Tampereen yliopisto

Rakennustekniikka

Tutkimusselostus nro RAK/2718/2024

VEDEN MÄÄRÄN JA KUIVUMISEN MITTAUKSET BETONIKOEKAPPALEISTA

19.3.2025

Tampere 2025

Tutkimusselostus Nro 2718

31 sivua + 0 liitesivua

Tilaaja	Matolog Oy Marko Oikarinen Koskelontie 17 B, 02920 Espoo
Tehtävä	Mitataan eri sementtilaadulla valettujen betonikoekappaleiden kuivumista tilaajan toimittamilla mittausantureilla, punnitusmenetelmällä ja porareikämittauksin.
Tutkimusaika	6.6.2024 - 30.11.2024
Tutkijat	Tuomas Raunima, tutkija, DI Jaakko Hietikko, tutkija, DI Eero Tuominen, projektipäällikkö, DI Juha Vinha, professori, TkT Tampereen yliopisto Rakennustekniikka PL 600, 33014 Tampereen yliopisto Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere Puh. 0294 5211 (vaihde)

Jakelu	Matolog Oy	1 kpl + pdf
	Tampereen yliopisto Rakennustekniikka	1 kpl + pdf
	Tutkijat	pdf

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

VEDEN MÄÄRÄN JA KUIVUMISEN MITTAUKSET BETONIKOEKAPPALEISTA

SISÄLLYSLUETTELO

JOHDANTO 3
TUTKIMUKSEN TOTEUTUS 3
2.1 Mittalaitteet 3
2.2 Koekappaleet 4
2.3 Tutkimuksen vaiheet 5
2.4 Huokosilman vesihöyrypitoisuuden laskenta 8
MITTAUSTULOKSET 9
3.1 Huoneolosuhteet 9
3.2 Lämmitettyjen koekappaleiden punnitukset 10
3.3 Lämmittämättömien koekappaleiden punnitukset 13
3.4 Lämpötila, suhteellinen kosteus ja ilmanpaine 14
3.5 Porareikämittaukset 16
TULOSTEN ANALYSOINTI 17
4.1 Mitatun suhteellisen kosteuden ja punnitusten tulosten korrelointi lämmitetyissä koekappaleissa 17
4.2 Mitatun suhteellisen kosteuden ja punnitusten tulosten korrelointi lämmittämättömissä koekappaleissa 19
4.3 Eri mittausmenetelmillä lasketun kosteusvirran korrelaatio 20
4.4 Porauksen vaikutus mittaustuloksiin 21
POHDINNAT 24
5.1 Pohdintojen taustoitus 24
5.2 Sementtilaatujen väliset erot 25
5.3 Kosteuden poistumisen laskenta suhteellisen kosteuden mittaustulosten avulla 27
5.4 Poraamisen aiheuttama häiriö betonista mitattuun suhteelliseen kosteuteen 28
YHTEENVETO 30
LÄHTEET 30

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka
PL 600, 33014 Tampereen yliopisto
Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere

Puhelinvaihde
0294 5211

etunimi.sukunimi@tuni.fi
www.tuni.fi

JOHDANTO

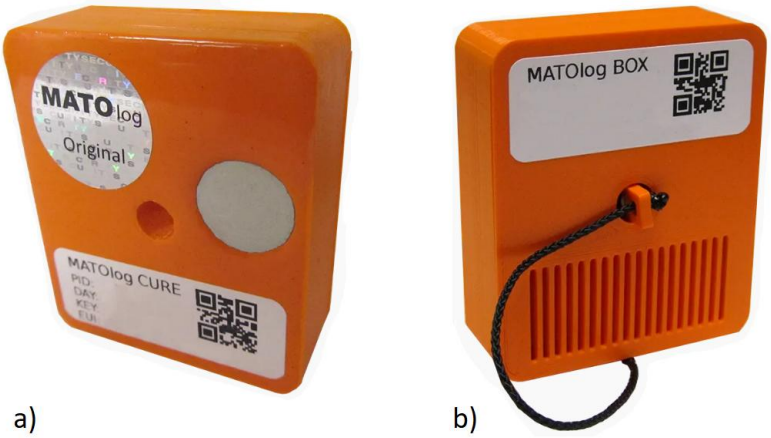
Valettujen betonirakenteiden kuivumisen seurannassa käytetään tyypillisesti kapasitiivisia suhteellisen kosteuden mittausantureita. Menetelmään liittyy useita virhelähteitä ja luotettavan mittaustuloksen arvioiminen on usein haastavaa, erityisesti korkeissa kosteuspitoisuuksissa. Matologin kehittämällä ja valmistamalla betonivaluun asennettavalla mittalaitteella pyritään
1 seuraamaan kosteuden siirtymistä valetussa betonirakenteessa jatkuvatoimisesti ilman kapasitiiviseen mittausteknologiaan liittyviä haasteita.

Tässä tutkimuksessa arvioidaan Matolog-mittalaitteiden toimivuutta valetun betonirakenteen kosteuden jatkuvatoimisessa mittauksessa. Tutkimuksessa tarkastellaan, kuinka Matolog-mittalaitteen antamat mittaustulokset korreloivat koekappaleiden punnitusten perusteella arvioidun kuivumisnopeuden kanssa. Lisäksi tarkastellaan porareikämittausten ja Matolog-mittalaitteiden välisiä eroja.

TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

2 2.1 Mittalaitteet

Tutkimuksessa käytettiin Matolog Oy:n valmistamia langattomia betonivaluun asennettavia Cure betoniantureita (kuva 1a) sekä rakenteen ulkopuolella vallitsevia huoneilman olosuhteita mittaavia Box olosuhdeantureita (kuva 1b). Matolog Cure- ja Box-anturit mittaavat lämpötilaa, suhteellista kosteutta ja ilmanpainetta.



Kuva 1. a) Matolog Cure betonianturi. b) Matolog Box olosuhdeanturi.

Ympäröivän ilman olosuhteiden mittaamiseen käytettiin tutkimuksessa kahta Box-anturia. Yhtä mittalaitetta käytettiin pysyvästi vakio-olosuhdehuoneen olosuhdemittaukseen huoneen seinällä. Toinen mittalaite pidettiin koekappaleiden kanssa aina samassa sijainnissa: se siirrettiin lämpöpöydältä kuivatusuuniin ja pidettiin siellä uunikuivausjakson loppuun asti.

Koekappaleiden valumuotteihin asennetut Matolog Cure -anturit sekä ympäröiviä ilman olosuhteita mittaavat Matolog Box -anturit lähettivät datan Matolog UI -pilvipalveluun, josta data noudettiin myöhemmin Excel-taulukoissa tehtäviä jatkotarkasteluita varten.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka
PL 600, 33014 Tampereen yliopisto
Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere

Puhelinvaihde
0294 5211

etunimi.sukunimi@tuni.fi
www.tuni.fi

2.2 Koekappaleet

Koekappaleet valettiin Matologin suunnittelemaan teräksiseen muottiin, jossa kosteuden liikkumista on pyritty ohjaamaan hallitusti. Muotissa on sylinterin muotoinen seinämä ja irrotettava pohja sekä kansi. Rakenne on suunniteltu toimimaan myös radioteknisesti, jotta valun sisään jätettävä langaton mittalaite kykenee lähettämään signaalin ulos rakenteesta. Kuvassa 2 on esitetty valmis muotti sekä muotin sisälle asennettu Matolog Cure -anturi. Muotit punnittiin ennen valua, jotta punnitustuloksista voidaan myöhemmin laskea muottien sisältämän betonin massa.

Matolog Cure -anturi asennettiin anturin keskellä olevasta kiinnityspisteestä kiinteästi valumuotin keskipisteeseen kierretangon avulla. Matolog Cure -anturi mittaa olosuhteita kahdesta pisteessä syvyyssuunnassa 14 mm ja 54 mm mittalaitteen yläpinnasta laskettuna. Valumuotin keskipisteeseen asennettuna mittalaite peittyi 6 mm betonikerroksella, joten todelliset mittaussyvyydet betonin yläpinnasta mitattuna olivat 20 mm ja 60 mm.

Kuva 2. Valuun valmis valumuotti.

Tutkimuksessa käytettiin kolmea eri sementtilaatua kahdella eri vesi-sementtisuhteella. Kiviaineksena käytettiin 0–8 mm raekoon seulottua hiekkaa. Valmiiksi suhteistettu kiviaines, sementit ja reseptit betonimassojen sekoittamista varten hankittiin Finnsementiltä. Sementtilaatuina käytettiin Rapid-, Oiva- ja Kolmos-sementtiä, joista valmistettiin betonia kahdella eri vesisementtisuhteella: 0,5 ja 0,62. Näin saatiin yhteensä kuusi eri betonilaatua.

Jokaisesta betonilaadusta valmistettiin kolme koekappaletta, joita pidettiin tutkimuksen aikana lämpöpöydällä kuivumisprosessin nopeuttamiseksi. Lisäksi Oiva-sementistä tehtiin v/s suhteella 0,5 kolmen koekappaleen sarja, jota käytettiin mm. porareikämittausten harjoituskappaleina. Näiden lisäksi Oiva- ja Kolmos-sementeistä valmistettiin kolme koekappaletta v/s suhteella 0,5, joita ei tutkimuksen aikana lämmitetty. Näille kuudelle koekappaleelle tehtiin tutkimuksen lopuksi porareikämittaukset. Lämmitettyjä koekappaleita oli tutkimuksessa siis yhteensä 18 kpl ja porareikämittausten koekappaleita 6 kpl + 3 kpl harjoituskoekappaleita. Tutkitut koekappaleet on esitetty taulukossa 1.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Taulukko 1. Tutkimuksen koekappaleiden sementtilaadut sekä v/s-suhteet. Koekappaleiden sarjat nimettiin sementtilaadun ja v/s-suhteen mukaan. Jokaisessa koekappalesarjassa oli kolme rinnakkaisnäytettä.

Sementti	**Rapid**		**Oiva**		**Kolmos**	
Testiohjelman mukaiset lämmitetyt koekappaleet						
V/S	0,50	0,62	0,50	0,62	0,50	0,62
Nimi	L111…L113	L121…L123	L211…L213	L221…L223	L311…L313	L321…L323
Porareikämittauksissa käytetyt koekappaleet, joita ei lämmitetty						
V/S	Oiva 0,5, harjoituskappaleet		0,50		0,50	
Nimi	Lp211…Lp213		K211…K213		K311…K313	

2.3 Tutkimuksen vaiheet

Koekappaleiden valu

2.3.1 Koekappaleiden valu suoritettiin Tampereen yliopiston Hervannan kampuksella Rakennushallin valutilassa 6.6.2024 klo 12–16 välisenä aikana. Sementti, kiviaines ja vesi sekoitettiin eri betonilaaduiksi reseptin määrittämissä suhteissa neljän litran erissä. Raaka-aineet punnittiin tarkasti vaa'alla ja sekoitettiin kymmenen litran astioissa kaksivispiläisellä laastisekoittajalla. Sementti sekoitettiin ensin kiviainekseen ja tasaisesti sekoittuneen kuiva-aineksen joukkoon lisättiin punnitsemalla mitattu reseptin mukainen vesimäärä. Huolellisen sekoituksen jälkeen valumuotit täytettiin betonimassalla. Täytön aikana muottia tärytettiin vaiheittain sauvatäryttimellä ja lopuksi betonin pinta hierrettiin puulastalla. Valetut koekappaleet siirrettiin vakio-olosuhdehuoneeseen, jossa ne punnittiin ja siirrettiin hyllylle. Koekappaleiden päälle asetettiin kannet ensimmäisen viikon jälkihoitojakson ajaksi.

Koekappaleiden valmistuksen vaiheet on esitetty kuvassa 3. Kuuden eri reseptin raaka-aineiden sekoitussuhteet neljän litran eriin on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Kuuden eri sementtireseptin neljän litran sekoituserät painolukemina.

Sementti	**V/S-suhde**	**Sementti [kg]**	**Vesi [kg]**	**Kiviaines [kg]**
Rapid	0,50	1,600	0,800	6,978
Oiva	0,50	1,600	0,800	6,978
Kolmos	0,50	1,600	0,800	6,978
Rapid	0,62	1,400	0,872	6,959
Oiva	0,62	1,400	0,872	6,959
Kolmos	0,62	1,400	0,872	6,959

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka
PL 600, 33014 Tampereen yliopisto
Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere

Puhelinvaihde
0294 5211

etunimi.sukunimi@tuni.fi
www.tuni.fi

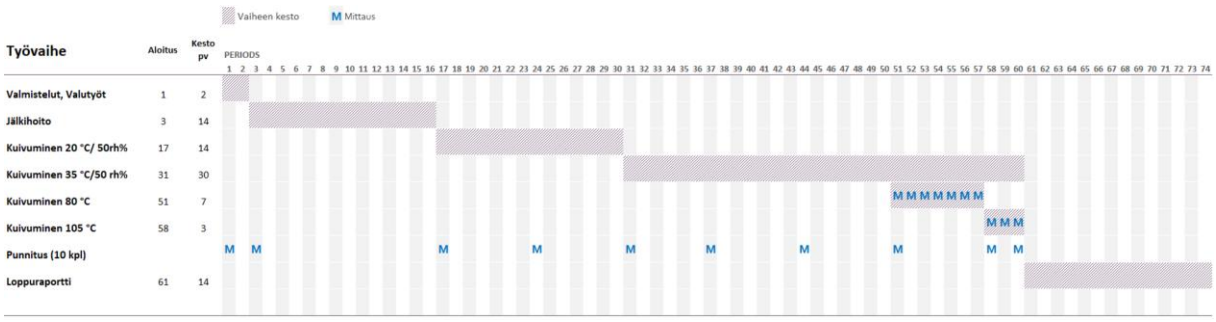
Kuva 3. Koekappaleiden valun vaiheita: punnitseminen, sekoitus, tärytys ja betonipinnan hierto.

