



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TIMO KORKALA

LÄMPÖ- JA KOSTEUSOLOSUHTEIDEN VAIKUTUS BETONIN
KUIVUMISEEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
3. tammikuuta 2018

TIIVISTELMÄ

Tampereen teknillinen yliopisto

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Korkala, Timo: Lämpö- ja kosteusolosuhteiden vaikutus betonin kuivumiseen

Diplomityö, 130 sivua, 27 liitesivua

Toukokuu 2018

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: betonin kuivuminen, kosteusmittaus, kuivumisen mallintaminen, kosteudensiirtyminen, porareikämittaus, näytepalamittaus, kosteusjakauma

Työssä tutkittiin kahteen suunteen kuivuvien betonirakenteiden kuivumista erilaisissa lämpö- ja kosteusolosuhteissa diplomityötä varten valetuista koekappaleista. Mitattuja tuloksia vertailtiin Vahanen Rakennusfysiikka Oy:ssä mallinnettuihin kuivumistuloksiin. Työn tavoitteena oli selvittää betonirakenteiden kuivumisen lämpötilariippuvuutta. Osatavoitteena oli tarkastaa FEM-laskentaan perustuvan laskentamallin tulosten vastaavuutta mitattuihin tuloksiin.

Työn kokeellisessa osassa tutkittiin valettujen koekappaleiden kuivumista erilaisissa lämpö- ja kosteusolosuhteissa. Työssä tutkittiin kolmea betonilaatua yhteensä viidessä eri kuivatusolosuhteessa. Teoriaosuudessa käytiin läpi kosteudensiirtymiseen liittyviä fysiikaalisia ilmiöitä, betonin kuivatustarvetta ja nykyisiä kuivumisen arviointiin käytettäviä menetelmiä.

Korkeampi lämpötila nopeutti koekappaleiden kuivumista huomattavasti. Kuukauden ajan viileässä olosuhteessa säilyttäminen ei pidentänyt koekappaleiden kuivumisaikaa lämpimämpiin kuivatusolosuhteisiin siirtämisen jälkeen. Viileässä olosuhteessa koekappaleet kuivuivat huomattavasti muita olosuhteita hitaammin.

Eri kuivumisolosuhteissa säilytettyjen koekappaleiden kuivuminen ja kosteusjakaumat erosivat toisistaan osin huomattavasti. Sekä kuivumisolosuhteiden lämpötilat, että vesihöyrypitoisuudet erosivat toisistaan. Lisäksi eri vesi-sementtisuhteella valmistettujen betonimassojen kuivumisessa havaittiin selkeä ero. Samalla vesi-sementtisuhteella, mutta eri sementtilaadulla valmistettujen betonimassojen välillä ei havaittu merkittävää eroa kuivumisnopeudessa.

Tutkimuksessa todettiin Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n toteuttamien FEM-laskentaan perustuvien hydrataation huomioivien mallinnusten toimivan muita arviointimenetelmiä tarkemmin betonin kuivumisen arvioinnissa. TorKaS -ohjelmalla saatiin moninkertaisia kuivumisaika-arvioita mitattuihin kuivumisaikoihin verrattuna. BY 1021 -laskentataulukolla määritetyt kuivumisaika-arviot olivat systemaattisesti hieman pidempiä, kuin FEM-laskentaan perustuvat kuivumisaika-arviot ja mitatut kuivumisajat.

ABSTRACT

Korkala Timo: Effect of heat and moisture conditions to concrete drying

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 130 pages, 27 Appendix pages

May 2018

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Juha Vinha

Keywords: concrete, drying, numerical simulation, humidity transfer, humidity distribution

This thesis investigate drying of concrete slabs that can evaporate moisture from top and bottom of the slab. The measured results were compared to the drying results modeled with a numerical simulation model that regards the hydration phenomenon. The numerical simulation model is developed and the simulations used in this thesis were made by Vahanen Building Physics Ltd. The aim of the thesis was to find out the temperature dependence of the humidity distribution in drying concrete structures. The secondary objective was to check the performance and accuracy of calculations made with the numerical simulation model under changing heat and moisture conditions.

In the experimental part of the work, the drying of molded test pieces was examined under various heat and moisture conditions. Three concrete grades were studied in five different drying conditions. Theoretical part presents the physical phenomenon related to moisture transfer, and the need to dry the concrete, and commonly used methods to evaluate the relative humidity in concrete structure.

Higher temperature accelerated the drying of the test pieces considerably. Storage for a month under cool conditions did not prolong the drying time of the test pieces after test pieces were transferred to warmer drying conditions. In a cool condition the test pieces did not dry as effectively as in the other conditions.

The drying and moisture distributions of the test pieces stored under different heat and moisture conditions differed considerably from one another. In addition, there was a clear difference in the drying of the concrete masses prepared with different water-cement ratios. At the same time, there was no significant difference in the drying rate between the concrete masses manufactured with different cement grades but with same water-cement ratio.

The study found out that concrete drying modeled with a numerical simulation model has a reasonable agreement to measured results. Drying time estimates based on modeled drying corresponds better than drying time estimates made with TorkaS estimation software or BY 1021 drying time estimation sheet.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laboratoriolle. Työn aiheesta, rahoituksen hankinnasta ja ohjauksesta vastasi Vahanen Rakennusfysiikka Oy. Tutkimuksen rahoitukseen ja ohjausryhmään osallistuivat: Finnsementti Oy, Lujabetoni Oy, Peikko Finland Oy, Pistesarjat Oy, Rudus Oy, Suomen Betoniyhdistys ry, sekä Vahanen Rakennusfysiikka Oy. Työn ohjaajana toimi Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n asiantuntija diplomi-insinööri Pauli Sekki.

Kiitän kaikkia työn rahoittamiseen ja ohjausryhmään osallistuneita tahoja sekä henkilöitä, jotka panoksellaan mahdollistavat tämän työn tekemisen. Kiitokset myös professori Juha Vinhalle työn tarkastamisesta ja kommentoinnista. Erityisesti haluan kiittää työn ohjaajana toiminnutta Pauli Sekkiä, ohjausryhmän koonnutta Sami Niemeä, sekä muita työn tekemisessä avustaneita Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n työntekijöitä tuesta ja lukuisista neuvoista työn tekemisen yhteydessä.

Tampereella, 30.05.2018



Timo Korkala

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENTEET JA MERKINNÄT	VI
1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen taustaa.....	1
1.2 Tavoite.....	2
1.3 Tutkimusmenetelmät ja rajaukset.....	3
2. TAUSTAA	4
2.1 Yleistä betonista	4
2.1.1 Betonin lujuus ja mikrorakenne	6
2.2 Kosteus ja kosteudensiirtyminen.....	9
2.2.1 Kosteus ilmassa ja materiaalissa	9
2.2.2 Kosteuden siirtymismuodot	12
2.3 Betonin kosteuspitoisuuden mittaaminen.....	18
2.3.1 Menetelmät betonirakenteiden kosteusmittaukseen.....	18
2.3.2 Yleisesti käytetyt betonin suhteellisen kosteuden mittaustavat	21
2.3.3 Suhteellisen kosteuden mittaamisen mittaustarkkuus.....	25
3. KOSTEUS JA KOSTEUDEN SIIRTYMINEN BETONIRAKENTEISSA	26
3.1 Betonin rakennekosteus.....	26
3.2 Betonin rakennuskosteus.....	27
3.3 Betonirakenteen kuivuminen.....	29
3.3.1 Sitoutumiskuivuminen	29
3.3.2 Haihtumiskuivuminen.....	33
3.3.3 Rakennetyypin vaikutus kuivumiseen	35
3.4 Betonin kuivumisen arvioiminen ja mallintaminen	36
3.4.1 Nykyisin käytettävät ohjelmat ja menetelmät.....	36
3.4.2 Vertailulaskelmat eri ohjelmilla.....	39
4. TUTKIMUSMENETELMÄT	43
4.1 Kokeelliset järjestelyt.....	43
4.1.1 Laboratoriokokeiden kuivatusolosuhteiden säätäminen ja ylläpito.....	44
4.1.2 Koekappaleet.....	49
4.2 Suoritetut laboratoriokokeet ja mittaukset	54
4.2.1 Kuivumisen seuranta.....	54
4.2.2 Halkeilun seuranta ja ohuthietutkimukset.....	60
4.2.3 Koekappaleiden lämpötila.....	64
4.2.4 Puristuskokeet	65
4.3 Laskennallinen tarkastelu.....	65
4.3.1 Laskentamallin kuvaus.....	66
5. MITTAUSTULOKSET	68
5.1 Koekappaleiden lämpötila.....	68
5.1.1 Koekappaleiden lämpötilan tarkastelu	70
5.2 Kuivatusolosuhteet.....	76

5.2.1	Olosuhteet valun jälkeen.....	76
5.2.2	Olosuhdekaappien ja -arkkujen mitatut olosuhteet koejakson aikana 76	
5.3	Kosteusmittaukset	83
5.3.1	Koekappaleiden kosteusmittaustulokset kuivumisolosuhteittain...	83
5.3.2	Porareikämittausten tarkistusmittaus	88
5.3.3	Koekappaleiden kosteusprofiilien kehittyminen.....	90
5.3.4	Kosteusmittausten tulokset betonilaaduittain.....	92
5.3.5	Suhteellisen kosteuden kehittyminen 30 mm syvyydellä	96
5.4	Puristuslujuudet.....	97
5.4.1	Puristuslujuuskokeiden tulokset.....	97
5.5	Koekappaleiden mikrorakenne.....	98
5.5.1	Ohuthietutkimuksen tulokset	99
5.5.2	Ohuthietutkimusten tulosten tarkastelu.....	101
6.	MITATTUJEN JA MALLINNETTUJEN TULOSTEN VERTAILU	103
6.1	Koekappaleiden mallinnettu lämpötila.....	103
6.2	Koekappaleiden mallinnettu kuivuminen.....	104
6.2.1	Kuivumistulokset A betonin kappaleilla.....	104
6.2.2	Kuivumistulokset B betoneilla.....	108
6.2.3	Kuivumistulokset C betoneilla.....	112
6.3	Mallinnettujen ja mitattujen kuivumistulosten vertailu	116
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET	119
7.1	Tutkimuksen onnistuminen	119
7.2	Mitatut tulokset	119
7.3	Mittaustulosten vertailu mallinnettuihin tuloksiin	121
8.	YHTEENVETO	124
	LÄHTEET	127
	LIITTEET	130

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Absorptio	Molekyylien imeytyminen aineeseen.
Adsorptio	Molekyylien sitoutuminen aineen huokosten pinnoille.
Diffuusio	Aineen sisäisestä molekyylien välisestä vuorovaikutuksesta johtuva ilmiö, jossa jonkin aineen pitoisuuserot väliaineessa tai materiaalissa pyrkivät tasoittumaan aineensiirron seurauksena.
Hygroσκοoppisuus	Hygroσκοoppisuus kuvaa aineen kykyä sitoa itseensä kosteutta ympäröivästä ilmasta.
Kapillaarisuus	Riittävän pieniä huokosia sisältävän materiaalin kyky siirtää nestettä koheesio- ja adheesiovoimien avulla.
Loggeri	Mittalaite-tiedonkerääjäyhdistelmä jolla tallennetaan mitattuja suureita tietyllä mittausvälillä.
Suhteellinen kosteus	RH (<i>Relative humidity</i>) eli suhteellinen kosteus ilmoittaa ilman sisältämän kosteuden suhteessa kyseisessä lämpötilassa vallitsevaan vesihöyryn kyllästyspitoisuuteen.
Suhteitus	Betoniin käytettävien osa-aineiden määrien keskinäisten suhteiden valitseminen silmällä pitäen edellytettyjen betonimassan ja betonin ominaisuuksia.
Vesi-sementtisuhde(v/s)	Betonin kokonaisvesimäärän (betoniin lisätyn veden ja mm. kiviaineksen sisältämän veden) ja sementin välinen suhde paino-osin.
Vesi-sideainesuhde	Kuten vesi-sementtisuhde, mutta sementin tilalla kaikkien sideaineiden paino-osa.
w	kosteuspitoisuus, [kg/m ³]

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen taustaa

Betonirakenteiden riittävä kuivuminen ennen päällystämistä on välttämätöntä terveellisen rakennuksen rakentamisen kannalta. Betonin riittävän kuivumisen edellytyksenä on tarpeeksi pitkä kuivumisaika hyvissä kuivumisolosuhteissa. Kuivumisolosuhteiden vaikutusta kuivumisaikaan ei aina nähdä riittävän tärkeänä tekijänä. Oletettua huonommat kuivumisolosuhteet voivat pidentää betonirakenteiden kuivumisaikaa merkittävästi tarkkaankin tehtyä kuivumisaika-arviota pidemmäksi, joka voi johtaa rakentamisajan pidentymiseen.

Betonirakenteiden kuivuminen ei kuitenkaan ole yhtä merkittävää kaikille betonirakenteille, sillä kaikkia betonirakenteita ei päällystetä. Kuivatustarvetta voidaan vähentää myös käyttämällä paremmin vesihöyryä läpäiseviä pinnoitteita. Vesihöyryä läpäisevät pinnoitteet vähentävät kostean betonin aiheuttamia riskejä ja mahdollistavat pinnoituksen varhaisemmassa vaiheessa, sillä kosteus pääsee kuivumaan pinnoitteen läpi vielä pinnoituksen jälkeenkin.

Rakenteiden riittävä kuivuminen varmistetaan yleisesti rakennustyömaalla tehtävillä rakenteiden kosteusmittauksilla. Nykyisillä rakenteiden kosteusmittausmenetelmillä saadaan tarkasti määritettyä mittauspisteen suhteellinen kosteus. Työmaalla tehtävät kosteusmittaukset ovat pistokoeluontoisinakin työläitä, eikä niitä osata aina kohdistaa päällystettävyyden kannalta kriittisimpiin kohtiin. Tarkkojen kosteusmittausten raskaus ja eri lattiapäällysteiden vaihtelevat kosteudensieto-ominaisuudet lisäävät tarvetta rakenteen kosteustekniseen mallintamiseen ja tarkempaan rakenteiden kosteusteknisen toiminnan ymmärtämiseen. Onkin esitetty, että rakennesuunnittelun apuvälineeksi tulisi kehittää päällystysmateriaalin ja betonin ominaisuudet huomioon ottava rakennusfysikaalinen laskentaohjelma, jonka perusteella voitaisiin määrittää vaadittava kuivumisaika tapauskohtaisesti (Merikallio 2009).

Nykyään rakenteiden kuivumisaikoja arvioidaan erilaisilla laskentaohjelmilla ja aiempien mittaustulosten avulla. Mittaustuloksiin perustuvien laskentataulukoiden tarkkuutta on kritisoitu, koska joissain kuivumiskokeissa mitatut kuivumisajat ovat olleet huomattavasti taulukkomitoituksen arvoja pidempiä (Miettunen, Wirtanen 2017). Laskentataulukolla tehtävä arvio perustuu aikaisempiin mittaustuloksiin ja oletukseen siitä, että betoni kuivuu vakio-olosuhteissa. Taulukkomitoituksella ei voida arvioida muuttuvien kuivatusolosuhteiden vaikutusta, eikä vaihtuvia kuivatusolosuhteita voida usein edes syöttää laskentataulukon lähtötiedoiksi.

Kaikki laskentaohjelmat eivät automaattisesti ota huomioon betonin hydrataation vaikutusta kuivumiseen. Osalla laskentaohjelmistoista saadaan huomattavasti todellista pidempiä arvioita kuivumisajasta. Betonin kuivumisen riittävän tarkka mallintaminen vaatii hydrataation huomioimisen lisäksi tietoa betonin materiaaliominaisuuksista. Betonin ominaisuudet ja materiaaliparametrit vaikuttavat merkittävästi kuivumisen mallinnuksen tuloksiin. Olemassa olevien laskentamallien hyödyntäminen betonirakenteiden kosteuskäyttäytymisessä ja kuivumisen mallintamisessa vaatii tarkasteltavan betonilaadun materiaaliparametrien tarkempaa määrittämistä ja mallin soveltamista tutkittavalle betonilaudulle, sekä vaihtelevien kuivumisolosuhteiden vaikutuksien vertailua mallinnettuihin tuloksiin. Betonin kuivumisen riittävän tarkka mallintaminen vaatisi materiaaliparametrien määrittelyä siten, että ne vastaavat tutkittavan betonilaadun ominaisuuksia vallitsevissa lämpö- ja kosteusolosuhteissa ja kehittyvät betonin lujittumisen ja mikrorakeen muuttuessa. Betonin kosteudensiirto-ominaisuudet muuttuvat merkittävästi betonin kovettuessa ja toisaalta kosteudensiirtoparametrit muuttuvat lämpötilan ja kosteuspitoisuuden funktiona. Suurimpana ongelmana FEM-laskentaan pohjautuvien menetelmien käytölle on lujittuvan betonin kosteusteknisten materiaaliparametrien puuttuminen. Tässä työssä vertaillaan betonikoekappaleista mitattuja kosteusprofiileita Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n tekemiin laskennallisiin tuloksiin. Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n käyttämän laskentamallin toimintaa ei ole tarkasteltu muuttuvissa olosuhteissa kuivuville betoneille. Vakio-olosuhteissa kuivuvien rakenteiden kuivumisen mallintamisesta hydrataation huomioon ottavilla FEM-laskentaan pohjautuvilla malleilla on kuitenkin saatu lupaavia tuloksia (Sekki, Karvinen 2017).

Työn pääasiallisena ohjaajana toiminut Vahanen Rakennusfysiikka Oy on aiemmin tutkinut betonirakenteiden kuivumisen mallintamista sekä laskennallisten ja mitattujen tulosten vastaavuutta. Työn onnistuneen toteutuksen kannalta olikin tärkeää, että käytössä oli Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n kokeneiden asiantuntijoiden tiedot FEM-laskennasta, rakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta ja pitkä kokemus betoniteknikasta sekä kosteusmittauksista. Lisäksi työn ohjaukseen osallistui TTY etenkin työn alkuvaiheessa, sekä työn tarkastukseen liittyen.

1.2 Tavoite

Diplomityön päätavoitteena on selvittää betonirakenteiden kuivumisen lämpötilariippuvuutta. Päätavoitteen osatavoitteena on verrata Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n toteuttamia FEM-laskentaan perustuvalla laskentamallilla mallinnettujen ja tässä työssä laboratoriokeihin mitattujen kuivumisaikojen ja rakenteen kosteusjakaumien vastaavuutta myös muuttuvissa kuivumisolosuhteissa. Koekappaleiden kuivumisen mallintamisen toteuttaa Vahanen Rakennusfysiikka Oy, joka on vastannut hydrataation huomioivan laskentamallin kehittämisestä (Sekki, Karvinen 2017). Laskennassa käytetään laboratoriokeiden yhteydessä mitattuja kuivatusolosuhteiden olosuhdetietoja. Erillisenä osatavoit-

teena oli selvittää koekappaleissa käytettyjen betonilaatujen ominaisuuksia ja ominaisuuksien kehittymistä erilaisissa lämpö- ja kosteusolosuhteissa jatkotutkimuksen taustatiedoksi.

Päätavoitteen saavuttamiseksi diplomityöntyön aikana suunniteltiin ja toteutettiin laboratoriotutkimus, jossa seurattiin tämän työn yhteydessä valettujen betonikoekappaleiden kuivumista. Laboratoriotutkimuksessa selvitettiin kosteusjakaumat kahteen suuntaan kuivuvissa betonikappaleissa puolen vuoden seurantajakson aikana viidessä eri kuivumisolosuhteessa. Erillisen osatavoitteen saavuttamiseksi kuivumis seurannan yhteydessä seurattiin myös koekappaleiden lämpötilaa ja eri ikäisistä koekappaleista tutkittiin betonin mikrorakennetta.

Laboratoriokokeiden päätavoitteena on saada mahdollisimman tarkat ja vertailukelpoiset suhteellisen kosteuden mittaustulokset eri lämpötiloissa kuivatetuista koekappaleista, joissa käytettyjen betonien koostumukset ovat tarkoin tiedossa. Tunnettujen betoniominaisuuksien ja kuivatusolosuhteiden ansiosta voidaan arvioida betonien kuivumiseen vaikuttavien tekijöiden vaikutuksia kuivumiseen. Laboratoriokokeiden osatavoitteena on rakentaa olosuhdehuoneet, joissa on kokeen suorittamisen tarvittavat ja laskennan lähtötiedoiksi tallennettavissa olevat olosuhteet.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja rajaukset

Työn teoriaosuudessa käsitellään betonin kuivumisen taustalla vaikuttavia fysikaalisia ja kemiallisia prosesseja, sekä kuivumisen mallintamisen nykytilaa ja problematiikkaa. Lisäksi käsitellään käytössä olevia rakenteiden kosteusmittausmenetelmiä ja niiden tarkkuutta. Teoriaosuudessa esitellään myös mallinuksissa käytetyn laskentamallin toimintaperiaatteita.

Kokeellisessa osuudessa seurataan koekappaleiden kuivumista tunnetuissa olosuhteissa. Tutkimuksessa tutkitaan kolmea eri betonilaatua, joiden vesi-sementtisuhde ja sementtityyppi vaihtelevat. Tutkimuksessa käytetään neljää toisistaan eroavaa olosuhdehuonetta, joilla aikaansaadaan yhteensä viisi erilaista kuivumishistoriaa tutkittaville koekappaleille. Diplomityön aikana koekappaleiden kuivumista seurataan 6 kk. Koekappaleiden kosteusmittaukset toteutetaan mahdollisimman tarkkoilla menetelmillä ja mittausten epävarmuutta arvioidaan tarvittaessa erillisillä varmistusmittauksilla.

Työssä vertaillaan Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n mallintamia kuivumisaikoja työn laboratoriotutkimuksissa mitattuihin tuloksiin. Laskentamallin parametreja säädetään muun muassa koekappaleiden lämpötilamittausten tuloksien avulla, jotta hydrataatioaste ja hydrataatioreaktion aiheuttama lämmön nousu saadaan vastaamaan todellista tilannetta. Mallinnuksella testataan laskentamallin soveltuvuutta muuttuvissa olosuhteissa kuivuvien betonirakenteiden kuivumisen ja kosteusjakauman mallintamiseen.

2. TAUSTAA

2.1 Yleistä betonista

Betoni on yksi yleisimmistä rakennusmateriaaleista maailmassa, sen käyttö kuitenkin yleistyi esimerkiksi Suomessa vasta noin sata vuotta sitten. Betoni on sementin, veden, kiviaineen sekä erilaisten lisäaineiden muodostama kovettuessaan kiinteäksi muuttuva materiaali. Betonimassan ja kovettuneen betonin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa paljon valittavien raaka-aineiden ominaisuuksia ja suhteita muuttamalla. Betonin soveltuvuutta rakentamiseen lisää merkittävästi sen toiminta yhdessä raudoitteiden kanssa, joilla betonirakenteiden kantavuutta voidaan parantaa merkittävästi. (Iso-Mustajärvi 2013)

Betonin sisältämät aineet ovat betonin historian aikana monimuotoistuneet. Alun perin sementistä, kivistä ja vedestä koostuneeseen materiaaliin on tuotekehityksen ansiosta alettu lisätä erilaisia seos- ja lisäaineita, joilla parannetaan niin tuoreen betonimassan, kuin kovettuneen lopputuotteenkin ominaisuuksia. Myös sementin valmistus ja ominaisuudet ovat kehittyneet merkittävästi. Nykyisellään betonin valmistus ja eri raaka-aineiden suhteitus on hyvin monimuotoinen prosessi, jonka avulla saadaan aikaan useisiin hyvinkin erilaisiin kohteisiin soveltuvaa betonia. Nykyaikaisen betoninvalmistuksen monimuotoisuus ja monimuotoisuuden mukanaan tuomat riskit olivat laajalti esillä myös mediassa vuonna 2016, kun suomalaisilla rakennustyömailla havaittiin suunniteltua heikompa betonia.

Sementin ja veden seosta kutsutaan sementtiliimaksi, joka kovettuessaan muuttuu sementtikiveksi. Suurimman osan betonista muodostaa betonin runko-aines eli kiviaines. Suomessa käytetty kiviaines on lujuudeltaan hyvin lujaa, joten betonin lujuus määräytyy käytännössä sementtikiven ominaisuuksien mukaan (Iso-Mustajärvi 2013). Vesi-sementtisuhte on yksi eniten betonin lujuuteen ja muihin betonin ominaisuuksiin vaikuttava suure. Vesi-sementtisuhte kuvaa betonissa olevan veden ja sementin suhdetta.

Sementin pääraaka-aine on kalkkikivi. Jauhettuun kalkkikiveen lisätään muun muassa kipsiä ja masuunikuonaa. Raakajauheesta saadaan sementtiä polttamalla jauhetta 1400 °C lämpötilassa, jolloin kalkki-, pii-, alumiini- ja rautayhdisteet saadaan reagoimaan. Sementit jaotellaan viiteen päälajiin (CEM I – V), joista ensimmäisessä (CEM I) on eniten sementtiklinkkeriä ja vähiten seosaineita. Suomessa on betonin raaka-aineena yleisesti käytössä vain luokkien I ja II sementtejä. (Iso-Mustajärvi 2013)

Puhtaaseen sementtiin sekoitetaan useasti muita seosaineita. Seosaineina käytetään yleisesti muun muassa lentotuhkaa, masuunikuonaa ja silikaa. Lentotuhkabetonin lujuudenkehitys on tavalliseen betoniin nähden hitaampaa, mutta betonin loppulujuus saattaa

nousta korkeammaksi. Lentotuhka myös alentaa betonin hydratoitumislämpöä, kuten tekevät käytännössä kaikki sementin seosaineet. Masuunikuona tekee betonimassasta notkeampaa ja mahdollistaa täten pienemmän vesimäärän käytön. Hienoksi jauhettu masuunikuona vähentää myös betonin ilmapitoisuutta. (Iso-Mustajärvi 2013)

Tämän diplomityön laboratorioskokeiden betonimassoissa käytettiin sementtejä, jotka ovat kauppanimiltään plussementti ja pikasementti. Plussementti (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N) on normaalisti kovettuva portlandsementti, joka kuuluu sementtiluokkaan II. Plussementtiä markkinoidaan ympäristöystävällisenä sementtinä, joka sisältää kalkkikiveä ja masuunikuonaa. Pikasementti (CEM I 52,5 R) on erittäin nopeasti kovettuva portlandsementti ja se kuuluu sementtiluokkaan I. Pikasementti sisältää hyvin vähän seosaineita ja sen lujuudenkehitys ja lämmöntuotto ovat nopeampia ja korkeampia verrattuna plussementtiin. (Finnsementti 2018)

Betonin lisäaineilla pyritään muuttamaan yhtä tai useampaa kovettuneen betonin ominaisuutta. Lisäksi lisäaineilla voidaan vaikuttaa betonimassan ominaisuuksiin sekä betonin sitoutumisreaktion toimintaan. Yksittäiset lisäaineet vaikuttavat usein useampiin betonin ominaisuuksiin. Lisäaineiden käytöllä voi päävaikutuksensa lisäksi olla sivuvaikutuksia, jotka saattavat olla haitallisiakin. Lisäaineilla voidaan muun muassa lisätä massan notkeutta, lisätä betoniin huokosia tai säädellä hydratoitumisreaktion nopeutta. (Iso-Mustajärvi 2013) Neville (1995) toteaa, että betonin lisä- ja seosaineiden suunnitellun mukainen vaikutus tulisi aina varmistaa koemassasta.

Tämän diplomityön laboratorioskokeiden betonimassoissa käytettiin notkistinta ja huokostinta. Huokostimia käytetään yleisesti pakkasrasitetuissa betoneissa, mutta sitä käytetään myös nopeasti kuivuvissa massoissa. Notkistavilla lisäaineilla voidaan vähentää veden tarvetta 5 ... 30 % betonin työstettävyyden heikentymättä, jolloin betoniin sekoitettavan veden määrää voidaan vähentää ja täten kuivumisaika lyhenee. (Finnsementti 2018)

Betonin kovettuminen (ts. lujuudenkehitys) perustuu hydrataatioreaktioon, jossa vesi reagoi sementin ja sen seosaineiden kanssa muodostaen kiinteitä yhdisteitä. Reaktiossa sitoutuu vettä. Sitoutuvan veden määrää riippuu voimakkaasti vesi-sementtisuhteesta. Veden sitoutuminen laskee betonin huokosten suhteellista kosteutta, joten betonin voidaan ajatella kuivuvan kovettuessaan. Tähän viitataan jatkossa nimellä sitoutumiskuivuminen tai hydrataatiokuivuminen. Betonin lujuudenkehitys on kuitenkin usein täysin erillään betonin kuivumisesta, sillä kovettuminen tapahtuu myös esimerkiksi vesiuputuksessa. (BY 201 2018)

Vaikka betoniin kehittyikin vaadittava lujuus ilman tarvetta kuivattaa betonirakennetta ovat betonin kuivuminen ja etenkin kostean betonin aiheuttamat ongelmat nykyisin vahvasti esillä mediassakin. Mikäli betoni päällystetään, tulee rakenteen kuivua riittävästi ennen päällystystä. Päällystettävien betonirakenteiden, kuten välipohjien, kuivumisella on pitkään ollut rakennusaikaa pidentävä vaikutus. Nykyään yhä kiristyvät rakennusajat,

sekä rakenteisiin jäävän rakennusaikaisen kosteuden mahdollisesti aikaansaamat sisäilmaongelmat luovat kasvavan tarpeen betonin tehokkaammalle kuivattamiselle, sekä oikean päällystysajankohdan määrittämiselle.

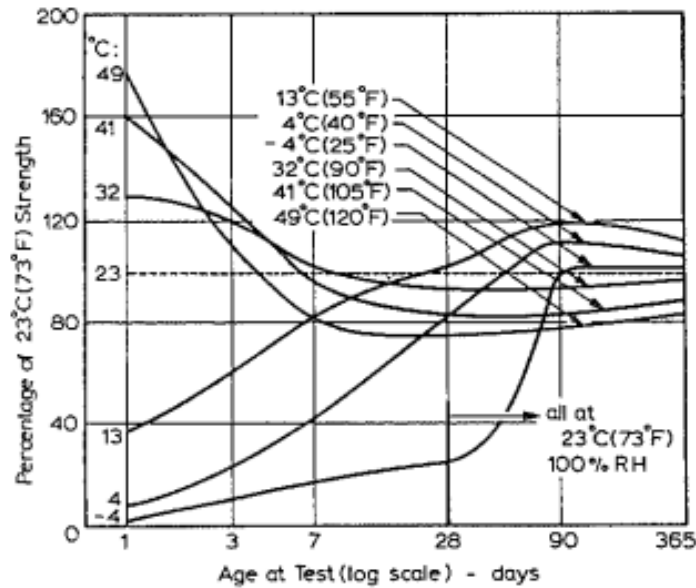
2.1.1 Betonin lujuus ja mikrorakenne

Lujuuden kehittyminen

Betonin osa-aineiden sekoittamisen jälkeen hydrataatioreaktiot alkavat välittömästi. Betonimassa pysyy kuitenkin aluksi notkeana, koska reaktiotuotteet eivät ole vielä kiinnittyneinä toisiinsa. Betonilaadusta ja lämpötilasta riippuvan ajan kuluttua massa menettää työstettävyyden ja lujuudenkehitys alkaa, tätä vaihetta kutsutaan sitoutumiseksi. Betonin kovettuminen (lujuudenkehitys) alkaa sitoutumisen jälkeen. Lujuudenkehitys jatkuu käytännössä niin kauan kuin hydrataatioon osallistumiskykyistä vettä ja reagoimatonta sementtiä on jäljellä. (BY 201 2018)

Betonin lujuus kehittyy nopeammin korkeammassa lämpötiloissa. Betonin lujuudenkehitys voi kuitenkin jatkua hyvin kauan, vaikka yleisesti betonin lujuutta arvioidaan 28 vrk iässä. Hydrataatioreaktion on esitetty pysähtyvän, kun betonin suhteellinen kosteus laskee alle 80 % RH (Vinkler & Vítek 2016).

Kuvassa 2.1 on esitetty lämpötilan vaikutusta betonin lujuudenkehitykseen. Kuvasta huomataan, että korkeammassa lämpötiloissa betonin lujuus kehittyy hyvin nopeasti. Kun betonit siirretään vakio-*lämpötilaan*, kehittyy alkuvaiheessa alhaisemmissa lämpötiloissa olleiden betonien lujuus kuitenkin korkeammalle, kuin korkeissa lämpötiloissa säilytettyjen betonien. Varhaisvaiheen matala lämpötila mahdollistaa korkeamman loppulujuuden, joka tosin saavutetaan vasta 90 vuorokauden iässä. (Neville 1995)



Kuva 2.1. Lämpötilan vaikutus betonin lujuudenkehittymiseen. Kuvassa lujuudet on ilmoitettu suhteessa 23 °C lämpötilassa kovettuvaan betoniin. Kuvan betonit on siirretty 23 °C lämpötilaan 28 vrk kohdalla. (Neville 1995)

Betonin mikrorakenne

Suomessa betonin mikrorakennetta on tutkittu mikroskooppitutkimuksilla 1980-luvulta lähtien. Aiemmin betonin tutkimus perustui lähinnä lujuusominaisuuksien testaamiseen. Betonimikroskooppimenetelmät voidaan jakaa käytettävien laitteiden perusteella kolmeen ryhmään: stereomikroskooppitutkimus, petrografiset ohuthietutkimukset ja elektronimikroskooppiset tutkimukset. (Pyy 2017)

Stereomikroskooppitutkimuksissa betoninäytteitä tutkitaan sellaisinaan tai käyttäen pintahiettä. Stereomikroskooppitutkimuksissa käytetään yleisesti melko pieniä suurennuksia, joilla voidaan kuitenkin havaita jo betonin suojuhuokostus. Petrografiset ohuthietutkimukset ovat mikroskooppisen betonitutkimuksen keskeisin soveltamisalue. Petrografiset ohuthietutkimukset tehdään käyttäen polarisaatio- ja fluoresenssimikroskooppeja. Ohuthietutkimuksessa tutkitaan betonista valmistettua vakiopaksuista näyteleikettä. Useimmiten näyte irrotetaan betonista poraamalla betonista näyteliieriö vesihuuhdellulla timanttikoralla, josta valmistetaan varsinainen näyteleike. Ohuthieen koko on yleisesti noin 55 mm × 35 mm × 0,03 mm ja ne impregnoidaan alipaineessa epoksilla, johon on lisätty fluoresoivaa väriainetta. Ohuthietutkimuksessa suurennukset ovat tyypillisesti 10 – 400 kertaiset. Polarisaatiomikroskoopilla voidaan tutkia muun muassa betonin yleis- ja huokosrakennetta, koostumusta, sementtikiven rakennetta, sideaineen koostumusta, sekä kiteymiä betonin huokosissa ja halkeamissa. Fluoresenssimikroskopiolla voidaan tutkia betonin huokosrakennetta, halkeilua, sekä sementtikiven kapillaarihuokoisuutta ja vesi-sementtisuhdetta. Elektronimikroskooppisilla tutkimuksilla voidaan tarvittaessa tutkia

tarkemmin näytteiden koostumusta ja siinä olevia alkuaineita. Laitetta käytetään esimerkiksi, kun halutaan selvittää havaittujen kiteymien tai korroosiotuotteiden koostumusta. (Pyy 2017)

Betonin huokokset

Betonin sementtikivessä on useita erilaisia huokosia. Osa huokosista on betonin säilyvyydelle ja etenkin pakkasrasituksille välttämättömiä. Ylimääräiset huokokset alentavat betonin lujuutta merkittävästi. Sementin reagoidessa sementtigelikiteiden väliin jää vesitäyteisiä huokosia, joita kutsutaan geelihuokosiksi. Geelihuokokset ovat hyvin pieniä, halkaisijaltaan noin 1 - 5 nm. Geelihuokosia on noin 25 - 30 % sementtikiven kokonaistilavuudesta. Geelihuokosten vesi poistuu huokosista vasta, kun betonin suhteellinen kosteus laskee alle 11 % RH. (BY 201 2018)

Sementtipartikkeleiden väliin jääviä vesitäyteisiä tiloja kutsutaan kapillaarihuokosiksi. Kapillaarihuokosten halkaisija on noin 0,01 - 1 μm . Kapillaarihuokosten määrä on voimakkaasti riippuvainen betonin vesi-sementtisuhteesta. Alle 0,4 vesi-sementtisuhteen täysin hydratoituneessa betonissa kapillaarihuokosia ei käytännössä ole. Vesi-sementtisuhteen ollessa yli 0,7 kapillaariverkosto ei katkea edes betonin hydratoituessa täydellisesti. Kapillaariverkosto katkeaa 0,4 vesi-sementtisuhteen betonilla noin 3 vuorokauden kuluessa ja vesi-sementtisuhteen 0,6 betonilla noin kuuden kuukauden kuluttua. (BY 201 2018)

Kapillaarihuokosten ansiosta vesi pääsee liikkumaan kapillaarivoimien takia hyvin tehokkaasti betonissa. Vesi voi kuitenkin kuljettaa mukanaan betonin kestävyuden kannalta ei toivottuja aineita, kuten suoloja ja klorideja, joten kapillaarihuokokset eivät ole toivottuja betonissa. (Iso-mustajärvi 2013)

Kolmannen huokoslajin muodostavat supistumishuokokset. Supistumishuokokset syntyvät sementin ja veden reagoidessa, koska sementin ja veden tilavuus on suurempi kuin reaktiossa syntyvien lopputuotteiden. Supistumishuokokset ovat sisältä tyhjiä ja niitä on noin 25 % sitoutuneen veden tilavuudesta. (BY 201 2018)

Betonin pakkaskestävyyden kannalta välttämättömät suojahuokset ovat kooltaan noin 0,01 – 0,8 nm ja niiden välisen etäisyyden tulisi pakkasrasitetussa betonissa olla noin 0,4 nm. Suojahuokosten tasainen jakautuminen ja pieni välimatka mahdollistavat veden laajentumisen huokosiin jäätyessään ilman, että se aiheuttaa vaurioita betoniin. Suojahuokosia tulee pakkaskestävässä betonissa olla noin 2,5 - 8 % betonin tilavuudesta ja noin 20 % sementtikiven tilavuudesta. Suojahuokosten määrää voidaan lisätä huokostimilla. (BY 201 2018)

Betonissa voi olla myös tiivistyshuokosia, jotka syntyvät betonin valun aikana. Tiivistyshuokosia syntyy etenkin muotin ja betonin rajapintaan, johon jää ilmaa valun aikana. Tiivistyshuokosten koko noin 0,2 - 8 mm. (Iso-mustajärvi 2013)

Vuonna 2016 betonirakenteissa havaittiin lujuusongelmia työmailla. Ongelmista uutisoitiin laajalti. Lujuusongelmien pääsyyksi esitettiin tavoiteltua korkeammat ilmamäärät. Betoneista mitattiin jopa 10 - 15 % ilmamääriä, kun normaalina ilmamääränä pidetään 3 - 8 %. Ilmamäärän noustessa 1 %-yksikön verran betonin lujuus laskee noin 5 % (Iso-Mustajärvi 2013).

2.2 Kosteus ja kosteudensiirtyminen

2.2.1 Kosteus ilmassa ja materiaalissa

Rakenteita ympäröivä ilma ja rakenteet itsessään sisältävät aina jonkin verran kosteutta. Rakenteet altistuvat jatkuvasti monenlaisille kosteusrasituksille. Kosteudella tarkoitetaan kemiallisesti sitoutumatonta vettä sen kaikissa olomuodoissa (Siikanen 2014). Kosteuden määrä vaihtelee monien tekijöiden vaikutuksesta. Yleisimpiä kosteuslähteitä rakennuksille ovat: ilman kosteus, rakennusaikainen kosteus, sade, vesivuodot ja maasta tuleva kosteus (Hagentoft 2001).

Ilma koostuu monista kaasuista, joista yksi on vesihöyry. Vesihöyryn määrää ilmassa voidaan kuvata monilla eri suureilla. Vesihöyryn määrä voidaan ilmoittaa joko kg/m^3 tai kg/kg (kiloina vettä per kilo kuivaa ilmaa), tai vesihöyryn osapaineena (Pa) (Siikanen 2014). Vesihöyrypitoisuus voidaan myös ilmoittaa suhteellisena kosteutena, jolloin yksikkönä on usein prosentit.

Suhteellinen kosteus (RH) ilmoittaa prosentteina ilman sisältämän vesihöyryn määrän suhteessa ilman enimmäisvesihöyrymäärästä (Siikanen 2014). Ilman enimmäisvesihöyrymäärää kutsutaan yleisemmin termillä vesihöyryn kyllästyspitoisuus (RIL 255-1 2014). Suhteellinen kosteus ei voi ylittää arvoa 100 % RH. Vesihöyryn kyllästyspitoisuus on hyvin voimakkaasti riippuvainen lämpötilasta (Hagentoft 2001).

Materiaalien kykyä sitoa kosteutta kuvataan hygroskooppisuudella. Hygroskooppiset materiaalit voivat sitoa suuria määriä kosteutta (Siikanen 2014). Rakennusmateriaaleista muun muassa betonilla ja puupohjaisilla materiaaleilla on suuri hygroskooppisuus, vastaavasti esimerkiksi mineraalivillojen hygroskooppisuus on hyvin pieni (Siikanen 2014). Esimerkiksi betoniin sitoutuu kosteutta, mikäli rakenteen ympärillä olevan ilman suhteellinen kosteus on betonin huokosilman kosteutta korkeampi, tai materiaali päätyy kosketuksiin vapaan veden kanssa. Kosteutta siirtyy betoniin ja materiaaliin yleisesti huomattavasti nopeammin, mikäli kappale on kosketuksissa vapaaseen veteen. Usein kappaleen kastuminen hygroskooppisesti on hyvin hidasta.

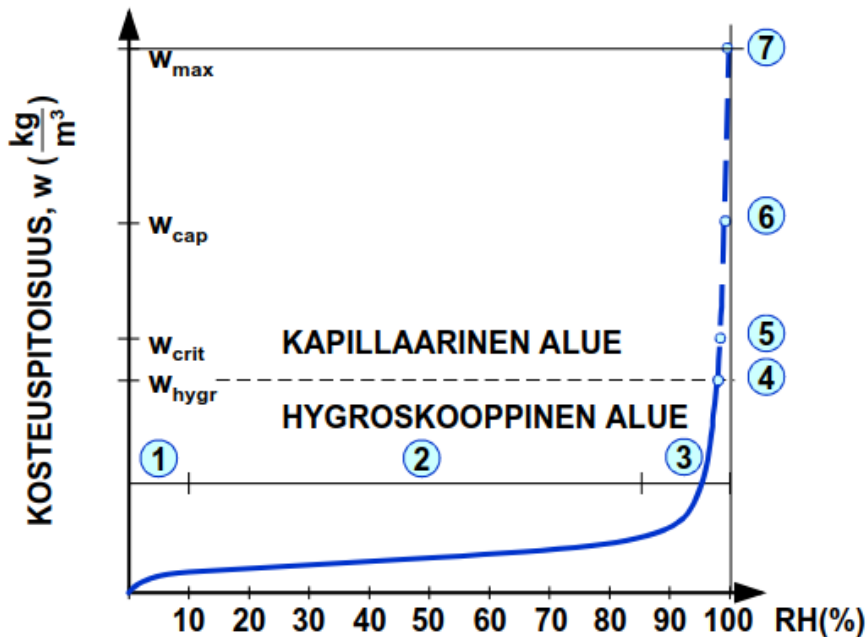
Materiaalin huokosten ilmatilassa oleva kosteus sekä huokosen pintaan fysikaalisesti sitoutunut kosteus muodostavat yhdessä materiaalin kosteussisällön W , joka voidaan ilmoittaa kosteusmäärää kilogrammoina kuutiota kohden (kg/m^3). Huokosilman suhteellinen kosteus ja huokospintoihin sitoutunut kosteus hakeutuvat tasapainotilaan. Kosteuden

tasaantumisen vuoksi materiaalin kosteuspitoisuus voidaan arvioida huokosilman suhteellisesta kosteudesta, joka on helposti mitattava ja siksi usein käytössä oleva suure. Kosteuspitoisuus voidaan ilmoittaa myös painoprosentteina (p-%), joka kuvaa kuinka monta prosenttia materiaalin kuivapainosta on vettä. (Merikallio 2009; Merikallio et al. 2007)

Materiaalin suhteellisella kosteudella tarkoitetaan materiaalin huokosten ilmatilan suhteellista kosteutta. Usein rakennusmateriaalien kosteuspitoisuutta kuvataan juuri rakenteen suhteellisella kosteudella. Esimerkiksi betonirakenteiden pinnoitettavuuskriteereitä on yleisesti annettu betonin suhteellisena kosteutena tietyllä tarkastelusyvyydellä. Suhteellinen kosteus ei suoraan kerro, miten paljon (kg/m^3) materiaalissa on kosteutta. Betonin suhteellisen kosteuden ja siinä absoluuttisesti olevan kosteusmäärän suhde voidaan selvittää kokeellisesti, mutta se vaihtelee merkittävästi eri betonilaatujen ja betonin iän mukaan. Suhteellisen kosteuden lisäksi materiaalin huokosten seinämiin on sitoutunut fyysikaalisesti eli adsorpoitunut vesimolekyylejä. Adsorptiovoimien sitoman kosteuden määrä riippuu huokostilan ominaispinta-alasta. Pienet huokokset voivat olla vielä täynnä vettä, vaikka suurten huokosten ja siten betonin huokosten suhteellinen kosteus on esimerkiksi 90 % RH. (Merikallio 2009; Merikallio et al. 2007)

Materiaalin suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden välille voidaan kokeellisesti määrittää yhteys, jota kutsutaan tasapainokosteuskäyräksi (RIL 255-1 2014) tai hygroskooppiseksi tasapainokosteuskäyräksi (Vinha 2011). Tasapainokosteuskäyrät eroavat selvästi, mikäli käyrä määritetään kuivuvasta tai kostuvasta kappaleesta. Ilmiötä nimitetään hystereesiksi (Hagentoft 2001). Kuitenkin muun muassa betonille suhteellisen kosteuden (RH %) ja kosteussisällön (kg/m^3 tai p-%) välille on lähes mahdotonta luoda luotettavaa korrelaatiota, koska edellä mainittujen suureiden suhteet vaihtelevat merkittävästi esimerkiksi eri betonilaatujen välillä (Merikallio 2009).

Eri materiaaleille määritettyjen tasapainokosteuskäyrien arvot vaihtelevat suuresti. Tasapainokosteuskäyrän muoto selittyy erilaisilla kosteuden sitoutumisilmiöillä, Kuvassa 2.2 on esitetty tasapainokosteuskäyrästä havaittavat kosteuden sitoutumismuodot ja käyrän tärkeimmät pisteet.



Kuva 2.2. Tasapainokosteuskäyrä (hygroskooppinen). Kuvassa on esitetty erilaiset kosteuden sitoutumismuodot ja tärkeimmät pisteet numeroituina. (Vinha 2011)

Kosteuden sitoutumistasot muuttuvat materiaalin kosteuspitoisuuden muuttuessa. Pienissä kosteuspitoisuuksissa kosteus sitoutuu materiaaliin monomolekyylarisella adsorptiolla (Kuva 2.2, kohta 1). Monomolekyylarisen adsorption alueella vesimolekyylit sitoutuvat materiaaliin huokosten seinämiin ohuena kerroksena van der Waalsin sidoksilla (Vinha 2011). Kun materiaalin on sitoutunut tarpeeksi kosteutta alkaa kosteus sitoutua polymolekyylarisella adsorptiolla yhä paksumpina kerroksina (kuva 2.2, alue 2). Kuvan 2.2 aluetta 3 nimitetään kapillaarikondenssin alueeksi, jolloin materiaalin pienimmät huokokset alkavat täyttyä ja kosteus alkaa siirtyä myös kapillaaristen voimien vaikutuksesta (Vinha 2011). Muun muassa betonin pinnoitettavuuden kannalta yleisesti merkittävät kosteuspitoisuudet ovat kuvaajan alueilla 2 ja 3. Tasapainokosteuskäyrän alueella 2 käyrä on hyvin lineaarinen, mutta kapillaarikondenssin alueella käyrän kulmakerroin alkaa kasvaa.

Hygroskooppinen alue päättyy kuvan 2.2 pisteessä 4, jolloin saavutetaan hygroskooppinen kyllästyskosteuspitoisuus. Hygroskooppinen kyllästyskosteuspitoisuus kuvaa korkeinta kosteuspitoisuutta, jonka materiaali voi saavuttaa ilman kosketusta vapaaseen veteen (Hagentoft 2001). Suhteellinen kosteus hygroskooppisessa kyllästyskosteuspitoisuudessa on määritetty tyypillisesti vastaamaan n. 98 % RH:ta (Vinha 2011, Hagentoft 2001). Hygroskooppisen alueen jälkeen siirrytään kapillaariselle alueelle. Kriittisen kosteuspitoisuuden (kuva 2.2, piste 5) jälkeen kosteus siirtyy materiaalissa pääosin nestemäisenä yhtenäistä kapillaariverkostoa pitkin. Kuvan 2.2 piste 6 kuvaa kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta. Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus on suurin mahdollinen kosteuspitoisuus, joka voidaan saavuttaa materiaalin ollessa vesikosketuksessa. Kosteuspitoi-

suutta saadaan nostettua kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden yläpuolelle upottamalla materiaali veteen. Vesiupotuksessakin materiaalin jää ilmalla täyttyneitä huokosia. Materiaalin koko huokostilavuus voidaan täyttää vedellä esimerkiksi imemällä ilma pois materiaalin huokosista vakuuissa ja upottamalla kappale tämän jälkeen veteen, jolloin saavutetaan materiaalin maksimikosteuspitoisuus (kuva 2.2, piste 7).

Kapillaarisella alueella materiaalin kosteuspitoisuutta voidaan kuvata myös kapillaarisella tasapainokosteuskäyrällä, koska hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä ei ole havainnollinen kapillaarisella alueella (Vinha 2011). Kapillaarisessa tasapainokosteuskäyrässä kosteuspitoisuus esitetään havainnollisemmin joko keskimääräisen huokosalipaineen tai huokosten säteen funktiona (Vinha 2011). Kapillaarista tasapainokosteuskäyrää ei käsitellä tässä työssä tarkemmin, sillä kuivuvan betonin kosteus on aivan alkuvaiheen jälkeen pääosin hygroskooppisella alueella. Jatkossa tasapainokosteuskäyrällä tarkoitetaan nimenomaan hygroskooppista tasapainokosteuskäyrää.

2.2.2 Kosteuden siirtymismuodot

Kosteus voi siirtyä monilla eri tavoilla ja eri voimien ajamana. Vinha (2011) mainitsee merkittävimmiksi kosteudensiirtymismuodoiksi:

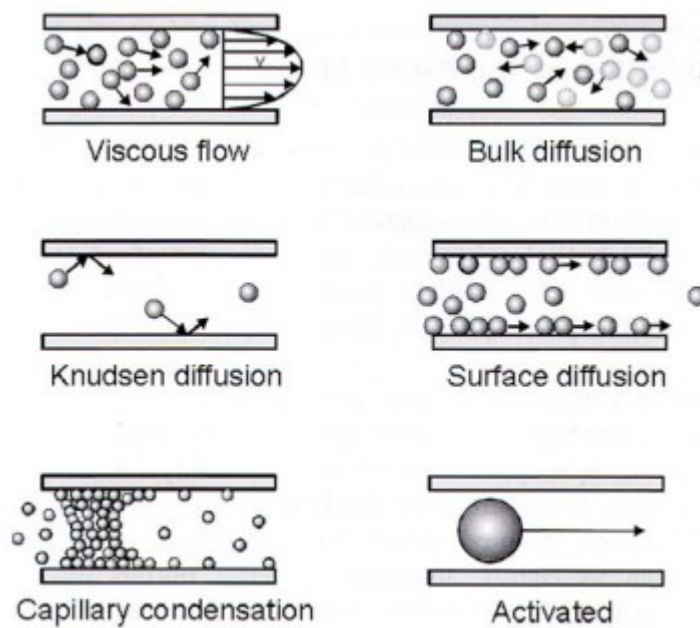
- Diffuusio
- Pintadiffuusio
- Kapillaarinen siirtyminen
- Konvektio
- Painovoimainen siirtyminen
- Paineenalainen siirtyminen

Muita kosteuden siirtymismuotoja ovat muun muassa termodiffuusio, effuusio eli Knudsenin diffuusio, osmoosi ja elektrokineettinen siirtyminen. Eri kosteuden siirtymismuodot vaikuttavat usein samanaikaisesti ja saattavat kuljettaa kosteutta samaan suuntaan tai eri suuntiin (Vinha 2011). Edellä mainittuja muita kosteuden siirtymismuotoja pidetään yleisesti melko merkityksettöminä rakennusfysiikassa (Vinha 2011, Björkholtz 1987). Wang ja Xi (2017) esittävät, että termodiffuusiolla on merkittävä rooli kosteudensiirtymisessä betonirakenteissa, mikäli rakenteen eri puolilla on lämpötilaero. Diffuusio voidaan jakaa tavallisen kaasudiffuusion ja pintadiffuusion lisäksi myös Knudsenin diffuusiioon (Malek & Coppens 2003).

Tässä luvussa käsitellään tarkemmin kosteudensiirtomuotoja, joilla on vaikutusta myös betonirakenteiden kuivumiseen ja kosteuspitoisuuteen. Osmoosi ja elektrokineettinen siirtyminen rajataan tarkastelun ulkopuolelle. Myöskään painovoimaista tai paineenalaista siirtymistä ei käsitellä, vaikka ne ovatkin merkittäviä kosteuden siirtymismuotoja. Paineenalaista siirtymistä voi tapahtua muun muassa painovoiman seurauksena

ja esimerkiksi betonisen laatan päällä oleva vesikerros siirtyy rakenteen halkeamiin painovoiman vaikutuksesta. Yleinen kosteuden siirtymisen teoria on betonirakenteiden kuivumisen ja kosteudenhallinnan kannalta tärkeä osa-alue. Yleinen kosteudensiirron teoria toimii myös pohjana kosteuden siirtymiselle betonissa.

Kuvassa 2.3 on havainnollistettu erilaisten kosteuden siirtymismuotojen eroja. Kuvassa esitettyjä erilaisilla diffuusimenetelmiä, kapillaarikondensssia tarkastellaan tarkemmin omina kokonaisuuksinaan. Kuvan ”*bulk diffusion*” vastaa vesihöyryn diffuusiota ja ”*Knudsen diffusion*”, sekä ”*Surface diffusion*” Knudsenin diffuusiota ja pintadiffuusiota.



Kuva 2.3. Havainnekuva eri kosteuden siirtymismuodoista. (KJM5100 2006)

Kuvassa 2.3 huokosputken koko pienenee ylhäältä alapäin siirryttäessä. Ylimmällä rivillä huokosputken halkaisija on yli 50 nm, alemmilla riveillä 2 - 50 nm ja alimman rivin oikeassa reunassa alle 2 nm. Alimman rivin ”*activated*” eli avustettu diffuusio tarkoittaa molekyylien liikettä lähes molekyylin kokoisissa huokosputkissa. Avustettuun diffuusiota tarvitaan jokin muu gradientti, kuten paine, konsentraation lisäksi, jotta siirtymistä tapahtuu. Avustettua diffuusiota ei käsitellä tässä työssä tarkemmin. (KJM5100 2006)

Vesihöyryn diffuusio

Diffuusio tarkoittaa yleisesti molekyylien satunnaisen liikkeen aikaansaamaa aineen siirtymistä, jonka seurauksena epätasaisesti jakautuneet kaasuseokset tasaantuvat. Rakennustekniikassa diffuusiolla tarkoitetaan useimmiten kosteuden liikkumista vesihöyrynä (Siikanen 2014). Ilman sisältämä vesihöyry pyrkii tasoittumaan diffuusion seurauksena, jolloin esimerkiksi kosteasta sisäilmasta siirtyy vesihöyryä ympäröiviin sisäilmaa kui-

vempiin rakenteisiin. Diffuusion suuntaan vaikuttaa ilman sisältämän vesihöyryn pitoisuusero. Lämpimämmässä ilmassa on usein enemmän vesihöyryä kuin kylmemmässä, jolloin yleensä diffuusio suuntautuu lämpimästä kylmempään (Siikanen 2014).

Vesihöyryn siirtyminen diffuusiolla on usein hyvin hidasta verrattuna muihin kosteuden siirtymismuotoihin. Homogeenisessä ainekerroksessa diffuusiolla siirtyvän kosteuden määrää, eli kosteusvirran tiheyttä g , [kg/(m²s)], voidaan laskea Fickin lain (2.1) avulla (Vinha 2011).

$$g = -\delta_p \cdot \nabla p_v \quad (2.1)$$

missä

δ_p = Vesihöyrynläpäisevyys [kg/(m·s·Pa)]

∇p_v = Vesihöyryn osapaine-ero [Pa].

Kaava 2.1 voidaan esittää myös vesihöyrypitoisuuseron avulla. Vesihöyrynläpäisevyyksien välillä on yhteys ja esimerkiksi vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistu vesihöyrynläpäisevyys voidaan muuttaa osapaine-erolla ilmaistuksi vesihöyrynläpäisevyydeksi ideaalikaasun tilanyhtälöön perustuvalla kaavalla. Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys voidaan lisäksi ilmaista muun muassa yksiköttömällä diffuusiovastuskertoimella μ , joka kuvaa materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden suhdetta ilman vesihöyrynläpäisevyyteen. Materiaalille on myös mahdollista laskea suhteellinen diffuusiovastus s_d [m], joka kuvaa kuinka paksun ilmakerroksen vesihöyrynvastusta tietty materiaalikerros vastaa. (Vinha 2011)

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys määritetään usein märkä- tai kuivakuppikokeena. Kokeessa materiaalinäyte tiivistetään kiinni kuppiin ikään kuin kanneksi. Kupin sisä- ja ulkopuoliset kosteuspitoisuudet säädetään toisistaan eroaviksi ja materiaalin läpi kulkevaa kosteusmäärää mitataan kuppia punnitsemalla. Mitatun kosteusvirran tiheyden avulla määritetään materiaalin vesihöyrynvastus Z_v [s/m] tai Z_p [m²sPa/kg], josta voidaan edelleen laskea vesihöyrynläpäisevyys. Märkäkuppikokeessa kupin sisällä on korkeampi suhteellinen kosteus. (RIL 255-1 2014)

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys muuttuu materiaalin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan muuttuessa. Vesihöyrynläpäisevyys kasvaa suhteellisen kosteuden noustessa. Muutos materiaalin suhteellisen kosteuden noustessa johtuu kapillaarikondenssista. Kapillaarikondenssissa materiaalin pienimmät huokokset ovat jo täyttyneet vedellä ja osa kosteuden siirtymisestä tapahtuu kapillaaristen voimien ajamana. (Vinha 2011)

Yleensä materiaalin vesihöyrynläpäisevyys mitataan 23 °C vakiolämpötilassa yhdellä tai kahdella kosteusparilla. Mitattu vesihöyrynläpäisevyys saadaan määritettyä kupin sisä- ja ulkopuolisten suhteellisten kosteuksien keskiarvolle. Kosteissa olosuhteissa mitattua vesihöyrynläpäisevyyden arvoa voidaan käyttää materiaalin läpi virtaavan kosteuden määrän laskemiseen, mikäli kaikki kosteuden siirtymismuodot kuljettavat kosteutta samaan

suuntaan. Mikäli rakenteen yli vallitsee lämpötilaero, saattavat muut kosteuden siirtymismuodot kuljettaa kosteutta vastakkaiseen suuntaan kuin diffuusio, jolloin mitattu vesihöyrynläpäisevyyden arvo ei kuvaa todellista tilannetta. (RIL 255-1 2014)

Rakennusinsinööriliiton julkaisussa suositellaankin käyttämään laskennassa kuivassa olosuhteessa mitattua vesihöyrynläpäisevyyden arvoa diffuusiolla tapahtuvalle kosteuden siirtymiselle ja ottamaan muut kosteuden siirtymismuodot huomioon erikseen (RIL 255-1 2014).

Lämpötilan vaikutusta materiaalin vesihöyrynläpäisevyyteen voidaan tutkia toteuttamalla kuiva- tai märkäkuppikokeita myös muissa kuin 23 °C lämpötiloissa. Materiaalien vesihöyrynläpäisevyyksiä eri suhteellisen kosteuden alueilla on kirjallisuudessa runsaasti, mutta muissa kuin 23 °C lämpötiloissa tehtyjä tuloksia on kirjallisuudessa huomattavasti vähemmän. Vinha et al. (2005) ovat esittäneet tietyille rakennusmateriaaleille vesihöyrynläpäisevyyden arvoja myös -10 ja 5 °C lämpötiloissa. Vinha et al. (2005) toteavat vesihöyrynvastuksen pienenevän suurimmalla osalla materiaaleista lämpötilan noustessa. Materiaaleilla, joiden vesihöyrynläpäisevyys ei riippunut materiaalin suhteellisesta kosteudesta, vesihöyrynvastus laski keskimäärin 21 % lämpötilan noustessa -10 °C:sta 5 °C:seen ja edelleen 18 % lämpötilan noustessa 5 °C:sta 23 °C:seen (Vinha et al. 2005). Vesihöyrynläpäisevyyden voidaan siten yleisesti todeta nousevan sekä lämpötilan että kosteuspitoisuuden noustessa. Vinha (2011) toteaa kosteusvirran tiheyden kasvun materiaalin läpi johtuvan lähinnä pintadiffuusiosta ja kapillaarivirtauksesta ja, että kaasudiffuusiolla siirtyvä vesihöyryn määrä on hygroskooppisella alueella melko vakio. Kapillaarisella alueella diffuusiolla siirtyvä kosteuden määrä pienenee huokosten täytyessä vedellä (Vinha 2011). Kapillaarisella alueella diffuusion vaikutus on myös vähäinen kapillaarisen kosteudensiirron ollessa huomattavasti merkitsevämpi.

Pintadiffuusio

Polymolekylaarisen adsorption myötä molekyylien sidosvoimat materiaalihuokosten huokosseinämiin pienentyvät materiaalin kosteuspitoisuuden noustessa, koska molekyylit ovat yhä useampana kerroksena. Heikentyvien sidosvoimien seurauksesta uloimmat sitoutuneet vesimolekyylit voivat yhä helpommin palata takaisin huokosilmaan. Molekyylit voivat kuitenkin sitoutua heti uuteen kohtaan. Molekyylit pyrkivät sitoutumaan tyypillisesti heikompien sidosvoimien alueelta kohtaan, jossa sidosvoimat ovat suurempia, eli ne siirtyvät korkeammasta kosteuspitoisuudesta matalampaan. Tästä kosteuden siirtymismuodosta käytetään nimitystä pintadiffuusio. (Vinha 2011)

Pintadiffuusion potentiaalina toimii materiaalin kosteuspitoisuus, kuten kapillaarivirtauksellekin. Tämän takia kapillaarivirtaus ja pintadiffuusio voidaan laskennassa yhdistää. Kapillaarivirtauksen ja pintadiffuusion määrittäminen erillään on myös hyvin haastavaa.

Pintadiffuusio alkaa kuitenkin materiaalissa jo huomattavasti alhaisemmissa kosteuspi-toisuuksissa kuin kapillaarivirtaus. Pintadiffuusio alkaa jo jopa 30 % RH suhteellisissa kosteuksissa. (Vinha 2011)

Termodiffuusio

Termodiffuusiota tapahtuu vain, mikäli rakenteen yli vallitsee lämpötilaero. Termodif-fuusiassa kevyet vesihöyrymolekyylit siirtyvät suurenevan lämpötilan suuntaan ja raskaat ilman molekyylit pienemmän lämpötilan suuntaan (Vinha 2011). Termodiffuusio rajataan usein kosteudensiirron tarkastelun ulkopuolelle sen pieneksi oletetun vaikutuksen takia (Leivo & Rantala 2000).

Wangin ja Xin (2017) mukaan rakenteessa tasaisesti vallitseva korkeampi lämpötila ei merkittävästi vaikuta kosteuden siirtymiseen, mutta mikäli rakenteen yli vaikuttaa läm-pötilaero, havaitaan kosteuden siirtymisessä sitä suurempi ero mitä suurempi lämpötila-ero rakenteen eri puolten välillä vallitsee. Lämpötilaeron vaikutuksesta kosteus siirtyy rakenteessa kohti korkeampaa lämpötilaa.

Termodiffuusion merkityksestä kosteudensiirtoon rakennusfysiikan sovellutuksissa on tehty useita tutkimuksia. Janssen (2010) perustelee miksi termodiffuusiolla ei ole merkit-tävää vaikutusta rakennusfysiikan sovellutuksissa. Janssenin (2010) mukaan useat termo-diffuusion merkittävyyden puolesta tehdyt tutkimukset on toteutettu virheellisesti, eikä termodiffuusiolla ole merkittävää vaikutusta, mikäli virheelliset tutkimukset toteutetaan oikein.

Knudsenin diffuusio eli effuusio

Knudsenin diffuusiolla tarkoitetaan diffuusiota kapean huokosputken läpi, jolloin mole-kyylit törmäilevät huokosputken seinämiin, kun tavallisessa kaasudiffuusiassa molekyylit törmäilevät pääsoin toisiinsa. Knudsenin diffuusion edellytys on, että huokosputken halkaisija on pieni verrattuna molekyylien törmäysväliin. (Malek & Coppens 2003)

Mikäli materiaalin vesihöyrynläpäisevyys määritetään kokeellisesti esimerkiksi kuppiko-keen avulla, on testattavassa koekappaleessa mukana kaiken kokoisia huokosia, jolloin Knudsenin diffuusio on mukana saadussa vesihöyrynläpäisevyyden tuloksessa.

Vesihöyryn konvektio

Konvektiossa ilman sisältämä vesihöyry siirtyy ilman virtausten mukana. Vesihöyryn konvektio voi olla luonnollista tai pakotettua. Luonnollista konvektiota tapahtuu esimer-kiksi rakenteiden sisällä ilman tiheyserojen seurauksena. Pakotettua konvektiota tapahtuu muun muassa rakennuksen vaipassa olevien reikien ja ilmavuotojen seurauksena. (Siika-nen 2014)

Konvektiolla siirtyvä kosteuden määrä saattaa olla moninkertainen diffuusiolla siirtyvään kosteuteen verrattuna (Siikanen 2014). Tuulen tai muun ilmavirtauksen liikuttama ilma tehostaa merkittävästi rakenteiden pintojen kuivumista konvektion seurauksena. Konvektio ei vaikuta kosteudensiirtoon umpinaisessa betonissa, mutta vaikutus voi olla merkittävä rakojen ja halkeamien kautta tapahtuvaan kosteudensiirtoon, sekä betonin pintojen kuivumiseen, mikäli esimerkiksi tuuli kuljettaa ilmaa rakenteen pinnalla.

