

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikka / Korjausrakentaminen

Pasi Ahola

MATALALÄMPÖLEVYJEN KÄYTTÖ BETONIN KUIVAAMISESSA

Opinnäytetyö 2011

# TIIVISTELMÄ

## KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

### Rakennustekniikka / Korjausrakentaminen

Ahola Pasi	Matalalämpölevyjen käyttö betonin kuivaamisessa
Opinnäytetyö	32 sivua + liite (salainen)
Työn ohjaaja	Lehtori Sirpa Laakso, Laboratorio insinööri Anna Eskola
Toimeksiantaja	Polygon Finland Oy
Maaliskuu 2011	
Avainsanat	Lämpölevy, kuivaus, betoni, vesivahinko

Tämän työn tavoitteena oli saada aikaan lämpölevykuivaimien käyttöohje ja tutkia lämpölevyjen käyttöä ja kosteuden käyttäytymistä betonissa. Kokeita päädyttiin tekemään valvotuissa olosuhteissa ja pyrittiin simuloimaan maanvastaista yhteen suuntaan kuivuvaa betonilaattaa. Tämä rakenne valittiin useiden rakenteen joukosta, koska se on yleisin vesivahingoista aiheutuneiden betonirakenteiden kuivauskohde lämpölevyille. Rakenteena oli 80 mm:n betonilaatta ja 50 mm EPS-eristettä. Aikaisemmin lämpölevyjen käyttöön ei ole ollut yhdenmukaisia ohjeita, ja kuivauksen asentaja on käyttänyt levyjä parhaaksi näkemällään tavalla.

Tarkoitus ei ollut tutkia betonin kuivumista, vaan löytää paras lämpölevyjen ohjaustapa. Kokeissa päädyttiin tarkastelemaan kuutta erilaista lämpölevyn ohjaus-/jaksotustapaa, sekä tutkimaan tuuletuksen vaikutusta kuivauksen aikana. Kokeissa tarkasteltiin kosteuden käyttäytymistä betonin eri syvyyksissä sekä seurattiin sisäilman olosuhteita.

Tehtyjen kokeiden avulla saatiin laadittua käyttöohje lämpölevykuivaimille. Kokeiden suorittamisen ja tutkimustyön aikana kävi kuitenkin hyvin selväksi, ettei yksityiskohtaisia ohjeita voi laatia lukuisten muuttujien takia. Jokainen muuttuja vaikuttaa muihin muuttujiin ja täten ei esimerkiksi voida enakkoon määrittää jaksotusaikoja. Käyttöohje keskittyy pääasiassa antamaan reunaehtoja ja tietoa parhaasta kuivumistavasta.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Construction Engineering

PASI AHOLA

Bachelor's Thesis

Supervisor

Commissioned by

March 2011

Keywords

Drying Concrete with Low Heat Panels

32pages + 1 appendix

Sirpa Laakso, Senior Lecturer

Anna Eskola, Laboratory Engineer

Polygon Finland Oy

drying, concrete, water damage, heat panel

Low heat panels have been used in Polygon Finland Oy many years without uniform instructions. This has resulted in everybody using them differently. The first aim of this thesis was to produce a manual for low heat panels. Another aim was to study the usage of panels, and to study the movements of moisture in concrete while using panels, and thus to find the best timing for warming and cooling.

The thesis was carried out by studying literature and testing six different control methods of low heat panels. The single way drying of 80 mm thick slab was chosen as the structure to be monitored. Six 600x1200 mm slabs were cast. Each slab was heated a different period of time. Four of them were controlled with clocks and two were controlled with a special-control center. Humidity and temperature values were data logged in 20, 40 and 60 mm in each slab.

The research revealed that no uniform instructions/guidelines for heating and cooling can be given, as there are numerous variables that interact. However, a manual was made and it mainly focuses on giving boundary conditions and knowledge about drying. Also, it was found that a few days after the drying was started, it was not possible to push moisture deeper. This is completely new information and should be proven with further tests.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

## KÄSITTEIDEN SELITTEET 5

### 1 JOHDANTO 6

#### 1.1 Rakenteiden yleiset kuivaustavat 7

### 2 KOSTEUS BETONISSA 8

#### 2.1 Betonirakenteen kuivuminen 10

#### 2.2 Veden painovoimainen siirtyminen 12

#### 2.3 Veden kapillaarinen siirtyminen $RH > 98\%$ 12

#### 2.4 Vesihöyryn siirtyminen diffuusiolla $RH < 98\%$ 13

#### 2.5 Vesihöyryn siirtyminen ilmavirtauksien mukana eli konvektio 14

### 3 KOEJÄRJESTELYT 14

#### 3.1 Kokeen suorituspaikka 14

#### 3.2 Betoni 14

#### 3.3 Mittalaitteisto 16

#### 3.4 Järjestelyt 17

### 4 TULOKSET 19

#### 4.1 Kello ohjattu lämmitys 6 h jäähdytys 6 h 19

#### 4.2 Kello ohjattu lämmitys 5 h jäähdytys 3 h 20

#### 4.3 Kello ohjattu lämmitys 3 h jäähdytys 5 h 22

#### 4.4 Kello ohjattu lämmitys 2 h jäähdytys 2 h 23

#### 4.5 Ohjauskeskuksella ohjattu lämmitys $65\text{ °C}$ hystereesi $20\text{ °C}$ 24

#### 4.6 Ohjauskeskuksella ohjattu lämmitys $65\text{ °C}$ hystereesi $10\text{ °C}$ 26

#### 4.7 Sisäilma 28

### 5 JOHTOPÄÄTÖKSET 29

## LÄHTEET 31

## LIITTEET

### Liite 1. Käyttöohje (salainen)

## KÄSITTEIDEN SELITTEET

**Diffuusio** tarkoittaa kaasuseoksessa (tässä tapauksessa ilmassa) vakiopaineessa tapahtuvaa yksittäisen kaasun (tässä tapauksessa vesihöyryn) pitoisuuserojen tasoittumista molekyylien liikkuesssa. Vesihöyry siirtyy korkeammasta osapaineesta matalampaan.

**Hydrataatio** on veden ja sementin sisältämien mineraalien välinen reaktio, jonka vaikutuksesta vesi-sementti-kiviainesseos kovettuu betoniksi.

**Hygroskooppinen tasapainokosteus** tarkoittaa sitä kosteuspitoisuutta, joka sitoutuu diffuusion avulla materiaaliin sitä ympäröivästä ilmasta. Saavutettuaan tilan ei materiaalin- eikä ilmankosteus muutu enää tasapainokosteuden saavuttamisen jälkeen.

**Hygroskooppisuus** tarkoittaa huokoisen materiaalin kykyä sitoa ja luovuttaa kosteutta ympäröivästä ilmasta. (Esim. betoni on hygroskooppinen materiaali.)

**Kapillaarisuus** tarkoittaa materiaalin kykyä nostaa vettä vapaata nestepintaa korkeammalle ja pitää se siellä.

**Kondensoituminen** tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä vedeksi tai jääksi kylmemmän materiaalin pintaan. Tämä vaatii että vesihöyry saavuttaa materiaalin lähellä/pinnalla kyllästymislämpötilan ja kyllästyskosteuden, eli vesihöyryn suhteellinen kosteus nousee lämpötilan laskiessa 100 % RH. Tapahtuu yleensä materiaalien rajapinnoilla.

**Kyllästyskosteus** tarkoittaa vesihöyrypitoisuutta, joka mahtuu ilmaan tietyssä lämpötilassa. Kyllästyskosteuden ylittyessä vesihöyry tiivistyy vedeksi.

**Suhteellinen kosteus (RH)** tarkoittaa, kuinka paljon ilmassa on kosteutta kyllästyskosteuteen nähden tietyssä lämpötilassa. Betonin suhteellisesta kosteudesta puhuttaessa tarkoitetaan betonin huokosen ilmatilassa vesihöyrynä olevaa kosteutta.

**Vesihöyrynosapaine** tarkoittaa ilmassa olevan vesihöyryn osuutta ilman kokonaispaineesta.

**Vesihöyryn konvektio** tarkoittaa ilman sisältämän vesihöyryn siirtymistä ilmavirtauksen mukana. Ilma virtaa aina alenevan kokonaispaineen suuntaan.

## 1 JOHDANTO

Tämän työn tavoitteena oli saada aikaan lämpölevykuivaimien käyttöohje ja tutkia lämpölevyjen käyttöä ja kosteuden käyttäytymistä betonissa. Kokeita päädyttiin tekemään valvotuissa olosuhteissa ja pyrittiin simuloimaan maanvastaista yhteen suuntaan kuivuvaa betonilaattaa. Tämä rakenne valittiin useiden rakenteiden joukosta, koska se on yleisin vesivahingoista aiheutuneiden betonirakenteiden kuivauskohde lämpölevyille. Toinen vaihtoehto testattavaksi rakenteeksi olisi ollut massiivibetoninen välipohja/väliseinä, jonka paksuus olisi ollut yli 200 mm. Kokeissa päädyttiin tarkastelemaan kuutta erilaista lämpölevyn ohjaus-/jaksotustapaa, sekä tarkastelemaan tuuletuksen vaikutusta kuivauksen aikana.

Työ suoritettiin Kotkan toimipisteen tiloissa Jylpyn teollisuusalueella. Tämä oli luonnollinen valinta koelaboratorion kasaamispaikaksi, jotta laitteiston seuranta olisi mahdollisimman helppoa. Työn ongelmallisimman osuus oli löytää simulaatiobetoniksi sopiva betonikappale. Toimeksiantajan kohteina on pääosin vesivahingon kärsineitä vanhoja rakennuksia, joten betonin tulisi olla jo kovettunutta sekä mielellään ikääntynyttä, koska vanhan betonirakenteen kuivuminen hidastuu huomattavasti. Ikääntynyttä oikean paksuista betonia (50 - 120 millimetriä) ei kuitenkaan pystytty tiukasta aikataulusta johtuen hankkimaan, joten koepalat päätettiin valaa itse pikabetonista.

Työn tuloksista ei voida vetää suoria johtopäätöksiä todellisen kohteen alapohjan betonin kuivumisnopeuteen. Tätä rajoittavat lukuisat muuttujatekijät, esimerkkeinä: betonin lujuus, ilman lämpötila, ilman kosteus, betonin kosteus, rakenteet, ilman vaihtuvuus, betonin ikä ja huokosrakenne ynnä muut mahdollisesti muuttuvat tekijät.

Ohjeen tarve tuli esille aloittaessani työt nykyisessä Polygon Finland Oy:ssä, jossa lämpölevykuivaimia on käytetty jo useiden vuosien ajan menestyksekkäästi monilla eri toimipaikoilla, mutta yhtenäistä ohjeistusta ei ole. Tästä on seurannut, että jokaisella toimipaikalla jokainen kuivausasentaja käyttää lämpölevykuivaimia eri tavalla. Työn tilaaja halusi selvittää, mikä olisi tehokkain tapa käyttää lämpölevykuivaimia ja luoda yhtenäinen ohjeistus lämpölevykuivaimien käyttöön mahdollisimman tehokkaasti.

## 1.1 Rakenteiden yleiset kuivaustavat

Kuivaustavat jaotellaan kahteen pääryhmään: koneelliseen kuivattamiseen ja luonnolliseen kuivattamiseen. Kuivaustapojen nimi paljastaa tapojen eron. Koneellisessa kuivauksessa pyritään tehostamaan kastuneen materiaalin kuivumista. Erilaisia koneellisia kuivattamistapoja ovat: tilakuivaus, lämpölevykuivaus, mikroaaltokuivaus ja imu-/puhalluskuivaus.