2.3.2 Kuivatusjaksot

Tutkimuksen koejärjestelyihin ja mittausaikatauluihin saatiin tutkimuksen tilaajalta valmis pohjasuunnitelma, jota noudatettiin:

- jälkihoitojakso, jota seurasi
- säilytys vakioidussa huoneilmassa, jonka tavoiteolosuhteet ovat 21–23 °C ja 50 % RH.
- 27.6.2024 alkaen lämmitysjakso 35 °C lämpötilaan säädetyllä lämpöpöydällä sekä
- 18.7.2024 alkaen kuumennusjakso kuivausuunissa 80 °C lämpötilassa ja
- lopuksi myös kaiken veden poistaminen 105 °C lämpötilassa kuivapainon määritystä varten.

Eri vaiheiden alkuperäinen aikataulusuunnitelma on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Tutkimuksen alkuperäinen aikataulusuunnitelma.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Aikataulusuunnitelma toteutui pääosin; tutkimuksen tilaajan toiveesta jälkihoitojakso lyhennettiin kahdesta viikosta viikon pituiseksi ja lopun uunikuivausjakso 105 °C lämpötilassa oli myös alkuperäistä suunnitelmaa pidempi. Uunikuivausta jatkettiin pidempään, koska koekappaleet todettiin kuiviksi standardin EN 1363-1 [1] liitteen F määritelmän mukaisesti, kun yhden vuorokauden aikana tapahtunut suhteellisen painon alenema oli alle 0,1 %.

Punnitukset

Koekappaleiden kuivumista seurattiin punnitusmenetelmällä, jolla saadaan tietoon koekappaleen painon muutos, joka vastaa käytännössä koekappaleesta poistunutta vesimäärää. Punnituksissa käytettiin vakio-olosuhdehuoneen vaakaa Precisa ES 2220M,
2.3.3 jonka punnituskapasiteetti on 2220 grammaa ja punnitustarkkuus 0,001 grammaa. Vaaka on asetettu suojakammion sisään, joka poistaa ilmavirtausten aiheuttaman virheen punnitustuloksesta. Koekappaleita punnittiin valusta alkaen kerran viikossa ja uunikuivausjaksojen aikana kerran päivässä viikonloput pois lukien. Punnituksissa käytetty vaaka on esitetty kuvassa 5.

2.3.4

Kuva 5. Punnituksissa käytetty vaaka Precisa ES 2220M.

Porareikämittaukset

Kahdelle lämmittämättömälle koekappalesarjalle tehtiin lopuksi porareikämittaukset. Näistä koekappaleista kolme oli Oiva-sementistä ja toiset kolme Kolmos-sementistä vesi-sementtisuhteella 0,5 valmistettua betonia. Näitä yhteensä kuutta koekappaletta säilytettiin koko tutkimuksen ajan vakio-olosuhdehuoneessa, eikä niitä siirretty lämpöpöydälle tai uuniin.

Porareikämittausten tuloksista tarkasteltiin porareiän porauksen vaikutusta koekappaleesta mitattuun kosteusolosuhteeseen. Tarkastelua tehtiin sekä koekappaleisiin asennettujen

Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka
PL 600, 33014 Tampereen yliopisto
Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere

Puhelinvaihde
0294 5211

etunimi.sukunimi@tuni.fi
www.tuni.fi

Matolog Cure -anturin mittaustulosten perusteella että eri tasaantumisajan jälkeen porareiästä mitattujen lukemien avulla.

Porareikämittaukset suoritettiin RT 103333 Betonin suhteellisen kosteuden mittaus [2] -ohjekortissa kuvatulla tavalla. Lukemienotot tehtiin Vaisala HMP40-mittapäillä käyttäen HM40-näyttölaitetta. Porareikämittauksessa käytetyt mittalaitteet on esitetty kuvassa 6.

Kuva 6. Porareikämittauksissa käytetty Vaisala HM40-näyttölaite ja HMP40-mittapäitä.

2.4 Huokosilman vesihöyrypitoisuuden laskenta

Vesihöyryn diffuusiolla tapahtuvan kosteusvirran todellinen potentiaali on huokosilman vesihöyrypitoisuus, joka voidaan laskea lämpötilan ja suhteellisen kosteuden avulla. Tässä luvussa on esitelty tapa, jolla tämän tutkimuksen aikana eri mittalaitteilla saadut suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaustulokset on muutettu ilman vesihöyrypitoisuudeksi.

Tähän tarkoitukseen on olemassa erilaisia sovellettavia laskukaavoja. Tutkimuksen lähtökohdat huomioiden pyrittiin valitsemaan laskukaava, joka soveltuu myös kuivausuunin lämpötiloihin.

Suhteellinen kosteus määritellään kaavan 1 mukaisesti ilman vesihöyrypitoisuuden ja lämpötilasta riippuvan vesihöyryn kyllästyspitoisuuden suhteena:

$$\varphi = \frac{\nu}{\nu_{sat}}, \quad (1)$$

jossa φ on suhteellinen kosteus (% RH), ν on ilman vesihöyrypitoisuus (kg/m^3) ja ν_{sat} on vesihöyryn kyllästyspitoisuus. Suhteellinen kosteus voidaan ilmaista myös vesihöyryn osapaineen (kaava 2) avulla:

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{v,sat}}, \quad (2)$$

jossa p_v on vesihöyryn osapaine ja $p_{v,sat}$ on vesihöyryn kyllästysosapaine (Pa).

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Kun vesihöyryn osapaine tiedetään, vesihöyrypitoisuus voidaan laskea likiarvokaavalla 3:

$$\nu = \frac{p_v}{461{,}5 * T}, \tag{3}$$

jossa T on lämpötila Kelvinasteina.

Kaavojen 4 ja 5 avulla voidaan laskea kyllästysosapaine riittävällä tarkkuudella lämpötila-alueella 0…373 °C [3]:

$$\vartheta = 1 - \frac{T}{T_C}, \tag{4}$$

$$\ln\left(\frac{p_{v,sat}}{P_c}\right) = \frac{T_C}{T}(C_1\vartheta + C_2\vartheta^{1,5} + C_3\vartheta^3 + C_4\vartheta^{3,5} + C_5\vartheta^4 + C_6\vartheta^{7,5}), \text{jossa} \tag{5}$$

T = lämpötila (K)
T_c = kriittinen lämpötila 647,096 K
$p_{v,sat}$ = vesihöyryn kyllästysosapaine [Pa]
P_c = kriittinen paine 220640 hPa
C_i = vakioarvoja
C_1 = -7,85951783
C_2 = 1,84408259
C_3 = -11,7866497
C_4 = 22,6807411
C_5 = -15,9618719
C_6 = 1,80122502

Kaavoista 3–5 voidaan johtaa kaava 6, jolla saadaan laskettua vesihöyrypitoisuus lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella:

$$\nu = \frac{T_C * \exp\left(\frac{T_C}{T}\left(C_1\vartheta + C_2\vartheta^{1,5} + C_3\vartheta^3 + C_4\vartheta^{3,5} + C_5\vartheta^4 + C_6\vartheta^{7,5}\right)\right)\varphi}{461{,}5 * T}, \tag{6}$$

Kaavaa 6 käytettiin mittausdatan tarkasteluissa mitatun lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muuntamiseksi vesihöyrypitoisuudeksi.

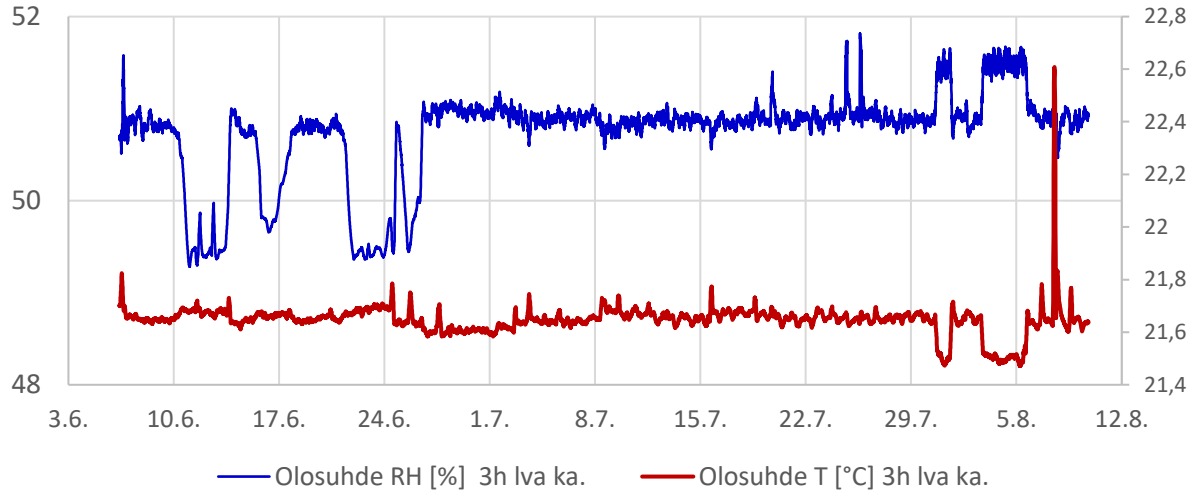
3

MITTAUSTULOKSET

3.1 Huoneolosuhteet

Kuvassa 7 on esitetty Miranlink olosuhteiden seurantamittausjärjestelmällä todetut huoneen olosuhteet tutkimuksen ajalta. Huoneilman olosuhteita seurattiin lisäksi Matolog Box-anturilla, jonka dataa on käytetty tutkimuksen tuloksissa.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



Kuva 7. Vakio-olosuhdehuoneen olosuhteet lämmitettyjen koekappaleiden seurannan ajalta kolmen tunnin liukuvanana keskiarvona. Vasen y-akseli on suhteellinen kosteus [% RH] ja oikea y-akseli lämpötila [°C].

Kuvasta 7 nähdään, että huoneolosuhteet ovat olleet varsin tasaiset, suurimmat heilahdukset ovat olleet tyypillisesti 2 % RH ja 0,2 °C. Siten ympäröivät olosuhteet eivät ole aiheuttaneet merkittäviä eroja koekappaleiden kuivumiseen vierekkäin säilytettyjen koekappaleiden välillä.

3.2 Lämmitettyjen koekappaleiden punnitukset

Punnituksia tehtiin koekappaleiden kuivapainon määrittämiseen asti. Koekappaleet punnittiin vakio-olosuhdehuonesäilytyksen aikana kerran viikossa ja uunikuivatusvaiheen aikana joka arkipäivä. Punnitukset lopetettiin, kun suhteellinen painon muutos vuorokauden aikana alitti 0,1 % standardin EN 1363-1 [1] liitteen F määritelmän mukaisesti.

Lämmitettyjen koekappaleiden punnitustulokset on esitetty taulukossa 3 kolmen koekappaleen sarjan keskiarvoina. Taulukossa punnitustuloksista on vähennetty muotin ja kiinteän Matolog-mittalaitteen paino. Siten punnitustuloksessa on mukana vain betoni ja sen sisältämä kosteus.

Taulukko 3. Eri betonilaatujen koesarjojen punnitustulokset grammoina [g]. Punnitustulokset on annettu kolmen koekappaleen keskiarvoina. Punnituspäivämäärä-sarake on värikoodattu koekappaleiden säilytysolosuhteiden mukaan: **Vihreä** = olosuhdehuone, hylly. **Keltainen** = olosuhdehuone, lämpöpöytä. **Oranssi** = kuivausuuni 80 °C. **Punainen** = kuivausuuni 105 °C.

PVM	Rapid 0,50	Rapid 0,62	Oiva 0,50	Oiva 0,62	Kolmos 0,50	Kolmos 0,62
6.6.	1097,8	1070,9	1128,2	1085,6	1114,1	1087,5
13.6.	1096,2	1069,1	1126,9	1083,7	1113,7	1085,9
20.6.	1092,3	1062,6	1122,9	1076,9	1111,1	1081,8
27.6.	1090,7	1060,0	1121,5	1074,6	1110,1	1080,3
4.7.	1088,7	1056,5	1119,1	1071,2	1108,1	1077,7
11.7.	1087,1	1053,9	1117,4	1068,8	1106,8	1076,0
18.7.	1085,7	1051,7	1115,9	1066,8	1105,7	1074,6
19.7.	1078,5	1043,2	1109,7	1059,8	1101,1	1070,1
22.7.	1066,8	1028,7	1099,8	1048,5	1094,7	1062,7
23.7.	1064,3	1025,7	1097,6	1046,0	1093,1	1060,6
24.7.	1061,9	1022,8	1095,5	1043,6	1091,5	1058,5
25.7.	1059,8	1020,3	1093,7	1041,5	1090,1	1056,7

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

PVM	Rapid 0,50	Rapid 0,62	Oiva 0,50	Oiva 0,62	Kolmos 0,50	Kolmos 0,62
26.7.	1060,2	1020,7	1094,0	1041,9	1090,4	1057,1
29.7.	1059,5	1019,5	1093,1	1040,4	1090,1	1056,2
30.7.	1043,7	1000,4	1077,6	1021,9	1078,1	1039,8
31.7.	1036,2	993,4	1069,7	1013,5	1070,5	1029,9
1.8.	1031,9	991,1	1064,5	1008,9	1064,3	1022,6
2.8.	1029,9	990,0	1061,7	1007,1	1059,6	1017,2
5.8.	1027,6	988,7	1058,8	1005,2	1050,7	1010,0
6.8.	1027,2	988,4	1058,3	1004,8	1049,1	1009,2
7.8.					1047,8	
8.8.	1028,4	989,7	1059,4	1006,1	1046,9	1010,3
15.8.	1030,3	992,0	1061,3	1008,2	1049,3	1011,8

Taulukossa 4 on taulukon 3 punnitustuloksista laskettu edelleen koekappaleen sisältämä vesimäärä eri punnitusajankohtina käyttäen reseptin mukaista vesimäärää.