Kapillaarinen siirtyminen ja kapillaarivirtaus

Nestemäinen vesi voi siirtyä materiaalissa painovoiman tai muun ulkoisen voiman lisäksi myös kapillaarisesti huokosalipaineen seurauksena. Yleisesti kapillaarisuudesta puhuttaessa puhutaan kapillaarisesta nousukorkeudesta, joka kuvaa materiaalin kykyä nostaa vettä vapaan vedenpinnan yläpuolelle. Kapillaarista virtausta voi tapahtua kuitenkin myös vaakasuuntaan tai alaspäin (Vinha 2011). Veden noustessa kapillaarisesti ylöspäin veden siirtymistä vastustavat painovoima ja kitkavoima (Leivo & Rantala 2002). Veden siirtyessä muihin suuntiin painovoima ei vastusta kapillaarivirtausta.

Kapillaarinen kosteudensiirto vaatii huokoisen materiaalin, jonka huokosverkosto on yhtenäinen ja jatkuva. Kapillaarinen siirtyminen on käänteisesti verrannollinen huokosten halkaisijaan (Hagentoft 2001). Kapillaarinen siirtyminen pysähtyy ensimmäiseen suurempaan huokoseen (Vinha 2011).

Materiaalin suhteellisen kosteuden ollessa korkea (yli 98 % RH) kosteus siirtyy lähes yksinomaan nesteinä yhtenäistä kapillaariverkostoa pitkin (Vinha 2011). Kapillaarinen siirtyminen alkaa materiaalissa kuitenkin usein jo huomattavasti alhaisemmissa kosteuspitoisuuksissa. Kapillaarikondenssi alkaa pienimmässä huokosissa, joiden halkaisija on 1 nm luokkaa jo suhteellisen kosteuden ollessa noin 34 % RH (Vinha 2011).

Kosteusdiffusiviteetti

Kosteusdiffusiviteetti D_w [m^2/s] kuvaa materiaalin kosteuspitoisuuden muutosnopeutta kohti tasapainokosteutta. Kosteusdiffusiviteetti ottaa huomioon kaikkien kosteuden siirtymismuotojen vaikutuksen silloin, kun kosteuden siirto voidaan kuvata kosteuspitoisuuseron avulla. Kosteusdiffusiviteetti voidaan myös määrittää pelkästään nestemäisen veden siirtymiselle, jolloin kosteusdiffusiviteetin arvossa on mukana pintadiffuusion, kapillaarisen, painovoimaisen ja paineenalaisen kosteuden siirtymisen vaikutus. Mikäli kosteusdiffusiviteetin arvossa on mukana painovoimaisen kosteuden siirtymisen vaikutus, tulisi laskennassa käyttää eri arvoja, jos kosteus siirtyy ylös- tai alaspäin. (Vinha 2011, RIL-255-1 2014)

Kosteusdiffusiviteetistä voidaan laskea kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti $D_{w,s}$ vähentämällä kosteusdiffusiviteetistä diffuusion vaikutus (RIL 255-1 2014). Materiaalin kosteuspitoisuus ei ole kuitenkaan kapillaarivirtauksen siirtopotentiaali, joten kosteusdiffusiviteetin käyttäminen kapillaarista kosteudensiirtoa laskettaessa saattaa johtaa virheellisiin

tuloksiin etenkin epästationäärisissä tarkasteluissa (Vinha 2011). Hagentoft (2001) toteaa, että ei-isotermisten kosteudensiirtolaskelmien vaatimien diffusiviteettien määrittämistä varten vaaditaan paljon materiaalikokeita, eikä riittäviä materiaaliparametreja ole vielä olemassa.

2.3 Betonin kosteuspitoisuuden mittaus

Yleisesti betonin riittävän kuivumisen määrittelee lattianpäällysteen tai muun betonin päälle tulevan rakennekerroksen vaatimukset alustan kosteuspitoisuudesta. Betonin kosteuspitoisuus voidaan esittää useilla tavoilla, joista yleisimmin käytetty on suhteellinen kosteus (% RH). (Merikallio 2002) Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet -kirjassa (2007) todetaan, että betonin riittävä kuivuminen tulee arvioida betonin suhteellisesta kosteudesta, koska painoprosentteina esimerkiksi karbidimitauksella saatavat tulokset eivät anna riittävän luotettavaa kuvaa betonin kosteudesta.

Betonin suhteellisen kosteuden (% RH) ja kosteussisällön (kg/m^3 tai paino-%) välille on lähes mahdotonta luoda riittävän luotettavaa korrelaatiota, koska edellä mainittujen suureiden suhteet vaihtelevat merkittävästi eri betonilaatujen välillä (Merikallio et al. 2007). Jos betonin kosteuspitoisuus on mitattu esimerkiksi painoprosentteina, kosteusarvoa ei tule muuttaa esimerkiksi päällystettävyyttä arvioitaessa minkään käyrän tai taulukon avulla suhteelliseksi kosteudeksi, eikä myöskään päinvastoin. Jos päällystysraja-arvo on annettu suhteellisena kosteutena, pitää mitata suhteellista kosteutta. (Merikallio 2002)

Betonin kosteutta mitataan käytännössä lähes aina suhteellisena kosteutena arvioitaessa rakenteen pinnoitettavuutta. Betonin suhteellinen kosteus voidaan selvittää luotettavasti esimerkiksi porareikä- tai näytepalamenetelmällä (RT 14-10984 2010).

2.3.1 Menetelmät betonirakenteiden kosteusmittaukseen

Betonin, kuten muidenkin materiaalien kosteuspitoisuuden määrittämiseen on olemassa lukuisia erilaisia mittalaitteita. Tässä aluvussa käsitellään erityisesti betonirakenteiden kosteusmittauksissa käytettäviä mittalaitteita ja mittaustapoja.

Pintakosteudenosoittimet

Pintakosteudenosoittimet ovat kokonsa ja toimintaperiaatteensa takia helppoja ja nopeita käyttää. Niillä ei kuitenkaan saada tarkkaa tietoa rakenteen kosteuspitoisuudesta. Pintakosteudenosoittimet perustuvat sähkönjohtavuuden muutokseen materiaalin kosteuspitoisuuden muuttuessa (Merikallio et al. 2007). Toimintaperiaatteensa ansiosta pintakosteudenosoittimet ovat materiaalia rikkomattomia. Mittalaitteiden valmistajat määrittävät karkeasti sähkönjohtavuuden arvot eri materiaaleille, joten tulokset ovat aina enintään suuntaa-antavia. (Merikallio 2002) Tulokset ovat suuntaa-antavia, koska pintakosteudenosoittimet eivät varsinaisesti mittaa rakenteen kosteutta, vaan arvio kosteudesta perustuu

rakenteen sähkönjohtavuuteen, johon vaikuttaa kosteuden lisäksi muun muassa mahdollisesti rakenteessa olevat metallit.

Pintakosteudenosoittimilla ei saada tarkkaa tietoa betonirakenteiden kosteuspiitoisuudesta, mutta niillä voidaan tuloksia vertailemalla arvioida kosteamman alueen laajuutta, mikäli tiedossa on tarkemmat mittaustulokset märältä ja kuivalta alueelta. Betonirakenteiden raudoitteet tai muut itse betonia sähköä paremmin johtavat osat vaikuttavat herkästi mittaustuloksiin. (Merikallio 2002)

Nimensä mukaisesti pintakosteudenosoittimilla voidaan mitata vain pintaosan kosteuspiitoisuutta. Pintakosteudenosoittimilla ei myöskään voida todeta, millä syvyydellä kosteus on kerroksellisessa rakenteessa, joten esimerkiksi vedeneristetyssä ja laatoitetussa tilassa ei voida arvioida onko laitteen osoittama kosteus vedeneristeen ylä- vai alapuolella. (Merikallio 2002)

Kalsiumkarbidi- ja kalsiumkloridimittaus

Kalsiumkarbidimittausta on käytetty aiemmin, mutta sen käyttöä ei enää suositella päällystettävyyden arviointiin mittaustavan epätarkkuuden takia (Merikallio 2002). Kalsiumkloridimittausta käytetään edelleen ulkomailta pinnoitettavuuden arvioinnissa, mutta sekin ei ota kantaa kosteuden jakautumiseen rakenteen sisällä (CIP 28 2004).

Kalsiumkarbidimittaus perustuu kalsiumkarbidin reaktioon betonin kosteuden kanssa ja reaktion tuottaman paineen mittaukseen. Mittauksessa betonirakenteesta otetut näytepalat laitetaan pulloon, jossa on kalsiumkarbidijauhetta lasiampulleissa. Ampullien hajotessa pullon korkissa oleva painemittari mittaa syntyvän paineen, joka muutetaan taulukoilla betonin kosteuspiitoisuudeksi painoprosenteina. Tulosten määrittäminen edellyttää betonin koostumuksen tuntemisen ja mikäli painoprosenteina saatu tulos halutaan muuttaa suhteelliseksi kosteudeksi heikentää tämäkin muunnos tuloksen tarkkuutta ja luotettavuutta. (Merikallio 2002)

Kalsiumkloridimittauksessa kalsiumkloridiasia punnitaan ennen koetta ja asetetaan pinnoitettavalle betonipinnalle tiivistetyn kuvun alle. Betonista haihtuva kosteus mitataan kalsiumkloridiasian painonmuutoksesta. Tuloksiin vaikuttaa merkittävästi mittausaika. Mittaustapaa voidaan verrata koepinnoitukseen tai betonipinnalle teipatun muovikalvon alle tiivistyvän kosteuden avulla tapahtuvaan pinnoitettavuuden arviointiin. (CIP 28 2004)

Kalsiumkloridimittauksesta on olemassa mittausstandardi ASTM F 1869. Esimerkiksi Yhdysvalloissa kalsiumkloridimittaus on ollut aiemmin yleisesti käytetty menetelmä betonirakenteiden päällystettävyydelle. Nykyään ollaan kuitenkin siirrytty jo betonin suhteellisen kosteuden mittaamiseen porarei'istä, jolloin saadaan muun muassa parempi kuva kosteusjakaumasta rakenteen sisällä. (CIP 28 2004)

Vastusmittaus

Vastusmittaus perustuu pintakosteudenosoittimien tapaan betonin sähkönjohtavuuden mittaamiseen. Vastusmittauksessa vastukset porataan rakenteen sisään, jolloin tuloksia saadaan pintaa syvemmillä. Vastusmittauksen tulosten arviointia vaikeuttavat samat periaatteelliset ongelmat kuin pintakosteudenosoittimillakin tehdyissä mittauksissa. (Merikallio 2002)

Kuivatus-punnitus -menetelmä

Monet aiemmin esitellyt betonin kosteusmittausmenetelmät antavat kosteuspitoisuuden painoprosentteina. Menetelmissä kuitenkin mitataan usein muita suureita ja muunnos kosteuspitoisuudeksi perustuu mittalaittevalmistajan asettamiin karkeisiin arvoihin. (Merikallio 2002)

Betonin kosteuspitoisuus painoprosentteina voidaan määrittää tarkasti kuivatus-punnitus-menetelmällä. Menetelmässä betoninäyte punnitaan kosteana ja kuivana. Kosteuspitoisuus lasketaan mitattujen massojen avulla. Betonikoekappale kuivataan 105 °C lämpötilassa, kunnes koekappaleen massa ei enää muutu. (Merikallio 2002)

Suhteellisen kosteuden mittalaitteet

Betonin huokostilan suhteellista kosteutta mitataan mittalaitteiden koon takia välillisesti, joko betoniin poratusta reiästä (porareikämittaus) tai mittaamalla koeputkeen betoninäytepaloista tasaantuva suhteellinen kosteus (näytepalamittaus).

Suhteellista kosteutta mittaavat mittalaitteet/anturit ovat yleisesti sähköisiä. Suhteellisen kosteuden määrittäminen voi perustua muun muassa anturin kapasitanssin tai resistanssin muutokseen (Merikallio 2002). Kosteutta voidaan mitata myös kastepisteen tai haihtumisen aiheuttaman jäähtymisen perusteella (Parish & Putnam 1977).

Kastepisteanhuri mittaa lämpötilaa, jolloin vesimolekyylit tiivistyvät jäädytetylle levyllä. Psykrometri mittaa kostealla ilmalla huuhdeltavan lämpötila-anturin lämpötilaa ja vertaa sitä vastaavaan ”kuiva-anturiin”, jolloin tuloksena saadaan laskettua ilman suhteellinen kosteus (Parish & Putnam 1977). Suhteellista kosteutta voidaan mitata myös niin sanotulla hiuskosteusmittarilla joka mittaa hiuksen venymistä kostuessaan. Hiuskosteusmittarit olivat yleisiä vielä 1970-luvulla radiosondeissa. (Vaisala 2012)

Kosteusmittauksissa eniten käytettyjä ovat kapasitiiviset kosteusanturit (Merikallio 2002), jotka perustuvat ohutkalvopolymeeriin, jonka ominaisuudet muuttuvat nopeasti suhteellisen kosteuden muuttuessa. Antureiden etuna on nopea tasaantuminen vaihtuvissa olosuhteissa, sekä mittausten korkea tarkkuus. (Vaisala 2012)

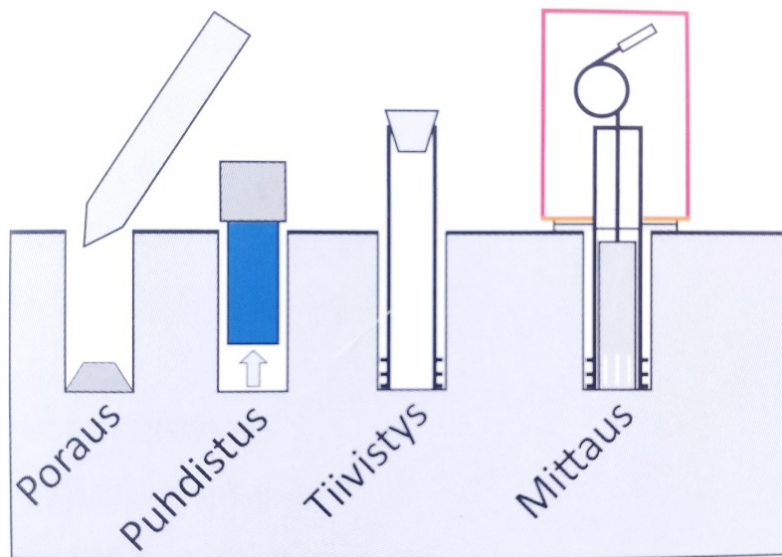
Mittauksissa käytetään yleisesti esimerkiksi Vaisala Oy:n HUMICAP –antureita, joita käytetään Vaisalan HMP42, HMP44 ja HMP40S mittapäissä. Mittalaittevalmistaja ilmoittaa mittapäiden suhteellisen kosteuden mittaustarkkuuden olevan 20 °C lämpötilassa välillä $\pm 1,5 \dots \pm 3$ % RH, riippuen käytettävästä mittapästä ja siitä mitataanko yli vai alle 90 % RH suhteellisessa kosteudessa. Alle 90 % RH suhteellisessa kosteudessa tehtäville mittauksille luvataan hieman parempi tarkkuus, kuin hyvin kosteissa olosuhteissa tehtäville mittauksille. (Vaisala 2006, Vaisala 2014)

2.3.2 Yleisesti käytetyt betonin suhteellisen kosteuden mittaus- tavat

RT 14-10984 Betonin suhteellisen kosteuden mittaus

Rakennustiedon ohjekortissa (2010) käydään läpi betonirakenteiden kosteusmittaustapoja ja annetaan ohjeita käytännön mittausten suunnitteluun sekä toteutukseen. Kortissa kosteusmittausmenetelmät jaotellaan tarkkoihin ja suuntaa antaviin mittaustapoihin. Tarkoiksi rakenteen suhteellisen kosteuden mittaustavoiksi luetaan ohjekortissa kortin ohjeiden mukaisesti toteutettuina porareikämittaus ja näytepalamittaus, jolloin mittausepärtarkkuudet saadaan minimoitua. Suuntaa antaviksi menetelmiksi ohjekortissa lasketaan muun muassa tarkastelu pintakosteudenosoittimella, porareikämittaus toistuvasti samasta reiästä, mittaus valuun asennetusta putkesta, mittaus suosituslämpötila-alueen ulkopuolella, näytepalamittaus pienellä näytemäärällä ja mittaaminen porareistä pian reiän poraamisen jälkeen.

Porareikämittauksen todetaan olevan tarkimmillaan 15 - 25 °C lämpötiloissa, kuitenkin niin, että olosuhteet ovat mahdollisimman lähellä rakennuksen käytönaikaista lämpötilaa. Porareikämittausta varten porataan reikä haluttuun mittaussyvyyteen, reikä puhdistetaan huolellisesti porauspölystä ja reikään asennetaan porareiän pohjalle ulottuva mittausputki, joka tiivistetään vesihöyrytiivisti kiinni rakenteeseen ja putken pää suljetaan. Porareikämittauksen vaiheet on esitetty kuvassa 2.4. Putkitetun reiän annetaan tasaantua vähintään 3 vrk poraamisesta, jonka jälkeen putken tasoittunut suhteellinen kosteus mitataan. Poraamisen on todettu nostavan hetkellisesti porauksen jälkeen kuivien betonirakenteiden mitattuja suhteellisen kosteuden arvoja jopa 20 % RH-yksikköä, porauksen aiheuttaman lämpötilan nousun ja kosteuden jakautumisen takia (Merikallio 2002). Mittapään täytyy antaa tasaantua putken suhteelliseen kosteuteen. Tasaantumisaika on laitekohtainen ja ohjekortin mukainen tasaantumisaika on 1 - 4 tuntia. (RT 14-10984 2010)

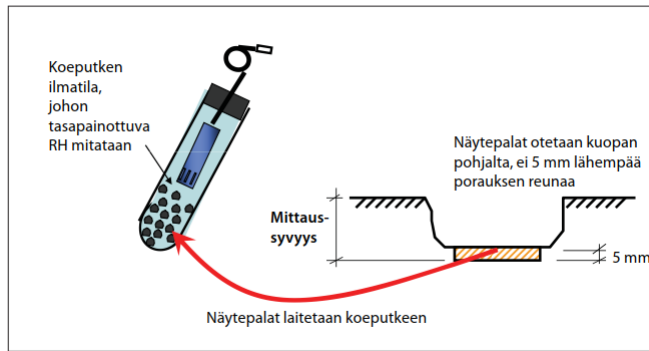


Kuva 2.4. Porareikämittauksen vaiheet. (BY 201 2018)

Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n ohje porareikämittauksiin vastaa RT-kortin oheistusta. Vahasen mittaustapaliitteen mukaan mittapään annetaan tasaantua vähintään 1 tunti käytettäessä Vaisala Oy:n HMP44/HMP40S antureita.

Näytepalamittaus soveltuu tarkaksi kosteusmittausmenetelmäksi $-20 - 80\text{ °C}$ lämpötiloissa, koska mittaolosuhteiden (olosuhteet mittaushetkellä) eivät vaikuta mittaustulosten luotettavuuteen. Näytepalamittauksessa piikataan betonista näytepaloja koeputkeen, joiden sisältämä kosteus tasoittuu koeputken ilmatilaan. Putkeen tasoittuva suhteellinen kosteus mitataan putkeen asennettavalla mittapäällä. Kuvassa 2.5 on esitetty näytepalamittauksen periaate. Näytepalat piikataan halutulta arviointisyvyydeltä ja 5 mm sen yläpuolelta niin sanotulta näytteenottopinnalta, jolloin putkeen tasoittuva kosteus vastaa tavoitemittaussyvyyden suhteellista kosteutta. Ohjekortissa neuvotaan poraamaan betoniin kuivamenetelmällä 50 - 100 mm porakruunulla haluttuun syvyyteen mittaussyvyyden yläpuolella olevan betonin poistamiseksi. Mikäli betoni poistetaan poraamalla, täytyy porauksen aiheuttama lämpötilan nousu kuitenkin ottaa huomioon itse näytepaloja piikattaessa siten, että näytepaloja ei piikata porausalueelta. Mittaussyvyyden yläpuolinen betoni voidaan poistaa myös piikkaamalla. (RT 14-10984 2010)

Näytteitä kerätään koeputkeen vain halutulta syvyydeltä siten, että näytteitä on koeputken ilmatilavuudesta vähintään kolmasosa. Näytteinä ei käytetä suuria runkoainesrakeita. Putkeen asennetaan välittömästi mittapää ja putken pää tiivistetään vesihöyrytiivillä kitillä. Tiivistetty koeputki siirretään tasaantumaan vakio- 20 °C lämpötilaan (yleensä 20 °C) vähintään 5 - 12 tunniksi. Tasaantumisaika todetaan riippuvan käytettävästä mittapästä, betonilaadusta, betonin kosteudesta ja käytettävästä näytemäärästä sekä näytteiden koosta. (RT 14-10984 2010)



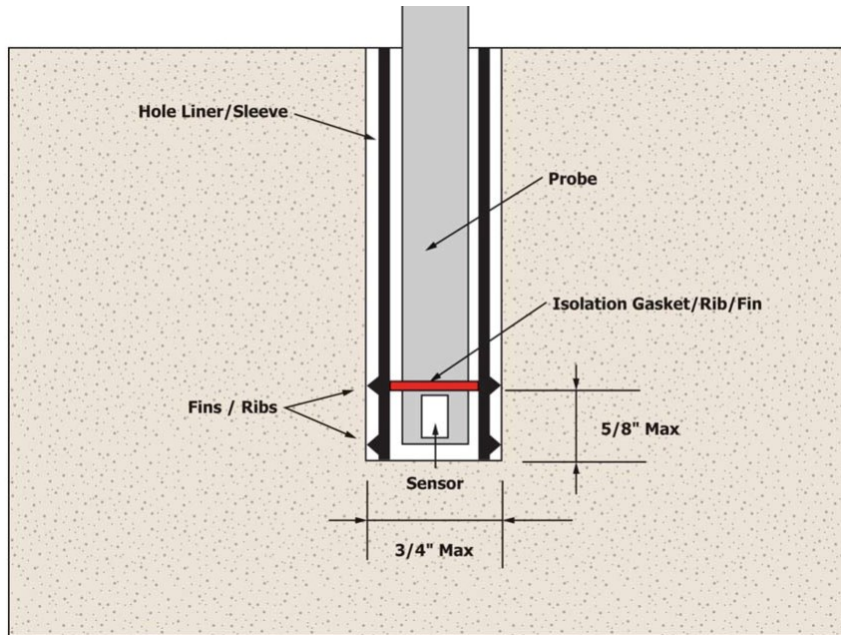
Kuva 2.5. Näytepalamittauksen periaate. (RT 14-10984 2010)

Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n ohje näytepalamittauksiin vastaa RT-kortin oheistusta. Vahasen mittaustapalitteen mukaan koeputken annetaan tasaantua vähintään 6 tuntia käytettäessä Vaisala Oy:n HMP44/HMP40S antureita.

RT-kortissa (RT 14-10984 2010) todetaan suhteellisen kosteuden tasaantuvan koeputkeen 2 % RH-yksikön tarkkuudella jo yhden tunnin aikana, mikäli koeputkessa on varmasti riittävästi murusia ja betoni on normaalilujuuksista. Jo tunnin tasaantumisajalla saavutetaan yleensä riittävä tarkkuus varsinkin, jos tulos tarvitaan nopeasti.

ASTM, F2170-16b

Standardissa (ASTM F2170-16b 2017) kuvataan porareikämittausmenetelmä. Kuvattu menetelmä vastaa monin paikoin RT-kortissa kuvattua porareikämittausmenetelmää. ASTM -standardissa ohjeistetaan poraamaan betoniin halkaisijaltaan 1 mm suurempi reikä, kuin käytettävä putki. Tiivistetyn putken tulee tasaantua vähintään 3 vuorokautta. Standardissa ohjeistetaan myös mittauksien teko valuun asennettavasta putkesta. Mittapään tasaantumiselle ei anneta erillistä tasaantumisaikaa, vaan mittaus voidaan suorittaa, kun porareikään asennettu mittapää saavuttaa rakenteen lämpötilan. Rakenteen lämpötilan tulee tasaantua 2 vuorokautta ennen mittauksia. Mittapään saavutettua sama lämpötila luetaan suhteellisen kosteuden lukema ja mittaus sekä mittapään tasaantuminen tarkastetaan. Suhteellisen kosteuden mitattu tulos ei saa muuttua 5 minuutin kuluessa yli 1 % RH-yksikköä. Standardissa ohjeistetaan asentamaan mittapää $15,9 \pm 3$ mm päähän poratun reiän pohjasta ja tiivistämään mittapää putken reunoihin kuvan 2.6 mukaisesti. (ASTM F2170-16b 2017)

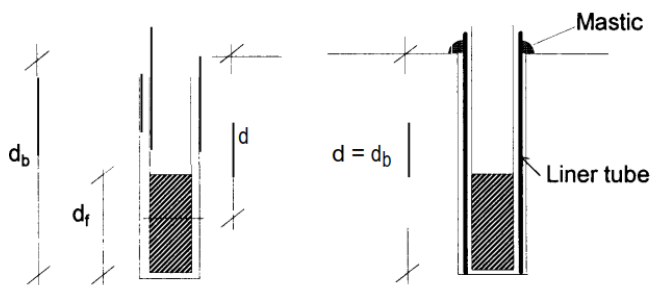


Kuva 2.6. Mittapään tiivistys ja asennussyvyys. (ASTM F2170-16b 2017)

Putken yläreuna tiivistetään kuvasta poiketen kuten RT-kortin ohjeistuksessa. Yläreunan tiivistys voidaan kuitenkin poistaa ennen varsinaista mittausta (ASTM F2170-16b 2017).

Nordtest, NT Build 439

NT Build ohjekortin (1995) menetelmä betonin suhteellisen kosteuden mittaamiseen on pääperiaatteeltaan samansuuntainen RT-kortissa ohjeistettuun porareikämenetelmään nähden. Betoniin porataan sopiva reikä siten, että siihen sopii käytettävä putki tai siten, että se on halkaisijaltaan 2 mm mittapäättä suurempi, mikäli putkea ei käytetä. Porattu reikä tiivistetään mittaussyvyyteen asti vähintään viikoksi. Kuvassa 2.7 on esitetty mittaussyvydet, mikäli mittausta suoritetaan ilman reikään asennettavaa putkea tai putken kanssa. (NT Build 439 1995)



Kuva 2.7. Betonin suhteellisen kosteuden mittausta porareikästä. (NT Build 439 1995)

Mikäli suhteellinen kosteus mitataan porareikästä ilman suojaputkea, mittaussyvyys on poratun reiän ja tiivistyksen puolivälissä. Mikäli mittausta tehdään suojaputken kanssa, on

mittaussyvyys sama kuin poratun reiän syvyys. (NT Build 439 1995) Mikäli mittaus tehdään ilman putkea, vaikuttaa rakenteessa vallitseva kosteusjakauma mittauksen tarkkuuteen ja tulos on epätarkka.

NT Buildin ohjeistuksessa mittapään tulee tasaantua 1 - 24 tuntia. Mikäli mittauksessa käytetään suojaputkea, annetaan mittapään tasaantua 24 tuntia, tällöin saavutetaan ± 1 % RH-yksikön mittausvirhe. Ilman suojaputkea mitattaessa virhe on ± 2 % RH-yksikköä tasaantumisaian ollessa 24 tuntia ja ± 4 % RH-yksikköä 1 tunnin tasaantumisaialla. (NT Build 439 1995) NT Buildin ohjekortin mukaan suhteellisen kosteuden mittausvirheet ovat huomattavasti pienempiä, kuin RT-kortissa (2010) esitetyt mittauksen kokonaisvirheet.

2.3.3 Suhteellisen kosteuden mittaamisen mittaustarkkuus

Mittalaitteiden tarkkuuden lisäksi kosteusmittausten tarkkuuteen vaikuttaa olosuhdetekijät ja mittausten suoritustavasta johtuvat epätarkkuustekijät. Ohjekortin (RT 14-10984 2010) mukaan huolellisesti ja tarkoilla mittausmenetelmillä suoritettujen kosteusmittausten kokonaismittaustarkkuus on vähintään suuruusluokkaa ± 5 % RH-yksikköä.

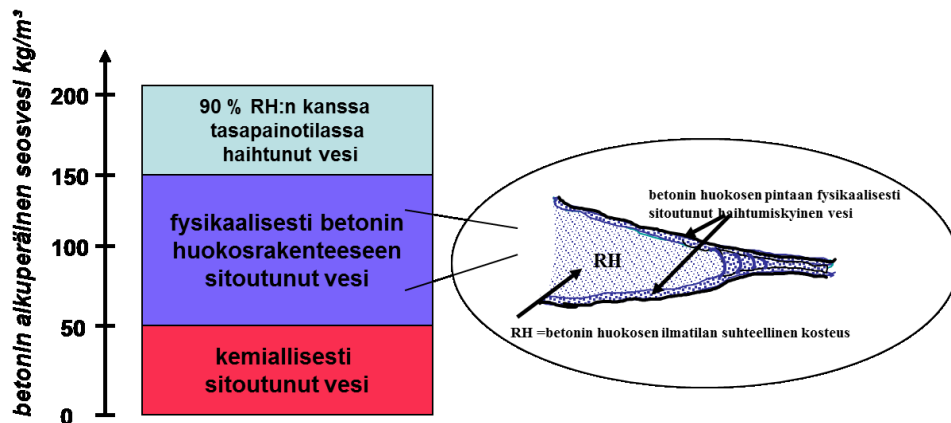
Esimerkiksi porareikämittauksissa lämpötilalla on suuri merkitys tulosten oikeellisuuteen. Jo 1 °C lämpötilaero mittapään ja rakenteen välillä aiheuttaa 5 % RH-yksikön virheen mittauksiin (Merikallio 2002). Käytännössä suurin vaikutus mittaustarkkuuteen on kuitenkin suorituksen huolellisuus, sillä mittausputken puhdistus ja tiivistys vaikuttavat tuloksiin merkittävästi. Myös mittaussyvyys vaikuttaa kosteusmittaustulosten tarkkuuteen.

3. KOSTEUS JA KOSTEUDEN SIIRTYMINEN BETONIRAKENTEISSA

3.1 Betonin rakennekosteus

Kuten edellä on todettu, sisältää betoni aina jonkin verran kosteutta. Suuri osa kosteudesta on peräisin betonin valmistamiseen käytetystä vedestä. Veden tehtävänä betonia valmistettaessa on muodostaa sementin kanssa sementtiliima, joka sitoo kiviainekset toisiinsa ja muodostaa lujan lopputuotteen. Vesimäärällä voidaan vaikuttaa myös betonimassan työstettävyyteen, mikä on osaltaan tärkeä ominaisuus valun onnistumisen kannalta.

Kaikkea betoniin valmistusvaiheessa sekoitettavaa vettä ei tarvitse kuivattaa rakenteesta, sillä osa betonin valmistamiseen käytetystä vedestä sitoutuu kemiallisesti reagoidessaan sementin kanssa betonin kovettuessa. Kemiallisesti sitoutuneen veden määrä on tyypillisesti noin 20 painoprosenttia sementin massasta. Loput betonin valmistamiseen käytetystä vedestä sitoutuu betonin huokosiin fysikaalisesti. Fysikaalisesti betonin huokosiin sitoutunutta vesimäärää nimitetään rakennekosteudeksi. Esimerkiksi kuvan 3.1 mukaisesti, jos normaalin lattiabetonin valmistamiseen käytetään 200 kg/m^3 vettä ja 250 kg/m^3 sementtiä, alkuperäisestä vesimäärästä vain noin 50 kg/m^3 sitoutuu kemiallisesti. Esimerkitapauksessa 150 kg/m^3 vettä sitoutuu betonin huokosrakenteeseen fysikaalisesti. (Merikallio et al. 2007)



Kuva 3.1. Havainnekuva kemiallisesti ja fysikaalisesti sitoutuneen veden suhteista esi-merkin betonissa. Vain osa alkuperäisestä vedestä tarvitaan betonin hydrataatioon (lujuudenkehitykseen). (Merikallio et al. 2007)

Betoniin fysikaalisesti sitoutunutta vesimäärää kutsutaan myös haihtumiskykyiseksi vedeksi, joka kuivuu betonin suhteellisen kosteuden lähestyessä samaa suhteellista kosteutta ympäristön kanssa. Huonoissa kuivumisolosuhteissa, kun ympäristön suhteellinen kos-

teus on korkea, betoni ei kuivu käytännössä lainkaan. Kyseinen tilanne saattaa vallita rakennustyömailla esimerkiksi syksyisin, kun ulkoilman suhteellinen kosteus on luokkaa 90 - 100 % RH, ja jos ei erityisesti huolehdi hyvästä kosteudenhallinnasta. Tämän takia betonin kuivumiseen ja kuivumisolosuhteisiin on syytä kiinnittää huomiota. Esimerkiksi pyrittäessä kuivattamaan betoni 90 % RH tasoon, tulee fysikaalisesti sitoutuneesta vedestä kuivattaa n. 50 kg/m³. (Merikallio et al. 2007)

3.2 Betonin rakennuskosteus

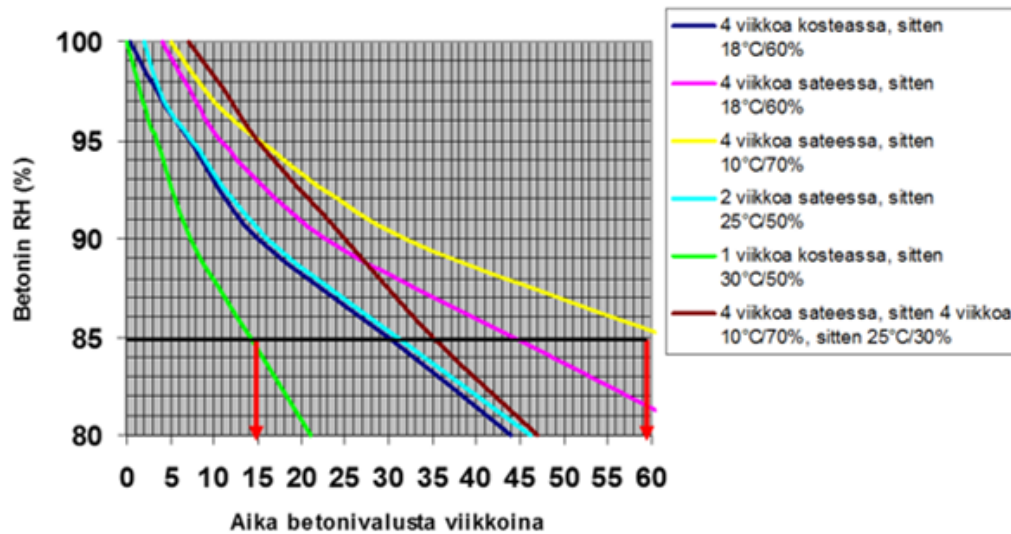
Betoniin voi joutua kosteutta myös rakennusvaiheen aikaisen kastumisen seurauksena. Tätä rakennuksen käytönaikaisen tasapainokosteuden ylittävää kosteutta kutsutaan rakennuskosteudeksi. Kosteus voi siirtyä betoniin hygroskooppisesti ympäröivän ilman korkeamman kosteuspitoisuuden seurauksena tai kapilaarisesti mikäli betonirakenteet ovat kosketuksissa vapaaseen veteen. (Merikallio et al. 2007)

Rakennustyömaalla olosuhteet vaihtelevat laajalti. Betonilaatta saattaa joutua valun jälkeen olemaan useita viikkoja kylmässä ja kosteassa ympäristössä, pahimmassa tapauksessa vesisateessa. Erittäin kylmissä olosuhteissa edes hydrataatio ei käynnisty kunnolla ja betoniin ei kehity tavoiteltuja lujuusominaisuuksia. Tämä on mahdollista esimerkiksi talvella betonoitaessa. (BY 201 2018)

Betonin kastuminen vaikuttaa kuivumisaikaan merkittävästi. Betonin kastuessa kuivatettava vesimäärä kasvaa. Betonin huokosrakenteen tiivistyessä myöhäisemmässä vaiheessa kastumisen seurauksena betoniin päässyt kosteus poistuu hitaammin kuin betoniin valmistusvaiheessa lisätty vesi. Valuvaiheessa betonin huokokset ovat vielä lähes täynnä vettä eivätkä ne siten pysty vastaanottamaan lisää kosteutta, mutta jo muutaman viikon päästä valusta tapahtuneella kastumisella on merkittävä vaikutus kuivumisaikoihin. (Merikallio et al. 2007)

Hydrataation edetessä betonin huokosrakenne tiivistyy. Huokosrakenteen tiivistyminen ei kuitenkaan estä veden pääsyä rakenteeseen, mutta se kuitenkin hidastaa kosteuden poistumista. Esimerkiksi muutamien viikkojen pituinen rankkasade voi kasvattaa betonirakenteen kuivumisaikaa kymmenillä viikoilla, kuten kuvasta 3.2 selviää. Myös vesivaingossa kastuneen betonin kuivumisaika on huomattavasti tuoretta betonia pidempi, koska betonin tiiviys kasvaa ajan kuluessa. (Merikallio et al. 2007)

Paikallavalettu massiivinen tb-välipohja 250 mm.
Betoni v/s 0,7. Kuivumisaikoja eri olosuhteissa.



Kuva 3.2. Kuivumisolosuhteiden vaikutus kuivumisaikaan. Betonin kastuminen sekä huonot kuivumisolosuhteet pidentävät merkittävästi kuivumisaikaa. Erityisesti alhaisissa lämpötiloissa kuivumisajat ovat hyvin pitkiä. (Merikallio 2002)

Betonirakenteiden jälkihoidon jälkeisen kastumisen mahdollisimman nopea estäminen on yksi merkittävimmistä tekijöistä, mikäli rakenne pyritään kuivattamaan nopeassa aikataulussa.

Lyhytaikaisen kastumisen vaikutuksia voidaan arvioida esimerkiksi veden tunkeutumiskertoimen avulla laskettavalla tunkeutumissyvyydellä. Vesi-sementtisuhteella 0,5 valmistetulle betonille ilmoitetaan kirjallisuudessa veden tunkeutumiskertoimen, B_w , arvoksi $0,17 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^{1/2}$. Veden tunkeutumissyvyys, X_p [m], voidaan laskea kaavalla 3.1. (Vinha 2011)

$$X_p = B_w \sqrt{t}, \quad (3.1)$$

missä

B_w = Veden tunkeutumiskerroin [$\text{m/s}^{1/2}$]

t = Aika [s]

Yleisesti käytetyt veden tunkeutumiskeroimen arvot eivät sisällä painovoiman vaikutusta. Periaatteessa painovoiman vaikutus voidaan ottaa huomioon veden tunkeutumiskertoimen arvossa. Kaavalla voidaan laskea muun muassa alapäästään vesikosketuksessa olevaan rakenteeseen tunkeutuvan veden tunkeutumissyvyys tietyssä ajassa (Vinha 2011). Mikäli kaavaa sovelletaan pinnaltaan kastuneelle betonilaatalle, saadaan esimerkiksi vuorokauden vesikosketuksen vaikutukseksi noin 50 mm veden tunkeutuminen.

3.3 Betonirakenteen kuivuminen

Betonirakenteiden kuivuminen ja kuivumisnopeus riippuvat monista tekijöistä. Kaikkia rakenteita ei ole tarpeellista eikä mielekästä pyrkiä kuivattamaan. Tärkeintä kuivuminen on pinnoitettavissa rakenteissa, kuten välipohjissa etenkin, jos betonirakenteen päälle asennetaan vesihöyrytiivitä pinnoitteita. Kuivumisen kannalta kriittisten rakenteiden huomioon ottaminen aikatauluissa, betonivalinnoissa ja kuivatusolosuhteiden luomisessa ovat yksi rakentamisen kosteudenhallinnan avainkohtia (BY 201 2018).

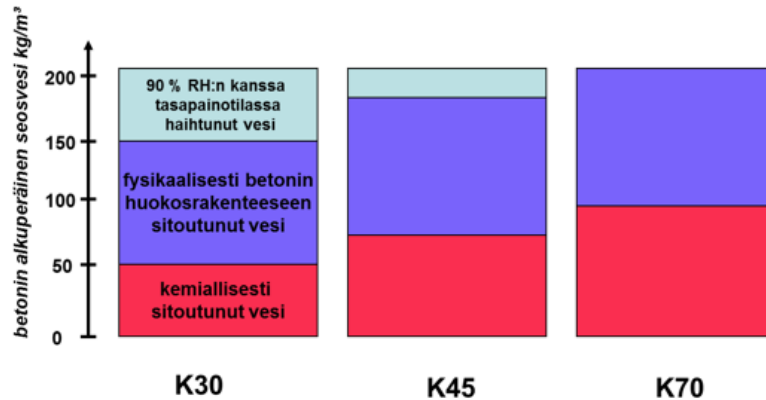
Betonin kuivuminen voidaan jakaa kahteen osaan, joista ensimmäinen on hydrataation betonia kuivattava vaikutus, jota nimitetään sitoutumiskuivumiseksi. Kuten edellä todettiin, hydrataatioreaktiossa vesi sitoutuu kemiallisesti, jolloin betonin huokosissa fysikaalisesti sitoutuneen veden määrä pienenee ja kosteuspitoisuus alenee. Fysikaalisesti sitoutunut kosteus kuivuu rakenteesta haihtumalla avointen pintojen kautta. (Merikallio et al. 2007)

3.3.1 Sitoutumiskuivuminen

Sitoutumiskuivumiseen vaikuttaa eniten betonissa käytettävä sementtimäärä. Suuri sementtimäärä kasvattaa sitoutumiskuivumisen osuutta. Esimerkiksi nopeasti kuivuvien betonien nopeampi kuivuminen perustuu osittain suureen sementtimäärään. Joidenkin erikoisbetonien kohdalla puhutaankin itsestään kuivuvista betonimassoista. (Merikallio et al. 2007)

Betonimassan kovettuessa osa betonin valmistamiseen käytettävästä vedestä sitoutuu sementin hydrataation seurauksena, jolloin suhteellinen kosteus betonin huokosrakenteessa laskee. Hydrataatioreaktion seurauksena suhteellinen kosteus betonin huokosrakenteessa laskee yleensä tasolle 90 - 98 % RH betonilaadusta riippuen. Loppuosa kosteudesta poistuu rakenteesta haihtumiskuivumisen seurauksena, kun betonirakenteen suhteellinen kosteus tasoittuu ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden tasolle. (Merikallio et al. 2007)

Betonin ominaisuuksista lähinnä vesi-sideainesuhde ja huokosrakenne vaikuttavat siihen, miten paljon, kuinka nopeasti ja kuinka kauan betoni sitoo kosteutta kemiallisesti kovettuessaan. Kun verrataan kahta eri betonilaatua, joiden valmistamiseen käytetään sama määrä vettä, mutta sementtimäärässä on eroa, kemiallisesti sitoutuneen veden määrä on suurempi betonissa, jossa sementtimäärä on suurempi. Vastaavasti haihdutettavan veden määrä on pienempi pyrittäessä samaan tavoitekosteuspitoisuuteen. Kuvassa 3.3 on havainnollistettu eri lujuusluokkien betonien seosveden jakautumista kemiallisesti ja fysikaalisesti sitoutuvaan veteen betonin lujittumisen jälkeen. (Merikallio et al. 2007)



Kuva 3.3. Betonin lujuusluokan vaikutus kemiallisesti sitoutuvan veden määrään suhteessa haihdutettavaan veteen, kun tavoitellaan 90 % RH kosteutta. Betonin haihtumiskykyisen veden määrä riippuu pitkälti sen sementtimäärästä. Korkean lujuusluokan betoni saattaa kuivua 90 RH %:n kosteuteen pelkällä kemiallisella kuivumisella. (Merikallio et al. 2007)

Alhaisempi vesi-sementtisuhte edesauttaa betonin kuivumista alkuvaiheessa ja esimerkiksi päällystysvaatimukset saatetaan saavuttaa jopa ilman haihtumiskuivatusta. Matala vesisementtisuhte kuitenkin heikentää betonin työstettävyyttä, koska betonimassa on huomattavasti jäykempää kuin suuremman vesi-sementtisuhteen vastaava betoni. Lisäaineilla voidaan parantaa betonin työstettävyyttä ja notkeutta kuitenkin merkittävästi. Korkea sementtimäärä lisää myös betonin kutistumaa, joka saattaa aiheuttaa rakenteen halkeilua ja ohuiden teräsbetonilaattojen käyritymistä. Matalan vesi-sementtisuhteen betonien vesihöyrynläpäisevyys on yleensä pienempi kuin korkean vesi-sementtisuhteen betoneilla. Pienempi vesihöyrynläpäisevyys hidastaa haihtumiskuivumista. (Merikallio et al. 2007)

Sementin hydrataatioreaktiot

Hydrataatio koostuu sementin eri komponenttien ja veden välisistä reaktioista, jotka tapahtuvat eri nopeuksilla sekä peräkkäin että samanaikaisesti. Kun sementti sekoitetaan veteen, sementin sisältämät silikaatit ja aluminaatit muodostavat hydrataatiotuotteita. Hydrataatiotuotteet kovettuvat ajan myötä yhtenäiseksi sementtikiveksi. (Iso-Mustajärvi 2013)

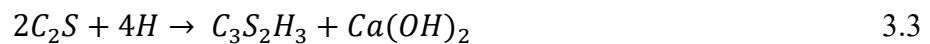
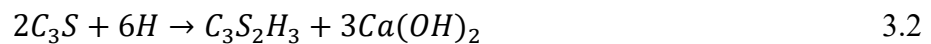
Hydrataatioreaktio alkaa sementtihiukkasten pinnalta, johon muodostuu sementtigeliksi kutsuttavaa massaa. Sementtigeeli koostuu sauvamaisista ja levymäisistä kiteistä. Sementtigelin tilavuus on kaksinkertainen sementin alkuperäiseen tilavuuteen nähden, koska hydratoituneet sementtihiukkaset muodostavat verkkomaisen rakenteen. (BY 2018)

Sementtiliiman hydrataatioaste riippuu käytettävissä olevasta vesimäärästä. Teoriassa täydelliseen hydratoitumiseen vaaditaan vettä noin 20 – 25 % sementin painosta. Hydrataation vaatiman vesimäärän lisäksi vettä sitoutuu sementtigeelin geelihuokosiin noin 15 % sementin painosta, jolloin täydellisen hydrataation vaatima vesimäärä on noin 40 % sementin painosta, joka tarkoittaa vesi-sementtisuhdetta 0,4. (BY 201 2018)

Kovettuneessa sementtikivessä vettä on sitoutuneena kemiallisesti syntyneiden yhdisteiden molekyyliissä, fysikaalisesti sitoutuneena geelihuokosissa sekä sementtikiven kapillaarihuokosissa ja muissa mahdollisissa huokosissa ja koloissa. (Iso-Mustajärvi 2013)

Sementtikiveen syntyy niin kutsuttuja supistumishuokosia, koska sementtigeelin tilavuus on pienempi kuin sementin ja veden yhteenlaskettu tilavuus. Esimerkiksi täysin hydratoituneessa vesi-sementtisuhteella 0,6 valmistetussa sementtikivessä on huokosia yhteensä noin 28 % sementtigeelin tilavuudesta. (Iso-Mustajärvi 2013)

Sementin hydrataatiosta pääosan muodostaa kalsiumsilikaattien hydratoituminen, jossa kalsiumsilikaatit C_3S ja C_2S reagoivat veden kanssa. Kalsiumsilikaattien reaktiotuotteina syntyy kalsiumsilikaattihydraattia ja kalsiumhydroksia kemiallisten yhtälöiden 3.2 ja 3.3 mukaisesti. (Iso-Mustajärvi 2013)



joissa

C_3S = Trikalsiumsilikaatti ($3CaO \cdot SiO_2$)

C_2S = Dikalsiumsilikaatti ($2CaO \cdot SiO_2$)

H = Vesi (H_2O)

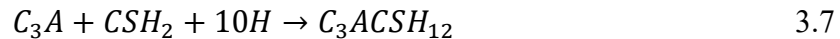
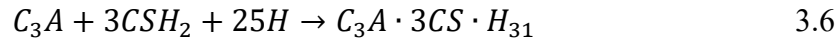
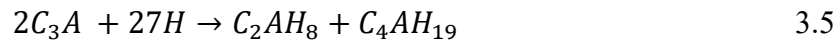
$C_3S_2H_3$ = Kalsiumsilikaattihydraatti ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$)

$Ca(OH)_2$ = Kalsiumhydroksidi

Kummankin kalsiumsilikaatin hydrataatioreaktion reaktiotuotteet ovat samat, mutta reaktiotuotteiden suhteissa on eroja. Dikalsiumsilikaatin hydrataatio tuottaa sementtipastalle suuremman loppulujuuden, koska se tuottaa enemmän kalsiumsilikaattihydraattia. Dikalsiumsilikaatin hydrataationopeus on kuitenkin huomattavasti hitaampi kuin trikalsiumsilikaatilla. Esimerkiksi 28 vuorokauden jälkeen sementtipastan lujuus on pääosin peräisin trikalsiumsilikaatin hydratoitumisesta. (Iso-Mustajärvi 2013)

Sementtiklinkkerin polton kannalta merkittävien trikalsiumaluminaattien C_3A hydratoituminen tapahtuu hyvin nopeasti ja se kovettaa sementtiliimaa välittömästi. Haitallisen reaktion estämiseksi sementtiin lisätään kipsiä, jotta betonimassalle saadaan riittävä työaika. Trikalsiumaluminaattien vaikutukset sementin hydrataatioon ovat muutenkin epäedullisia, sillä trikalsiumaluminaatit heikentävät sementtikiven sulfaatinkestoa eivätkä ne

juurikaan lisää sementtikiven lujuutta. Trikalsiumaluminaattien hydrataatio etenee seuraavien kemiallisten yhtälöiden mukaisesti. Yhtälöissä 3.6 ja 3.7 reaktiossa on mukana kipsi. (RAK 82.3131 2015)



joissa

C_3A = Trikalsiumaluminaatti ($3CaO \cdot Al_2O_3$)

H = Vesi (H_2O)

C_3AH_6 = Trikalsiumaluminaattihydraatti ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$)

C_2AH_8 = Dikalsiumaluminaattihydraatti ($2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$)

C_4AH_{19} = Tetradikalsiumaluminaattihydraatti ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 19H_2O$)

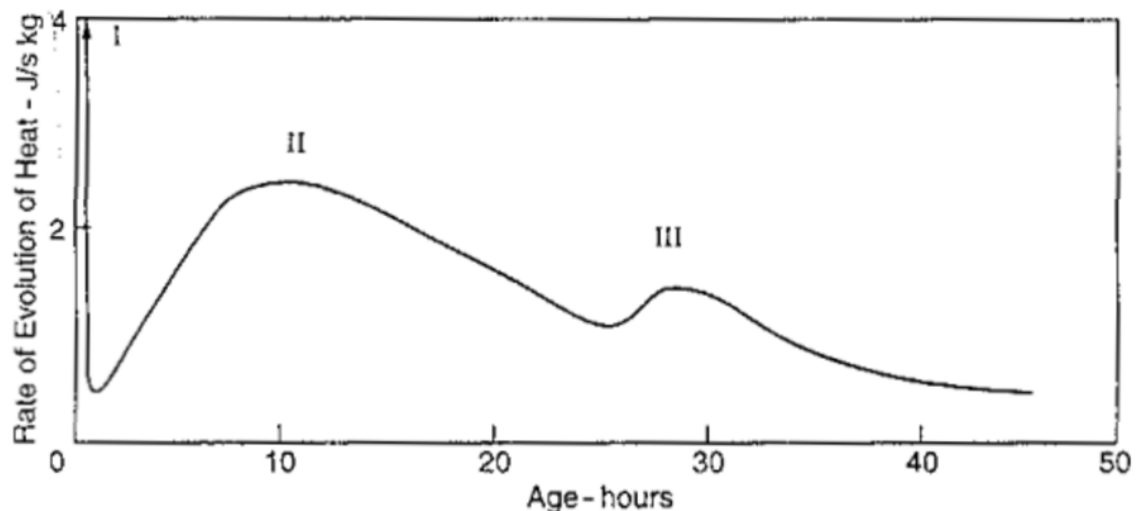
CSH_2 = Kipsi ($CaSO_4 \cdot H_2O$)

$C_3A \cdot 3CS \cdot H_{31}$ = Ettringiitti ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$)

C_3ACSH_{12} = Monosulfaatti ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$)

Portlandsementin hydrataation lämmöntuotto

Sementin hydrataatiosta on erotettavissa useita vaiheita. Kuvassa 3.4 on numeroituna kolme hydrataation aiheuttamaa lämmöntuoton nousua.



Kuva 3.4. Portlandsementin lämmöntuotto vesi-sementtisuhteella 0,4. (Neville 1995)

Ensimmäinen vaihe on hyvin nopea ja lämmöntuotto on hyvin korkea. Ensimmäinen vaihe on hyvin lyhyt ja kestää tyypillisesti vain muutamia minutteja. Tämän vaiheen aikana sementtipasta säilyttää työstettävyytensä. Ensimmäisen vaiheen jälkeen lämmön-

tuotto vähenee. Tätä vaihetta kutsutaan usein lepovaiheeksi, joka kestää tyypillisesti muutamia tunteja. Kuvassa 3.4 numerolla 2 kuvattua vaihetta kutsutaan kiihtyväksi vaiheeksi. Kiihtyvän vaiheen aikana syntyy ensimmäisiä pysyviä hydrataatiotuotteita, jonka seurauksena pasta sitoutuu. Kiihtyvän vaiheen suurin lämmöntuotto on tyypillisesti 5-10 tunnin kuluttua veden ja sementin sekoittamisesta. Kiihtyvää vaihetta pidetään hydrataation pääreaktiona. (Virola & Raivio 2000)

Kiihtyvän vaiheen jälkeen lämmöntuotto vähenee, vaihetta kutsutaan hidastuvaksi vaiheeksi (Virola & Raivio 2000). Hidastuva vaihe johtuu siitä, että hydrataation vaadittavan veden on siirryttävä diffuusiolla syntyneiden hydrataatiotuotteiden huokosten kautta saavuttaakseen reagoimatonta sementtiä (Neville 1995).

Useimmilla sementeillä hidastuvaa vaihetta seuraa kuvaan numerolla 3 merkitty lämmöntuoton nousu. Kolmannen lämmöntuottopiikin maksimi saavutetaan yleensä 18 - 30 tunnin kuluttua sementin ja veden sekoittamisesta. Kolmas lämmöntuoton nousu johtuu trikalsiumalumiinin reagoimista kipsin loppumisen jälkeen. (Neville 1995)

Huokosrakenteen vaikutus kuivumiseen

Betonin huokosrakenne ja sen kehittyminen kovettumisen seurauksena vaikuttaa betonin kosteudensiirto-ominaisuuksiin ja siten myös betonin kuivumiseen. Hydrataation edessä betonin huokosrakenne tiivistyy. Tuoreessa betonissa on yhtenäinen kapillaariverkosto, jonka avulla kosteutta voi siirtyä hyvin tehokkaasti rakenteen sisällä. Betonin kovettuessa sementtikivi tiivistyy ja huokosrakenne muuttuu. Betonikiven lopullinen tiiviys riippuu betonin vesi-sementtisuhteesta. Korkean vesi-sementtisuhteen betoneissa kapillaariverkosto voi olla yhtenäinen, vaikka hydrataatio olisikin edennyt loppuun asti. Mitä matalampi vesi-sementtisuhte on, sitä nopeammin sementtikiven kapillaariverkosto katkeaa ja kosteuden siirtyminen betonin sisällä hidastuu. (BY 201 2018)

3.3.2 Haihtumiskuivuminen

Betonin haihtumiskuivuminen alkaa varsinaisesti vasta, kun jälkihoito on lopetettu. Usein betonirakenteet vaativat huolellisen vähintään viikon kestävän jälkihoidon. Jälkihoito varmistaa betonin suunnitellun lujuudenkehittymisen ja vähentää kutistuman aiheuttamaa halkeilua. Yleinen jälkihoitotapa on pitää betonirakenteen pinta kosteana jälkihoidon ajan esimerkiksi muovikalvolla ja/tai vesisumutuksella. (BY 201 2018)

Haihtumiskuivumiseen vaikuttavat merkittävästi betonin koostumus, rakenteen paksuus ja rakennetta ympäröivät lämpö- ja kosteusolosuhteet. Betonin koostumus vaikuttaa siihen, miten paljon haihtumiskykyistä kosteutta rakenteessa on ja miten helposti kosteus pääsee siirtymään rakenteen pintaan, josta se poistuu. (Merikallio et al. 2007)

Yleisesti rakennekerroksen kuivuminen jakautuu kolmeen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa rakenteesta poistuu kosteutta kapillaarisesti ja diffuusiolla, jolloin kuivumista

rajoittaa pinnasta haihtuva kosteus. Kapilaarista siirtymistä tapahtuu, mikäli rakenteen suhteellinen kosteus on hyvin korkea (yli 97 % RH). Kun rakenteen pintaosa kuivuu hygroskooppiselle alueelle, rakenteen kuivumista rajoittaa kosteuden siirtyminen rakenteen sisältä rakenteen pintaan. Hygroskooppisella alueella kosteus siirtyy rakenteen sisällä suurelta osin diffuusiolla. Kuivumisen viimeisessä vaiheessa rakenteen pinta on kuivunut ympäröivää ilmaa vastaavaan suhteelliseen kosteuteen, mutta rakenteen sisältä siirtyy yhä kosteutta diffuusiolla, joka edelleen haihtuu pinnasta. Kuivumisnopeus riippuu kahdessa viimeisessä vaiheessa vahvasti rakenteen vesihöyrynvastuksesta. Kosteuden siirtyminen diffuusiolla on erittäin hidasta verrattuna kapilaariseen siirtymiseen tai pinnan kykyyn haihduttaa kosteutta. Rakenteen pinnan kykyyn haihduttaa kosteutta vaikuttaa merkittävästi ulkopuolen lämpötila ja kosteuspitoisuus. (Vinha 2011)

Mitä alhaisempi betonin vesisementtisuhte on, sitä huonommin se läpäisee vesihöyryä. Betonin tiiviys vaikuttaa merkittävästi myös kapillaariseen kosteuden siirtymiseen. Betonin kosteuspitoisuuden nousu puolestaan lisää kapillaarista kosteudensiirtymistä, joten mitä kuivempaa betoni on, sitä hitaammin siinä kosteus siirtyy.

Käytännössä betonin kuivuminen alkaa vasta siinä vaiheessa, kun lisäkosteuden pääsy rakenteeseen on estetty ja rakenteen ympärillä on riittävän alhainen suhteellinen kosteus. Tämä on käytännössä työmaalla mahdollista vasta, kun vesikatto tai väliaikainen vesikatto on valmis, ikkunat asennettu ja lämmitys aloitettu. Ulkopuolisten tekijöiden ollessa kuivumiselle suotuisat betonin kuivumista rajoittaa kosteuden siirtyminen betonirakenteen sisäosista haihduttavaan pintaan (Vinha 2011).

Lämpötilan vaikutus betonin kuivumiseen

Aiemmin todettiin kosteuden siirtymisen vesihöyrynä vaikuttavan merkittävästi kuivumisnopeuteen. Betonin vesihöyrynläpäisevyyteen ja betonin kosteuden siirtymisominaisuuksiin vaikuttavat mm. betonilaatu, betonin kosteuspitoisuus ja betonin lämpötila. Usein betonin ominaisuuksien, kuten vesisementtisuhteen muuttaminen, ei ole mahdollista heikentämättä betonin työstettävyyttä tai sopivuutta rakenteeseen.

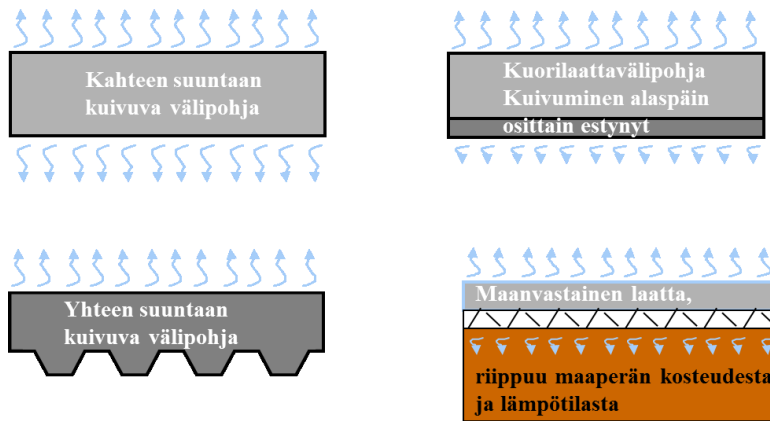
Betonin lämpötilan nostaminen nostaa betonin huokosten ilmatilan vesihöyrynpainetta, joka tehostaa kosteuden siirtymistä (Merikallio et al. 2007). Lämpötilan noston todetaan olevan tehokkain tapa tehostaa betonin kuivumista (Merikallio et al. 2007). Lämpötilan vaikutusta betonin kuivumiseen on käytössä olevissa arviointimalleissa otettu huomioon erilaisten kertoimien avulla. Esimerkiksi kirjassa Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi (Merikallio 2002) lämpötilan nosto 10 °C:sta 30 °C:een puolittaa kuivumisajan lähes kaikilla arvioitavilla rakenteilla, mikäli ympäröivän ilman RH on riittävän alhainen.

3.3.3 Rakennetyypin vaikutus kuivumiseen

Rakennusaikana betonirakenteen ei tarvitse kuivua tasapainokosteuteen ympäröivän ilman kanssa, vaan tavoitekosteuden asettavat päällyste- ja pinnoitemateriaalit. Monissa tapauksissa varsinaisia kuivumisvaatimuksia ei edes ole, lisäksi osa pinnoitteista voidaan asentaa jo, kun betoni on pintakuiva. Useimmat päällystemateriaalit kuitenkin edellyttävät, että alustana olevan betonin suhteellinen kosteus on enintään 80 - 90 % RH. Päällystettävyyden vaatimuksena oleva tietty betonin suhteellisen kosteuden arvo ei kuitenkaan tarkoita sitä, että betonirakenteen tulisi kuivua vaadittuun RH-arvoon läpikotaisin, vaan riittää, kun kyseinen suhteellisen kosteuden arvo on alitettu rakenteen paksuudesta riippuvaisella arviointisyvyydellä (A). Arviointisyvyys valitaan muun muassa rakenteen paksuuden ja tutkittavan rakennetyypin mukaan. Esimerkiksi kahteen suuntaan kuivuvassa rakenteessa arviointisyvyys on pienempi kuin vastaavan paksuisessa maanvastaisessa laatussa. (Merikallio et al. 2007) Arviointisyvyyden ja arviointisyvyydellä vaadittavan kuivumisen tarkoituksena on varmistaa, ettei suhteellinen kosteus nouse pinnoituksen jälkeen pinnoitteen alapinnassa kriittisen korkeaksi.

Kahteen suuntaan kuivuvalla rakenteelle arviointisyvyytenä käytetään 20 % laatan paksuudesta ja yhteen suuntaan kuivuville rakenteille 40 % rakenteen paksuudesta (RT 14-10984 2010). Esimerkiksi 200 mm paksussa rakenteessa arviointisyvyys olisi kahteen suuntaan kuivuvalla rakenteelle 40 mm ja yhteen suuntaan kuivuvalla rakenteelle 80 mm. Arviointisyvyys on kuitenkin enintään 70 mm (RT 14-10984 2010). 70 mm maksimi tarkastelusyvyys perustuu oletukseen, että kosteusherkkä päällyste läpäisee aina edes jonkin verran kosteutta (Merikallio et al. 2007, Niemi 2018). Siihen, miten nopeasti betonirakenne tämän raja-arvon alittaa, vaikuttavat mm. betonilaatu, rakenteen paksuus ja kuivumissuunnat sekä erityisesti kuivumisolosuhteet (Merikallio et al. 2007). Erittäin paksujen betonirakenteiden kohdalla olisi kuitenkin syytä harkita maksimitarkastelusyvyyden kasvattamista etenkin, jos rakenne päällystetään kosteusherkillä ja vesihöyrytiivillä materiaaleilla.

Rakennepaksuuden kasvattaminen hidastaa kuivumista merkittävästi. Mitä paksumpi rakenne on, sitä pidemmän matkaa kosteus joutuu siirtymään päästäkseen haihtumiskykyiseen pintaan. Rakennepaksuuden kasvattaminen tai kuivumisen estyessä toiseen suuntaan voi kuivumisaika kasvaa moninkertaiseksi. Erityyppisten rakenteiden kuivumissuuntia on esitetty kuvassa 3.5. (Merikallio et al. 2007)



Kuva 3.5. Rakenteen tyyppi, kerroksellisuus ja paksuus vaikuttavat siihen, miten nopeasti kosteus kulkeutuu rakenteen sisältä haihduttavaan pintaan. Mitä pidemmän matkan kosteus joutuu siirtymään betonissa, sitä hitaammin rakenne kuivuu. (Merikallio et al. 2007)

3.4 Betonin kuivumisen arvioiminen ja mallintaminen

Betonin kuivumista voidaan arvioida kokemuseräisen tiedon, aiempiin kosteusmittauksiin perustuvien laskentataulukoiden tai lämmön- ja kosteudensiirron huomioon ottavien laskentamallien avulla. Tarkkakaan laskentamalli ei kuitenkaan itsessään ratkaise betonin kuivumisen mallintamisen ongelmia. Suurimpana haasteena on materiaaliparametrien määrittäminen. Vänttinen et al. (2017) toteaa, että eri valmistajien betonilaaduissa on merkittäviä eroja kosteudensiirtymisominaisuuksissa. Nykyisillä koemenetelmillä ei voida tarkasti määrittää esimerkiksi betonin tasapainokosteuskäyrää betonin kovettuessa (Vänttinen et al. 2017). Tarkan kosteustilan ja päällystettävyyden määrittämiseksi on aina tehtävä kosteusmittauksia.

3.4.1 Nykyisin käytettävät ohjelmat ja menetelmät

BY 1021

BY 1021 on Suomen Betoniyhdistys ry:n julkaisema Excel-laskentaohjelma betonirakenteiden kuivumisajan määrittämiseksi, joka perustuu Merikallion (2002) kirjaan. Laskentaohjelmasta valitaan tutkittava rakennetyyppi ja rakenteelle määritetään paksuus, lisäksi rakenteelle määritetään tavoiteltava suhteellinen kosteus tarkastelusyvytydellä. Tutkittavalle betonille syötetään vesi-sideainesuhde.

