila on saavuttanut keskimääräisen käyttötilan lämpötilatasonsa, maahan johtuva lämpövuoto eri tapauksissa ja kuvan 7.5 mukainen.



Kuva 7.5 Lämpövuoto maahan lämmityskaudella, määritelty kenttämittausten lämpötiloista laattojen keskiosissa.

Lattialämmitetyn alapohjarakenteen energiataloudelliseen toimintaan vaikuttaa myös pinnoitteen lämmönvastus. Jos pinnoitteella on suuri

lämmönvastus, laattaa joudutaan lämmittämään enemmän, jotta saadaan sama lämpöteho. Laatan lämpötilan kasvaessa myös lämpöhäviöt maahan kasvavat.

## 7.2 Pohjamaan lämpötilan vaikutus kosteuskäyttäytymiseen

Pohjamaan lämpötilalla on merkitystä myös rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Pohjamaassa on lähes aina huokosissa 100 RH%:n suhteellinen kosteus. Mitä lämpimämpi maa, sitä suurempi on maan huokosten vesihöyrypitoisuus. Kun maa ei ole vielä saavuttanut keskimääräistä tasapainolämpötilaa ja alapohjalaatassa on vielä rakennusaikaista kosteutta, rakenteessa on kosteusgradientti kosteammasta ja lämpimämmästä laatasta maahan päin ja laatta kuivaa alaspäin, ellei rakenteessa ole vesihöyryvirtausta estäviä materiaaleja. Betonilaatan rakennuskosteuden poistuminen kestää yleensä vuosia. Mitä suurempi lämpötilaero muodostuu laatan ja pohjamaan välillä (eli mitä suurempi on laatan alapuolinen lämmönvastus) sitä enemmän laatta kuivaa alaspäin. Lattialämmitetyssä laatasta on yleensä suurempi lämpötilagradientti maahan, josta johtuen rakenne kuivuu enemmän alaspäin (jos kuivuminen mahdollista) kuin lämmittämätön. Laskelmien mukaan (kuva 7.3) lämpötilagradientti on lämmitetyssä laatasta (+25°C) 1...3 °C korkeampi kuin lämmittämättömässä (2...6,5 °C, jos +30°C). Niin kauan kuin laatta on lämmitetty ja rakennuskosteutta on poistumatta kosteusgradientti on laatasta alaspäin maahan. Kytettäessä lattialämmitys pois, laatan lämpötilan laskiessa myös pohjamaan lämpötila reagoi suhteellisen nopeasti lämpötilan muutokseen. Tutkimuksen alussa nostettiin esille teoreettinen mahdollisuus, että kun lämmitys ei ole päällä kosteusgradientin suunta muuttuisi ja kosteusvirta olisikin maasta laataan. Mittauksissa ja mallinuksissa tätä ilmiötä ei ole havaittu. Lisäksi tämäkin riski poistuu kun rakenteeseen muodostuu rakennusfysikaalisesti ”riittävä” lämpötilagradientti eli alapohjalaatta on hyvin lämpöeristetty.

Kuten edellä esitettiin, ulkolämpötila vaikuttaa rakennuksen reuna-alueella laatan alapuolisen maan lämpötilaan enemmän kuin keskialueella. Tästä johtuen talvella rakennuksen reuna-alueella maa on viileämpi kuin keskellä. Tästä syystä laatta kuivaa hieman nopeammin alaspäin reuna-alueella kuin keskialueella, josta syystä pinnoittamiskriteeri tulee määritellä rakennuksen keskeltä.

## 7.3 Lattialämmityksen vaikutus betonilaatan kuivamiseen

Kuten edellä esitettiin laatan lämmitys nopeuttaa kuivumista laatan alapinnassa alaspäin johtuen korkeammasta kosteusgradientista. Samoin laatan kuivuminen pinnasta nopeutuu mikäli sisäilman tehokkaasta tuuletuksesta on huolehdittu kuivumisen aikana. Laatan keskialueella ja pinnoittamiskriteerin mittaussyvyydellä (noin 40%:n syvyydellä laatan paksuudesta) kuivumisen nopeutuminen on vähäisempää. Yleisesti voidaan sanoa, että pinnoittamiskriteeri saavutetaan lämmitetyssä laatasta muutamia päiviä tai paria viikkoa aiemmin riippuen olosuhteista. Mitä lämpimämpi on laatta, sitä nopeampaa on laatan kuivuminen. Toisaalta laatan lämmittäminen

lämmittää pohjamaata, jolloin laatan alaspäin kuivuminen jonkin verran hidastuu. Kosteusvirta laatasta reagoi hitaasti lämpötilan muutoksiin ja laatan kuivattaminen lämmittämällä tulee olla riittävän pitkäkestoista, useita viikkoja.