Taulukko 4. Eri betonilaatujen koesarjojen punnitustulosten ja reseptien perusteella lasketut koekappaleiden sisältämät vesimäärät grammoina [g] kullakin punnitushetkellä. Vesimäärät on annettu kolmen koekappaleen keskiarvoina. Punnituspäivämäärä-sarake on värikoodattu koekappaleiden säilytysolosuhteiden mukaan: **Vihreä** = olosuhdehuone, hylly. **Keltainen** = olosuhdehuone, lämpöpöytä. **Oranssi** = kuivausuuni 80 °C. **Punainen** = kuivausuuni 105 °C.

PVM	Rapid 0,50	Rapid 0,62	Oiva 0,50	Oiva 0,62	Kolmos 0,50	Kolmos 0,62
6.6.	93,6	101,2	96,2	102,6	95,0	102,7
13.6.	92,1	99,4	94,9	100,6	94,6	101,2
20.6.	88,1	92,9	91,0	93,9	92,0	97,0
27.6.	86,6	90,3	89,6	91,6	91,0	95,6
4.7.	84,5	86,8	87,1	88,1	89,0	93,0
11.7.	83,0	84,1	85,4	85,8	87,7	91,3
18.7.	81,6	82,0	84,0	83,8	86,6	89,9
19.7.	74,3	73,5	77,8	76,7	82,1	85,3
22.7.	62,6	59,0	67,9	65,5	75,6	77,9
23.7.	60,1	56,0	65,7	62,9	74,0	75,8
24.7.	57,8	53,1	63,6	60,6	72,4	73,8
25.7.	55,7	50,6	61,7	58,5	71,0	72,0
26.7.	56,0	51,0	62,1	58,8	71,3	72,3
29.7.	55,3	49,8	61,2	57,4	71,0	71,5
30.7.	39,6	30,7	45,7	38,9	59,0	55,0
31.7.	32,1	23,7	37,8	30,4	51,4	45,1
1.8.	27,8	21,4	32,6	25,9	45,3	37,8
2.8.	25,7	20,3	29,8	24,1	40,5	32,5
5.8.	23,5	19,0	26,8	22,1	31,6	25,3
6.8.	23,1	18,7	26,3	21,8	30,0	24,4
7.8.					28,8	
8.8.	24,3	20,0	27,5	23,1	27,9	25,5
15.8.	26,1	22,3	29,3	25,1	30,2	27,0

Taulukossa 5 on vielä esitetty taulukon 4 arvot prosenttiosuuksina verrattuna reseptin mukaiseen vesimäärään.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka
PL 600, 33014 Tampereen yliopisto
Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere

Puhelinvaihde
0294 5211

etunimi.sukunimi@tuni.fi
www.tuni.fi

Taulukko 5. Koekappaleen laskennallinen kosteuden poistuma prosentteina reseptin vesimäärään verrattuna kullakin punnitushetkellä. Prosentit on annettu kolmen koekappaleen keskiarvoina. Punnituspäivämäärä-sarake on värikoodattu koekappaleiden säilytysolosuhteiden mukaan: **Vihreä** = olosuhdehuone, hylly. **Keltainen** = olosuhdehuone, lämpöpöytä. **Oranssi** = kuivausuuni 80 °C. **Punainen** = kuivausuuni 105 °C.

PVM	Rapid 0,50	Rapid 0,62	Oiva 0,50	Oiva 0,62	Kolmos 0,50	Kolmos 0,62
6.6.	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
13.6.	-1,7 %	-1,7 %	-1,4 %	-1,9 %	-0,5 %	-1,5 %
20.6.	-5,9 %	-8,2 %	-5,4 %	-8,4 %	-3,2 %	-5,5 %
27.6.	-7,5 %	-10,7 %	-7,0 %	-10,7 %	-4,2 %	-7,0 %
4.7.	-9,7 %	-14,2 %	-9,5 %	-14,1 %	-6,4 %	-9,5 %
11.7.	-11,4 %	-16,8 %	-11,2 %	-16,4 %	-7,7 %	-11,2 %
18.7.	-12,9 %	-18,9 %	-12,7 %	-18,3 %	-8,9 %	-12,5 %
19.7.	-20,6 %	-27,4 %	-19,2 %	-25,2 %	-13,7 %	-17,0 %
22.7.	-33,1 %	-41,7 %	-29,5 %	-36,2 %	-20,5 %	-24,1 %
23.7.	-35,8 %	-44,7 %	-31,8 %	-38,6 %	-22,2 %	-26,2 %
24.7.	-38,3 %	-47,5 %	-33,9 %	-40,9 %	-23,8 %	-28,2 %
25.7.	-40,5 %	-49,9 %	-35,9 %	-43,0 %	-25,3 %	-29,9 %
26.7.	-40,2 %	-49,6 %	-35,5 %	-42,6 %	-24,9 %	-29,6 %
29.7.	-40,9 %	-50,7 %	-36,4 %	-44,0 %	-25,3 %	-30,4 %
30.7.	-57,7 %	-69,6 %	-52,5 %	-62,1 %	-37,9 %	-46,4 %
31.7.	-65,8 %	-76,5 %	-60,8 %	-70,3 %	-45,9 %	-56,1 %
1.8.	-70,3 %	-78,9 %	-66,1 %	-74,7 %	-52,4 %	-63,2 %
2.8.	-72,5 %	-79,9 %	-69,1 %	-76,5 %	-57,3 %	-68,4 %
5.8.	-75,0 %	-81,2 %	-72,1 %	-78,4 %	-66,7 %	-75,4 %
6.8.	-75,4 %	-81,5 %	-72,6 %	-78,8 %	-68,4 %	-76,2 %
7.8.					-69,7 %	
8.8.	-74,1 %	-80,2 %	-71,4 %	-77,5 %	-70,7 %	-75,2 %
15.8.	-72,1 %	-77,9 %	-69,5 %	-75,5 %	-68,2 %	-73,7 %

Kolmossementistä valmistetun betonin havaittiin kuivuvan muita betonilaatuja hitaammin, mutta uunikuivauksen jälkeen erot pienenivät. Kuvassa 8 on visualisoitu taulukon 5 tulokset, eli punnitustuloksista laskettu koekappaleen laskennallinen kosteuden poistuminen verrattuna reseptin vesimäärään kullakin punnitushetkellä.

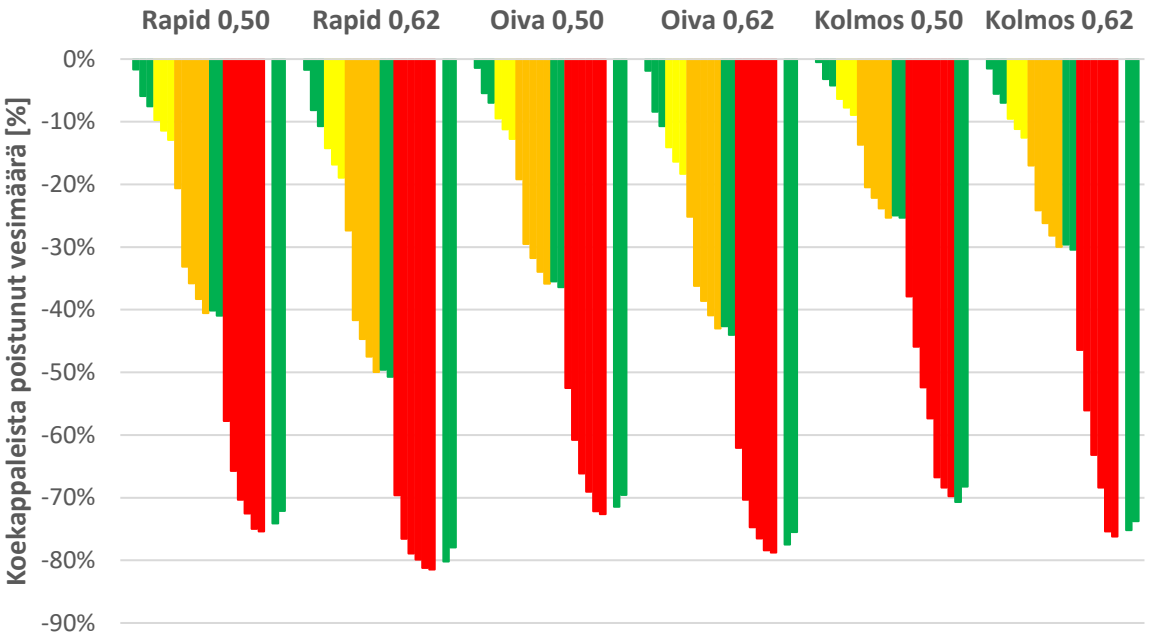
Kuvasta 8 havaitaan, että Rapid-sementistä valmistettu betoni kuivuu punnitustulosten perusteella nopeimmin ja Kolmos-sementti luovuttaa vettä muita hitaammin. Erot pienenivät lopulta uunikuivauksen aikana.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka
PL 600, 33014 Tampereen yliopisto
Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere

Puhelinvaihde
0294 5211

etunimi.sukunimi@tuni.fi
www.tuni.fi



Kuva 8. Koekappalesarjoista poistunut vesimäärä prosentteina verrattuna betonireseptin vesimäärään.

3.3 Lämmittämättömien koekappaleiden punnitukset

Lämmittämättömien koekappaleiden punnitukset tehtiin viikon välein 22.8.2024 asti, jonka jälkeen kappaleet suljettiin kosteusprofiilin tasaamiseksi läpi koekappaleen. Punnitustulokset on esitetty kolmen koekappaleen sarjan keskiarvona kahdelle lämmittämättömälle koesarjalle.

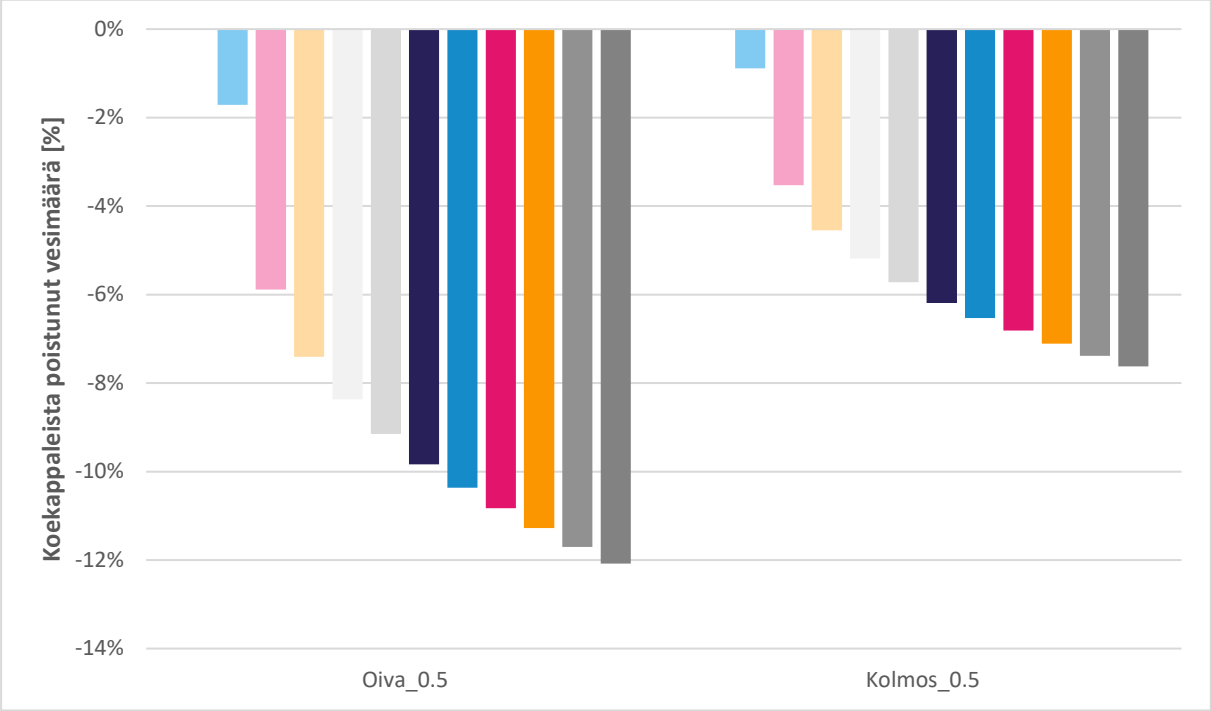
Taulukossa 6 punnitustuloksista on laskettu koekappaleen sisältämä vesimäärä eri punnitusajankohtina käyttäen reseptin mukaista vesimäärää (vrt. taulukko 4) ja lisäksi on esitetty vesimäärän kuivuminen prosentteina (vrt. taulukko 5).