Laskentaohjelmassa valitaan kuivumisolosuhteet taulukon vaihtoehdoista ja lisäksi määritetään mahdollinen kastuminen tai rakenteen kosteissa olosuhteissa oleminen ennen kuivumisvaihetta. Ohjelmaan ei voida syöttää muuttuvia kuivumisolosuhteita ja esimerkiksi kuivumisolosuhteiden lämpötila valitaan väliltä 10 - 30 °C, lämpötilavaihtoehtoja on 5 °C välein. Kuivatusolosuhteen suhteellinen kosteus määritetään 10 % RH tarkkuudella. (BY 1021)

Laskentaohjelma antaa rakenteen kuivumisajan viikkoina, johon lisätään tarvittaessa aika, jolloin rakenteet ovat kastuneina. Taulukon arvio perustuu oletettuihin pitkän aikavälin keskimääräisiin olosuhteisiin. Taulukon karkea kuivumisaika-arvio ei vähennä kosteusmittausten merkitystä rakenteiden päällystettävyyttä arvioitaessa.

TorkaS 3.2

TorkaS on Ruotsissa Lundin yliopistossa kehitetty laskentaohjelma, jolla voidaan laskea erilaisten betonirakenteiden kuivumisaikoja erilaisissa olosuhteissa. Ohjelman kehitys on aloitettu vuonna 1991. Tässä työssä käytetty versio 3.2 on julkaistu vuonna 2012. Ohjelmasta valitaan tutkittava rakennetyyppi, esimerkiksi kahteen suuntaan kuivuva massiivinen betonilaatta. Valupäivä ja jälkihoitoaika valitaan kalenterista ja laskennalle ilmoitetaan päättymispäivä. (Arfvidsson et al. 2010)

TorkaS:llä voidaan valita tutkittavalle betonille vesi-sementtisuhte ja vesimäärä. Ohjelma laskee automaattisesti sementtimäärän syötettyjen tietojen perusteella. Kuivumisjakson lämpötilaa ja rakennetta ympäröivän ilman suhteellista kosteutta voidaan säätää manuaalisesti tai ilmastoksi voidaan valita kartalta joidenkin ruotsalaisten kaupunkien ilmasto valitun tarkastelujakson aikana. Laskentaan voidaan ottaa huomioon myös esimerkiksi valun peittäminen eristeellä tai muovilla, sekä tuulen vaikutus kuivumiseen. TorkaS-ohjelmaan ei voida syöttää yli 30 °C kuivumislämpötiloja.

TorkaS laskee rakenteen kosteusprofiilin ajan funktiona. Lisäksi ohjelma ilmoittaa suhteellisen kosteuden rakenteen tarkastelusyvytydellä. Tarvittaessa suhteellisen kosteuden arvot voidaan tulostaa tekstitiedostoksi, jolloin tulosteessa näkyy suhteellisen kosteuden arvot jokaisena päivänä kaikilla syvyyksillä rakenteessa.

COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics on simulointiohjelmisto, joka soveltuu muun muassa fysiikan ongelmien simulointiin. Ohjelmalla voidaan käyttää valmiita laskentamoduuleja, joihin on syötetty valmiiksi tietyissä laskennoissa tarvittavat yhtälöt. Comsoliin voidaan myös luoda omia yhtälöitä, joilla voidaan ottaa laajemmin erilaisia ilmiöitä huomioon.

Tähän diplomityöhön liittyvät Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n tekemät kuivumisajan mallinnukset on tehty COMSOL multiphysics ohjelmistolla. Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n käyttämää laskentamallia käydään läpi tarkemmin luvussa 4.3. Laskentaohjelmalla voidaan käytännössä rajattomasti määrittää rakenteen geometriaa ja kuivumisolosuhteiden lämpö- ja kosteusolosuhteita. Työssä käytettävä laskentamalli ottaa huomioon hydrataation betonia kuivattavan vaikutuksen.

WUFI

WUFI on rakennusfysikaalisiin laskentatarkasteluihin kehitetty laskentaohjelmisto, jolla voidaan suorittaa yhdistettyjä kosteuden- ja lämmönsiirron laskentaa tarkasteluja käyttäjän määrittämällä ehdoilla. WUFI-ohjelmisto on kehitetty saksalaisen Fraunhofer-instituutin rakennusfysiikan osastolla. (WUFI Wiki)

Ohjelmasta löytyy laaja kirjasto valmiita materiaaleja, joista osa on kuitenkin tarkoitettu vain rajalliseen käyttöön (WUFI 2d-ohjelman help, WUFI wiki) Esimerkiksi osalle WUFI:n materiaalikirjaston lämmöneristemateriaaleille on ilmoitettu vain lämmönsiirtymiseen liittyvät parametrit, joten kaikki kirjaston materiaalit eivät sovi käytettäväksi, mikäli tarkastellaan myös kosteuden siirtymistä.

WUFI:ssa materiaaliparametrit jakautuvat kahteen ryhmään, ensimmäisessä ryhmässä ovat materiaalien vakioiksi oletetut perusominaisuudet. Perusominaisuuksiin kuuluvat kuivan materiaalin tiheys, huokoisuus, ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus ja vesihöyryn diffuusiovastuskerroin. Perusarvojen lisäksi materiaaleille määritellään kosteuspitoisuudesta (w) riippuvia materiaaliparametreja. Kosteuspitoisuudesta riippuvia materiaaliparametreja ovat tasapainokosteuskäyrä, kosteusdiffusiviteetit, materiaalin lämmönjohtavuus ja vesihöyrynläpäisevyys kosteuspitoisuuden funktiona. (WUFI 2d-ohjelman help)

Rakennemallin ulkoreunoille määritellään laskennan aikana vallitsevat olosuhteet. Reunoille voidaan määritellä muuttuvat tai vakioidut lämpötilan ja kosteuspitoisuuden arvot, sekä muut pintoja koskevat ominaisuudet, kuten pintavastukset. Reunojen olosuhteet voivat vaihdella laskenta-ajan aikana.

WUFI:n käyttämät ajasta riippuvat lämmön- ja kosteudensiirron yhtälöt on esitetty alla. Yhtälö 3.8 kuvaa lämmönsiirtoa ja yhtälö 3.9 kosteudensiirtoa. (WUFI Wiki)

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta_{p,a}}{\mu} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.8)$$

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta_{p,a}}{\mu} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.9)$$

joissa

H	= Entalpia [J/m ³]
D_w	= Kosteusdiffusiviteetti [m ² /s]
h_v	= Haihtuvan veden entalpia [J/kg]
p_v	= Vesihöyryn osapaine [Pa]
u	= Kosteuspitoisuus [m ³ /m ³]
$\delta_{p,a}$	= Ilman vesihöyrynläpäisevyys [kg/msPa]

θ	= Lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
λ	= Lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{mK})$]
μ	= Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin [-]
ρ_w	= Veden tiheys [kg/m^3]
φ	= Suhteellinen kosteus [-]

Yhtälöiden vasemmanpuoleinen termi kuvaa yhtälöstä riippuen lämmön tai kosteuden varastoitumista rakenteeseen. Oikeanpuoleinen osa kuvaa yhtälön kuvaaman suureen muutosta.

3.4.2 Vertailulaskelmat eri ohjelmilla

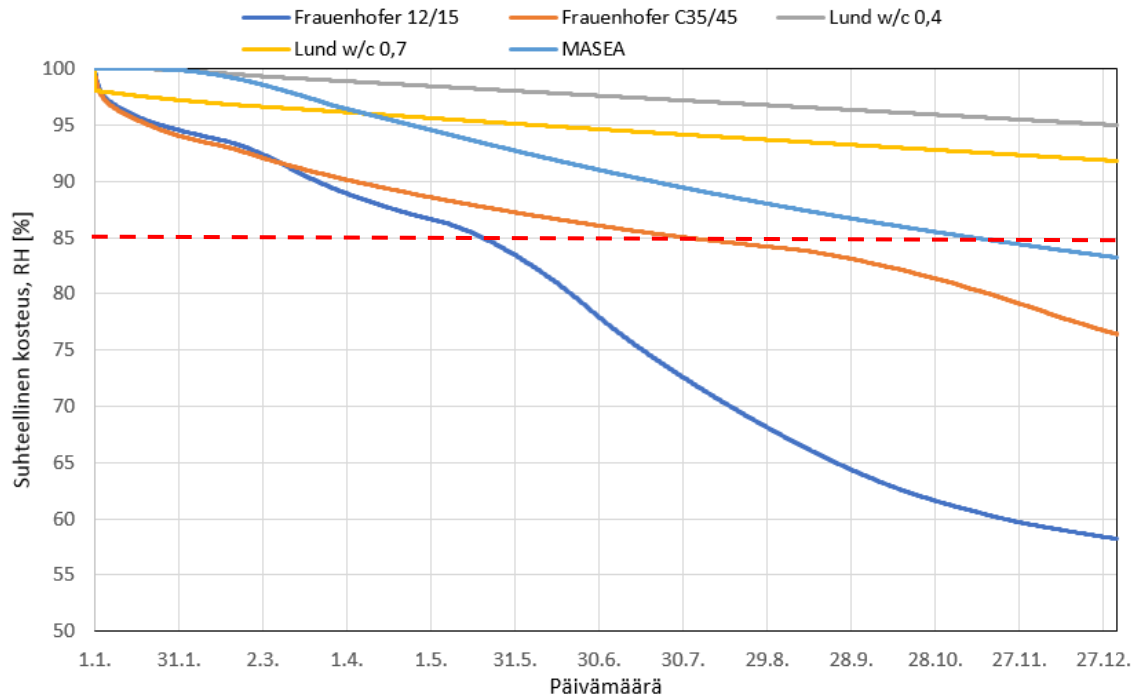
Betonin kuivumisen mallintamisen nykytilan määrittämiseksi toteutettiin joukko vertailulaskelmia edellä esitellyillä ohjelmilla. COMSOL multiphysics laskentaohjelmalla tehtävät kuivumisajan mallinnukset käydään erikseen läpi luvussa 6.

Vertailulaskelmat WUFI:lla

WUFI:lla tehtävät mallinnukset toteutettiin WUFI 2D –ohjelmistolla. Tarkastelut tehtiin kahteen suuntaan kuivuvalle massiiviselle betonirakenteelle, jonka paksuus oli 200 mm. Kuivumisolosuhteina käytettiin vakio-olosuhteita, joissa lämpötila oli $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja suhteellinen kosteus 50 % RH.

Tarkastelussa käytettiin WUFI:n materiaalikirjaston betoneja, joille on valmiiksi määritetty materiaaliparametrit. Tuloksia tarkastellessa tulee ottaa huomioon, että osa käytetyistä materiaalikirjaston betoneista eivät lähtökohtaisesti sovellu betonirakenteen kuivumisen tarkasteluun. Esimerkiksi Lundin yliopiston betonimateriaalien kohdalla on ilmoitettu, ettei kyseisiä materiaaleja tule käyttää betonin kuivumisen mallintamiseen.

Tutkittavien betonien kuivumista mallinnettiin yhden vuoden ajan tunnin aika-askeleella. Suhteellisen kosteuden arvot tarkastelusyvytydellä (40 mm) on esitetty ajan funktiona kuvassa 3.6.



Kuva 3.6. WUFI:n materiaalikirjaston betonien kuivuminen 23 °C lämpötilassa ja 50 % RH suhteellisessa kosteudessa vuoden aikana. Kuvassa 200 mm kahteen suuntaan kuivuvan betonilaatan suhteellisen kosteuden arvot 40 mm syvyydeltä. Punaisella katkoviivalla korostettu 85 % RH taso, joka on tyypillinen suhteellisen kosteuden raja päällystettävyydelle.

Materiaalikirjaston eri betonilaatujen kuivumisaikojen välillä on erittäin suuria eroja. Osittain suuret erot johtuvat siitä, etteivät kaikki tutkitut betonit sovellu materiaaliparametrien puolesta lainkaan betonin kuivumisen mallintamiseen. Vuoden tarkastelujaksolla kolme betonilaatua kuivui tarkastelusyvyydeltään alle 85 % RH kosteuteen. Nopeinta kuivuminen oli Fraunhofer instituutin materiaalikirjaston todella matalan lujuusluokan betonilla, jonka kuivumista voidaan verrata saman materiaalikirjaston korkeamman lujuusluokan betoniin. Kaikkien tutkittujen WUFI:n materiaalikirjaston betonien kuivuminen oli kuitenkin merkittävästi liian hidasta, jotta niitä voitaisiin käyttää tuoreen betonin kuivumisen arviointiin.

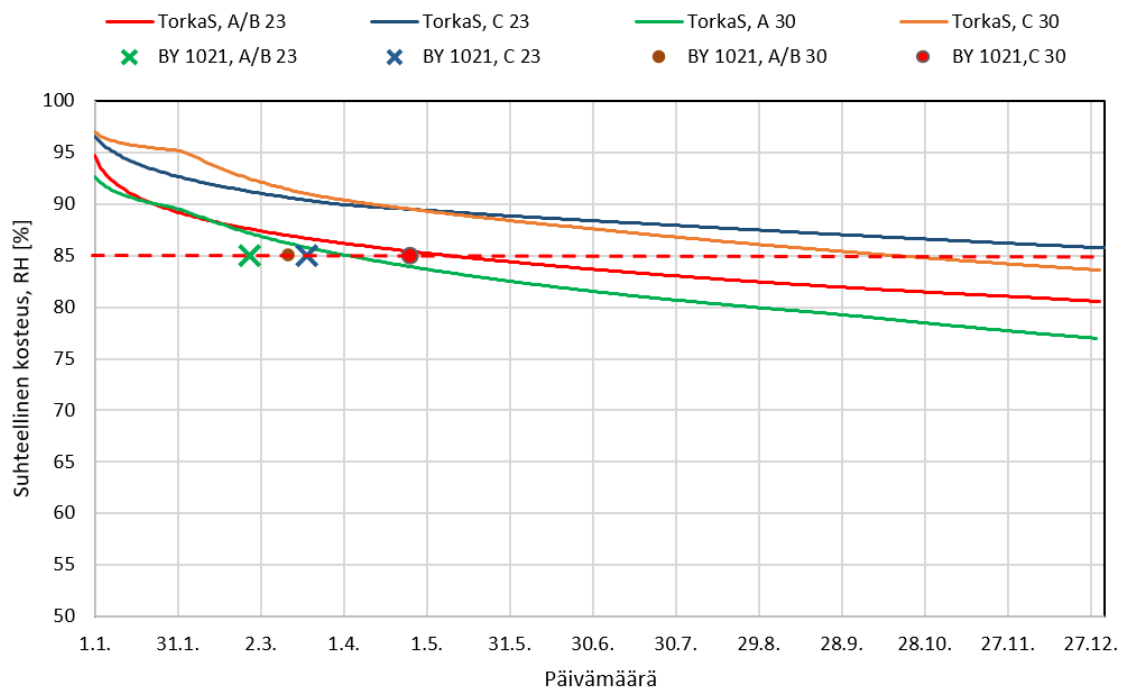
Vertailulaskelmat TorkaS:llä ja BY 1021 -laskentaohjelmalla

TorkaS ja BY 1021 -laskentaohjelmilla tutkittiin tämän työn laboratoriokeiteita vastaavia betonilaatua 23 °C vakio-olosuhteita ja 30 °C kuivatusolosuhteita vastaavissa olosuhteissa.

Laskennassa tutkittiin kahteen suuntaan kuivuvaa massiivista betonilaattaa, jonka paksuus oli 200 mm. Betonien A ja B vesi-sementtisuhde oli 0,45 ja betonin C vesi-sementtisuhde oli 0,64. 23 °C vakio-olosuhteessa suhteellinen kosteus oli 50 % RH, ja lämpötila sekä suhteellinen kosteus pidettiin vakiona koko tarkastelujakson ajan. 30 °C kuivatusolosuhteen lämpötila oli alhainen (noin 5 °C) ensimmäisen kuukauden ajan, jonka jälkeen

lämpötila nousi 30 °C:een. Lämpötilan muutosta ei voitu ottaa BY 1021 -laskentaohjelmassa huomioon. Myös suhteellinen kosteus oli muuttuvassa kuivatusolosuhteessa ensimmäisen kuukauden ajan korkeampi.

Kuvassa 3.7 on esitetty tarkasteltavien betonien suhteellisen kosteuden arvot tarkasteluväylällä. TorkaS -ohjelmasta saatiin suhteellisen kosteuden arvot ajan funktiona koko tarkastelujakson ajalta. BY 1021 -laskentaohjelma ilmoittaa vain vaaditun kuivumisajan halutun suhteellisen kosteuden saavuttamiseksi, joten kuvassa ilmoitetaan vain päivämäärä, jolloin kyseinen rakenne on ohjelman mukaan kuivunut haluttuun tasoon.



Kuva 3.7. TorkaS -ohjelmalla ja BY 1021 -taulukolla saadut kuivumisajat. Betonit ja olosuhteet on valittu diplomityön laboriotutkimuksia vastaaviksi. Betonit A ja B ovat vesi-sementtisuhteella 0,45 ja betoni C vesi-sementtisuhteella 0,64. Luvut 23 ja 30 kuvaavat kuivatusolosuhteen lämpötilaa, 30 °C lämpötilassa kuivuvat betonit olivat aluksi kosteissa ja viileissä olosuhteissa 30 vuorokauden ajan.

Vesi-sementtisuhte vaikuttaa huomattavasti enemmän TorkaS -ohjelman tuloksiin, kuin kuivatusolosuhteen lämpötilan muutos. BY 1021 -ohjelmalla lasketut kuivumisajat ovat huomattavasti lähempänä toisiaan vesi-sementtisuhteesta tai kuivatusolosuhteesta riippumatta.

Vertailulaskelmien tarkastelu

Selvästi lyhimmat kuivumisajat saatiin BY 1021 -laskentaohjelmalla. TorkaS:llä ja WUFI:lla saadut kuivumisajat olivat huomattavasti pidempiä ja kuivumisajoissa oli enemmän hajontaa.

WUFI:lla saatuja tuloksia ei kuitenkaan voida verrata muihin tuloksiin, koska vain TorKaS ja BY 1021:llä tehdyt laskelmat tehtiin tämän työn laboratorion kokeita edes jotenkin vastaavilla betonilaaduilla. Tulokset osoittavat kuitenkin, että kuivumista mallinnettaessa saadaan hyvin vaihtelevia tuloksia käytettävästä laskentaohjelmasta ja materiaaliominaisuuksista riippuen.

TorkaS ja BY1021 -arviointiohjelmilla saatuja tuloksia vertaillaan COMSOL:illa saataviin kuivumisaika-arvioihin ja tässä työssä mitattuihin kuivumisaikoihin luvussa 6.3.

4. TUTKIMUSMENETELMÄT

Betonin kuivumisen laskennallisen tarkastelun tulosten arvioimiseksi ja kuivumisaika-arvioiden tarkentamiseksi suunniteltiin ja toteutettiin testisarja, jossa betonikoekappaleiden kosteusjakaumat selvitettiin erilaisissa kuivumisolosuhteissa kosteusmittausten avulla. Koekappaleet valittiin siten, että ne kuvaisivat massiivista kahteen suuntaan kuivuvaa välipohjalaattaa. Kaikki työn vaatimat koejärjestelyt ja laitteistot toteutettiin Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n tiloissa.

4.1 Kokeelliset järjestelyt

Diplomityön mittausohjelma muovautui yhteistyössä työn ohjaajan, tarkastajan ja ohjausryhmän kanssa. Kosteusmittaukset päädyttiin tekemään kolmella rinnakkaisella mittauspisteellä tulosten luotettavuuden ja mittaustarkkuuden lisäämiseksi. Kosteusseurantajakson pituudeksi valittiin kuusi kuukautta. Koekappaleiden kosteuspitoisuus mitattiin mittausjakson alussa noin viikon välein ja jakson loppuvaiheessa noin kuukauden välein. Mittaustiheys vaihteli myös hieman olosuhdekohtaisesti.

Mittausohjelman mukaisesti koekappaleita kuivatettiin yhteensä viidessä eri olosuhteessa.

1. Osa koekappaleista säilytettiin koko 6 kk tarkastelujakso 5 °C viileässä olosuhteessa.
2. Osa koekappaleista siirrettiin suoraan valun jälkeen 23 °C vakio-olosuhteeseen, jossa niitä säilytettiin koko tarkastelujakson ajan.
3. Loput koekappaleet siirrettiin valua seuraavana päivänä viileään 5 °C olosuhteeseen. Viileästä olosuhteesta koekappaleet siirrettiin 30 vuorokauden kuluttua eri lämpöisiin vakio-olosuhteisiin.
 - a. 23 °C vakio-olosuhteeseen (5 °C → 23 °C),
 - b. 30 °C vakio-olosuhteeseen (5 °C → 30 °C) ja
 - c. 60 °C vakio-olosuhteeseen (5 °C → 60 °C).

Poikkeuksena tarkastelu- ja kuivatusjakson pituuteen 60 °C olosuhteessa koekappaleita säilytettiin vain 3 kk ikäisiksi, jonka jälkeen kyseisen kuivatusolosuhteen mittaukset lopetettiin. Lyhyemmällä tarkastelujaksolla haluttiin vähentää tarvittavien koekappaleiden määrää, koska koekappaleiden oletettiin kuivuvan kyseisessä olosuhteessa huomattavasti nopeammin, eikä pidemmästä tarkastelujaksosta saataisi enää hyödyllisiä tuloksia.

4.1.1 Laboratoriokokeiden kuivatusolosuhteiden säätäminen ja ylläpito

Työn kokeelliseen osaan päädyttiin mittausohjelmaa suunniteltaessa valitsemaan edellä kuvatusti neljä erilaista koekappaleiden säilytysolosuhdetta. Kuivatusolosuhteita varten hankittiin ja rakennettiin olosuhdekaappeja ja -arkkuja.

Kaikkien työssä käytettyjen olosuhdehuoneiden olosuhteet tallennettiin Testo 174H loggereilla. Lisäksi käytettiin apuna olosuhdehuoneiden ulkopuolelta luettavia lämpötilaloggereita ja kosteusantureita. Ulkopuolelta luettavien mittalaitteiden avulla saatiin olosuhteita säädettyä ja olosuhteiden säilymistä seurattua ilman olosuhdehuoneiden availua. Lämpötilan seuraamiseen käytettiin Testo 177T4 ja 176T4 termolankaloggereita ja Vaisala Oy:n HMP42 ja HMP44 mittapäitä ja HMI41 lukulaitetta, olosuhdehuoneiden suhteellisen kosteuden mittaamiseen huoneen ulkopuolelta käytettiin lähinnä Vaisala Oy:n HMP42 mittapäitä ja HMI42 mittalaitetta. Termolankoja käytettiin myös koekappaleiden lämpötilan seuraamiseen.

5 °C viileä vakio-olosuhdekaappi

Viileällä olosuhteella pyrittiin kuvaamaan työmaalla mahdollisesti vallitsevia kuivumiselle epäedullisia kuivumisolosuhteita. Tärkeimpänä vaatimuksena viileälle olosuhteelle pidettiin noin 5 °C lämpötilaa. Kaappien suhteellista kosteutta ei erikseen säädetty, sillä kaapin suhteellisen kosteuden uskottiin pysyvän yli 50 % RH, joka oli suhteellisen kosteuden osalta kyseisen olosuhteen tavoitetaso.

Viileä olosuhde toteutettiin kahdella kotikylmiöllä, joihin lisättiin kondenssiveden ulosjohtava putkitus, sekä kaappien sisäisiä olosuhdevaihteluita minimoiva tuuletus. Kuvassa 4.1 on esillä viileän olosuhteen olosuhdekaapit. Kuvassa on näkyvillä myös koekappaleiden lämpötilaa mittaavia loggereita ja termolankoja. Erillisten kylmiöiden lämpötilat säädettiin mahdollisimman lähelle toisiaan, ja lämpötilojen vastaavuutta tarkkailtiin kaappien ulkopuolelle sijoitetuilla lämpötilaloggereilla. Alkuvaiheen jälkeen kaikki työssä tutkittavat koekappaleet saatiin sijoitettua samaan olosuhdekaappiin.



Kuva 4.1. Viileän olosuhteen aikaansaamiseksi hankittu kylmiö. Pällekkäisten koekappaleiden välissä on säteilysuojana 20 mm eristelevy. Lisäksi koekappaleiden ylä- ja alapuolella on 22 mm rimat, jotka mahdollistavat ilman kiertämisen koekappaleiden pinnoilla ja siten koekappaleiden kuivumisen kahteen suuntaan.

Kaappien tuuletus toteutettiin molempiin kaappeihin asennetuilla tuulettimilla, jotka kiertävät ilmaa kaapin sisällä. Tuulettimina käytettiin tietokoneen kotelotuulettimia, joiden virtalähteinä käytettiin tavallisia tietokoneen virtalähteitä.

23 °C vakio-olosuhdehuone

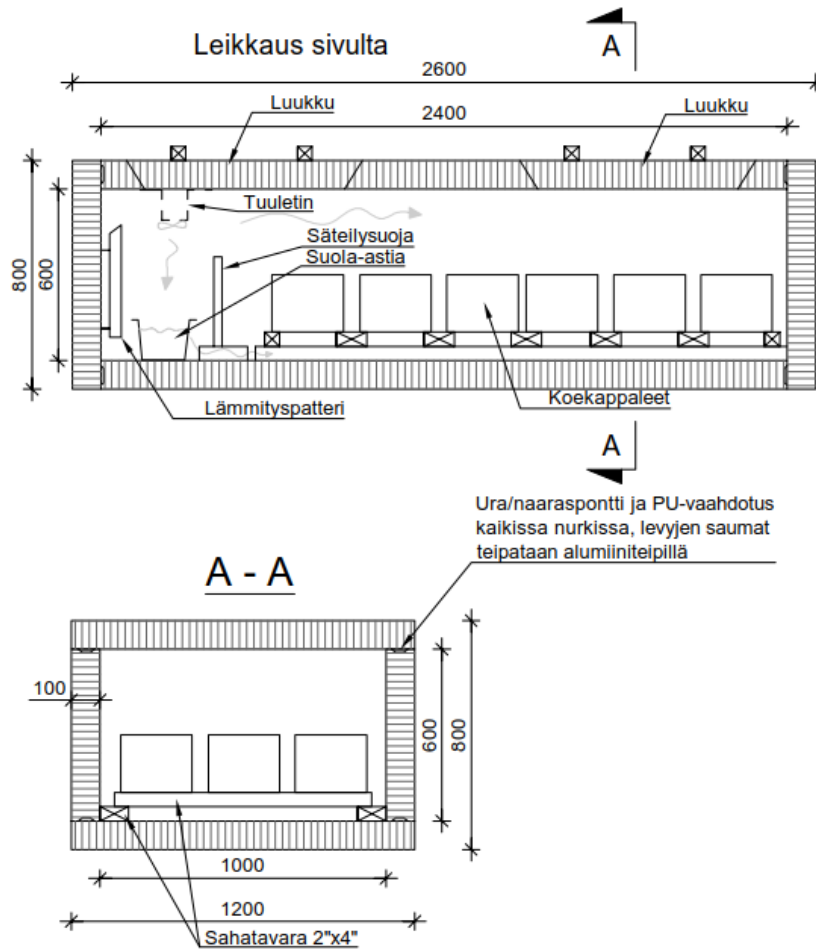
23°C vakio-olosuhdehuoneen tavoiteltu lämpötila oli 23 °C ja tavoiteltu suhteellinen kosteus 50 % RH. 23 °C vakio-olosuhde toteutettiin Vahanen Rakennusfysiikka Oy:llä valmiiksi olleella olosuhdehuoneella, jolla arvioitiin päästävän mahdollisimman tarkasti haluttuihin arvoihin. Kuvassa 4.2 näkyy koekappaleiden säilytysperiaate olosuhdehuoneen hyllyillä. Hyllyn ja koekappaleen välissä oli kaksi puurimaa, joten koekappale pääsi kuivumaan myös alapinnan kautta.



Kuva 4.2. Koekappaleiden säilytys olosuhdehuoneessa. Kuvan alareunassa kylmälaukuissa tasaantumassa olevia näytepalamittauksen koeputkia mittapäineen.

30 °C vakio-olosuhdearkku

30 °C vakio-olosuhteella pyrittiin kuvaamaan erittäin tehokkaasti lämmitettyjä työma-olosuhteita, joissa tavoiteltu lämpötila on 30 °C ja tavoiteltu suhteellinen kosteus noin 50 % RH. Olosuhdetta varten rakennettiin erillinen kuvan 4.3 periaatteiden mukainen olosuhdearkku Kingspan Therma TP10 100 mm eristelevystä. Levyt kiinnitettiin toisiinsa polyuretaanivaahdolla ja saumat tiivistettiin arkun sisäpuolelta alumiiniteipillä. Arkun kanteen sahattiin kaksi luukkua, luukkujen reunat sahattiin vinoiksi, jolloin luukut pysyivät paikoillaan ilman erillistä kannattelua. Esitestauksella todettiin, ettei kansia tarvitse erikseen tiivistää teippaamalla kokeiden aikana. Arkkuun lisättiin testausjakson aikana tuuletusputket, joilla pystyttiin estämään suhteellisen kosteuden nousu koekappaleista haihtuvan kosteuden seurauksena. Esitestauksesta huolimatta olosuhteiden ylläpitäminen vaati arkun olosuhteiden tarkkailua ja tuuletuksen säätämistä.

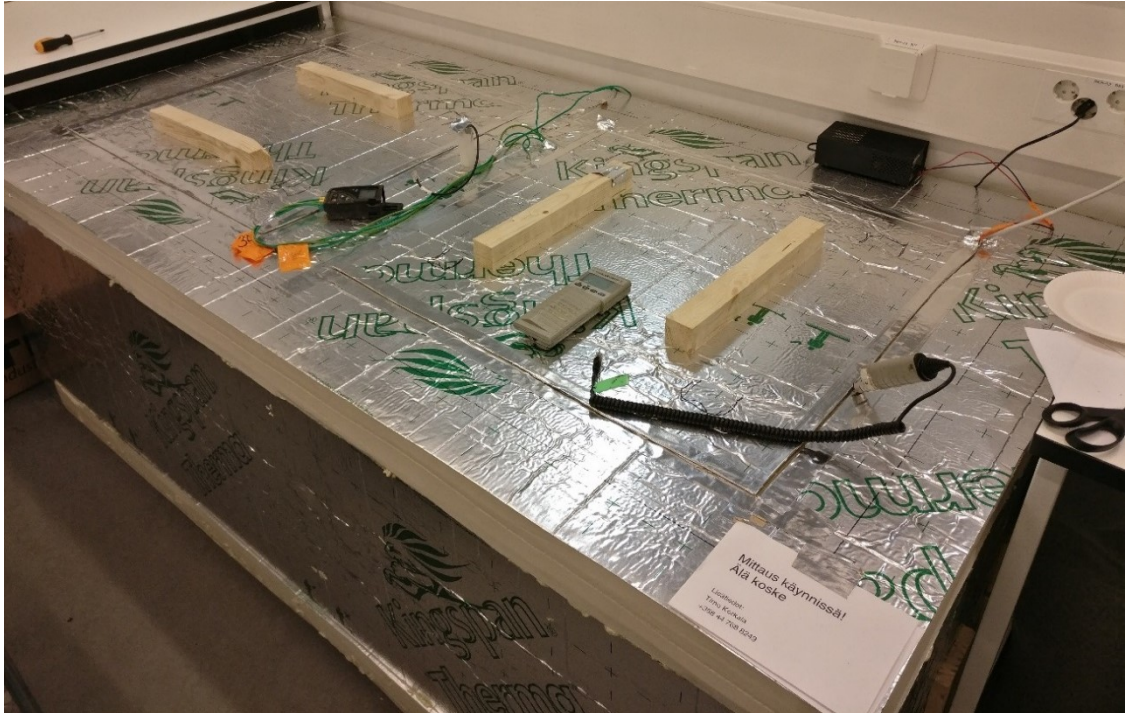


Kuva 4.3. Periaatekuva olosuhdearkun toteutuksesta ja koekappaleiden sekä tarvittavien laitteiden sijoittelusta arkuun.

Arkun lämmityksessä päädyttiin esitestauksen jälkeen arkun pätyyn asennettavaan Ensto BETA Mini 250W virtauslämmittimeen, jossa on valmiina pistotulppa lämmittimen kytkemiseksi. Valmistajan ilmoittama tarkkuus lämmittimen mekaaniselle termos-tatille on +/- 0,5 °C.

Arkun suhteellista kosteutta säädeltiin ylikylläisellä suolaliuksella. Suolaksi valittiin kaliumkarbonaatti (K_2CO_3), jonka ylikylläisen liuoksen tulisi tasata arkun suhteellinen kosteus 30 °C lämpötilassa 48,4 % RH:een. Arkun tuuletuksen ja koekappaleiden kosteuden tuoton seurauksena arkun suhteellinen kosteus asettui hyvin lähelle tavoiteltua arvoa 50 % RH.

Kuvassa 4.4 yleiskuva olosuhdearkusta ja arkun ulkopuolisista lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittalaitteista. Kuvissa 4.5 a ja b on esitetty koekappaleiden sijoittelu olosuhdearkkuun ja olosuhdearkun lämpö- ja kosteusolosuhteiden ylläpitoa varten asennetut laitteet.



Kuva 4.4. 30 °C kuivatusolosuhdetta varten rakennettu olosuhdearkku. Arkun päällä lämpötilaloggeri ja kosteusmittari sekä tuulettimen virtalähde.



Kuvat 4.5 a ja b. Kuvassa a (vasemmalla) koekappaleiden sijoittelua olosuhdearkkuun ja kuvassa b (oikealla) olosuhdearkun lämmitin ja suhteellista kosteutta ylläpitävä suolaliuosastia.

60 °C vakio-olosuhdearkku

60 °C kuivatusolosuhteella pyrittiin kuvaamaan olosuhteita, joissa betonivalua lämmitetään betonivalun sisään asennettavilla lämmityskaapeleilla tai esimerkiksi infrapunasäteilylämmittimillä. Tällekin olosuhteelle rakennettiin erillinen olosuhdearkku Kingspan

Therma TP10 100 mm eristelevystä, arkku on varustelua lukuun ottamatta identtinen 30 °C olosuhdearkkuun verrattuna.

60 °C olosuhdearkussa lämpötila pyrittiin pitämään noin 60 °C:ssa. Alustavasti suhteellista kosteutta ei ollut tarkoitus säätää, mutta noin 2 viikon kuivatuksen jälkeen arkun suhteellinen kosteus oli laskenut noin tasolle 15 % RH, jolloin arkkuun päätettiin lisätä suolaliuos, jolla arkun suhteellinen kosteus saadaan välille 20 – 30 % RH. Suolaksi valikoitui kalsiumkloridi. Arkun tavoiteltu suhteellinen kosteus oli noin 30 % RH.

Arkun lämmitykseen valikoitui monien esitestien jälkeen miniuuni, jonka termostaatin tarkkuus ja lämpötila-alue osoittautuivat riittävän tarkaksi ja korkeaksi halutun lämpötilan ylläpitoon. Arkku varustettiin kahdella tuulettimella, joista toinen puhalsi ilmaa lämmitintä kohti ja toinen kierrätti ilmaa arkussa. Olosuhdearkun tuuletus ja lämmityslaitteet arkkuun asennettuina ja koekappaleiden sijoittelu ovat esillä kuvassa 4.6.



Kuva 4.6. 60 °C olosuhdearkku. Vasemmanpuoleisessa kuvassa arkun ilmankierrosta vastaavat tuulettimet, säteilysuoja ja lämmönlähteenä toiminut miniuuni. Oikealla kuva arkkuun sijoitetuista koekappaleista.

Kuvan 4.6 ottamisen jälkeen arkkuun lisättiin vielä suolaliuosastia uunia kohti puhaltavan tuulettimen taakse.

4.1.2 Koekappaleet

Tutkittaviksi koekappaleiksi valmistettiin 200 mm korkeita ja halkaisijaltaan noin 240 mm reunoiltaan tiivistettyjä betonilieriöitä, jotka kuvaavat 200 mm paksua kahteen suuntaan kuivuvaa massiivivalua. Koekappaleiden muotteina käytettiin Uponor Oyj:n 250 mm PE SVT putkea, josta sahattiin 200 mm pitkiä muotteja Uponorin toimesta.

Mittausohjelman varmistuttua työssä tarvittavaksi koekappalemääräksi saatiin 66 koekappaletta. Koekappaleita valettiin yhteensä 75 kappaletta, jolloin muutamiin olosuhteisiin, sekä betonointiin saatiin varakappaleet. Ylimääräisiä koekappaleita käytettiin mitausjakson lopussa varmistusmittauksiin ja puristuslujuuksien määrittämiseen.

Betonilaadut

Työn laboratoriokeiteita varten valittiin kolme betonilaatua. Kaikki betonilaadut olivat nopeammin kuivuvia lattiabetoneita. Betoneissa käytettiin kahta eri vesi-sementtisuhdetta ja kahta eri sementtiä. Kaikki betonit olivat huokostettuja, notkistettuja ja kaikissa maksimirakoko oli 16 mm. Betonien nimeäminen ja vesi-sementtisuhteet on esitetty taulukossa 4.1. Työtä varten toimitettujen betonien kuormakirjat on esitetty liitteessä D.

Taulukko 4.1. Työssä käytettyjen betonien vesi-sementtisuhteet ja betoneissa käytetyt sementtityypit.

Betoni	Vesi-sementtisuhte	Vesimäärä [kg]	Sideainemäärä [kg]	Käytetty sementti
A	0,45	197	440	Plussem.
B	0,45	197	442	Plussem. + Pikasem.
C	0,64	181	282	Plussem.

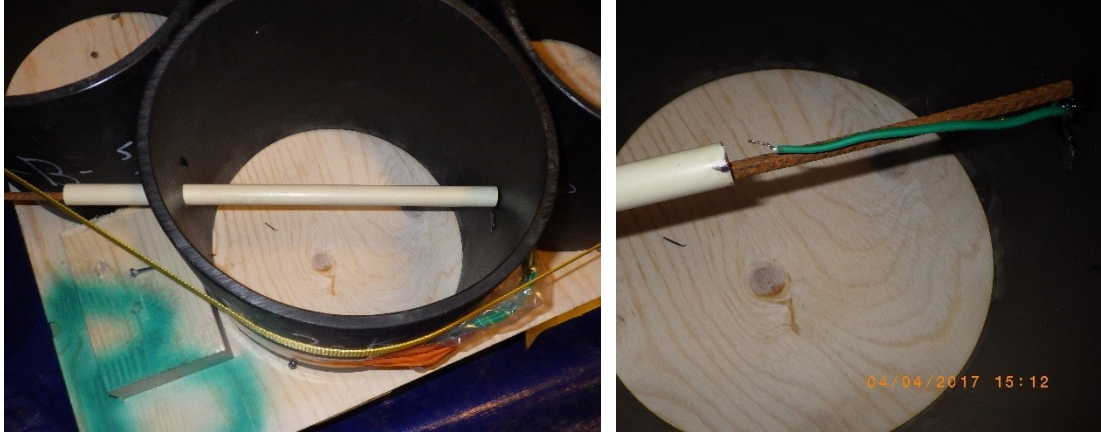
A ja B betoneissa on sama vesi-sementtisuhte. A betonissa käytettiin pelkästään plussementtiä ja B betonissa plussementtiä ja pikasementtiä. C betonissa vesi-sementtisuhte on 0,64 ja siinä käytettiin plussementtiä. A ja B betoneille betonivalmistaja ilmoitti lujuusluokan C30/37 ja betonille C lujuusluokan C25/30.

Muottien valmistelu ja koekappaleiden valaminen

Ennen koekappaleiden betonointia koekappaleiden muotit pestiin ja muotteihin kiinnitettiin valun sisään jätettävät mitta-anturit kiinnitystarvikkeineen. Koekappaleiden keskipisteen lämpötilan mittaamiseksi käytettävän termolangan asentamiseksi kehitettiin muotin läpäisevä kannatinjärjestelmä, joka voitiin poistaa valun yhteydessä.

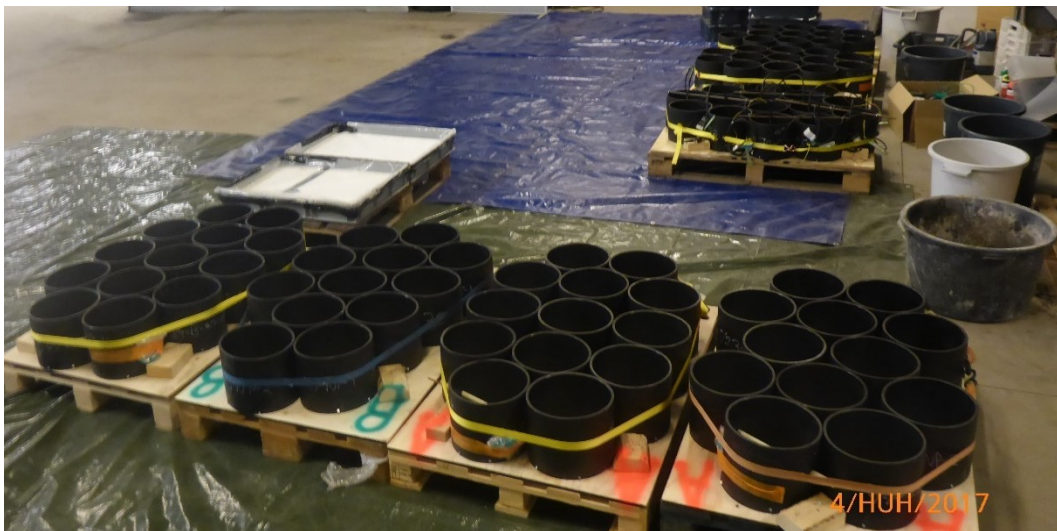
Koekappaleen lämpötilaa mittaava termolanka haluttiin asentaa mahdollisimman tarkasti koekappaleen keskipisteeseen. Johdin haluttiin tuoda koekappaleen keskelle muotin läpi sivulta, termolangan mahdollisten koekappaleita kuivattavien ominaisuuksien eliminomiseksi. Lämpötilaseurattuihin koekappaleisiin ei kuitenkaan haluttu jättää mitään ylimääräisiä osia, kuten koekappaleen halkaisevia raudotteita, joten termolangan kannateluun kehitettiin valun yhteydessä poistettava järjestelmä, joka on esillä kuvassa 4.7. Termolangan sijainti varmistettiin koekappaleen läpi poratulla 6 mm harjaterästängolla, joka poistettiin valun yhteydessä. Termolangan pysyminen kannattimen kanssa samassa asemassa varmistettiin suojaputkella, jonka sisällä termolanka ja kannatinteräs olivat. Suojaputkena käytettiin 16 mm sähköputkea, joka niin ikään poistettiin valun yhteydessä.

Mittauksissa käytettiin K-tyyppin termolankoja, joissa termoparin muodostavat nikkeli ja kromin ja nikkelin seos (crhomel). Metallien liitos aiheuttaa metallien välille jännite-eron, joka on voimakkaasti lämpötilasta riippuva. Lämpötila saadaan määritettyä jännite-eroa mittaamalla.



Kuva 4.7. Termolankojen asennusperiaate muotteihin.

Koekappaleet kiinnitettiin kuormalavan päälle kiinnitetyn vanerin päälle kuvan 4.8 mukaisesti. Koekappaleet sidottiin yhteen kuormaliinalla ja kiinnitettiin vaneriin vinoruuvauksella muotin reunan läpi, sekä kuormalavan kulmiin asennettujen tukipalikoiden avulla. Muotit pysyivät hyvin paikoillaan ja enimmillään yksittäinen muotti oli noussut alle 10 mm, suurin osa muoteista pysyi erittäin hyvin paikoillaan eikä valupaineen aiheuttamaa nousua ollut havaittavissa.



Kuva 4.8. Muottien kiinnitys kuormalavoille ja yleiskuva ennen valua.

Kuvassa 4.9 betonilaadulla A valetut koekappaleet heti valun jälkeen. Termolankojen suoja- ja tukiputket poistettiin heti valun jälkeen ja termolankojen liittimet kaivettiin esiin muovisuojistaan ja koekappaleiden lämpötilan seuraaminen aloitettiin. Koekappaleiden

pinnat hierrettiin noin tunti betonoinnin jälkeen. Koekappaleiden jälkihoito aloitettiin va-lupäivän iltana, jolloin koekappaleet peitettiin muovikalvolla.



Kuva 4.9. Valettuja ja hierrettyjä koekappaleita ennen jälkihoidon aloitusta.

Koekappaleet valettiin tiistaina 4.4. klo 14.00 – 17.30 Vahanen yhtiöiden parkkihallissa. Muotit täytettiin suoraan betoniauton ränniä apuna käyttäen. Jokaisesta kuormasta lasket-tiin ensin noin 50 l betonimassaa saaviin. Betonoinnin jälkeen koekappaleet tärytettiin betonitäryttimellä. Jokaiseen koekappaleeseen tärytin laskettiin kahteen kertaan. Tiivis-tyksen jälkeen koekappaleiden pinta tasattiin muotin yläpinnan mukaan, ja ylimääräinen betoni poistettiin koekappaleiden päältä ja ympäriltä.

Koekappaleet oli sijoitettu yhteensä kuudelle kuormalavalle siten, että samalla lavalla oli vain samalla betonilla valettavia kappaleita. Tämän takia ensimmäisen vuorokauden ajan koekappaleiden lämpötilaa seurattiin 3 loggerilla, yksi jokaista betonilaatua kohden. Vii-meisenä valetun betonierän loggerista ei kuitenkaan saatu tuloksia ulos, koska loggeri ei ollut tallentanut vuorokauden aikana lainkaan dataa.

Siirtely

Koekappaleet siirrettiin tutkimussuunnitelman mukaisiin kuivumisolosuhteisiin 12 - 20 h kuluttua valusta. Siirto aloitettiin valua seuraavana aamuna ja koekappaleiden suuresta määrästä johtuen työ jatkui lähes koko päivän ajan. Ennen siirtelyä koekappaleet irrotet-tiin kuormalavoilta. Koekappaleiden pinnat pidettiin peitettynä muovilla töiden sallimissa rajoissa siten, että jokainen koekappale oli lähes yhtä pitkään ilman muovikalvoa.

Jälkihoito ja pintojen käsittely

Valun jälkeen koekappaleita säilytettiin 5 °C ja 23 °C vakio-olosuhteissa. Viileissä olo-suhteissa koekappaleet pinottiin päällekkäin siten, että koekappaleiden välissä oli XPS-eristelevy. Viileässä olosuhteessa koekappaleiden pintoja ei erikseen sumutettu jälkihoi-toajan aikana olosuhteen korkeasta suhteellisesta kosteudesta johtuen. Vakio-olosuh-

teissa koekappaleet ladottiin metallisille hyllyille, ja niiden pinnat peitettiin muovikalvolla kuvan 4.10 mukaisesti. Koekappaleiden yläpintoja kostutettiin välillä vesisumutuksella.



Kuva 4.10. Koekappaleiden säilytys ja jälkihoito vakio-olosuhteissa.

Koekappaleiden molemmat pinnat (ala- ja yläpinta) hiottiin 7 vuorokauden kuluttua valusta betonihiomakoneella. Samalla betonin ja valumuotin välinen raja tiivistettiin molemmista pinnoista vesihöyrytiivillä massalla (VapourSeal, Soudal Oy). Pintojen hionnalla saatiin myös valun yhteydessä nousseista koekappaleista hiottua ylimääräinen betoni pois. Kuvassa 4.11 näkyy hiomattoman ja hiotun betonipinnan ero. Hiotut pinnat ovat keskenään samanlaisia, kun taas hiomattomissa pinnoissa on jonkin verran vaihtelua pinnan tasauksen ja hierron takia.



Kuva 4.11. Kuvassa hiomaton ja hiottu koekappale, sekä lattialla kuvan yläreunassa tiivistettyjä koekappaleita. Tiivistys näkyy kuvassa sinisenä kaistana betonin ja muotin rajapinnassa.

4.2 Suoritetut laboratoriokeet ja mittaukset

4.2.1 Kuivumisen seuranta

Koekappaleiden kuivumista seurattiin tutkimuksen suunnitteluvaiheessa laaditun mittausohjelman mukaisesti. Koekappaleiden suhteellista kosteutta eri syvyyksillä seurattiin porareikä- ja näytepalamenetelmällä. Lisäksi kappaleista kuivumalla poistuvaa veden määrää seurattiin koekappaleiden punnituksilla.

Mittausohjelmaa ei voitu etenään näytepalamenetelmällä mitattavien koekappaleiden osalta laajentaa enää mittausvaiheessa, koska tällä mittaustavalla koekappaleet olivat keräkäyttöisiä. Porareikämenetelmällä mittauskertoja olisi ollut mahdollista tarvittaessa tihentää.

Porareikämenetelmää käytettiin vain 23 °C vakio-olosuhdehuoneessa säilytetyille koekappaleille. Muissa olosuhteissa säilytettyjen koekappaleiden kosteusmittaukset tehtiin näytepalamenetelmällä, koska koekappaleiden lämpötila oli porareikämenetelmän vaatiman lämpötila-alueen ulkopuolella. Lisäksi 23 °C vakio-olosuhteissa säilytettävien koekappaleiden kaksi ensimmäistä mittauskertaa toteutettiin näytepalamenetelmällä, koska koekappaleisiin ei oltaisi ehditty porata mittausreikiä tarpeeksi aikaisin riittävän tasaantumisasjan saavuttamiseksi.

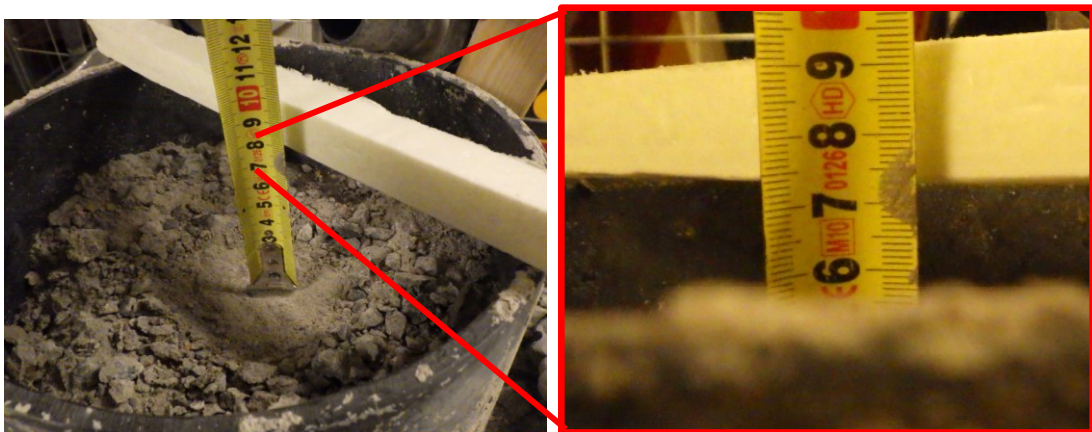
Koekappaleiden suhteelliset kosteudet mitattiin 30, 70 ja 100 mm syvyyksiltä. Vakiintunut pinnoitettavuuden arviointisyvyys koekappaleita vastaavalle 200 mm paksuiselle kahteen suuntaan kuivuvalla laatalle on 40 mm (RT 14-10984 2010). Koekappaleiden

kosteusmittausten syvyyksiksi valittiin kuitenkin 30, 70 ja 100 mm, jotta kosteusprofiili saatiin määritettyä tasaisemmin koko koekappaleen syvyydellä. Mittaussyvyysiksiä valittaessa oletettiin, että kosteusprofiili muodostuu symmetriseksi koekappaleen keskipisteeseen nähden. 40 mm tarkastelusyvyiden pois jättämistä puolsi myös se, ettei työn ensisijaisena tavoitteena ollut määrittää koekappaleiden kuivumista pinnoituksen kannalta kriittiseen kosteuspitoisuuteen. Tavoitteena oli tuottaa tietoa suhteellisen kosteuden jakautumisesta myös syvemmillä rakenteessa, jotta voitiin vertailla mallinnettuja ja mitattuja arvoja myös syvemmillä rakenteessa. Valittujen mittaussyvyyksien haittapuolena vertailtavuus muun muassa BY 1021 -laskentataulukon kuivumisaika-arvioihin vaikeutuu ja menettää tarkkuuttaan.

Kosteusmittaukset suoritettiin Vaisala Oy:n valmistamilla HMP44 ja HMP40S mittapäillä. Mittapäät kalibroitiin Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n toimesta liitteessä C esitetyn kalibrointijärjestelmän mukaisesti. Työssä käytetyt mittapäät kalibroidaan vähintään 4 kk välein.

Näytepalamenetelmä

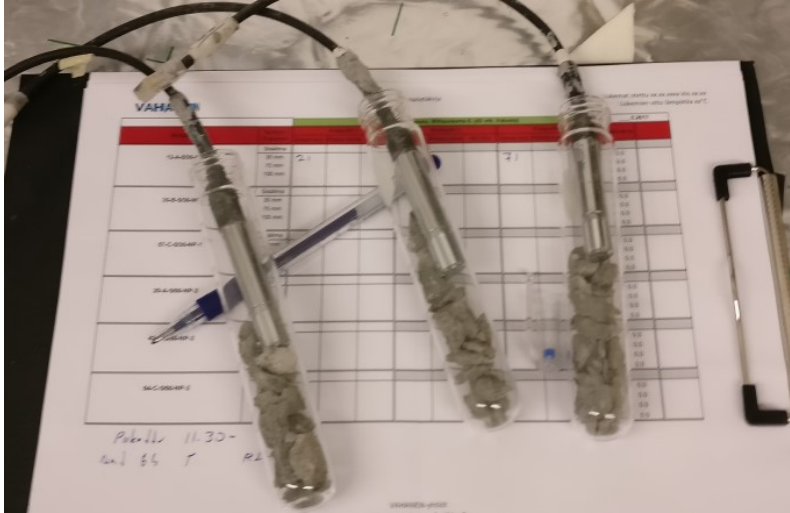
Jokaisesta näytepalamenetelmällä mitattavasta koekappaleesta piikattiin kullakin mitauskerralla betoninäytteet RT-kortin 14-10984 (2010) ja Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n mittaustapaliitteen (liite B) mukaisesti. Mittaus tehtiin aina kolmelta mittaussyvyydeltä. Mittaussyvyydet olivat 30, 70 ja 100 mm. Jokaiselta syvyydeltä piikattiin kustakin kappaleesta näytepalat kolmeen koeputkeen, jolloin saatiin kolme rinnakkaista tulosta. Kuvassa 4.12 on esimerkkinä 70 mm syvyydeltä piikattuja näytepaloja koekappaleen pinnalla.



Kuva 4.12. 70 mm syvyydeltä piikattuja betoninäytepaloja. Näytteet piikattiin väliltä 65 – 75 mm.

Mittaussyvyyden yläpuolinen betoni poistettiin piikkaamalla. Näytteenoton mahdollistamiseksi mittaussyvyyden yläpuolinen betoni poistettiin koko koekappaleen alalta. Varsinaiset näytepalat piikattiin koekappaleen keskeltä, jotta koekappaleen reunojen kautta mahdollisesti tasaantuva kosteus ei vaikuttaisi tuloksiin. Kuvassa 4.13 on rinnakkaiset

koeputket, joissa on piikatut näytepalat sekä suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mittaavat mittapääät.



Kuva 4.13. Kolme rinnakkaista koeputkea näytepalamittauksista (betoni näytteet on piikattu samasta koekappaleesta samalta syvyydeltä). Kuvassa koeputken yläpäättä ei ole vielä tiivistetty. Putki täytettiin näytepaloilla noin puoleen välin asti, jotta näytepaloja on varmasti riittävästi.

Koeputkiin asennettiin lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaava mittapää välittömästi näytteenoton jälkeen ja putki tiivistettiin vesihöyrytiivillä kitillä. Koeputket siirrettiin 23 °C lämpöiseen vakio-olosuhdehuoneeseen ja koeputkiin tasaantunut suhteellinen kosteus luettiin seuraavana päivänä. Tasaantumisaika oli huomattavasti RT kortin 14-10984 (2010) vaatimusta pidempi, usein jopa yli 18 tuntia.

Porareikämittaus

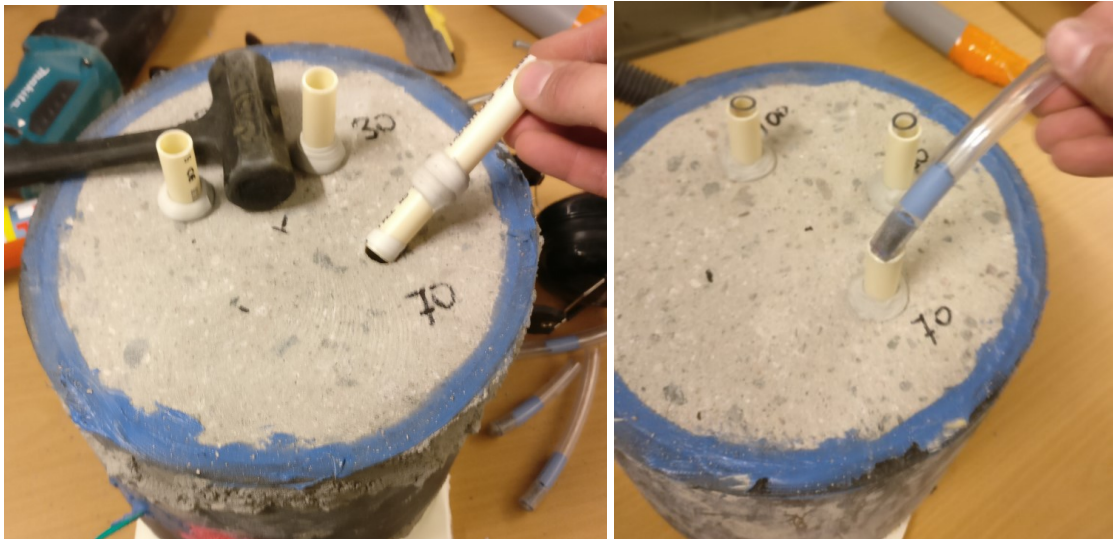
Vakio-olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden kosteusmittaukset suoritettiin porareikämenetelmällä. Mittaussyvyyydet olivat samat kuin näytepalamenetelmällä. Jokaisesta betonilaadusta oli kolme rinnakkaista koekappaletta, joista jokaiseen porattiin mittaputket kaikille tarkasteltaville syvyyksille. Rinnakkaiset tulokset tulivat jokainen omasta kappaleestaan.

Kosteusmittaukset suoritettiin samoista putkista koko mittausjakson ajan. Koejakson lopulla tarkastettiin samasta putkesta suoritettujen mittauksen virhe erillisten varmistusmittausten avulla. Virheen vähentämiseksi mittausputket täytettiin umpinaisella putkella ja putkien päät tiivistettiin vesihöyrytiivillä kitillä mittauskertojen välillä. Mittauskertojen välistä putkien täyttöä lukuun ottamatta reikien poraus ja tiivistys tehtiin RT kortin 14-10984 (2010) ja Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n mittauspaliitteen (liite A) mukaisesti.

Porareikien putkitus ja putkien tiivistys on esitetty kuvassa 4.14. Putken ympärille pyörítettii kittiä, jonka jälkeen putki lyötiin porareikään. Kittiiä asennettiin aivan putken alapähän ja noin 20 mm betonipintaa alemmas. Putken alapähän kittauksen tavoitteena on

saada mittausulos tarkemmin juuri mitattavalta syvyydeltä. Yläpään kitti asetettiin hie-
man lyöntisyvyyttä alemmas, jotta kitti saatiin tiiviisti betonia vasten, kun putki lyötiin
porareikään.

Puhdistettuihin mittausputkiin asennettiin pääosan putken ilmatilasta täyttävä alapäästään
tiivis sisäputki, jolla minimoitiin koekappaleen kuivuminen putken ilmatilaan mittausker-
tojen välillä. Kuvassa 4.14 näkyy myös mittausputkien sisään asennettu sisäputki. Putkien
yläpää tiivistettiin kitillä välittömästi mittauksen jälkeen.



Kuva 4.14. Porareikien putkitus. Vasemmalla mittausputkien tiivistysperiaate ja oikealla
sisäputken asennus. Kuvissa mittausputkien yläpäättä ei ole vielä tiivistetty.

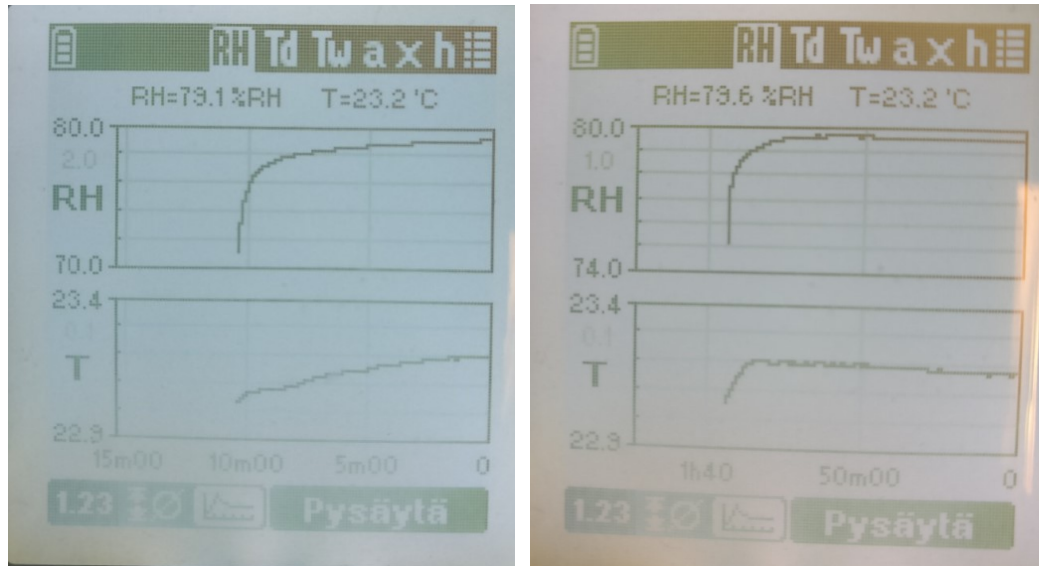
Kosteusmittauksen ajaksi sisäputki poistettiin ja suhteellista kosteutta sekä lämpötilaa
mittaavat mittapäät asennettiin porareikiin. Mittausputken yläpään ja mittapään väli tii-
vistettiin mittauksen ajaksi kitillä kuvan 4.15 mukaisesti. Mittauksissa käytettiin mitatta-
vien porareikien mukainen määrä mittapäitä. Enimmillään mittapäitä oli käytössä 135
kappaletta, kun samalla mittauskerralla mitattiin kaikissa olosuhteissa säilytettäviä koe-
kappaleita.



Kuva 4.15. Vasemmalla mittapäitä tasaantumassa porarei'issä ja oikealla tarkemmin esillä mittausputken yläpään tiivistys. Koekappaleiden päällä on mittauksen ajaksi pois-tetut sisäputket.

Porareikämittauksissa noudatettiin soveltaen ASTM standardia riittävän mittapään tasaantumisaajan määrittämisessä. Tasaantumisaajan oletettiin olevan riittävä, mikäli suhteellisen kosteuden muutos oli alle 1 % RH-yksikköä tunnin aikana. Tasaantumisaika oli kuitenkin aina vähintään 1 tunti (lukemien tarkistus 2 tunnin kuluttua mittapään asennuksesta). Tasaantumisaajan pidentämiselle ei havaittu tarvetta edes mittausjakson loppuvaiheessa, vaikka betoni oli jo kuivempaa ja tasaantumisaajan oletettiin mahdollisesti pidentyvän.

Koeluontoisesti osasta porarei'istä mitattiin lukemia myös pidemmällä ja lyhyemmällä tasaantumisaajalla. Huomattavasti normaalia tunnin tasaantumisaikaa pidempää tasaantumisaikaa käytettäessä ei mitaustuloksissa havaittu kuitenkaan merkittävää muutosta. Osasta porarei'istä mitattiin suhteelliset kosteudet vasta mittapäiden asennusta seuraavana päivänä, jolloin tulokset olivat edelleen pääosin 1-2 % RH-yksikön tarkkuudella samat kuin tunnin tasaantumisen jälkeen mitatut tulokset. Uudemmillä HMP40S –mittapäillä kosteusanturin mittaamat lukemat voitiin piirtää lukulaitteen näytölle muutaman sekunnin päivitysvälillä. Kuvassa 4.16 on esillä lukulaitteen tallentamat suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kuvaajat noin 10 minuuttia ja 95 minuuttia mittapään asentamisen jälkeen.



Kuva 4.16. Valokuvat Vaisalan lukulaitteen näytöltä. Vasemmassa kuvassa mittapää on tasaantunut porareissä noin 10 minuuttia ja oikealla noin 95 minuuttia. Suhteellinen kosteus on valokuvien ottamisen välillä noussut 0,5 % RH-yksikköä.

Tulosten perusteella Vaisalan HMP40S –mittapää tasaantuu lähelle todellista suhteellisen kosteuden arvoa jo noin 10 minuutin aikana mittapään asentamisesta. Riittävää tasaantumisaikaa tuntuu rajoittavan mittapään lämpötilan tasoittuminen. Koeluontoisten testien perusteella voidaan todeta, että laboratoriokokeissa käytetty tunnin tasaantumisaika oli riittävä. Tunnin tasaantumisaika varmistaa luotettavan tuloksen saamisen, vaikka mittapää olisi likaantunut tai pölyyntyneet ja tasaantumisaika olisi täten normaalia pidempi.

Porareikämittausten varmistus

Toistuvasti samoista rei'istä tehdyt porareikämittausten tulokset varmistettiin mittausjakson lopussa. Samoihin koekappaleisiin porattiin uudet yksittäiset varmistusmittausreiät 30 mm ja 70 mm syvyyteen ja tuloksia verrattiin vanhoista rei'istä saatuihin tuloksiin. Kuvassa 4.17 on esillä varmistusmittausten mittausputkien sijoittelu koekappaleisiin.



Kuva 4.17. Varmistusmittausten mittausputket koekappaleen etuosassa. Punaisella teipatut mittausputket ovat alkuperäisiä mittausputkia, joista suhteellista kosteutta on mitattu toistuvasti.

Yksittäisellä uudella reiällä tehdyt tulokset erosivat aiemmista tuloksista pääosin noin 2 % RH-yksikköä. Yhdessä mittapisteessä havaittiin suurempi poikkeama, jonka takia tarkistusmittaukset uusittiin ja ensimmäisten tarkistusmittausreikien lisäksi porattiin kahdet uudet porareivät kuhunkin kappaleeseen. Näin varmistusmittaukset saatiin mitattua kolmesta rinnakkaisesta porareistä.