Yleisin vesivahingon kärsineiden rakenteiden kuivaustapa on tilakuivaus. Tilakuivauksessa kastuneen materiaalin ympärille luodaan mahdollisimman hyvät olosuhteet kuivumiseen. Tämä tarkoittaa ilmavirtojen hallintaa, jossa ilman suhteellinen kosteus pidetään riittävän alhaisena ja lämpötila riittävän korkeana käyttäen ilmankuivaimia ja lämmittimiä. Tärkeä osa tilakuivauksessa on pitää ilma liikkeessä ”huuhtelemassa” kuivattavaa aluetta, jottei kuivuvan rakenteen pinnalle pääse muodostuman mikroilmasto. Tätä kuivaustapaa käytetään lähes kaikkien materiaalien kuivattamiseen. Sekä hyödynnetään muissa kuivaustavoissa.

Imu-/puhalluskuivausta käytetään kahden tiiviin kerroksen välissä olevan kastuneen rakennusmateriaalin kuivaamiseen. Kastuneen materiaalin läpi pitää pystyä johtamaan ilmaa hallitusti. Pääasiallisesti käytetään imukuivausta, koska näin kostea ilma saadaan hallitusti poistettua ilmakehään. Puhalluskuivauksella saavutetaan hieman nopeampi kuivuminen, mutta kostean ilman kulkua ei voida yhtä hyvin hallita. Kuiva ilma johdetaan kuivattavaan materiaaliin sisäilmasta, jota hallitaan tilakuivauksella.

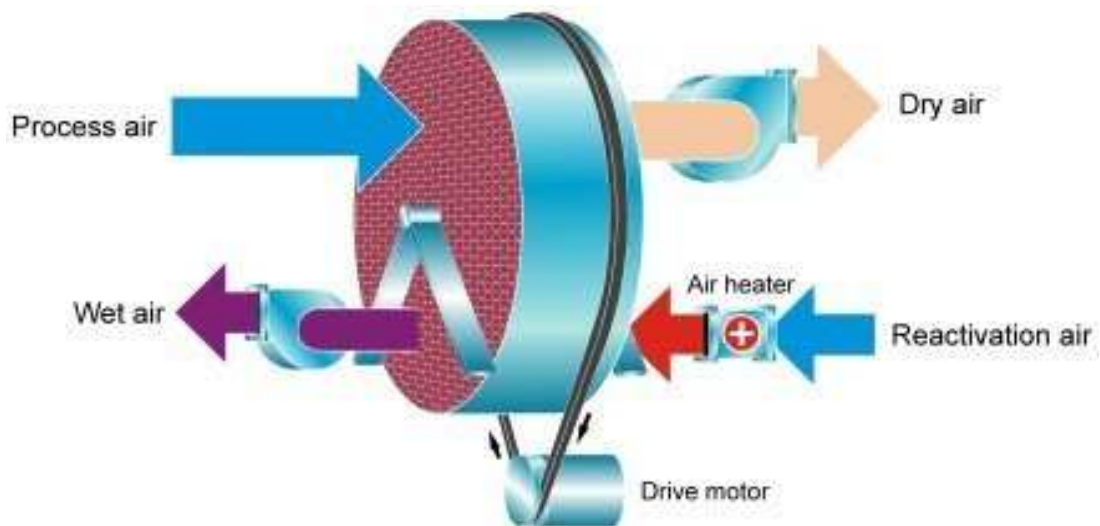
Lämpölevykuivaus on betonin ja muiden kiviainespohjaisten materiaalien kuivaamiseen tarkoitettu muoto. Lämpölevykuivauksessa on tarkoitus nostaa kastuneen rakenteen lämpötilaa ja näin kohottaa kastuneen materiaalin huokosissa olevaa vesihöyrynosapainetta, mikä nopeuttaa diffuusiota.

Betonin kuivaamisessa on myös mahdollista käyttää mikroaaltokuivaimia. Mikroaaltokuivaimet ovat tehokkain tapa kuivata kosteusvahingon kastelema betoni. Mikroaaltokuivauksessa kosteus siirtyy painegradientin ja vesihöyrynsapaine-erojen avulla. Mikroaaltokuivauksessa lämpötilat voivat nousta niin korkeiksi, että betonin huokosissa oleva vesi höyrystyy ja aiheuttaa huokosissa painetta. Mikroaalloilla lämmitys saadaan kohdistettua suoraan vesimolekyyleihin betonirakenteen sisällä eikä lämmitysenergiaa/aikaa kulu betonikerrosten lämmittämiseen yhtä paljon. Mikroaalto-

kuivaamiseen sisältyy kuitenkin monia riskitekijöitä, minkä takia menetelmää ei kovin laajasti käytetä. Näitä ovat esimerkiksi: säteily, jota pitää valvoa, sekä liian suuret lämpötilat, jotka voivat aiheuttaa vaurioita. (2.)

Polygon Finlandilla on käytössä pääasiassa ilmankuivaimina Munters Oy:n valmistamia sorptioroottorikuivaimia sekä muutama malli lauhdutinkuivaimia. Lauhdutinkuivaimet ovat muuten samanlaisia kuin sorbtioroottorikuivaimet, mutta niissä on lisäksi lauhdutin, jossa regenerointi-ilmassa oleva kosteus muutetaan vedeksi eikä regenerointi-ilmaa tarvitse poistaa ilmakehään, vaan se voidaan vapauttaa huonetilaan.

Sorptioroottori on huokoinen aallotettu lasikuiturakenteinen kennosto, jossa ilma imeytään roottorin läpi, jolloin ilmassa oleva kosteus imeytyy kuivainaineeseen. Roottorissa oleva kuivainaine on nykyään pääosin silikaa. Aikaisemmin kennostoissa on käytetty myös litiumkloridia. Roottorista saadaan kuivaa ilmaa ulos. Käyttömoottori pyörittää kennoa hitaasti (6 - 10 kierrosta tunnissa). Roottori kiertyy erilliseen sektoriin, jossa kuumaa reaktiivointi/regenerointi-ilmaa johdetaan roottorin läpi, kertyneen kosteuden poistamiseksi. Kosteaa lämmin ilma puhalletaan ulos ilmakehään, pois kuivatavasta tilasta. Reaktiivointialue on noin  $\frac{1}{4}$  osa kennon koosta. Kuvassa 1. on esitetty sorbtioroottorikuivaimen toimintaperiaate.



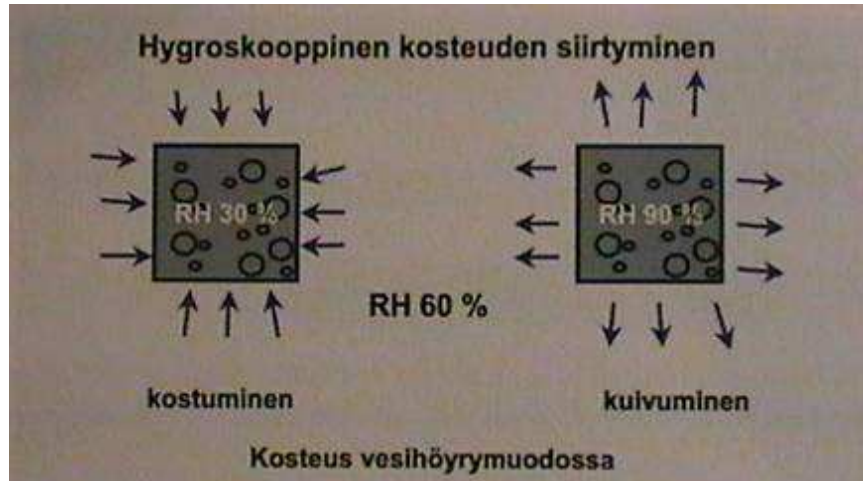
Kuva 1. Sorptioroottorikuivaimen toimintaperiaate (1).

## 2 KOSTEUS BETONISSA

Kovettunut betoni sisältää aina jonkin verran kosteutta. Se on peräisin joko betonin valmistamiseen käytetystä vedestä, rakennusaikaisesta kastumisesta, vesivahingosta



tai maaperästä. Hygroskooppisena materiaalina betoni pyrkii tasapainokosteuteen ympäröivän ilman kanssa. Betoni pystyy sitomaan ja luovuttamaan kosteutta ympäröivästä ilmasta vallitsevan olosuhteen mukaan. (3.) Kuvassa 2 on havainnollistettu betoni ominaisuutta pyrkiä tasapainokosteuteen ympäröivän ilman kanssa.

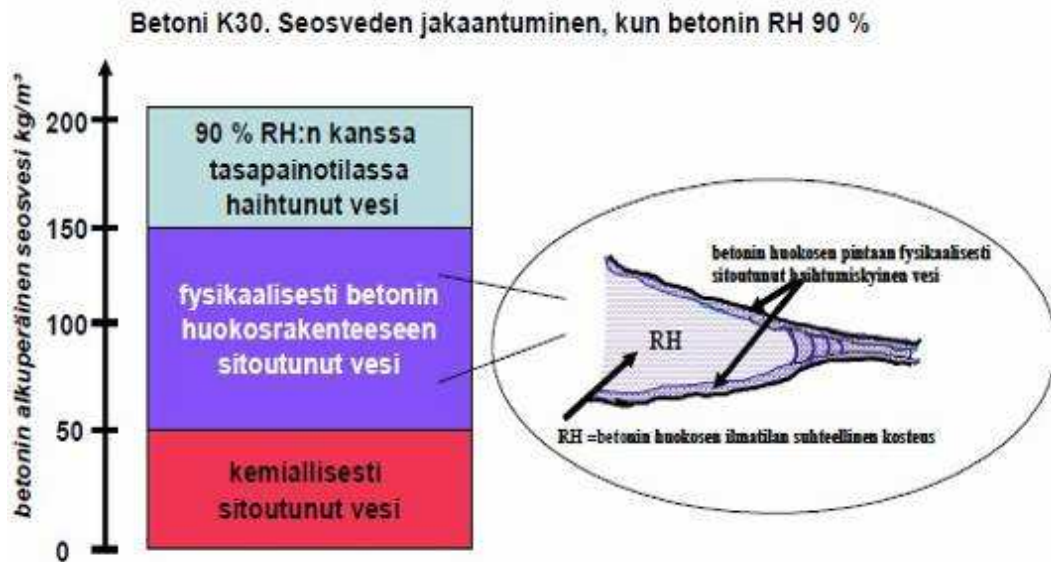


Kuva 2. Betoni on hygroskooppinen materiaali. Betoni pyrkii tasapainokosteuteen ympäröivän ilmankosteuden kanssa. (3,17.)

Osa betonin valmistamiseen käytetystä vedestä sitoutuu kemiallisesti reagoidessaan sementin kanssa betonin kovettuessa. Kemiallisesti sitoutuneen veden määrä on noin 20p % betonin valmistamiseen käytetyn sementin painosta. Valtaosa sitoutumisesta tapahtuu muutamassa päivässä. (3, 13.)

Osa betonin valmistamiseen käytetystä vedestä sitoutuu betonin huokosen seinämän reunalle fysikaalisesti. Tämä vesi on sitoutunut van der Waals - voimien vaikutuksesta eli absorptiovoimien vaikutuksesta. Absorptiovoimien sitoman veden määrä riippuu vesi-sementtisuhteesta, joka määrittää huokosen pinta-alaa, ja betonin lämpötilasta. (3, 15.)

Jäljelle jääneen osuuden, betonin valmistamiseen käytetystä vedestä, tulee haihtua pois ennen kuin betoni alittaa pinnoitettavuuskosteuden. Kuvassa 3 on havainnollistettu seosveden jakautumista.



Kuva 3. Kun betonin alkuperäinen seosvesimäärä on 200 kg/betoni-m<sup>3</sup>, sitoutuu siitä osa kemiallisesti betonin kovetuttua, osa fysikaalisesti ja osa haihtuu. Tasapainotilassa (RH 90 %) betonin huokosen ilmatilan suhteellinen kosteus on sama kuin ympäristön. (3,13.)