Taulukko 6. Eri betonilaatujen lämmittämättömien koesarjojen punnitustulosten sekä reseptin perusteella lasketut koekappaleiden sisältämät vesimäärät grammoina [g] kullakin punnitushetkellä. Lisäksi on esitetty vesimäärän poistuminen prosentteina verrattuna reseptin vesimäärään kullakin punnitushetkellä. Tulokset on annettu kolmen koekappaleen keskiarvoina.

PVM	Oiva_0.5	Kolmos_0.5	Oiva_0.5	Kolmos_0.5
6.6.2024	96,00	94,87	0 %	0 %
13.6.2024	94,36	94,03	-1,7 %	-0,9 %
20.6.2024	90,34	91,53	-5,9 %	-3,5 %
27.6.2024	88,89	90,56	-7,4 %	-4,5 %
4.7.2024	87,97	89,96	-8,4 %	-5,2 %
11.7.2024	87,22	89,45	-9,1 %	-5,7 %
18.7.2024	86,56	89,00	-9,8 %	-6,2 %
25.7.2024	86,05	88,68	-10,4 %	-6,5 %
1.8.2024	85,60	88,41	-10,8 %	-6,8 %
8.8.2024	85,17	88,13	-11,3 %	-7,1 %
15.8.2024	84,76	87,87	-11,7 %	-7,4 %
22.8.2024	84,40	87,64	-12,1 %	-7,6 %

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Kuvassa 9 on visualisoitu taulukon 6 kosteuden poistuminen koekappaleista.



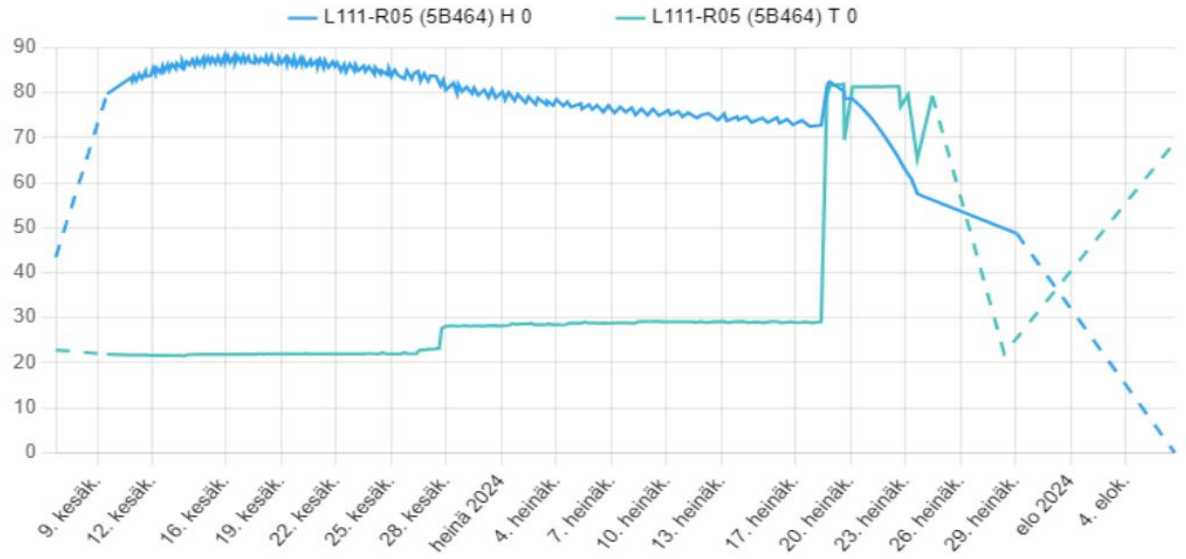
Kuva 9. Koekappalesarjoista poistunut vesimäärä prosentteina verrattuna betonireseptin vesimäärään.

Kuvasta 9 voidaan havaita vastaavasti kuin lämmitetyillä koekappaleilla, että kolmossementti kuivuu hitaammin. Lisäksi voidaan havaita lämpöpöydän merkittävä vaikutus kuivumisnopeuteen. Tässä tapauksessa reilun 2 kk kuivumisjaksolla vedestä on poistunut vain noin 10 prosenttia, kun lämmitetyillä koekappaleilla veden poistuminen on ollut 25–50 prosenttia jo ennen uunikuivausta, joka aloitettiin noin 1 kk aiemmin.

3.4 Lämpötila, suhteellinen kosteus ja ilmanpaine

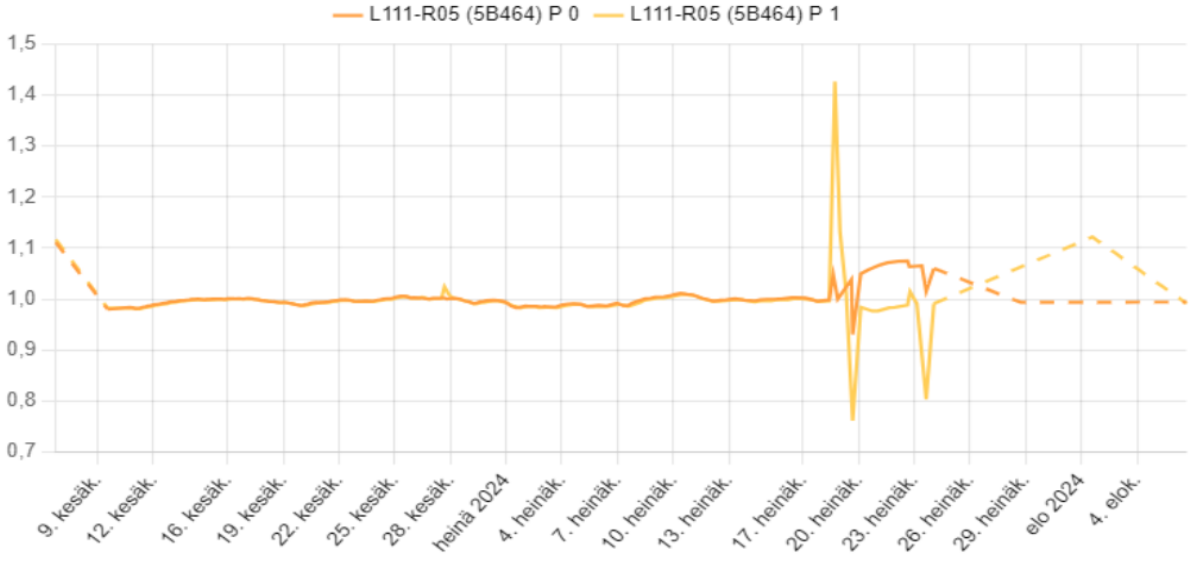
Matolog Cure- ja Box -anturit mittaavat lämpötilaa, suhteellista kosteutta ja ilmanpainetta. Mittalaitteet lähettivät datan Matolog UI -pilvipalveluun, josta sitä noudettiin Excel-taulukoissa tehtävää jatkokäsittelyä varten. Kuvissa 10 ja 11 on esitetty esimerkinomaisesti pilvipalvelun kuvaajia.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



Kuva 10. Rapid sementistä 0,50 v/s-suhteella valmistetun lämmitetyn koekappaleen L111 lämpötilan [°C] ja suhteellisen kosteuden [% RH] kuvaajat 20 mm mittaussyvyydeltä Matolog UI-pilvipalvelusta.

Kuvasta 10 voidaan havainnoida yleisellä tasolla mittaussuureiden arvojen kehitystä tutkimuksen aikana: Matolog Cure-anturi tasaantuu aluksi ympäröivän betonimassan huokosissa olevaan suhteelliseen kosteuteen usean päivän ajan. Lämpötilakäyrästä havaitaan koekappaleiden siirto lämpöpöydälle 27.6.2024 sekä siirto kuivatusuuniin 18.7.2024 Kuvan 10 mittalaite ei odotetusti ole tuottanut uskottavaa dataa enää yli 100 °C lämpötilaan siirron jälkeen.



Kuva 11. Rapid sementistä 0,50 v/s-suhteella valmistetun lämmitetyn koekappaleen L111 ilmanpaineen [bar] kuvaajat 20 mm (P0) ja 60 mm (P1) mittaussyvyyksiltä.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Kuvasta 11 havaitaan erityisesti lämmityksen aiheuttama ilmanpaineen nousu syvemmällä betonin sisällä. Lämpöpöydälle siirto 27.6.2024 aiheuttaa piikin 60 mm mittaussyvyyden käyrään (P1) ja uuniin siirron 18.7.2024 voidaan havaita aiheuttavan merkittävän kohouman 20 mm mittaussyvyyden käyrään (P0).

3.5 Porareikämittaukset

Porareikämittaukset suoritettiin kahdelle lämmittämättömälle koesarjalle tarkoituksena seurata porauksen vaikutusta Matolog Cure -anturin jatkuvatoimisten mittausten lukemiin. Lisäksi tehdyistä porarei'istä otettiin mittauslukemia eri tasaantumisaikojen jälkeen, jotta voitiin tarkastella tasaantumisajan vaikutusta mittausputkista otettuihin lukemiin.

RT-ohjekortissa 103333 [2] ohjeistetaan, että porareikämittauksissa lukemien otto tulisi tehdä 3–14 vrk porauksen jälkeen, jotta kosteustila ehtii tasaantua. Tämän tutkimuksen porareikämittauksissa mittauspisteet porattiin ja valmisteltiin 27.8.2024 ja mittauspisteistä otettiin lukemat 3 vrk valusta (30.8.2024), 7 vrk valusta (3.9.2024) ja 14 vrk valusta (10.9.2024).

Porareikämittaukset tehtiin 30 mm ja 70 mm mittaussyvyyksille, jotka vastaavat Matolog Cure-anturin mittapäiden keskimääräistä syvyyttä koekappaleessa. Tulokset 30 mm mittaussyvyydelle on esitetty taulukossa 7 ja 70 mm mittaussyvyydelle taulukossa 8. Kolmen vuorokauden mittaustulos on jätetty ottamatta molempien sarjojen yhdestä koekappaleesta, jotta saatiin myös yksittäinen myöhäisempi mittaustulos siten, että porareikää ei ole avattu mitattavaksi kertaakaan porauksen jälkeen.

Taulukko 7. Porareikämittaustulokset 30 mm mittaussyvyydeltä. Taulukossa RH = suhteellinen kosteus [% RH] ja T = lämpötila [°C].

Aika	Oiva-sementti, v/s = 0,50						Kolmos-sementti, v/s = 0,50					
	K211		K212		K213		K311		K312		K313	
	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T
3 vrk	77,4	22,6	78,4	22,6			75,8	22,5	74,5	22,6		
7 vrk	76,0	22,7	76,1	22,6	75,5	22,5	72,3	22,5	73,9	22,8	73,7	22,8
14 vrk	74,1	22,5	74,2	22,5	73,0	22,5	70,0	22,5	71,4	22,7	71,0	22,7

Taulukko 8. Porareikämittaustulokset 70 mm mittaussyvyydeltä. Taulukossa RH = suhteellinen kosteus [% RH] ja T = lämpötila [°C].

Aika	Oiva-sementti, v/s = 0,50						Kolmos-sementti, v/s = 0,50					
	K211		K212		K213		K311		K312		K313	
	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T
3 vrk	84,5	22,8	85,6	22,8			81,6	22,7	80,4	22,7		
7 vrk	83,5	22,9	83,4	22,8	83,2	23,0	79,1	23,0	80,2	23,0	81,4	23,1
14 vrk	82,0	22,7	81,5	22,7	83,0	22,8	78,6	22,8	77,6	22,9	77,3	22,9

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

TULOSTEN ANALYSOINTI

4.1 Mitatun suhteellisen kosteuden ja punnitusten tulosten korrelointi lämmitetyissä koekappaleissa

4 Matolog Cure -mittalaitteiden jatkuvaa mittadataa verrattiin punnitustuloksiin 20.6.2024–18.7.2024 aikavälillä. Tätä edeltävässä mittadatassa kaikki Matolog Cure -anturit eivät olleet vielä tasaantuneet betonin huokosilman suhteelliseen kosteuteen (ks. luku 3.2). Heinäkuun lopussa (18.7.2024) aloitetussa uunikuivauksessa suhteellisen kosteuden lukemat muuttuvat rajusti lämpötilamuutoksen myötä ja tarkastelun laajentaminen tälle ajanjaksolle ei siksi ole mielekästä.