Ensimmäinen vertailumittaus toteutettiin yhdellä rinnakkaisella mittapisteellä, reiät porattiin 2.10 ja mitattiin 5.10. Varmistusmittauksien lisäreiät porattiin 31.10. Uusia reikiä porattiin 2 kpl jokaiseen betonilaatuun kumpaankin varmistusmittauksissa tarkasteltavaan mittaussyvytyteen. uudet varmistusmittausreiät porattiin 31.10. Tarkastelujakson alussa porattujen varsinaisten mittausrakojen ja aiemmin 2.10 porattujen varmistusrakojen vertailumittaus tehtiin 31.10. Myöhemmin porattujen varmistusmittausreikien kosteusmittaus tehtiin 3.11.

Punnitukset

Koekappaleista poistuvaa kosteusmäärää mitattiin koekappaleita punnitsemalla. Koekappaleiden joukosta valittiin kustakin betonilaadusta ja jokaisesta kuivatusolosuhteesta ns. punnituskappale. Näytepalamenetelmällä mitattavista kappaleista punnituskappaleesta mitattiin suhteellinen kosteus viimeisenä.

Punnitusten aikana havaittiin ongelmia valitun menetelmän kanssa. Koekappaleiden muottien ulkopintoihin jääneet betonivalumat aiheuttivat merkittävää virhettä mittauksiin, koska valumia irtoili mittausten yhteydessä. Ongelmia aiheutti myös porareikäkappaleissa mittauspulttien tiivistykseen käytetyn kitin määrän vaihtelut. Kitin määrän vaihtelu vaikutti alkuvaiheessa tuloksiin enemmän, kuin koekappaleista poistunut vesimäärä. Punnituksissa havaittujen virhelähteiden vuoksi punnituksista luovuttiin eikä tuloksia esitetä.

Punnitukset olisi mahdollisesti kannattanut tehdä erillisistä punnituksista varten tehdyistä pienemmistä kappaleista, sillä noin 20 kg painoisten kappaleiden siirtely ja punnitseminen osoittautuivat vaikeaksi. Punnitusten sijaan oltaisiin voitu myös seurata näytepalamenetelmässä syntyneiden betoninäytteiden mittaushetken massaa verrattuna saman näytteen kuivapainoon.

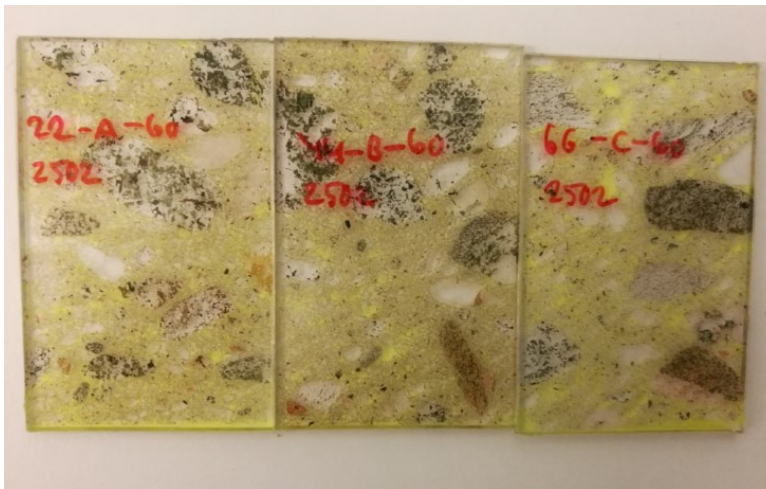
4.2.2 Halkeilun seuranta ja ohuthietutkimukset

Vesisumutus

Koekappaleiden pintojen halkeilua seurattiin vesisumutuksella. Vesisumutus tehtiin näytepalamitatuille koekappaleille. Koekappaleiden pinnat sumutettiin kosteiksi juuri ennen näytepalojen piikkausta, jotta vesisumutus ei vaikuttaisi kosteusmittausten tuloksiin. Ehjä betonipinta kuivuu nopeammin kuin halkeama, johon on imeytynyt enemmän kosteutta. Yhdessäkään koekappaleessa ei kuitenkaan havaittu pinnan halkeilua vesisumutuksella.

Ohuthietutkimukset

Ohuthietutkimuksia varten työssä valetuista koekappaleista porattiin vesijäähdytetyllä poralieriöllä noin 50 mm halkaisijaltaan olevat näytelieriöt. Ohuthietutkimuksia varten näytteistä valmistettiin petrografiset ohuthieet näytteiden ulkopinnasta alkaen, pinnan suuntaa vasten kohtisuorassa suunnassa noin 55 mm:n syvyydelle betoniin. Ohuthieiden pinta-ala on 35×55 mm. Kuvassa 4.18 on esillä kolme preparoitua ohuthiettä.



Kuva 4.18. Preparoidut petrografiset ohuthieet kolmesta betonilaadusta. Vastaavia ohuthieitä valmistettiin yhteensä 21 kappaletta.

Vahanan Rakennusfysiikka Oy:n Hannu Pyy tutki koekappaleiden mikrorakennetta ohuthietutkimuksin kolmessa eri vaiheessa poratuista ja valmistetuista ohuthieistä. Tutkimustulokset on esitetty liitteessä E. Koekappaleista porattiin lieriöt koekappaleiden ollessa 45, 90 ja 180 vuorokauden ikäisiä. 45 vuorokauden kohdalla porattiin näytteet 23 °C vakio-olosuhteessa, 30 °C kuivatusolosuhteessa ja 60 °C kuivatusolosuhteessa säilytetyistä koekappaleista 16.5.2017. 90 vuorokauden kohdalla porattiin lieriöt vain 60 °C kuivatusolosuhteessa säilytetyistä koekappaleista, koska kyseisen kuivatusolosuhteen tarkastelujakso päättyi 90 vuorokauteen. Poraus tehtiin 1.7.2017.

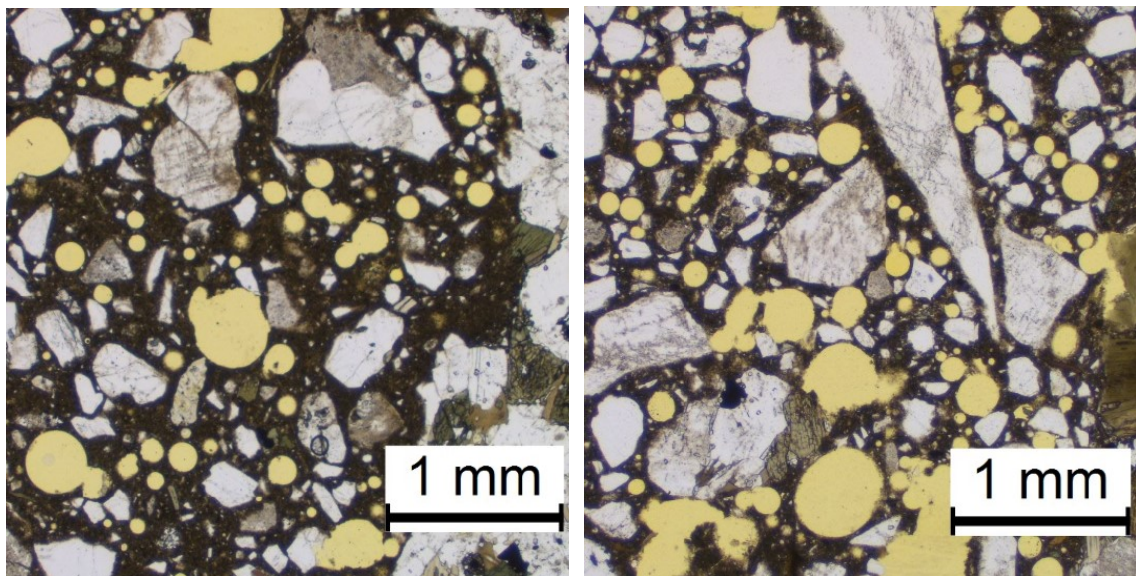
180 vuorokauden kohdalla (1. ja 2.10.2017) porattiin lieriöt 23 °C vakio-olosuhteessa ja 30 °C kuivatusolosuhteessa säilytetyistä koekappaleista, sekä lisäksi 180 vuorokautta viileissä (5 °C) olosuhteissa säilytetyistä koekappaleista.

Porauksen jälkeen porattuja lieriöitä säilytettiin laboratoriossa noin 20 °C lämpötilassa. 45 vuorokauden kohdalla porattujen lieriöiden preparointi viivästyi tietokatkon vuoksi ja näytteet preparoitiin vasta noin 90 vuorokauden kohdalla. Loput lieriöt preparoitiin lähes välittömästi porauksen jälkeen.

Ohuthieiden preparointi- ja tutkimusmenetelmä on esitetty mm. standardeissa ASTM C856 ja NT Build 381. Ohuthiepreparointi tehdään siten, että tutkittavasta betonista saadaan näyteaiho, joka on ohuthieen kokoinen (n. 35×55 mm) ja paksuudeltaan noin 10

mm. Kappale impregnoidaan alipaineessa epoksilla, johon on lisätty fluoresoivaa väriainetta. Kappaleen toinen lapepinta hiotaan tasoon ja liimataan ohuthielasille. Tämän jälkeen näyte sahataan alle 1 mm:n paksuuteen ja tarkkuushiotaan timantti-hionnalla lopulliseen paksuuteen, joka on 0,03 mm. (Liite E)

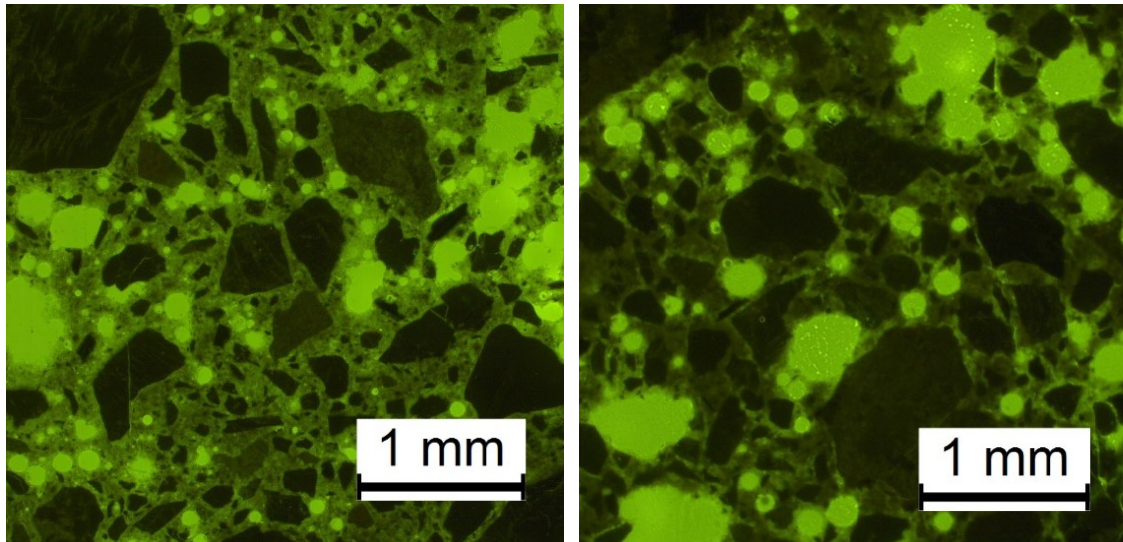
Ohuthieet tutkittiin Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratoriossa yhdistetyllä polarisaatio- ja fluoresenssimikroskoopilla. Polarisaatiopuolella (POL) valaistuksena käytetään joko normaalia (polarisoimatonta) halogeenivaloa tai ristiin polarisoitua valaistusta. POL-mikroskopiolla tutkitaan betonien yleisrakenne, koostumus ja huokosrakenne. Suuremmilla suurennuksilla voidaan tutkia sementtikiven rakennetta ja sideaineen koostumusta sekä kiteytyymiä betonin huokosissa ja halkeamissa. Kuvassa 4.19 on polarisaatiomikroskoopin näkymä esimerkkinä kahdesta eri betonilaadusta.



Kuva 4.19. Kuva polarisaatiomikroskoopin näkymästä. Vasemmalla betoni B, ja oikealla betoni C. Kuvissa keltaisena näkyy suojahuokoset, mustana sementtikivi ja vaaleana runkoaines.

Polarisaatiomikroskoopin näkymästä voidaan havainnoida muun muassa suojahuokosia. Vasemmanpuoleisessa kuvassa (betoni B) huokosia on huomattavasti vähemmän kuin oikeanpuoleisessa kuvassa (betoni C).

Fluoresenssi- (FLU-) mikroskopiolla tutkitaan näytteiden huokosrakennetta, halkeilua sekä sementtikiven kapillaarihuokoisuutta ja vesi-sementtisuhdetta. FLU-mikroskopiassa valonlähteenä on näytteeseen impregnoitu fluoresoiva aine, jonka valon intensiteetin perusteella arvioidaan tutkittavan materiaalin, kuten sementtikiven huokoisuutta. Kuvassa 4.20 on fluoresenssimikroskoopin näkymä kahdesta esimerkkinäytteestä.



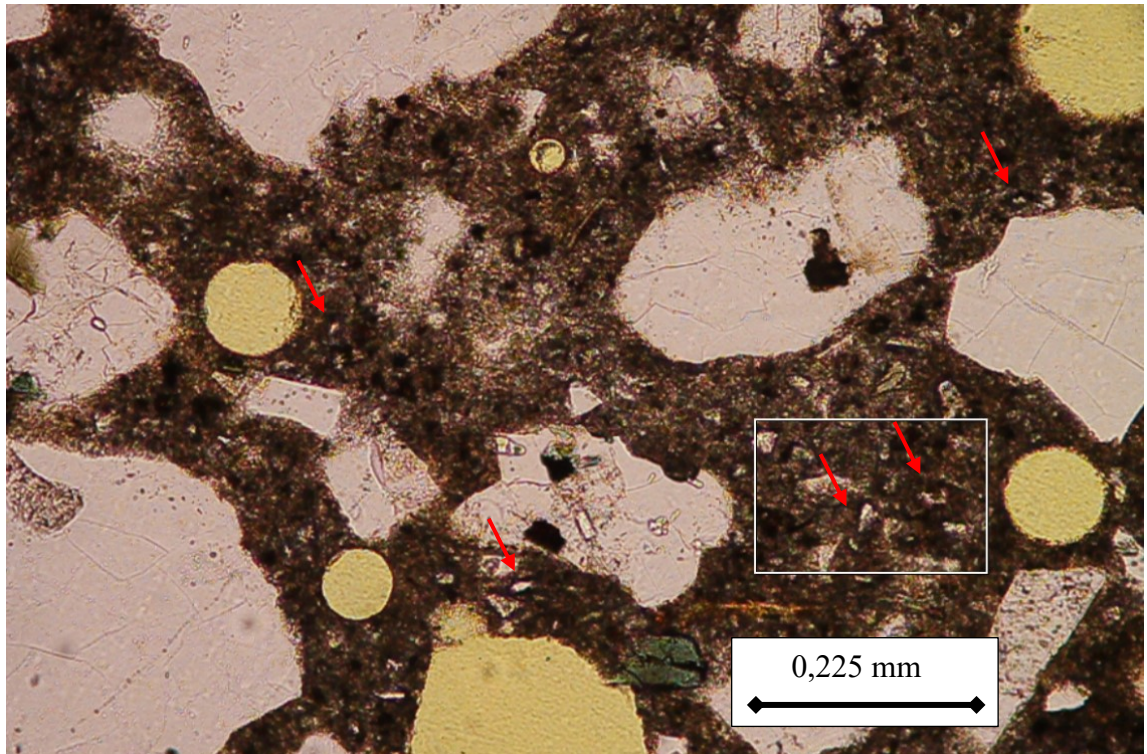
Kuva 4.20. Kuva fluoresenssimikroskoopin näkymästä. Vasemmalla on esitetty kuva C betonista 45 vuorokauden kohdalla poratusta ohuthieestä ja oikealla samasta betonista 180 vuorokauden iässä poratusta ohuthieestä. Molempia betoneita säilytettiin 23 °C vakio-olosuhteessa. Kuvassa suojahuokset ja kapillaariverkosto toimivat valonlähteenä ja hohtavat kuvassa vihreinä. Runkoaines on kuvassa mustaa ja sementtikivi vaihtelee vaalean harmaasta tumman harmaaseen. Huokoisempi sementtikivi näkyy vaaleampana.

Fluoresenssimikroskoopin esimerkkikuvista havaitaan sementtikiven huokoisuuden pieneneminen ajan kuluessa. Vasemmassa kuvassa sementtikivi näkyy vaaleampana tarkoittaen, että sementtikivi on huokoisempaa. Oikeanpuoleisessa kuvassa sementtikivi on lähes mustaa, joten sementtikivessä ei ole enää yhtenäistä kapillaariverkostoa.

Ohuthienäytteet tutkittiin Nikon E600- ja Leica DM2700P –polarisaatio- ja fluoresenssimikroskoopeilla. Ohuthietutkimuksissa käytettävät suurennukset ovat tavallisesti 10 - 400 kertaisia. (Hannu Pyy, Vahanen)

Ohuthienäytteistä tutkittiin betonin rakennetta, määritettiin suojahuokostus, arvioitiin tiivistyshuokosten määrää ja sementtikiven tiivyyttä (kapillaarisuutta) sekä tutkittiin halkeamia. (Liite E)

Ohuthienäytteistä pyrittiin lisäksi arvioimaan betonien hydrataatioastetta laskemalla hydratoitumattomien sementtipartikkelien määrää. Kuva 4.21 on kuvakaappaus mikroskoopinäkymästä, jossa näkyy hydratoitumattomia sementtipartikkeleita. Tavoitteena oli laskea hydratoitumattomat sementtipartikkelit satunnaisesti sijoitellulta rajatulta alueelta.



Kuva 4.21. Hydratoitumattomien sementtipartikkelien laskenta. Kuvassa näkyvä laatikko on todellisuudessa kooltaan 0,225 mm leveä ja 0,15 mm korkea, jolloin sen pinta-ala on 0,034 mm². Hydratoitumattomat sementtipartikkelit näkyvät kuvassa valkoisina pisteinä, joiden ympärillä on musta reunus. Osa hydratoitumattomista sementtipartikkeleista on esitetty punaisilla nuolilla. Kuvassa näkyvät isommat vaaleat alueet ovat runkoainesta ja keltaiset kuplat suojahuokosia.

Hydrataatioasteen määrittämisen ja hydratoitumattomien sementtipartikkelien laskeminen osoittautui hyvin epätarkaksi menetelmäksi. Kuvasta 4.21 voidaan erottaa selvästi hydratoitumattomia sementtipartikkeleita sekä jo sementtigeliksi muuttuneita partikkeleita (mustat pisteet kuvassa). Kun hydratoitumattomia partikkeleita lasketaan rajatulta alueelta, muodostuu ongelmaksi rajanveto laskettavien partikkelien riittävälle koolle, eli sille mitkä hyväksytään ja mitä ei. Samalta alueelta saadaan vaihtelevia tuloksia eri laskentakerroilla ja etenkin, jos laskennan tekee eri henkilö. Menetelmän epätarkkuuden takia hydrataatioasteen määrittämisestä ohuthieestä luovuttiin.

4.2.3 Koekappaleiden lämpötila

Koekappaleiden keskipisteen lämpötilaa seurattiin noin 2 kk termolankaloggereilla. Lämpötilaseurannalla pyrittiin havaitsemaan hydrataation aiheuttamia kappaleiden ympäristöään korkeampia lämpötiloja.

Valujärjestelyistä johtuen termolankaloggereita oli valun aikana asennettu yksi loggeri jokaista betonilaatua varten. Jokaiseen loggeriin oli kytketty 4 termolankaa. Jokaisesta betonilaadusta 4 koekappaletta varustettiin termolangoilla, yksi jokaista kuivatusolosuh-

detta varten. Viileässä olosuhteessa 180 vuorokautta säilytettäviin koekappaleisiin ei sijoitettu termolankoja, sillä osa muista kappaleista oli ensimmäiset 30 vuorokautta viileässä olosuhteessa.

Valun aikana ja valua seuraavana yönä parkkihallin lämpötila oli noin 17 °C ja suhteellinen kosteus noin 45 % RH. Valmistajan ilmoittamat betonimassojen toimituslämpötilat olivat välillä 17 – 18,5 °C.

Valupäivän jälkeen termolangoilla varustettujen koekappaleiden termolangat kytkettiin kuivatusolosuhdekohtaisesti omiin loggereihin, jolloin samassa loggerissa oli aina yksi koekappale kutakin betonilaatua. Koekappaleiden lämpötilaseurantaa jatkettiin monissa olosuhteissa vielä senkin jälkeen, kun koekappaleiden lämpötila oli vakiintunut kyseisen olosuhteen lämpötilaan, koska lämpötilaloggeroituja kappaleita hyödynnettiin olosuhdearokkujen lämpötilan säätämässä/varmentamisessa.

4.2.4 Puristuskokeet

Koekappaleiden puristuslujuuden määrittämiseksi koekappaleista porattiin 50 mm halkaisijaltaan olevat poralieriöt, jotka katkaistiin 50 mm pituisiksi. Poralieriöt lähetettiin puristettaviksi Oulun ammattikorkeakoulun laboratorioon, jossa määritettiin niiden lieriöpuristuslujuus.

Lieriöt porattiin 2.10.2017, jolloin betonit olivat 180 vuorokauden ikäisiä. Koekappaleet puristettiin 21.11.2017. Porauksen jälkeen koekappaleita säilytettiin normaalissa huone-tilassa.

Laboratorion toimittamat lieriölujuudet muutettiin kuutiolujuuksiksi Betoninormit (2016) by 65 -ohjeen mukaisesti kertomalla saatu tulos 1,1:llä. Muunnos tehtiin, vaikka lieriöiden halkaisija jäi 0,7 – 0,9 mm alle vaadittavan 50 mm mitan.

4.3 Laskennallinen tarkastelu

Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n Pauli Sekki mallinsi tutkimuksessa tarkasteltuja koekappaleita vastaavien betonikappaleiden kuivumista COMSOL –multiphysics laskentaohjelmiston versiolla 5.3a. Tämän työn koekappaleiden mallinnuksessa hyödynnetty laskentamalli perustuu Vahasen ja Comsolin kehittämään malliin, joka on esitelty NSB2017 -konferenssissa. Mallia on parannettu pääosin materiaaliominaisuuksien suhteen, jotta lämpötilan vaikutus kuivumiseen on saatu huomioitua paremmin. Koekappaleiden kuivumisen mallintaminen tehtiin kaikissa laboratoriokokeissa käytetyissä olosuhteissa kaikille kolmelle betonilaadulle. (Liite H)

Laskennan reunaehtoina käytettiin mitattuja toteutuneita kuivatusolosuhdekohtaisia lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja. Käytännön syistä reunaehtoja ei syötetty malliin

samalla tarkkuudella, kuin millä ne mitattiin olosuhdehuoneista. Käytetyt reunaehdot olivat keskiarvoltaan vastaavia kuin mitatut lämpötilat ja suhteellisen kosteuden arvot, mutta päivä- ja tuntikohtaista vaihtelua ei lisätty laskennan reunaehtoihin. Merkittävimmät olosuhdemuutokset otettiin huomioon. (Liite H)

4.3.1 Laskentamallin kuvaus

Laskentamallissa COMSOL:in sisäänrakennettuun lämmön- ja kosteudensiirron moduuliin on lisätty hydrataation huomioon ottavat kaavat ”ODEs and DAEs” fysiikkarajapinnalla. Ohjelman valmis lämmön- ja kosteudensiirron moduuli ottaa huomioon lämmön- ja kosteudensiirron yhtälöiden 4.1 ja 4.2 mukaisesti pois lukien lisätermi Q ja S , jotka kuvaavat hydrataation aiheuttamaa lämmöntuottoa ja kosteuden sitoutumista. Yhtälöissä kosteudensiirtopotentiaalina toimii suhteellinen kosteus (φ). (Sekki, Karvinen 2017)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda \nabla T + L_v \delta_p \nabla(\varphi p_{sat})] + Q \quad 4.1$$

$$\xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot [\xi D_w \nabla \varphi + \delta_p \nabla(\varphi p_{sat})] + S \quad 4.2$$

joissa

T	= lämpötila [K]
ρ	= tiheys [kg/m^3]
C_p	= lämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kgK})$]
t	= aika [s]
λ	= lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{mK})$]
L_v	= haihtumisen vaatima lämpö [J/kg]
δ_p	= vesihöyrynläpäisevyys [s]
p_{sat}	= kyllästymispaine [Pa]
Q	= lämmönlähde [J/kg]
S	= kosteusnielu [$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$]
w	= kosteuspitoisuus [kg/m^3]
φ	= suhteellinen kosteus [-]
D_w	= kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti [m^2/s]
ξ	= $dw/d\varphi$ kosteuskapasiteetti [kg/m^3]

Hydrataation huomioon ottamiseksi malliin on lisätty yhtälöt hydrataatioasteelle ja ekvivalentille iälle. Yhtälöitä 4.3 ja 4.4 käytetään lämmönlähteen (Q) ja kosteusnielun (S) määrittämiseksi. (Sekki, Karvinen 2017)

$$\frac{d\alpha}{dt} = \exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right] \beta_{RH} \frac{\alpha_u \beta}{t_e} \left(\frac{\tau}{t_e}\right)^\beta \exp\left[-\left(\frac{\tau}{t_e}\right)^\beta\right] \quad 4.3$$

$$\frac{dt_e}{dt} = \exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad 4.4$$

joissa

- $\alpha(t_c)$ = Hydrataatioaste [-]
 t_e = Ekvivalentti-ikä [s]
 E = Aktivaatioenergia [J/mol]
 R = Yleinen kaasuvakio [J/molK]
 T_r = Vertailulämpötila [K]
 β = Hydrataation muotokerroin [-]
 β_{RH} = Suhteellisen kosteuden vaikutus hydrataatioon [-]
 τ = Hydrataation aikaparametri [s]

Hydrataation tuottama lämpö ja kuluttama vesimäärä voidaan edelleen laskea seuraavien yhtälöiden avulla. Kaavassa 4.3 oleva termi β_{RH} ottaa huomioon hydrataation hidastumisen kosteuspitoisuuden laskiessa, ja loppumisen kokonaan, kun suhteellinen kosteus laskee alle 85 % RH. (Sekki 2017)

$$Q = H_u \frac{d\alpha}{dt} \quad 4.5$$

$$S = -\rho_s M_{f, \text{cem}} w_n \frac{d\alpha}{dt} \quad 4.6$$

joissa

- H_u = Hydrataation kokonaisentalpia [J/m³]
 ρ_s = Kiinteiden aineiden tiheys [kg/m³]
 w_n = Hydrataation tarvitsema vesimäärä [kg/kg]
 $M_{f, \text{cem}}$ = Sementin massaosuus [-]

5. MITTAUSTULOKSET

5.1 Koekappaleiden lämpötila

Koekappaleiden keskipisteen lämpötilaa seurattiin koekappaleen sisään valetun termolanka-anturin ja Testo 176 / 177 T4 loggereiden avulla. Lämpötilaa seurattiin jokaiseen kuivatusolosuhteeseen sijoitetuista koekappaleista siten, että jokaisessa kuivatusolosuhteessa oli yksi lämpötilaseurattu koekappale jokaista betonilaatua. Yhteensä lämpötilaa seurattiin 12:ta koekappaleesta.

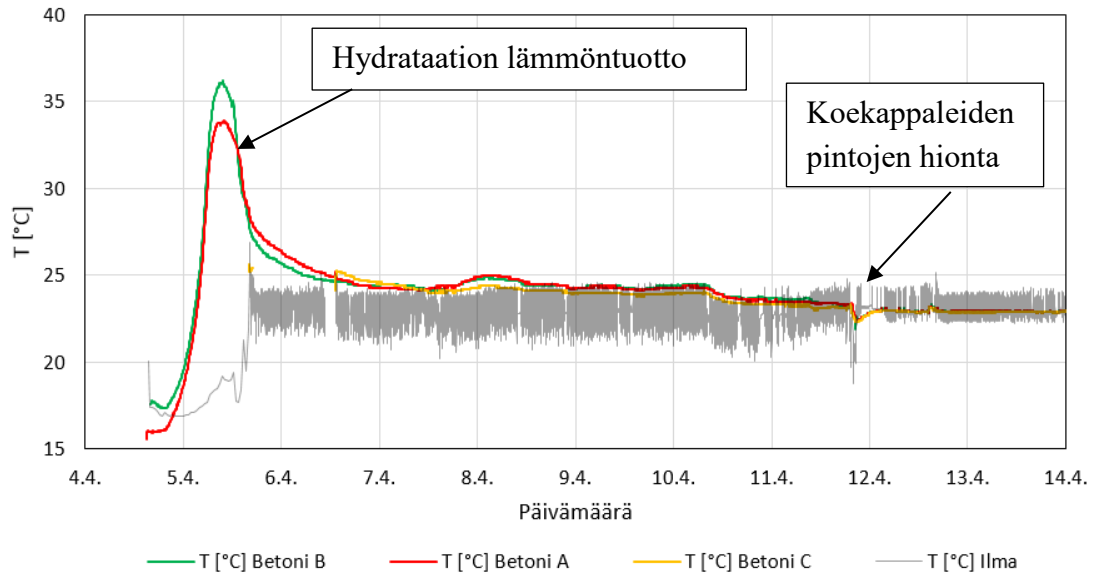
Koekappaleiden lämpötila tasaantui hyvin lähelle kunkin kuivatusolosuhteen lämpötilaa pääosin muutamassa päivässä, kuitenkin koekappaleiden lämpötilaseuranta jatkettiin pidemmälle tasaantumisen varmistamiseksi.

Alkuvaiheessa koekappaleiden lämpötilat tallennettiin tiheämmällä, muutaman minuutin tallennusvälillä, ja loput mittausjaksosta tallennusväli oli noin puoli tuntia. Jokaisessa kuivatusolosuhteessa oli mukana myös yksi koekappaleita ympäröivän ilman lämpötilaa mittaava termolanka-anturi. Valupäivänä ympäröivän ilman lämpötila tallennettiin erillisellä Testo 174 H loggerilla, joka oli sijoitettu samaan tilaan valettujen koekappaleiden kanssa.

Tässä luvussa esitettyjen kuvien akseleiden asteikot vaihtelevat merkittävästi keskenään. Asteikot on valittu siten että kussakin kuivatusolosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden lämpötilakuvaajat olisivat mahdollisimman selkeälukuisia.

Lämpötilat 23 °C vakio-olosuhteessa säilytetyissä koekappaleissa

Kuvassa 5.1 näkyy 23 °C vakio-olosuhteeseen siirrettyjen koekappaleiden lämmönkehitys ensimmäisen 10 vuorokauden aikana. Kuvassa näkyy betonin hydrataation aiheuttama lämmöntuotto ensimmäisten vuorokausien aikana sekä koekappaleiden pintojen hionta 7 vuorokauden kohdalla.



Kuva 5.1. 23 °C vakio-olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden lämpötilamuutokset. Kuvaajiin on yhdistetty valutilanteen tiheämpi lämpötilaseuranta ja myöhempi lämpötilaseuranta.

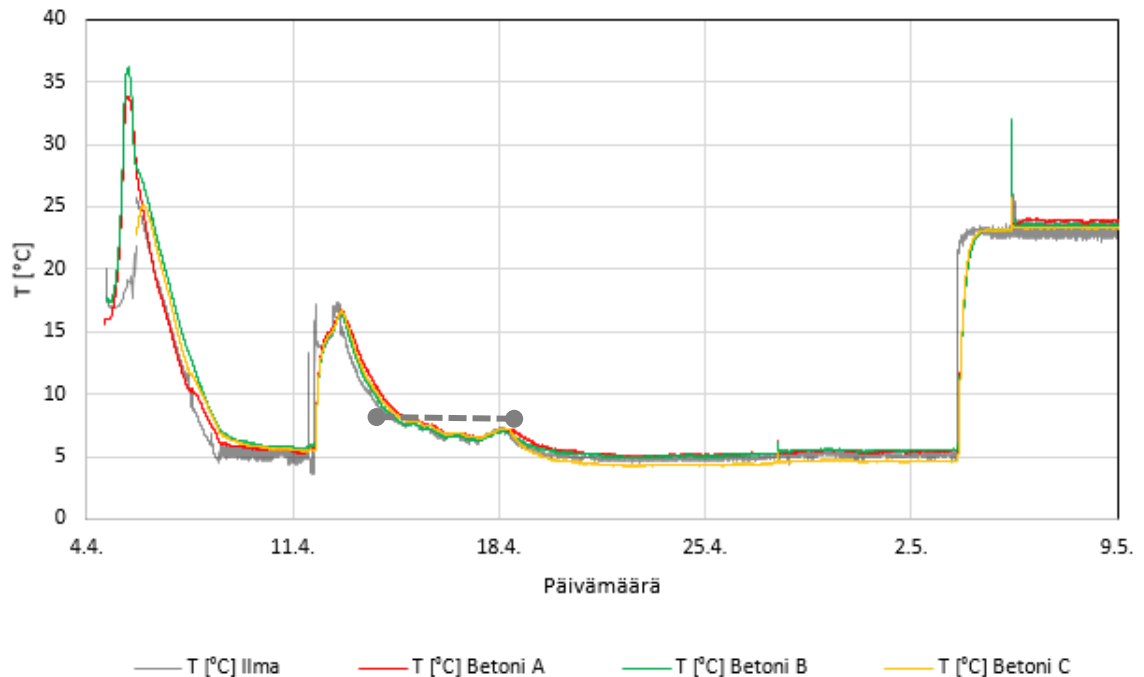
Kaikkien koekappaleiden lämpötila on jälkihoitajakson ajan muutaman asteen vakio-olosuhteen lämpötilaa korkeampi. Pintojen hionta näkyy 7 vuorokauden kohdalla kuoppana lämpötilakuvaajassa, sillä koekappaleiden pinnat hiottiin noin 17 °C lämpötilassa. Koekappaleiden lämpötila tasoittuu vakio-olosuhteen lämpötilaan hyvin nopeasti pintojen hionnan ja jälkihoidon lopetuksen jälkeen. Hydrataation lämmöntuottoa tarkastellaan tarkemmin kohdassa 5.1.1 ja jälkihoitoajan lämpötilaa kuvassa 5.4.

Valupäivän mittalaittevirian lisäksi 23 °C vakio-olosuhteessa säilytetyn lämpötilaseurattun betonin C termolanka-anturin liitin vaurioitui koekappaleiden siirtelyn seurauksena, mikä näkyy lämpötilakuvaajassa toisena tyhjänä kohtana. Kyseisen koekappaleen viallinen termolanka-anturi havaittiin ja korjattiin 6.4. Kyseisestä koekappaleesta saatiin muutama lämpötilalukema valupäivää seuraavana päivänä (5.4.2017), jotka näkyvät pisteenä noin 26 °C:ssa iltapäivällä 5.4.2017.

Koekappaleiden lämpötilat 5 °C viileässä olosuhdekaapissa

Kuvassa 5.2 on esitetty viileässä olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden lämpötilamuutokset. Kuvan oikeassa reunassa näkyy koekappaleiden siirtämisestä kuivatusolosuhteeseen johtuva lämpötilan nousu. Eri kuivatusolosuhteisiin siirtämisen vaikutuksia koekappaleiden lämpötilaan tarkastellaan tarkemmin kohdassa 5.1.1.

Harmaassa säilytysolosuhteiden lämpötilaa esittävässä kuvaajassa on muutaman tunnin katkos 5.4.2017. Kuvassa erottuu koekappaleiden pintojen hionta viikon kohdalla selkeänä lämpötilan nousuna. Hionnan jälkeen koekappaleita säilytettiin yön yli noin 17 °C lämpötilassa, jotta muotin ja betonipinnan rajapinta saatiin tiivistettyä.



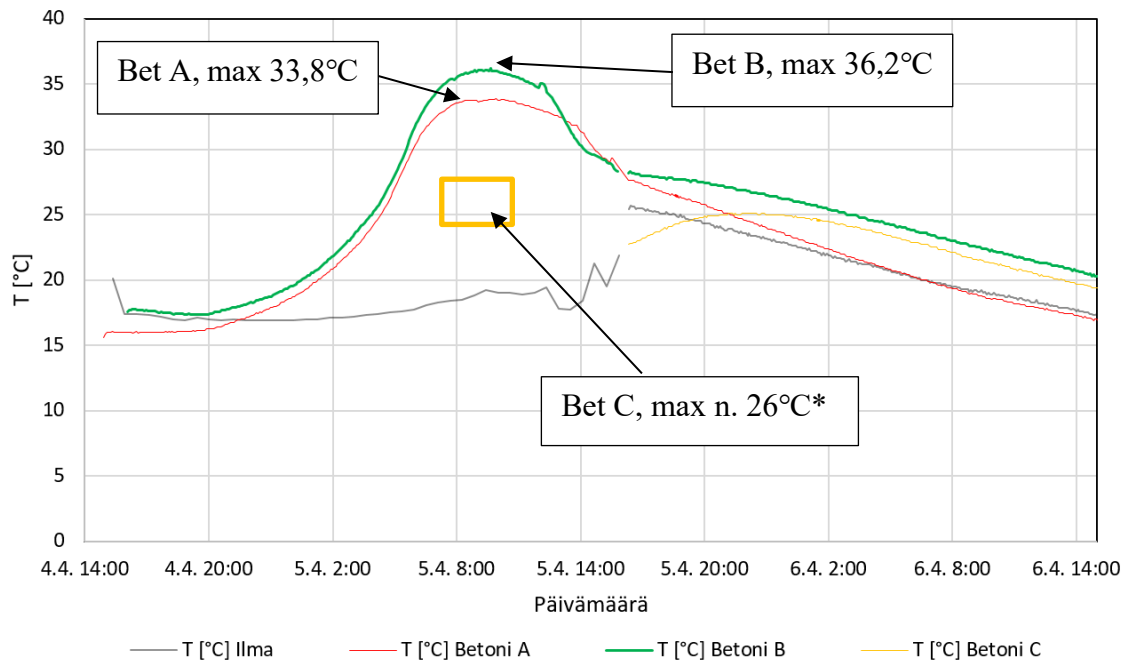
Kuva 5.2. Ensimmäiset 30 vuorokautta viileässä olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden lämpötilamuutokset. Kuvaajaan on yhdistetty valutilanteen tiheämpi lämpötilaseuranta ja myöhempi lämpötilaseuranta.

Lämpötilaseurattujen koekappaleiden lämpötila laskee pintojen hionnan jälkeen verrattain hitaasti, koska hionnan jälkeen 13.4.2017 olosuhdekaapin ovi ei ollut täysin tiiviisti kiinni johtuen useiden termolanka-antureiden johdoista, jotka kulkivat oven välistä (ajanjakso merkitty kuvaan harmaalla katkoviivalla). Olosuhdekaapin oven tiiviyyttä parannettiin 18.4.2017. Oven epätiivyydestä johtunut hieman kohonnut lämpötila näkyy myös olosuhdekaapin olosuhdetta esittävässä kuvassa 5.9. Koekappaleiden kuivumisen vertailun kannalta oven epätiivyydellä ei ole merkitystä, sillä kaikki koekappaleet olivat samassa olosuhdekaapissa ja epätiivyyden aiheuttama kohonnut lämpötila vaikutti kaikkiin viileässä olosuhteessa säilytettyihin koekappaleisiin.

5.1.1 Koekappaleiden lämpötilan tarkastelu

Lämpötilan seuranta valun jälkeen

Kuvassa 5.3 on esitetty tarkemmin koekappaleiden lämpötilamuutoksia valun jälkeen. Kuvassa on esitetty eri betonilaaduista mitatut korkeimmat lämpötilat, C betonilla maksimilämpötila on luettu loggerin näytöltä aamupäivällä 5.4.2017.

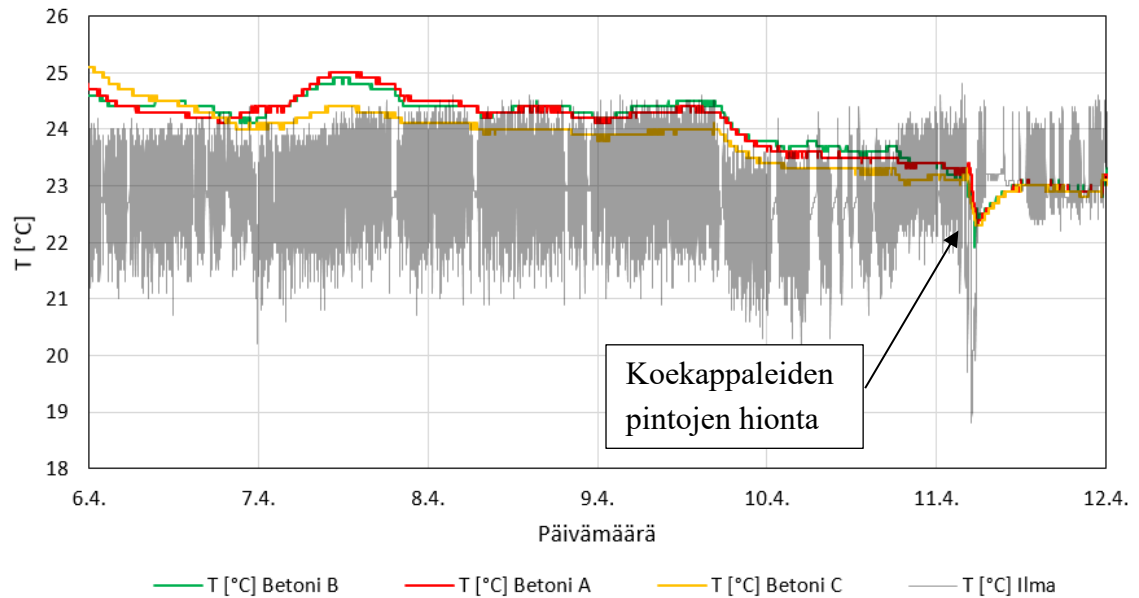


Kuva 5.3. Koekappaleiden lämpötilan muutokset valun jälkeen.

Koekappaleiden valun jälkeisenä yönä koekappaleiden lämpötila kohosi selvästi yli ympäröivän tilan lämpötilan hydrataation seurauksena. Korkein lämpötila havaittiin betoni-laadusta B, jossa on käytetty nopeammin reagoivaa pikasementtiä, kun taas A betonissa sementtinä on hitaammin reagoivaa plussementtiä. Yhden loggerin toimimattomuuden seurauksena tarkkaa lämpötilakuvaajaa ei saatu betonilaadun C koekappaleista. C betonin lämpötilan todettiin käyvän korkeimmillaan noin 26 °C:ssa, valupäivää seuraavana päivän aamuna, kun koekappaleita alettiin purkaa kuormalavoilta. Lämpötila luettiin loggerin näytöltä, jossa lukemat olivat näkyvillä, vaikka loggeri ei mitattuja tuloksia tallentanutkaan. C betonin havaittu lämpötilamaksimi on esitetty kuvassa kertaisella laatikolla. Kuvassa C betonin lämpötila nousee valua seuraavana päivänä uudelleen noin 25 °C:seen, kun koekappaleet oli jo siirretty viileän olosuhteen olosuhdekaappiin, tämä myöhäisempi lämpötilan nousu johtunee pääosin siitä, että olosuhdekaapin lämpötila nousi noin 25 °C:seen, kun sinne asetettiin hydrataation seurauksena lämmentyneitä koekappaleita kaikista betonilaaduista. C betonin muita betonilaatuja alemmaa maksimilämpötilaa selittää kyseisen betonilaadun korkeampi vesi-sementtisuhte, lisäksi betonissa käytettiin ainoastaan plussementtiä.

23 °C vakio-olosuhdehuoneessa säilytetyt koekappaleet

Kuvassa 5.4 on esitetty 23 °C vakio-olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden lämpötilamuutokset jälkihoitojakson aikana. Kuvassa on myös termolanka-anturilla mitattu olosuhteen lämpötila. Olosuhdeanturia säilytettiin koekappaleiden läheisyydessä, kuitenkin niin, ettei koekappaleiden tuottama lämpö vaikuttanut anturiin.

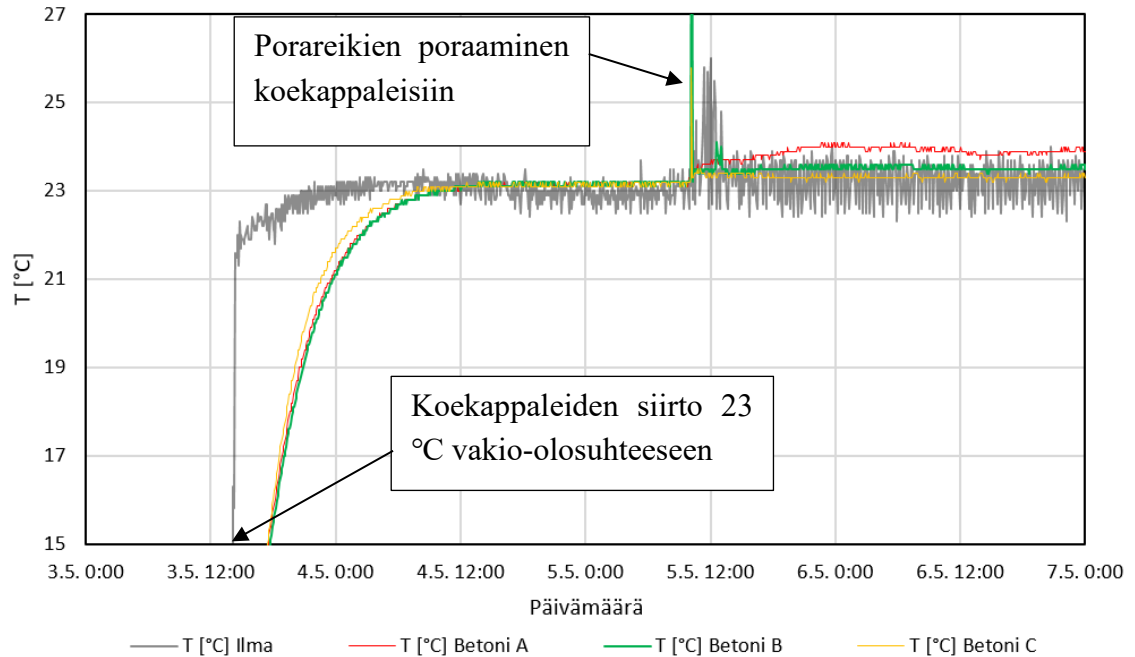


Kuva 5.4. 23 °C vakio-olosuhdehuoneessa säilytettyjen koekappaleiden lämpötilan kehitys jälkihoitojakson aikana.

Jälkihoitojakson aikana koekappaleiden vakio-olosuhdetta korkeampi lämpötila saattaa osittain johtua tai korostua koekappaleita ympäröivän muovikalvon ja muovikalvon alla olevan ilmatilan vaikutuksesta. Kuvan vasemmassa reunassa (6.4.2017) näkyy koekappaleiden lämpötilan tasaantuminen hydrataation jälkeen. Koekappaleiden jälkihoidon lopetuksen ja pintojen hionnan jälkeen koekappaleiden lämpötilat tasaantuivat hyvin lähelle olosuhdehuoneen lämpötilaa.

Viileästä 23 °C vakio-olosuhteeseen siirretyt koekappaleet (5 °C → 23 °C)

Viileästä olosuhteesta 30 vuorokauden kohdalla 23 °C vakio-olosuhteeseen siirrettyjen lämpötilaseurattujen koekappaleiden lämpötilojen kehitys on esitetty kuvassa 5.5. Kuvasta on rajattu pois ensimmäiset 30 vuorokautta, jolloin koekappaleita säilytettiin viileässä olosuhteessa. Viileässä olosuhteessa säilytyksen aikana koekappaleiden lämpötila kehittyi aiemmin esitetyn mukaisesti. Kuvassa on myös termolanka-anturilla mitattu olosuhteen lämpötila. Olosuhdeanturia säilytettiin koekappaleiden läheisyydessä, kuitenkin niin, ettei koekappaleiden tuottama lämpö vaikuttanut anturiin.



Kuva 5.5. Viileästä olosuhteesta 30 vrk kohdalla 23 °C vakio-olosuhteeseen siirrettyjen koekappaleiden lämpötilamuutokset.

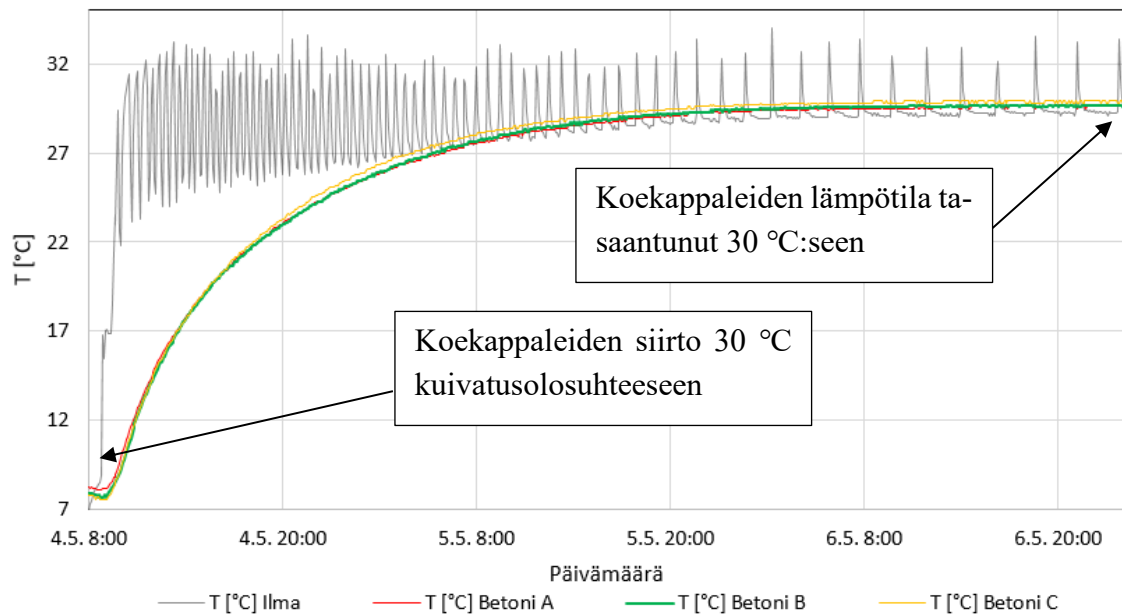
Kuvaajan piikki 5.5.2017 johtuu porareikien poraamisesta koekappaleisiin. Reiät porattiin 30, 70 ja 100 mm syvyyteen, lämpötila-anturin ollessa 100 mm syvyydessä 30 mm porareian alapuolella ja 70 ja 100 mm porareikien välissä. Poraamisen vaikutus näkyy vain betonilaadussa B ilmeisesti, koska lämpötilan nousu on hyvin hetkellinen ja se on osunut vain B betonin loggerin lämpötilan tallennushetkelle. Porareivät porattiin kaikkiin kappaleisiin olosuhdehuoneessa, joka selittää hetkellisen nousun olosuhdehuoneen lämpötilassa.

Koekappaleiden lämpötila tasaantui olosuhdehuoneen lämpötilaan noin 24 tuntia koekappaleiden siirtämisen jälkeen. A betonin lämpötila jää porareikien poraamisen jälkeen noin 0,5 – 1 °C korkeammalle, kuin muiden koekappaleiden lämpötila, mikä johtunee epätasaisesta lämpötilajakaumasta olosuhdehuoneen sisällä. Jokaisesta betonilaadusta olosuhdehuoneessa oli kuitenkin 3 rinnakkaista kappaletta, joten kuivumistulosten kannalta yhden koekappaleen hieman korkeammalla lämpötilalla ei ole merkitystä, sillä rinnakkaiset koekappaleet olivat eri puolilla olosuhdehuonetta.

Viileästä 30 °C olosuhdearkkuun siirretyt koekappaleet (5 °C → 30 °C)

Viileästä olosuhteesta 30 vuorokauden kohdalla 30 °C olosuhdearkkuun siirrettyjen lämpötilaseurattujen koekappaleiden lämpötilojen kehitys on esitetty kuvassa 5.6. Kuvassa on esitetty ajanjakso, jonka aikana koekappaleiden lämpötila tasaantui olosuhdearkun lämpötilaan. Kuvassa on myös termolanka-anturilla mitattu olosuhteen lämpötila. Olosuhdeanturia säilytettiin koekappaleiden läheisyydessä, kuitenkin niin, ettei koekappaleiden tuottama lämpö vaikuttanut anturiin.

Lämpötilakuvaajassa näkyy selvästi koekappaleiden siirtäminen pois viileästä olosuhteesta. Koekappaleiden lämpötila tasaittuu kuivatusolosuhteen lämpötilaan pienellä viiveellä anturia ympäröivän betonin takia.



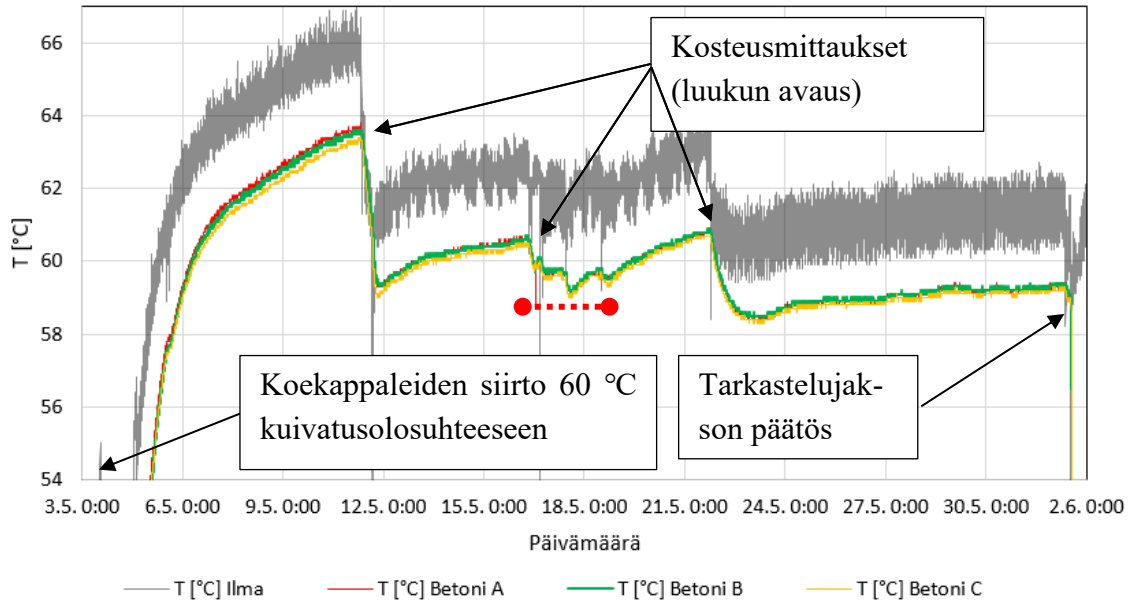
Kuva 5.6. Viileästä olosuhteesta 30 vrk kohdalla 30 °C olosuhdearkkuun siirrettyjen koekappaleiden lämpötilamuutokset.

Koekappaleiden lämpötila tasaantuu olosuhdearkun lämpötilaan noin kahden vuorokauden aikana. Eri betonilaatujen koekappaleiden välillä ei havaittu käytännössä lainkaan eroja lämpötiloissa.

Viileästä 60 °C olosuhdearkkuun siirretyt koekappaleet (5 °C → 60 °C)

Viileästä olosuhteesta 30 vuorokauden kohdalla 60 °C olosuhdearkkuun siirrettyjen lämpötilaseurattujen koekappaleiden lämpötilojen kehitys on esitetty kuvassa 5.7. Kuvassa on esitetty koekappaleiden lämpötilan kehitys olosuhdearkkuun siirtämisestä lähtien aina kyseisen olosuhteen tarkastelujakson loppuun asti. Kuvassa on myös termolanka-anturilla mitattu olosuhteen lämpötila. Olosuhdeanturia säilytettiin koekappaleiden läheisyydessä, kuitenkin niin, ettei koekappaleiden tuottama lämpö vaikuttanut anturiin.

Koekappaleiden lämpötila nousee 60 °C:seen noin 3 vuorokauden aikana. Olosuhdearkun lämpötila kohosi aluksi yli tavoitellun 60 °C:en. Olosuhdearkun lämpötilaa säädettiin ensimmäisen mittauskerran yhteydessä. Koekappaleiden siirron ja kosteusmittausten yhteydessä olosuhdearkun luokkuja jouduttiin pitämään auki, jolloin olosuhdearkun lämpötila laskee.



Kuva 5.7. Viileästä olosuhteesta 30 vrk kohdalla 60 °C olosuhdearkkuun siirrettyjen koekappaleiden lämpötilakehitys.

Olosuhdearkun lämpötilaa mitanneen termolanka-anturin kuvaajassa näkyy luukkujen avaamisen aiheuttamat alaspäin olevat piikit lämpötilassa. Kuvassa punaisella katkoviivalla merkityllä ajanjaksolla arkkuun lisättiin suolaliuosastia ja arkun luukkua jouduttiin aukomaan useampaan kertaan tuuletuksen säätämiseksi. Kuvaajien piikkien vaihteleva koko selittynee lämpötilan tallennushetken ja luukun avaushetken vaihtelevana välinä, sillä loggeri tallensi termolanka-anturin lämpötila-arvon vain noin puolen tunnin välein.

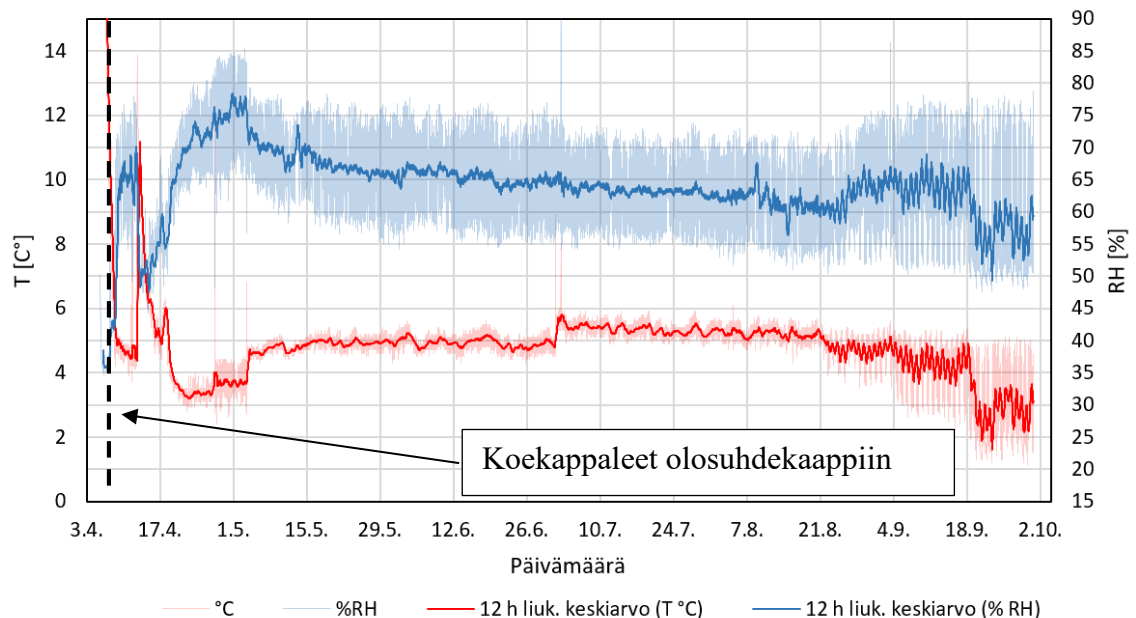
Koekappaleiden lämpötila on koko tarkastelujakson ajan noin 2 °C mitattua olosuhdearkun lämpötilaa korkeampi. Ero selittynee arkun lämpötilaa mitanneen termolanka-anturin sijoittelulla tai olosuhdearkun vaipan yli tapahtuvalla lämmönsiirtymisellä, sillä vaipan yli vallitsi noin 40 °C lämpötilaero. Lämpötilaero vaipan yli on huomattavasti suurempi kuin muissa kuivatusolosuhteissa.

Viileä olosuhde 5 °C

Viileän olosuhdekaapin lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaava mittalaite oli sijoitettu kaapin yläosaan. Tulokset on kerätty yhtä mittalaitetta käyttäen ja tulokset on esitetty kuvassa 5.9.

Viileän olosuhteen lämpötila nousi koekappaleiden olosuhdekaappiin siirtämisen jälkeen lähelle koekappaleiden lämpötilaa, joka oli hydrataation johdosta noin 30 °C. Alkuvaiheen korkea lämpötila on rajattu kuvan ulkopuolelle kuvan selkeyden parantamiseksi. Viikon kuluttua valusta koekappaleiden pinnat hiottiin, jolloin koekappaleet lämpenivät noin 14 °C:seen. Viileän olosuhteen olosuhdekuvaajassa on selkeä lämpötilapiikki 7 vuorokauden kohdalla joka tasoittuu noin viikossa. Tarkastelujakson lopulla olosuhdekaapin lämpötilan vaihteluväli kasvaa selvästi ja alimmillaan lämpötila käy lähes 1 °C:ssa. Heinäkuun alun kohdalla oleva lämpötilapiikki johtuu mittalaite-tiedonkerääjäyhdistelmän varmuuskopioinnista lämpimässä toimistossa. Valtaosan tarkastelujaksosta olosuhdekaapin lämpötila vaihteli 4 – 6 °C välillä.

Tarkastelujakson aikana viileän olosuhdekopin suhteellista kosteutta ei erikseen säädelty ja se vaihteli koekappaleiden sijoituksen jälkeen välillä 45 – 85 % RH. Ensimmäisen viikon aikana koekappaleiden pinnat olivat peitettynä (jälkihoito), joten koekappaleiden kosteudentuotto ja olosuhdekaapin suhteellinen kosteus pysyvät varsin maltillisina. Ensimmäisen viikon jälkihoitojakson ja koekappaleiden pintojen hionnan jälkeen olosuhdekaapin suhteellinen kosteus nousee tarkastelujakson maksimiarvoonsa noin 85 % RH.



Kuva 5.9. Viileän olosuhteen lämpötila ja suhteellinen kosteus koekappaleiden olosuhdekaapin aikana. Loggeri tallensi arvot 35 minuutin välein.

Viileän olosuhteen olosuhdekaapin jäähdytyskapasiteetti ei riittänyt koekappaleiden nopeaan jäähdytykseen, sillä koekappaleiden hydrataatiosta johtuva lämmöntuotto oli käynnistynyt valupäivää seuraavana yönä ennen koekappaleiden siirtämistä säilytysolosuhteisiin. Lukuun ottamatta tarkastelujakson loppuosaa lämpötila pysyi hyvin tavoitellussa 5 °C tasossa. Koko tarkastelujakson aikana olosuhdekaapin lämpötilan keskiarvo oli 4,9 °C.

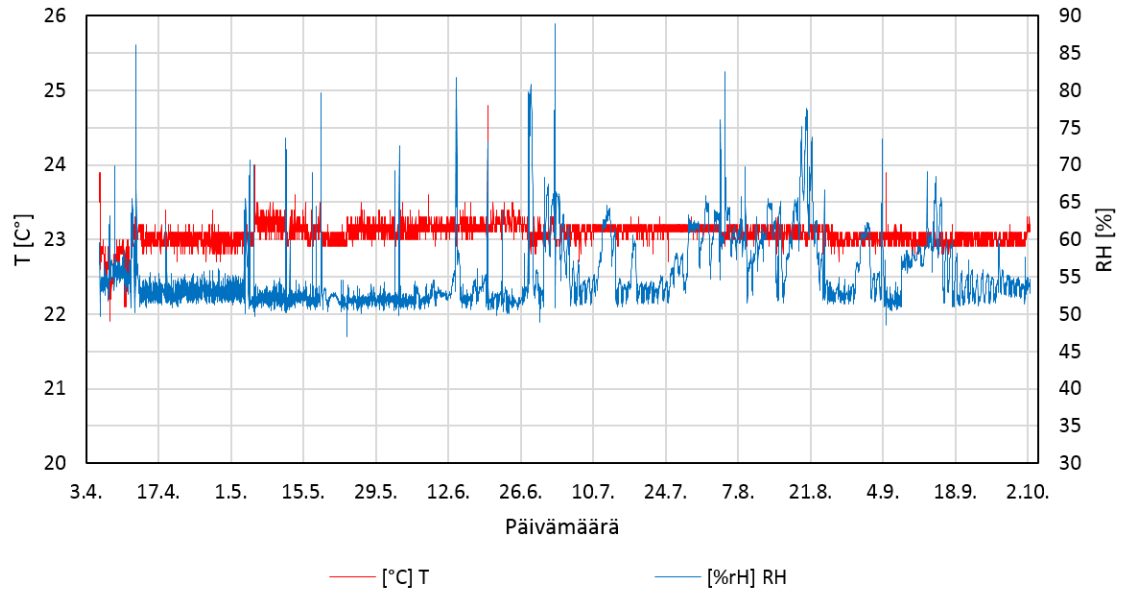
Olosuhdekaapin suhteellisen kosteuden taso pysyi tarkastelujakson aikana hyvinkin taiseisena, vaikka olosuhdekaapin suhteellista kosteutta ei erikseen säädelty. Suhteellinen kosteus oli alhaisempi kuin tavoiteltu noin 90 % RH taso. Koko tarkastelujakson suhteellisen kosteuden keskiarvo oli 63,9 % RH. Viileän olosuhteen suhteellinen kosteus oli korkeampi kuin muiden kuivatusolosuhteiden. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvoista laskettu ilman vesihöyrypitoisuus on 4,3 g/m³.

23 °C vakio-olosuhdehuone

23 °C vakio-olosuhdehuoneen lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaava mittalaite oli sijoitettuna noin 2 m korkeuteen. Tulokset on kerätty yhtä mittalaitetta käyttäen ja tulokset on esitetty kuvassa 5.10.

Olosuhdehuoneen lämpötila pysyi tarkastelujakson aikana 22 ja 24 °C välillä. Pääosan tarkastelujaksosta lämpötila oli $23 \pm 0,5$ °C. Osa lämpötilakuvaajan terävistä piikeistä johtunee työskentelystä mittalaitteen läheisyydessä.

Olosuhdehuoneen suhteellinen kosteus pysyi hyvin lähellä tavoiteltua 50 % RH tasoa, kun olosuhdehuoneessa ei käyty. Mittauskerrat näkyvät suhteellisen kosteuden kuvaajassa selkeinä piikkeinä. Osittain piikin selittyvät työskentelystä mittalaitteen läheisyydessä, sillä olosuhdehuoneen kuivatus ei pystynyt reagoimaan riittävän nopeasti ja tehokkaasti huoneen sisällä työskentelyyn. Mittausjakson aikana samassa olosuhdehuoneessa oli käynnissä muitakin tutkimuksia, jotka näkyvät kuvassa heinä-elokuussa esiintyvänä suhteellisen kosteuden heiluntana.