Betonin huokosen suhteellisen kosteuden (RH) ja betonin välille ei ole olemassa yleispätevää taulukkoa mikä RH vastaa mitään kilogrammamäärää vettä/m<sup>3</sup> betonia. Erilaisilla betoneilla on erilainen huokosrakenne, ja ne myös sitovat erilaisen määrän kosteutta eri lämpötiloissa. Huokosrakenteeseen vaikuttavat vesi-sementtisuhde, betonin lujuus, lisäaineiden käyttö, hydrataation aste ynnä muut muuttuvat tekijät. Suuntaa antavia taulukoita on mahdollista tehdä tietylle betonille tietyssä lämpötilassa. (3,16.)

## 2.1 Betonirakenteen kuivuminen

Rakenteiden kuivuminen tapahtuu eri kosteudensiirtoilmiöiden vaikutuksesta. Oltaessa kapillaarialueella (RH > 98 %) osa rakenteeseen joutuneesta ylimääräisestä vedestä valuu painovoiman vaikutuksesta pois sekä osa kosteudesta siirtyy kapillaarisesti materiaalien sisältä rakenteiden pinnoille ja ilmavirtaukset kuivattavat rakenteiden pinnat. Oltaessa hygrooskooppisella kosteusalueella (RH < 98 %) kosteus poistuu materiaalien sisältä diffuusiolla ja ilmavirtausten mukana. (4.)

Kapillaarisella alueella kuivuminen on verrattain nopeaa. Siirryttäessä hygrooskooppiselle alueelle kuivuminen hidastuu huomattavasti. Kuivuminen tapahtuu pääosin hygrooskooppisella alueella. Pääsääntöisesti rakenteet kuivatetaan RH < 85 %;iin, tai mate-

riaalinvalmistajan antamien ohjeiden mukaan. Kuivatettaessa kostuneita betonirakenteita tulee rakenteita ja vaadittavaa RH:ta aina tarkastella tapauskohtaisesti. (3,21.)

Betonirakenne voi siis kuivua neljällä eri tavalla. Näitä ovat: veden painovoimainen siirtyminen, veden kapillaarinen siirtyminen, veden ja vesihöyryn siirtyminen ilmavirtauksien mukana eli konvektio sekä vesihöyryn siirtyminen diffuusiolla. (5.)

Kuivatettaessa vesivahingon kastelemaa betonia kuivuminen perustuu yleensä vesihöyryn siirtymiseen diffuusiolla betonin sisältä betonin pintaan ja siitä vesihöyryn siirtymisenä ilmavirtauksen mukaan pois. Tätä on havainnollistettu kuvassa 4.

Betonirakenteen kuivumista voidaan tehostaa monin eri tavoin. Pääosin kaikki tavat perustuvat kahteen asiaan: rakenteen lämmittämiseen ja betonirakennetta ympäröivän ilman kosteuden alentaminen. Betonin lämpötilan nostaminen on tehokkain tapa nopeuttaa betonin kuivumista. (3,21)

Rakennetta ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden alentaminen on yleensä tarpeen, mikäli ilman suhteellinen kosteus on niin korkea, ettei rakenteesta pääse haihtumaan kosteutta. Kuivuminen nopeutuu huomattavasti, kun ilman kosteus on  $RH < 50 \%$ , eikä kuivuminen enää nopeudu oleellisesti ilman kosteuden ollessa  $RH < 30 \%$ . Kylminä vuodenaikoina ei yleensä ole tarvetta erityisesti kuivattaa rakennetta ympäröivää ilmaa, vaan ensisijaisesti tulee huolehtia riittävästä lämpötilasta sekä ilmanvaihdoista tiloissa, joihin rakenteita kuivatetaan. Kesällä voi ulkoilman kosteussisältö olla niin suuri, että kuivumisen varmistamiseksi on tarpeen kuivattaa rakennetta ympäröivää ilmaa. Tällöin tulee huolehtia rakennuksen ilmatiiveydestä, jottei kuivauslaitteistoilla tarpeettomasti kuivatettaisi ulkoilmaa. (4.)

Rakenteen lämpötilan noustessa yli  $+25...30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :seen luonnollinen kuivuminen nopeutuu merkittävästi (6, 32). Tällöin rakenteen sisäinen vesihöyryn osapaine nousee, ja rakenteen ja ympäröivän ilman välinen vesihöyryn osapaineen ero kasvaa ja diffuusio nopeutuu. Rakenteita lämmitettäessä on syytä huomioida, että materiaalien lämmittäminen voi siirtää kosteutta myös rakenteen sisälle päin, jolloin jonkin toisen rakennosan kosteus voikin nousta. Ko. ilmiötä tulee varoa, ja tarvittaessa varmistua riittävin kosteusjakaumamittauksin rakenteen kosteuspitoisuudesta kuivatuksen jälkeen. (4.)



Kuva 4. Periaatekuvaa betonin kuivumisesta. Kosteus siirtyy rakenteen pintaan josta sisäilmaan, jota hallitaan koneellisesti.

## 2.2 Veden painovoimainen siirtyminen

Vesi kulkee alaspäin painovoiman vaikutuksesta. Vinoilla pinnoilla aiheutuu sivuttaista siirtymistä, mutta suunta on koko ajan alaspäin. Kapillaarisesti vettä imevissä materiaaleissa painovoimaisella siirtymisellä on harvoin merkitystä, sillä kapillaarivoimat ovat useimmiten suurempia kuin painovoima. Karkeissa rakeisissa aineissa kuten sepeleissä on veden painovoimainen siirtyminen mahdollista, vaikka materiaali itsessään olisi kapillaarisesti vettä imevä. (5) Painovoima siis harvoin riittää vastustamaan veden kapillaarista nousua rakenteessa poislukien kapillaarikatkosora ja vastaavat materiaalit.

## 2.3 Veden kapillaarinen siirtyminen $RH > 98 \%$

*Vesi siirtyy kapillaarisessa materiaalissa pääsääntöisesti veden pintajännitysvoimien aiheuttaman huokosalipaineen vaikutuksesta materiaalin ollessa kosketuksessa vapaaseen veteen tai toiseen kapillaarisella kosteusalueella olevaan materiaaliin. Huokosalipaine vaikuttaa materiaalissa kaikkiin suuntiin, joten vesi voi siirtyä kapillaarisesti kaikkiin suuntiin. Kapillaarinen kosteustasapaino on saavutettu, kun kosteus on noussut korkeudelle, jossa huokosalipaine ja maan vetovoima ovat tasapainossa.*

*Aina kosteustasapaino ei muodostu huokosalipaineen ja maan vetovoima välille, vaan esimerkiksi seinärakenteissa ilmaan haihtuvan kosteuden määrä vaikuttaa myös siihen, miten korkealle kosteus rakenteessa nousee. Eli tällöin kyseessä on dynaaminen tasapainotilanne kapillaarisesti siirtyvän ja haihtumalla poistuvan kosteuden välillä. Myös rakenteita ympäröivän ilman kosteudella on suuri merkitys, koska jos ilman kosteus on 100% ei ilma voi ottaa vastaan rakenteista haihtuvaa kosteutta, vaan kapillaarinen siirtyminen rakenteessa jatkuu. (5.)*

*Eri materiaaleilla on erilainen kyky siirtää kosteutta kapillaarisesti. Esimerkiksi tiilellä kapillaarinen vedentunkeutumiskerroin on n. 10 kertaa suurempi kuin betonilla jonka vesisementtisuhde on 0.3. Samoillakin materiaaleilla, kuten poltetuilla tiilillä, voi olla merkittäviä eroja veden kapillaarisessa siirtonopeudessa koska materiaalien huokosjakaumat voivat vaihdella merkittävästi eri tuotteissa. (5.)*

Hyviä esimerkkejä kyseisestä ilmiöstä vesivahinkojen yhteydessä on alapohjan tupla-laattarakenne, jossa eristetilassa on irtovettä ja tiiliseinä lähtee pohjalaatan päältä. Kahitiiliseinäessä kosteus nousee kapillaarisesti korkeammalle ja nopeammin kuin punaisesta poltetusta tiilestä muuratussa seinässä.

## 2.4 Vesihöyryn siirtyminen diffuusiolla $RH < 98 \%$

*Vesihöyry siirtyy diffuusiolla suuremmasta vesihöyrypitoisuudesta pienempää (= suuremmasta vesihöyryn osapaineesta pienempään). Mitä suurempi vesihöyrypitoisuuden ero rakenteen eri puolilla on, sitä voimakkaampi on diffuusiovirtaus. Vesihöyryn kulkuun vaikuttaa vesihöyrypitoisuuseron lisäksi vesihöyrynläpäisevyys. Vesihöyryn läpäisevyydessä on materiaalikohtaisesti suuret erot. (5)*

Diffuusion vaikutuksesta voidaan kosteutta siirtää lämmitysvaiheessa syvemmälle kuivattavaa rakennetta. Ilmiö on havaittavissa alkuvaiheissa lämmitysjakson aikana, kun betonin pintaosan lämpötila ja vesihöyryn osapaine on korkeampi kuin betonin pohjaosien. Tällöin kosteutta voi siirtyä syvemmälle betoniin.

Tasotteilla ja liimoilla voi olla suurempi vesihöyrynvastus kuin betonilla, joten kuivattaessa lattiabetonia tulee tasoitteet ja liimat poistaa betonin pinnalta.

## 2.5 Vesihöyryn siirtyminen ilmavirtauksien mukana eli konvektio)

Vesihöyry siirtyy ilmavirtauksien mukana, koska vesihöyry on yksi osa ilmaseoksesta.

(5) Tämä on yleisesti käytetty kuivausmuoto kuivattaessa materiaaleja, joiden läpi saadaan johdettua ilmaa hallitusti. Esimerkkinä vesivahinkokohteissa kastunut alapohjan tuplalaattarakenne kovalla mineraalivillaeristeellä. Kuivattaessa kyseistä rakennetta luodaan eristetilaan yli- tai alipaine kuivalla ilmalla. Näin kostea ilma saadaan korvattua kuivalla ilmalla. Betonin kuivattamisessa ei käytetä kyseistä menetelmää, koska betonikerroksen läpi ei pystytä luomaan ilmavirtaa. Kuivattaessa huokoisia materiaaleja, joiden läpi pystytään johtamaan ilmaa, on menetelmä tehokas.

## 3 KOEJÄRJESTELYT

### 3.1 Kokeen suorituspaikka

Suorituspaikalla oli muutama kriteeri, jotta koe saadaan luotettavasti suoritettua. Paikan, jonne koelaboratorio kasattiin, tuli olla riittävän suuri, jotta kaikki kuusi 1 200 x 600 millimetristä koepalaa saatiin aseteltua riittävän väljästi. Koepalojen tuli olla riittävän etäällä toisistaan, ettei viereisen palan lämpö vaikuta toiseen tutkittavaan palaan. Myöskään koetilan huoneen lämpötila ei saa liiaksi muuttua koejakson aikana. Kokeen suorituspaikaksi valittiin Kotkan Jylpyllä sijaitseva Polygon Finlandin toimipaikka. Moni asia puolsi paikan valintaa: hallissa oli riittävästi tilaa kokeen suorittamista varten, kalusto koetta varten oli lähellä, hallissa oli riittävästi sähköä tarjolla sekä koepaikka oli myös työpaikkani, joten kokeen etenemistä oli helppo valvoa.