Teoreettisesti on määritelty lämmittämättömälle laatalle kriittinen mittaussyvyys pinnoittamiskriteerin määrittämistä varten. Teorian mukaan pinnoittamisen jälkeen pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus nousee enimmillään samalle tasolle kuin suhteellinen kosteus on ollut pinnoittamishetkellä kriittisellä syvyydellä. Kriittinen syvyys on maanvastaisen laatan tapauksessa yleisesti määritelty 40%:n syvyydelle laatan paksuudesta eli 80 mm paksussa laatasta 32 mm syvyydelle.

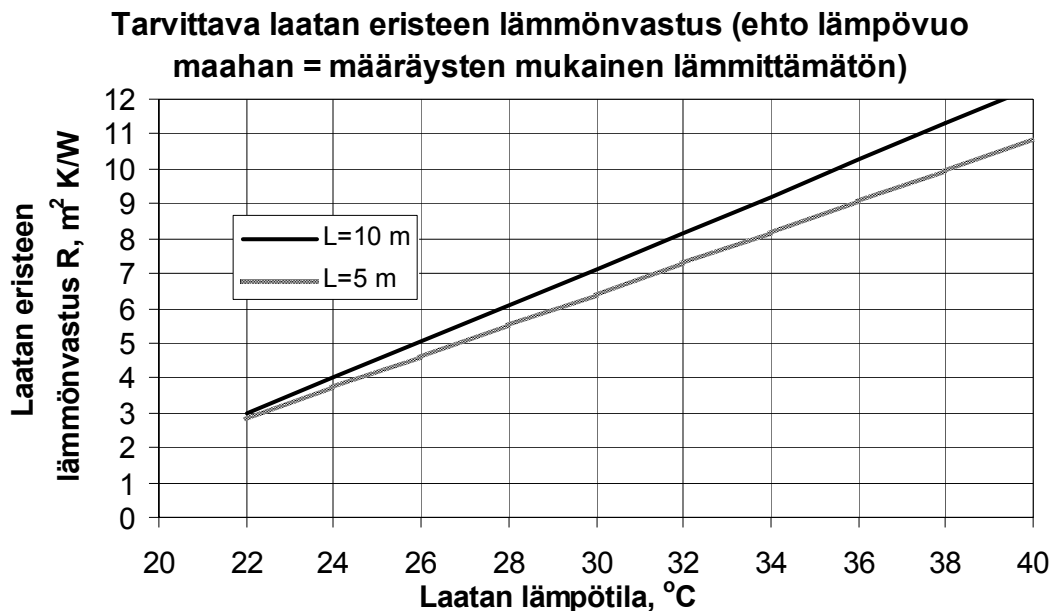
Pisteittäisessä lattialämmityksessä (esim. vesikiertoinen lattialämmitys) lämmön kytkemisen jälkeen laattaa alkaa kuivua voimakkaasti lämmityselementin läheltä. Mittausten ja mallinnusten mukaan laatan kuivuminen on erilaista lämmityselementin läheisyydessä (noin 50 mm päässä) ja elementtien välissä. Riippuen laatan lämpötilasta ja muista kuivumisolosuhteista (sisäilman ja pohjamaan lämpötilasta ja kosteudesta) kriittiseltä syvyydeltä (40% laatan paksuudesta) lämmityselementin läheltä ja elementtien keskeltä mitatuissa suhteellisen kosteuden arvoissa voi olla 5 RH%:n ero. Rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta on oleellista, että laatta pinnoitetaan riittävän kuivana. Mallinnusten mukaan lämmitetyn betonilaatan kosteustekninen toiminta lämmityselementtien keskellä noudattaa melko hyvin lämmittämättömän laatan teoreettista toimintaa. Pinnoittamiskriteeri tulee mitata oikeasta paikasta suhteessa lämmityselementtiin eli elementtien keskeltä. Pinnoittamiskriteerin mittaamisesta on olemassa erilaisia ohjeita. Yleisesti suhteellinen kosteus käsketään mitata laatan käyttölämpötilassa. Jos laattaa on kuivatettu käyttölämpötilaa korkeammalla lämpötilalla, lämpötilaa tulee pudottaa käyttölämpötilaan ennen mittausta. Laatan lämpötila ja kosteus tasaantuu muuttuneeseen lämpötilaan melko hitaasti, noin viikossa. Kosteuden mittaamisessa tulee myös käyttää riittävän pitkiä tasaantumisaikoja. Poranreikämittauksessa porareian olosuhteet tasaantuvat muutamassa päivässä ja samoin reikään asennettava mittausanturi vaatii 1...8 tunnin vuorokauden tasaantumisaajan riippuen anturityypistä.