Kuva 5.10. Vakio-olosuhteen lämpötila ja suhteellinen kosteus mittausjakson aikana. Loggeri tallensi arvot 35 minuutin välein.

Tarkastelujakson loppupuolella olosuhdehuoneeseen lisättiin toinen tuuletin tehostamaan ilmankiertoa huoneen sisällä. Tuulettimen lisäys tasasi mitattuja suhteellisen kosteuden vaihteluita merkittävästi.

Olosuhdehuoneen lämpötilan keskiarvo koko tarkastelujaksolla oli 23,1 °C ja suhteellisen kosteuden keskiarvo 55,3 % RH. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvoista laskettu ilman vesihöyrypitoisuus on 11,5 g/m³.

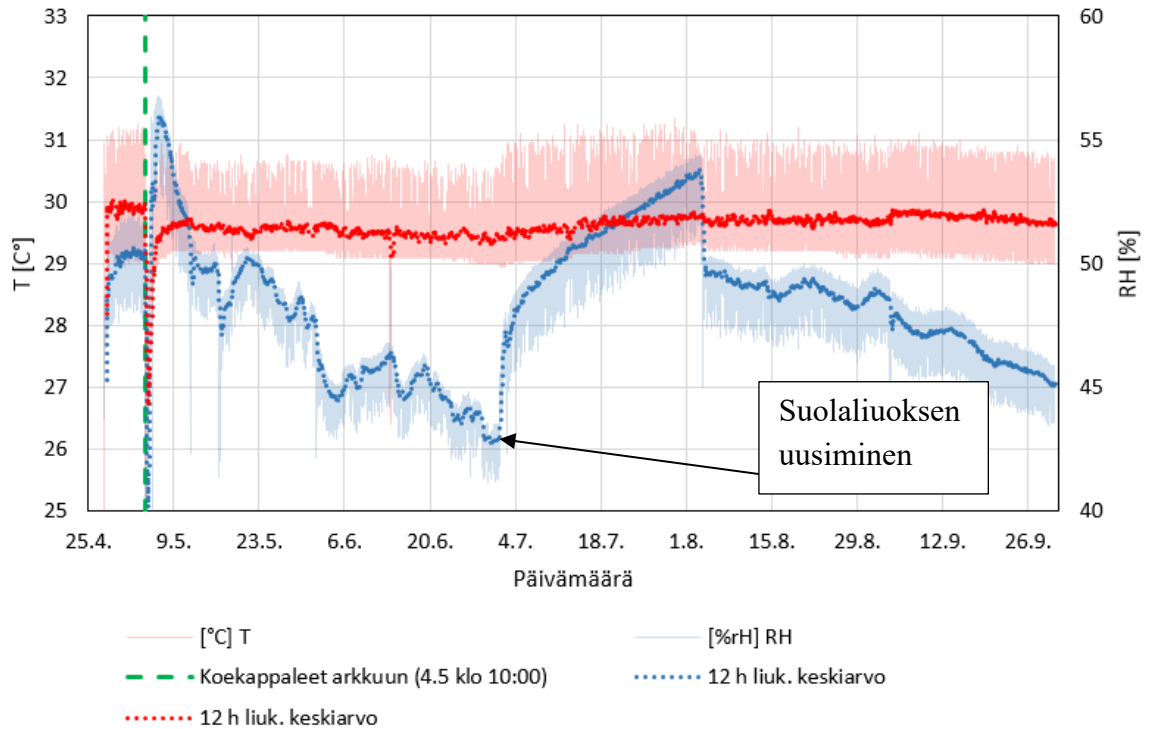
30 °C kuivatusolosuhdearkku

30 °C olosuhdearkun lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaavat mittalaitteet olivat sijoitettuna arkun osaan, jossa myös koekappaleet olivat. Tulokset on kerätty molemmista mittalaitteista ja niiden keskiarvo on esitetty kuvassa 5.11.

Olosuhdearkun lämpötila laski koekappaleiden olosuhdearkkuun siirtämisen jälkeen noin 24 °C:seen koekappaleiden alhaisen lämpötilan (5 °C) takia. Olosuhdearkun lämpötila nousi kuitenkin nopeasti tavoiteltuun 30 °C:en tasoon. Olosuhdearkun lämpötila vaihteli välillä 29 - 31 °C, 12 h liukuva keskiarvo pysyi kuitenkin hyvin tasaisena noin arvossa 29,5 °C. Lämpötilan keskiarvo koko tarkastelujaksolla oli 29,6 °C.

Tarkastelujakson aikana 30 °C olosuhdearkun suhteellista kosteutta säädettiin ylikylläisellä suolaliuoksella. Suhteellinen kosteus vaihteli koejakson aikana välillä 42 - 56 % RH. Heti koekappaleiden arkkuun sijoittamisen jälkeen arkun tuuletusputket avattiin, koska koekappaleista haihtuvan kosteuden oletettiin nostavan arkun suhteellista kosteutta. Tuuletuksen takia arkun suhteellinen kosteus pääsi koejakson puoliväliin mennessä laskemaan alle 45 % RH, jonka jälkeen suolaliuos uusittiin ja tuuletuksista vähennettiin. Pienem-

män tuuletuksen johdosta arkun suhteellinen kosteus kohosi lähes 55 % RH ennen seuraavaa mittauskertaa. Koejakson lopussa suhteellinen kosteus lähti uudelleen laskemaan alle tavoitellun 50 % RH:n tason. Laskua ei kuitenkaan huomattu ennen viimeistä mittauskertaa ja tarkastelujakson loppua. Tarkastelujakson aikana olosuhdearkun suhteellisen kosteuden keskiarvo oli 48,4 % RH. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvoista laskettu ilman vesihöyrypitoisuus on $14,4 \text{ g/m}^3$.



Kuva 5.11. 30 °C olosuhdearkun lämpötila ja suhteellinen kosteus mittausjakson aikana. Kuvassa tummalla 12 tunnin liukuva keskiarvo loggerin tuloksista. Loggeri tallensi arvot 30 minuutin välein.

Olosuhdearkun lämpötila pysyi hyvin tavoitellussa tasossa, mutta suhteellinen kosteus pääsi hieman heittelemään tarkastelujakson aikana. Suhteellisen kosteuden tarkemmaksi säätämiseksi oltaisiin voitu kasvattaa suolaliuoksen määrää, jolloin suolaliuoksen olosuhdetta tasaava vaikutus olisi todennäköisesti parantunut. Tarkempi suhteellisen kosteuden säätäminen olisi vaatinut myös tiheämpää arkun tarkkailua. Olosuhdearkun olosuhteet tarkastettiin vain mittauskertojen yhteydessä. Usein päätökset mahdollisista säätötoimenpiteistä tehtiin noin vuorokauden mittaisen tarkistusmittausjakson perusteella, koska arkun olosuhteita tallentavaa loggeria ei haluttu poistaa arkusta. Arkun olosuhteita tallentavan loggerin lukeminen olisi aiheuttanut lyhyen katkon tallennukseen ja vaatinut arkun luukun ylimääräisen avaamisen.

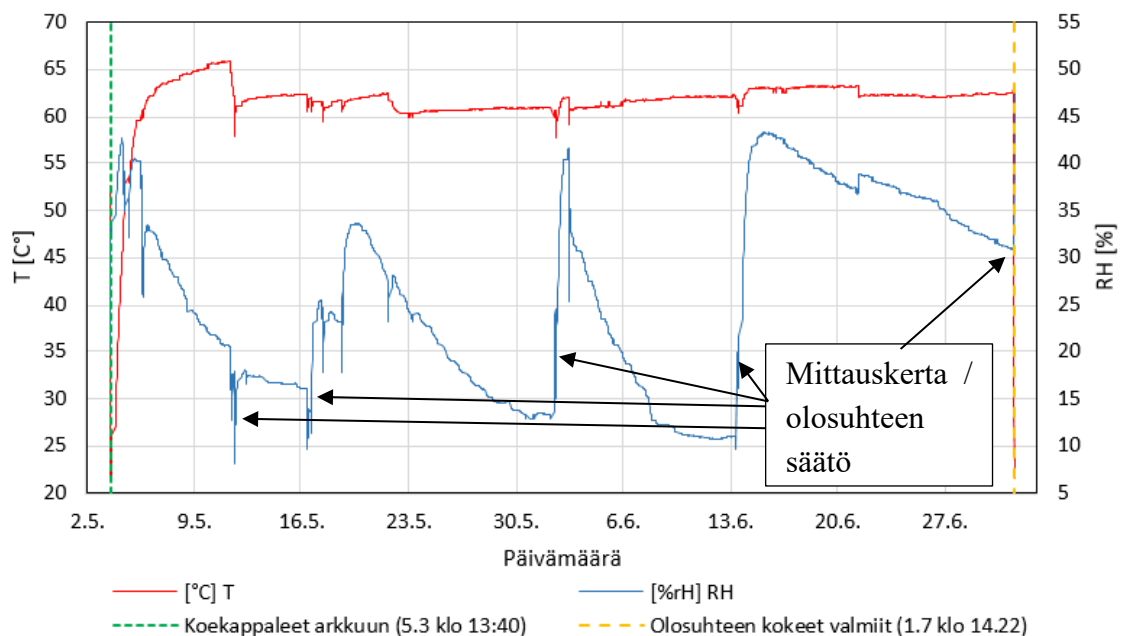
60 °C kuivatusolosuhdearkku

60 °C olosuhdearkun lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaavat mittalaitteet olivat sijoitettuna ilmaan koekappaleiden päälle. Toinen mittalaitteista oli hieman säteilysuojan

yläpuolella, joten sen tuloksia ei otettu huomioon olosuhdearkun olosuhteita tarkastellessa. Kauempana lämmönlähteestä sijainneen mittalaitteen tulokset on esitetty kuvassa 5.12.

Olosuhdearkun lämpötila laski koekappaleiden olosuhdearkkuun siirtämisen jälkeen huomattavasti koekappaleiden alhaisen lämpötilan (5 °C) takia. Olosuhdearkun lämpötila nousi kuitenkin nopeasti hieman ylikin tavoitellun 60 °C tason. Olosuhdearkun lämpötila vaihteli koejakson aikana välillä 57 – 66 °C. Alun jälkeen lämmitintä säädettiin hieman ja loppujakson ajan lämpötila pysyi hieman 60 °C yläpuolella vaihdellen välillä 60 – 63 °C. Lyhyitä poikkeamia lämpötilaan tuli lähinnä arkun avaamisesta mittauskertojen ja suhteellisen kosteuden säätämisen takia. Koko tarkastelujakson aikana olosuhdearkun lämpötilan keskiarvo oli 61,4 °C.

Tarkastelujakson alussa 60 °C olosuhdearkun suhteellista kosteutta ei säädelty mitenkään. Tarkastelujakson aikana arkkuun lisättiin suolaliuos, jolla suhteellinen kosteus pyrittiin tasaamaan noin 20 – 30 % RH. Suola-astia kuitenkin kuivui mittaus/tarkastelukertojen välillä, jonka takia suhteellinen kosteus pääsi laskemaan alle tavoitellun tason. Tarkastelujakson loppupuolella arkun tiiviyyttä parannettiin ja suolaliuoksen määrää kasvatettiin, jonka seurauksena suhteellisen kosteuden muutosnopeus pieneni ja suhteellinen kosteus pysyi noin kuukauden ajan välillä 43 – 31 % RH. Tarkastelujakson aikana olosuhdearkun suhteellisen kosteuden keskiarvo oli 23,1 % RH. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvoista laskettu ilman vesihöyrypitoisuus on 31,9 g/m³.



Kuva 5.12. 60 °C olosuhdearkun lämpötila ja suhteellinen kosteus kyseisen kuivatusolosuhteen koejakson aikana. Loggeri tallensi arvot 35 minuutin välein.

Olosuhdearkun lämpötila pysyi melko hyvin tavoitellussa tasossa, mutta suhteellinen kosteus vaihteli tarkastelujakson aikana. Kosteutta siirtyi arkusta luukkujen saumojen kautta,

joita ei tarkastelujakson alussa oltu tiivistetty 30 °C olosuhdearkun lupaavien esitestien perusteella. Arkun tiiviyttä rajoitti myös kannen läpi vietyjen sähköjohtojen ja termolanka-antureiden kaapeleiden läpivientien heikko tiiviys. Arkun ja ympäröivän tilan suuren lämpötilaeron takia suhteellisen kosteuden säätäminen osoittautui haastavaksi, koska arkun avaaminen vaikutti välittömästi arkun suhteelliseen kosteuteen ja vesihöyrypitoisuuden tasaantuminen arkussa oli verrattain hidasta. Arkun suhteellisen kosteuden arviointia vaikeutti myös avaamisen jälkeinen tavoitellusta poikkeava lämpötila, joka havaittiin erityisesti arkun suhteellista kosteutta hetkellisesti mitattaessa.

60 °C olosuhdearkun suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kuvaajissa on huomattavasti vähemmän lyhyen aikavälin heittelyä kuin viileän olosuhteen ja 30 °C olosuhdearkun kuvaajissa. Ero kuvaajissa johtunee 60 °C olosuhdearkun tehokkaammasta ilmankierrosta. 60 °C olosuhdearkussa oli kaksi tuuletinta, kun taas 30 °C olosuhdearkussa oli vain yksi. Myös tuulettimien sijoittelu ja suuntaus erosivat toisistaan.

Suhteellisen kosteuden tarkemmaksi säätämiseksi oltaisiin voitu kasvattaa suolaliuoksen määrää, jolloin suolaliuoksen olosuhdetta tasaavaa vaikutus olisi mahdollisesti parantunut. Tarkempi suhteellisen kosteuden säätäminen olisi vaatinut myös tiheämpää arkun tarkkailua, sekä arkun parempaa tiivistämistä.

Kuivatusolosuhteiden vesihöyrypitoisuus

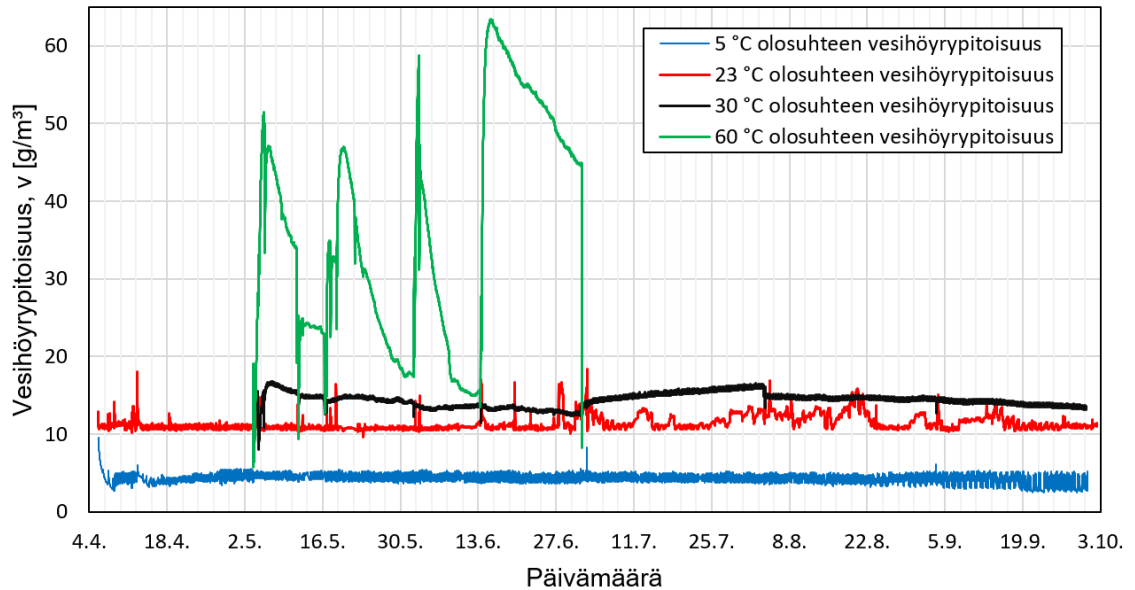
Kuivatusolosuhteiden vesihöyrypitoisuus on laskettu mitattujen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen avulla. Kussakin lämpötilassa vallitseva vesihöyryn kyllästyspitoisuus on laskettu Tetensin kaavalla, kaava 5.1. Kaavan antamasta vesihöyryn kyllästyspitoisuudesta on edelleen laskettu vallitseva vesihöyryn osapaine (kPa), joka on edelleen muunnettu vesihöyrypitoisuudeksi v (g/m^3). Kuivatusolosuhteiden vesihöyrypitoisuudet on esitetty kuvassa 5.12 b.

$$p_{v,sat} = 0,61078 * e^{\left(\frac{17,2 * T}{T + 237,3}\right)} \quad (5.1)$$

jossa

$p_{v,sat}$ = Vesihöyryn kyllästyspitoisuus [kPa]

T = Lämpötila [°C]



Kuva 5.12 b. Kuivatusolosuhteiden vesihöyrypitoisuus tarkastelujakson aikana.

Kuivatusolosuhteiden vesihöyrypitoisuudet eroavat toisistaan. Lämpimämmissä olosuhteissa on pääosin korkeampi vesihöyrypitoisuus. Etenkin 60 °C kuivatusolosuhteen vesihöyrypitoisuus vaihtelee huomattavasti tarkastelujakson aikana.

Siirrettäessä koekappaleet lämpimämpään tilaan koekappaleiden lämpötila nousee, jolloin koekappaleiden huokosissa vesihöyrypitoisuus nousee. Nousut vesihöyrypitoisuus kasvattaa kuivumispotentiaalia. Samanaikaisesti kuitenkin lämpimämmän kuivatusolosuhteen vesihöyrypitoisuus on viileämpää olosuhdetta korkeampi, mikä vähentää kuivumispotentiaalia. Esimerkiksi viileästä 5 °C olosuhteesta 30 °C kuivatusolosuhteeseen siirron yhteydessä ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuus nousee noin 5 g/m³ noin 15 g/m³. Jos koekappaleiden huokosissa oletetaan olevat vesihöyryn kyllästyspitoisuus, nousee huokosten vesihöyrypitoisuus arvosta 6,80 g/m³ arvoon 30,31 g/m³, joten kuivumispotentiaali nousee moninkertaiseksi.

5.3 Kosteusmittaukset

Koekappaleiden kuivumista seurattiin kohdassa 4.2.1 esitetyillä menetelmillä. Mittauspöytäkirja, jossa on esitetty kaikki yksittäiset suhteellisen kosteuden arvot ovat liitteessä F.

5.3.1 Koekappaleiden kosteusmittaustulokset kuivumisolosuhteittain

Kaikissa tässä luvussa esitetyissä kuvissa on sama aika-akseli kuivumisnopeuden vertailtavuuden parantamiseksi. Kuvien y-akselit on kuitenkin skaalattu siten, että kuvat ovat mahdollisimman selkeitä. Kaikissa kuvissa yksittäiset käyrät on nimetty siten, että nimen

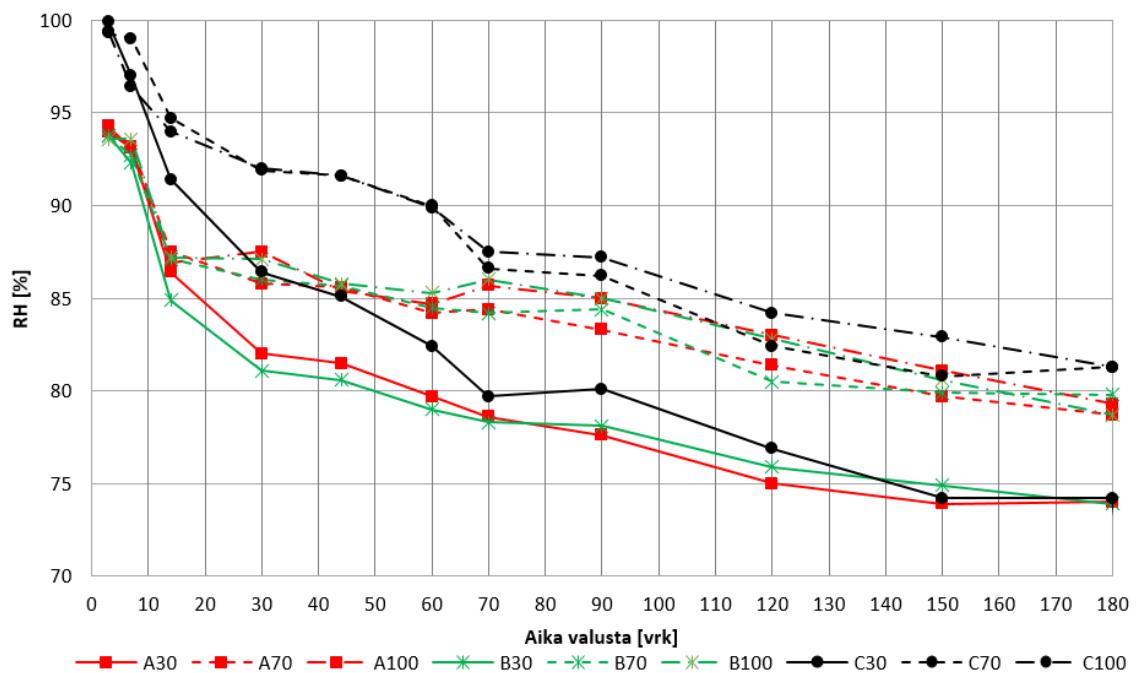
kirjain kuvaa koekappaleessa käytettyä betonilaatua ja numero mittauspisteen syvyyttä millimetreinä.

Yksittäisessä kuvassa on esitetty samassa kuivumisolosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden kuivuminen tarkastelujakson aikana. Jokainen kuvassa esitetty lukema on kolmen rinnakkaisen tuloksen keskiarvo.

23 °C vakio-olosuhteessa säilytetyt koekappaleet

Vakio-olosuhteessa 23 °C koko tarkastelujakson ajan säilytettyjen koekappaleiden betonin huokosilman suhteellisen kosteuden muuttuminen on esitetty kuvassa 5.13.

Betonien A ja B suhteellinen kosteus on heti 3 vuorokauden kohdalla huomattavasti betonia C matalammalla tasolla johtuen hydrataatiokuivumisesta ja selkeästä erosta vesisementtisuhteesta. Kaikkien betonilaatujen pintaosien (30 mm) suhteellinen kosteus laskee mittausjakson aikana noin tasolle 75 % RH, koekappaleiden sisäosien kuivuessa noin 80 % RH tasolle.



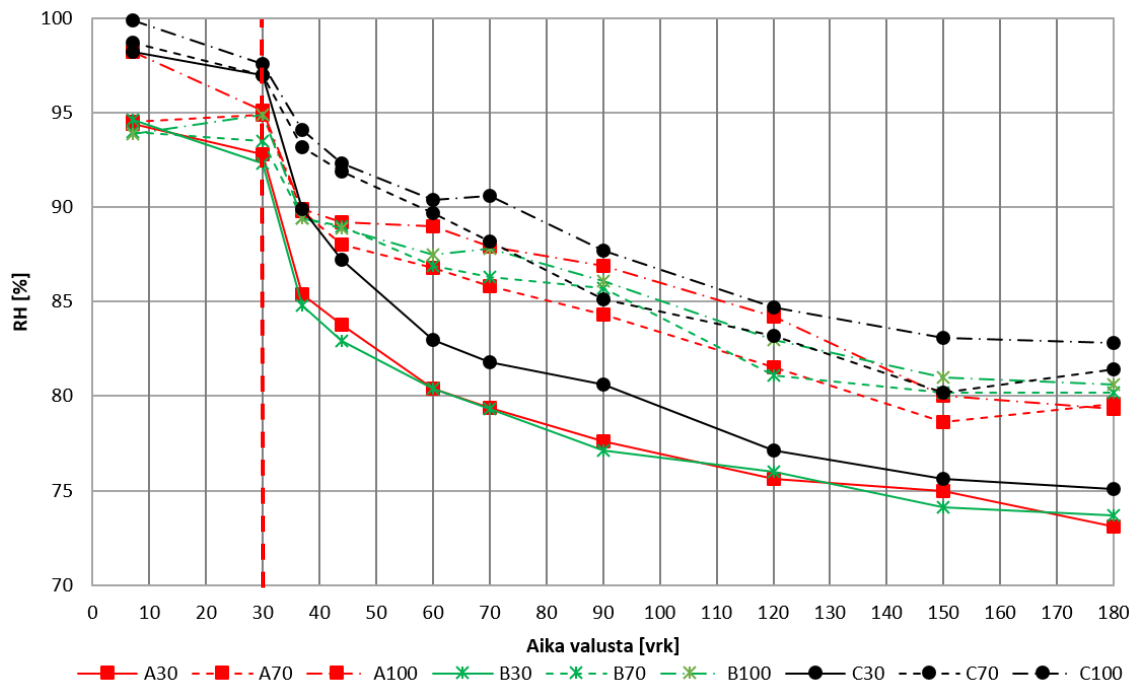
Kuva 5.13. 23 °C vakio-olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden kosteusmittausten tulokset tarkastelluilla syvyyksillä mittausjakson aikana.

Suurin osa kuvan mittapisteistä on mitattu porareikämenetelmällä samoista 7 vrk:n kohdalla poratuista porarei'istä. Seurantajakson kaksi ensimmäistä mittauskertaa mitattiin näytepalamenetelmällä. Porareikämittausten varmistusmittausten tulokset on esitetty erillisessä osiossaan varsinaisten mittaustulosten jälkeen.

Vileästä olosuhteesta 23 °C olosuhdekaappiin siirretyt koekappaleet (5 °C →23 °C)

Viilestä olosuhteesta 23 °C vakio-olosuhteeseen siirrettyjen koekappaleiden betonin suhteellisen kosteuden kehittyminen on esitetty kuvassa 5.14.

Betonien A ja B suhteellinen kosteus on heti 3 vuorokauden kohdalla huomattavasti betonia C matalammalla johtuen hydrataatiokuivumisesta ja selkeästä erosta vesi-sementti-suhteessa. Kaikkien betonilaatujen pintaosien (30 mm) suhteellinen kosteus laskee mitausjakson aikana noin tasolle 75 % RH, koekappaleiden sisäosien kuivussa noin 80 – 85 % RH tasolle.



Kuva 5.14. Viilestä olosuhteesta 23 °C vakio-olosuhteeseen siirrettyjen koekappaleiden kosteusmittausten tulokset tarkastelluilla syvyyksillä mitausjakson aikana. Koekappaleet siirrettiin 23 °C olosuhteeseen 30 vuorokauden kohdalla, joka on esitetty kuvassa punaisella katkoviivalla.

Kaksi ensimmäistä mittauskertaa mitattiin näytepalamenetelmällä, koska koekappaleet olivat viileässä olosuhteessa. Loput mittauskerroista mitattiin 30 vuorokauden kohdalla poratuista ja putkitetuista porareijistä. Porareikämittausten varmistusmittausten tulokset on esitetty erillisessä osiossaan varsinaisten mittaustulosten jälkeen.

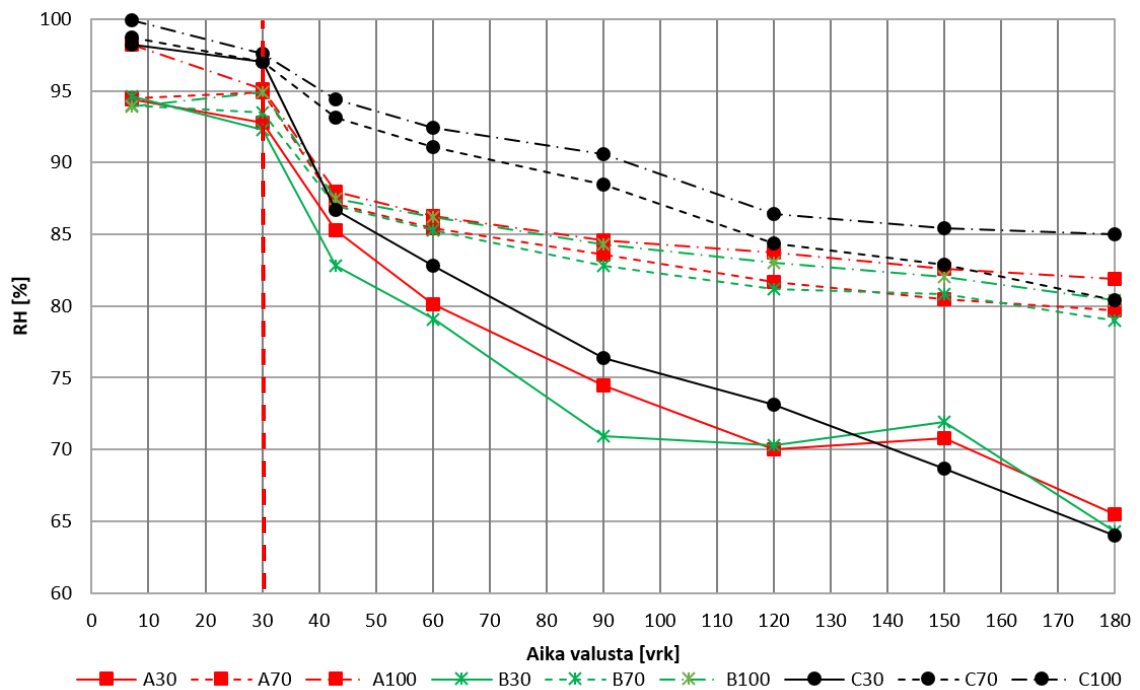
Viilestä 30 °C olosuhteeseen siirretyt koekappaleet (5 °C → 30 °C)

Viilestä olosuhteesta 30 °C olosuhteeseen siirrettyjen koekappaleiden betonin suhteellisen kosteuden kehittyminen on esitetty kuvassa 5.15.

Betonien A ja B suhteellinen kosteus on heti 3 vuorokauden kohdalla huomattavasti betonia C matalammalla tasolla johtuen hydrataatiokuivumisesta ja selkeästä erosta vesi-

sementtisuhteessa. Kaikkien betonilaatujen pintaosien (30 mm) suhteellinen kosteus laskee mittausjakson aikana noin tasolle 65 % RH, koekappaleiden sisäosien kuivuuksa 80 – 85 % RH tasolle.

Betonilaadun B pintaosan (30 mm) kuvaajan nopeampi kuivuminen 60 ja 90 vuorokauden välillä sekä kosteuspitoisuuden näennäinen nousu tämän jälkeen selittynee mittausepä-tarkkuudella.



Kuva 5.15. Viileästä olosuhteesta 30 °C olosuhdearkkuun siirrettyjen koekappaleiden kosteusmittausten tulokset tarkastelluilla syvyyksillä mittausjakson aikana. Koekappaleet siirrettiin 30 °C olosuhteeseen 30 vuorokauden kohdalla, joka on esitetty kuvassa punaisella katkoviivalla.

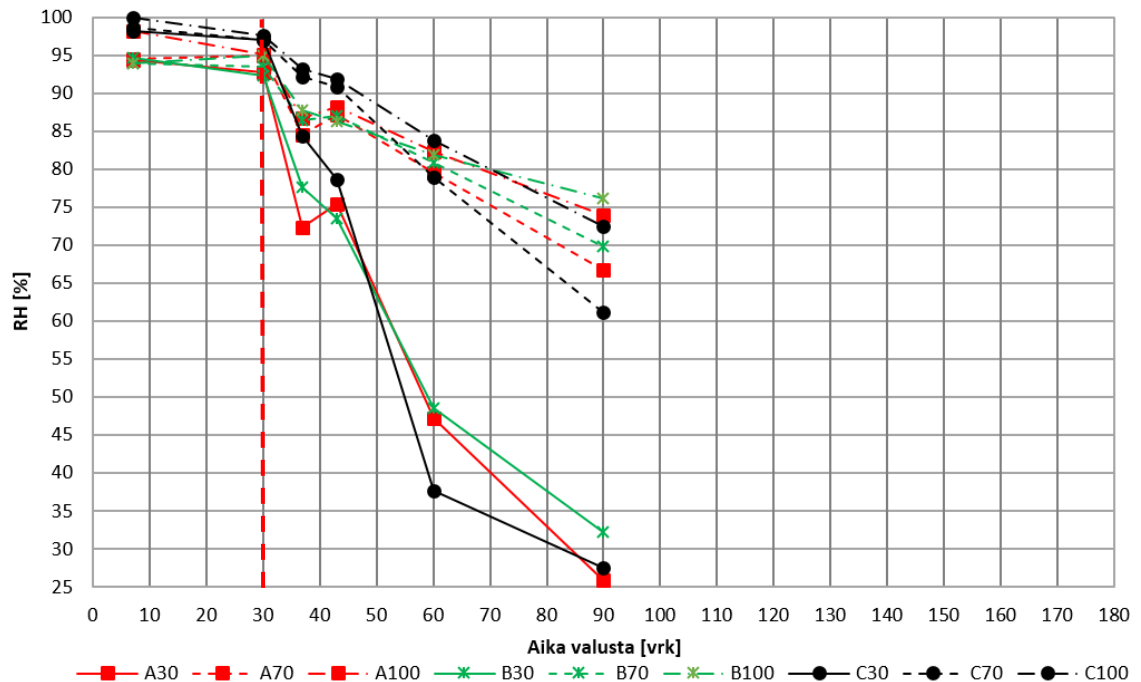
Kaikki tarkastelujakson kosteusmittaukset toteutettiin näytepalamenetelmällä. C betonin kuivuminen näyttäisi nopeutuvan lämpimässä muita betonilaatuja enemmän tarkastelujakson aikana. Tämä selittynee C betonin korkeamman vesi-sementtisuhteen aikaansaamalla muita betonilaatuja huokoisemmalla rakenteella.

Viileästä 60 °C olosuhdearkkuun siirretyt koekappaleet (5 °C → 60 °C)

Viileästä olosuhteesta 60 °C olosuhdearkkuun siirrettyjen koekappaleiden betonin suhteellisen kosteuden kehittyminen on esitetty kuvassa 5.16. Kuivatusolosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden kosteusmittaukset lopetettiin 90 vuorokauden kohdalla, jolloin koekappaleet olivat olleet 60 °C kuivatusolosuhteessa 2 kuukautta mittausohjelman mukaisesti.

Betonien A ja B suhteellinen kosteus on heti 3 vuorokauden kohdalla betonia C matalammalla tasolla johtuen hydrataatiokuivumisesta ja selkeästä erosta vesi-sementtisuhteessa.

Kaikkien betonilaatujen pintaosien (30 mm) suhteellinen kosteus laskee mittausjakson aikana noin tasolle 25 - 32 % RH, koekappaleiden sisäosien kuivuessa tasolle 60 – 72 % RH.

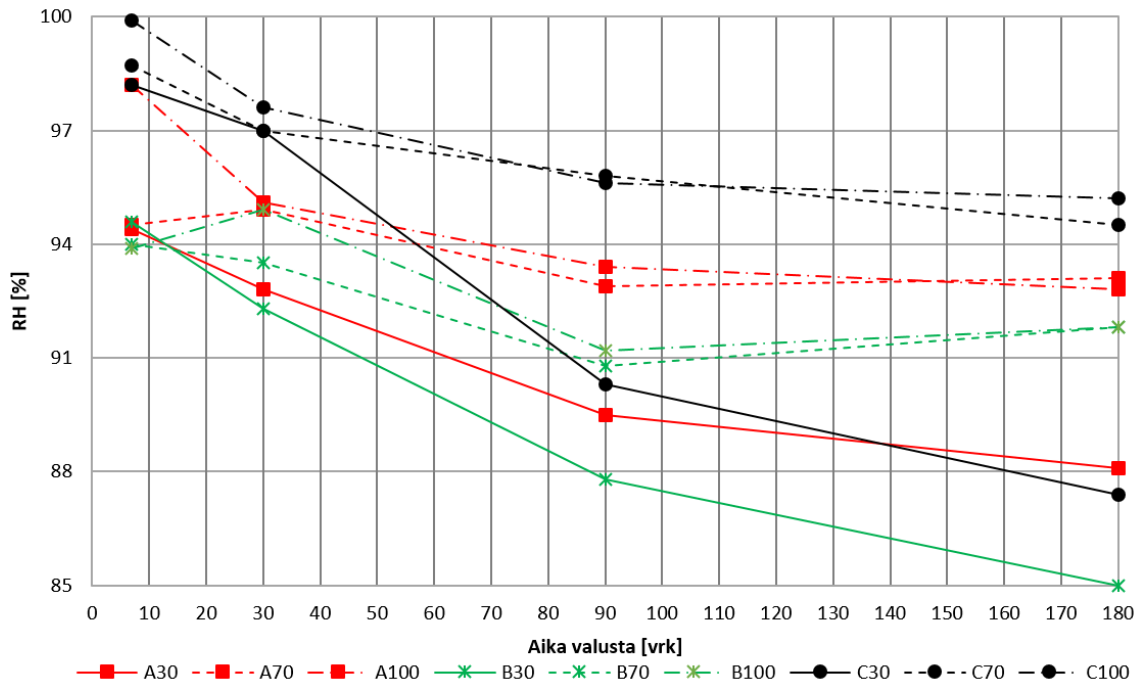


Kuva 5.16. Viilestä olosuhteesta 60 °C olosuhtearkkuun siirrettyjen koekappaleiden kosteusmittausten tulokset tarkastelluilla syvyyksillä mittausjakson aikana. Koekappaleet siirrettiin 60 °C olosuhteeseen 30 vuorokauden kohdalla, joka on esitetty kuvassa punaisella katkoviivalla.

Kaikki tarkastelujakson kosteusmittaukset toteutettiin näytepalamenetelmällä. C betonin kuivuminen näyttäisi tehostuvan tarkastelujakson aikana verrattuna muihin betonilaatuihin. Tätä selittänee C betonin korkeamman vesi-sementtisuhteen aikaansaama muita betonilaatuja huokoisempi rakenne. Etenkin 70 mm syvyydellä C betonista valettu koekappale kuivuu 60 °C kuivatusolosuhteeseen siirtämisen jälkeen huomattavasti muita betonilaatuja nopeammin.

Viileässä olosuhteessa säilytetyt koekappaleet (5 °C)

Koko tarkastelujakson viileässä olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden betonin suhteellisen kosteuden kehittyminen on esitetty kuvassa 5.17. Betonien A ja B suhteellinen kosteus on pääsoin heti 3 vuorokauden kohdalla betonia C matalammalla tasolla johtuen tehokkaammasta hydrataatiokuivumisesta ja selkeästä erosta vesi-sementtisuhteessa. Kaikkien betonilaatujen pintaosien (30 mm) suhteellinen kosteus laskee mittausjakson aikana noin tasolle 85 - 88 % RH, koekappaleiden sisäosien kuivuessa tasolle 92 - 95 % RH.



Kuva 5.17. Koko tarkastelujakson viileässä 5 °C olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden kosteusmittausten tulokset tarkastelluilla syvyyksillä mittausjakson aikana.

Kaikki tarkastelujakson kosteusmittaukset toteutettiin näytepalamenetelmällä. Ensimmäisen mittauskerran tuloksissa on selvä ero A ja B betonilaatujen 100 mm syvyydellä olevassa mittapisteessä, jossa A betonin suhteellinen kosteus on huomattavasti korkeampi kuin B betonin vastaava arvo. A betonin korkeampi suhteellinen kosteus selittyy mittausepä-tarkkuudella tai mittausvirheellä, sillä saman betonilaadun 70 mm tulos on linjassa B betonin kanssa. Mittausvirheen todennäköisyyttä lisää toisen mittauskerran lähes identtiset tulokset B ja A betonien 100 mm mittauspisteestä.

Tulokset 70 ja 100 mm tulosten välillä eroavat toisistaan hyvin vähän kaikilla betoneilla. Koekappaleiden keskiosissa on lähes tasakosteudessa oleva ydin, jossa suhteellinen kosteus alenee hitaasti ilman varsinaista kosteusjakaumaa.

5.3.2 Porareikämittausten tarkistusmittaus

Vakio-olosuhteissa koko tarkastelujakson säilytettyjen koekappaleiden varmistusmittausten tulokset on esitetty taulukossa 5.1 ja viileistä olosuhteista vakio-olosuhteeseen siirrettyjen koekappaleiden varmistusmittausten tulokset taulukossa 5.2. Taulukoiden ”uudet” riveillä on esitetty sekä 2.10.2017, että 31.10.2017 porattujen reikien tulokset ja ”vanhat” riveillä on tarkastelujakson alkupäässä poratuista mittausputkista mitatut tulokset. Vanhoista mittausputkista on mitattu lukemia useasti noin puolen vuoden ajan.

Taulukko 5.1. Varmistusmittausten tulokset koko tarkastelujakson 23 °C olosuhdehuoneessa säilytetyistä koekappaleista.

23 °C / 50 % RH (jälkihoito 7 vrk. muovilla)

Betonilaatu		Betoni A				Betoni B				Betoni C							
	Syvyys	Putki 1	Putki 2	Putki 3	KA	Putki 1	Putki 2	Putki 3	KA	Putki 1	Putki 2	Putki 3	KA				
		RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]			
Vanhat	30 mm	72,3	71,4	69,3	71,0	74,3	74,1	70,2	72,9	73,1	73,2	73,2	73,2				
	70 mm	76,9	81,2	77,2	78,4	77,2	80,2	77,4	78,3	80,4	80,8	81,1	80,8				
Uudet	30 mm	72,3	70,8	71,6	71,6	71,8	71,1	71,4	71,4	68,7	71,1	71,9	71,5				
	70 mm	79,8	78,8	80,3	79,6	79,8	78,2	79,1	79,0	82,1	79,4	80,4	80,6				
		xx,x				Ei mukana keskiarvossa				xx,x				Yksittäinen aiemmin porattu varmistusreikä			

Varmistusmittausten tarkoituksena oli vertailla vanhoista ja uusista porarei'istä porattujen tulosten eroja. Taulukossa päällekkäin olevat harmaat ja valkoiset arvot ovat keskenään vertailukelpoisia. Esimerkiksi A betonilla vanhoista porarei'istä saatiin 30 mm syvyydellä kolmen porareiän keskiarvoksi 71,0 % RH ja vastaavista uusista rei'istä 71,6 % RH.

Vanhoista ja uusista porarei'istä mitattujen tulosten keskiarvot eroavat toisistaan 0,2 - 1,7 % RH-yksikköä. Vanhoista rei'istä on ennen varmistusmittauksia mitattu suhteelliset kosteudet puolen vuoden aikana yhteensä 10 kertaa. Taulukossa punaisella merkityt yksittäiset tulokset eivät ole mukana keskiarvojen laskennassa, sillä ne eroavat selvästi rinnakkaisista tuloksista.

Taulukko 5.2. Varmistusmittausten tulokset viileästä 5 °C olosuhteesta 30 vuorokauden kohdalla 23 °C olosuhdehuoneeseen siirretyistä koekappaleista.

23 °C / 50 % RH (0-1 kk viileässä olosuhteessa 5 °C / ~80 % RH)

Betonilaatu		Betoni A				Betoni B				Betoni C							
	Syvyys	Putki 1	Putki 2	Putki 3	KA	Putki 1	Putki 2	Putki 3	KA	Putki 1	Putki 2	Putki 3	KA				
		RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]			
Vanhat	30 mm	67,4	71,3	71,9	71,6	70,8	72,2	72,3	71,8	72,2	72,1	71,9	72,1				
	70 mm	74,9	77,6	79,2	78,4	76,6	81,0	78,5	78,7	79,0	79,8	76,7	79,4				
Uudet	30 mm	71,7	70,3	74,9	72,3	71,2	71,8	73,0	72,0	72,1	69,5	73,3	71,6				
	70 mm	79,4	81,0	80,4	80,3	79,4	78,8	80,1	79,4	79,7	78,7	81,4	79,9				
		xx,x				Ei mukana keskiarvossa				xx,x				Yksittäinen aiemmin porattu varmistusreikä			

Vanhoista ja uusista porarei'istä mitattujen tulosten keskiarvot eroavat toisistaan 0,2 - 1,9 % RH-yksikköä. Vanhoista rei'istä on ennen varmistusmittauksia mitattu suhteelliset kosteudet 5 kuukauden aikana 9 kertaa. Taulukossa punaisella merkityt yksittäiset tulokset eivät ole mukana keskiarvojen laskennassa, sillä ne eroavat selvästi rinnakkaisista tuloksista.

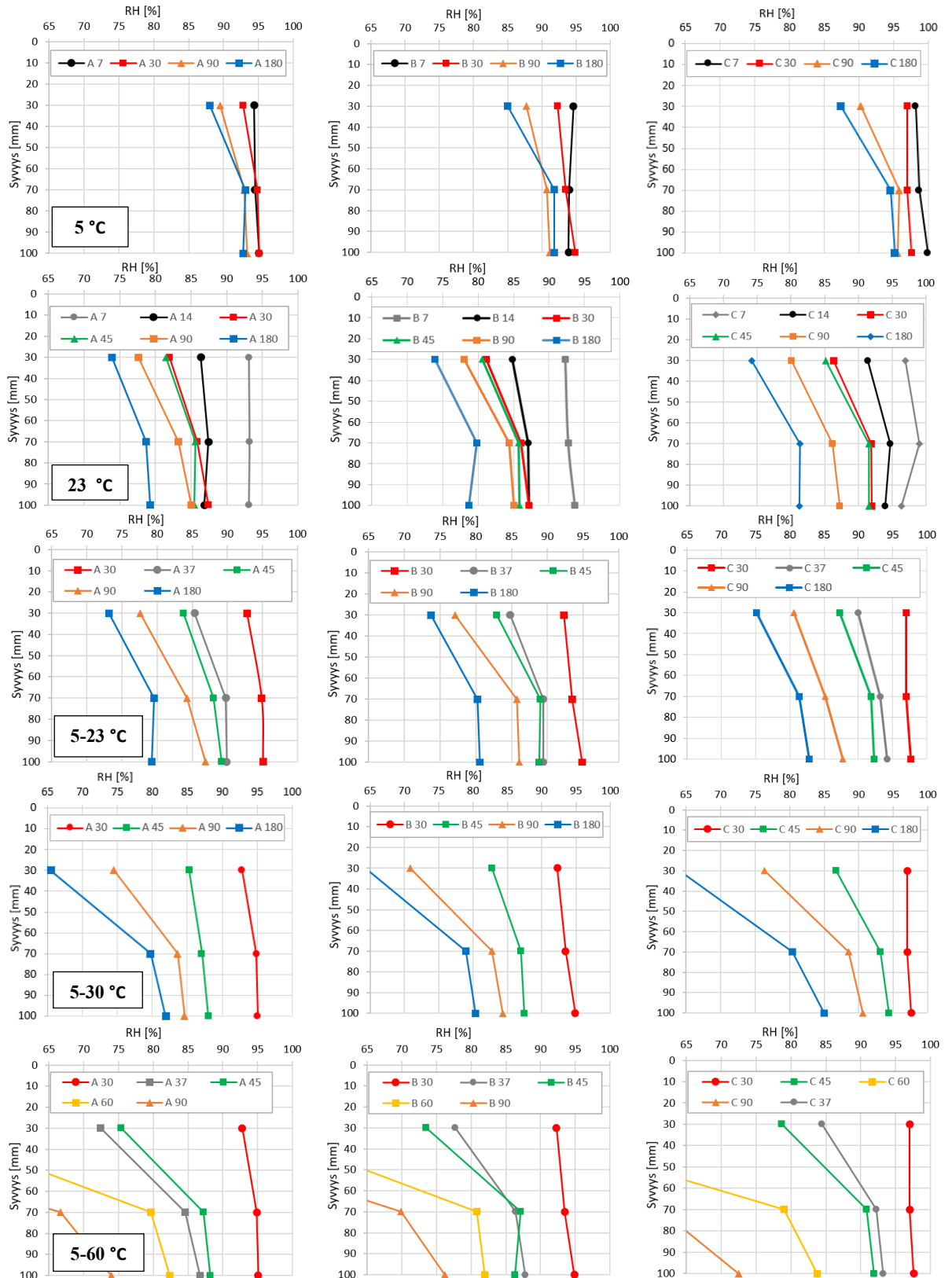
Varmistusmittauksissa mitatut tulokset uusista ja vanhoista porarei'istä mitattaessa vastaavat toisiaan mittaustarkkuuden rajoissa. Varmistusmittausten perusteella voidaan olettaa, että samoista porarei'istä toistuvasti mittaaminen ei ole vaikuttanut mittaustarkkuuden aikana mitattujen tulosten tarkkuuteen ainakaan merkittävästi.

5.3.3 Koekappaleiden kosteusprofiilien kehittyminen

Koekappaleiden kosteusprofiilit on koostettu mitatuista suhteellisen kosteuden arvoista. Taulukkoon 5.3 on koottu kosteusprofiilien kehittyminen kaikista betonilaaduista kuivatusolosuhteittain. Taulukon kosteusprofiilikuvissa pystyakselilla on mittaussyvyys ja vaaka-akselilla mitattu kosteuspitoisuus. Yksittäinen viiva kuvaa kyseisellä mittauskeralla vallitsevaa kosteusprofiilia. Kuivatusjakson edetessä kosteusprofiilia kuvaava viiva siirtyy kohti kuivempaa. Olosuhteesta riippuen koekappaleiden pintaosa kuivuu muuta koekappaletta nopeammin, mikä näkyy kosteusprofiilikuvaajan yläpäähän kääntymisenä.

Kosteusprofiilikuvien akselit ovat kaikissa kuvissa samalla skaalalla, jotta kuvaajia voidaan vertailla keskenään. Vaaka-akselin asteikko on valittu siten, että suurin osa mitatuista suhteellisen kosteuden arvoista saadaan esitettyä, mutta kuvat ovat kuitenkin mahdollisimman selkeitä.

Taulukko 5.3. Koekappaleista mitatut kosteusprofiilit. Kullakin rivillä tietyssä olosuhteissa kuivatut betonilaadut on esitetty rinnakkain. Käyrät on nimetty ja värjätty mittausajankohtien mukaan (7 = 7 vrk, 14 = 14 vrk jne.). Kaikkien kuvien akselit on skaalattu samoiksi, jotta tuloksia voidaan vertailla kuivatusolosuhteiden kesken.



Kosteusprofiileista nähdään koekappaleen pinnan kuivuminen suhteessa sisäosien kuivumiseen. Vierekkäisistä kosteusprofiileista voidaan myös päätellä koekappaleen kuivumisnopeutta, jolloin suuremmat välit yksittäisten kosteusprofiilikuvaajien välillä tarkoittavat nopeampaa kuivumista. Esimerkiksi 60 °C olosuhdearkussa säilytettyjen koekappaleiden kosteusprofiilit ovat hyvin erillään toisistaan, kun taas koko tarkastelujakson viileässä olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden kosteusprofiilit ovat hyvin lähekkäin.

Olosuhteessa 5 °C säilytetyissä koekappaleissa suhteellinen kosteus on melko tasainen koko koekappaleen syvyydellä. Koekappaleiden pintaosan nopeampi kuivuminen alkaa näkyä kosteusprofiileissa vasta 90 ja 180 vuorokauden kosteusprofiileissa.

Kuivatusolosuhteessa 60 °C koekappaleiden pintaosat kuivuvat huomattavasti sisäosia nopeammin. Kosteusprofiilit kaartuvat jo 45 vuorokauden kohdalla yläpäästään selvästi vasemmalle. Kuivuminen on aluksi nopeampaa A ja B betoneilla, mutta 60 ja 90 vuorokauden kohdalla C betoni on jo kuivempaa kuin A ja B betonit. C betonin kosteusprofiili kaartuu myös jyrkimmin, eli C betonin pintaosat kuivuvat kuivemmiksi kuin A ja B betonien.

Vakio-olosuhteessa 23 °C säilytettyjen ja viileistä 5 °C olosuhteista 23 °C vakio-olosuhteeseen siirrettyjen koekappaleiden kosteusprofiilit ovat hyvin samankaltaiset jo 45 vuorokauden kohdalla, jolloin viileästä olosuhteesta siirretyt koekappaleet ovat olleet vasta 15 vuorokautta 23 °C vakio-olosuhteessa.

Viileästä 5 °C olosuhteesta 30 °C kuivatusolosuhteeseen siirrettyjen koekappaleiden kosteusprofiilit ovat muodoltaan ja suhteellisten kosteuksien osalta 60 °C kuivatusolosuhteeseen ja viileästä 23 °C kuivatusolosuhteeseen siirrettyjen koekappaleiden kosteusprofiilien välillä. Kosteusprofiilit ovat kaareutuneet melko voimakkaasti yläpäästään. 30 °C kuivatusolosuhteessa C betoni ei ehdi tarkastelujakson aikana kuivua A ja B betoneita kuivemmaksi, C betonin kuivumisvauhti kuitenkin kiihtyy tarkastelujakson loppupuolella verrattuna A ja B betonien kuivumisnopeuteen.

Kosteusprofiileista nähdään ettei 70 mm ja 100 mm mittaussyvyyksien välillä ole merkittävää eroa suhteellisen kosteuden arvoissa, paitsi 60 °C kuivatusolosuhteen tapauksessa. Muissa kuivatusolosuhteissa kosteusprofiilin osa 100 mm ja 70 mm välillä on melko pystysuora.

5.3.4 Kosteusmittausten tulokset betonilaaduittain

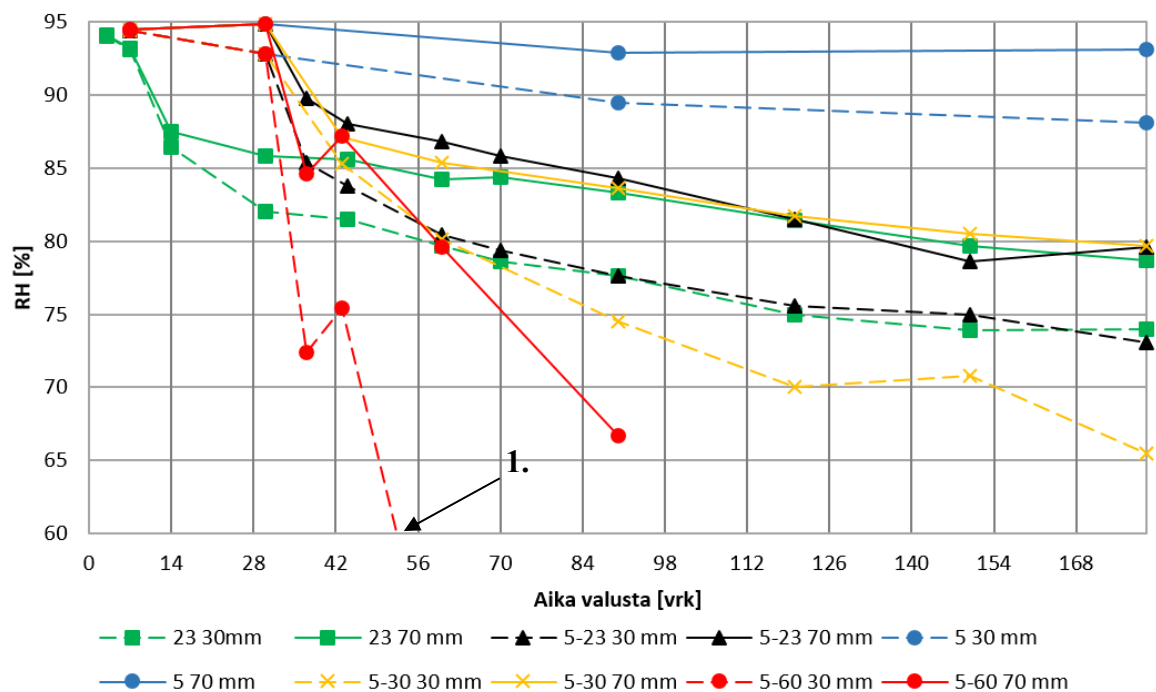
Tässä luvussa esitetyissä kuvissa on sama aika-akseli kuivumisnopeuden vertailtavuuden parantamiseksi. Kuvien y-akselit on kuitenkin skaalattu siten, että kuvat ovat mahdollisimman selkeitä. Kaikissa kuvissa yksittäiset kuvaajat on nimetty siten, että nimen alussa on kyseisen kuivatusolosuhteen lämpötila tai lämpötilat ja lopussa mittauspisteen syvyys.

Yksittäisessä kuvassa on esitetty samassa kaikkien samaa betonilaatua olevien koekappaleiden kuivumistulokset. Tuloksista voidaan vertailla eri kuivatusolosuhteiden vaikutuksia kuivumisaikoihin.

Kuvien selkeyden parantamiseksi 100 mm syvyydeltä tehtyjen kosteusmittausten tuloksia ei esitetä kuvissa. Aiemmin todettiin 70 mm ja 100 mm tulosten olevan hyvin lähellä toisiaan.

Betoni A

Kaikkien betonilla A valettujen koekappaleiden kuivumistulokset 30 mm ja 70 mm syvyydellä on esitetty kuvassa 5.18. Kuvassa 30 mm syvyydeltä mitatut tulokset on esitetty katkoviivalla ja 70 mm tulokset tavallisella viivalla. Eri kuivumisolosuhteet ovat omilla väreillään.



Kuva 5.18. Betonilla A valettujen koekappaleiden kuivumisen vertailu kaikissa kuivatusolosuhteissa 30 mm ja 70 mm mittaussyvyyksillä. Kuvan ulkopuolelle jäävät mittaustulokset: (1.) 60 vrk 47 % RH ja 90 vrk 26 % RH.

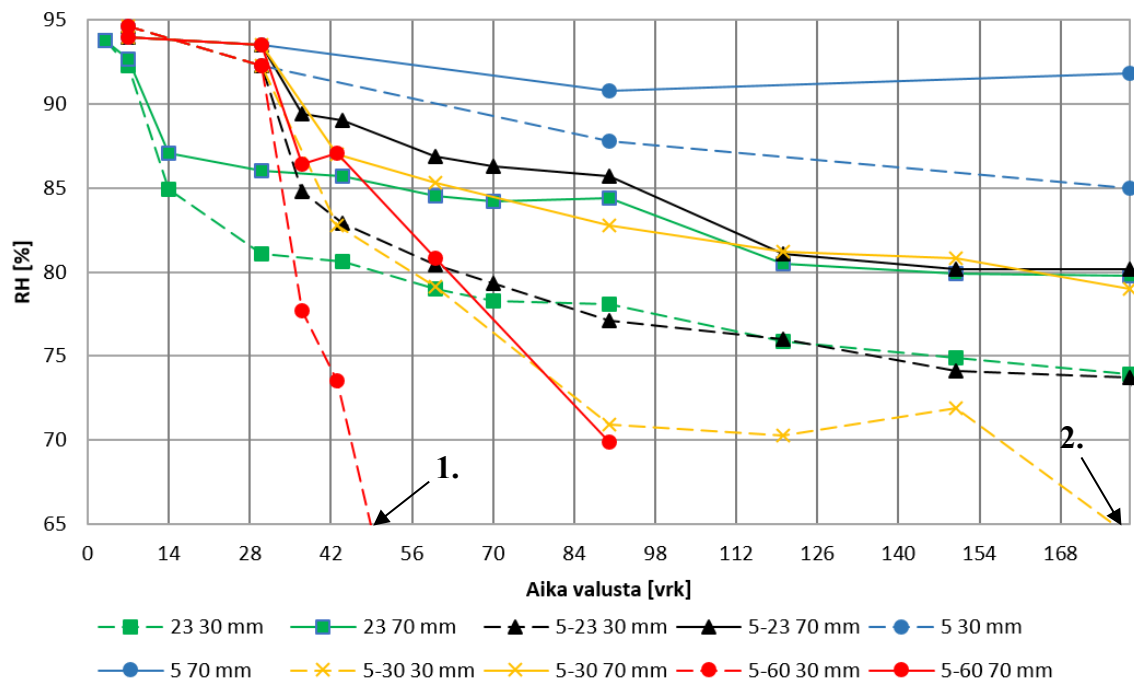
A betonilla valettujen koekappaleiden suhteellinen kosteus laskee hydrataation seurauksena noin tasolle 95 % RH. Viileissä 5 °C olosuhteissa säilytettyjen koekappaleiden suhteellinen kosteus ei juurikaan laske 70 mm syvyydellä 30 vuorokauden aikana. 30 mm syvyydellä suhteellinen kosteus laskee noin tasolle 93 % RH viileässä olosuhteessa.

Viileästä 5 °C olosuhteesta 23 °C vakio-olosuhteeseen siirretyt koekappaleet saavuttavat koko tarkastelujakson 23 °C vakio-olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden suhteellisen kosteuden 30 mm syvyydellä noin 90 vuorokauden kohdalla ja 70 mm syvyydellä 120

vuorokauden kohdalla. Vastaavasti 30 °C kuivatusolosuhteeseen siirretyt koekappaleet saavuttavat vakio-olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden suhteellisen kosteuden 30 mm syvyydellä noin 60 vuorokauden kohdalla ja 70 mm syvyydellä noin 90 vuorokauden kohdalla. 60 °C kuivatusolosuhteeseen siirretyt koekappaleet kuivuvat 30 ja 70 mm syvyydellä vakio-olosuhteessa säilytettyjä koekappaleita kuivemmiksi jo ennen 37 vuorokauden kohdalla tehtyä mittauskertaa.

Betoni B

Kaikkien betonilla B valettujen koekappaleiden kuivumistulokset 30 mm ja 70 mm syvyydellä on esitetty kuvassa 5.19. Kuvassa 30 mm syvyydeltä mitatut tulokset on esitetty katkoviivalla ja 70 mm tulokset tavallisella viivalla. Eri kuivumisolosuhteet ovat omilla väreillään.



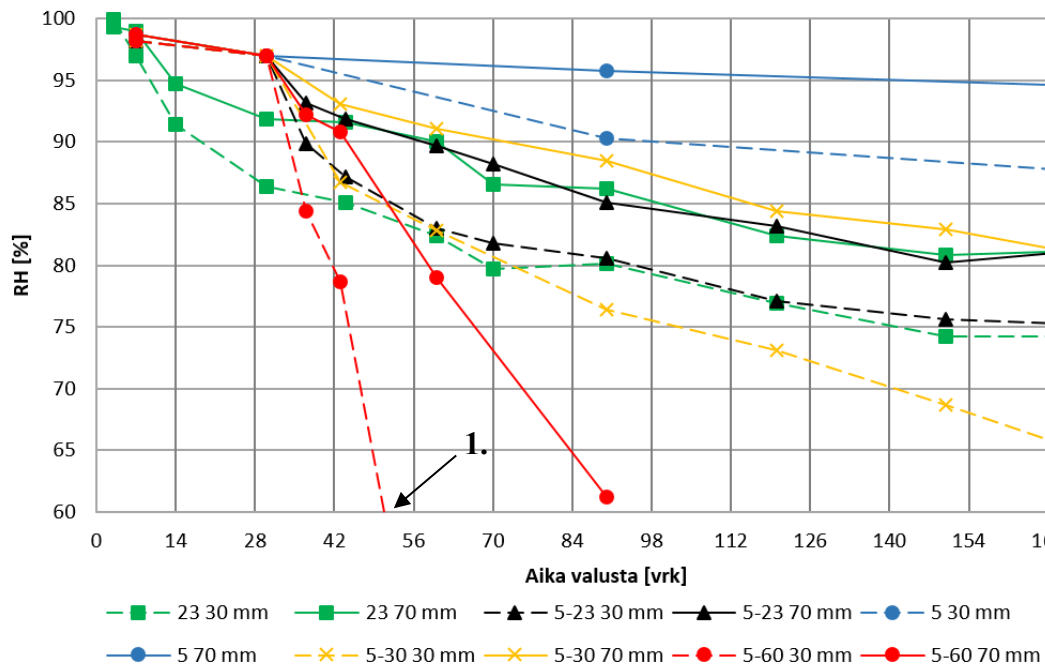
Kuva 5.19. Betonilla B valettujen koekappaleiden kuivumisen vertailu kaikissa kuivatusolosuhteissa 30 mm ja 70 mm mittaussyvyyksillä. Kuvan ulkopuolelle jäävät mittaustulokset: (1.) 60 vrk 49 % RH ja 90 vrk 32 % RH, (2.) 180 vrk 64 % RH.

A betonin tavoin B betonilla valettujen koekappaleiden suhteellinen kosteus laskee hydrataation seurauksena noin tasolle 95 % RH. B betonilla kuivuminen on viileässä olosuhteissa 30 vuorokauden aikana hieman nopeampaa kuin A betonilla, 70 mm syvyydellä suhteellinen kosteus laskee noin 93 % RH ja 30 mm syvyydellä 92 % RH. Hieman A betonia nopeampi kuivuminen hydrataation seurauksena selittynee B betonin sisältämällä pikasementillä ja korkeammalla hydrataation aikaisella lämpötilalla.

Viilestä 5 °C olosuhteesta muihin kuivatusolosuhteisiin siirretyt koekappaleet saavuttavat koko tarkastelujakson 23 °C vakio-olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden suhteellisen kosteuden lähes samassa iässä kuin vastaavissa olosuhteissa A betonillakin.

Betoni C

Kaikkien betonilla C valettujen koekappaleiden kuivumistulokset 30 mm ja 70 mm syvyydellä on esitetty kuvassa 5.20. Kuvassa 30 mm syvyydeltä mitatut tulokset on esitetty katkoviivalla ja 70 mm tulokset tavallisella viivalla. Eri kuivumisolosuhteet ovat omilla väreillään.



Kuva 5.20. Betonilla C valettujen koekappaleiden kuivumisen vertailu kaikissa kuivatusolosuhteissa 30 mm ja 70 mm mittaussyvyyksillä. Kuvan ulkopuolelle jäävät mittaustulokset: (1.) 60 vrk 38 % RH ja 90 vrk 28 % RH.