### 3.2 Betoni

Ihanteellisessa tilanteessa betoniksi olisi löytynyt jostain vanhaa, mielellään yli 2 vuotta vanhaa betonia, jotta betoni olisi käyttänyt kovettumisreaktioon tarvitsemansa veden ja huokosrakenne olisi vakiintunut. Samalla olisi voitu seurata betonin kuivumisaikaa. Vanhalla ja uudella betonilla on erilainen kuivumisaika, vanhan betonin kuivuessa hitaammin. Vanhetessaan betonin huokosrakenne muuttuu ja tiivistyy hydrataation vaikutuksesta. Tämä hidastaa vanhan betonin kuivumista verrattuna uuteen betoniin.

Betonia kyseltiin muutamalta elementtitehtaalta sitä kuitenkaan löytämättä. Elementtitehtailla oli tarjota kokeeseen minimissään 200 millimetriä paksuja elementtejä, eikä aikataulun puitteissa ollut varaa jäädä odottelemaan sopivaa purkukohdettakaan, josta betonia olisi mahdollisesti saatu hankittua.

Näin ollen päädyttiin valamaan omat koepalat pikabetonista. Hallilla olleesta Fescon pikabetonista valettiin 60 x 60-senttimetrinen koepala. Koepalan kuivuttua luonnollisesti noin viikon verran hallissa olisi koepala ollut valmis pinnoitettavaksi. Todettiin, että koepaloissa käytetty betoni sopii tehtävään ja että valujen annetaan kuivua noin viikon verran ennen kokeen aloittamista. Kuvassa 5 on koepalan kosteuden tarkkailua ja siihen käytettyä kalustoa.



Kuva 5. Testipala betonia ja sen tarkkailuun käytetty laitteisto.

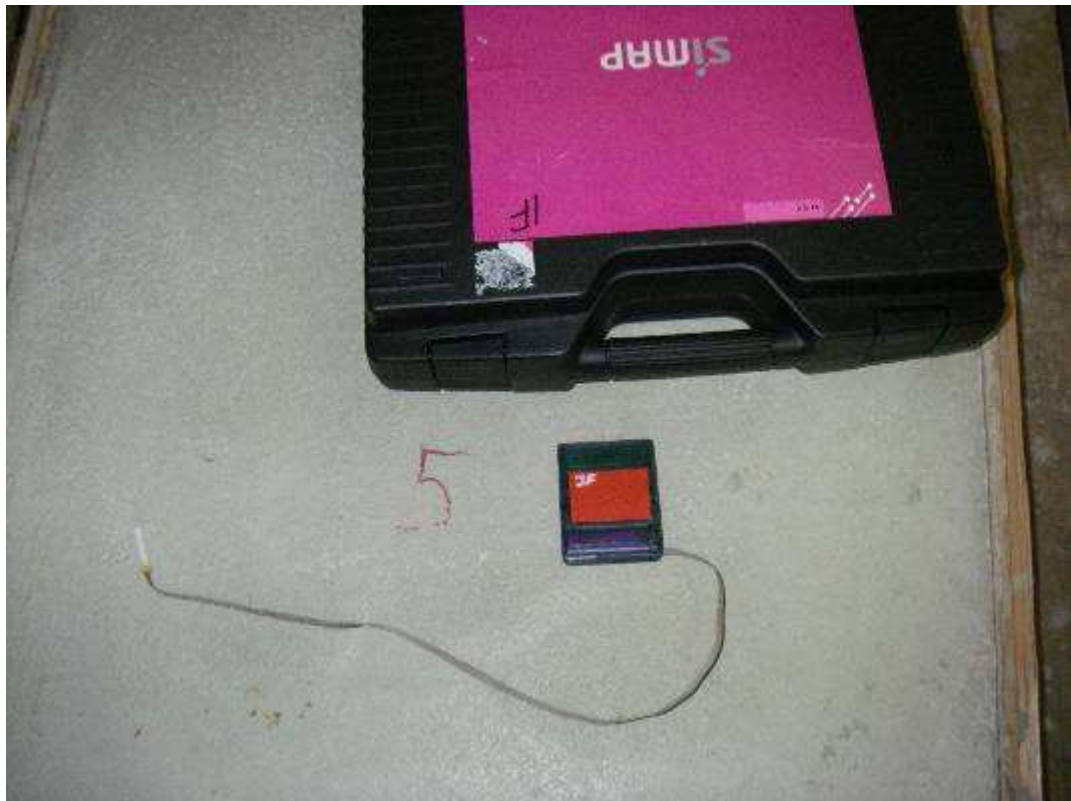
Koska tarkoituksena ei ole tutkia betonin kuivumisaikaa vaan parasta menetelmää ohjata/ajastaa lämpölevyjä betonin kuivattamiseksi, ei betonin iällä juurikaan ole väliä. Vaikkakin lämpötilan nosto nopeuttaa betonin hydrataatiota, ei tällä ominaisuudella katsottu olevan vaikutusta tuloksiin. Riittää, kunhan tutkitaan, millä ohjauksella tasalaatuisista betoneista koepala kuivuu nopeinten, mikä on kosteuden siirtymisen suunta ja mikä on vesihöyryn osapaine koepalojen eri syvyyksillä.



### 3.3 Mittalaitteisto

Koetta varten vuokrattiin tallentava mittauslaitteisto eli dataloggeri, jolla voitiin mitata ja tallentaa lämpötilaa ja betonin suhteellista kosteutta. Laitteisto päivitti tiedot reaaliaikaisesti, ja tiedot olivat luettavissa Internetin kautta. Anturit itsessään ovat halkaisijaltaan noin 5 millimetriä paksuja ja 2 senttimetriä pitkiä. Anturit porattiin betoniin 20, 40 ja 60 millimetrin syvyyteen. Tällä pyrittiin saamaan hyvä kuva betonilaatan kosteusjakaumasta. Anturit asennettiin silikoniputkeen, joka toimi mittaholkkina tiivistäen porareian seinämät, jotta mittaustulos saataisiin oikealta syvyydeltä. Mittaholkit tiivistettiin laatan pinnasta MAL-kitillä. Myös hallin sisäilman kosteutta ja lämpötilaa tallennettiin.

Mittalaitteisto itsessään toimi hyvin, ja tiedot päivittyivät reaaliajassa Internet-portaaliin. Tulosten reaaliaikainen seuraaminen oli välillä hankalaa työpaikan tietokoneisiin suoritettujen päivitysten vuoksi, koska ne tukkivat työpaikan sisäisen verkon ja lamauttivat tietokoneet.



Kuva 6. anturi, dataloggeri ja salkku, joka lähettää tiedot reaaliaikaisesti.



### 3.4 Järjestelyt

Laatat valettiin 26.2.2011 kuormalavojen päälle, jotta saavutettiin parempi liikuteltavuus, havainnollistettu kuvassa 6. Muotit valmistettiin vesivahinkokohteesta puretusta lakatusta lattialankusta. Lakattu puoli aseteltiin betonia vasten. Muottilaudan ollessa lakattu laatta ei pääse kuivumaan sivultaan yhtä hyvin kuin ylöspäin. Muotit aseteltiin 50 mm:n paksun EPS-eristeen päälle, ja sillä simuloitiin alapohjan eristettä, ja näin ollen tehtiin laatasta yhteen suuntaan kuivuva.



Kuva 6. Koepalat hallissa.

Kokeissa päädyttiin käyttämään isoja lämpölevyjä niiden suuremman tehon takia. Ne ovat myös aidoissa kohteissa yleisemmin käytettyjä kuin pienemmät levyt. Kuvassa 7. on esitelty erikokoiset lämpölevyt. Niitä ohjattiin ajastimilla valittujen jaksotusaikojen mukaan ja ohjauskeskuksilla, jotka mittaavat betonilaatan lämpötilaa anturin kautta. Ohjauskeskukseen asetetaan haluttu betonilaatan lämpötila ja haluttu hystereesi eli lämpötilan vaihteluväli. Lämpötila-anturi asennettiin betonilaattaan noin 10 mm:n syvyyteen poraamalla sille reikä. Aikajaksotukset valittiin niin, että lämmitys- ja jäähdytysjaksoja tulee X määrä vuorokaudessa, eli lämmitysjakson + jäähdytysjakson yhteenlaskettu aika on jaollinen 12:lla.



Kuva 7. Lämpölevykuivaimet vasemmalta oikealle: 60x120 cm, 600 W; 60x60 cm , 300 W; 30x120 cm 300 W.

Jaksotuksina käytettiin seuraavia jaksotuksia:

1. Kello ohjattu lämmitys 6 h jäähditys 6 h
2. Kello ohjattu lämmitys 5 h jäähditys 3 h
3. Kello ohjattu lämmitys 3 h jäähditys 5 h
4. Kello ohjattu lämmitys 2 h jäähditys 2 h
5. Ohjauskeskuksella ohjattu lämmitys 65 °C hystereesi 20 °C
6. Ohjauskeskuksella ohjattu lämmitys 65 °C hystereesi 10 °C

Koepaloja kuivattiin noin viikon ajan, minkä jälkeen lämpölevyt sammutettiin ja lämpötilan annettiin tasaantua. Tasaantumisen aikana kosteuden käyttäytymistä eri syvyyksillä seurattiin. Muutaman päivän tasaantumisen jälkeen lämpölevyt laitettiin takaisin päälle. Nyt asennettiin myös apupuhaltimeja, jotka olivat koko ajan päällä. Näin

saatiin havainnointia puhaltimien vaikutusta. Puhaltimia pidettiin päällä muutama päivä, minkä jälkeen puhaltimet sammutettiin.

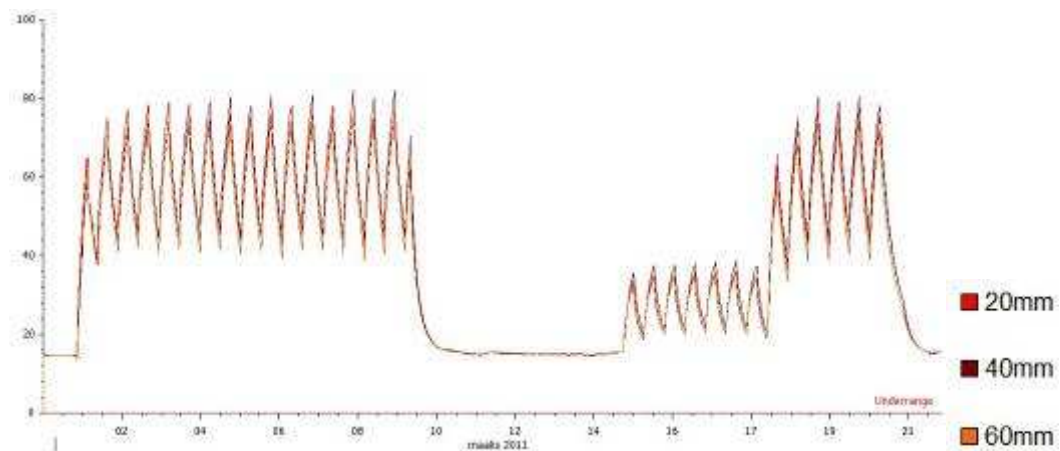
Koepaloille suoritettujen kokeiden jälkeen tehtiin toinen koe, jossa tutkittiin huonetilan sisäilman lämpötilaa jos huoneen pinta-alaa vastaava määrä lämpölevyjä asennetaan huonetilaan. Kokeella simuloitiin tilannetta, jossa esimerkiksi wc:n tai pesuhuoneen lattia on kokonaan kastunut ja se kuivattaisiin lämpölevyillä.

## 4 TULOKSET

Kuvissa on esitetty lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja absoluuttisen kosteuden arvot kokeen aikana 20, 40 ja 60 millimetrin syvyydeltä. Eri syvyydet on erotettu eri väreillä toisistaan, mutta kaikissa kuvissa ei niiden havaitseminen tässä mittakaavassa ole mahdollista.