Laatan pinnoittamisen jälkeen pinnoitteen alapinnan ja laatan yläpinnan suhteellinen kosteus alkaa nousta. Taso, jolle suhteellinen kosteus enimmillään nousee pääasiassa riippuu sisäilman olosuhteista (lämpötila, RH), pinnoitteen ja betonin vesihöyrynläpäisevyydestä ja laatan kosteusjakaumasta pinnoitushetkellä. Yleisesti vesihöyryntiiviimmällä pinnoitteella suhteellinen kosteus nousee korkeammalle kuin läpäisevämmällä. Lämmitetyssä laatasta pinnoittamisen jälkeen pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus nousee nopeammin kuin lämmittämättömässä laatasta, koska laatan ja sisäilman välinen kosteusgradientti on suurempi. Vastaavasti lämmitetty laatta saavuttaa pinnoitteen alapinnassa suurimman suhteellisen kosteuden arvonsa nopeammin. Jos laattaa lämmitetään voimakkaasti, erityisesti vesihöyryntiiviillä pinnoitteella pinnoittamisen jälkeen pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus saattaa nousta liian korkeaksi. Riski, että pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus nousee liian korkeaksi

pinnoitteen tai sen kiinnityksen kannalta on suurin vesihöyryntiiviillä pinnoitteella, jos laatan lämpötila heti pinnoittamisen jälkeen jatkuvasti on yli +25 °C. Samoin on kosteusvaurion riski, jos laatta on pinnoitettu liian märkänä, esimerkiksi tapauksessa, jossa pinnoituskriteeri on mitattu liian läheltä lämmityselementtiä.

### Lattialämmitetyn alapohjan rakennesuosituksia

Energiatalouden kannalta voidaan antaa suosituksia lämmöneristyspaksuuksista. Ehtona energiataloudelliselle lämmitetylle alapohjaratkaisulle voidaan pitää, että lämpövuoto maahan lämmitetystä laatasta tulee olla samansuuruinen kuin lämmittämättömästä, lämmöneristemääräykset (RakMK, C3) täyttävästä alapohjasta. Tämä vastaa alapohjaa, jonka lämmöneristeen lämmönvastus  $R$  on noin 1,9 m<sup>2</sup> K/W (noin 70 mm EPS). Esimerkkinä suositeltavasta lämmöneristepaksuudesta esitetään kuvan 7.6 käyrästä.



Kuva 7.6 Energiataloudellisesti optimaalisen lämmöneristepaksuuden valintakäyrästä.

Mallinnusten mukaan energiataloudellisesti hyvä ratkaisu on myös kosteusteknisesti toimiva ja lämmöneriste muodostaa riittävän lämpötilaeron ja siitä johtuen riittävän kosteusgradientin.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lattialämmitetyn alapohjan alapuolisen maan lämpötilakenttään vaikuttavat laatan lämpötila, ulkolämpötila ja perusmaan lämpötila sekä lämmityselementin alapuolisen rakenteen lämmönvastus, routa- ja sokkelieristyksen lämmönvastukset ja maan lämmönvastus. Ulkolämpötila vaikuttaa pohjamaan lämpötilaan merkittävästi vain noin 1,5... 2 metrin etäisyydelle ulkoseinälinjasta, keskemällä rakennusta lämpötilaan vaikuttaa pääasiassa laatan lämpötila. Johtuen ulkolämpötilan vaikutuksesta rakennuksen reuna-alueen lämpötilaan, pohjamaan lämpötiloissa rakennuksen reuna- ja keskialueella eroa. Mitä vähemmän rakennuksen sokkelissa on lämmöneristystä, sitä viileämmäksi rakennuksen reuna-alueen lämpötila putoaa talvella.