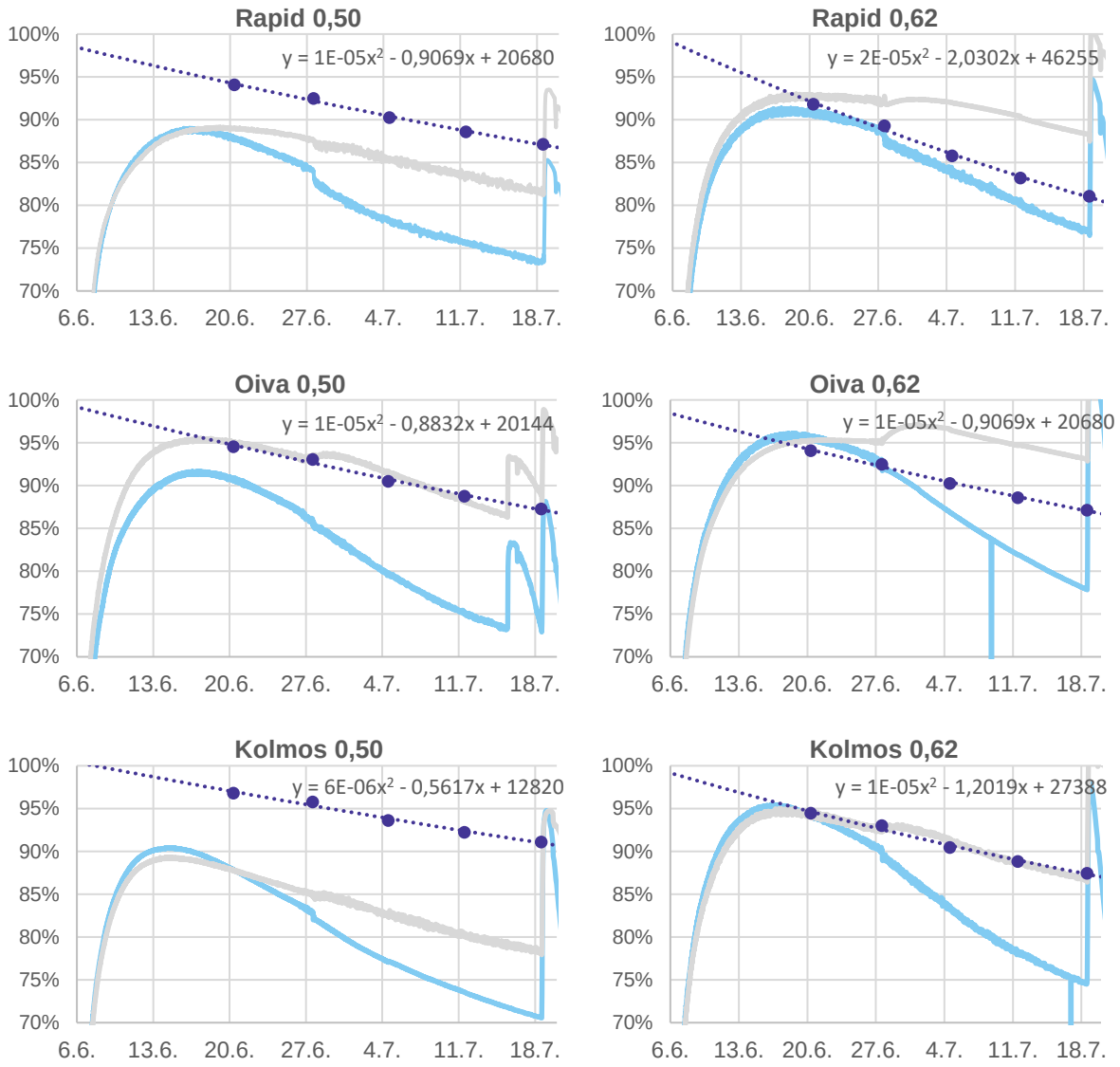
Taulukossa 9 on esitetty eri koesarjojen punnitustuloksista laskettu koekappaleiden sisältämä vesimäärä (luku 3.2 taulukko 5) ja punnitusajankohtaa vastaava suhteellisen kosteuden lukeman keskiarvo Matolog Cure -antureista noin kahden tunnin ajanjaksolta. Keskiarvoa käytettiin, koska suhteellisen kosteuden mittaustuloksessa oli säännönmukaista huojuntaa.

Taulukko 9. Eri betonilaatujen koesarjojen sisältämä vesimäärä verrattuna betonireseptin vesimäärään prosentteina ja punnitusajankohtaa vastaava suhteellisen kosteuden mittaustulos [% RH]. Tulokset on annettu kolmen koekappaleen keskiarvoina. Punnituspäivämäärä-sarake on värikoodattu koekappaleiden säilytysolosuhteiden mukaan: **Vihreä** = olosuhdehuone, hylly. **Keltainen** = olosuhdehuone, lämpöpöytä.

	PVM	V/S-suhde 0,50			V/S-suhde 0,62		
		Vesi	RH 20 mm	RH 60 mm	Vesi	RH 20 mm	RH 60 mm
Rapid	20.6.2024 8:45	94,1 %	87,3 % RH	89,4 % RH	91,8 %	90,8 % RH	92,7 % RH
	27.6.2024 15:03	92,5 %	83,9 % RH	87,5 % RH	89,3 %	88,5 % RH	92,1 % RH
	4.7.2024 13:13	90,3 %	78,1 % RH	85,4 % RH	85,8 %	83,7 % RH	92,0 % RH
	11.7.2024 12:39	88,6 %	75,5 % RH	83,5 % RH	83,2 %	79,1 % RH	88,9 % RH
	18.7.2024 13:23	87,1 %	73,7 % RH	81,5 % RH	81,1 %	76,9 % RH	88,3 % RH
Oiva	20.6.2024 8:45	94,6 %	89,9 % RH	92,9 % RH	94,1 %	95,6 % RH	95,3 % RH
	27.6.2024 15:03	93,0 %	85,1 % RH	91,0 % RH	92,5 %	92,6 % RH	95,0 % RH
	4.7.2024 13:13	90,5 %	78,7 % RH	89,6 % RH	90,3 %	86,9 % RH	96,6 % RH
	11.7.2024 12:39	88,8 %	74,3 % RH	86,8 % RH	88,6 %	81,9 % RH	94,7 % RH
	18.7.2024 13:23	87,3 %	71,2 % RH	84,5 % RH	87,1 %	77,9 % RH	93,1 % RH
Kolmos	20.6.2024 8:45	96,8 %	87,9 % RH	87,7 % RH	94,5 %	94,2 % RH	94,4 % RH
	27.6.2024 15:03	95,8 %	82,8 % RH	85,2 % RH	93,0 %	90,0 % RH	92,3 % RH
	4.7.2024 13:13	93,6 %	77,1 % RH	82,5 % RH	90,5 %	83,5 % RH	91,3 % RH
	11.7.2024 12:39	92,3 %	73,6 % RH	80,3 % RH	88,8 %	78,3 % RH	88,5 % RH
	18.7.2024 13:23	91,1 %	70,6 % RH	78,2 % RH	87,5 %	74,6 % RH	86,7 % RH

Taulukossa 9 esitetyt koekappaleiden sisältämät vesimäärät prosentteina on yhdistetty Matolog Cure -antureiden dataan kuvassa 12.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



Kuva 12. Eri betonilaatujen koesarjojen sisältämä vesimäärä prosentteina verrattuna betonireseptin vesimäärään (siniset pisteet ja sovitekäyrä) ja punnitusajankohtaa vastaava suhteellisen kosteuden mittaustulos [% RH] (sininen, alempi 20 mm syvyydeltä ja harmaa, ylempi 60 mm syvyydeltä). Sovitekäyrän funktio on merkitty kuviin näkyviin.

Kuvan 12 perusteella voidaan todeta punnitustuloksista johdetun koekappaleiden sisältämän vesimäärän alenemisen korreloivan melko hyvin Matolog Cure-anturilla mitatun suhteellisen kosteuden lukemien kanssa. Tämä pätee erityisesti 60 mm mittaussyvyyteen, joka edustaa lähellä kuivuvaa pintaa olevaa anturia paremmin koekappaleen keskimääräistä kosteustilaa.

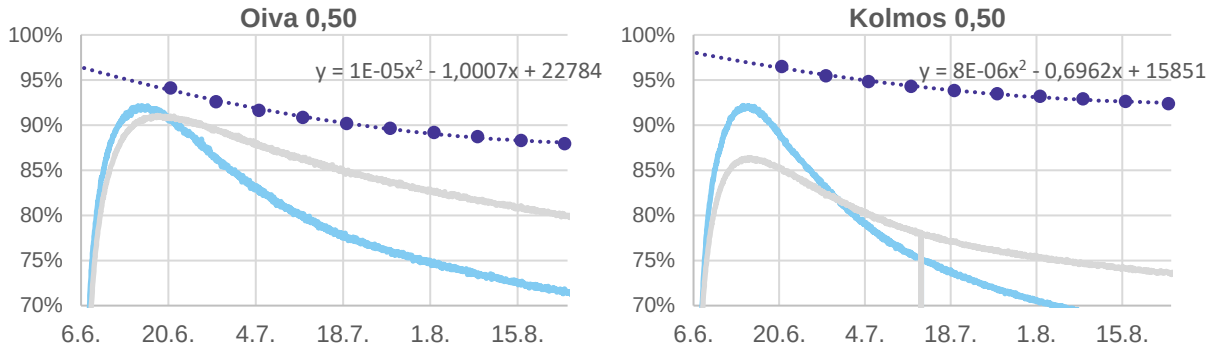
Koekappaleet on siirretty lämpöpöydälle 27.6.2024, mikä näkyy pienenä taitoksena etenkin RH-käyrissä. Reagointi on voimakkaampaa korkeamman vesi-sementti-suhteen betonilla, jossa lienee enemmän huokosten pinnoille heikommin sitoutunutta kosteutta. Kuvaajissa näkyy myös 18.7.2024 tehty koekappaleiden uuniin siirto, jonka jälkeen suhteellisen kosteuden lukemat muuttuvat rajusti eikä korrelaatiota suhteellisen kosteuden ja punnitustulosten väliltä ole enää nähtävissä.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

4.2 Mitatun suhteellisen kosteuden ja punnitusten tulosten korrelointi lämmittämättömissä koekappaleissa

Lämmitettyjen koekappaleiden kohdalla havaittiin korrelaatiota suhteellisen kosteuden mittaustulosten ja punnitustulosten välillä. Siksi tarkastelu toteutettiin myös lämmittämättömille koekappaleille, joissa vertailukelpoinen mittaussarja on pidempi ja tarkastelua vaikeuttavat lämpötilamuutokset puuttuvat.

Seurantajakso on esitetty valupäivästä alkaen, vaikka suhteellisen kosteuden lukema ei ensimmäisillä viikoilla ole vielä tasaantunut betonin huokosilman suhteelliseen kosteuteen. Ensimmäiset kaksi (6.6.2024 ja 13.6.2024) punnitustulosta on jätetty pois, koska niiden aikana betonia on jälkihoidettu eli kuivuminen on ollut estettyä. Seuranta voitiin näissä kappaleissa ulottaa 22.8.2024 tehtyyn viimeiseen punnitukseen asti. Kuvassa 13 on yhdistetty taulukon 5 kuivumismittausten tulokset Matolog Cure -anturin suhteellisen kosteuden mittaustuloksiin (vrt. kuva 12).



Kuva 13. Lämmittämättömien koekappalesarjojen vesimäärä prosentteina verrattuna betonireseptin vesimäärään (siniset pisteet ja sovitekäyrä) ja punnitusajankohtaa vastaava suhteellisen kosteuden mittaustulos [% RH] (sininen, alempi 20 mm syvyydeltä ja harmaa, ylempi 60 mm syvyydeltä). Sovitekäyrän funktio on merkitty kuviin näkyviin.

Sovitekäyrän osalta havaitaan, että koekappaleiden sisältämän vesimäärän prosenttiosuudet sopivat johdonmukaisesti toisen asteen polynomifunktioon. Vesimäärien prosenttiosuudet on määritetty otaksuen aloitushetkellä 6.6.2024 vesimääräksi 100 %, mutta jos tämä piste otettasiin mukaan sovitekäyrään, se ei korreloisi mittauspisteisiin yhtä hyvin.

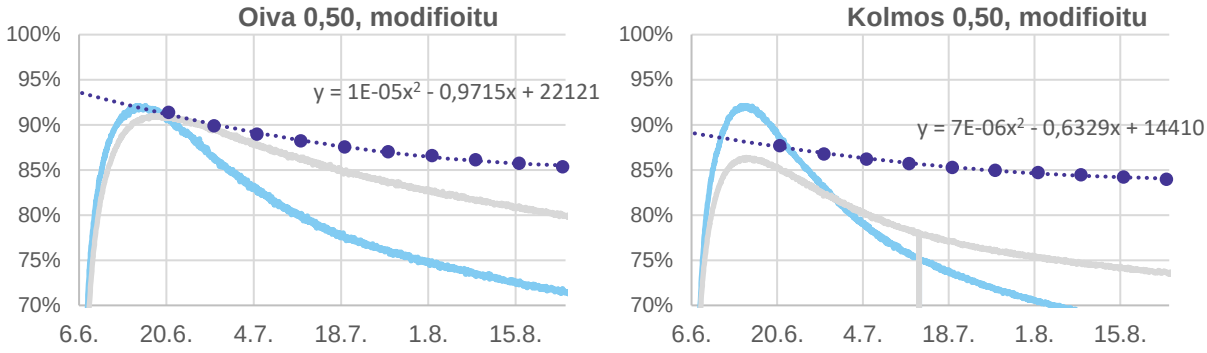
Näissä kokeissa suhteellisen kosteuden mittaustulokset eivät saavuta kovin korkeaa tasoa jälkihoidon jälkeen, mikä lienee merkittävimmiltä osin seurausta alhaisesta vesi-sementti-suhteesta, jolloin kemiallinen kuivuminen on varsin voimakasta. Kuvia 12 ja 13 vertaamalla havaitaan, että lämmitettyjen sarjojen Oiva 0,50 ja Kolmos 0,50 tulokset on samankaltaiset lämmittämättömien sarjojen kanssa lämpöpöydälle siirtoon asti.