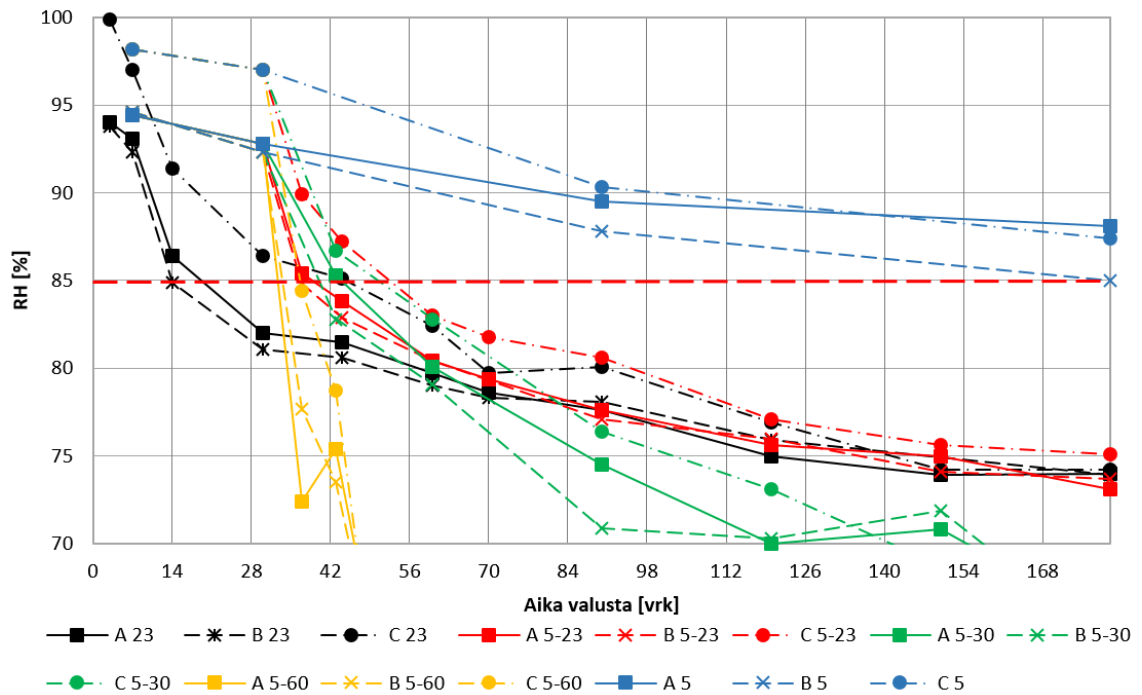
C betonilla valettujen koekappaleiden suhteellinen kosteus laskee hydrataation seurauksena noin tasolle 98 % RH, joka on korkeampi kuin betoneilla A ja B. C betonilla 3 vuorokauden mittaustulokset kaikilla mittaussyvyyksillä olivat tasolla 100 % RH. C betonilla valettujen koekappaleiden suhteellinen kosteus laskee viileässä olosuhteessa 30 vuorokauden aikana noin tasolle 97 % RH, kun vastaavasti A ja B betonit kuivuivat tasolle 93 % RH. Viileässä olosuhteessa C betonin suhteellinen kosteus on 30 vuorokauden jälkeenkin lähes sama mittaussyvyydestä riippumatta. A ja B betonia vähäisempi kuivuminen selittyy C betonin korkeammalla vesi-sementtisuhteella. Korkean vesi-sementtisuhteen takia C betonilla valetuissa koekappaleissa on yhtenäisempi kapillaariverkosto, joka selittää muita betonilaatuja tasaisempaa kuivumisnopeutta koko tarkastelujakson ajalla.

Viilestä 5 °C olosuhteesta 23 °C vakio-olosuhteeseen siirretyt koekappaleet saavuttavat koko tarkastelujakson 23 °C vakio-olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden suhteellisen kosteuden 30 mm syvyydellä noin 60 vuorokauden kohdalla ja 70 mm syvyydellä jo 45 vuorokauden kohdalla. Vastaavasti 30 °C kuivatusolosuhteeseen siirretyt koekappaleet saavuttavat vakio-olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden suhteellisen kosteuden 30 mm syvyydellä noin 60 vuorokauden kohdalla, mutta 70 mm syvyydellä vasta noin 170 vuorokauden kohdalla. 70 mm mittaussyvyydellä 30 °C siirrettyjen koekappaleiden suhteellinen kosteus on kuitenkin hyvin lähellä 23 °C vakio-olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden vastaavia suhteellisen kosteuden arvoja 45 vuorokauden mittauskerrasta lähtien. 60 °C kuivatusolosuhteeseen siirretyt koekappaleet kuivuvat 30 ja 70 mm syvyydellä vakio-olosuhteessa säilytettyjä koekappaleita kuivemmiksi A ja B betonien tapaan jo ennen 37 vuorokauden kohdalla tehtyä mittauskertaa. C betonin 60 °C kuivatusolosuhteeseen siirretyt koekappaleet kuivuvat tarkastelujakson aikana kuivemmiksi kuin A ja B betonin vastaavat koekappaleet.

5.3.5 Suhteellisen kosteuden kehittyminen 30 mm syvyydellä

Kuvassa 5.21 on esitetty kaikkien betonilaatujen ja kuivatusolosuhteiden kuivumistulokset 30 mm syvyydeltä. Kuvasta voidaan vertailla eri kuivatusolosuhteiden ja betonilaatujen vaikutuksia betonien pinnoitettavuuteen. Mittaukset tehtiin 30 mm syvyydeltä kosteusprofiilien takia. Kyseessä olevalle 200 mm paksulle kahteen suuntaan kuivuvalla massiivibetonilaatulle RT 14-10984 (2010) -kortin mukainen arviointisyvyys olisi 40 mm.

Kuvassa eri kuivatusolosuhteet ovat omilla väreillään ja betonilaadut omilla viivatyypeillään. Koekappaleiden kuivumisaikoja on käsitelty tarkemmin kohdassa 6.3.



Kuva 5.21. Koekappaleiden suhteellisen kosteuden muutokset 30 mm syvyydellä.

85 % RH tavoitekosteus alittuu ensimmäisenä 23 °C vakio-olosuhteessa säilytetyillä A ja B betoneista valetuilla koekappaleilla, joilla kuivuminen kestää 2 - 3 viikkoa. Vastaavassa olosuhteessa säilytetty C betonista valettu koekappale kuivuu noin 6:ssa viikossa. Viileässä 5 °C olosuhteessa vain betonista B valetut koekappaleet saavuttavat 85 % tavoitekosteuden puolella vuodessa. A ja C betonista valetut koekappaleet saavuttavat noin 87 % RH suhteellisen kosteuden puolella vuodessa.

Viileästä 5 °C olosuhteesta muihin kuivumisolosuhteisiin siirretyt koekappaleet saavuttavat tavoitekosteuden pääosin sitä nopeammin, mitä korkeampi pitkän ajan kuivatusolosuhteen lämpötila on. Siirretyt koekappaleet saavuttavat tavoitekosteuden 5 - 7,5 viikossa, jolloin koekappaleet ovat olleet lämpimissä kuvatusolosuhteissa 1 - 4,5 viikkoa.

5.4 Puristuslujuudet

Koekappaleiden puristuslujuudet selvitettiin kohdassa 4.2.4 esitetyllä tavalla. Puristuslujuudet testanneen laboratorion selostus on työn liitteenä G.

5.4.1 Puristuslujuuskokeiden tulokset

Taulukossa 5.4 on esitetty koekappaleiden puristuslujuudet noin 200 vuorokauden iässä. Koekappaleet on nimetty siten, että kirjain kuvaa betonilaatua, ensimmäinen numero kuivatusolosuhteen lämpötilaa ja viimeinen numero on rinnakkaisten kappaleiden juokseva numero.

Taulukko 5.4. Koekappaleiden puristuslujuudet. (Liite G)

Tunnus	Voima [kN]	Lieriölujuus [MPa]	Kuutiolujuus [MPa]	Kuutiolujuuksien keskiarvo [MPa]	Ilmoitettu lujuusluokka
A 5-1	108	56,9	62,6	60,9	30/37
A 5-2	104	54,7	60,2		
A 5-3	103	54,5	60,0		
B 5-1	108	57,2	62,9	64,1	30/37
B 5-2	109	57,5	63,3		
B 5-2	114	60,1	66,1		
C 5-1	70	36,6	40,3	40,6	25/30
C 5-2	70	37,1	40,8		
C 5-3	70	37,0	40,7		
A 23-1	110	57,8	63,6	64,2	30/37
A 23-2	104	54,9	60,4		
A 23-3	119	62,4	68,6		
B 23-1	119	62,3	68,5	67,7	30/37
B 23-2	117	61,7	67,9		
B 23-3	115	60,6	66,7		
C 23-1	76	40,1	44,1	43,5	25/30
C 23-2	73	38,3	42,1		
C 23-3	76	40,1	44,1		

Kaikki testatut koekappaleet täyttävät betonitoimittajan ilmoittaman lujuusluokan vaatimuksen. Kaikissa koekappaleissa mitattu lujuus on lähes kaksinkertainen lujuusluokan vaatimukseen verrattuna. Tuloksia tulkitessa tulee kuitenkin muistaa, että koekappaleet olivat yli 180 vuorokauden ikäisiä, kun normaalisti lujuuksia arvioidaan 28 vuorokauden ikäisistä koekappaleista.

Tulosten perusteella myös viileissä 5 °C olosuhteissa säilytettyihin koekappaleisiin on kehittynyt erittäin hyvin lujuutta. Erot 5 °C ja 23 °C vakio-olosuhteissa säilytettyjen koekappaleiden puristuslujuuksissa ovat hyvin pieniä. Osaltaan viileässä säilytettyjen koekappaleiden lujuudenkehitys johtunee koekappaleiden säilyttämisestä lämpimissä olosuhteissa poraamisen jälkeen ennen puristuslujuuskokeita.

Käytettyjen betonien suhteitus ja erityisesti suuri sementtimäärä johtavat korkeisiin lujuuksiin. B betonista valettujen koekappaleiden lujuus on korkein. Korkeaa lujuutta selittää B betonissa käytetty pikasementti.

5.5 Koekappaleiden mikrorakenne

Koekappaleiden mikrorakennetta tutkittiin Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n toimesta valituista koekappaleista. Työtä varten teetettiin yhteensä 21 ohuthiettä, joiden valmistus ja tehdyt ohuthietutkimukset on kuvattu kohdassa 4.2.2. Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n tutkimusraportti on kokonaisuudessaan liitteessä E.

5.5.1 Ohuthietutkimuksen tulokset

Ohuthietutkimuksien tulokset on esitetty taulukossa 5.5. Näytteiden nimen ensimmäinen numero on koekappaleen juokseva numero, josta näyte on porattu. Nimen kirjain kuvaa koekappaleessa käytettyä betonilaatua ja nimen viimeinen luku kuvaa säilytysolosuhteen lämpötilaa.

Taulukko 5.5. Ohuthietutkimusten tulokset. (Liite E)

Näyte	Ikä d	Betonin rakenne	Suoja-huokokset % a)	Tiivistys-huokokset	Sementtikiven tiiveys	Halkeamat
13A30	45	Homogeeninen	7 – 8 b)	Vähän	Melko tiivis	Ei
35B30	45	Hieman epähomogeeninen	6 – 7	Vähän	Melko tiivis	Ei
57C30	45	Hieman epähomogeeninen	10 – 12	Kohtalaisesti	Huokoinen	Ei
20A60	45	Hieman epähomogeeninen	9 – 11	Jonkin verran	Melko tiivis	Ei
42B60	45	Homogeeninen	8 – 9	Vähän	Melko tiivis	Ei
64C60	45	Hieman epähomogeeninen	10 – 12	Kohtalaisesti	Huokoinen	Ei
81A23	45	Melko homogeeninen	7 – 9	Vähän	Melko tiivis	Ei
84B23	45	Homogeeninen	8 – 9	Vähän	Melko tiivis	Ei
87C23	45	Hieman epähomogeeninen	11 – 13	Jonkin verran	Huokoinen	Ei
22A60	90	Hieman epähomogeeninen	9 – 10	Vähän	Hieman huokoinen	Ei
44B60	90	Homogeeninen	8 – 10	Vähän	Hieman huokoinen	Ei
66C60	90	Hieman epähomogeeninen	10 – 12	Jonkin verran	Huokoinen	Ei
81A23	180	Melko homogeeninen	6 – 7	Erittäin vähän	Tiivis	Jonkin verran & tasaisesti + c)
84B23	180	Homogeeninen	7 – 8	Erittäin vähän	Tiivis	Jonkin verran & tasaisesti + d)
87C23	180	Melko homogeeninen	8 – 10	Jonkin verran	Tiivis	Ei
18A30	180	Melko homogeeninen	6 – 7	erittäin vähän	Tiivis	Erittäin vähän
40B30	180	Homogeeninen	7 – 8	Vähän	Tiivis	Erittäin vähän
62C30	180	hieman epähomogeeninen	10 – 11 e)	Vähän	Tiivis	Ei
80A5	180	Homogeeninen	7 – 8	Vähän	Tiivis	Jonkin verran & tasaisesti + f)
83B5	180	Homogeeninen	7 – 8	Vähän	Tiivis	Jonkin verran & tasaisesti + g) h)
86C5	180	Melko homogeeninen	8 – 10	Vähän	Tiivis	Erittäin vähän

Taulukon 5.5 huomautukset:

- a) suojahuokosilmamäärä arvioitu silmämääräisesti
- b) todellinen ilmamäärä määritetty point count -analyysillä, tulos 8,2 %
- c) ulkopinnassa noin 10 mm:n syvyyteen vain muutama särö
- d) ulkopinnassa 10 – 15 mm:n syvyyteen erittäin vähän
- e) todellinen ilmamäärä määritetty point count -analyysillä, tulos 11,0 %
- f) ulkopinnassa 5 – 10 mm:n syvyyteen ei
- g) voimakkain halkeilu tässä näytteessä
- h) ulkopinnassa 5 mm:n syvyyteen ei

5.5.2 Ohuthietutkimusten tulosten tarkastelu

Ohuthietutkimusten tuloksia tarkastellessa tulee ottaa huomioon, että ohuthie on ohut siivu tutkittavasta betonista valettuun koekappaleeseen poratusta poralieriöstä. Ohuthie kuvaa vain ohutta leikettä kolmiulotteisesta betonikappaleesta, ikään kuin 2d tulostus 3d mallista.

Makrorakenne

Ohuthietutkimuksissa betonien makrorakenteessa ei havaittu suuria eroja. Kaikkien betonilaatujen makrorakenne vaihtelee homogeenisesta hieman epähomogeeniseen.

Ilmamäärät ja suojahuokokset

Ohuthietutkimusten perusteella kaikkien näytteiden betoni on melko runsaasti tai runsaasti suojahuokostettuja. A ja B massojen näytteissä suojahuokosilmaa oli noin 8 % ja C massojen näytteissä suojahuokosilmaa oli noin 10 %. Suojahuokosilmamäärät ovat hie-man suunniteltua 7 % suojahuokosilmamäärää korkeampia, C massojen suojahuokosilmamäärät ovat selvästi suunniteltua korkeampia. Tiivistyshuokosten määrissä on pieniä eroja. Erot tiivistyshuokosten määrässä eivät kuitenkaan ole merkittäviä. Koekappaleiden runsaat ilmamäärät selittävät myös osaltaan nopeita kuivumisaikoja.

Suuresta ilmamäärästä huolimatta betonien lujuudet olivat korkeita. Pienet erot tiivistyshuokosten määrässä viittaavat betonoinnin hyvään onnistumiseen ja antavat vahvistuksen sille, että eri muotteihin valetut koekappaleet ovat vertailukelpoisia keskenään.

Sementtikiven tiiviys (kapillaarisuus)

Ohuthietutkimusten perusteella sementtikiven tiiviydessä on selkeitä eroja, sementtikiven tiiviys on verrattavissa sementtikiven kapillaarisuuteen. 45 vuorokauden kohdalla poratuista näytteistä A ja B betonin näytteissä sekä 30 °C olosuhdearkussa ja 60 °C olosuhdearkussa säilytetyissä koekappaleiden näytteissä sementtikivi on melko tiivistä. Vastavissa C betonin näytteissä sementtikivi on huokoista. Huokoisempi (kapillaarisempi) C betoni selittää osaltaan kyseisen betonilaadun koekappaleiden nopeampaa kuivumista kuivatusjakson loppupuolella. Erot huokoisuudessa johtuvat pääosin betonien vesi-sementtisuhteesta, sillä A ja B betonien vesi-sementtisuhte on huomattavasti C betonin vesi-sementtisuhdetta matalampi.

Yllättävänä tuloksena voidaan pitää 90 vuorokauden kohdalla porattujen A ja B betonin näytteiden huokoisuutta, joka on hieman suurempi kuin vastaavista betoneista aiemmin 45 vuorokauden kohdalla porattujen näytteiden huokoisuus. Myös C betonin huokoisuus (kapillaarisuus) on 90 vuorokauden kohdalla poratussa näytteessä suuri. 90 vuorokauden kohdalla porattiin näytteet vain 60 °C olosuhdearkussa säilytetyistä koekappaleista. Ilmeisesti kuumen olosuhteen aikaansaama nopea kuivuminen on lisännyt A ja B betonilla valettujen koekappaleiden huokoisuutta. Huokoisuuden lisääntyminen on saattanut tehostaa edelleen koekappaleiden kuivumista. Normaalisti pidemmälle hydratoituneissa koekappaleissa huokoisuus on pienempi. 45 vuorokauden ja 90 vuorokauden kohdalla porattujen näytteiden huokoisuuden eroon saattaa vaikuttaa myös 45 vuorokauden kohdalla porattujen näytteiden pidempi valmistelu-aika. Näytteiden valmistelun aikana koekappaleita säilytettiin suojaamattomina laboratorion varastossa, jossa hydrataatio on päässyt jatkumaan, kunnes koekappaleet valmisteltiin ja epoksoitiin.

Kaikkien 180 vuorokauden kohdalla porattujen näytteiden sementtikivi on tiivistä, joten koekappaleiden kapillaarisuus on vähäistä. Hydrataatio on kaikissa betonilaaduissa ja kuivatusolosuhteissa edennyt puolessa vuodessa niin pitkälle, että sementtikiven tiivistyminen näkyy ohuthietutkimuksen tuloksissa selkeästi. Oletettavasti osittain sementtikiven tiivistymisen takia koekappaleiden kuivuminen hidastuu merkittävästi tarkastelujakson loppua kohden, vaikka koekappaleiden suhteellinen kosteus on vielä huomattavasti korkeampi kuin ympäröivän ilman suhteellinen kosteus.

Halkeilu

Näytteiden välillä havaittiin halkeilussa selkeitä eroja. 45 ja 90 vuorokauden kohdalla porattujen koekappaleiden näytteissä ei havaittu massasta tai säilytysolosuhteesta aiheutuvaa halkeilua yhdessäkään näytteessä. Tulosta voidaan jossakin määrin pitää yllättävänä, sillä kutistumasäröilyä havaitaan yleensä ainakin pienessä määrin. Koekappaleiden erittäin vähäistä halkeilua selittää kappaleiden pieni koko sekä jälkihoito.

180 vuorokauden kohdalla poratuissa näytteissä havaittiin halkeilua vaihtelevasti. 23 °C vakio-olosuhteessa säilytetyistä koekappaleista A ja B massojen näytteissä havaittiin jonkin verran tasaista, lyhyttä ja epäjatkuvaa kutistumahalkeilua. Vastaavasti C näytteissä halkeilua ei todettu. 30 °C olosuhdearkussa säilytetyissä koekappaleissa havaittiin 23 °C vakio-olosuhteissa säilytettyjä koekappaleita vähemmän tasaista, lyhyttä, epäjatkuvaa halkeilua A ja B massojen näytteissä. C massan näytteissä ei todettu halkeilua. Koko mittausjakson viileässä 5 °C olosuhteessa säilytetyissä koekappaleissa todettiin A ja B massojen näytteissä vastaavaa halkeilua, kuin 23 °C vakio-olosuhteessa säilytetyissä koekappaleissa. Tosin viileässä olosuhteessa säilytetyssä B massan näytteessä havaittiin koko näytesarjan voimakkainta halkeilua. Viileässä olosuhteessa säilytetyssä C-massan näytteessä havaittiin erittäin vähän halkeilua.

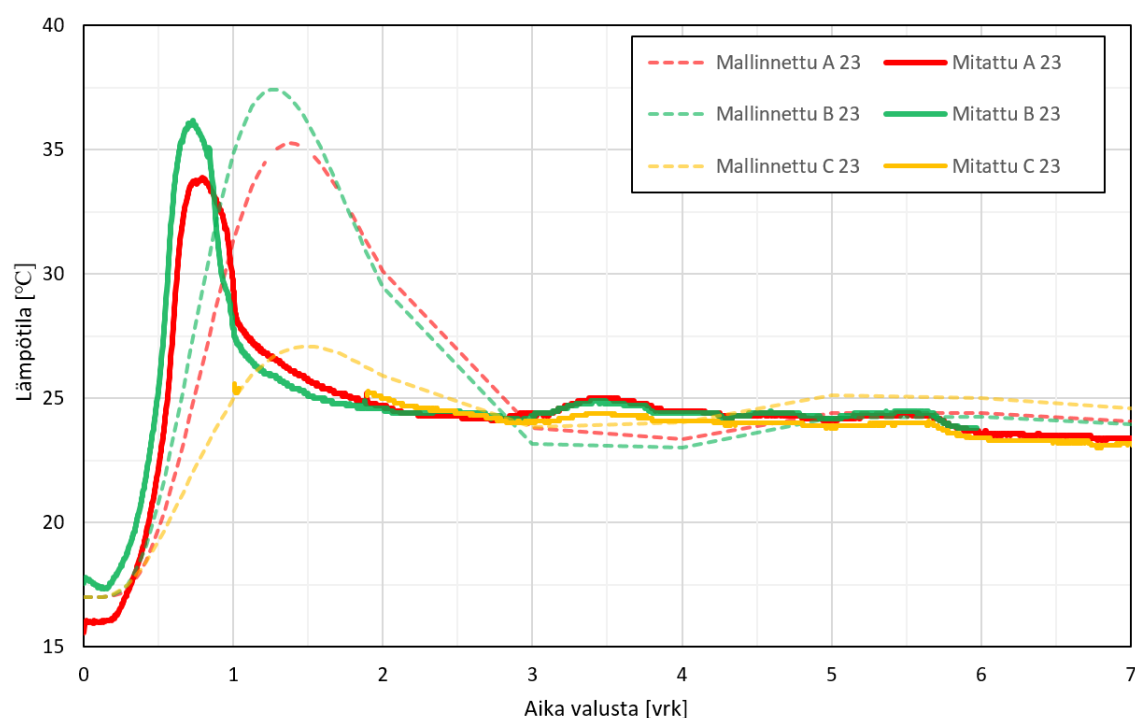
6. MITATTUJEN JA MALLINNETTUJEN TULOSTEN VERTAILU

COMSOL- mallinnuksessa käytettyä laskentamallia on kuvattu luvussa 4.3. Laskenta- muistio Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n tekemistä mallinnuksista on esitetty liitteessä H. Mallinnuksen reunaehtoina käytetyt kuivatusolosuhteiden lämpötilat ja ilman suhteelliset kosteudet on valittu tehtyjen laboratoriokeiden kuivatusolosuhteiden mukaan yksinkertaistettuina. Mallinnettujen ja mitattujen olosuhteiden keskiarvot vastaavat toisiaan, mutta mallinnuksessa ei otettu huomioon lyhyen aikavälin muutoksia olosuhteissa.

6.1 Koekappaleiden mallinnettu lämpötila

Hydrataatio

Koekappaleiden mallinnetut ja mitatut lämpötilat hydrataation aikana on esitetty ensimmäisten 7 vuorokauden ajalta kuvassa 6.1. Kuvassa on lisäksi esitetty koekappaleista mitatut lämpötilat 23 °C vakio-olosuhteessa säilytetyistä A ja B betonilaadun koekappaleista mitattujen ja mallinnettujen lämpötilojen vertailun mahdollistamiseksi.



Kuva 6.1. Mallinnettujen ja mitattujen lämpötilojen vertailu. (Liite H)

Lämpötilojen maksimi-arvot on saatu mallinnettua melko tarkasti toteutuneita maksimilämpötiloja vastaaviksi. Mallinnettu hydrataatioreaktio tuottaa lämpöä kuitenkin pidem-

pään, kuin mitä koekappaleista mitattiin. Koekappaleista mitatut hydrataation aiheuttamat lämpötilapiikit esiintyvät mallinnettuja lämpötilapiikkejä aikaisemmin. Koekappaleiden lämpötilan seuranta aloitettiin vasta valun jälkeen, jolloin massan sekoituksesta oli kulunut jo muutamia tunteja. Mikäli lämpötilojen mittaaminen oltaisiin voitu aloittaa jo massojen sekoitushetkellä, olisivat lämpötilapiikit hieman lähempänä toisiaan. Kuvajissa piikkien välillä on kuitenkin noin 12 tunnin ero.

Koekappaleista mitatut lämpötilat laskevat A ja B betoneilla noin 42 – 48 tuntia valun jälkeen lähelle säilytysolosuhteen lämpötilaa. Mallinnettujen koekappaleiden lämpötila tasaantuu 23 °C lämpötilaan vasta noin 3 vuorokauden (72 tunnin) kohdalla. Mallinnettu hydrataatio jatkuu koekappaleiden lämpötilojen perusteella pidempään kuin todellisudessa. Mitatut lämpötilat nousevat mallinnettuja lämpötiloja nopeammin.

5 °C vakio-olosuhteeseen siirrettyjen koekappaleiden mitattuja tuloksia ei ole tässä kuvassa esitetty, sillä koeolosuhteissa ilman lämpötila laskee hitaammin kuin mallinnetun olosuhteen lämpötila, joka vaikeuttaa koekappaleiden lämpötilojen muutosnopeuden vertailua.

Laskentamallin hydrataatioon vaikuttavia muuttujia voitaisiin edelleen säätää lämpötilojen paremman vastaavuuden saamiseksi. Mikäli hydrataation tuottama lämpö on verrannollinen hydrataation sitomaan vesimäärään, voidaan olettaa, että mallinnettujen koekappaleiden suhteellinen kosteus laskee todellista alhaisemmaksi hydrataation takia.

6.2 Koekappaleiden mallinnettu kuivuminen

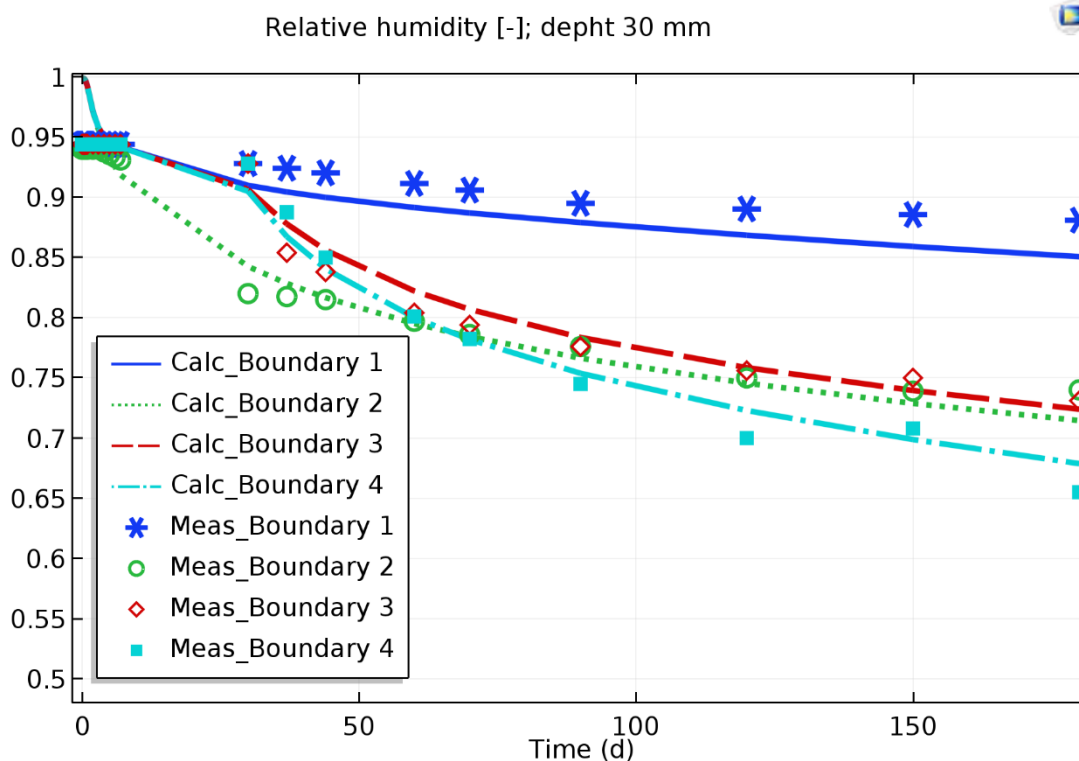
Mallinnetut kuivumistulokset on esitetty suhteellisen kosteuden muutoksina samoilla syvyyksillä, joista laboratoriokokeiden kosteusmittaukset tehtiin. Kuvissa on esitetty kuivumistulokset betonilaaduittain. Jokainen mittaus-/tarkastelusyvyys on esitetty omana kuvanaan. Poikkeuksena ovat 60 °C kuivatusolosuhteen tulokset, jotka on esitetty omassa kuvassaan. 60 °C kuivatusolosuhteen tarkastelu lopetettiin 90 vuorokauden kohdalla, kuten kyseisen kuivatusolosuhteen kosteusmittauksetkin. Kuvissa viivalla on esitetty mallinnettu suhteellisen kosteuden arvot ja pisteillä on esitetty vastaavat mitatut suhteellisen kosteuden arvot.

Kuvissa esitetyt mitatut suhteellisen kosteuden arvot on esitetty samoilla aika-askeleilla kuin laskennan tulokset. Tästä syystä mitattujen arvojen mittauspisteitä on enemmän kuin koekappaleiden todellisia mitattuja kosteusmittaustuloksia. Mitattujen tulosten väliset pisteet ovat COMSOL:in interpoloimia arvoja todellisten mittaustulosten väliltä.

6.2.1 Kuivumistulokset A betonin kappaleilla

A betonin mallinnetut kuivumistulokset on esitetty seuraavissa kuvissa. Tulokset on esitetty lukuun ottamatta 60 °C kuivatusolosuhteen tuloksia. Kuvassa 6.2 on esitetty tulokset

30 mm syvyydeltä ja kuvissa 6.3 ja 6.4 vastaavasti 70 mm ja 100 mm syvyyksiltä. 60 °C kuivatusolosuhteen tulokset on esitetty kuvassa 6.5, jossa on esitetty tulokset kaikilla tutkituilla syvyyksillä.

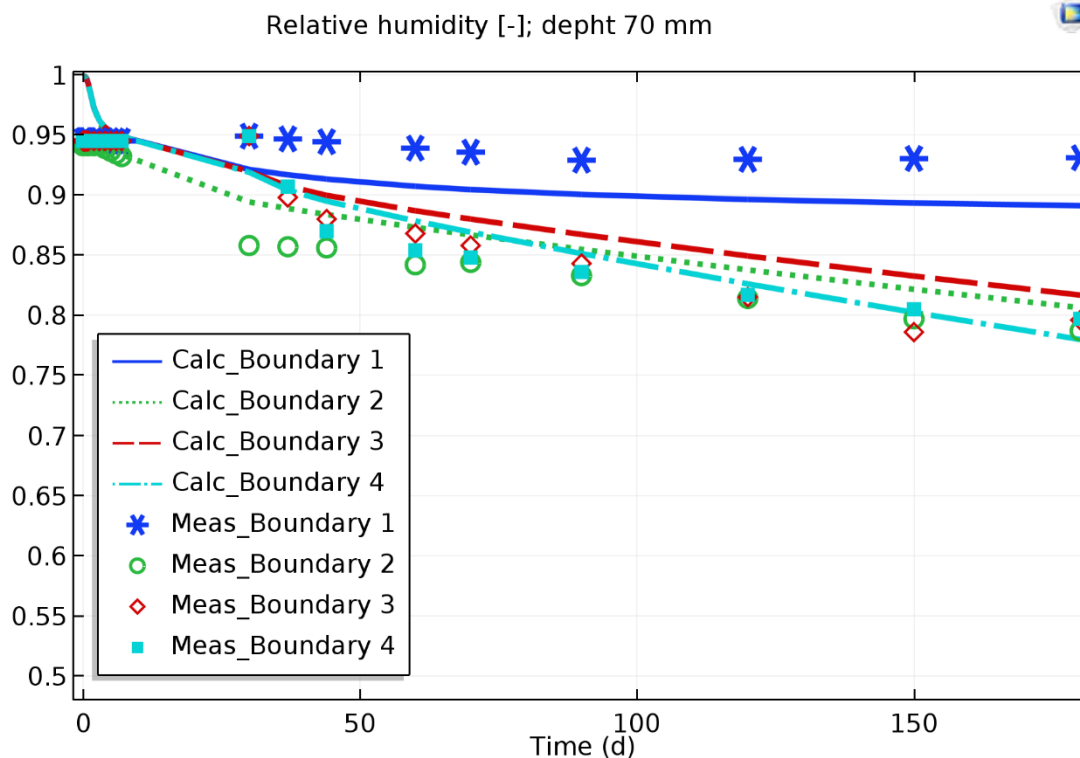


Kuva 6.2. Mallinnettu kuivuminen 30 mm syvyydellä A betonilla. Käyrät on nimetty liitteen H mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C , Boundary 2 = 23 °C , Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C). (Liite H)

Laskennalliset ja mitatut suhteellisen kosteuden tulokset vastaavat toisiaan kohtuullisen hyvin 30 mm syvyydellä. Vakio-olosuhteessa 5 °C kuivatetun betonin mallinnetut tulokset ovat systemaattisesti mitattuja arvoja matalampia, ero selittyy ainakin osittain mallinnuksen pidempään kestäväällä hydrataatiolla.

Vakio-olosuhteessa 23 °C säilytetyn betonin suhteellinen kosteus laskee mittausten perusteella alussa nopeammin verrattuna mallinnettuihin tuloksiin. Ero johtunee siitä, että koekappale pääsi jo jälkihoitojakson aikana kuivumaan hieman. Mallinnuksessa koekappaleen pinnoilla oli jälkihoidon ajan 100 % RH suhteellinen kosteus, joka ei välttämättä täysin vastaa laboratoriokokeissa jälkihoidon aikana vallinneita olosuhteita.

Kuivatusjakson loppua kohden mitattujen ja mallinnettujen tulosten ero pienenee kaikissa muissa olosuhteissa paitsi 5 °C vakio-olosuhteessa. Muiden kuivatusolosuhteiden väliset erot ovat selvemmät ja systemaattisemmat mallinnetuissa tuloksissa. Mitattuja tuloksia tarkastellessa on otettava huomioon mittalaitteiden epätarkkuus. Jo pelkän suhteellista kosteutta mittaavan mittapään tarkkuus on luokkaa ± 1 - 2 % RH.

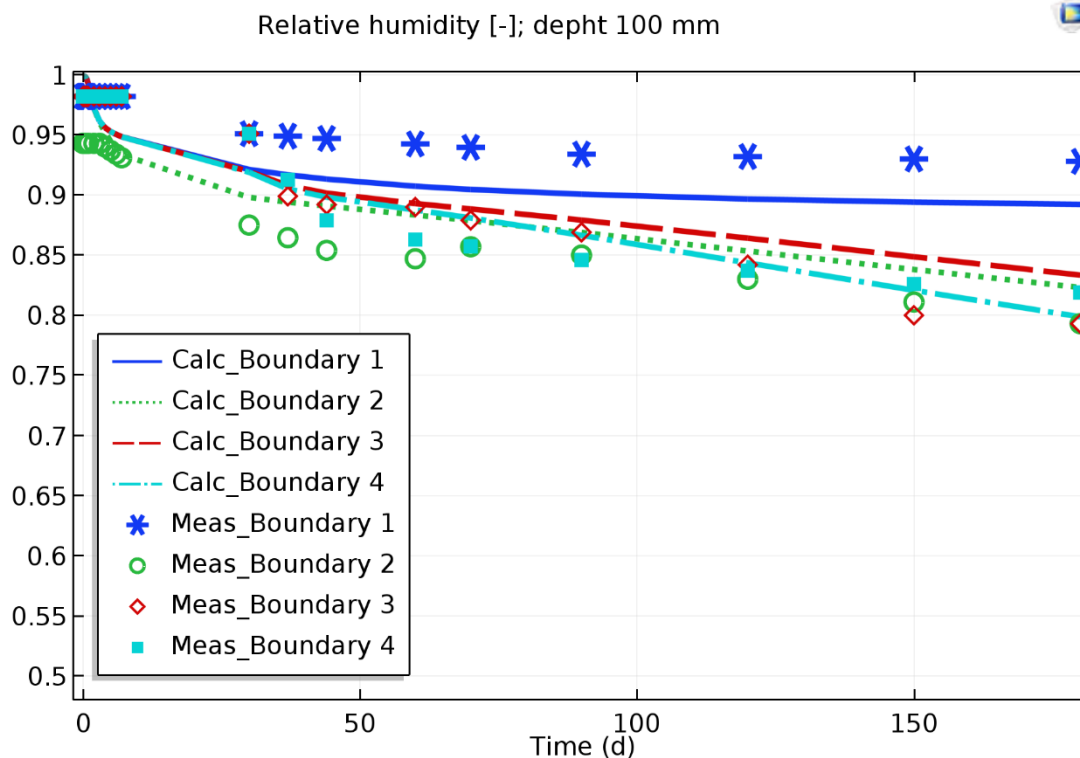


Kuva 6.3. Mallinnettu kuivuminen 70 mm syvyydellä A betonilla. Käyrät on nimetty liitteen H mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C , Boundary 2 = 23 °C , Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C). (Liite H)

70 mm syvyydellä mitattujen ja mallinnettujen tulosten ero kasvaa 30 mm tulosten eroa suuremmaksi etenkin aluksi viileässä 5 °C olosuhteessa säilytetyillä koekappaleilla. Ero selittää mallinnuksen pidempi hydrataatio, joka voidaan havaita kuvassa 6.1 esitetyistä lämpötiläkäyrien muodoista.

Viileästä 5 °C olosuhteesta muihin kuivatusolosuhteisiin siirrettyjen betonien suhteellinen kosteus laskee laskennallisesti vähemmän siirtämisen jälkeen kuin todellisista koekappaleista mitatut suhteellisen kosteuden tulokset.

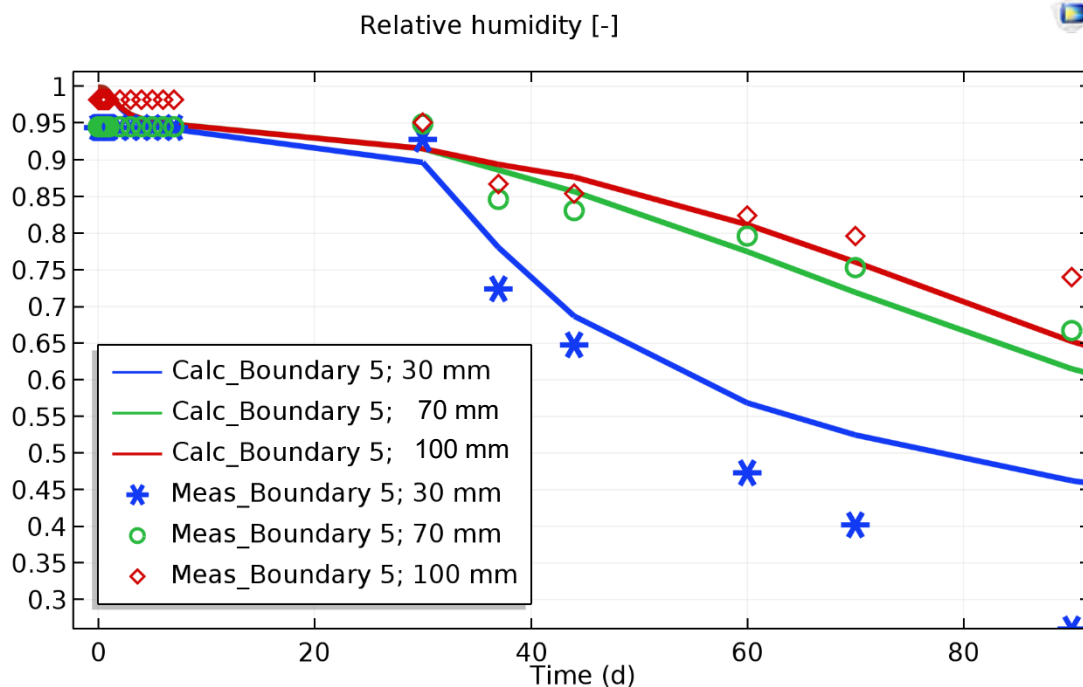
Tarkastelujakson alussa 23 °C vakio-olosuhteessa säilytetyistä koekappaleista mitattiin mallinnusta matalampia suhteellisen kosteuden arvoja. Ero pienenee tarkastelujakson loppua kohden.



Kuva 6.4. Mallinnettu kuivuminen 100 mm syvyydellä A betonilla. Käyrät on nimetty liitteen H mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C , Boundary 2 = 23 °C , Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C). (Liite H)

100 mm syvyydellä mitattujen ja mallinnettujen tulosten ero kasvaa 30 mm tulosten eroa suuremmaksi etenkin aluksi viileässä 5 °C olosuhteessa säilytetyillä koekappaleilla. Tulosten välinen ero vastaa 70 mm syvyydeltä saatujen tulosten välistä eroa. Sitoutumiskui-vuminen tai kosteuden siirtyminen rakenteen keskiosista kohti pintaa ei vastaa täysin mitattuja arvoja, sillä 100 mm tarkastelussa mallinnetut tulokset ovat pääosin mitattuja arvoja kosteampia. Eroa selittää osaltaan mallinnuksen pidempi hydrataatio, joka havaittiin lämpötilakuvaajien vertailusta (ks. kuva 6.1).

Tarkastelujakson alussa 23 °C vakio-olosuhteessa säilytetyistä koekappaleista mitattiin mallinnusta matalampia suhteellisen kosteuden arvoja. Ero pienenee tarkastelujakson loppua kohden. Eroa saattaa osittain selittää kosteusmittauksissa käytetyn putken alapään tiivistyksen mahdollinen epätiiviyys, jolloin mitattu tulos kuvaa suhteellista kosteutta keskiarvoisesti 0 – 100 mm väliltä.

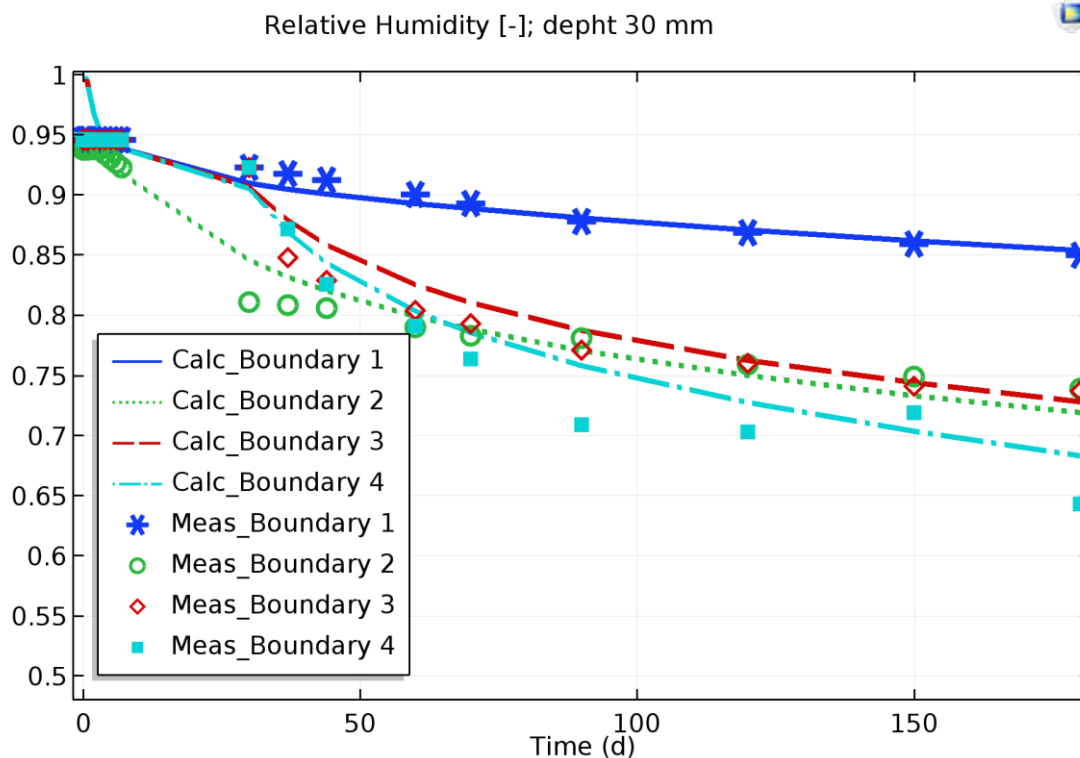


Kuva 6.5. Mallinnettu kuivuminen 60 °C kuivatusolosuhteeseen siirrettyillä A betonin kapaleilla kaikilla syvyyksillä. (Boundary 5 = 5 °C → 60 °C). (Liite H)

Viileästä 5 °C olosuhteesta 60 °C olosuhteeseen siirrettyillä betoneilla laskennalliset tulokset vastaavat hyvin mitattuja tuloksia 70 ja 100 mm syvyydellä. 30 mm syvyydellä mitatut tulokset ovat etenkin tarkastelujakson loppua kohden kuivempia kuin mallinnetut. Eroa pintaosan kuivumistuloksissa selittää ohuthietutkimuksissa havaittu avoin kapillaariverkosto ja betonien suuri huokosmäärä. Ohuthietutkimuksissa 60 °C olosuhteessa säilytetyissä betoneissa kapillaariverkoston todettiin olevan yhtenäinen vielä 90 vuorokauden kohdalla (tarkastelujakson lopussa).

6.2.2 Kuivumistulokset B betoneilla

B betonin mallinnetut kuivumistulokset on esitetty seuraavissa kuvissa. Tulokset on esitetty lukuun ottamatta 60 °C kuivatusolosuhteen tuloksia. Kuvassa 6.6 on esitetty tulokset 30 mm syvyydeltä ja kuvissa 6.7 ja 6.8 vastaavasti 70 mm ja 100 mm syvyyksiltä. 60 °C kuivatusolosuhteen tulokset on esitetty kuvassa 6.9, jossa on esitetty tulokset kaikilla tutkituilla syvyyksillä.

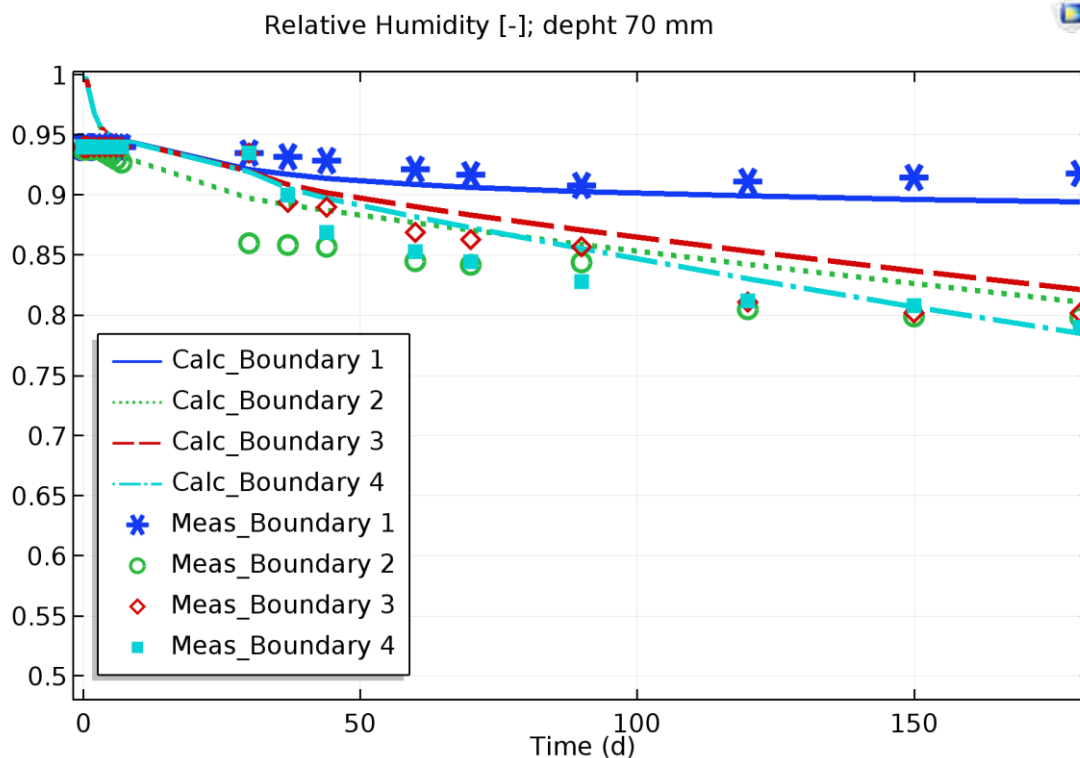


Kuva 6.6. Mallinnettu kuivuminen 30 mm syvyydellä B betonilla. Käyrät on nimetty liitteen H mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C , Boundary 2 = 23 °C , Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C). (Liite H)

Laskennalliset ja mitatut suhteellisen kosteuden tulokset vastaavat toisiaan 30 mm syvyydellä. A betonin tuloksiin verrattuna myös 5 °C olosuhteessa säilytetyt tulokset vastaavat toisiaan huomattavasti paremmin.

Vakio-olosuhteessa 23 °C säilytettyjen betonin suhteellinen kosteus laskee mittausten perusteella alussa nopeammin verrattuna mallinnettuihin tuloksiin. Ero johtunee siitä, että koekappale pääsi jo jälkihoitajakson aikana kuivumaan hieman. Mallinnuksessa koekappaleen pinnoilla oli jälkihoidon ajan 100 % RH suhteellinen kosteus, joka ei todellisuudessa aivan pidä paikkaansa.

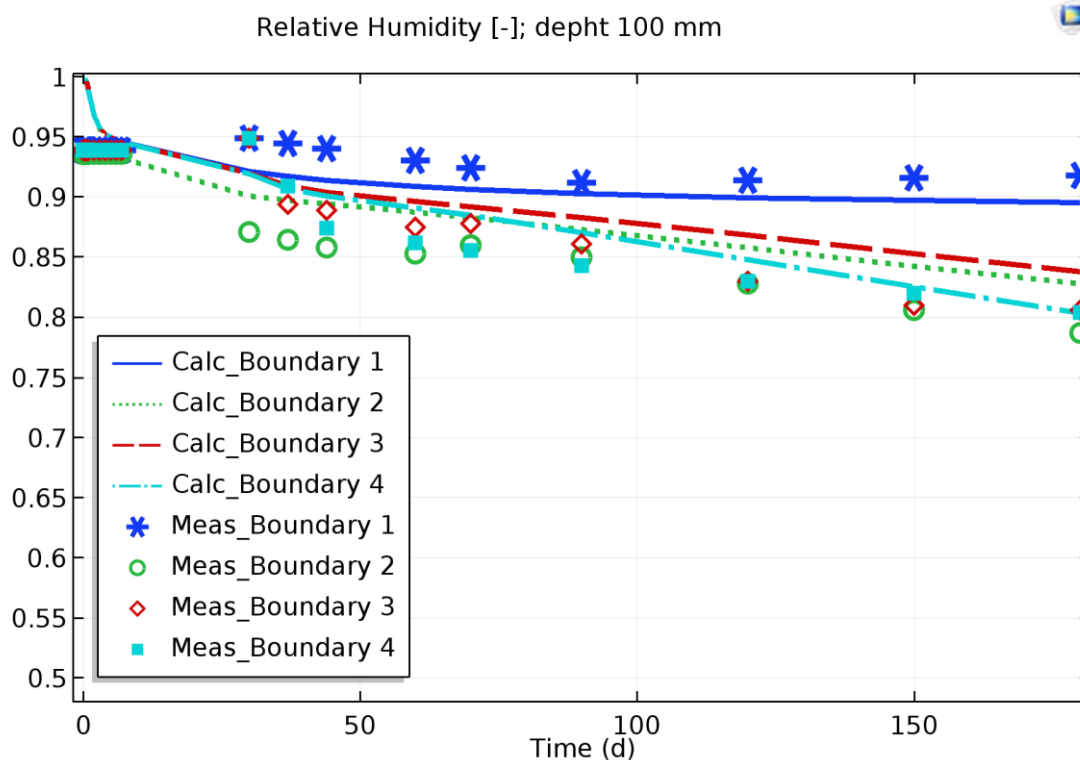
Viileästä olosuhteesta muihin kuivatusolosuhteisiin siirrettyjen kappaleiden mallinnettu kuivuminen on hitaampaa verrattuna mitattuihin arvoihin. Nopeaa kuivumista selittänee mahdollisesti vielä osittain avoin kapillaariverkosto, joka tehostaa koekappaleiden kuivumista. Kuivatusjakson loppua kohden mitattujen ja mallinnettujen tulosten ero pienee kaikissa muissa olosuhteissa paitsi 30 °C olosuhteeseen siirretyissä kappaleissa. 30 °C kuivatusolosuhteeseen siirrettyjen kappaleiden kosteusmittaustuloksissa on muita tuloksia enemmän vaihtelua. Mitattujen tulosten vaihtelu viittaa siihen, etteivät valetut koekappaleet olleet täysin vertailukelpoisia.



Kuva 6.7. Mallinnettu kuivuminen 70 mm syvyydellä B betonilla. Käyrät on nimetty liitteen H mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C , Boundary 2 = 23 °C , Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C). (Liite H)

70 mm syvyydellä mallinnetut suhteellisen kosteuden arvot eivät laske kuivumisen alkuvaiheessa yhtä nopeasti kuin mitatut arvot. 23 °C vakio-olosuhteissa säilytetyillä kappaleilla ero näkyy aivan tarkastelujakson alussa, ja muihin olosuhteisiin viileästä olosuhteesta siirretyillä kappaleilla koekappaleiden siirtämisen jälkeen. Tarkastelujakson lopussa mitatut ja mallinnetut tulokset vastaavat hyvin toisiaan.

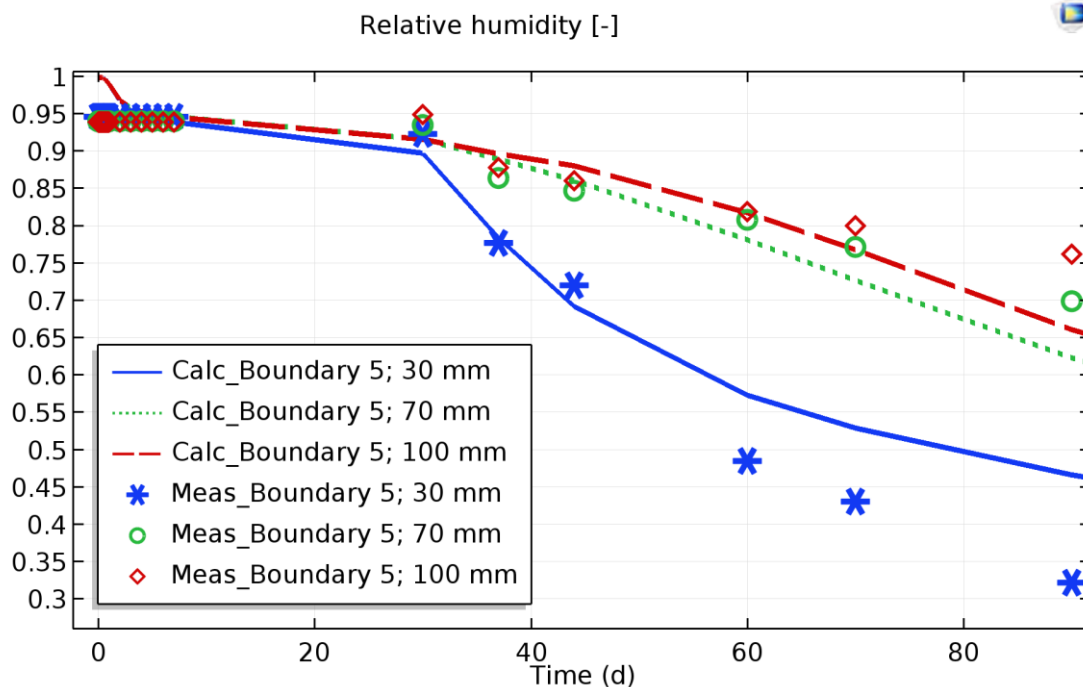
Systemaattinen ero kaikissa kuivatusolosuhteissa B betonin kappaleilla mallinnettujen ja mitattujen tulosten välillä viittaa väärin kosteudensiirron materiaaliparametreihin mallinnuksessa. 5 °C viileissä olosuhteissa, jossa kuivumista (kosteuden liikettä) tapahtuu vähemmän vastaavat mitatut ja mallinnetut tulokset paremmin toisiaan.



Kuva 6.8. Mallinnettu kuivuminen 100 mm syvyydellä B betonilla. Käyrät on nimetty liitteen H mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C , Boundary 2 = 23 °C , Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C). (Liite H)

100 mm syvyydellä 5 °C lämpötilassa mallinnetut kappaleet kuivuvat enemmän kuin laboratoriokokeiden kappaleet. Muissa olosuhteissa mallinnetut suhteellisen kosteuden arvot ovat mitattuja arvoja korkeammat. Sitoutumiskuivuminen tai kosteuden siirtyminen rakenteen keskiosista kohti pintaa ei vastaa täysin mitattua, sillä 100 mm tarkastelussa mallinnetut tulokset ovat mitattuja kosteampia.

Viileää olosuhdetta lukuun ottamatta kaikkien muiden kuvatusolosuhteiden mitatut tulokset ovat samalla tasolla tarkastelujakson lopussa. Mallinnetuissa tuloksissa eri kuivatusolosuhteiden välillä on tarkastelujakson lopulla eroa, vaikka mitatut tulokset päättyvät tarkastelujakson lopussa lähes samaan suhteelliseen kosteuteen.

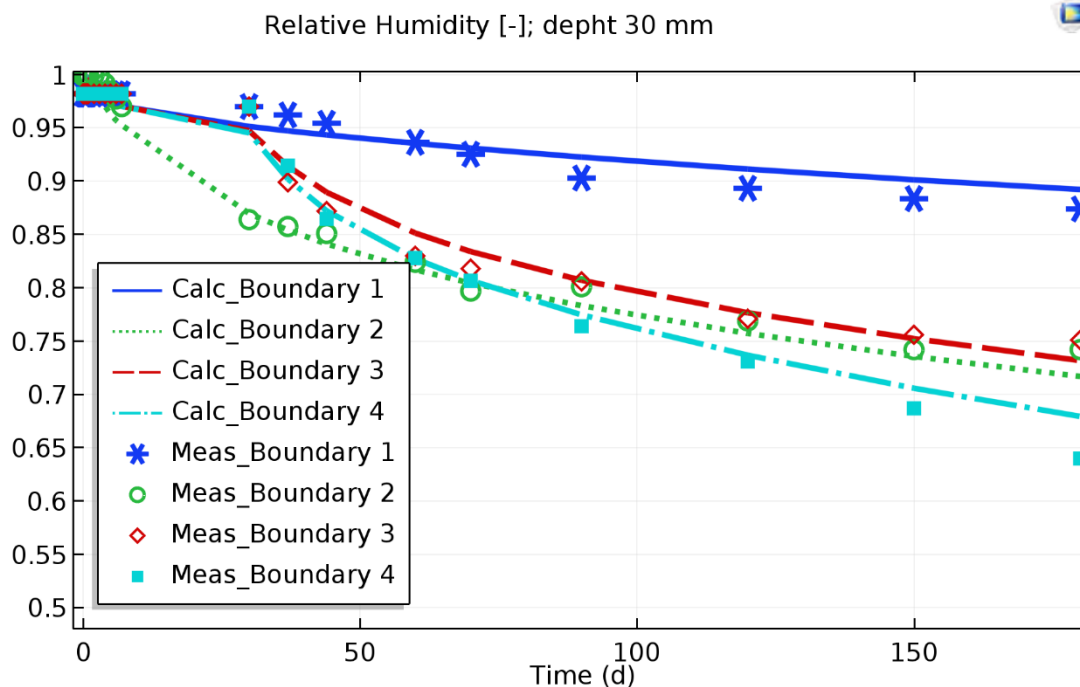


Kuva 6.9. Mallinnettu kuivuminen 60 °C kuivatusolosuhteeseen siirrettyillä B betonin kappaleilla kaikilla syvyyksillä. (Boundary 5 = 5 °C → 60 °C). (Liite H)

60 °C kuivatusolosuhteeseen siirrettyjen kappaleiden mallinnetut ja mitatut tulokset ovat lähellä toisiaan noin 50 vuorokauden ikään asti. 50 vuorokauden jälkeen kappaleen pinnasta (30 mm) mitattiin mallinnuksen tuloksia kuivempia suhteellisen kosteuden arvoja. 70 ja 100 mm syvyydellä mallinnetut tulokset ovat mitattuja korkeampia. Pintaosan nopeampaa kuivumista selittänee koekappaleiden avoin kapillaariverkosto ja suuri huokoisuus.

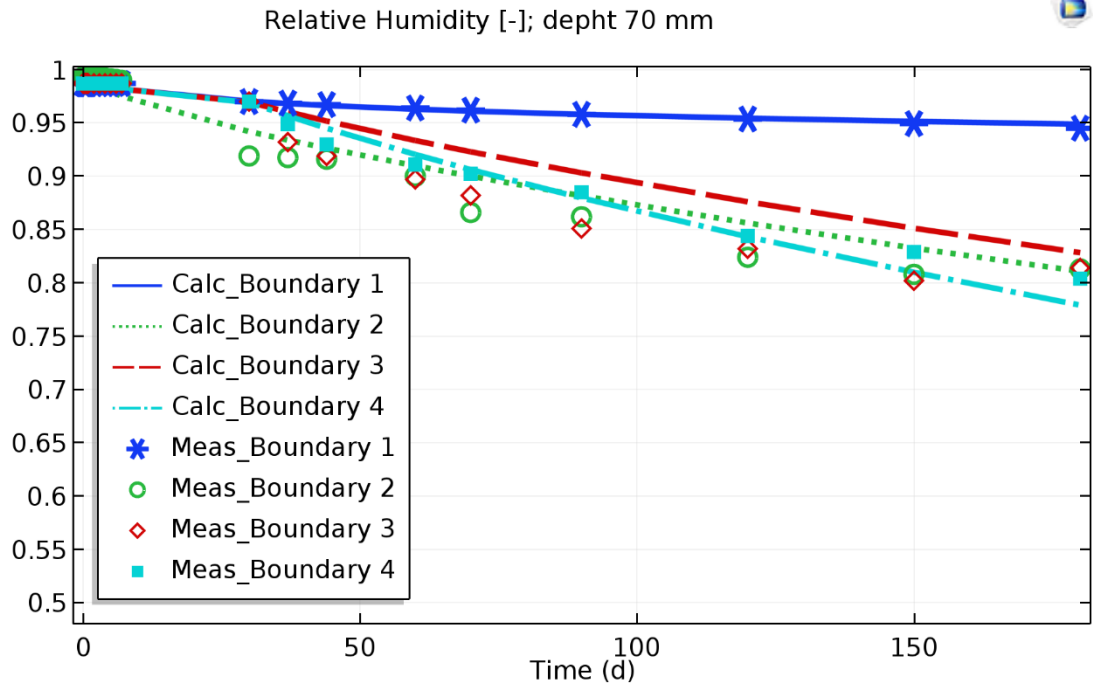
6.2.3 Kuivumistulokset C betoneilla

B betonin mallinnetut kuivumistulokset on esitetty seuraavissa kuvissa. Tulokset on esitetty lukuun ottamatta 60 °C kuivatusolosuhteen tuloksia. Kuvassa 6.10 on esitetty tulokset 30 mm syvyydeltä ja kuvissa 6.11 ja 6.12 vastaavasti 70 mm ja 100 mm syvyyksiltä. 60 °C kuivatusolosuhteen tulokset on esitetty kuvassa 6.13, jossa on esitetty tulokset kaikilla tutkituilla syvyyksillä.



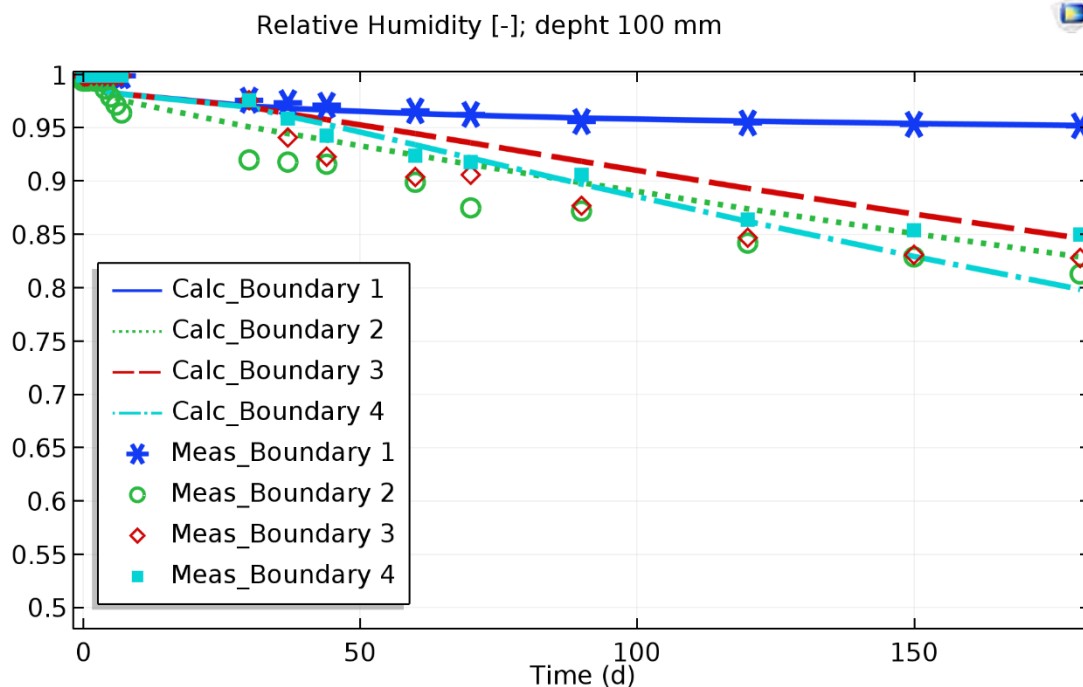
Kuva 6.10. Mallinnettu kuivuminen 30 mm syvyydellä C betonilla. Käyrät on nimetty liitteen H mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C , Boundary 2 = 23 °C , Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5°C → 30 °C). (Liite H)

30 mm syvyydellä mitatut ja mallinnetut tulokset ovat lähellä toisiaan. Yksittäisetkään mitatut arvot eivät ole ± 5 % RH-yksikköä kauempana vastaavista mallinnetuista tuloksista ja pääosin mitatut tulokset ovat noin ± 2 % RH-yksikön päässä mallinnetuista. Mallinnetut tulokset ovat pääosin mittausvirheen sisällä mitatuista tuloksista.