Laatan lämpötila vaikuttaa voimakkaasti pohjamaan lämpötilaan. Jos laatan lämpötila on keskimäärin +5 °C korkeampi, pohjamaan lämpötila on heikosti eristetyssä ( $R= 1,35 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , 50 mm EPS) laatassa noin 4 °C ja hyvin eristetyssä ( $R= 4,05...5,41 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , 150...200 mm EPS) noin 2 °C korkeampi. Pohjamaan lämpötila vaikuttaa merkittävästi rakenteen kosteustekniseen toimintaan sekä energiatalouteen.

Lattialämmitetyssä alapohjassa laatan ja pohjamaan välille muodostuu muutaman °C-asteen suurempi lämpötilaero kuin lämmittämättömässä. Tästä syystä betonilaatta kuivuu alaspäin, mikäli laatan alapuolella ei ole vesihöyrynvastuskerroksia. Koska pohjamaa rakennuksen reuna-alueella on varsinkin talvella viileämpi, laatta kuivuu hieman nopeammin rakennuksen reuna- kuin keskialueella.

Lattialämmitetyssä alapohjassa maahan johtuvat lämpöhäviöt ovat aina suurempia kuin lämmittämättömässä johtuen laatan korkeammasta lämpötilasta. Teoreettisesti lämpövuoto lämmityksessä laatassa maahan on noin 30% suurempi kuin lämmittämättömässä, kun molemmissa sama laatan lämmöneristys. Jos halutaan, että lämmityksessä laatassa lämpövuoto maahan on samansuuruinen kuin lämmittämättömässä lämmöneristettä on lisättävä. Laatan lämpötilan ollessa keskimäärin +25 °C, energiataloudellinen lämmöneristeen lämmönvastus  $R$  on 4,05...5,41  $\text{m}^2 \text{ K/W}$  (vastaa noin 150...200 mm EPS).

Betonilaatan yläpinnan ja yläosan kuivuminen riippuu pääasiassa sisäilman olosuhteista ja laatan ja sisäilman kosteusgradientista. Laatan kuivattaminen lämmittämällä on tehokasta jos laatan lämpötilaa korotetaan selkeästi ja samalla sisäilman suhteellinen kosteus pidetään mahdollisimman alhaisena tehokkaalla tuuletuksella. Kosteudenliikkeet betonilaatassa ovat hitaita ja muutaman päivän laatan lämmittäminen ei kuivata laattaa paljoakaan. Laatan kuivuminen kriittiseltä syvyydeltä (40% laatan paksuudesta), jossa määritellään pinnoittamiskriteerin täyttyminen, lämmityksessä laatassa on usein muutamista päivistä pariin viikkoon nopeampaa kuin lämmittämättömässä.



Pisteittäisesti (esim. vesikiertoinen lattialämmitys) lämmitetyn betonilaatan kosteuskentässä on selvä ero lämmityselementtien läheisyydessä (noin 50 mm päähän) ja elementtien keskellä. Laatan kuivuminen alkaa lämmityselementin läheisyydestä ja jatkuu jonkin verran nopeampana kuivumisen ajan. Tästä syystä on tärkeää määritellä pinnoittamiskriteeri lämmityselementtien keskeltä, ei niiden viereltä.

Pinnoittamisen jälkeen pinnoitteen alapinnan ja betonilaatan yläpinnan suhteellinen kosteus alkaa nousta. Taso, jolle suhteellinen kosteus enimmillään nousee riippuu pinnoitteen vesihöyrynvastuksesta, olosuhteista ja pinnoittamisajankohdan kosteusjakaumasta. Lämmitetyssä laatassa pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus nousee nopeammin ja saavuttaa maksimitasonsa nopeammin kuin lämmittämättömässä laatassa. Mitä korkeampi on laatan lämpötila heti pinnoittamisen jälkeen, sitä korkeammalle pinnoitteen alapinnan suhteellinen kosteus nousee.

## LÄHTEET

Athientis A.K., 1993. Experimental and theoretical investigation of floor heating with thermal storage. ASHRAE Transactions 93 (1): 1049-1+57.

Adjali M.H., Davies M., Ni Riain C., Littler J.G., 2000. In situ measurements and numerical simulation of heat transfer beneath a heated ground floor slab. Energy and Buildings 33 (2000): 75 – 83.

Chuangchid P., Krafti M., 2001. Foundation heat loss from heated concrete slab-on-grade floors. Building and Environment, Vol. 36(5), June 2001, pp. 637-655.

Deru M.P., Kirkpatrick A.T., 2001. Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer from Buildings; Part 2: Application. The American Solar Energy Society National Solar Conferences Forum 2001. NREL/CP-550-29694. 7 p.

EN ISO 13370. Thermal performance of buildings – Heat transfer via the ground – Calculation methods.