Huomionarvoista on kolmos-sementistä tehdyn koesarjan kaikilla koekappaleella toistunut ilmiö, että lähempänä pintaa mitattu suhteellinen kosteus on ollut merkittävästi syvemmältä tehtyä mittausta korkeampi ja suhteellisen kosteuden käyrät leikkaavat toisensa vasta n. 1.7.2024. Tälle ilmiölle ei etsitty selitystä ja se ei toistunut yhtä voimakkaana yhdelläkään toisella koekappalesarjalla – ei myöskään lämmitettyjen koekappaleiden kolmos-sementti -sarjoissa, vaikka samankaltainen käytös onkin niissä lievempänä havaittavissa. Toistuvuus

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

kaikissa kolmessa rinnakkaiskoekappaleessa indikoi mittausjärjestelyyn (säilytystila ja -tapa) tai sementtilaatuun viittaavaa selitystä. Kyse ei todennäköisesti ole mittalaitevirheestä. Todennäköisimmin kyse on materiaaliteknisestä ilmiöstä esimerkiksi sementin sitoutumisessa, joka näyttäytyy mittaustuloksissa tähän tapaan.

Kuvasta 13 havaitaan, että myös suhteellisen kosteuden mittaustulokset noudattavat jonkinlaista paraabelimuotoa kuivumisjaksolla. Kuvassa 14 onkin tarkasteltu, miten punnitustuloksien ja suhteellisen kosteuden mittaustulosten käyrät korreloivat toisiinsa, jos punnitustulosten lähtötasoa (100 % arvon tuottavaa vesimäärää) modifioidaan siten, että eri käyrät on samalla tasolla 20.6.2024.



Kuva 14. Lämmittämättömien koekappalesarjojen vesimäärä prosentteina verrattuna betonireseptin vesimäärään (siniset pisteet ja sovitekäyrä) ja punnitusajankohtaa vastaava suhteellisen kosteuden mittaustulos [% RH] (sininen, alempi 20 mm syvyydeltä ja harmaa, ylempi 60 mm syvyydeltä). Punnitustulosten tasoa on muutettu modifioimalla koekappaleista poistunutta vesimäärää. Sovitekäyrän funktio on merkitty kuviin näkyviin.

Modifioinnin seurauksena havaitaan, että punnitustulokset, jotka kuvaavat koko koekappaleesta poistunutta vesimäärää, tuottavat yhdessä eri syvyydeltä saatujen suhteellisen kosteuden mittaustulosten kanssa muodoltaan varsin yhtenevän käyräparven. Tämä on sinällään odotettavissa oleva ilmiö, koska eri syvyyksiltä mitatut suhteelliset kosteudet edustavat kosteustasoa mittaussyvyydellään, mutta syvällä koekappaleessa on enemmän kosteutta, jonka hidas poistuminen tuottaa loivemman käyrän punnitustulosten mukaan lasketulle vesimäärälle. Käyrien tarkempi vertailu edellyttäisi myös tasapainokosteuskäyrään liittyvien ilmiöiden huomioon ottamista, jotta tuloksista saisi vielä paremmin vertailukelpoisia.

4.3 Eri mittausmenetelmillä lasketun kosteusvirran korrelaatio

Suhteellisen kosteuden mittaustulosten ja punnitustuloksista saadun vesimäärän välisen korrelaation tarkastelemiseksi tehtiin Fickin lakiin perustuvaa monimutkaisempaa laskennallista. Tarkastelu tehtiin tähän, vesihöyryn diffuusion teoriaan pohjautuen, koska se on kuivumisen alkujakson jälkeen vallitseva kosteuden siirtymismuoto betonissa.

Laskennassa Matolog Cure -anturien mittadatan perusteella laskettiin kaavaa 6 hyödyntäen huokosilman vesihöyrypitoisuuden arvot. Tämän jälkeen laskettiin vesihöyrypitoisuuserot eri mittaussyvyyksien välillä mittaushetkittäin: Nyt käytettävissä oli kolme mittaussyvyyttä: 0 mm (huoneilma), 20 mm syvyys (koekappaleen sisältä lähempää kuivuvaa pintaa) ja 60 mm syvyys

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

(koekappaleen sisältä syvempi tulos). Mittaushetkittäiset vesihöyrypitoisuuserot summattiin integroiden ajan yli, eli summa laskettiin vesihöyrypitoisuuden ja aika-askeleen tulosta. Näin saatiin ”vesihöyrypitoisuuseron integraali”, eli toisin sanoen yksiköltään tuntematon poistuneen kosteuden määrä.

Vesihöyrypitoisuuden integraaleja vertailtiin eri tavoin punnitustulosten perusteella määritetyn veden poistuman sekä muiden mitattujen tunnuslukujen suhteen. Tarkasteluilla yritettiin etsiä yhtäläisyyksiä eri koekappalesarjojen välillä, jos käytettävissä on vain betoniresepti ja Matolog-antureilta saatava mittadata. Nyt käytetyllä datalla ainoa yhtenäinen havainto oli, että vesihöyrypitoisuuden integraali 60 mm syvyydeltä pintaan ei juurikaan poikennut 20 mm syvyydeltä pintaan lasketusta integraalista. Tämä tarkoittaa, että tarkastelujaksolla lähes kaikki punnituksissa havaittu kosteuden poistuma on tapahtunut 0…20 mm syvyydeltä, eli kuivuminen ei edennyt kovin syvälle kappaleisiin tarkastelujakson aikana.

Tarkasteluiden perusteella voidaan todeta, että tälläkään laskentatavalla ei saada kunnollista yhteyttä koekappaleen painon muutoksen, eli poistuvan kosteuden määrän ja mitatun suhteellisen kosteuden tulosten välille. Kosteusprofiilin muutos betonissa on todellisuudessa epälineaarinen, kun laskentatavassa se oletetaan lineaariseksi eri mittaussyvyyksien välillä ja tämä luo epätarkkuutta tarkasteluun. Lisäksi syvemmällä betonissa kapillaariset ilmiöt ovat merkittävässä roolissa ja diffuusion teoriaan pohjautuva tarkastelu ei siten ole suoraan sovellettavissa. Lisäksi tarkastelussa on muita mahdollisia puutteita. Laskentamenetelmän mahdollisuuksia on pohdittu laajemmin luvussa 5.

4.4 Porauksen vaikutus mittaustuloksiin

Lämmittämättömille koekappaleille tehtiin tutkimuksen loppuvaiheessa porareikämittaukset. Mittausten tavoitteena oli osoittaa porauksen aiheuttama häiriö betonista mitattavaan suhteellisen kosteuden arvoon Matolog Cure-anturien sekä varsinaisten porareikämittausten tulosten perusteella.

Mittausputkista otettiin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan lukemat 3 vrk, 7 vrk ja 14 vrk porauksen jälkeen. Molempien sarjojen yhden koekappaleen osalta 3 vrk tulos jätettiin ottamatta, jotta saatiin 7 vrk mittaustulos myös sellaisesta koekappaleesta, jonka mittausputkea ei ole avattu mitattavaksi porauksen jälkeen.

Taulukoissa 11 ja 12 on esitetty porareikämittaustulokset 30 mm ja 70 mm mittaussyvyyksiltä sekä porareikien lukemienottohetkeä vastaavat Matolog Cure-anturien suhteellisen kosteuden lukemat. Lisäksi on esitetty Matolog Cure-anturin suhteellisen kosteuden arvo poraushetkellä (Aloitus) sekä porauksen vaikutuksesta kohoavan suhteellisen kosteuden maksimiarvo (Max RH), joka on usein saavutettu joitain päiviä porauksen jälkeen. Tuloksia vertaillessa tulee huomata, että Matolog-anturin mittapää on kontaktissa betoniin luokkaa syvyydellä 10 – 30 mm sekä 50 – 70 mm, eli mittaustuloksissa on taustalla systemaattinen, mutta tuntematon ero eri mittalaitteiden mittaussyvyydessä.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Taulukko 11. Porauksen vaikutus betonin huokosilman suhteellisen kosteuden [% RH] mittaustuloksiin porareikämittauksessa 30 mm mittaussyvyydessä.

	Oiva-sementti, v/s = 0,50						Kolmos-sementti, v/s = 0,50					
	K211		K212		K213		K311		K312		K313	
	Pora-RH	Mato-RH	Pora-RH	Mato-RH	Pora-RH	Mato-RH	Pora-RH	Mato-RH	Pora-RH	Mato-RH	Pora-RH	Mato-RH
Pora-	Aloitus	Max RH	Aloitus	Max	Aloitus	Max	Aloitus	Max	Aloitus	Max	Aloitus	Max
vaik.	72,5	72,7	71,0	73,7	69,9	70,7	68,5	70,5	66,4	69,5	66,9	68,3
3 vrk	77,4	71,4	78,4	72,4			75,8	68,8	74,5	68,7		
7 vrk	76,0	71,0	76,1	71,0	75,5	69,4	72,3	67,8	73,9	67,3	73,7	65,9
14 vrk	74,1	70,2	74,2	69,6	73,0	69,0	70,0	66,2	71,4	65,6	71,0	64,6

Taulukko 12. Porauksen vaikutus betonin huokosilman suhteellisen kosteuden [% RH] mittaustuloksiin porareikämittauksessa 70 mm mittaussyvyydessä.

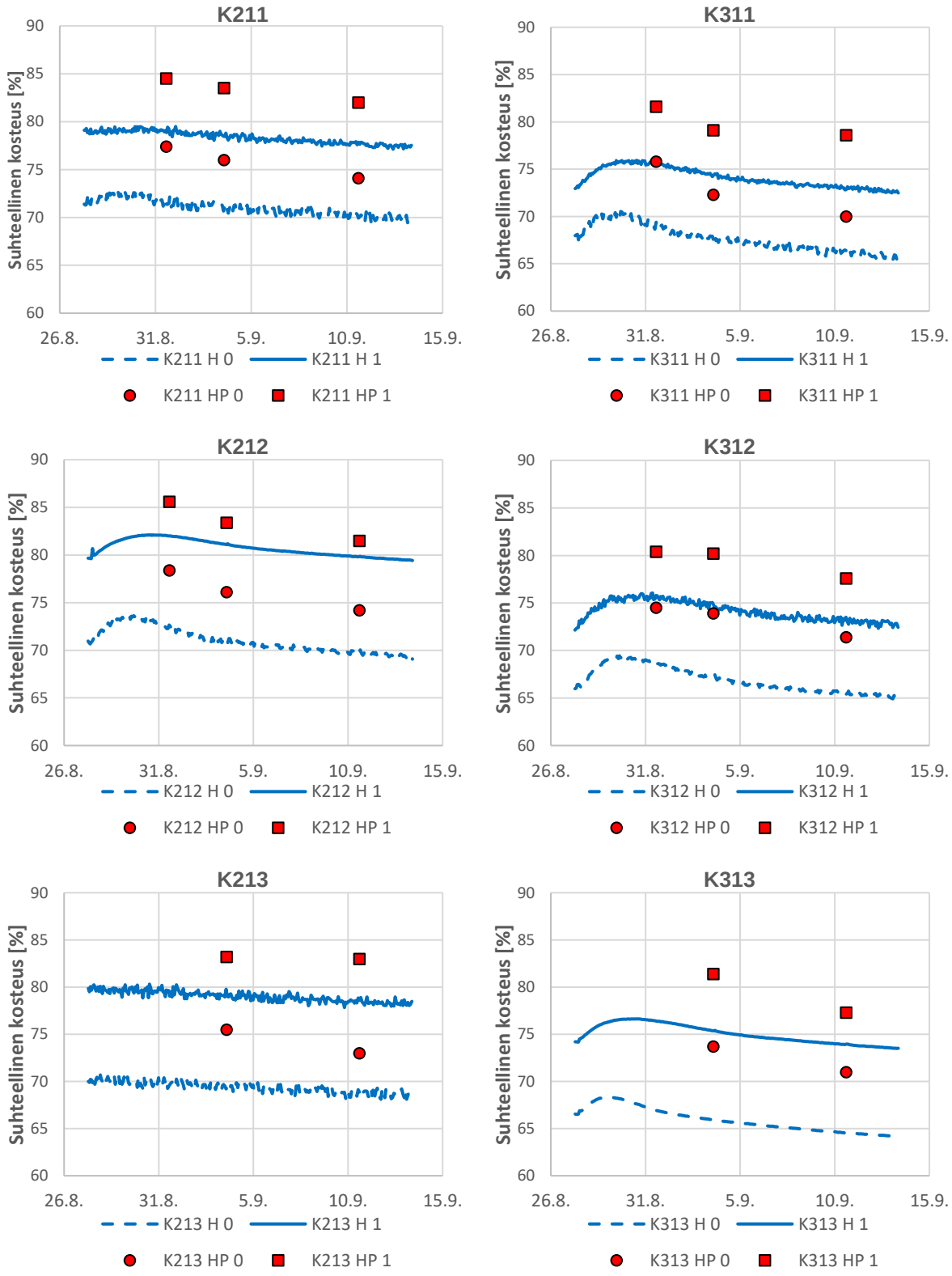
	Oiva-sementti, v/s = 0,50						Kolmos-sementti, v/s = 0,50					
	K211		K212		K213		K311		K312		K313	
	Pora-RH	Mato-RH	Pora-RH	Mato-RH	Pora-RH	Mato-RH	Pora-RH	Mato-RH	Pora-RH	Mato-RH	Pora-RH	Mato-RH
Pora-	Aloitus	Max RH	Aloitus	Max	Aloitus	Max	Aloitus	Max	Aloitus	Max	Aloitus	Max
vaik.	79,1	79,5	80,7	82,1	80,0	80,3	73,3	75,9	73,1	76,1	74,5	76,6
3 vrk	84,5	79,1	85,6	82,0			81,6	75,6	80,4	75,6		
7 vrk	83,5	78,5	83,4	81,1	83,2	79,2	79,1	74,4	80,2	74,8	81,4	75,4
14 vrk	82,0	77,8	81,5	79,8	83,0	78,6	78,6	73,0	77,6	73,2	77,3	73,9

Poraukset on tehty tutkimuksen koekappaleisiin, joissa porareiän etäisyys Matolog Cure -anturista on varsin pieni. Tulosten avulla ei pystytä arvioimaan porauksen sivusuunnassa aiheuttaman häiriön laajuutta tarkemmin.