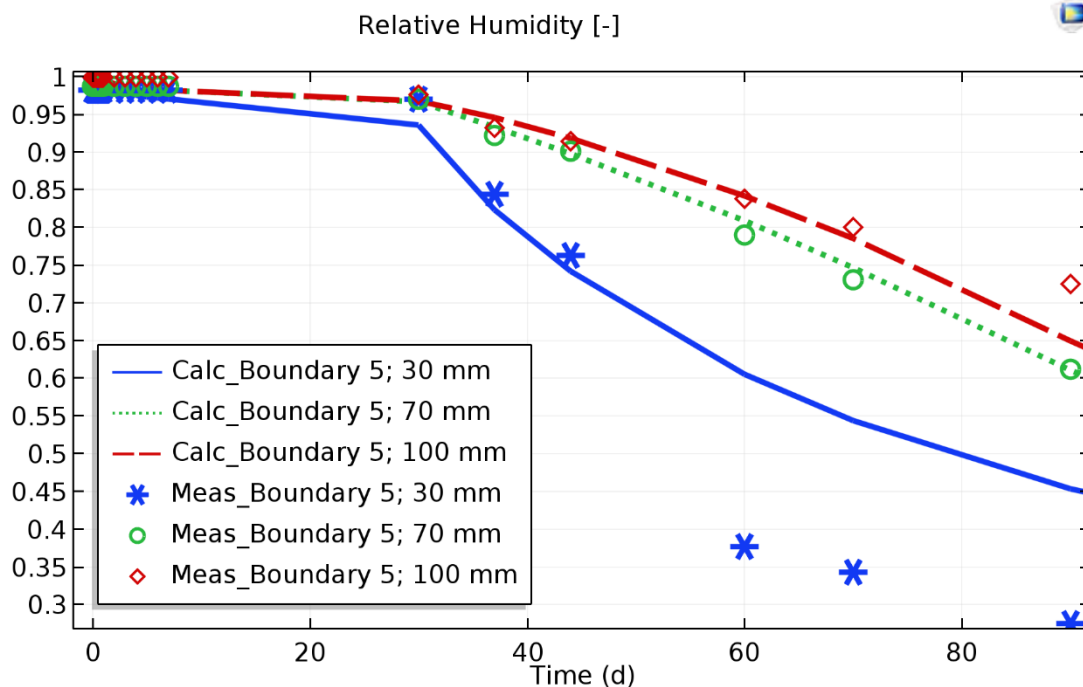
Kuva 6.11. Mallinnettu kuivuminen 70 mm syvyydellä C betonilla. Käyrät on nimetty liitteen H mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C , Boundary 2 = 23 °C , Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C). (Liite H)

Viileässä 5 °C olosuhteessa mitatut ja mallinnetut tulokset osuvat samalle käyrälle, joten mallinnus tältä osin vastaa täysin mitattuja tuloksia. Muissa olosuhteissa mitatut arvot ovat tarkastelujakson alussa mallinnettuja arvoja kuivempia, mutta tarkastelujakson loppua kohden mallinnetut tulokset saavuttavat mitatut arvot. 30 °C kuivatusolosuhteeseen siirrettyjen kappaleiden mallinnetut tulokset ovat tarkastelujakson lopussa mitattuja arvoja kuivempia. Erot mitattujen ja mallinnettujen tulosten välillä ovat kuitenkin melko pieniä.



Kuva 6.12. Mallinnettu kuivuminen 100 mm syvyydellä C betonilla. Käyrät on nimetty liitteen H mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C , Boundary 2 = 23 °C , Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5°C → 30 °C). (Liite H)

100 mm syvyydellä mitattujen ja mallinnettujen tulosten erot vastaavat eroja 70 mm syvyydellä. Eniten eroja on 23 °C vakio-olosuhteissa koko tarkastelujakson ajan säilytettyjen kappaleiden tuloksissa, joissa mallinnetut arvot ovat systemaattisesti korkeampia. Sioutumiskuivuminen tai kosteuden siirtyminen rakenteen keskiosista kohti pintaa ei vastaa täysin mitattua, sillä 100 mm tarkastelussa mallinnetut tulokset ovat systemaattisesti mitattuja kosteampia. Eroa saattaa lisäksi selittää porareikämittauksen mittaputken mahdollisesti epätiivis alapää, jolloin mitattu tulos ei kuvaa todellisuudessa betonin suhteellista kosteutta 100 mm syvyydellä.



Kuva 6.13. Mallinnettu kuivuminen 60 °C kuivatusolosuhteeseen siirrettyillä C betonin kappaleilla kaikilla syvyyksillä. (Boundary 5 = 5 °C → 60 °C). (Liite H)

60 °C olosuhteeseen siirrettyjen koekappaleiden mitattujen ja mallinnettujen tulosten välillä on hyvin pieniä eroja. Suurimmat erot ovat 30 mm syvyydellä 50 vuorokauden jälkeen, jonka jälkeen mitatut tulokset ovat huomattavasti kuivempia. Syvemmillä mitatut ja mallinnetut tulokset vastaavat toisiaan verrattain hyvin tarkastelujakson loppuun asti. Alle 70 % RH suhteellisissa kosteuksissa tulosten vastaavuuden merkitys pienenee, koska erittäin kuivat tulokset eivät ole tarpeellisia esimerkiksi päällystettävyyttä tutkittaessa. Kuivankin betonin materiaaliparametrien epätarkkuudella voi olla merkitystä, mikäli betonirakenteen pinta pääsee kuivumaan erittäin kuivaksi ja kosteuden siirtyminen kuivan kerroksen läpi on muun rakenteen kuivumista rajoittava tekijä.

6.3 Mallinnettujen ja mitattujen kuivumistulosten vertailu

Työssä tehtyjen kosteusmittausten ja koekappaleiden kuivumisen mallinnoista saadut kuivumisajat (tavoitekosteuspitoisuuteen 85 % RH) on esitetty taulukossa 6.1. Taulukossa on ilmoitettu kuivumiseen kuluva aika vuorokausina. Mitattujen ja COMSOL:illa mallinnettujen tulosten osalta esitetyt kuivumisajat on interpoloitu lineaarisesti 30 ja 70 mm tuloksista, jotta tuloksia voidaan vertailla 40 mm syvyydeltä saataviin kuivumisaikarvioihin. Muilla ohjelmilla ja menetelmillä saadut tulokset ovat yleisesti käytetyltä tarkastelusyvyydeltä (40 mm).

Taulukossa ei ole esitetty kuivumisaikoja, jotka ylittävät 180 vuorokautta. Kaikilla arviointimenetelmillä ei voitu laskea kaikkia työssä käytettyjä olosuhteita, esimerkiksi TorKaS -ohjelmaan ei voida asettaa yli 30 °C lämpötiloja kuivatusjakson ajalle.

Mitattujen tulosten, COMSOL:illa mallinnettujen tulosten ja TorkaS -ohjelmalla saatujen tulosten lukemat on arvioitu kuvaajista. BY 1021 -laskentataulukon tulokset on muutettu laskentataulukon ilmoittamista viikoista vuorokausiksi kertomalla saatu tulos seitsemällä. BY 1021 -laskentataulukon 23 °C kuivumisaika-arviot on laskettu laskentataulukon 20 ja 25 °C tulosten keskiarvoista.

Taulukko 6.1. *Kuivumisajat eri menetelmillä. Tavoitekosteuspitoisuutena 85 % RH, joka on eniten käytetty kosteusvaatimus päällystettävyyttä arvioitaessa. Viiva sarakkeessa tarkoittaa sitä, että betoni ei ole kuivunut tavoitekosteuspitoisuuteen 180 vrk tarkasteluajanjakson aikana.*

Betoni	Olosuhde [°C]	Mitatut tulokset* [vrk]	COMSOL:illa mallinnetut tulokset*	Mitattujen ja mallinnettujen tulosten ero	BY 1021 [vrk]	TorkaS [vrk]
Betoni A	5	-	-	(-)		
	23	26	48	(+22)	57	120
	5-23	49	65	(+16)		
	5-30	50	53	(+3)	71	90
	5-60	33	39	(+6)		
Betoni B	5	-	-	(-)		
	23	23	48	(+25)	57	120
	5-23	52	65	(+13)		
	5-30	51	53	(+2)	71	90
	5-60	35	35	(±0)		
Betoni C	5	-	-	(-)		
	23	60	60	(±0)	78	-
	5-23	62	83	(+21)		
	5-30	66	65	(-1)	115	-
	5-60	46	39	(-7)		

"-" = Ei saavuta tavoitekosteutta 180 vuorokauden aikana

* = lineaarisesti interpoloitu 30 mm ja 70 mm tuloksista

 =Ei tutkittu

Muihin arviointimenetelmiin verrattuna COMSOL:illa mallinnetut kuivumisajat vastaavat systemaattisesti paremmin mitattuja tuloksia. Erot mitattuihin arvoihin ovat kuitenkin paikoin merkittäviä. Esimerkiksi A ja B betoneilla, joita säilytettiin 23 °C vakio-olosuhteessa, mallinnetut kuivumisajat ovat lähes kaksinkertaiset. 60 °C olosuhteeseen siirretyillä koekappaleilla mitattujen ja COMSOL:illa mallinnettujen tulosten välinen ero on hyvin pieni ja esimerkiksi C betonilla mallinnettu kuivumisaika on mitattua lyhyempi.

TorkaS -ohjelmalla saadut kuivumisajat ovat kautta linjan huomattavasti muita tuloksia pidempiä. Erot mitattuihin tuloksiin 23 °C vakio-olosuhteessa säilytettävillä koekappaleilla ovat noin nelinkertaiset ja C betoni ei TorkaS tarkastelussa saavuta tavoitekosteutta puolen vuoden tarkastelun aikana.

BY 1021 -laskentataulukon ilmoittamat kuivumisajat ovat jonkin verran mitattuja kuivumisaikoja pidempiä. BY 1021 -laskentataulukon tuloksetkin ovat huomattavasti lyhyem-

piä kuin TorkaS -ohjelmalla saadut kuivumisaika-arvioit. Laskentataulukon kuivumisaika-arvioita voidaan kahteen suuntaan kuivuvulle laatalle pitää hyvänä arviona esimerkiksi rakentamisaikaa arvioitaessa. Laskentataulukon kuivumisaika-arviot ovat mitattuihin tuloksiin nähden varmallalla puolella.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Olosuhteiden vaikutusta betonin kuivumiseen tutkittiin valettujen koekappaleiden avulla. Koekappaleet valettiin huhtikuussa 2017 ja seurantajakso kesti puoli vuotta. Koekappaleita vastaavien betonien kuivumista vertailtiin FEM-laskentaan perustuvaan mallinnukseen, sekä lisäksi betonin kuivumista verrattiin kuivumisen arviointiin tarkoitetuilla ohjelmilla.

7.1 Tutkimuksen onnistuminen

Laboratoriokokeiden käytännön järjestelyt onnistuivat verrattain hyvin. Työn yhteydessä rakennettujen olosuhdehuoneiden olosuhteiden säätö ja ylläpito onnistuivat riittävällä tarkkuudella. Olosuhdehuoneiden lämpötilat vaihtelivat hieman tavoitelluista. Olosuhdehuoneiden kosteusolosuhteissa oli huomattavasti suurempia vaihteluja. Eri olosuhdehuoneilla saatiin kuitenkin kuvattua toisistaan eroavien kuivumisolosuhteiden vaikutusta betonien kuivumiseen ja olosuhteiden lämpö- ja kosteusolosuhteet tallennettiin mallinnuksen lähtötiedoiksi.

Koekappaleiden kattavat kosteusmittaukset onnistuivat hyvin ja pääsääntöisesti kaikista kolmesta rinnakkaisesta mittausputkesta saatiin mittapään tarkkuuden rajoissa samoja tuloksia molemmilla käytetyillä suhteellisen kosteuden mittausmenetelmillä. Tutkimuksen aikana toistuvasti samasta porareistä tehtyjen suhteellisen kosteuden mittausten todettiin pysyvän tarkkoina toistuvasta samasta putkesta mittaamisesta huolimatta. Toistuvan porareikämittaamisen onnistumisen edellytyksenä voidaan olettaa olevan koekappaleiden säilytys vakio-olosuhteessa, jolloin mittaputkeen ei pääse kondensoitumaan kosteutta ja rakenteen, sekä ympäröivän ilman lämpötila pysyy samana.

7.2 Mitatut tulokset

Koekappaleiden lämpötila

Koekappaleiden lämpötilan seuranta onnistui välittömästi valun jälkeen vain kahdelle kolmesta tutkitusta betonilaadusta. Mitatut lämpötilat ovat linjassa kirjallisuuslähteiden perusteella oletetun lämmönkehityksen kanssa. Korkein lämpötila mitattiin betonilaadusta B, jossa käytettiin nopeasti reagoivaa pikasementtiä. Samalla vesi-sementtisuhteella valmistetun A betonin lämpötilan maksimiarvo jäi hieman alhaisemmaksi, koska betonissa oli myös hitaammin reagoivaa plussementtiä. C betonissa oli muihin betoneihin verrattuna korkeampi vesi-sementtisuhde, jonka takia kyseisen betonin lämpötila ei nousut yhtä korkealle hydrataation seurauksena.

Koekappaleiden hydrataatio käynnistyi valupäivää seuraavana yönä, eikä lämpötila lähtenyt välittömästi laskemaan, vaikka osa koekappaleista siirrettiin 5 °C viileään olosuhteeseen. Kun koekappaleita siirrettiin kuukauden viileässä olosuhteessa säilytyksen jälkeen lämpimämpiin kuivatusolosuhteisiin, ei koekappaleiden lämpötila noussut olosuhtedeuoneiden lämpötilaa korkeammaksi. Tuloksen perusteella hydrataatio ei käynnistynyt merkittävästi uudelleen koekappaleiden siirtämisen jälkeen. Luultavasti hydrataatio oli edennyt viileässäkin olosuhteessa hyvin pitkälle valun jälkeisen lämmön nousun ansiosta.

Koekappaleiden kuivuminen

Kosteusmittausten perusteella hydrataatio laski koekappaleiden suhteellista kosteutta noin 2 – 8 % RH yksikköä. Eniten hydrataatio vaikutti matalan vesi-sementtisuhteen betoneilla (A ja B). Hydrataation vaikutus oli hieman pienempi viileään 5 °C olosuhteeseen siirretyillä kappaleilla. Eri olosuhteiden väliset erot hydrataation vaikutuksessa ovat kuitenkin korkeintaan mittaustarkkuuden suuruisia.

Koko tarkastelujakson ajan viileässä olosuhteessa säilytettyjen koekappaleiden suhteellinen kosteus laski tarkastelusyvyvyydestä ja betonilaadusta riippuen tasolle 85 – 95 % RH. Erot pintaosien ja koekappaleiden keskikohtien välillä olivat noin 5 % RH. Eri betonilaaduilla pintaosat kuivuivat lähes samaan suhteellisen kosteuteen (85 – 88 % RH) ja koekappaleiden keskipisteet (100 mm syvyys) tasolle 92 – 95 % RH.

Koko tarkastelujakson 23 °C vakio-olosuhteessa säilytetyissä koekappaleissa koekappaleiden keskiosat (100 mm syvyys) kuivuivat tarkastelujakson aikana kaikilla betonilaaduilla noin 80 % RH:een ja 30 mm syvyydeltä noin 74 % RH:een. C betonilla kuivuminen oli alussa hitaampaa, mutta A ja B betonien kuivumisen hidastuttua noin 120 vuorokauden kohdalla betonilaatujen väliset erot tasoittuivat.

Viileästä olosuhteesta 23 °C ja 30 °C vakio-olosuhteisiin siirrettyjen koekappaleiden keskiosat (100 mm ja 70 mm) kuivuivat samalle tasolle tarkastelujakson aikana. Kuivatusolosuhteiden välillä eroa 30 mm syvyydeltä mitatuissa suhteellisen kosteuden arvoissa oli enemmän. 30 °C olosuhteessa pintaosat kuivuivat noin 65 % RH:een, kun 23 °C olosuhteeseen siirretyillä kappaleilla pintaosat jäivät noin 73 – 75 % RH tasolle. 30 °C olosuhteessa C betoni kuivui tarkastelujakson lopussa kuivemmaksi kuin A ja B betoni. 23 °C olosuhteessa C betoni oli muita betonilaatuja kosteampi.

Viileästä 5 °C olosuhteesta 60 °C olosuhteeseen siirrettyjen koekappaleiden suhteellinen kosteus laski 90 vuorokauden tarkastelujakson aikana huomattavasti matalammalle, kuin muissa olosuhteissa, vaikka tarkastelujakso oli muita olosuhteita huomattavasti lyhyempi. Koekappaleiden pintaosat kuivuivat betonilaadusta riippuen tasolle 26 – 33 % RH. Pintaosista kosteimmaksi jäi B betonilla valettu koekappale. 70 mm syvyydellä suhteelliset kosteuden laskivat betonilaadusta riippuen 60 – 70 % RH, C betonin kuivuessa kaikkein kuivimmaksi. C betonin nopeaa kuivumista selittää epätiivimpi (kapillaarisempi) sementtikivi, joka mahdollistaa kosteuden nopeamman siirtymisen koekappaleen sisältä

haihduttavaan pintaan. Kaikkien koekappaleiden keskipisteet kuivuivat noin 75 % RH tasolle, joten koekappaleista poistui huomattavasti enemmän kosteutta kuin muissa olosuhteissa. Erot pintaosien ja koekappaleiden keskipisteiden suhteellisissa kosteuksissa olivat huomattavasti suuremmat, kuin muissa olosuhteissa.

Koekappaleiden puristuslujuus ja mikrorakenne

Ohuthietutkimuksissa koekappaleissa todettiin olevan runsaasti suojahuokosia (8 – 10 %). Suuresta huokosmäärästä huolimatta koekappaleiden puristuslujuudet olivat korkeita. Puristuslujuudet olivat lähes yhtä korkeita 23 °C ja 5 °C olosuhteissa säilytetyissä koekappaleissa. Puristuslujuuksia verratessa on kuitenkin otettava huomioon, että koekappaleita ei puristettu välittömästi poraamisen jälkeen ja niitä säilytettiin lämpimissä olosuhteissa lähes 2 kuukautta. Koekappaleet olivat yli 180 vuorokauden ikäisiä, kun koekappaleet puristettiin.

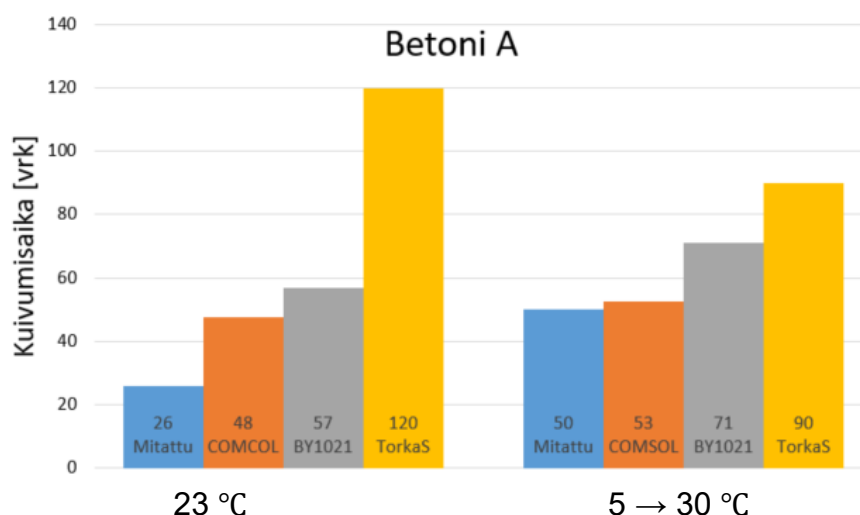
Ohuthietutkimuksissa todettiin A ja B betonin sementtikiven olevan tiiviimpää (vähemmän kapillaarista), kuin vastaavissa C betonin näytteissä. 60 °C lämpötilassa 60 vuorokautta säilytetyissä (koekappaleiden ikä 90 vuorokautta) koekappaleissa sementtikivi oli epätiivistä kaikilla betonilaaduilla. Epätiivimpi sementtikivi johtunee korkean lämpötilan aiheuttamasta nopeasta kuivumisesta ja mahdollisesti hydrataation päättymisestä ennen kapillaariverkoston katkeamista.

7.3 Mittaustulosten vertailu mallinnettuihin tuloksiin

COMSOL laskennassa käytetty hydrataation huomioon ottavan laskentamallin hydrataatioon vaikuttavia kertoimia säädettiin mitattujen koekappaleiden lämpötilatietojen perusteella. Mitatut ja mallinnetut maksimilämpötilat vastaavat hyvin toisiaan. Kertoimia tulee pyrkiä säätämään edelleen, jotta lämpötilapiikin kesto ja ajankohta vastaavat paremmin mitattua.

COMSOL:illa mallinnetut kuivumisajat vastaavat muita arviointiohjelmiä paremmin mitattuja kuivumisaikoja. Koekappaleiden mitatut kuivumisajat olivat käytettävästä arviointitavasta riippuen lyhyempiä tai huomattavasti lyhyempiä, kuin arvioidut kuivumisajat. TorkaS -ohjelmalla saadut kuivumisaika-arviot olivat huomattavasti pidempiä kuin mitatut kuivumisajat tai muilla menetelmillä saadut kuivumisaika-arviot.

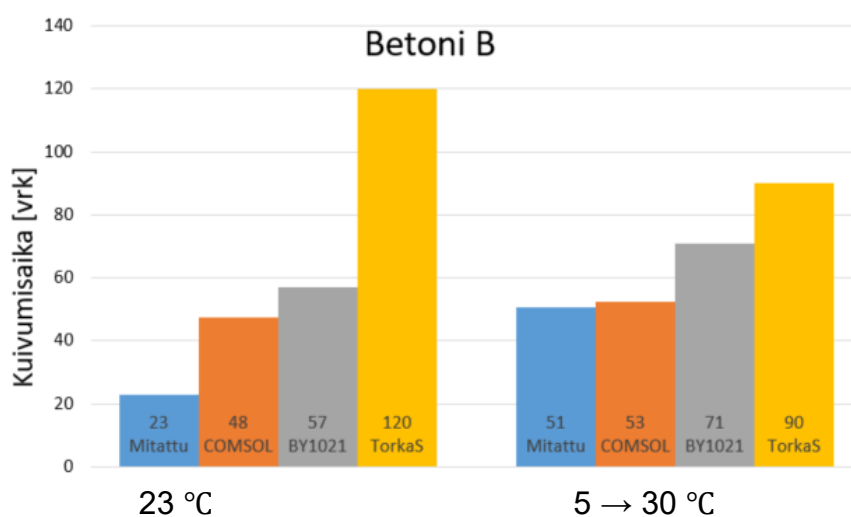
Mitatut kuivumisajat ja eri menetelmillä saadut kuivumisaika-arviot on esitetty betoni-laaduittain kaaviossa 7.1 (betoni A), kaaviossa 7.2 (betoni B) ja kaaviossa 7.3 (betoni C). Kaavioissa on esitetty tulokset vain 23 °C vakio-olosuhteessa ja viileästä 5 °C olosuhteesta 30 °C kuivatusolosuhteeseen siirretyille koekappaleille, joista kuivumisaika-arviot voitiin määrittää kaikilla menetelmillä.



Kaavio 7.1. Kuivumisaika-arvioiden ja mitattujen kuivumisaikojen vertailu 23 °C vakio-olosuhteessa ja viileästä 5 °C olosuhteesta 30 °C kuivatusolosuhteeseen siirrettyillä A betonin koekappaleilla.

Betonilla A kuivumisaika-arviot vaihtelevat käytettävästä menetelmästä riippuen paljon 23 °C vakio-olosuhteessa säilytetyillä betoneilla. Lisäksi kuivumisaika-arviot ovat huomattavasti pidempiä, kuin mitattu koekappaleiden kuivumisaika.

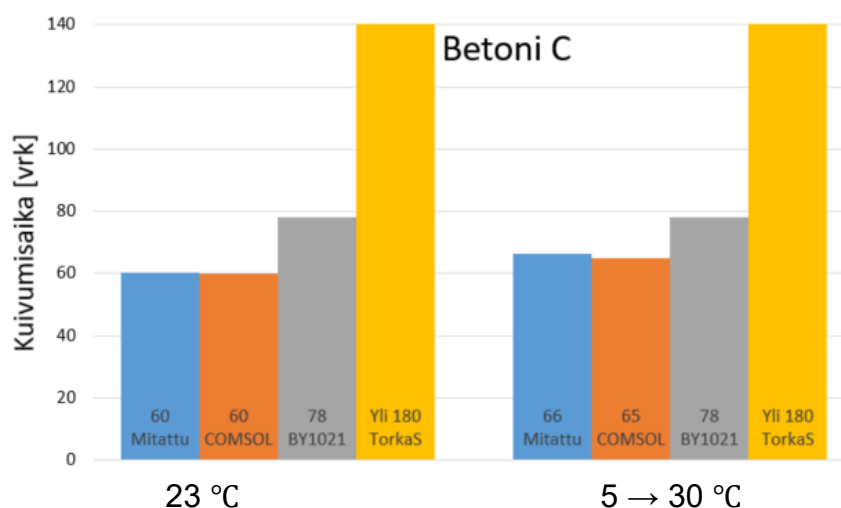
Viileästä 5 °C olosuhteesta kuukauden jälkeen 30 °C kuivatusolosuhteeseen siirrettyillä betoneilla eri arviointimenetelmien väliset erot ovat huomattavasti pienempiä. Kuivumisaika-arviot vastaavat paremmin mitattuja kuivumisaikoja, kuin 23 °C vakio-olosuhteessa.



Kaavio 7.2. Kuivumisaika-arvioiden ja mitattujen kuivumisaikojen vertailu 23 °C vakio-olosuhteessa ja viileästä 5 °C olosuhteesta 30 °C kuivatusolosuhteeseen siirrettyillä B betonin koekappaleilla.

Betonilla B kuivumisaika-arviot ovat hyvin lähellä A betonin kuivumisaikoja, koska A ja B betoneilla on sama vesi-sementtisuhde. Mitatuissa kuivumisajoissakin on vain muutama vuorokauden ero verrattaessa A betonin kuivumisaikoihin.

TorkaS -ohjelmalla saadut kuivumisaika-arviot ovat A ja B betoneilla 23 °C vakio-olosuhteessa pidempiä, kuin viileästä 5 °C olosuhteesta 30 °C kuivumisolosuhteeseen siirrettyillä kappaleilla. Muilla arviointimenetelmillä 23 °C vakio-olosuhteessa kuivumisaikat ovat lyhyempiä, kuin viileästä 5 °C olosuhteesta 30 °C kuivumisolosuhteeseen siirrettyillä kappaleilla. Myös mitatut kuivumisaikat ovat lyhyempiä 23 °C vakio-olosuhteessa. Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että TorkaS -ohjelman kuivumisaika-arvioon lämpötilan nousu vaikuttaa todellista enemmän.



Kaavio 7.3. Kuivumisaika-arvioiden ja mitattujen kuivumisaikojen vertailu 23 °C vakio-olosuhteessa ja viileästä 5 °C olosuhteesta 30 °C kuivatusolosuhteeseen siirrettyillä C betonin koekappaleilla.

C betonilla mitatut ja COMSOL:illa mallinnetut tulokset vastaavat toisiaan erittäin hyvin molemmissa olosuhteissa. TorkaS -ohjelman kuivumisaika-arviot ovat molemmissa olosuhteissa yli nelinkertaiset mitattuihin kuivumisaikoihin verrattuna.

8. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää betonirakenteiden kuivumisen lämpötilariippuvuutta. Tavoitteen saavuttamiseksi työn aikana suunniteltiin ja toteutettiin laboratorio-tutkimus, jossa tutkittiin kolmea välipohjavaluissa käytettyä betonilaatua viidessä eri kuivumisolosuhteessa, joiden lämpötilat vaihtelivat 5 °C:sta 60 °C:seen. Pää tavoitteen osatavoitteena tarkasteltiin FEM-laskentaan perustuvalla laskentamallilla mallinnettujen koekappaleiden kosteusjakaumien vastaavuutta mitattuihin kosteusjakaumiin. Lisäksi erillisenä osatavoitteena oli selvittää käytettyjen betonilaatujen ominaisuuksien kehittymistä erilaisissa lämpö- ja kosteusolosuhteissa.

Työn teoriaosuuden lähtötiedot hankittiin kirjallisuudesta sekä tieteellisistä julkaisuista. Koekappaleiden laskennallinen tarkastelu toteutettiin Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n toimesta hydrataation huomioon ottavalla laskentamallilla. Laskennassa käytettiin laboratoriokokeissa mitattuja olosuhdetietoja lähtötietoina. Lisäksi koekappaleiden kosteusmittausten tuloksia, sekä laskennallisia kuivumistuloksia vertailtiin BY 1021 ja TorkaS -laskentaohjelmilla saatuihin kuivumisaika-arvioihin.

Eri lämpöisissä kuivatusolosuhteissa säilytettyjen koekappaleiden kuivuminen ja kosteusjakaumat erosivat toisistaan osin huomattavasti. Lisäksi eri vesi-sementtisuhteella valmistettujen betonimassojen kuivumisessa havaittiin selkeä ero. Samalla vesi-sementtisuhteella, mutta eri sementtilaadulla valmistettujen betonimassojen välillä ei havaittu merkittävää eroa kuivumisnopeudessa.

Puolen vuoden tarkastelujakson aikana samassa lämpötilassa säilytettyjen koekappaleiden huokosilman suhteelliset kosteudet tasoittuivat syvyydestä riippuen hyvin lähelle toisiaan. Pienemmän vesi-sementtisuhteen betoneilla (A ja B) kuivuminen tapahtui nopeammin, kuin korkeamman vesi-sementtisuhteen betonilla (C). Myös koekappaleet joita säilytettiin 30 vuorokautta viileässä 5 °C olosuhteessa kuivuivat 23 °C vakio-olosuhteeseen siirron jälkeen tarkastelusyvytydestä riippuen samoille suhteellisen kosteuden tasolle kuin koko tarkastelujakson 23 °C olosuhteessa säilytetyt koekappaleet. Koekappaleet eivät kuitenkaan saavuttaneet miltään osin olosuhdehuoneessa vallinnutta suhteellisen kosteuden keskimääräistä tasoa.

Koekappaleet saavuttivat sitä matalampia suhteellisen kosteuden arvoja, mitä korkeammassa lämpötiloissa niitä säilytettiin. Myös 60 °C kuivatusolosuhteeseen 30 vuorokauden jälkeen siirretyt koekappaleet kuivuivat kuivemmiksi, kuin vastaavasti 30 °C kuivatusolosuhteeseen siirretyt koekappaleet, vaikka 60 °C kuivatusolosuhteessa koekappaleiden kuivumisen seurantajakso oli vain 90 vuorokautta, kun se muissa olosuhteissa oli 180 vuorokautta.

Lämpimämmissä olosuhteissa korkeamman vesi-sementtisuhteen betonin (C) kuivuminen tehostui muihin betonilaatuihin verrattuna ja C betonin koekappaleet kuivuivat jopa muita betonilaatua kuivemmiksi huokoisemman sementtikiven ansiosta. Matalamman vesi-sementtisuhteen betoneilla (A ja B) kuivuminen oli aluksi nopeampaa suuremman hydrataatiokuivumisen johdosta, kuin betonilla C.

Hydrataation huomioon ottavalla laskentamallilla mallinnettujen koekappaleiden suhteellisen kosteuden muutokset vastasivat betonilaadusta, tarkastelusyvyyydestä ja kuivatusolosuhteesta riippuen hyvin tai melko hyvin mitattuja suhteellisen kosteuden arvoja. Mallinnetut tulokset vastasivat C betonilla hyvin mitattuja tuloksia kaikissa kuivatusolosuhteissa kaikilla mittaussyvyyksillä. Muilla betonilaaduilla (A ja B) etenkin syvemmillä rakenteessa (70 ja 100 mm syvyydellä) tulokset erosivat jonkin verran mitatuista tuloksista. A ja B betoneilla mallinnetut suhteellisen kosteuden arvot laskivat alkuvaiheessa mitattuja tuloksia hitaammin. Tarkastelujakson edetessä mallinnetut ja mitatut tulokset vastasivat toisiaan paremmin. Mallinnuksen alkuvaiheen hitaampi kuivuminen pidensi laskennallisia kuivumisaika-arvioita A ja B betoneilla. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että C betonin kosteudensiirtoon vaikuttavat materiaaliparametrit kuvasivat kosteudensiirtoa paremmin kuin A ja B betonin parametrit. Muuttuvien kuivumisolosuhteiden ei havaittu heikentävän mallinnettujen kosteusjakaumien tai kuivumisaika-arvioiden tarkkuutta.

Hydrataation huomioivalla laskentamallilla saadut kuivumisaika-arviot olivat tarkempia, kuin muilla menetelmillä saadut kuivumisaika-arviot. BY 1021 -laskentaohjelmalla saadut kuivumisaika-arviot olivat systemaattisesti hieman COMSOL:illa saatuja kuivumisaika-arvioita pidempiä ja jonkin verran pidempiä kuin mitatut kuivumisajat. TorkaS -ohjelmalla saadut kuivumisaika-arviot olivat systemaattisesti merkittävästi pidempiä kuin mitatut ja muilla menetelmillä saadut kuivumisajat. TorkaS -ohjelmalla saadut kuivumisaika-arviot olivat muutamissa tapauksissa jopa yli nelinkertaisia mitattuihin kuivumisaikoihin verrattuna.

Laboratoriotutkimusten osalta tavoite tarkoista suhteellisen kosteuden mittaustuloksista erilaisissa kuivatusolosuhteissa säilytetyistä betonikoekappaista saavutettiin. Koekappaleista poistuvan kosteuden mittaaminen punnitsemalla ei onnistunut suunnitellusti ja punnituksista luovuttiin työn laboratoriokeiden aikana.

Hydrataation huomioon ottavan laskentamallin tuloksiin vaikuttaa merkittävästi laskentamallin lähtötiedot ja materiaaleille määritettävät kosteudensiirron parametrit sekä hydrataatioreaktion mallinnukseen liittyvät kertoimet. Hydrataation vaikutuksen oikeellisuutta voidaan arvioida vertaamalla todellisen betonirakenteen ja mallinnetun rakenteen lämpötilaa. Mallinnettua rakenteen lämpötilankehitystä voidaan muuttaa hydrataatioon liittyviä kertoimia säätämällä, jolloin todellisesta rakenteesta mitatut ja laskentamallilla mallinnetut lämpötilat saadaan vastaamaan paremmin toisiaan.

Hydrataation jälkeisen haihtumiskuivumisen nopeuteen vaikuttavia materiaaliparametreja ei voida helposti määrittää betonista, joten mallinnettuihin tuloksiin perustuvat kuivumisaika-arviot jäävät aina hieman epätarkoiksi. Betonirakenteen päällystettävyyden arviointia ei voida toteuttaa pelkän rakenteen mallintamisen avulla, vaan riittävästä kuivumisesta tulee varmistua kosteusmittauksin. Mallinnettujen koekappaleiden kosteusjakauma vastaa kuitenkin melko hyvin mitattuja kosteusjakaumia. Mallinnuksella voidaan arvioida päällysteen alle muodostuvaa kosteuden määrää, kun rakenteen suhteellisen kosteuden jakauma ja päällysteen ominaisuudet, kuten vesihöyrynläpäisevyys tunnetaan. Laskentaa voidaan hyödyntää esimerkiksi päällystettävyyden riskien arvioinnissa tai päällystämisen kannalta kriittisen kosteuspitoisuuden nykyistä tarkemmassa määrittämisessä.

LÄHTEET

Arfvidsson J., Hedenblad G., Nilsson L-O. (2010). Datorprogrammet TorkaS 3, som prognosverktyg vid val av ekonomisk betongkvalitet från uttorkningssynpunkt. Fuktcentrum, Lunds tekniska högskola. 18s.

ASTM F2170-16b. (2017). Standard test method for determining relative humidity in concrete floor slabs using in situ probes. ASTM International. 6s.

Björkholtz D. (1997). Lämpö ja kosteus. Rakennusfysiikka. Rakennustieto Oy, 150s.

CIP 28. (2004). Concrete slab moisture. National Ready Mixed Concrete Association. 2p.

Finnsementti Oy:n sementti ja lisäaine esitteet. Finnsementti Oy. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/tuotteet>

Hagentoft C-E. (2001). Introduction to Building Physics. Studentlitteratur AB. 442s.

Iso-Mustajärvi P. (2013). RTEK-3140 Betonitekniikka. Tampereen teknillinen yliopisto. 296s.

Janssen H. (2010). Thermal diffusion of water vapour in porous materials: Fact or fiction?. International Journal of Heat and Mass Transfer 54 (2011). 15p.

Leivo V., Rantala J. (2000). Maanvaraisten alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen (julkaisu 106). Tampereen teknillinen korkeakoulu. 127s.

Leivo V., Rantala J. (2002). Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus (julkaisu 120). Tampereen teknillinen korkeakoulu. 124s.

Malek K., Coppens M-O. (2003) Knudsen Self- and Fickian Diffusion in Rough nanoporous Media. Delft University of Technology. 42p.

Miettunen K., Wirtanen L. (2017). Muovimatolla päällystetyt betonilattiat – haasteita uudisrakentamisessa. Rakennusfysiikka 2017. Seminaarijulkaisu 5. s.51 - 56.

Merikallio T. (2002). Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi. Rakennustieto Oy. 62s.

Merikallio T., Niemi S., Komonen J. (2007). Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen. Suomen Betonitieto Oy. 97s.

Merikallio T. (2009). Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa. Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu. 136s.

- Parish O., Putnam T. (1977) Equations for determination of humidity from dewpoint and psychrometric data. Dryden Flight Research Center. National Aeronautics and Space Administration. NASA Technical note (NASA TN D-8401). 23p.
- Neville AM. (1995). Properties of concrete. Longman scientific & technical. 844s.
- Niemi S. Diplomi-insinööri, yksikönpäällikkö Vahanen Rakennusfysiikka Oy. Vapaa-
muotoinen haastattelu kosteusmittauksiin liittyen alkuvuonna 2018.
- NT Build 439. (1995). Concrete, hardened: Relative humidity measured in drilled holes. Nordtest. 3s.
- KJM5100. (2006). Uorganisk materialsyntese. Kurssin opetusmateriaali. Universitetet i Oslo. Saatavilla: http://www.uio.no/studier/emner/matnat/kjemi/KJM5100/h06/undervisningsmateriale/16KJM5100_2006_porous_e.pdf. 34p.
- Pyy H. (2017). Mikroskooppisten menetelmien käyttö vaurio- ja muissa betonianalyysissä. Rajoitettu saatavuus, opetusmateriaali: 1-lk betonityönjohtajan ja 1-lk valmisbetoni-työnjohtajan pätevyityskoulutus. 13s.
- RAK 82.3131. (2015). Concrete technology 2 kurssin opetusmateriaali. Aalto-yliopisto. Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/131041/mod_label/intro/Rak-82_3131_luentokalvoja_2.pdf. 36s.
- RIL 255-1-2014. (2014). Rakennusfysiikka I. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 500s.
- RT 14-10984. (2010). Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen. Rakennustieto Oy. 16s.
- Sekki P, Karvinen T. (2017). Numerical simulation and measurements of drying Finnish concrete grades. 11th Nordic Symposium of Building Physics, NSB2017. 6p.
- Sekki P., Korhonen L., Vinha J. (2017). Kuorielementtien kuivumisen mallintaminen hydrataation huomioivalla FEM-laskennalla. Rakennusfysiikka 2017. Seminaarijulkaisu 5. s.399 - 405.
- Siikanen U. (2014). Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovelluksia. Rakennustieto Oy. 256s.
- Suomen Betonitieto Oy, (2007). Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet. Betonikeskus ry. 47s.
- Suomen Betoniyhdistys ry. BY 1021 Betonirakenteiden kuivuminen. Betoniyhdistyksen betoniohjelmat. Laskentapohja (excel).
- Suomen Betoniyhdistys ry. (2016). BY 65 Betoninormit. 165s.

Suomen Betoniyhdistys ry. (2018). BY 201 Betonitekniikan oppikirja. 568s.

Vaisala. (2014). SHM40 rakenteiden kosteuden mittaamiseen. SHM40 tuote-esite. Vaisala Oy. 2s.

Vaisala. (2012). Vaisala HUMICAP –anturi suhteellisen kosteuden (RH) mittaamiseen. Teknologiakuvaus. Vaisala Oy. 2s.

Vaisala. (2006) Käyttöohje. Vaisala HUMICAP rakenteiden kosteusmittalaite HM44. Vaisala Oy. 55s.

Virola H., Raivio P. (2000). Portlandsementin hydrataatio. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT tiedotteita T2041). 65s.

Vinha J., Valovirta I., Korpi M., Mikkilä A., Käkelä A. (2005). Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona (tutkimusraportti 129). Tampereen teknillinen yliopisto. 321s.

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

Vinkler M., Vitek J L. (2016). Drying concrete: Experimental and Numerical Modeling. American Society of Civil Engineers. 8p.

Vänttinen K., Tuominen E., Vinha J. (2017). Betonin kosteusteknisten materiaaliominaisuuksien määrittäminen. Rakennusfysiikka 2017. Seminaarijulkaisu 5. s.461 - 470.

Wang Y., Xi Y. (2017). The Effect of Temperature on Moisture Transport in Concrete, MDPI Materials journal, 12p.

WUFI 2D -ohjelman help toiminto. luettu 2017. Fraunhofer IBP

WUFI Wiki. WWW-sivusto. luettu 2017. Saatavissa: <http://www.wufi-wiki.com>

LIITTEET

LIITE A: Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n mittaustapaliite betonin suhteellisen kosteuden (RH) mittaus porareiästä

LIITE B: Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n mittaustapaliite betonin suhteellisen kosteuden (RH) mittaus näytepalamenetelmällä

LIITE C: Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n kosteus- ja lämpötilamittapäiden sekä tiedonkeruulaitteiden kalibrointi

LIITE D: Betonien kuormakirjat, Rudus Oy

LIITE E: Ohuthie tutkimusraportti TT2502, Vahanen Rakennusfysiikka Oy

LIITE F: Mittauspöytäkirja tehdyistä kosteusmittauksista

LIITE G: Puristuslujuuksien testausselostus, OAMK

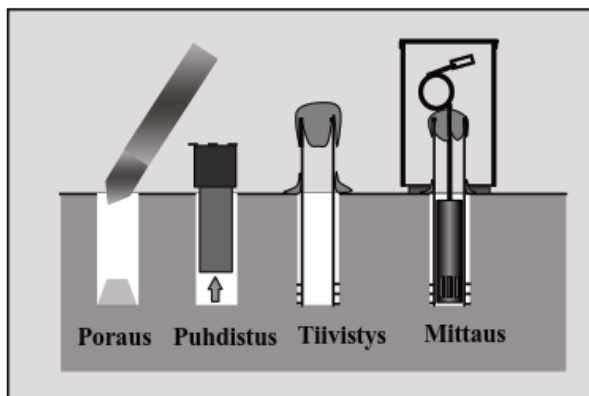
LIITE H: Laskentamuistio, Vahanen Rakennusfysiikka Oy, COMSOL laskennat

LIITE A: VAHANEN RAKENNUSFYSIIKKA OY:N MITTAUSTAPA- LIITE BETONIN SUHTEELLISEN KOSTEUDEN (RH) MITTAUS PORAREIÄSTÄ



BETONIN SUHTEELLISEN KOSTEUDEN (RH) MITTAUS PORAREIÄSTÄ

1. Rakenteeseen porataan iskuporakoneella $\varnothing 16$ mm reikä mittaussyvyydelle.
2. Reikä puhdistetaan porauspölystä imuroimalla käyttäen suutinta, joka mahtuu reikään.
3. Reikään asennetaan sivuiltaan tiivis mittausputki, joka ulottuu reiän pohjaan saakka. ($\varnothing 16$ mm sähköputki tai Vaisalan 19266HM asennusputki)
4. Mittausputken ja betonin rajapinta tiivistetään kosteusmittaukseen soveltuvalla kitillä.
5. Mittausputki imuroidaan puhtaaksi.
6. Mittausputken pää tiivistetään kosteusmittaukseen soveltuvalla kitillä.
7. Tarvittaessa mittausputki suojataan Vaisalan 19268HM asennussuojalla tai muulla tavalla.
8. Reiän annetaan tasaantua tiivistettynä vähintään 3 vrk.
9. Mittaus suoritetaan Vaisala Oy:n valmistamalla HM44 / SHM40 kosteusmittauslaitteistolla. Lämpötila-kosteusmittapää HMP44 / HMP40S asennetaan mittausputken siten, että putken pään tiivistys avataan mittapään putkeen laittamisen ajaksi. Tämän jälkeen putken pää tiivistetään kitillä mittapään johtoon. Mittapään annetaan tasaantua mittausputkessa vähintään 1 tunti ennen lukemien ottamista. Vaihtoehtoisesti mittapää asennetaan mittausputken jo porauksen yhteydessä, jolloin mittapään tasaantumisaika reiässä on vähintään 3 vuorokautta.
10. RH ja lämpötila (T) luetaan HMI41 / HM40 näyttölaitteella ja arvot kirjataan ylös mittapäännumeroineen.
11. Käytettäessä HMP44 mittapäitä arvot korjataan kunkin anturin yksilöllisillä kalibrointikorjauskertoimilla. HMP40S mittapäät säädetään kalibroinnin yhteydessä kohdalleen, joten luettuihin arvoihin ei tule kalibrointikorjauksia.



Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n omistamat HMP42 ja HM42 mittapäät kalibroidaan 2 kk välein sekä HMP44 ja HMP40S mittapäät 4 kk välein Vaisala Oy:n valmistamalla HMK13B kalibrointilaitteella. Lisäksi kaikkien Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n mittapäiden kalibrointitulosten muutosta seurataan ja kalibrointia tarkennetaan tarvittaessa. Kalibrointilaitteen suolaliuoskammioiden referenssikosteuspitoisuudet mitataan Vaisala Oy:n valmistamalla Vaisala Oy:n mittanormaalilaboratoriossa kuhunkin kosteuspitoisuuteen säädetyllä (75 %RH ja 97 %RH) HMP233 lämpötila- kosteuslähettimellä. Referenssilähettimeiden oikeellisuutta seurataan Vaisala Oy:n valmistamalla HMK15 kosteuskalibraattorilla, jossa tarkistuskosteuspitoisuudet aikaansaadaan kalibroitujen suolaliuosten avulla.

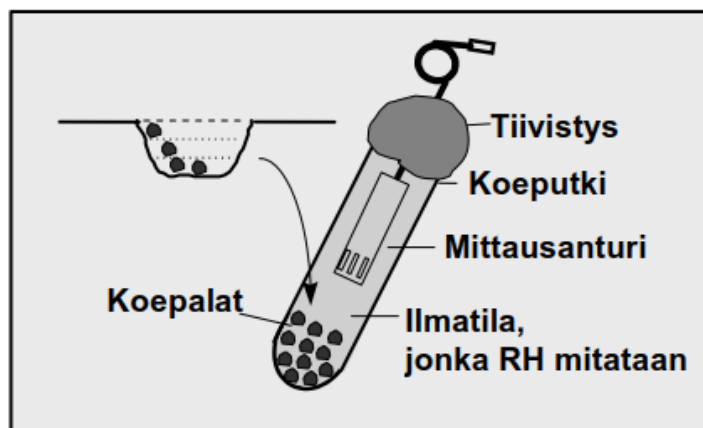
Mittalaitevalmistajan ilmoittama HMP44- ja HMP42 mittapään mittaustarkkuus $+20$ °C lämpötilassa on ± 2 %RH (0...90 %RH) ja ± 3 %RH (90...100 %RH). Lämpötilan mittaustarkkuus HMP44:llä on $\pm 0,5$ °C ja HMP42:lla on $\pm 0,2$ °C. Mittalaitevalmistajan ilmoittama HMP40S- ja HM42 mittapään mittaustarkkuus $+20$ °C lämpötilassa on $\pm 1,5$ %RH (0...90 %RH) ja $\pm 2,5$ %RH (90...100 %RH). Lämpötilan mittaustarkkuus on $\pm 0,2$ °C. Säännöllisellä kalibroinnilla päästään selvästi parempaan mittaustarkkuuteen.

LIITE B: VAHANEN RAKENNUSFYSIKKA OY:N MITTAUSTAPA- LIITE BETONIN SUHTEELLISEN KOSTEUDEN (RH) MITTAUS NÄYTEPALAMENETELMÄLLÄ

VAHANEN

BETONIN SUHTEELLISEN KOSTEUDEN (RH) MITTAUS NÄYTEPALA- MENETELMÄLLÄ

1. Rakenteesta piikataan betonimurusia koeputkeen. Muruset otetaan lyöntimeisellä betoni-pinnasta, joka on 5 mm mittausyvyyttä ylempänä. Näin menetellen muruset koostuvat betonista, joka on mittausyvyydestä 5 mm ylöspäin. Murusissa syvimmällä olleissa betonihuokosissa vallinnut ilmankosteus kehittyi tämän jälkeen koko koeputken ilmatilaan olettaen, että rakenteen kosteuspitoisuus kasvaa syvemmälle mentäessä. Näytteenottopinta työstetään betoniin kuivamenetelmällä piiriin porattujen reikien keskelle jäävän betonikappaleen alta. Mittauspinnan yläpuolinen betoni voidaan poistaa myös kuivaporausruunun avulla tai kokonaan ilman sähkötyökaluja. Näytemurusia ei oteta 10 mm lähempää näytteenottomontun reunaan. Lattia-pinnasta näytepalat otetaan ilman näytteenottopinnan esivalmistelua.
2. Koeputken tiivistetään Vaisala Oy:n valmistama HMP44 / HMP40S lämpötila- kosteusmittapää kosteusmittaukseen soveltuvalla kitillä siten, että mittapään johdon ja koeputken suun yhtymäkohta on täysin vesihöyryntiivis.
3. Koeputket ja mittapääät kuljetetaan kohteeseen ja kohteesta +20 °C vakio-olosuhteisiin lämpöeristetyssä kuljetuslaatikossa suurten lämpötilavaihtelujen minimoimiseksi.
4. Putkien annetaan tasaantua vakio-olosuhteisiin vähintään 6 tuntia ennen kosteusarvojen lukemista.
5. RH ja lämpötila (T) luetaan HMI41/ HM40 näyttölaitteella ja arvot kirjataan ylös mittapään numeroineen.
6. Käytettäessä HMP44 mittapäitä arvot kirjataan kunkin anturin yksilöllisillä kalibrointikorjauskertoimilla. HMP40S mittapääät säädetään kalibroinnin yhteydessä kohdalleen, joten luettuihin arvoihin ei tule kalibrointikorjauksia.



Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n omistamat HMP42 ja HM42 mittapääät kalibroidaan 2 kk välein sekä HMP44 ja HMP40S mittapääät 4 kk välein Vaisala Oy:n valmistamalla HMK13B kalibrointilaitteella. Lisäksi kaikkien Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n mittapäiden kalibrointitulosten muutosta seurataan ja kalibrointia tarkennetaan tarvittaessa. Kalibrointilaitteen suolaliuoskammioiden referenssikosteuspitoisuudet mitataan Vaisala Oy:n valmistamalla Vaisala Oy:n mittanormaalilaboratoriossa kuhunkin kosteuspitoisuuteen säädetyllä (75 %RH ja 97 %RH) HMP233 lämpötila- kosteuslähettimellä. Referenssilähettimeen oikeellisuutta seurataan Vaisala Oy:n valmistamalla HMK15 kosteuskalibraattorilla, jossa tarkistuskosteuspitoisuudet aikaansaadaan kalibrointijäsen suolaliuosten avulla.

Mittalaittevalmistajan ilmoittama HMP44- ja HMP42 mittapään mittaustarkkuus +20 °C lämpötilassa on ± 2 %RH (0...90 %RH) ja ± 3 %RH (90...100 %RH). Lämpötilan mittaustarkkuus HMP44:llä on $\pm 0,5$ °C ja HMP42:llä on $\pm 0,2$ °C. Mittalaittevalmistajan ilmoittama HMP40S- ja HM42 mittapään mittaustarkkuus +20 °C lämpötilassa on $\pm 1,5$ %RH (0...90 %RH) ja $\pm 2,5$ %RH (90...100 %RH). Lämpötilan mittaustarkkuus on $\pm 0,2$ °C. Säännöllisellä kalibroinnilla päästään selvästi parempaan mittaustarkkuuteen.

LIITE C: VAHANEN RAKENNUSFYSIIKKA OY:N KOSTEUS- JA LÄMPÖTILAMITTAPÄIDEN SEKÄ TIEDONKERUULAITTEIDEN KALIBROINTI

VAHANEN

VAHANEN RAKENNUSFYSIIKKA OY:N KOSTEUS- JA LÄMPÖTILAMITTAPÄIDEN SEKÄ TIEDONKERUULAITTEIDEN KALIBROINTI



Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n omistamat HMP42 ja HM42 mittapäät kalibroidaan 2 kk välein Vaisala Oy:n valmistamalla HMK13B kalibrointilaitteella. HMP44 ja HMP40S mittapäät kalibroidaan 4 kk välein Vaisala Oy:n valmistamalla HMK13B kalibrointilaitteella. Lisäksi kaikkien Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n mittapäiden kalibrointitulosten muutosta seurataan ja kalibrointia tarkennetaan tarvittaessa. Vaativissa mittauksissa ainakin osa mittapäistä tarkistuskalibroidaan mittauksen jälkeen mittapäiden kalibrointitason pysyvyyden varmistamiseksi.

HMK13B kalibrointilaitteen suolaliuoskammioiden referenssikosteuspitoisuudet mitataan Vaisala Oy:n valmistamalla Vaisala Oy:n mittanormaalilaboratoriossa kuhunkin kosteuspitoisuuteen säädetyillä (75 %RH ja 97 %RH) HMP233 lämpötila- kosteuslähettimillä. Referenssilähettimeiden oikeellisuutta seurataan Vaisala Oy:n valmistamalla HMK15 kosteuskalibraattorilla, jossa tarkistuskosteuspitoisuudet aikaansaadaan sertifioitujen suolaliuosten avulla.

Mittalaittevalmistajan ilmoittama HMP44- ja HMP42 mittapään mittaustarkkuus +20 °C lämpötilassa on ± 2 %RH (0...90 %RH) ja ± 3 %RH (90...100 %RH). Lämpötilan mittaustarkkuus HMP44:llä on $\pm 0,5$ °C ja HMP42:llä on $\pm 0,2$ °C. Mittalaittevalmistajan ilmoittama HMP40S- ja HM42 mittapään mittaustarkkuus +20 °C lämpötilassa on $\pm 1,5$ %RH (0...90 %RH) ja $\pm 2,5$ %RH (90...100 %RH). Lämpötilan mittaustarkkuus on $\pm 0,2$ °C. Säännöllisellä kalibroinnilla päästään selvästi parempaan mittaustarkkuuteen.

Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan seurantamittaukseen käytettävät Testo 174H tiedonkeruulaitteet kalibroidaan vuosittain suolaliuoskammioiden avulla Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratoriossa. Paine-eron seurantamittaukseen käytettävät Magnesense ja Pro dual mittalaitteet kalibroidaan vuosittain tarkkuusmanometrin avulla Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratoriossa. Hiilidioksidin seurantamittaukseen käytettävien SenseAir mittalaitteiden tuloksia verrataan määrääjoihin toisiinsa. Mikäli tulokset poikkeavat toisistaan, mittalaitteet toimitetaan laitevalmistajan kalibrointiin.

LIITE D: BETONIEN KUORMAKIRJAT, RUDUS OY

A

TI 04.04.2017 KUORMAKIRJANUMERO: 6514413 / 20400

Rudus OY PUH KONALA 0204477800

011 Linnontustie 5
Linnontustie 5
Espoo** AUTO 32 HOITAA

RUDUS OY KEHITYS/ VESA ANTTILA VBY
sisäinen
PL 40

Asiakasno - työmaano
002308 220385

050-3307894

ASIAKAS

Betonityyppi
253716030 NOPEAMMIN PÄÄLLYSTETTÄVÄ NP3716mmS3 X0 CL0,1

Betonilaatu, -luokka ja käyttöikä Maksimiraa Notkeus Sideaineet Määrä
C30/37 50 v 16MM S3 / 10-15cm PLUS_P SEMENTTI, PAKA_P SEMENTTI 2 M3

BETONI

NOJKISTIN
HUOKOSTIN

Betonin lisätietoja Betonin lisätietoja

NOPEAMMIN PÄÄLLYSTETTÄVÄ BETONI

RUNKOAIINEEN LÄMMITYSLISÄ

COPOF MATOPALLI

Auto-/pumpputyypin Nro Laskettava matka Purkaustapa
Pyörintäsäiliöauto, JJK-784 7 7M RANNI

Valmistusaika Perillä klo Tilattu betoni-m³ Toimitettu betoni-m³ Kuljetuksen lisätietoja
13:30 14:11 4 m³ 2 m³

Purkaus alkoi Purkaus lopetti Palveluaika PALVELUAJAN HYVÄKSYNTÄ: TOIMITUKSEN HYVÄKSYNTÄ:

14:11 14:32 20

KULJETUS

Häiriö pumpulla Häiriö valussa Muu syy _____

Kulkeuste Hidas valu

PUMPPAUS

Tilattu klo Alkoi klo Päättyi klo tuntia min.

Arvioitu betonimäärä Pumpattu betonimäärä

Pystytyspöytäkirja tehty

Koodi Muut veolitukset Määrä

TOIMITUKSEN KÄTEISHINTALASKELMA:

VALTUUTUS
Koneenkäyttäjällä/betoniauton kuljettajalla on betonikuormakirjojen kuitausoikeus

Vastaanottajan Tilajan allekirjoitus

Valtuutetun kuitaus

3. ASIAKAS

Pyydämme vastaanottajaa tarkastamaan kuormakirjan tiedot sekä tutustumaan asiakaskappaleen kääntöpuolella oleviin ohjeisiin.

Rudus Oy
Pronsitie 1, 00440 Helsinki
www.rudus.fi

Kotipaikka: Helsinki

Y-tunnus 1628390-6

SFS 7022



TI 04.04.2017 KUORMAKIRJANUMERO: 6514422 / 20409

Rudus PUS PUH KONALA 0204477800

011 Innohustie 5

Linnoitustie 5

Espoo AUTO 32 HOITAA**

Ajo-ohje ja lisätietoja
050-3397894

RUDUS OY KERITYS/ VESA ANTTILA VBY

sisäinen

PL 49

Asiakasryhmänumero **229385**
002306

NO PEAMMIN PÄÄLLESTETTÄVÄ NP3716mms3 XO

Betonilaatu, -luokka ja käyttöikä **C30/37** Maksimirie **50 v 16MM** Notkeus **S3 / 10-15cm** Sideaineet **PLUS_P SEMENTTI, PIKA_P SEMENTT** Määrä **2 M3**

NOTKISTIN Lisäaineet **HUOKOSTIN** Betonin lisätietoja **NO PEAMMIN PÄÄLLESTETTÄVÄ BETONI**

RUNKOAIINEEN LÄMMITYSLISÄ

Pyörintäsäiliöauto, JJK-764

Valmistusaika **15:03** Perillä klo **15:35** Tilattu betoni-m³ **4 m³** Toimitettu betoni-m³ **4 m³**

Purkaus alkoi **16:35** Purkaus loppui **16:48** Palvelu aika **20**

Laskutettava matka **7** Purkaustapa **7M RÄNNI**

Kuljetuksen lisätietoja

PALVELUAIJAN HYVÄKSYNTÄ: *[Signature]*

TOIMITUKSEN HYVÄKSYNTÄ: *[Signature]*

Häiriö pumpulla Häiriö valussa Muu syy _____

Kulkeuste Hidas valu

PUMPPUTILAUSHUOMAUTUKSIA:

Tilattu klo _____ Alkoi klo _____ Päätyi klo _____ tuntia _____ min. _____

Arvioitu betonimäärä _____ Pumpattu betonimäärä _____

Pystytyspöytäkirja tehty

Koodi	Muut veloitukset	Määrä

TOIMITUKSEN KÄTEISHINTALASKELMA:

VALTUUTUS
Koneenkäyttäjällä/betoniauton kuljettajalla on betonikuormakirjojen kuittausoikeus

Vastaanottajan Tilojen allekirjoitus _____

Valtuutetun kuittaus _____

3. ASIAKAS

Pyydämme vastaanottajaa tarkastamaan kuormakirjan tiedot sekä tutustumaan asiakaskappaleen kääntöpuolella oleviin ohjeisiin.

Rudus Oy Pronsstie 1, 00440 Helsinki www.rudus.fi

Kotipaikka: Helsinki

Y-tunnus 1628390-6

SFS 7922

150 961 150 9485

Rudus

Ti 04.04.2017 KUORMAKIRJANUMERO: 8514428 / 20409

011 Linnoitustie 5 KONALA 0204477800



011 Linnoitustie 5

RUDUS OY KEHITYS/ VESA ANTTILA VBYI

ASIAKAS	Laskutus sisäinen PL 49 Espoo** AUTO 32 HOITAA	Laskutus sisäinen PL 49 Espoo** AUTO 32 HOITAA	Laskutus sisäinen PL 49 Espoo** AUTO 32 HOITAA	Laskutus sisäinen PL 49 Espoo** AUTO 32 HOITAA
	Ajo-ohje ja lisätietoja 050-3397894	Asiakasnro 002308	Yritysno 229385	! FI FI
	Betonilaatu -luokka ja käyttöikä C25/30 50 v 16MM			

BETONI	Betonilaatu -luokka ja käyttöikä C25/30 50 v 16MM	Maksimiree 50 v 16MM	Notkeus S3 / 10-15cm	Sideaineet PLUS_P SEMENTTI, PIKA_P SEMENTT	Määrä 2 M3
	Lisäaineet HUOKOSTIN	Betonin lisäaineita NOPEAMMIN PÄÄLLYSTETTÄVÄ BETONI	Betonin lisäaineita NOPEAMMIN PÄÄLLYSTETTÄVÄ BETONI	Betonin lisäaineita NOPEAMMIN PÄÄLLYSTETTÄVÄ BETONI	Betonin lisäaineita NOPEAMMIN PÄÄLLYSTETTÄVÄ BETONI
	RUNKOAINEEN LÄMMITYSLISÄ				

KULJETUS	Auto -purennytysoyri Pyöritysauto, Nro JJK-784	Laskuttama matka Purkaustapa TM RÄNNI	Valmistusajka 10.37	Perillä klo 17.09	Tilattu betoni-m ³ 2 m ³	Toimitettu betoni-m ³ 2 m ³	Kuljetuksen lisätietoja	
	Purkaus alkoi 17.06	Purkaus lopui 17.02	Palveluajka 20	PALVELUAJAN HYVÄKSYNTÄ:				TOIMITUKSEN HYVÄKSYNTÄ:
	Palveluajan aihe							

PUMPPAUS	Häiriö pumpulla <input type="checkbox"/> Häiriö valussa <input type="checkbox"/> Muu syy	Kulkueste <input type="checkbox"/> Hidas valu <input type="checkbox"/>	PUMPPUTILAUSHUOMAUTUKSIA:				
	Tilattu klo Arvioitu betonimäärä	Alkoi klo Pumpattu betonimäärä	Päätyi klo Pumpattu betonimäärä	tuntia	min.	TOIMITUKSEN KÄTEISHINTALASKELMA:	
	Pystytyspöytäkirja tehty <input type="checkbox"/>						TOIMITUKSEN KÄTEISHINTALASKELMA:
	Koodi	Muut veikoitukset	Määrä				TOIMITUKSEN KÄTEISHINTALASKELMA:
	VALTUUTUS Konekäyttäjällä/betoniauton kuljettajalla on betonikuormakirjojen kuittausoikeus						
	Vastaanottajan Tilajan allekirjoitus						

Pyydämme vastaanottajaa tarkastamaan kuormakirjan tiedot sekä tutustumaan asiakaskappaleen kääntöpuolella oleviin ohjeisiin.

Rudus Oy
 Pronssitie 1, 00440 Helsinki
 www.rudus.fi

Kotipaikka: Helsinki Y-tunnus 1628390-6

SFS 7022



LIITE E: OHUTHIE TUTKIMUSRAPORTTI TT2502, VAHANEN RAKENNUSFYSIIKKA OY



Tutkimusselostus TT 2502
Timo Korkalan DI-työ,
ohuthietutkimus

24.1.2018

Timo Korkalan DI-työ, ohuthietutkimus

1 Näytteet

21 koekappaleista poraamalla irrotettua betoninäytettä.

2 Tutkimukset ja menetelmä

Ohuthietutkimuksia varten näytteistä valmistettiin petrografiset ohuthieet näytteiden ulkopinnasta alkaen, pinnan suuntaa vasten kohtisuorassa suunnassa noin 55 mm:n syvyydelle betoniin. Ohuthieiden koko on 35 x 55 mm.

Ohuthieiden preparointi- ja tutkimusmenetelmä on esitetty mm. standardeissa ASTM C856 ja NT Build 381. Ohuthiepreparointi tehdään siten, että tutkittavasta betonista sahataan näyteaihiio, joka on ohuthieen kokoinen (n. 35x55 mm) ja paksuudeltaan noin 10 mm. Kappale impregnoidaan alipaineessa epoksilla, johon on lisätty fluoresoivaa väriainetta. Kappaleen toinen lapepinta hiotaan tasoon ja liimataan ohuthielasille. Tämän jälkeen näyte sahataan alle 1 mm:n paksuuteen ja tarkkuushiotaan timanttihionnalla lopulliseen paksuuteen, joka on 0,03 mm.

Ohuthieet tutkitaan yhdistetyllä polarisaatio- ja fluoresenssimikroskoopilla. Polarisaatiopuolella (POL) valaistuksena käytetään joko normaalia (polarisoimatonta) halogeenivaloa tai ristiin polarisoitua valaistusta. POL-mikroskopiolla tutkitaan betonien yleisrakenne, koostumus ja huokosrakenne. Suuremmilla suurennuksilla voidaan tutkia sementtikiven rakennetta ja sideaineen koostumusta sekä kiteytyviä betonin huokosissa ja halkeamissa.

Fluoresenssi- (FLU-) mikroskopiolla tutkitaan näytteiden huokosrakennetta, halkeilua sekä sementtikiven kapillaarihuokoisuutta ja vesi-sementtisuhdetta. FLU-mikroskopiassa valonlähteenä on näytteeseen impregnoitu fluoresoiva aine, jonka valon intensiteetin perusteella arvioidaan tutkittavan materiaalin, kuten sementtikiven huokoisuutta.

Ohuthietutkimuksissa käytettävät suurennukset ovat tavallisesti 10x...400x.

Ohuthienäytteet tutkittiin Nikon E600- ja Leica DM2700P –polarisaatio- ja fluoresenssimikroskoopeilla.

3 Tulokset

Ohuthietutkimustulokset esitetään taulukossa 1.

Tämän dokumentin saa kopioida vain kokonaan, ellei yritys ole antanut kirjallista lupaa osittaiseen kopiointiin.

24.1.2018

Taulukko 1. Ohuthietutkimustulokset.