Hedenblad. G. 1993. Torktider för betong efter vattenskada. T27:1993. Byggeforskningsrådet. 31 s.

Hedenblad, G. 1993. Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste. Lund Institute of Technology, Division of Building Materials. Doctoral dissertation. 250 s.

Hagentoft C-E., 1988. Heat Loss to the Ground from a Building: Slab on the Ground and Cellar. Doctoral dissertation. Report TVBH-1004. Lund Institute of technology, Division of Building Technology. Sweden. P.216.

Hagentoft C-E. 1996. Heat Losses and temperature in the Ground under a Building with and without Ground Water Flow-II. Finite Ground Water Flow Rate. Building and Environment, Vol. 31, No 1 , pp. 13-19.

Hedenblad. G. 1997. Drying of construction water in concrete. T9:1997. Byggeforskningsrådet. 54 s.

Hagentoft, C-E. 2001. Introduction to Building Physics. Studentlitteratur.422 s.

Järvimäki P. and Puranen M. (1979). Heat flow measurements in Finland. Pp. 172 – 178 in: Terrestrial Heat Flow in Europe, ed. V. Cermák and L. Rybach. Springer-Verlag, Berlin.

Kara, R. 1994. Sähkölämmityksen käsikirja. Suomen Sähköurakoitsijaliitto ry. Espoo. 274 s.

Kim. Jin-Keum & Lee. Chil-Sung. 1999. Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages. Cement and Concrete Research 29 (1999). S.

Kim K-H., Joen S-E., Kim J-K., Yang S. (2003). An Experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research* 33. pp. 363 – 371.

Krarti M., Claridge D. E., Kreider J. F. 1988a. The ITPE Technique Applied to Steady-State Ground-Coupling Problems. *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 9, pp. 1885-1898.

Krarti M., Claridge D. E., Kreider J. F. 1988b. ITPE Technique Applications To Time-Varying Two-Dimensional Ground-Coupling Problems. *International Journal of heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 9, pp. 1899-1911.

Krarti M., Claridge D.E., Kreider J.F. 1990. ITPE Technique Applications to Time-Varying Three-Dimensional Ground-Coupling Problems. *Journal of Heat Transfer*, ASME, November 1990, Vol. 112, pp. 849-852.

Lood A., 1996. An Experimental and theoretical Study of Floor Heating with Thermal Storage. *Building Physics in the Nordic Countries, Proceedings of the 4<sup>th</sup> Symposium*, Vol. 1. August 1996. VTT Building technology. Pp. 173-180.

LVI 13-10261. 1996. Vesikiertoinen lattialämmitys. Ohjetiedosto. Rakennustuotesäätiö, Rakennustieto. 11 s.

Mattsson E., 2001. Mätning och beräkning av uttorkningsförloppet för betongbjälklag med golvvärme. Examensarbete E-0:2. Inst. F Byggnadsmaterial, CTH.

McFadden T. (1988). Thermal Performance Degradation of Wet Insulations in Cold Regions. *Journal of Cold Regions Engineering*. Vol. 2(1). March 1998. pp. 25 – 34.

Mitalas G.P. 1983. Calculation of Basement Heat Loss. *ASHRAE Transactions*, Vol , pp. 420-437.

Mitalas G.P. 1987. Calculation of Below-Grade Residential Heat Loss: Low-rise Residential Building. *ASHRAE Transactions*, Vol. 93(1), pp. 743-784.

Mäkinen, A. 1998. Sähkölämmitysasennukset. Suomen sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry. Espoo. 163 s.

Neville, A.M. 1995. *Properties of Concrete*. Fourth edition. Longman Group Limited. England. 797 p.

Nilsson, L-O. 1988. Hygroscopic moisture in concrete – drying, measurements & related material properties. Lund Institute of Technology, Division of Building Materials. Doctoral dissertation. 170 s.

Persson. B. 2003a. Golvsystem på betong. Fuktpåverkan, kemisk emission och vidhäftning. Lund tekniska högskola, avd Byggnadsmaterial. TVBM-7165, upplaga 2. 82 s. + 74 liites.

Persson, B. 2003b. Golvsystem på betong. Fuktpåverkan, kemisk emission och vidhäftning. Lund tekniska högskola, avd Byggnadsmaterial. TVBM-7165, upplaga 2. 82 s.

Pihlajavaara, S.E. 1964. Johdatus betonin kuivumisilmiöön. Valtion teknillinen tutkimuslaitos, Betoniteknillinen laboratorio. 114 s.