Jos asennettaisiin useita Matolog Cure -antureita eri sivusuuntaisille etäisyyksille tehtävästä porareiästä, voitaisiin nyt toteutetulla mittausjärjestelyllä arvioida myös porareikien välisen riittävän suojaetäisyyden arvoa.

Kuvassa 17 on esitetty kuvaajina taulukoiden 11 ja 12 porareikämittaustulokset ja Matolog Cure -anturien mittausdata koekappaleittain molemmilta mittaussyvyyksiltä.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



Kuva 17. Porareikämittaustulokset ja Matolog Cure -anturien mittausdata koekappaleittain molemmilta mittaussyvyyksiltä (10-30; 30 mm : H0; HP0, 50-70; 70 mm : H1; HP1)

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Kuvista voidaan todeta porauksen vaikutus Matolog Cure -anturien suhteellisen kosteuden mittaustulokseen sekä porauksen jälkeen kuluneen ajan vaikutus kaikkien mittaustulosten tasaantumiseen. Poraus aiheuttaa Cure-antureilla mitattuun suhteelliseen kosteuteen kohoaman, joka ei täysin ehdi palautua porausta edeltävälle tasolle ennen kolmen vuorokauden kohdalla suoritettua ensimmäistä porareikämittauksen lukemienottoa. Tämä on havaittavissa myös porareikämittauksissa, sillä ensimmäinen lukemienotto 3 vrk tasaantumisajalla on koholla suhteessa myöhempiin 7 vrk ja 14 vrk tasaantumisajalla suoritettuihin lukemienottoihin. Matolog Cure -anturien perusteella poraamisen aiheuttama häiriö on poistunut vasta 2–4 vk kuluttua porauksesta

Porareikämittaustarkastelussa otettiin myös huomioon samasta mittausputkesta toistuvasti suoritetun mittauksen mahdollinen vaikutus myöhempiin mittaustuloksiin. Molemmista koekappalesarjoista jätettiin ensimmäisellä mittauskerralla tekemättä lukemienotto koesarjan kolmannesta kappaleesta. Näiden kappaleiden tapauksessa on siten mahdollista arvioida, onko toistuvalla mittausputken avaamisella ollut mittaustulosta alentava vaikutus myöhempiin lukemienottoihin. Mittaustulosten perusteella näin ei vaikuta olevan, vaan koesarjojen kolmannen kappaleen mittaustulokset ovat linjassa koesarjojen muiden kappaleiden kanssa.

5 POHDINNAT

5.1 Pohdintojen taustoitus

Tässä luvussa on nostettu esiin tutkimuksen yhteydessä tehtyjä havaintoja, joiden tarkempi tieteellinen tarkastelu on jätetty tekemättä. Tarkoituksena on tuoda esiin havaintoja, joita pystytään mahdollisesti selvittämään tarkemmin joko syventymällä mittadataan enemmän, hakemalla havaintojen tueksi soveltuvia kirjallisuuslähteitä tai tekemällä uusia laboratoriomittauksia, joiden tutkimusasetelmassa on keskitytty näiden havaintojen todentamiseen.

Pohdintojen taustalla on usein betonin tasapainokosteuskäyrän käyttäytymiseen liittyvät ilmiöt, joista tässä on mainittu pohdintojen kannalta keskeisimmät:

- Kuivuvan, desorptiossa olevan betonin huokosilman suhteellinen kosteus tietyssä kosteuspitoisuudessa (kg/m^3) on alempi kuin vastaavan kosteuspitoisuuden adsorptiossa olevan betonin huokosilman suhteellinen kosteus olettaen, että desorption ja adsorption välillä esiintyy hystereesiä.
- Lämpötila vaikuttaa tasapainokosteuskäyrään. Lämpötilan noustessa materiaalin huokosilman suhteellinen kosteus tyypillisesti nousee, vaikka kosteuspitoisuus pysyisi vakiona.
- Betonimateriaalin tasapainokosteuskäyrän kulmakerroin suurenee korkeammilla kosteuspitoisuuksilla. Tämä tarkoittaa, että samansuuruinen suhteellisen kosteuden muutos korkeammissa kosteustasoissa vastaa suurempaa kosteuspitoisuuden muutosta kuin alemmilla kosteustasoilla. Ilmiö on seurausta pienissä huokosissa tapahtuvasta kapillaarikondenssista, joka alkaa betonilaadusta riippuen tyypillisesti voimistua 85 % RH kosteustason yläpuolella.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

5.2 Sementtilaatujen väliset erot

Luvussa 4.1 on tarkasteltu punnitustulosten ja suhteellisen kosteuden mittausten välistä korrelaatiota ja pohdittu vesi-sementti-suhteen vaikutusta kapillaarisesti sitoutuneen kosteuden määrään. Tuloksista voidaan lisäksi havainnoida sementtilaatujen välisiä eroja.

Luku 4.1: *”Koekappaleet on siirretty lämpöpöydälle 27.6.2024, mikä näkyy pienenä taitoksena etenkin RH-käyrissä. Reagointi on voimakkaampaa korkeamman vesi-sementti-suhteen betonilla, jossa lienee enemmän huokosten pinnoille heikommin sitoutunutta kosteutta. Kuvaajissa näkyy myös 18.7.2024 tehty koekappaleiden uuniin siirto, jonka jälkeen suhteellisen kosteuden lukemat muuttuvat rajusti eikä korrelaatiota suhteellisen kosteuden ja punnitustulosten väliltä ole enää nähtävissä.”*

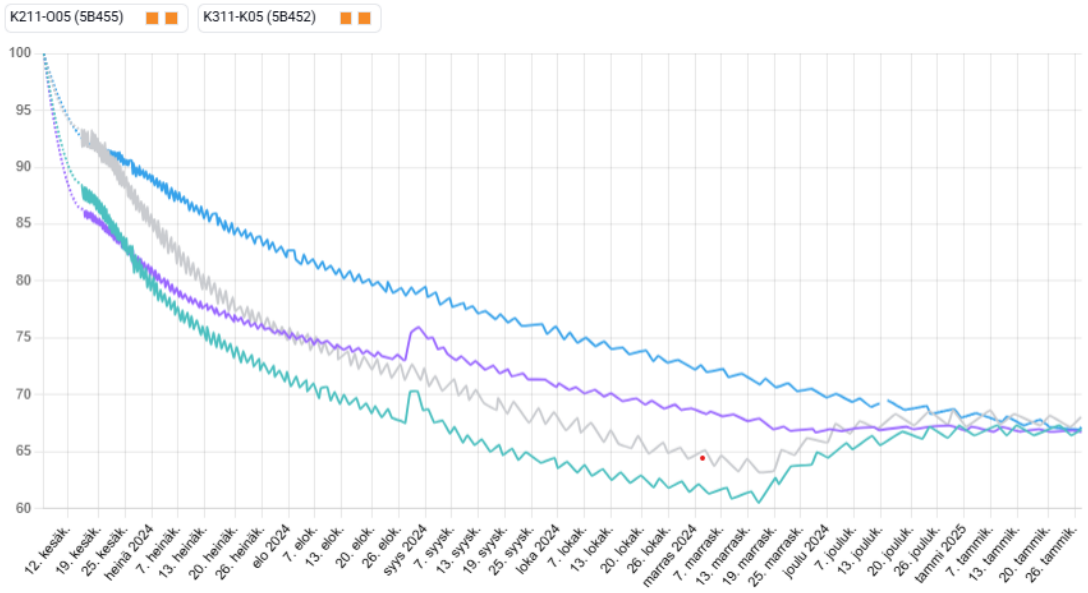
Kuvan 12 käyrien tasoja vertailemalla voidaan vahvistaa edellistä havaintoa: vesi-sementti-suhteella on selkeä korrelaatio suhteellisen kosteuden lähtötasoon; korkeamman vesi-sementti-suhteen betonien huokosilma on kuivumisen alkaessa kosteampaa. Huokosilman korkea suhteellinen kosteus tarkoittaa vastaavasti heikompia sidosvoimia huokosissa nesteeksi sitoutuneen kosteuden osalta.

Eri sementtilaatujen välillä vastaavaa johdonmukaista eroa kuivumisen lähtötasossa ei ole selkeästi havaittavissa, vaikka eroja onkin. Sen sijaan kuivumisen edetessä punnitustulosten ja suhteellisen kosteuden väliset erot kehittyvät eri tavoin eri sementtilaaduilla. Tätä on havainnollistettu jo edempänä kuvassa 8. Keskeistä on huomata, että kuvan 8 mukaan Kolmossementistä kosteus poistuu isommissa määrin vasta uunikuivauksen aikana. Vastaavasti Rapid-sementistä poistuminen jo varhaisemmassa vaiheessa on suurempaa ja Oiva asettuu näiden välimaastoon. Erot pienenevät uunikuivauksen aikana ja lopulta Kolmossementti ja Oiva asettuvat jotakuinkin samalle tasolle, mutta Rapidista poistunut vesimäärä jää lopultakin suurimmaksi.

Kuvasta 12 voidaan havaita myös se, että Kolmossementissä huokosilman suhteellinen kosteus laskee muita nopeammin etenkin syvemmissä mittapisteissä. Havainnot yhdistämällä voi tehdä johtopäätöksen, että Kolmossementin tasapainokosteuskäyrä desorptiossa poikkeaa merkittävästi muiden betonilaatujen vastaavasta tasapainokosteuskäyrästä. Tämä tarkoittaa, että samalla mitatulla huokosilman kosteustasolla materiaaliin voi olla sitoutuneena enemmän vettä. Kuitenkin, kun mennään entistä kuivempaan olosuhteeseen, eli tässä tapauksessa uunikuivataan materiaali, niin koko sitoutunut kosteusmäärä on vapaa poistumaan materiaalista.

Edellistä havaintoa tukee lisäksi hankkeen raportointivaiheen aikana kahdesta lämmittämättömästä koekappaleesta napattu suhteellisen kosteuden mittaustulosten kuvaaja (kuva 18).

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



Kuva 18. Oiva- ja Kolmossementistä valettujen yksittäisten koekappaleiden suhteellisen kosteuden kuvaajat valusta koekappaleiden hävittämiseen. Sininen (ylin) käyrä on K211 Oiva v/s 0,5 koekappaleen syvemmästä mittapisteestä ja harmaa saman koekappaleen pinnan lähellä olleesta mittapisteestä. Violetti käyrä on K311 Kolmos v/s 0,5 koekappaleen syvemmän mittapisteen ja vihreä pinnan lähellä olleesta mittapisteestä.

Kuvasta voidaan havaita systemaattisia käyttäytymisen eroja Oiva- ja Kolmossementin välillä. Ensin Kolmossementistä mitattu suhteellinen kosteus laskee nopeasti valun jälkeen ja mitattu lähtötaso on yli 5 RH %-yksikköä alempi kuin Oivalla. Porareikämittaus syyskuussa näkyy häiriönä Kolmossementin käyrässä, mutta ei vaikuta trendiin merkittävästi. Marraskuussa koekappaleiden kannet on asennettu takaisin paikoilleen, eli kuivuminen on estetty. Voidaan havaita, että Oivalla tämä ei vaikuta syvemmän mittapisteen trendiin ja lähempänä pintaa kosteus nousee syvemmän mittapisteen tasolle kosteustilan vaihtuessa desorptiosta adsorptioon. Kolmossementillä kuivumisen estäminen sen sijaan on hidastanut myös syvemmän mittapisteen laskevaa trendiä ja lopulta kolmossementin mitattu suhteellinen kosteus nousee läpi kappaleen samalle tasolle Oivan kanssa.

Nopeammin reagoineet Rapid ja Oiva-sementit näyttäisivät siis synnyttävän paremmin kosteutta luovuttavan huokosverkoston; Kolmossementillä kosteus sitoutuu tiukemmin ja näkyy siten matalampana suhteellisena kosteutena. Lopulta huokosten korkeampi absoluuttinen kosteuspitoisuus kuivumisen päättyessä kuitenkin näyttäytyy suurempana mitatun suhteellisen kosteuden nousuna kuvassa 18 tai yhtä suurena poistuneen kosteuden kokonaismääränä kuvassa 8.