Näyte	Tutkimusikä, d	Betonin rakenne	Suojahuokokset, % a)	Tiivistys-huokokset	Sementtikiven tiiveys (kapillaariisuus)	Halkeamat
13A30	45	Homogeeninen	7 – 8 b)	Vähän	Melko tiivis	Ei
35B30	45	Hieman epähomogeeninen	6 – 7	Vähän	Melko tiivis	Ei
57C30	45	Hieman epähomogeeninen	10 – 12	Kohtalaisesti	Huokoinen	Ei
20A60	45	Hieman epähomogeeninen	9 – 11	Jonkin verran	Melko tiivis	Ei
42B60	45	Homogeeninen	8 – 9	Vähän	Melko tiivis	Ei
64C60	45	Hieman epähomogeeninen	10 – 12	Kohtalaisesti	Huokoinen	Ei
81A23	45	Melko homogeeninen	7 – 9	Vähän	Melko tiivis	Ei
84B23	45	Homogeeninen	8 – 9	Vähän	Melko tiivis	Ei
87C23	45	Hieman epähomogeeninen	11 – 13	Jonkin verran	Huokoinen	Ei
22A60	90	Hieman epähomogeeninen	9 – 10	Vähän	Hieman huokoinen	Ei
44B60	90	Homogeeninen	8 – 10	Vähän	Hieman huokoinen	Ei
66C60	90	Hieman epähomogeeninen	10 – 12	Jonkin verran	Huokoinen	Ei
81A23	180	Melko homogeeninen	6 – 7	Erittäin vähän	Tiivis	Jonkin verran & tasaisesti + c)
84B23	180	Homogeeninen	7 – 8	Erittäin vähän	Tiivis	Jonkin verran & tasaisesti + d)
87C23	180	Melko homogeeninen	8 – 10	Jonkin verran	Tiivis	Ei
18A30	180	Melko homogeeninen	6 – 7	erittäin vähän	Tiivis	Erittäin vähän

Tämän dokumentin saa kopioida vain kokonaan, ellei yritys ole antanut kirjallista lupaa osittaiseen kopiointiin.

24.1.2018

Näyte	Tutkimusikä, d	Betonin rakenne	Suojahuokokset, % a)	Tiivistyshuokokset	Sementtikiven tiiveys (kapillaarisuus)	Halkeamat
40B30	180	Homogeeninen	7 – 8	Vähän	Tiivis	Erittäin vähän
62C30	180	hieman epähomogeeninen	10 – 11 e)	Vähän	Tiivis	Ei
80A5	180	Homogeeninen	7 – 8	Vähän	Tiivis	Jonkin verran & tasaisesti + f)
83B5	180	Homogeeninen	7 – 8	Vähän	Tiivis	Jonkin verran & tasaisesti + g) h)
86C5	180	Melko homogeeninen	8 – 10	Vähän	Tiivis	Erittäin vähän

- a) suojahuokosilmamäärä arvioitu silmämääräisesti
 b) todellinen ilmamäärä määritetty point count –analyysillä, tulos 8,2%
 c) ulkopinnassa noin 10 mm:n syvyyteen vain muutama särö
 d) ulkopinnassa 10 – 15 mm:n syvyyteen erittäin vähän
 e) todellinen ilmamäärä määritetty point count –analyysillä, tulos 11,0%
 f) ulkopinnassa 5 – 10 mm:n syvyyteen ei
 g) voimakkain halkeilu tässä näytteessä
 h) ulkopinnassa 5 mm:n syvyyteen ei

Keskeiset tutkimustulokset ovat:

- betonien makrorakenteessa ei ole suuria eroja
- betonien makrorakenne vaihtelee homogeenisesta hieman epähomogeeniseen
- kaikkien näytteiden betoni on melko runsaasti – runsaasti suojahuokostettua
- A- ja B- massojen näytteissä suojahuokosilmaa on noin 8 %
- C- massojen näytteissä suojahuokosilmaa on noin 10 %
- suojahuokosilmamäärät ovat A- ja B-näytteissä hieman yli suunnitellun (7%) ja C-näytteissä selvästi yli suunnitellun
- tiivistyshuokosten määrissä on pieniä, mutta ei merkittäviä eroja
- sementtikiven tiiveydessä (kapillaarisuudessa) on selkeitä eroja:
 - 45 d iässä tutkituissa A- ja B-näytteissä, sekä 30 että 60 astetta, sementtikivi on melko tiivis, eli kapillaarisuus pienehkö, kun taas C-näytteiden sementtikivi on huokoinen, eli kapillaarisuus on suuri
 - ero johtuu siitä, että C-massan vesi-sementtisuhte (v/s) on suurempi, kuin A- ja B-massoilla (C: v/s = 0,64, A&B: v/s = 0,45)

Tämän dokumentin saa kopioida vain kokonaan, ellei yritys ole antanut kirjallista lupaa osittaiseen kopiointiin.

24.1.2018

- yllättävä/poikkeava tulos on se, että 90 d iässä A- ja B-näytteiden huokoisuus (kapilaarisuus) on aavistuksen suurempi, kuin 45 d näytteissä, vaikka pidemmästä hydrataatioajasta sen tulisi olla pienempi
- 90 d iässä C-massan näytteissä sementtikivi on huokoinen, eli kapillaarisuus on suuri
- 180 d iässä kaikkien näytteiden sementtikivi on tiivis, eli kapillaarisuus pieni, riippumatta massasta tai säilytysolosuhteista, eli hydrataatio on näissä edennyt niin pitkälle, että sementtikiven tiivistyminen näkyy tuloksessa selkeästi
- halkeilun määrässä näytteiden välillä on selkeitä eroja:
 - 45 d ja 90 d näytteissä ei massasta (A, B, C) tai säilytysolosuhteista riippumatta todettu halkeilua yhdessäkään näytteessä.
 - Tulos on sinänsä yllättävä, sillä pientä kutistumasäröilyä esiintyy yleensä aina edes pienessä määrin
 - 180 d ikäisistä näytteistä tutkittiin sarjat A/B/C23, A/B/C30 ja A/B/C5
 - 23-sarjan näytteissä A ja B todettiin jonkin verran tasaista, lyhyttä, epäjatkovaa kutistumahalkeilua (kemiallinen kutistuma). C-näytteessä ei halkeilua todettu
 - 30-sarjan näytteissä A ja B todettiin erittäin vähän tasaista, lyhyttä, epäjatkovaa halkeilua. Määrä siis pienempi, kuin 23-sarjan näytteissä. C-näytteessä ei halkeilua todettu
 - 5-sarjan näytteissä A ja B todettiin jonkin verran tasaista, lyhyttä, epäjatkovaa kutistumahalkeilua, eli A- ja B-sarjojen halkeilu vastaa 23-sarjan halkeilua. 180/B5-näytteen halkeilu oli koko näytesarjan voimakkainta. C-näytteessä halkeilua todettiin erittäin vähän

Espoossa 24.1.2018



Hannu Pyy, TkL
Erityisasiantuntija

Tämän dokumentin saa kopioida vain kokonaan, ellei yritys ole antanut kirjallista lupaa osittaiseen kopiointiin.

LIITE F: MITTAUSPÖYTÄKIRJA TEHDYISTÄ KOSTEUSMITTAUKSISTA

Porareikämittaukset

23 °C / 50%rh (jälkihoito 7 vrk. muovilla)

Betonilaatu		Betoni A				Betoni B				Betoni C				
Ajankohta	Syvyys	Putki 1	Putki 2	Putki 3	ka.	Putki 1	Putki 2	Putki 3	ka.	Putki 1	Putki 2	Putki 3	ka.	
		RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	
0 - 1 kk	3 vrk (Näpa)	30 mm	92,4	95,4	94,1	94,0	93,6	93,9	94,0	93,8	99,9	99,9	99,9	99,9
		70 mm	94,9	93,4	94,1	94,1	93,4	95,0	93,1	93,8	99,9	98,2	99,9	99,3
		100 mm	94,1	95,0	93,8	94,3	94,5	93,1	93,2	93,6	99,9	98,5	99,9	99,4
	7 vrk (Näpa)	30 mm	93,4	91,7	94,2	93,1	92,5	91,3	93,0	92,3	96,9	97,3	96,8	97,0
		70 mm	92,9	93,4	93,3	93,2	92,1	93,6	92,4	92,7	97,1	99,9	99,9	99,0
		100 mm	93,7	92,6	93,1	93,1	94,5	93,0	93,4	93,6	96,7	96,5	96,0	96,4
	14 vrk	30 mm	85,7	86,7	86,7	86,4	84,4	84,4	85,7	84,8	92,8	90,3	91,1	91,4
		70 mm	88,4	87,0	87,0	87,5	87,5	86,3	87,4	87,1	95,8	93,4	94,9	94,7
		100 mm	87,4	86,1	86,1	86,5	88,0	87,2	86,4	87,2	93,9	94,2	93,9	94,0
30 vrk	30 mm	80,2	83,0	82,9	82,0	80,4	80,9	82,1	81,1	88,0	85,7	85,4	86,4	
	70 mm	85,2	84,8	87,5	85,8	85,9	85,9	86,6	86,1	93,3	90,8	91,5	91,9	
	100 mm	88,3	85,7	88,4	87,5	87,2	87,6	86,6	87,1	91,4	92,4	92,1	92,0	
1 - 3 kk	45 vrk	30 mm	80,7	81,9	81,9	81,5	80,6	80,2	80,9	80,6	86,7	84,7	84,0	85,1
		70 mm	87,1	84,6	85,2	85,6	86,3	85,3	85,5	85,7	92,6	91,1	91,0	91,6
		100 mm	86,5	84,6	85,2	85,4	86,3	85,3	85,9	85,8	91,6	91,4	91,7	91,6
	60 vrk	30 mm	79,0	80,1	80,1	79,7	79,1	78,8	79,1	79,0	83,5	82,5	81,3	82,4
		70 mm	84,1	84,1	84,3	84,2	84,3	84,6	84,6	84,5	92,1	88,4	89,6	90,0
		100 mm	85,9	83,5	84,7	84,7	85,6	85,1	85,2	85,3	89,6	89,4	90,8	89,9
	70 vrk	30 mm	76,4	77,9	81,4	78,6	77,7	78,9	78,3	78,3	80,3	79,3	79,4	79,7
		70 mm	84,7	84,2	84,4	84,4	84,2	84,7	83,6	84,2	86,7	86,0	87,1	86,6
		100 mm	86,2	85,8	85,2	85,7	85,4	85,1	87,4	86,0	86,7	87,1	88,8	87,5
90 vrk	30 mm	77,2	78,2	77,4	77,6	78,5	77,9	77,8	78,1	79,7	80,0	80,5	80,1	
	70 mm	82,8	83,5	83,5	83,3	84,5	84,5	84,3	84,4	85,7	87,2	85,6	86,2	
	100 mm	84,9	85,0	85,2	85,0	84,0	86,1	85,0	85,0	86,1	87,2	88,3	87,2	
3 - 6 kk	120 vrk	30 mm	74,1	75,1	75,9	75,0	75,7	76,3	75,7	75,9	77,1	76,9	76,8	76,9
		70 mm	81,7	81,3	81,1	81,4	81,5	81,4	78,5	80,5	83,3	82,6	81,4	82,4
		100 mm	84,1	82,4	82,5	83,0	83,2	82,8	82,4	82,8	84,5	83,8	84,3	84,2
	150 vrk	30 mm	73,0	73,8	74,9	73,9	75,4	74,4	75,0	74,9	74,0	74,0	74,5	74,2
		70 mm	81,2	78,3	79,6	79,7	79,8	81,0	78,8	79,9	82,5	80,4	79,6	80,8
		100 mm	80,3	81,5	81,4	81,1	79,9	81,9	80,1	80,6	83,5	82,4	82,7	82,9
	180 vrk	30 mm	72,3	74,8	74,8	74,0	73,2	75,0	73,6	73,9	74,0	73,9	74,7	74,2
		70 mm	78,4	79,3	78,5	78,7	79,9	80,0	79,6	79,8	82,7	80,6	80,7	81,3
		100 mm	78,8	80,5	78,6	79,3	78,5	79,1	78,5	78,7	82,0	80,4	81,5	81,3

23 °C / 50%rh (0-1 kk os. 5 °C / ~90%rh)

Betonilaatu		Betoni A				Betoni B				Betoni C				
Ajankohta	Syvyys	Putki 1	Putki 2	Putki 3	ka.	Putki 1	Putki 2	Putki 3	ka.	Putki 1	Putki 2	Putki 3	ka.	
		RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	
1 - 3 kk	37 vrk	30 mm	84,0	86,9	85,2	85,4	84,2	85,1	85,1	84,8	89,9	89,7	90,2	89,9
		70 mm	88,7	92,0	88,6	89,8	88,7	91,1	88,4	89,4	93,9	93,1	92,7	93,2
		100 mm	89,8	89,0	90,9	89,9	89,1	90,7	88,5	89,4	93,6	94,4	94,4	94,1
	45 vrk	30 mm	84,6	82,8	83,9	83,8	82,2	83,1	83,5	82,9	88,3	85,7	87,7	87,2
		70 mm	87,0	87,7	89,4	88,0	89,0	88,5	89,5	89,0	91,8	92,5	91,3	91,9
		100 mm	87,6	89,7	90,3	89,2	89,3	88,8	88,6	88,9	92,0	92,1	92,8	92,3
	60 vrk	30 mm	80,3	78,4	82,4	80,4	79,4	79,1	82,6	80,4	83,9	81,7	83,5	83,0
		70 mm	84,1	88,5	87,8	86,8	87,7	87,4	85,6	86,9	89,7	90,0	89,4	89,7
		100 mm	88,4	88,6	89,9	89,0	86,8	88,0	87,6	87,5	90,9	90,8	89,6	90,4
70 vrk	30 mm	78,5	79,3	80,5	79,4	79,4	78,6	79,8	79,3	83,8	80,5	81,1	81,8	
	70 mm	84,8	85,5	87,2	85,8	87,2	86,7	85,1	86,3	87,8	87,9	88,8	88,2	
	100 mm	87,8	87,2	88,6	87,9	88,4	88,1	86,8	87,8	90,6	90,5	90,6	90,6	
90 vrk	30 mm	78,6	76,7	77,6	77,6	79,5	77,6	74,2	77,1	83,1	78,6	80,1	80,6	
	70 mm	84,2	84,3	84,3	84,3	85,1	85,9	86,1	85,7	85,8	84,0	85,6	85,1	
	100 mm	85,5	86,3	88,8	86,9	85,2	86,7	86,4	86,1	88,4	86,8	88,0	87,7	
3 - 6 kk	120 vrk	30 mm	76,2	74,7	75,9	75,6	75,4	76,2	76,3	76,0	78,6	74,5	78,1	77,1
		70 mm	82,7	80,8	80,9	81,5	82,6	81,2	79,6	81,1	82,8	83,2	83,5	83,2
		100 mm	83,3	84,4	84,9	84,2	82,5	82,0	84,4	83,0	85,2	84,6	84,2	84,7
	150 vrk	30 mm	75,2	74,7	75,2	75,0	73,4	74,8	74,0	74,1	76,9	73,2	76,6	75,6
		70 mm	76,6	78,3	81,0	78,6	80,3	80,8	79,6	80,2	79,6	81,7	79,4	80,2
		100 mm	79,9	77,8	82,4	80,0	81,1	80,1	81,9	81,0	83,6	81,9	83,9	83,1
	180 vrk	30 mm	73,3	72,7	73,4	73,1	73,5	74,4	73,2	73,7	77,7	72,4	75,3	75,1
		70 mm	79,1	79,8	79,8	79,6	80,8	80,6	79,2	80,2	81,5	81,3	81,4	81,4
		100 mm	79,3	77,7	80,8	79,3	81,2	81,2	79,3	80,6	83,6	82,6	82,2	82,8

Näytepalamittaukset

5 °C / ~90%rh		mittauksia				mittauksia								
Betoni laatu		Betoni A				Betoni B				Betoni C				
Ajankohta	Syvyys	NP 1	NP 2	NP 3	ka.	NP 1	NP 2	NP 3	ka.	NP 1	NP 2	NP 3	ka.	
		RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	
0 - 1 kk	7 vrk	30 mm	93,9	94,2	94,4	94,2	95,4	95,0	94,6	95,0	98,6	98,3	98,2	98,4
		70 mm	94,8	94,1	94,5	94,5	94,1	93,9	94,0	94,0	98,3	99,9	98,7	99,0
		100 mm	94,9	95,7	95,7	95,4	94,5	94,7	93,9	94,4	99,4	99,9	99,9	99,7
30 vrk	30 mm	30 mm	92,7	92,4	93,4	92,8	93,0	93,4	90,6	92,3	97,0	97,5	96,6	97,0
		70 mm	95,5	93,6	95,7	94,9	92,9	92,8	94,9	93,5	98,3	97,0	95,7	97,0
		100 mm	96,0	94,7	94,6	95,1	94,6	95,4	94,7	94,9	98,5	97,3	96,9	97,6
1 - 3 kk	90 vrk	30 mm	89,2	89,6	89,8	89,5	86,9	88,4	88,0	87,8	92,1	89,8	88,9	90,3
		70 mm	92,6	92,6	93,6	92,9	89,0	91,8	91,5	90,8	94,3	96,1	96,9	95,8
		100 mm	94,3	93,5	92,4	93,4	92,1	90,6	90,8	91,2	95,8	95,4	95,5	95,6
3 - 6 kk	180 vrk	30 mm	88,8	88,4	87,0	88,1	83,5	85,4	86,1	85,0	87,3	87,3	87,6	87,4
		70 mm	92,9	92,8	93,7	93,1	91,5	92,1	91,8	91,8	94,6	95,3	93,7	94,5
		100 mm	92,7	94,1	91,5	92,8	92,1	93,0	90,4	91,8	94,8	94,9	95,9	95,2

30 °C / ~50%rh		(0-1 kk os. 5 °C / ~90%rh)				mittauksia				mittauksia				
betoni		Betoni A				Betoni B				Betoni C				
Ajankohta	Syvyys	NP 1	NP 2	NP 3	ka.	NP 1	NP 2	NP 3	ka.	NP 1	NP 2	NP 3	ka.	
		RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	
1 - 3 kk	45 vrk	30 mm	85,1	84,9	85,9	85,3	82,5	82,7	83,3	82,8	86,3	87,2	86,7	86,7
		70 mm	86,2	87,8	87,4	87,1	87,6	87,3	86,2	87,0	93,5	93,3	92,6	93,1
		100 mm	89,1	87,8	87,0	88,0	88,6	87,1	86,9	87,5	93,1	93,6	96,5	94,4
60 vrk	30 mm	30 mm	79,6	81,4	79,2	80,1	79,3	78,7	79,4	79,1	82,1	83,2	83,1	82,8
		70 mm	85,7	93,7	85,0	85,4	85,5	85,4	85,0	85,3	91,2	91,0	91,0	91,1
		100 mm	85,9	87,0	86,0	86,3	86,0	86,5	86,0	86,2	92,0	93,5	91,6	92,4
90 vrk	30 mm	30 mm	72,6	73,9	77,0	74,5	61,1	76,1	75,4	70,9	76,4	76,3	76,5	76,4
		70 mm	83,6	83,3	83,9	83,6	83,5	82,2	82,7	82,8	87,4	89,2	89,0	88,5
		100 mm	83,9	84,7	85,2	84,6	86,1	84,8	82,0	84,3	90,9	90,1	90,8	90,6
3 - 6 kk	120 vrk	30 mm	70,8	68,6	70,7	70,0	68,8	71,6	70,5	70,3	73,3	71,3	74,7	73,1
		70 mm	81,0	82,8	81,3	81,7	82,3	80,9	80,4	81,2	84,8	83,9	84,6	84,4
		100 mm	83,2	83,6	84,4	83,7	82,6	83,2	83,3	83,0	86,6	86,0	86,6	86,4
150 vrk	30 mm	30 mm	70,8	71,5	70,1	70,8	71,6	72,9	71,3	71,9	69,2	68,5	68,3	68,7
		70 mm	79,9	79,9	81,7	80,5	80,2	80,5	81,6	80,8	82,3	83,9	82,5	82,9
		100 mm	82,7	82,7	82,3	82,6	81,3	82,3	82,5	82,0	85,2	85,2	85,9	85,4
180 vrk	30 mm	30 mm	65,4	64,8	66,3	65,5	63,9	64,0	65,0	64,3	65,1	63,2	63,8	64,0
		70 mm	80,1	79,2	79,9	79,7	80,2	77,8	78,9	79,0	80,3	81,9	79,0	80,4
		100 mm	81,8	82,5	81,5	81,9	80,3	80,9	80,0	80,4	84,7	83,7	86,5	85,0

60 °C / ~50%rh		(0-1 kk os. 5 °C / ~90%rh)				mittauksia				mittauksia				
betoni		Betoni A				Betoni B				Betoni C				
Ajankohta	Syvyys	NP 1	NP 2	NP 3	ka.	NP 1	NP 2	NP 3	ka.	NP 1	NP 2	NP 3	ka.	
		RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	RH [%]	
1 - 3 kk	37 vrk	30 mm	72,3	70,4	74,5	72,4	77,7	78,5	76,8	77,7	84,3	83,0	85,8	84,4
		70 mm	84,6	84,1	85,2	84,6	86,6	86,9	85,8	86,4	93,1	92,5	91,1	92,2
		100 mm	87,6	87,0	85,5	86,7	88,6	86,9	87,8	87,8	93,5	93,6	92,4	93,2
45 vrk	30 mm	30 mm	75,7	76,1	74,4	75,4	73,3	73,9	73,4	73,5	79,0	78,8	78,3	78,7
		70 mm	89,0	86,1	86,4	87,2	86,8	88,3	86,2	87,1	90,9	90,7	90,7	90,8
		100 mm	88,5	86,6	89,4	88,2	87,6	86,3	85,0	86,3	92,9	91,5	91,2	91,9
60 vrk	30 mm	30 mm	47,4	46,0	48,6	47,3	47,7	48,9	49,0	48,5	38,4	38,2	36,6	37,7
		70 mm	79,3	79,0	80,6	79,6	81,3	81,2	79,9	80,8	78,3	80,5	78,3	79,0
		100 mm	82,3	80,8	84,1	82,4	81,9	81,6	82,3	81,9	83,7	83,8	83,8	83,8
90 vrk	30 mm	30 mm	27,0	26,4	24,5	26,0	33,7	31,2	31,8	32,2	26,9	28,0	27,6	27,5
		70 mm	65,7	66,3	68,0	66,7	69,7	69,7	70,2	69,9	61,6	61,3	60,7	61,2
		100 mm	72,6	74,6	74,7	74,0	76,5	75,8	76,2	76,2	71,1	72,8	73,5	72,5

LIITE G: PURISTUSLUJUUKSIEN TESTAUSSELOSTUS, OAMK



TESTAUSSELOSTUS OAMK- BT- 712- 17

24.11.2017

SFS-EN 12504-1. Betonin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut koekappaleet. Puristuslujuuden testaus

Kohde: RAFY 1037 / TT2502

Tilaaaja: Vahanen Rakennusfysiikka Oy
Linnoitustie 5
02600 ESPOO

Tilaaaja Vahanen Rakennusfysiikka Oy
 Linnoitustie 5
 02600 ESPOO

Tilaus 17.11.2017, saapunut 21.11.2017

Yhteyshenkilö Oulun ammattikorkeakoulu Oy:ssä

Pertti Uhlbäck, laboratoriomestari
 Kotkantie 1, 90250 Oulu
 Puh. 040 563 0950
 Sähköposti: pertti.uhlback@oamk.fi



Tehtävä **SFS-EN 12504-1. Betonin testaus rakenteista. Osa 1:
 Poratut koekappaleet. Puristuslujuuden testaus (25.5.2009)**

Näytteet Tilaaajan 21.11.2017 Oamkille toimittamat rakennekoekappaleet 18 kpl,
 Ø noin 49,2 mm, pituus noin 48,4 – 50,2 mm.

Kohde RAFY 1037 / TT2502

Tilaaajan lisätietoja Kohteen laboratorio tunnus: TT2502

Oamkin lisätietoja Puristuspinnat on tasoitettu rikkiseosmenetelmällä ja testauksessa käytetty erillistä apuniveltä.

Koekappaleita on säilytetty ennen testausta laboratoriossa suojaamattomana ilmasäilytyksessä vuorokausi. Pintakosteustila testaushetkellä: kuiva.

Testaustulokset

Tunnus	Halkaisija Ø mm	Voima kN	Lieriö- lujuus ¹⁾ MPa	Kuutio- lujuus ²⁾ MPa	Tiheys kg/m ³	Pituuden / halkaisijan suhde	Arvioitu max raekoko ³⁾ mm	Testauspäivä
A 5-1	49,2	108	56,9		2160	1,0	12	22.11.2017
A 5-2	49,1	104	54,7		2200	1,0	13	22.11.2017
A 5-3	49,1	103	54,5		2180	1,0	12	22.11.2017
B 5-1	49,1	108	57,2		2220	1,0	13	22.11.2017
B 5-2	49,2	109	57,5		2170	1,0	11	22.11.2017
B 5-3	49,2	114	60,1		2200	1,0	13	22.11.2017
C 5-1	49,2	70	36,6		2110	1,0	13	22.11.2017
C 5-2	49,1	70	37,1		2130	1,0	15	22.11.2017
C 5-3	49,2	70	37,0		2070	1,0	17	22.11.2017
A 23-1	49,2	110	57,8		2210	1,0	15	22.11.2017
A 23-2	49,2	104	54,9		2190	1,0	16	22.11.2017
A 23-3	49,2	119	62,4		2160	1,0	14	22.11.2017
B 23-1	49,3	119	62,3		2190	1,0	14	22.11.2017
B 23-2	49,2	117	61,7		2210	1,0	18	22.11.2017
B 23-3	49,2	115	60,6		2240	1,0	11	22.11.2017
C 23-1	49,2	76	40,1		2060	1,0	13	22.11.2017
C 23-2	49,2	73	38,3		2080	1,0	11	22.11.2017
C 23-3	49,3	76	40,1		2090	1,0	13	22.11.2017

- 1) Lujuudet ovat ilmoitettu Ø 49,1 – 49,3 mm lieriölujuuksina.
- 2) Lieriölujuustulosta ei voi muuttaa 150mm kuutiolujuudeksi, koska halkaisija on pienempi kuin 50mm betoninormit 2016 (by 65), kohdan 5.2.3.2 ohjeen mukaisesti.
- 3) Maksimiraekoko on arvioitu koekappaleen ulkopinnasta.

Oulu, 24.11.2017



 Hannu Kääriäinen
 Laboratorionjohtaja



 Pertti Uhlbäck
 Laboratoriomestari

Jakelu

 Tilaaja, alkuperäinen
 Oamk, arkisto, alkuperäinen

LIITE H: LASKENTAMUISTIO, VAHANEN RAKENNUSFYYSIIKKA OY



Laskentamuistio
Koekappaleiden laskennalliset tarkastelut, Timo Korkalan DI-työ

15.5.2018

Koekappaleiden laskennalliset tarkastelut, Timo Korkalan DI-työ

Laskentamuistio

1 Lähtötiedot

Laskentamuistiossa esitetään vain laskentatulokset. Diplomityön tekijä tarkastelee tulokset ja tekee niiden perusteella johtopäätökset. Diplomityön kokeellisen osan koekappaleita vastaavien betonikappaleiden kuivumista valun jälkeen mallinnettiin COMSOL -multiphysics laskentaohjelman versiolla 5.3a. Koekappaleet olivat halkaisijaltaan 250 mm ja 200 mm korkeita betonilieriöitä. Koska koekappaleiden sivujen kautta ei tapahdu kosteudensiirtoa ja koekappaleet pääsevät kuivumaan vain ylä- ja alapintojensa kautta, tarkastelu tehtiin 1D-mallinnuksena.

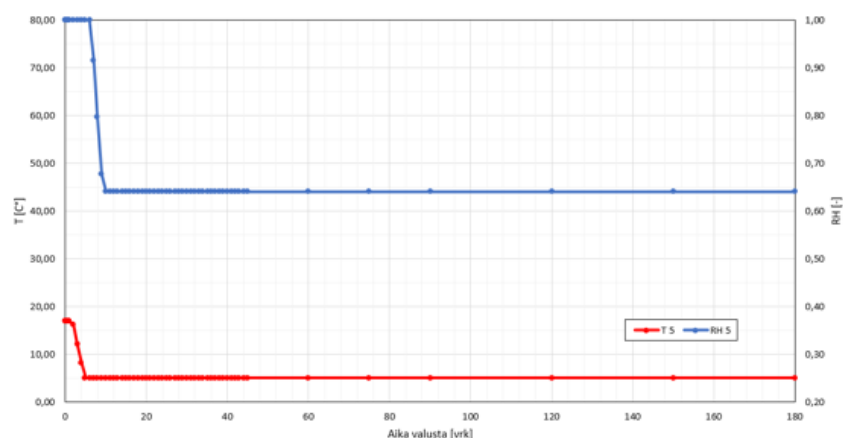
2 Laskentamalli ja reunaehdot

Laskentamalli

Laskenta tehtiin laskentamallilla, joka perustuu Vahasen ja Comsolin kehittämään malliin. Laskentamallia on esitelty NSB2017 -seminaarissa, sekä Rakennusfysiikka –seminaarissa 2017. Mallia on parannettu pääosin materiaaliominaisuuksien suhteen, jotta lämpötilan vaikutus kuivumiseen on saatu huomioitua paremmin. Koekappaleiden kuivumisen mallintaminen tehtiin kaikissa laboratoriokokeissa käytetyissä olosuhteissa kaikille kolmelle betonilaadulle.

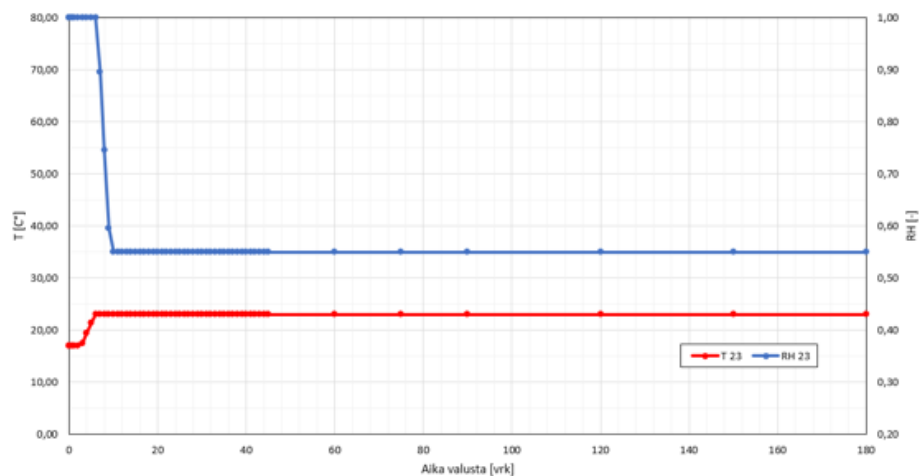
Reunaehdot

Laskennan reunaehtoina käytettiin diplomityössä mitattuja toteutuneita kuivatusolosuhdekohtaisia lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja. Käytännön syistä reunaehtoja ei syötetty malliin samalla tarkkuudella, kuin millä ne on mitattu diplomityön yhteydessä. Käytetyt reunaehdot olivat keskiarvoltaan vastaavia kuin diplomityössä mitatut lämpötilat ja suhteellisen kosteuden arvot, mutta päivä ja tuntikohtaista vaihtelua ei lisätty laskennan reunaehtoihin. Merkittävimmät olosuhdemuutokset otettiin huomioon. Reunaehtoina käytetyt olosuhdekuvaajat on esitetty liitteessä kuvissa 2.1-2.5.

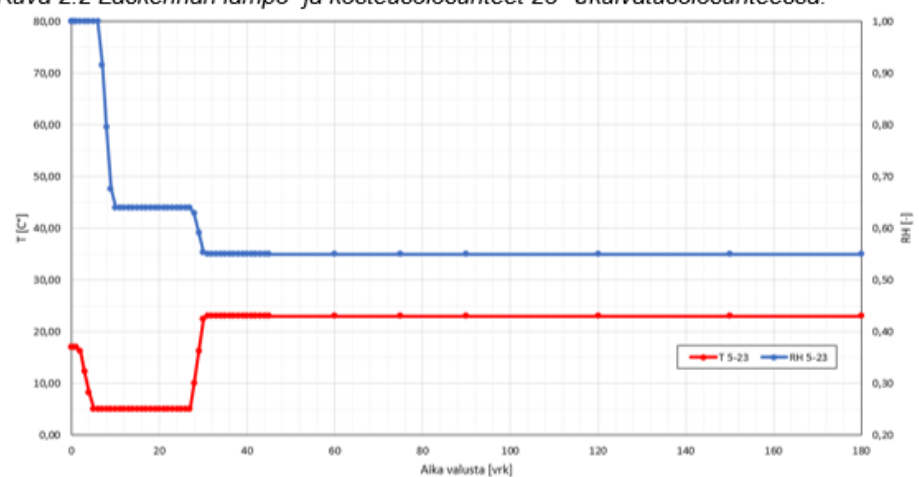


Kuva 2.1 Laskennan lämpö- ja kosteusolosuhteet 5 °C kuivatusolosuhteessa.

15.5.2018

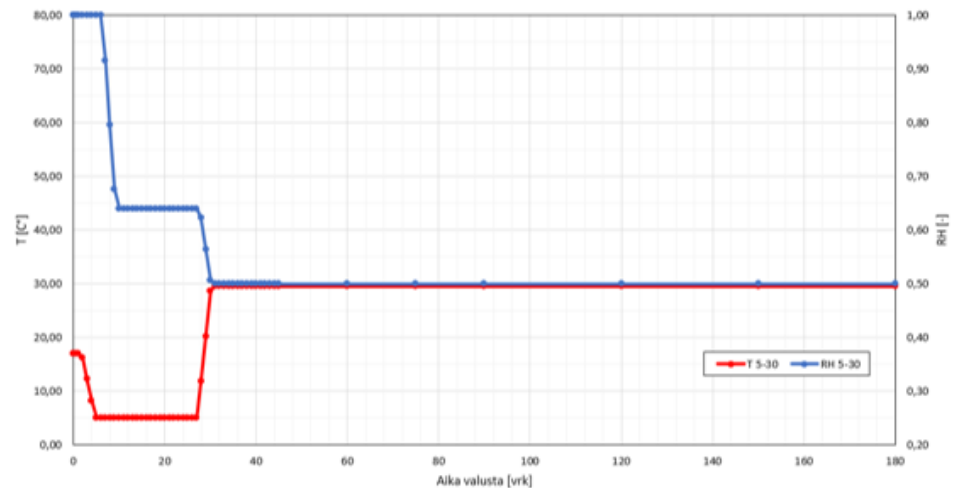


Kuva 2.2 Laskennan lämpö- ja kosteusolosuhteet 23 °Ckuivatusolosuhteessa.

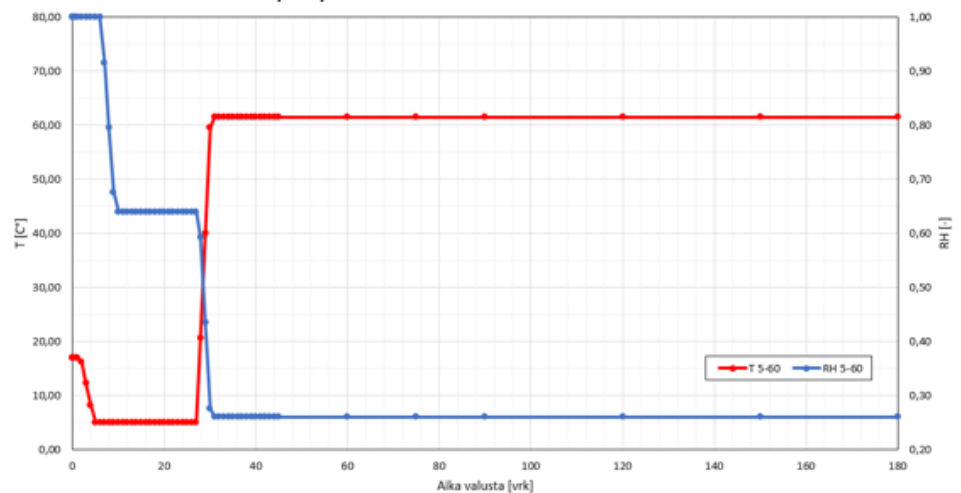


Kuva 2.3 Laskennan lämpö- ja kosteusolosuhteet 5 → 23 °Ckuivatusolosuhteessa.

15.5.2018



Kuva 2.4 Laskennan lämpö- ja kosteusolosuhteet 5 → 30 °C kuivatusolosuhteessa.



Kuva 2.5 Laskennan lämpö- ja kosteusolosuhteet 5 → 60 °C kuivatusolosuhteessa.

Laskennassa käytettävät materiaaliparametrit

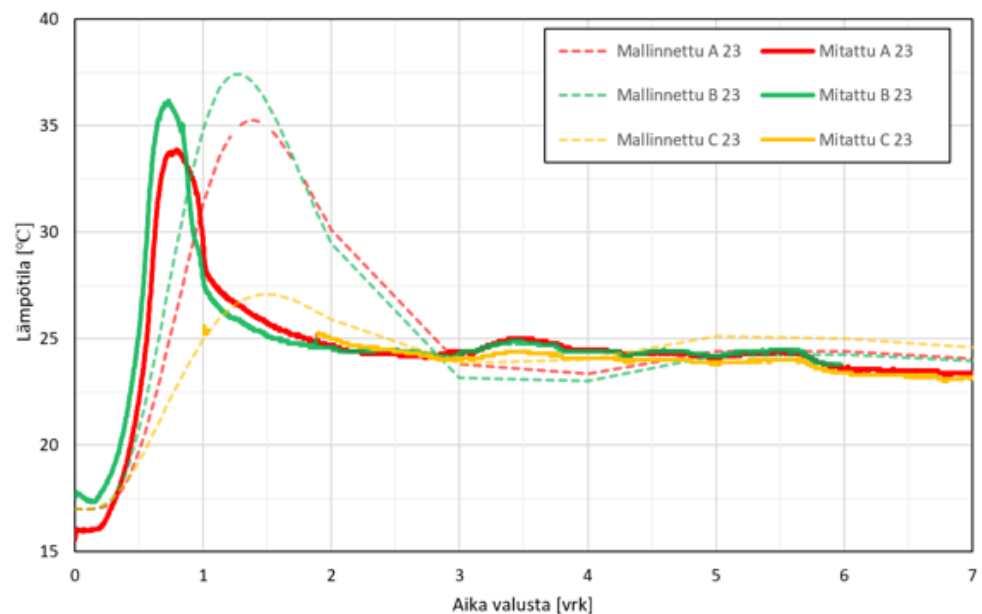
Laskennassa tarvittavat materiaaliparametrit ovat materiaalin lämmönjohtavuus, tiheys, lämpökapasiteetti, diffusiviteetti, vesihöyrynläpäisevyys ja vesipitoisuus. Materiaaliparametrit on valittu betonireseptien perusteella lämpötilasta, kosteudesta sekä hydrataatioasteesta riippuviksi. Koska laskentamallin kehitystyö on kesken, ei materiaaliparametreja esitetä tämän työn yhteydessä.

Hydrataatioon vaikuttavia materiaaliparametreja säädettiin mallinnettujen lämpötilojen ja mitattujen vastaavuuden saavuttamiseksi.

15.5.2018

3 Tulokset

Hydrataation aiheuttama lämmön nousu



Kuva 3.1. Mallinnettu lämpötilan kehitys koekappaleen keskipisteessä ensimmäisen 7 vuorokauden aikana. Kuvassa myös koekappaleista diplomityössä mitatut lämpötilat koekappaleiden keskipisteissä.

Mallinnetut betonin suhteellisen kosteuden kehittyminen

Mallinnetut kuivumistulokset on esitetty suhteellisen kosteuden kehittymisenä samoilla syvyyksillä, joista laboratoriokokeiden kosteusmittaukset tehtiin. Kuvaajissa on esitetty saman kuivumistulokset betonilaaduittain. Jokainen mittaus-/tarkastelusyvyys on esitetty omana kuvaajanaan. Poikkeuksena 60 °C kuivatusolosuhteen tulokset, jotka on esitetty omassa kuvaajassaan. 60 °C kuivatusolosuhteen tarkastelu lopetettiin 90 vuorokauden kohdalla, kuten kyseisen kuivatusolosuhteen kosteusmittauksetkin. Kuvaajissa viivalla esitetty "Calc_boundary X" kuvaa mallinnettua suhteellisen kosteuden arvoa ja pisteillä esitetyt "Meas_boundary X" vastaavia mitattuja suhteellisen kosteuspitoisuuden arvoja.

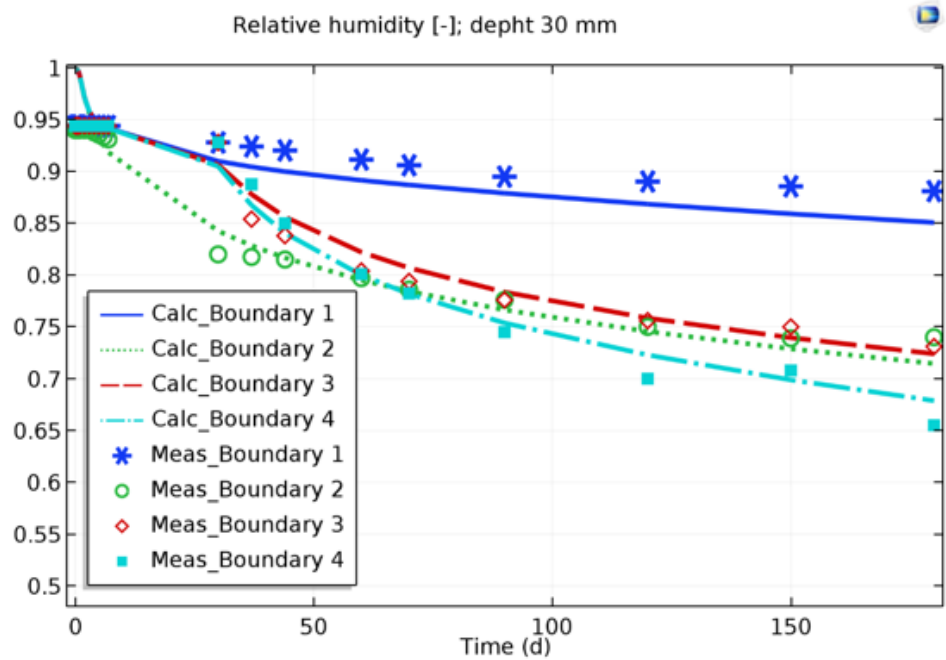
Eri kuivatusolosuhteet on merkitty numeroituina seuraavasti:

- "Boundary 1": 5 °C viileä vakio-olosuhde
- "Boundary 2": 23 °C vakio-olosuhde
- "Boundary 3": Viileästä olosuhteesta 23 °C olosuhteeseen siirretyt koekappaleet
- "Boundary 4": Viileästä olosuhteesta 30 °C olosuhteeseen siirretyt koekappaleet
- "Boundary 5": Viileästä olosuhteesta 60 °C olosuhteeseen siirretyt koekappaleet

15.5.2018

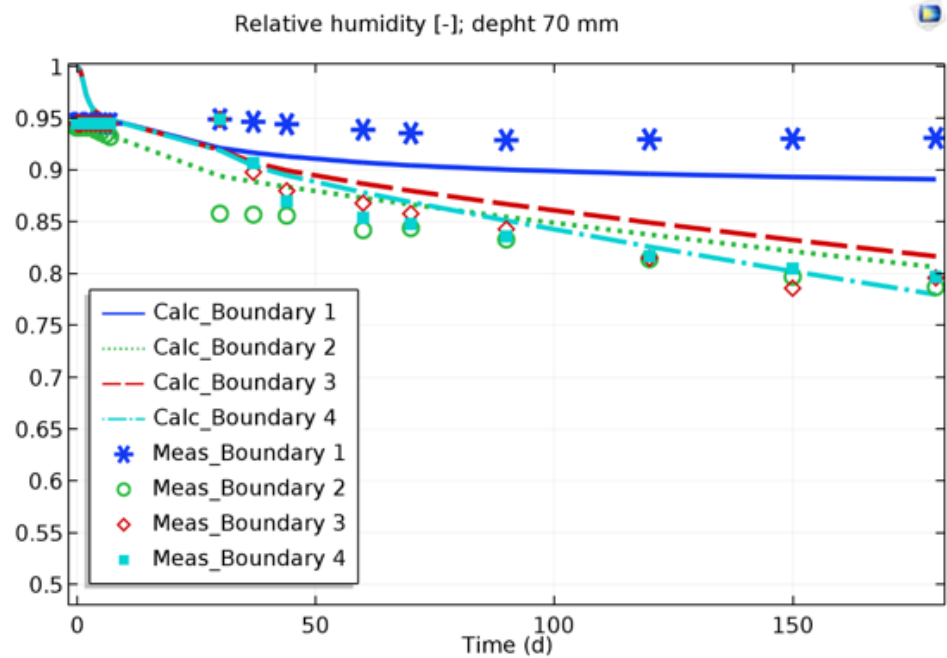
- o esitetty omissa kuvaajissaan, tarkastelujakso päättyy 90 vuorokauden kohdalla

Kuvaajissa esitetyt mitatut suhteellisen kosteuden arvot on esitetty samoilla aika-asteleilla kuin laskennan tulokset. Tästä syystä mitattujen arvojen mittauspisteitä on enemmän kuin koekappaleiden todellisia mitattuja kosteusmittaustuloksia. Mitattujen tulosten väliset pisteet ovat COMSOL:in interpoloimia arvoja todellisten mittaustulosten väliltä.



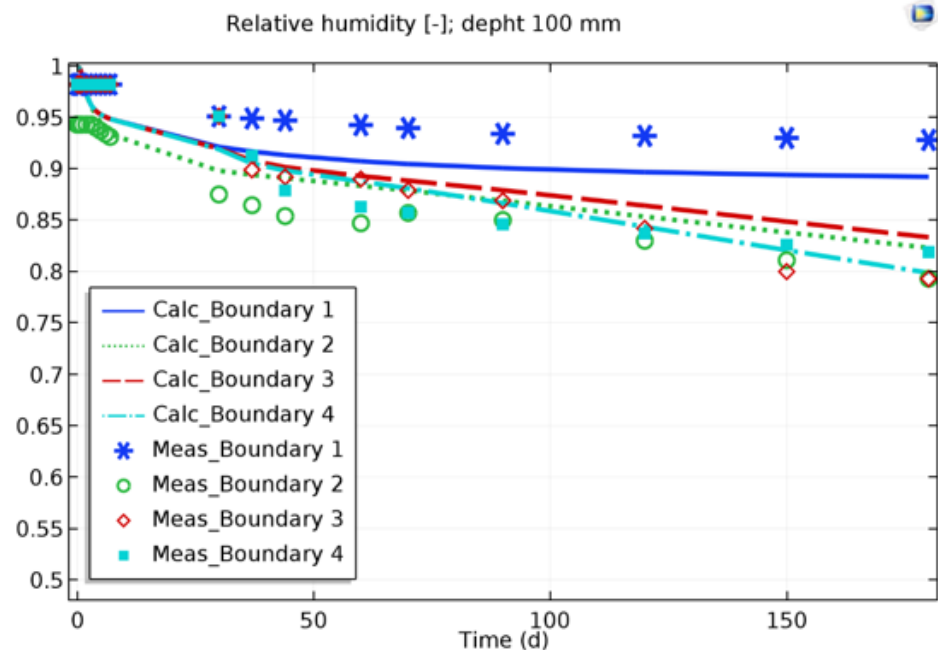
Kuva 3.2. Mallinnettu kuivuminen 30 mm syvyydellä A betonilla. Käyrien nimeäminen edelle esitetyn mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C, Boundary 2 = 23 °C, Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C).

15.5.2018

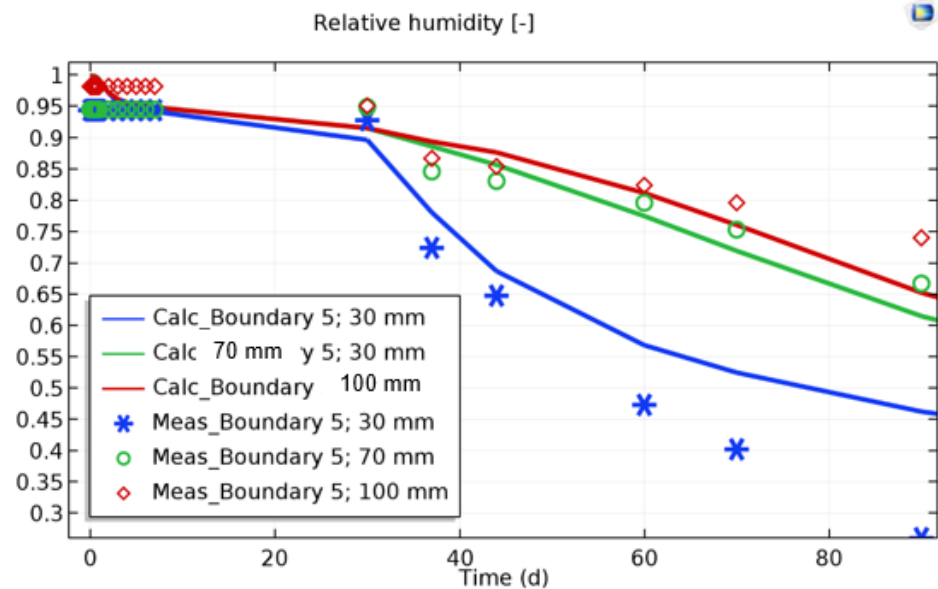


Kuva 3.3. Mallinnettu kuivuminen 70 mm syvyydellä A betonilla. Käyrien nimeäminen edelle esitetyn mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C, Boundary 2 = 23 °C, Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C).

15.5.2018

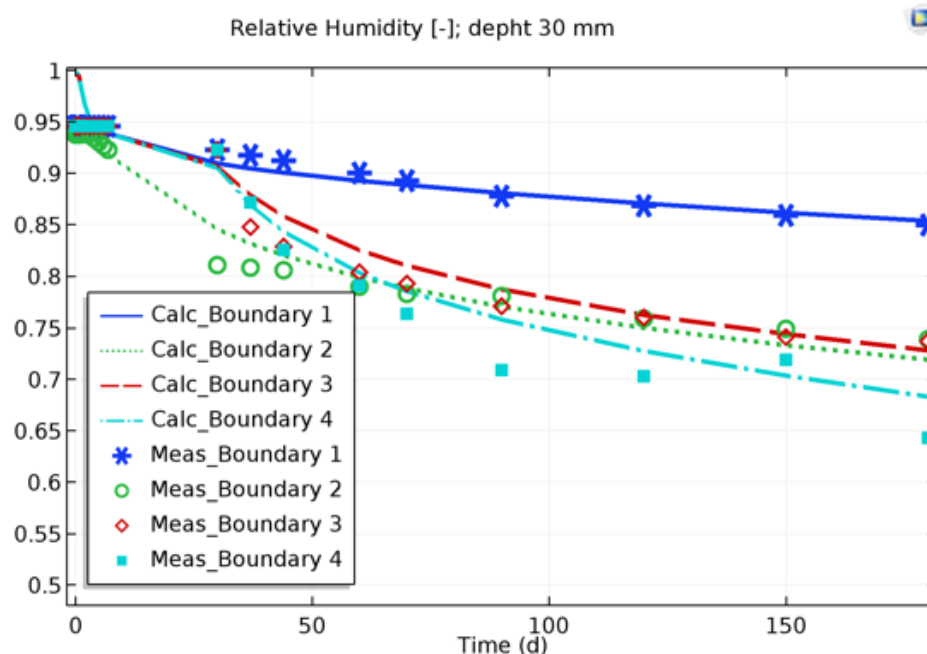


Kuva 6.4. Mallinnettu kuivuminen 100 mm syvyydellä A betonilla. Käyrien nimeäminen edelle esitetyn mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C, Boundary 2 = 23 °C, Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C).

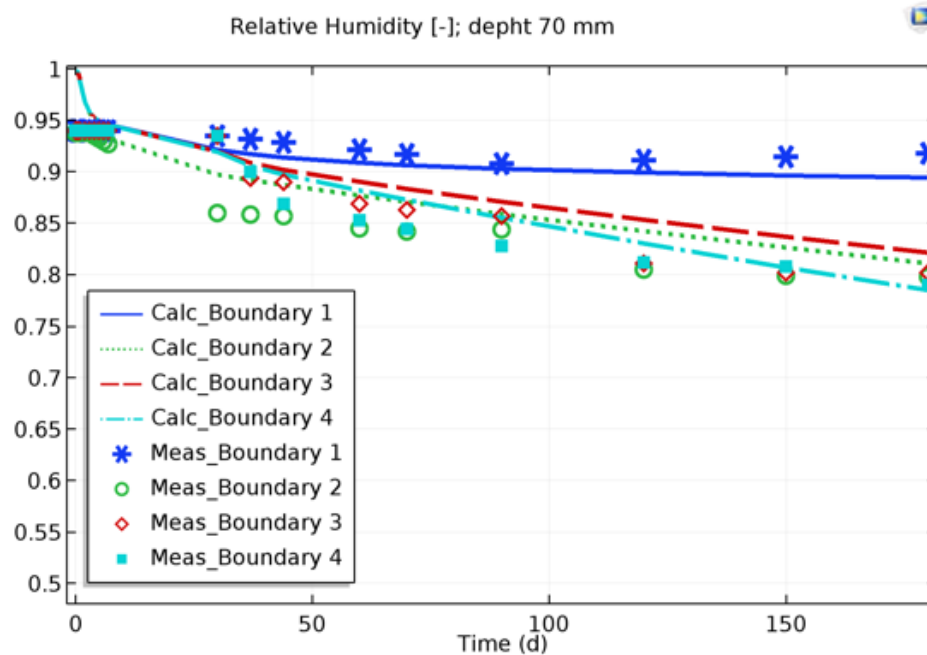


Kuva 6.5. Mallinnettu kuivuminen 60 °C kuivatusolosuhteeseen siirretyillä A betonin kappaleilla kaikilla syvyyksillä. (Boundary 5 = 5 °C → 60 °C).

15.5.2018

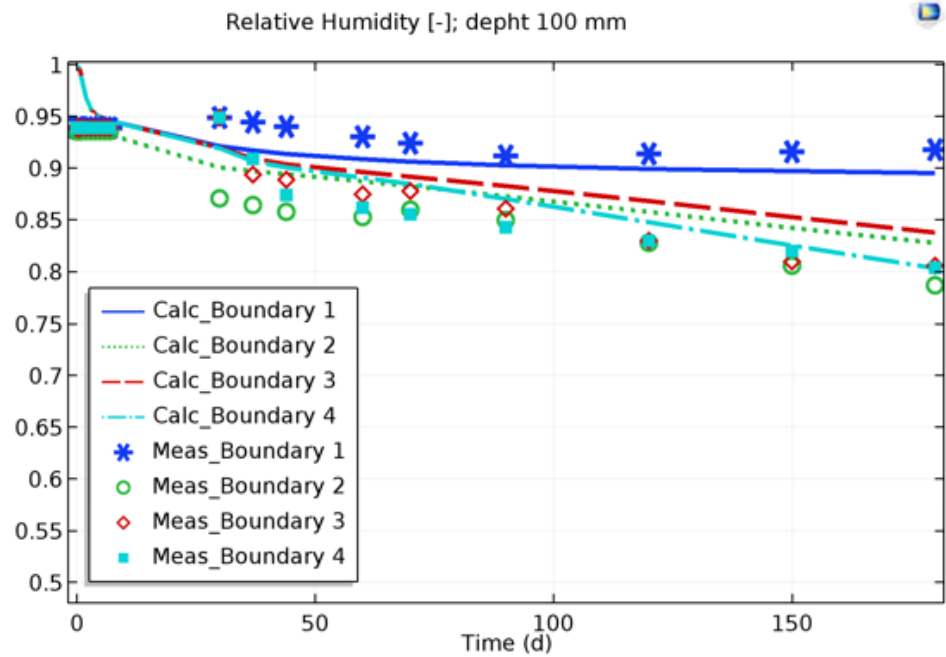


Kuva 3.6. Mallinnettu kuivuminen 30 mm syvyydellä B betonilla. Käyrien nimeäminen edelle esitetyn mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C, Boundary 2 = 23 °C, Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C).

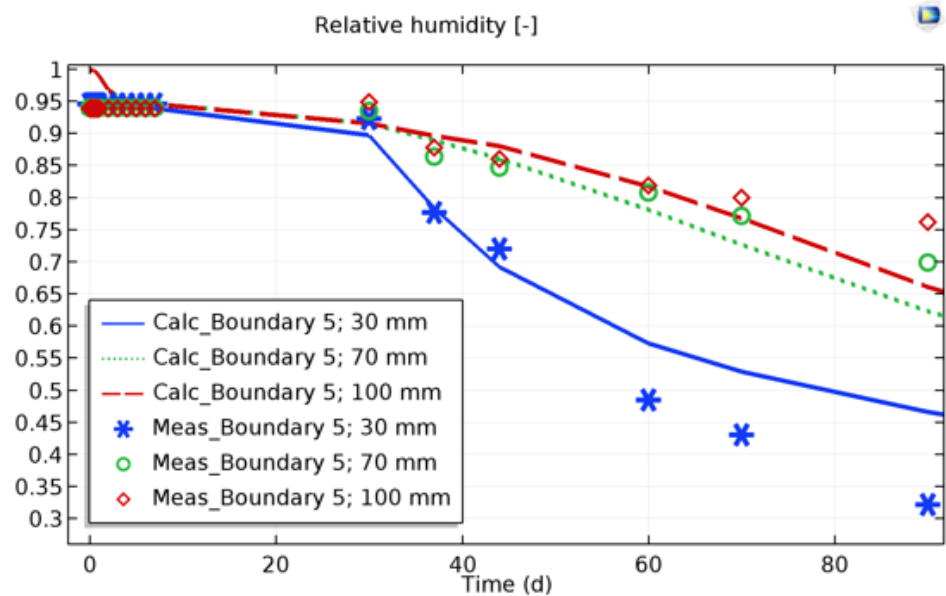


15.5.2018

Kuva 3.7. Mallinnettu kuivuminen 70 mm syvyydellä B betonilla. Käyrien nimeäminen edelle esitetyn mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C, Boundary 2 = 23 °C, Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C).

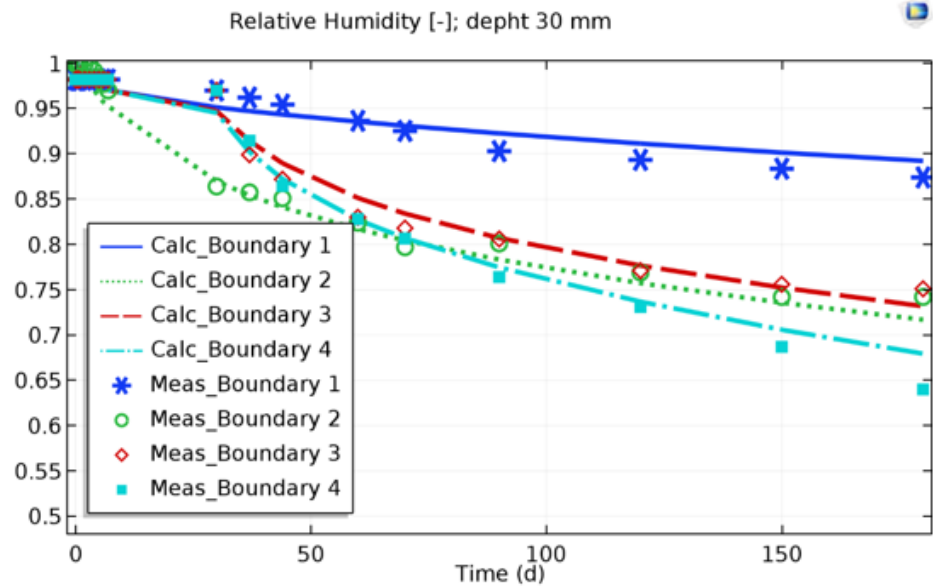


Kuva 3.8. Mallinnettu kuivuminen 100 mm syvyydellä B betonilla. Käyrien nimeäminen edelle esitetyn mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C, Boundary 2 = 23 °C, Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C).

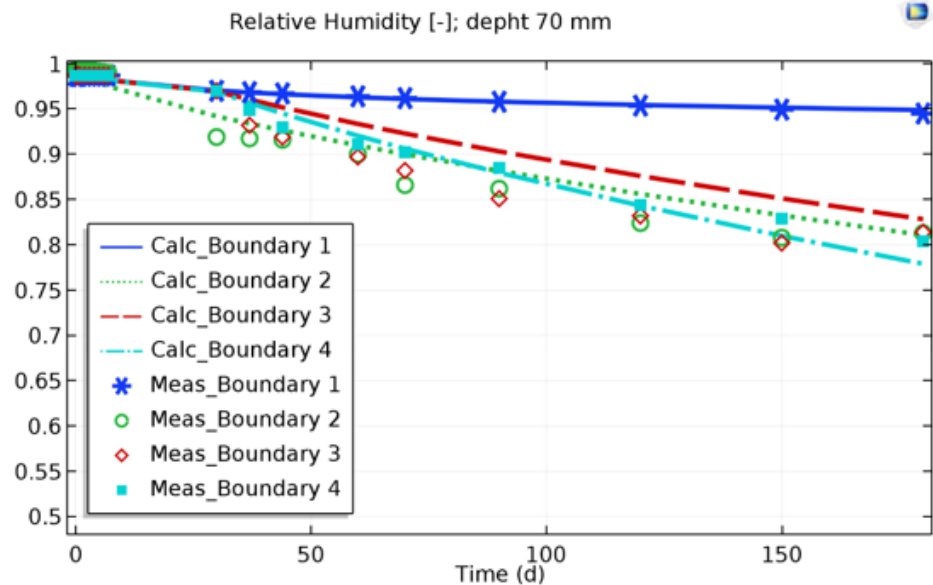


15.5.2018

Kuva 3.9. Mallinnettu kuivuminen 60 °C kuivatusolosuhteeseen siirretyillä B betonin kappaleilla kaikilla syvyyksillä. (Boundary 5 = 5 °C → 60 °C)

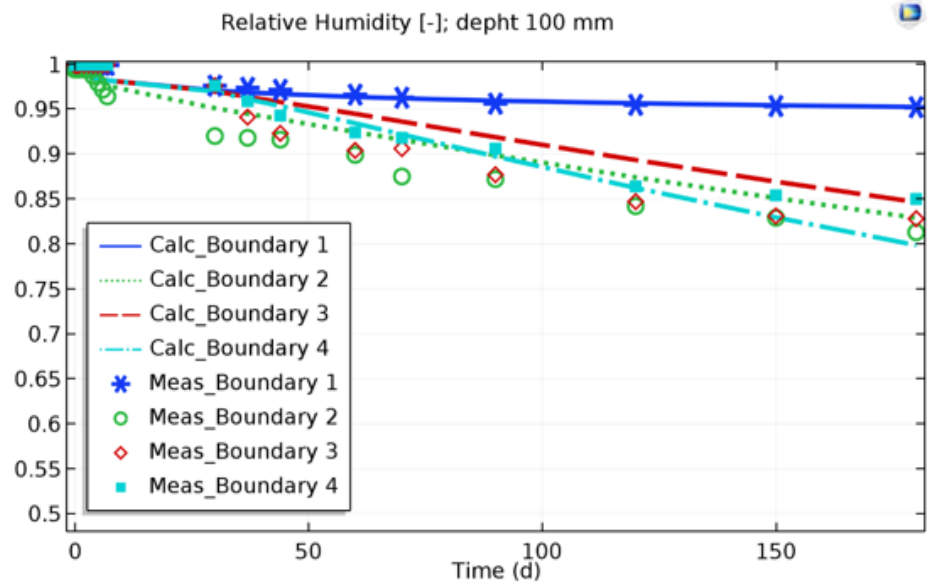


Kuva 3.10. Mallinnettu kuivuminen 30 mm syvyydellä C betonilla. Käyrien nimeäminen edelle esitetyn mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C, Boundary 2 = 23 °C, Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C).

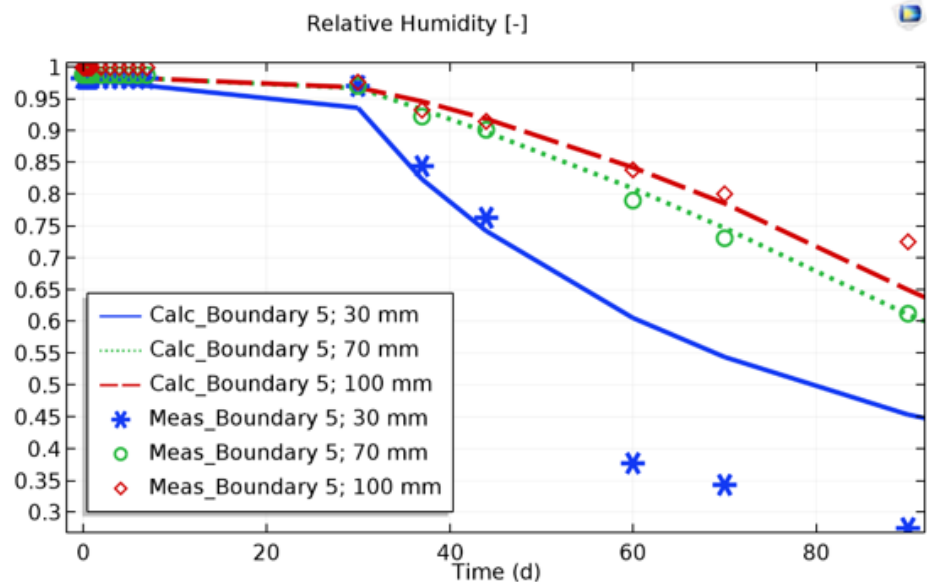


Kuva 3.11. Mallinnettu kuivuminen 70 mm syvyydellä C betonilla. Käyrien nimeäminen edelle esitetyn mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C, Boundary 2 = 23 °C, Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C).

15.5.2018



Kuva 3.12. Mallinnettu kuivuminen 100 mm syvyydellä C betonilla. Käyrien nimeäminen edelle esitetyn mukaisesti (Boundary 1 = 5 °C, Boundary 2 = 23 °C, Boundary 3 = 5 °C → 23 °C ja Boundary 4 = 5 °C → 30 °C).



Kuva 3.13. Mallinnettu kuivuminen 60 °C kuivatusolosuhteeseen siirrettyillä C betonin kappaleilla kaikilla syvyyksillä. (Boundary 5 = 5 °C → 60 °C).

VAHANEN

Laskentamuistio
Koekappaleiden laskennalliset tar-
kastelut, Timo Korkalan DI-työ

15.5.2018

Vahanen Rakennusfysiikka Oy
Espoossa 15.5.2018

Pauli Sekki

Pauli Sekki, DI
Asiantuntija