### 4.1 Kello ohjattu lämmitys 6 h, jäähdytys 6 h

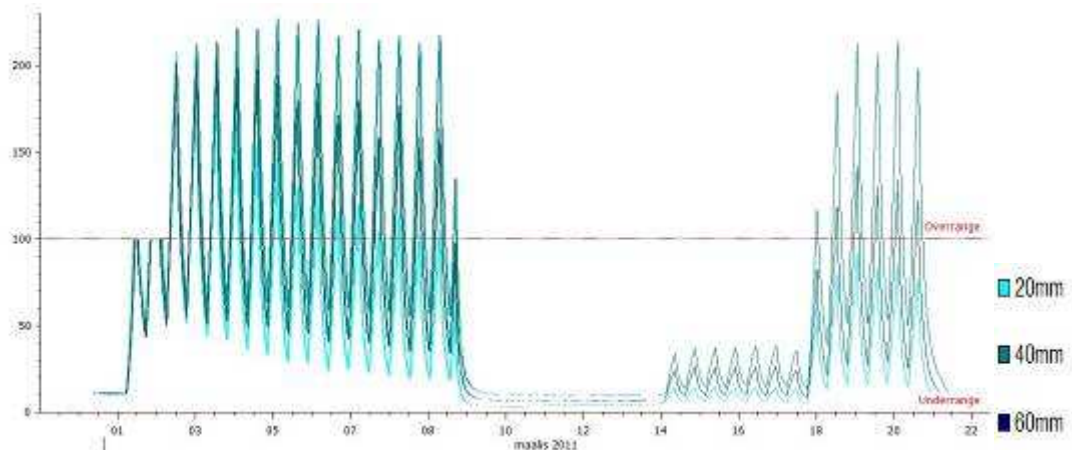
Tällä ohjauksella saavutettiin maksimissaan 20 mm:n syvyydellä 80 °C:n lämpötila koejakson aikana. Vastaavasti lämpötilat 40 mm:n ja 60 mm:n syvyydellä samalla hetkellä olivat 73 °C ja 75 °C. Jäähdytysjakson päätteeksi lämpötilat samoista mitta-pisteistä olivat 44 °C, 41 °C ja 45 °C. Tuuletuksen ollessa päällä koko ajan lämpötilat nousivat 20 mm:n syvyydellä vain 35 °C sekä 40 mm:n syvyydellä 36 °C ja 60 mm:n syvyydellä 38 °C. Lämpötilat on esitetty kuvassa 8.



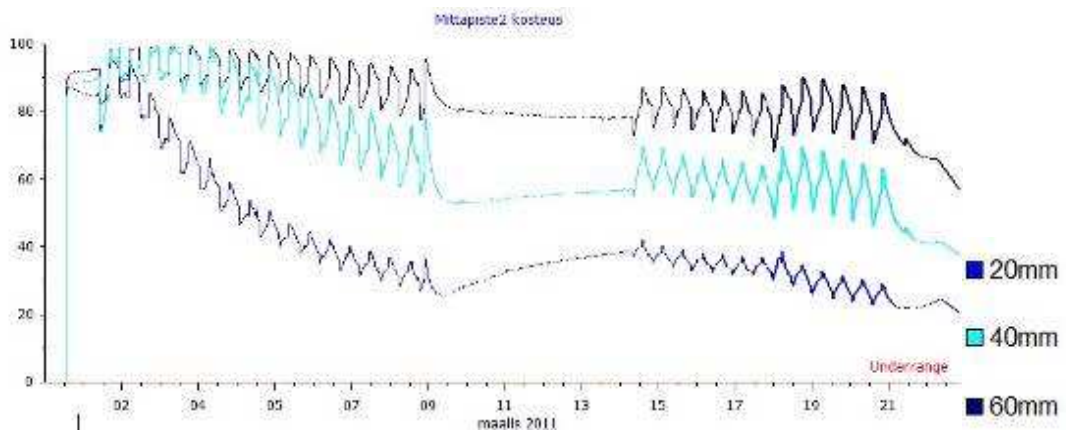
Kuva 8. Lämpötilan kuvaaja kokeen aikana.

Absoluuttisen kosteuden erot alkavat selvästi hahmottua ensimmäisen kuivausviikon puolessa välissä pinta ja pohjaosien absoluuttisen kosteuden eron kasvaessa. Tämä on

havainnollistettu kuvassa 9. Kuvassa 10 suhteellisen kosteuden kuvaajasta käy hyvin ilmi tasaantumisjaksolla tapahtuva pintaosan RH:n nousu ja eri syvyyksien kosteuksien pyrkimys tasaantua.



Kuva 9. Betonin absoluuttinen kosteus kokeen aikana.



Kuva 10. Suhteellisen kosteuden kuvaaja kokeen aikana.

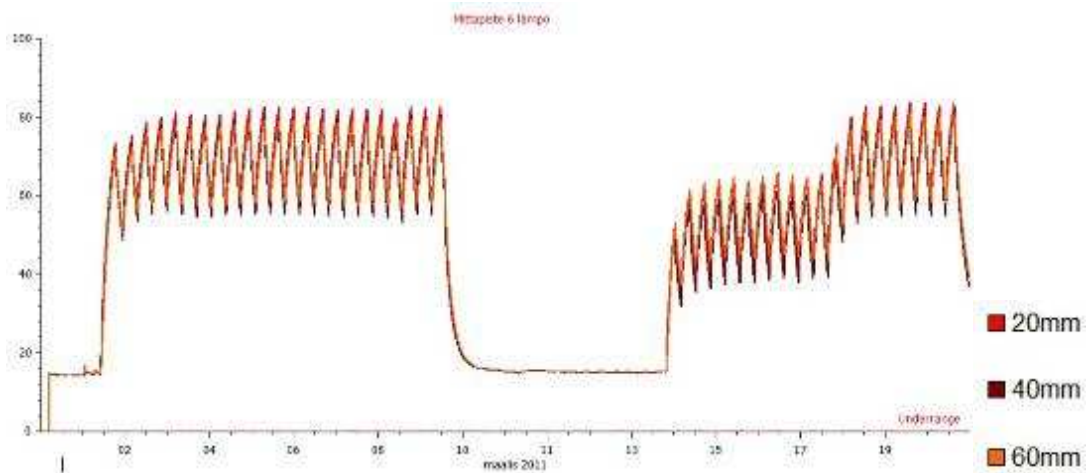
Lähtöarvot olivat 1.3.2011 klo 6.00 seuraavat: 20 mm: RH 85 % - 14,5 °C, 40 mm: RH 89 % - 14,5 °C ja 60 mm: RH 92 % - 14,5 °C. Saavutetut arvot olivat 12.3.2011 klo 6.00 noin vuorokauden jälkeen lämmityksen lopettamisesta seuraavat: 20 mm: RH 34 % - 15 °C, 40 mm: RH 55 % - 15°C ja 60 mm: RH 79 % - 15°C.

#### 4.2 Kello ohjattu lämmitys 5 h, jäädytys 3 h

Tällä ohjauksella saavutettiin maksimissaan 20 mm:n syvyydessä 82 °C:n lämpötila koejakson aikana. Vastaavasti lämpötilat 40 mm:n ja 60 mm:n syvyydessä samalla

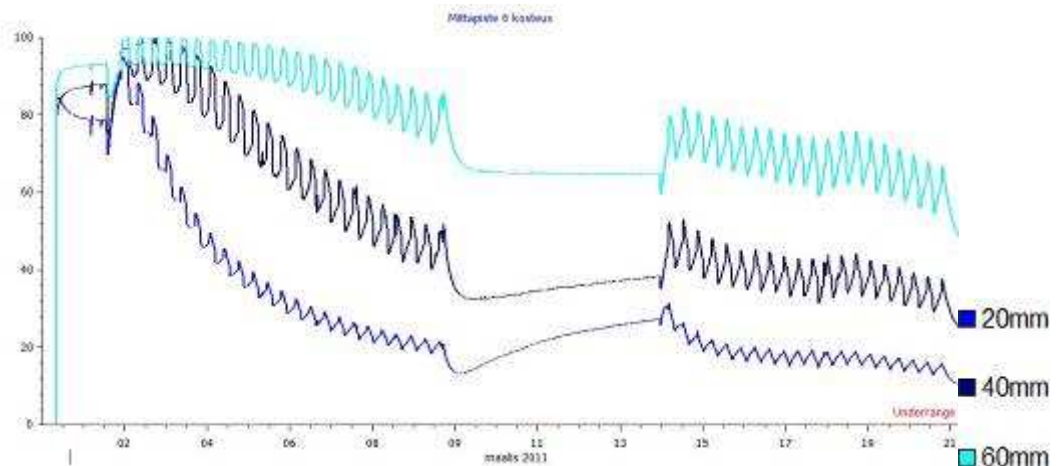


hetkellä olivat 79 °C ja 78 °C. Jäähdytys jakson päätteeksi lämpötilat samoista mitta-pisteistä olivat 58 °C, 56 °C ja 59 °C. Tuuletuksen ollessa päällä koko ajan lämpötilat nousivat 20 mm:n syvyydessä vain 64 °C, sekä 40 mm:n syvyydessä 59 °C ja 60 mm:n syvyydessä 64 °C. Lämpötilat on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Lämpötilan kuvaaja kokeen aikana.

Tästä koekappaleesta ei saatu teknisten ongelmien vuoksi absoluuttisen kosteuden kuvaajaa. Tasaantumisajan tuloksista ja suhteellisen kosteuden kuvaajasta voidaan kuitenkin päätellä tämänkin koekappaleen kuivuneen hyvin. Suhteellisen kosteuden tulokset näkyvät kuvassa 12.



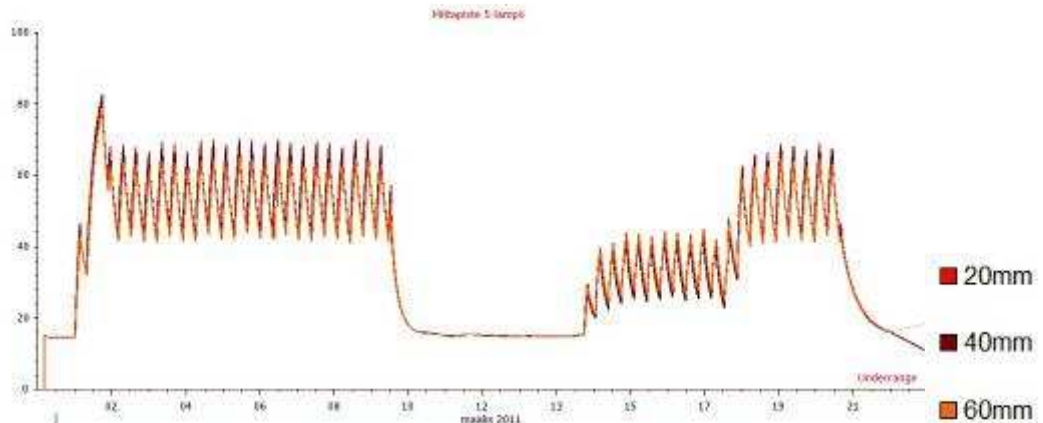
Kuva 12. Suhteellisen kosteuden kuvaaja kokeen aikana.

Lähtöarvot olivat 1.3.2011 klo 6.00 seuraavat: 20 mm: RH 80 % - 14,5 °C, 40 mm: RH 87 % - 14,5 °C ja 60 mm: RH 93 % - 14,5 °C. Saavutetut arvot olivat 12.3.2011

klo 6.00 noin vuorokauden jälkeen lämmityksen lopettamisesta seuraavat: 20 mm: RH 23 % - 15 °C, 40 mm: RH 35% - 15°C ja 60 mm: RH 65 % - 15°C.