RakMK D5. 1985. Rakennusten lämmityksen tehon- ja energiatarpeen laskenta. Ohjeet Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö.  
Rautiainen, K. 1997. Pientalojen lattialämmitysratkaisuja. Imatran Voima Oy, tutkimusraportteja IVO-A-02/97. Vantaa. 80 s. + 10 liites.

Rees. S.W. et al. 1999. The thermal performance of ground floor slabs – a full scale in-situ experiment. Building and Environment 34 (1999). S 139-164.

Rees S.W., Zhou Z., Thomas H.R., 2001. The influence of soil moisture content variations on heat losses from earth-contact structures; an initial assessment. Building and Environment 36 (2001). Pp. 157-165.

RIL 126 – 1979. Rakennusten ja tonttialueiden kuivatus. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto.

Roiha, J. 1996. Lämmityskaapeleiden asennus betonilattiaan. Imatran Voima Oy, tutkimusraportteja IVO-A-04/96. Vantaa. 109 s. + 14 liites.

Roots P., 2000. Mätning av fuktförhållande och värmetransport till underliggande mark i en grund som utföres med golvvärme. Workin Paper No 14. University of Gävle, 2000. 18 p.

Roots P., 2002. En litteraturstudie om golvvärme. SP AR 2002:04. Energiteknik , Borås 2002.

Roots. P., Hagentoft C-E. 2002. A field study of heat and moisture condition in a slab on the ground with floor heating - results. Building Physics 2002 – 6<sup>th</sup> Nordic Symposium. S. 223-230.

Roots. P., Sandberg. P.I. 2002. Moisture conditions in a slab on the ground with floor heating. Building Physics 2002 – 6<sup>th</sup> Nordic Symposium. S. 215-221.

RT 73-10616. Asunnon sähköasennukset. Ohjetiedosto. Rakennustietosäätiö. Rakennustieto. 12 s.

Seppänen, O. 1995. Rakennusten lämmitys. Suomen LVI-yhdistysten liitto ry. Jyväskylä. 467 s.

SFS-EN 1264-1. 1998. Lattialämmitys. Järjestelmät ja osat. Osa 1: määritelmät ja merkinnät. Suomen standardisoimisliitto SFS. 12 s.

SFS-EN 1264-2. 1998. Lattialämmitys. Järjestelmät ja osat. Osa 2: lämmöntarpeen määrittäminen. Suomen standardisoimisliitto SFS. 28 s.

SFS-EN 1264-3. 1998. Lattialämmitys. Järjestelmät ja osat. Osa 3: järjestelmän suunnitteleminen. Suomen standardisoimisliitto SFS. 12 s.

Sundberg J. (1988). Thermal Properties of Soils and Rocks. Publ. A 57, dissertation. Department of geology, Chalmers University of Technology and University of Göteborg. S-412 96 Göteborg. Sweden. 310 p.

Sjöberg A., Nilsson L-O., Rapp T., 2002. Fuktmätning i betonggolv med golvvärme. Etapp I: Förstudie. Publikation P-02:1. Chalmers Tekniska Högskola, mars 2002. 54 s.

Suomen betoniyhdistys. 2002. Betonilattiat 2002. Suomen betonitieto Oy. Helsinki. 175 s.

Thomas H. R., Rees S. W., 1999. The thermal performance of ground floor slabs – a full scale in-situ experiment. Building and Environment 34 (1999). Pp 139 – 164.

Tirkkonen, P. 1992. Lattialämmityksen mitoitus. Imatran Voima Oy, tutkimusraportteja. Helsinki. 115 s.

Tirkkonen, P. 1995. Lattialämmityksen suunnittelu ja asennus. Imatran Voima Oy, tutkimusraportteja IVO-A-01/95. Helsinki. 95 s. + 6 liites.

Williams G.P., Gold L.W., 1976. Ground temperatures. CBD-180. IRC Canadian Building Digest. <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cdb/cdb180e.htm>

Zhou Z., Rees S.W., Thomas H.R., 2002. A numerical and experimental investigation of ground heat transfer including edge insulation effects. Building and environment 37 (2002): 67 – 78.

Tampereen teknillinen yliopisto  
Rakennustekniikan osasto  
PL 600  
33101 Tampere

Tampere University of Technology  
Department of Civil Engineering  
P.O.B. 600  
FI-33101 Tampere

ISBN 952-15-1359-4  
ISSN 1459-4102