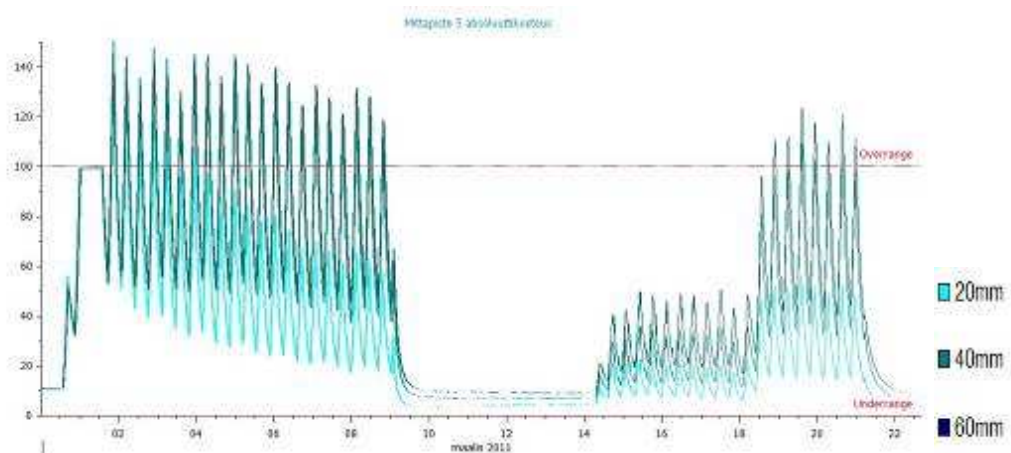
#### 4.3 Kello ohjattu lämmitys 3 h, jäähdytys 5 h

Tällä ohjauksella saavutettiin maksimissaan 20 mm:n syvyydellä 68 °C:n lämpötila koejakson aikana. Vastaavasti lämpötilat 40 mm:n ja 60 mm:n syvyydellä samalla hetkellä olivat 66 °C ja 63 °C. Jäähdytysjakson päätteeksi lämpötilat samoista mitta-pisteistä olivat 43 °C, 43 °C ja 43 °C. Tuuletuksen ollessa päällä koko ajan lämpötilat nousivat 20 mm:n syvyydessä vain 42 °C sekä 40 mm:n syvyydessä 41 °C ja 60 mm:n syvyydessä 43 °C. Lämpötilat on esitetty kuvassa 13.



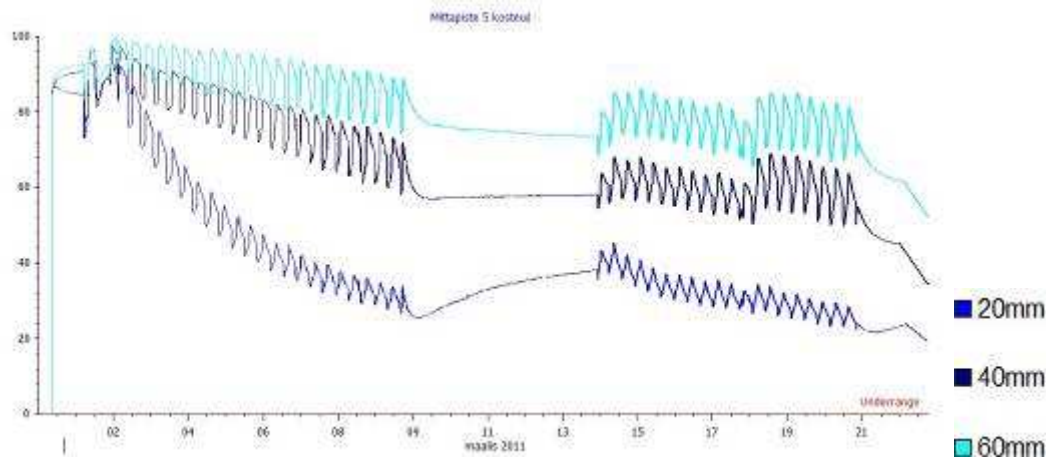
Kuva 13. Lämpötilan kuvaaja kokeen aikana.

Kuvassa 14 on esitetty absoluuttisen kosteuden kuvaaja eri syvyyksistä. Tämänkin koekappaleen/jaksotuksen tulokset osoittavat betonin kuivuvan ylöspäin.



Kuva 14. Absoluuttisen kosteuden kuvaaja kokeen aikana.

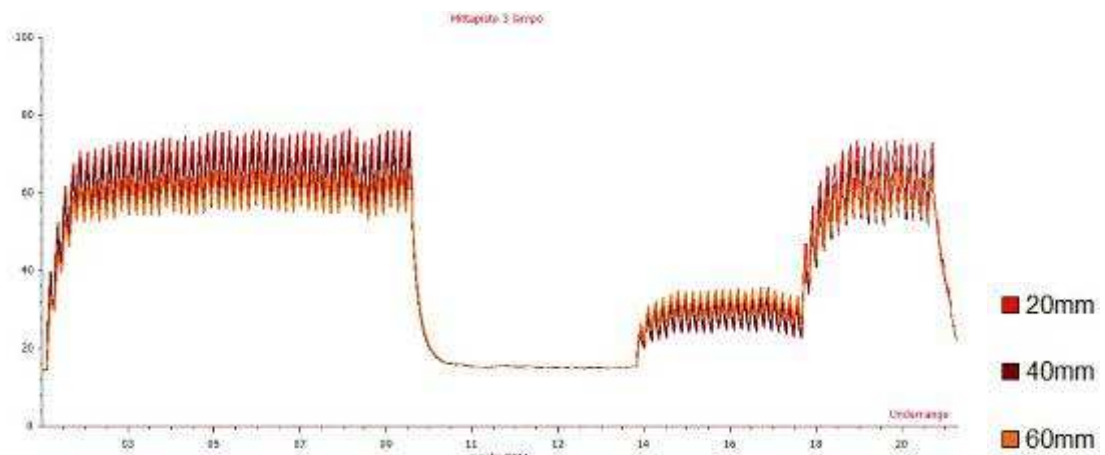
Lähtöarvot olivat 1.3.2011 klo 6.00 seuraavat: 20 mm: RH 85 % - 14,5 °C, 40 mm: RH 90 % - 14,5 °C ja 60 mm: RH 92 % - 14,5 °C. Saavutetut arvot olivat 12.3.2011 klo 6.00 noin vuorokauden jälkeen lämmityksen lopettamisesta seuraavat: 20 mm: RH 36 % - 15 °C, 40 mm: RH 58% - 15°C ja 60 mm: RH 74 % - 15°C. Suhteellinen kosteus on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Suhteellisen kosteuden kuvaaja kokeen aikana.

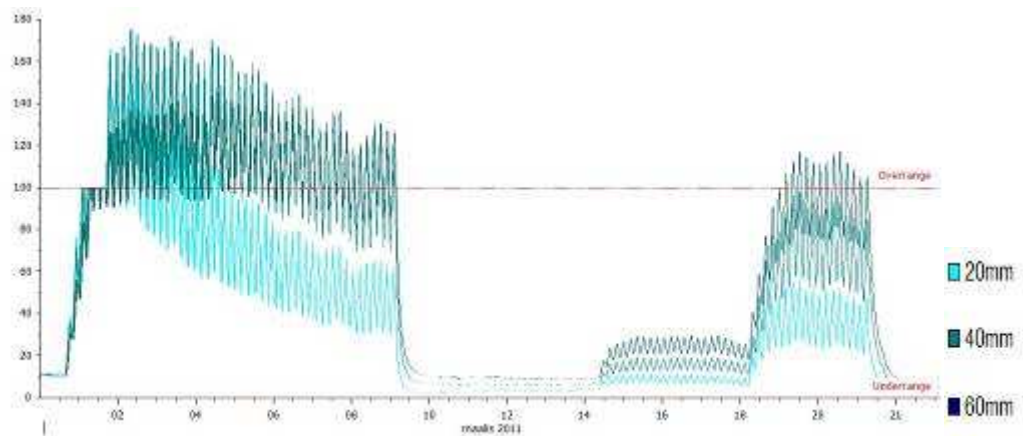
#### 4.4 Kello ohjattu lämmitys 2 h, jäähdytys 2 h

Tällä ohjauksella saavutettiin maksimissaan 20 mm:n syvyydellä 73 °C:n lämpötila koejakson aikana. Vastaavasti lämpötilat 40 mm:n ja 60 mm:n syvyydellä samalla hetkellä olivat 69 °C ja 64 °C. Jäähdytysjakson päätteeksi lämpötilat samoista mitta-pisteistä olivat 57 °C, 56 °C ja 54 °C. Tuuletuksen ollessa päällä koko ajan lämpötilat nousivat 20 mm:n syvyydessä vain 32 °C sekä 40 mm:n syvyydessä 31 °C ja 60 mm:n syvyydessä 34 °C. Lämpötilat näkyvät kuvassa 16.



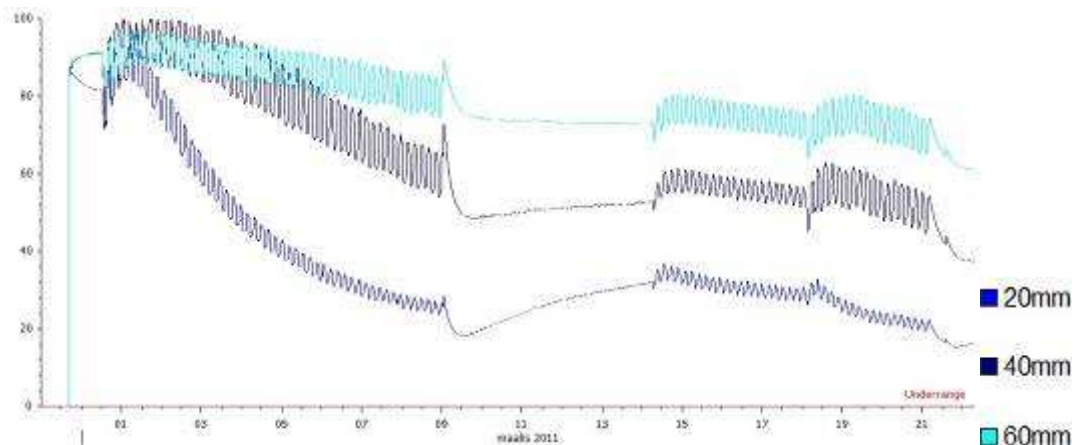
Kuva 16. Lämpötilan kuvaaja kokeen aikana.

Kuvassa 17 on havaittavissa selkeästi pintaosan kuivuminen kokeen ensimmäisen viikon aikana.



Kuva 17. Absoluuttisen kosteuden kuvaaja kokeen aikana.

Lähtöarvot olivat 1.3.2011 klo 6.00 seuraavat: 20 mm: RH 82 % - 14,5 °C, 40 mm: RH 91 % - 14,5 °C ja 60 mm: RH 91 % - 14,5 °C. Arvot olivat 12.3.2011 klo 6.00 noin vuorokauden jälkeen lämmityksen lopettamisesta seuraavat: 20 mm: RH 27 % - 15 °C, 40 mm: RH 51% - 15°C ja 60 mm: RH 73 % - 15°C. Suhteellinen kosteus on luettavissa kuvasta 18.



Kuva 18. Suhteellisen kosteuden kuvaaja kokeen aikana.

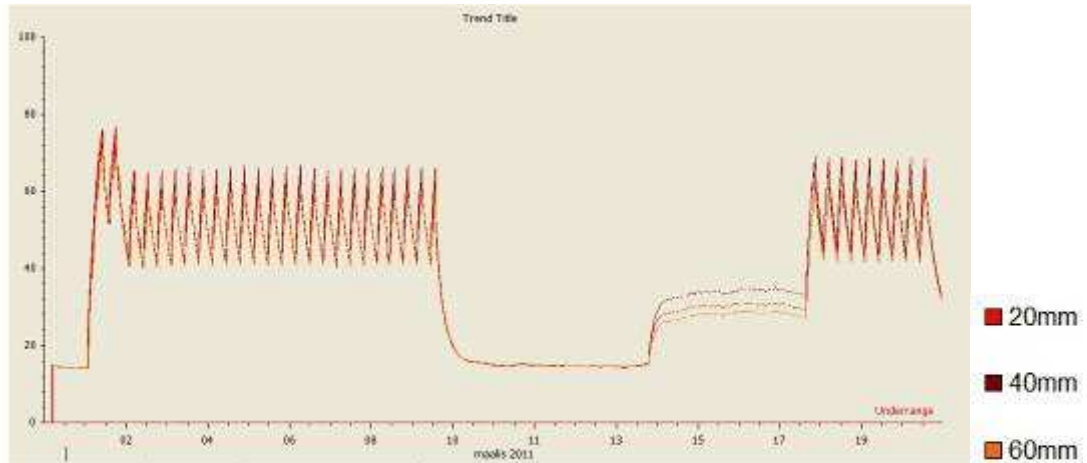
#### 4.5 Ohjauskeskuksella ohjattu lämmitys 65 °C, hystereesi 20 °C

Tällä ohjauksella saavutettiin maksimissaan 20 mm:n syvyydellä 66 °C:n lämpötila koejakson aikana. Vastaavasti lämpötilat 40 mm:n ja 60 mm:n syvyydellä samalla hetkellä olivat 62 °C ja 58 °C. Lämmitysjakson pituus oli noin 2 tuntia 40 minuuttia.



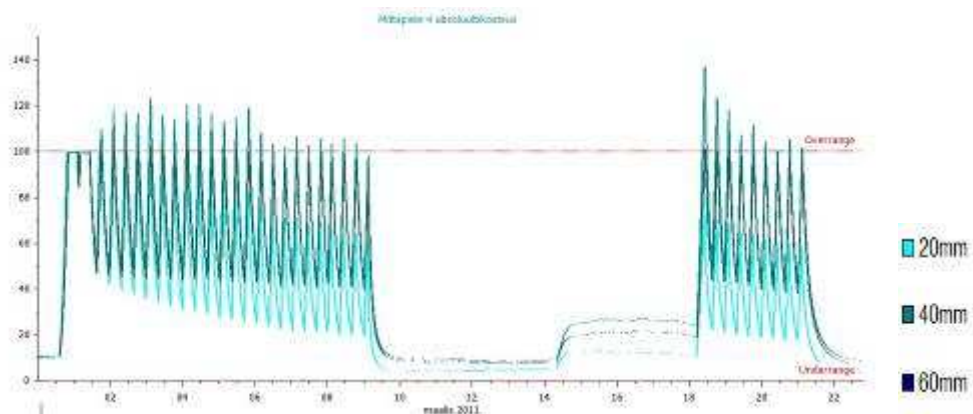
Tuuletuksen ollessa päällä koko ajan lämpötilat nousivat 20 mm:n syvyydessä vain 31 °C sekä 40 mm:n syvyydessä 35 °C ja 60 mm:n syvyydessä 29 °C. Betoni ei siis saavuttanut tavoiteltua lämpötilaa.

Jäähdytysjakson aikana alhaisimmat saavutetut lukemat olivat 20 mm:n syvyydessä 41,5 °C, 40 mm:n syvyydessä 41 °C ja 60 mm:n syvyydessä 40,5 °C. Jäähdytysjakson pituus oli noin 5 tuntia 15 minuuttia. Tiedot on luettavissa kuvasta 19.



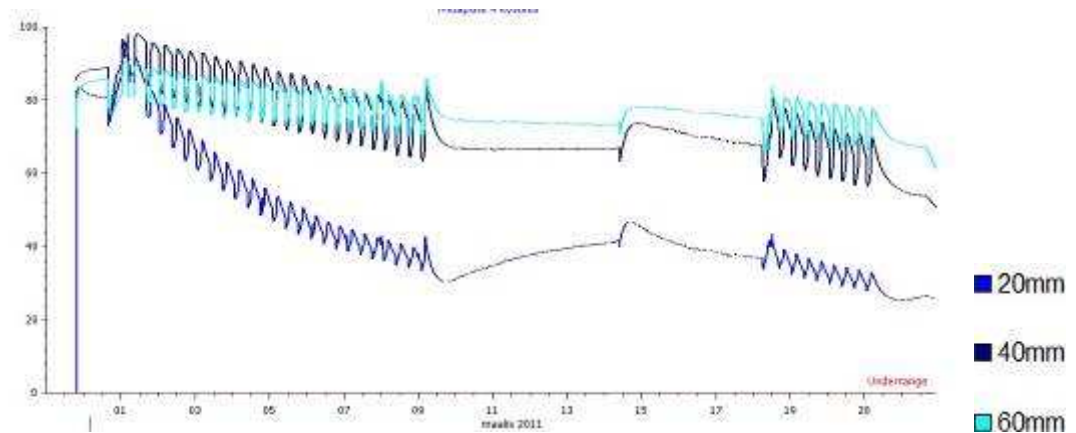
Kuva 19. Lämpötilan kuvaaja. Kokeen alussa ohjauskeskuksen parametrit olivat väärin. Näitä tuloksia ei huomioida.

Absoluuttisen kosteuden tulokset kuvassa 20.



Kuva 20. Absoluuttisen kosteuden kuvaaja kokeen aikana.

Lähtöarvot olivat 1.3.2011 klo 6.00 seuraavat: 20 mm: RH 81 % - 14,5 °C, 40 mm: RH 89 % - 14,5 °C ja 60 mm: RH 86 % - 14,5 °C. Saavutetut arvot olivat 12.3.2011 klo 6.00 noin vuorokauden jälkeen lämmityksen lopettamisesta seuraavat: 20 mm: RH 37 % - 15 °C, 40 mm: RH 67% - 15 °C ja 60 mm: RH 74 % - 15°C. Suhteellisen kosteuden tulokset on esitetty kuvassa 21.

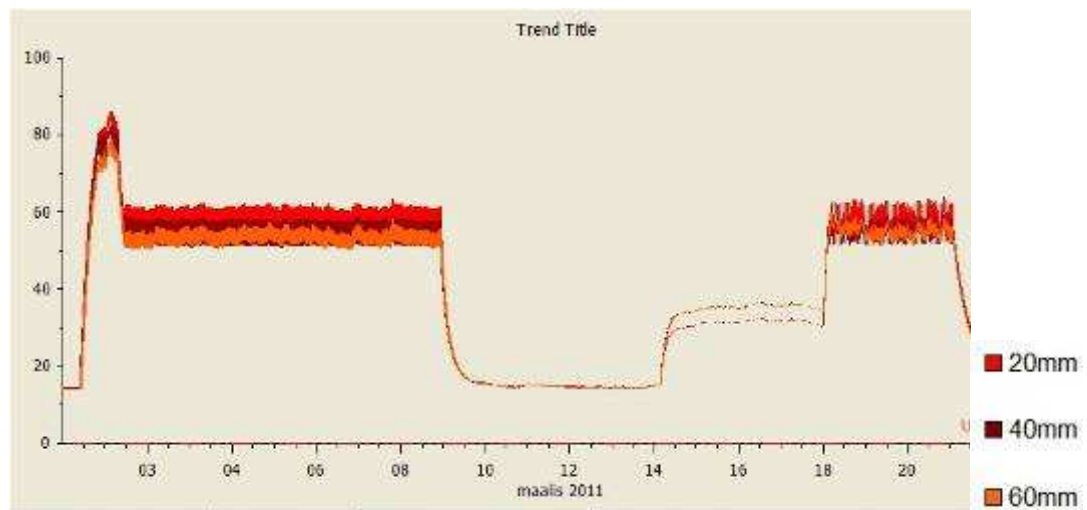


Kuva 21. Suhteellisen kosteuden kuvaaja kokeen aikana.

#### 4.6 Ohjauskeskuksella ohjattu lämmitys 65 °C, hystereesi 10 °C

Tällä ohjauksella saavutettiin maksimissaan 20 mm: syvyydessä 62 °C lämpötila koejakson aikana. Vastaavasti lämpötilat 40 ja 60 mm:n syvyydessä samalla hetkellä olivat 58 °C ja 55 °C. Lämmitysjakson pituus oli noin 30 minuuttia.

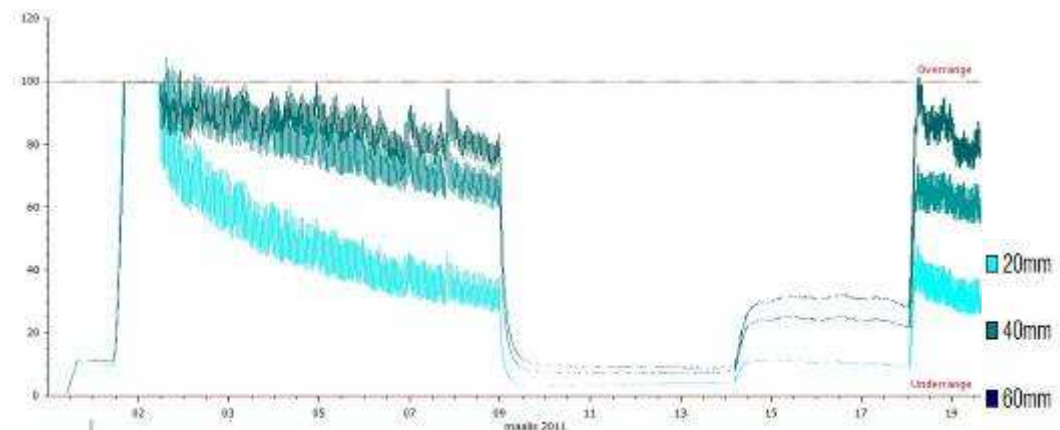
Tuuletuksen ollessa päällä koko ajan lämpötilat nousivat 20mm syvyydellä vain 32 °C sekä molemmissa 40mm:n ja 60 mm:n syvyydellä 36 °C. Tavoiteltua lämpötilaa ei saavutettu tuuletuksen ollessa päällä lämmityksen aikana: 14. - 18. maaliskuuta väliseltä ajalta. Tämän voi havaita kuvasta 22.



Kuva 22. Lämpötilan kuvaaja. Kokeen alussa ohjauskeskuksen parametrit olivat väärin. Näitä tuloksia ei huomioida.

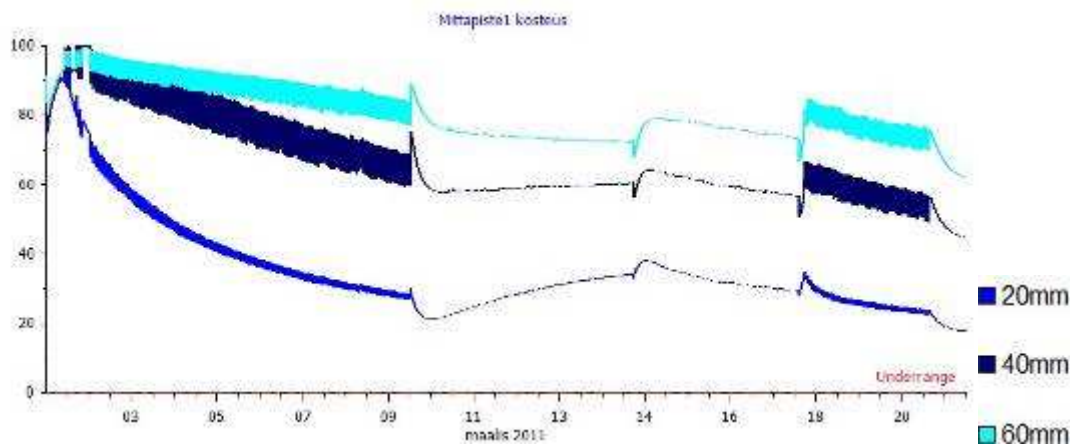
Jäähdytys jakson aikana alhaisimmat saavutetut lukemat olivat 20 mm:n syvyydessä 53.5 °C, 40 mm:n syvyydessä 51 °C ja 60 mm:n syvyydessä 52 °C. Jäähdytysjakson pituus oli noin 45–50 minuuttia.

Kuvassa 23 on esitetty absoluuttisen kosteuden käyttäytymistä.



Kuva 23. Absoluuttisen kosteuden kuvaaja kokeen aikana.

Lähtöarvot olivat 1.3.2011 klo 6.00 seuraavat: 20 mm: RH 81 % - 14,5 °C, 40 mm: RH 90 % - 14,5 °C ja 60 mm: RH 91 % - 14,5 °C. saavutetut arvot olivat 12.3.2011 klo 6.00 noin vuorokauden jälkeen lämmityksen lopettamisesta seuraavat: 20 mm: RH 29 % - 15 °C, 40 mm: RH 59 % - 15 °C ja 60 mm: RH 74 % - 15°C. Suhteellinen kosteus on luettavissa kuvasta 24.

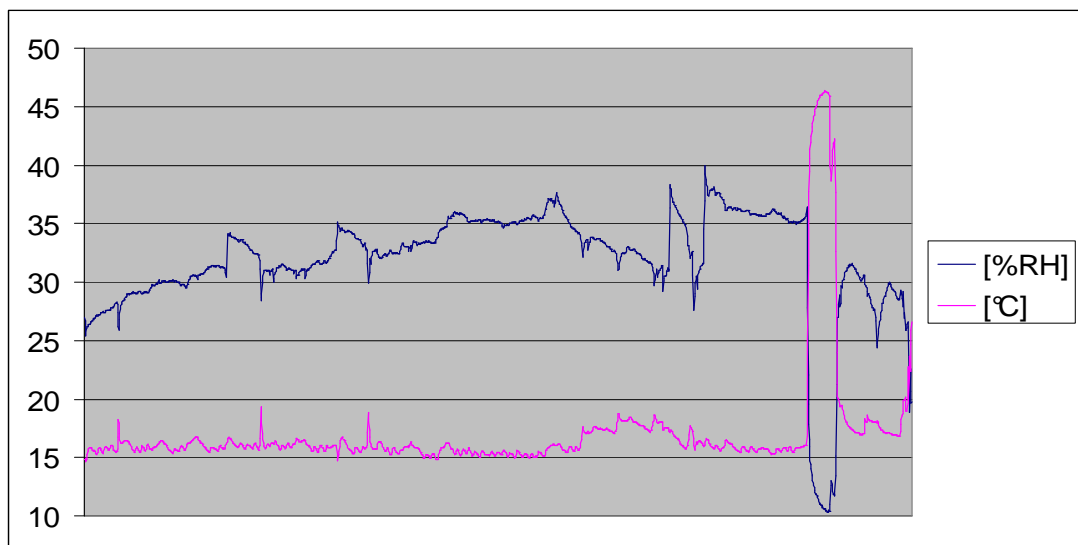


Kuva 24. Suhteellisen kosteuden kuvaaja kokeen aikana.

#### 4.7 Sisäilma

Hallin sisäilmaa datalogattiin kokeen ajan ja sisäilmasta tallennettiin lämpötila ja kosteus. Mittapiste sijaitsi noin 180 senttimetrin korkeudella. Hallin korkeus on noin 4,5 metriä. Hallin sisäilma pysyi kokeen ajan noin 15- 17 °C. Sisäilman kosteus nousi RH 25 %:sta noin RH 35 %:iin.

Kuvassa 25 kuvaajan loppuosassa oleva noin vuorokauden mittainen poikkeama on ajalta, jolloin kokeiltiin lämpölevyjen vaikutusta sisäilman lämpötilaan, jos huonetilan koko lattiapinta peitettäisiin lämpölevyillä. Koepaikkana toimi hallin yksi suljettu ves-sakoppi johon asennettiin pohjapinta-alaa vastaava määrä lämpölevyjä. Lämpötila kohosi kolmessa tunnissa yli 40 °C, ja vuorokauden lämmityksen aikana saavutettiin 46 °C:n lämpötila.



Kuva 25. Sisäilman lämpötila ja kosteus kokeen aikana

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tulosten perusteella kaikki koepalat kuivuivat reilusti noin viikon kuivumisjakson aikana. Koepaloista saavutetut maksimilämpötilat olivat 20 mm:n syvyydeltä 82–62 °C ja 60 mm:n syvyydestä 78 – 55 °C. Tarkasteltaessa mahdollisesti betonissa kulkevia materiaaleja, kuten sähköjohdot ja viemäri- sekä vesiputket, voidaan todeta, että osassa kokeita lämpötila nousi liian korkeaksi.

Käytettäessä lämpölevyjä tulee ottaa huomioon mitä talotekniikkaa betonin sisällä mahdollisesti kulkee ja mitkä ovat niiden pitkäaikaiset lämmönkestot. Muoviset käyttövesiputket PEX-muovista kestävät pitkäaikaisesti +70 °C ja hetkellisesti +95 °C (6), MMJ sähkökaapelin lämmönkesto on +70 °C (7) ja polypropeenisen viemäriputken pitkäaikainen lämmönkesto +85 °C ja hetkellinen +100 °C. PVC-muovisten viemäriputkien lämmönkesto on matalampi. EPS lämmöneriste kestää + 80 °C:n lämpöä (8)

Tulosten perusteella voidaan todeta kuivumisen olevan tehokkaina silloin, kun betonin lämpötila on korkea ja näin ollen vesihöyryn osapaine korkea. Betonirakenteen lämpötila tulee siis saada mahdollisimman korkeaksi vahingoittamatta materiaaleja.

Lämmitettäessä betonia kuivumisjakson alussa nousee pintaosien lämpötila ja vesihöyryn osapaine nousevat suuremmaksi kuin betonin pohjalla. Tällöin betonin pintaosa kuivuu ylös- sekä alaspäin. Alaspäin tapahtuva kuivuminen siis kastelee betonirakenteen alaosia (4.). Saatujen tulosten perusteella ilmiöstä on kuitenkin vaaraa vain kuivumisen alussa. Tätä ei kerrottu lähteissä. Muutaman päivän kuluessa betonin pinta on kuivunut huomattavasti enemmän kuin betonin pohja, eikä pintaosien vesihöyryn osapaine nousut pohjaa korkeammaksi. Tämän perusteella kuivuminen tapahtui pintaa kohti jokaisessa koepalassa. Tämä oli mielenkiintoinen ja yleisestä tiedosta poikkeava havainto, jonka paikkansapitävyys tulisi varmentaa lisätutkimuksilla.

Suunniteltaessa ja asennettaessa kuivausta tulee huolehtia, että sisäilma luo hyvät mahdollisuudet kuivumiselle. Pitää siis pitää huolta, ettei sisäilman kosteus eikä lämpötila muutu liian korkeiksi eikä mataliksi, jotka on mainittu liitteessä 1, sekä ilman tulee liikkua huonetilassa riittävästi. Huoneessa olevat pinnoitemateriaalit saattavat vaurioitua jos lämpötila tai kosteus pääsee karkaamaan. Tulosten perusteella sisäilman

liialliseen lämpötilan nousuun tulee kiinnittää erityistä huomiota jos tilaan tuodaan suuri määrä lämpölevyjä pinta-alan nähden. Liiallista tuuletusta tulee kuitenkin välttää, varsinkin lämmitysjakson aikana, jotta rakenteen lämpötila saadaan kohoamaan.

Tutkimuksen aikana kävi selväksi, ettei yksityiskohtaista ohjeistusta lämmitysjaksotukselle kastuneiden alapohjarakenteiden kuivattamiseksi lämpölevyillä voida tehdä. Jokainen vesivahinkokokohde eroaa toisesta, ja erilaisia muuttujia on lukuisia, ja ne kaikki vaikuttavat huomattavasti kokonaistapahtumaan. Esimerkiksi hieman suurempi ilmanvaihto litraa/m<sup>3</sup> vaikuttaa sisäilman kosteuteen ja lämpötilaan, joka taas vaikuttaa betonin lämpötilaan, joka vaikuttaa lämpölevyjen ohjaukseen/ajastukseen. Yhden muuttujan muuttuminen siis vaikuttaa kaikkiin muihin arvoihin.

Tutkimus herätti myös keskustelua ja ajatuksen laitteesta/ohjauskeskuksesta, jolla hallittaisiin enemmän muuttujia kuin nykyisellä ohjauskeskuksella. Tarvetta olisi koneelle joka hallitsisi betonin lämpötilaa, sisäilman lämpötilaa ja sisäilman kosteutta. Näiden parametrien perusteella kone ohjaisi lämpölevyn ajoitusta, sisäilman kuivausta, sisäilman lämmitystä ja jäähdytystä. Tämän perusteella käyttöohjeessa annetaan perustietoa parhaista kuivumisominaisuuksista, ja kuivauksen asentajan tulee seurata kuivattavan kohteen tilannetta varsinkin kuivauksen alussa hyvin tarkasti.

## LÄHTEET

- (1) Munters Oy materiaali. Saatavissa: <http://www.kvcayr.com/dehum.htm> [viitattu 18.4.2011].
- (2) Ranta, V., Tikkanen, I., Puttonen, J. j& Hirsi, H. 2009. Tasomainen mikroaalto-kuivain betonirakenteen kosteudenhallinnassa. TKK. Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitoksen julkaisuja B:17. Saatavissa: [http://buildtech.tkk.fi/fi/julkaisut/julkaisusarjat/julkaisu\\_b17/](http://buildtech.tkk.fi/fi/julkaisut/julkaisusarjat/julkaisu_b17/) [viitattu 19.4.2011]
- (3) Merikallio, T., Niemi, S. & Komonen, J. 2007. Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen. 2. painos. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
- (4) Sisäilmayhdistys ry. 2008a, Rakenteiden kuivaus, Saatavissa: [http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset\\_tilat/kunnossapito\\_ja\\_korjaaminen/purku\\_\\_kuivaus\\_ja\\_puhdistus/rakenteiden\\_kuivaus/](http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset_tilat/kunnossapito_ja_korjaaminen/purku__kuivaus_ja_puhdistus/rakenteiden_kuivaus/) [viitattu 31.1.2011].
- (5) Sisäilmayhdistys ry. 2008 b, Kosteuden siirtyminen, Saatavissa: [http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset\\_tilat/kosteusvauriot/kosteustekninen\\_toiminta/kosteuden\\_siirtyminen/](http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset_tilat/kosteusvauriot/kosteustekninen_toiminta/kosteuden_siirtyminen/) [viitattu 31.1.2001]
- (6) Tuotekortti, 2008, <http://www.rakennustieto.fi/Downloads/Tarviketieto/pdf/37741.pdf> [viitattu 23.4.2011]
- (7) Kajote Oy, 2010. Tuotekortti. Saatavissa: [http://www.kajote.fi/tuotteet/fi\\_04/pdf/F40350@MMJ%20450%20750.pdf](http://www.kajote.fi/tuotteet/fi_04/pdf/F40350@MMJ%20450%20750.pdf) [viitattu 7.4.2011].
- (8) Rakennustieto OY. 1999. RT-kortti 36-10690. EPS-eristeet: lämmöneristystarvikkeet.