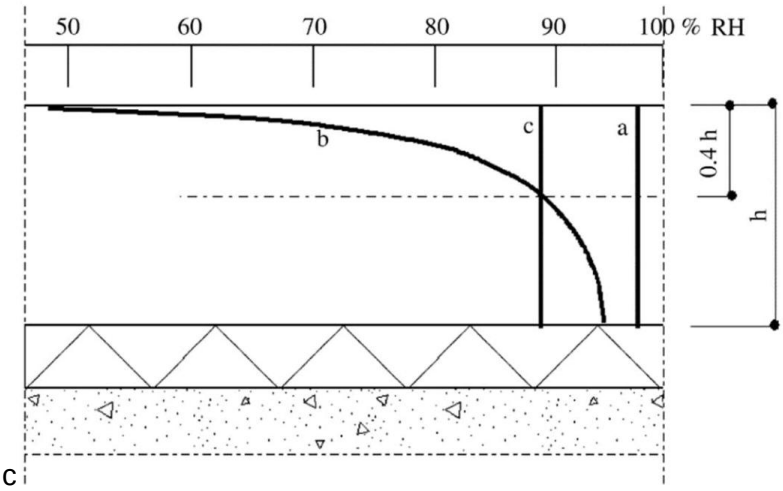
Nämä havainnot selittyvät toisistaan poikkeavilla huokoskokojakaumilla betonilaatujen välillä, joka puolestaan johtaa toisistaan poikkeaviin tasapainokosteuskäyriin. Lisäksi adsorptio- ja desorptiokäyrien eroissa lienee vaihtelua eri betonilaatujen välillä. Nämä yhdessä selittävät Kolmossementin suuremman mitatun suhteellisen kosteuden nousun pinnoituksen jälkeen sekä uunissa poistunee kosteusmäärän vertailukelpoisuuden Oivan kanssa. Tosin myös kemiallisilla eroilla voi olla merkitystä.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Tämän luvun keskeisin johtopäätös on, että turvallinen pinnoitusta edeltävä suhteellisen kosteuden taso kolmossementillä poikkeaa Oivan ja Rapidin tasosta. Tämän tutkimuksen perusteella ei voi esittää tarkempaa arviota pinnoitettavuuden kriteereistä ja tätä tulisi selvittää jatkotutkimuksilla.

5.3 Kosteuden poistumisen laskenta suhteellisen kosteuden mittaustulosten avulla

Kosteuden potentiaalin integraali -laskelmat tehtiin vain lämmitettyjen sarjojen koekappaleille. Tarkastelu on jokseenkin monimutkainen ja työläs, eikä sillä saavutettu erityisen hyvää korrelaatiota punnitustuloksiin. Tarkastelun teoriapohja on kuitenkin varsin pitävä ja pidempikestoisen kuivumiskokeen avulla laskentamenetelmästä voisi saada enemmän irti. Syvempää tarkastelua tehdessä laskelmassa on syytä ottaa huomioon betonin sisäinen suhteellisen kosteuden jakauman muutos (kuva 19).



Kuva 19. Betonilaatan suhteellisen kosteuden jakauma (a) välittömästi valun jälkeen (b) ennen pinnoitusta (c) pinnoituksen jälkeen kosteuspitoisuuden tasaannuttua. [4]

Kuvan 19 mukaisesti betonin huokosilmaan voidaan olettaa määrätty suhteellisen kosteuden jakauma, kun käytetään sovitteen piirtoon kolmen eri mittaussyvyyden (huoneilma, matala ja syvä) suhteellisen kosteuden mittaustuloksia. Tämän suhteellisen kosteuden jakauman muutos koekappaleen syvyyden ja ajan yli yhtäaikaisesti tulisi huomioida jollain tapaa integraalin laskennassa, jotta eri syvyyksiltä poistuva kosteusmäärä tulisi tarkemmin huomioiduksi. Tämän teorian toteutumista tukee luvussa 4.2 tehdyt havainnot punnitustulosten ja suhteellisen kosteuden mittaustulosten yhtäläisistä käyttäytymisistä trendejä tarkasteltaessa.

Edellistäkin ilmiötä oleellisempaa on tunnistaa, miten kosteus betonipoikkileikkauksessa käyttäytyy pinnoituksen jälkeen, kun kuivuminen yläpinnan läpi hidastuu oleellisesti tai jopa pysähtyy. Jos vesihöyrypitoisuuseron integraalin laskelmilla voitaisiin havaita, että kosteuden potentiaali syvemmältä anturilta lähempänä pintaa olevalle anturille saavuttaa pinnoitushetken lähestyessä vielä tuntemattoman raja-arvon, voisi tätä käyttää päättelyn tukena, kun pinnoitusajankohtaa määritetään. Hypoteesin testaaminen vaatisi lisätutkimusta.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Hypoteesi on, että kosteusvirta syvemmältä anturilta lähempänä pintaa olevalle anturille alkaa jossain kohtaa nousemaan merkittävämmäksi potentiaalilaskelmassa ja tämä tarkoittaisi, että kuivumista lähellä pintaa olevan anturin ja huoneilman välillä ei enää tapahdu niin merkittävästi. Jotta tilanne voidaan saavuttaa, on kuivumisen edettävä pois kapillaarisen kosteuden alueelta, mikä samalla tarkoittaa, että lähellä pintaa on paljon kosteuskapasiteettia jäljellä. Tämä kosteuskapasiteetti pystyy sitomaan syvemmältä hitaasti pintaa kohti liikkuvan kosteuden ilman, että kosteustaso aivan pinnassa nousee vaaralliselle tasolle. Pinnoituksen jälkeisissä kosteusmittauksissa tulee kuitenkin huomioida, että betoni siirtyy tasapainokosteuden desorptiokäyrältä adsorptiokäyrälle, jolloin suhteellisen kosteuden mittaustulos suurenee, vaikka betonin kosteuspitoisuus pysyy vakiona.

Tässä tutkimuksessa ei aikataulun puitteissa saatu syntymään tilannetta, että vesihöyrypitoisuuseron integraalin askelmilla voitaisiin varmentaa edellä esitetty hypoteesi. Kuivumisjaksojen tulisi olla oleellisesti pidempiä, että yllä kuvattu tilanne pääsisi syntymään. Lämmittämättömillä koekappaleilla saavutettiin tavanomaiset pinnoitettavuuskriteerin mukaiset suhteellisen kosteuden tasot, mutta potentiaalin laskelmia ei pystytty näille kappaleille tekemään loppuun asti, kun huoneilman referenssianturi siirrettiin muiden koekappaleiden mukana uuniin.

Yleisesti eri tarkasteluiden perusteella voidaan todeta, että suhteellista kosteutta mittaamalla ei saada helposti kiinni betonin sisältämää vesimäärää, vaikka tarkasteluun olisi käytettävissä useampia jatkuvatoimisia rinnakkaisia mittauksia eri syvyyksiltä. Syynä ovat erilaiset kosteuden siirtymismuodot, betonin jokseenkin tuntematon ja epälineaarinen kosteusprofiili pinnasta syvemmälle edettäessä sekä tasapainokosteuskäyrän epälineaarisuus. Tästä huolimatta eri mittaussyvyyksien välisiä kosteusvirran potentiaalieroja tarkastelemalla lienee mahdollista arvioida kuivuvan kosteuden alkuperää, eli kuinka iso osa poistuvasta kosteudesta tulee syvemmän anturin alapuolelta.

5.4 Poraamisen aiheuttama häiriö betonista mitattuun suhteelliseen kosteuteen

Porareikämittausten ja Matolog Cure -antureiden välillä on selkeä ja melko systemaattinen ero mitatussa suhteellisen kosteuden tasossa riippumatta poraamisen jälkeisestä tasaantumisajasta (kuva 17). Tässä yhteydessä oletetaan molempien mittausmenetelmien mittapäiden toimineen oikein, eli suhteellisen kosteuden mittaustuloksessa ei ole merkittäviä virheitä. Pohditaan seuraavassa mahdollisia syitä systemaattiseen eroon pohjautuen näihin kahteen olettamaan.

Porareikämittauksessa suhteellinen kosteus mitataan porareiästä, jonka sisällä oleva ilma oletetusti tasaantuu samaan suhteellisen kosteuden tasoon betonin huokosissa olevan ilman kanssa. Tällaisessa tilanteessa kosteus liikkuu betonin huokosista porareikää kohti, eli materiaali on desorptiossa, kuten kuivumisen aikana ylipäätään. Tähän perustuen voidaan ajatella, että porareikämittauksen tulos edustaisi tasapainokosteuskäyrän desorptiokäyrältä löytyvää suhteellisen kosteuden arvoa.

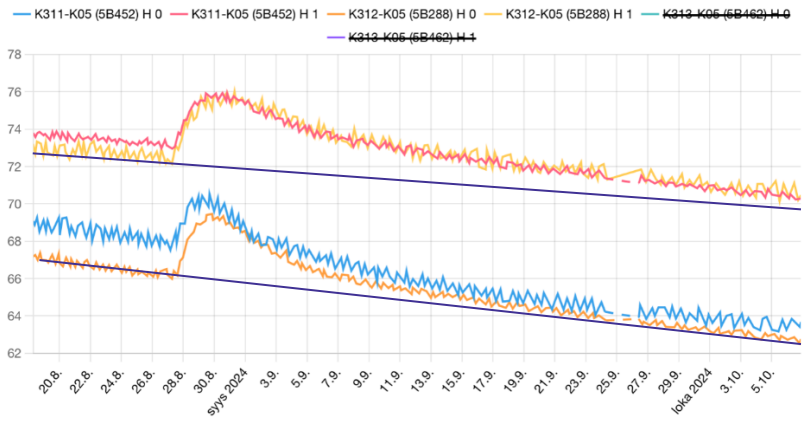
Poraaminen kuitenkin lämmittää betonia reiän ympärillä. Lämpiäminen aiheuttaa betonin tasapainokosteuskäyrään muutoksen ja suhteellisen kosteuden mittaustulos nousee, vaikka betonin kosteuspitoisuus ei muutu. Käytännössä siis huokosiin sitoutunutta vettä vapautuu

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

huokosilmaan ja tämä näkyy huokosilmasta mitattavan suhteellisen kosteuden nousuna. Lämpötilan nousu on varsin lyhytaikainen ja tasaantuu betonissa nopeasti. Se kuitenkin on jo aiheuttanut tilanteen, että porareikää ympäröivä betoni ei ole enää desorptiossa, vaan jossain adsorptio- ja desorptiotasapainokosteuskäyrien välimaastossa. Näin kosteuspitoisuuden pysyessä vakiona suhteellisen kosteuden mittaustulos voi vaihdella adsorptio- ja desorptiokäyrien rajoittamassa välimaastossa.

Tasapainokosteuskäyrän luonteeseen liittyy, että samassa kosteuspitoisuudessa (kg/m^3) pysyttäessä suhteellisen kosteuden mittaustulos nousee, kun siirrytään desorptiokäyrältä adsorptiokäyrälle. Ilmiön toteutumisen vahvistaa Matolog Cure-antureiden mittadata porareikämittauksen ajalta, jossa suhteellinen kosteus nousee varsin merkittävällä viiveellä. Tämä tuskin voi olla seurausta betonin hitaasta lämpiämisestä, vaan todennäköisemmin kyse on joko kosteuden liikkumisesta, tai nyt tulkitusti, kosteuspitoisuuden pysymisestä vakiona, mutta kosteustilan muutoksesta desorptiosta adsorptiota kohti.

Edellä esitettyä ilmiötä voidaan tarkastella myös kuvasta 20, jossa on nähtävissä kahden saman sarjan koekappaleen suhteellisen kosteuden nousu porauksen yhteydessä kahdella eri mittaussyvyydellä. Mittadata on sama, mikä on esitetty kuvassa 17, mutta kuva on kopioitu suoraan Matolog pilvipalvelusta ja tässä rinnakkaiset kappaleet on piirretty samaan kuvaajaan sekä tarkastelujakso on pidempi.



Kuva 20. K31 -sarjan kahden koekappaleen suhteellisen kosteuden mittaustulos porareiän teon ajalta. Ylemmät käyrät ovat syvemmän anturin (n. 50-70 mm) ja alemmat käyrät lähempänä pintaa olevan anturin (n. 10-30mm) mittaustulos. Lineaariset sovitteet on piirretty visualisoimaan suhteellisen kosteuden muutosta porauksen jälkeen; ne eivät ole sovitefunktioita.

Kuvasta voidaan havaita Matolog Cure -anturin palautumiseen porausta edeltävälle kuivumiskäyrälle kuluvan jopa kuukauden ajan. Lisäksi voidaan havaita, että suhteellisen kosteuden mittaustulosten ero koekappaleiden välillä pienenee porauksen myötä. Mittaustulosten erojen tasoittuminen oletettavasti saattaa olla seurausta kosteustilan muutoksesta desorptiokäyrältä adsorptio- ja desorptiokäyrien välimaastoon. Sama ilmiö mahdollisesti tasoittaa myös porareikämittausten välisiä eroja koekappaleiden välillä. Samalla tulee huomata, että Matolog Cure -anturissa on myös väliaine betonin ja mittapään välillä ja kyseisen väliaineen kosteuskäyttäytyminen voi myös vaikuttaa tämän ilmiön havainnointiin.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

YHTEENVETO

Tutkimuksessa tarkasteltiin jatkuvatoimisten Matolog Cure -antureiden suhteellisen kosteuden mittausten ja koekappaleiden punnitusten välistä korrelaatiota koekappaleiden kuivatustilanteessa valun jälkeen. Tutkimus oli lyhytkestoinen ja sen tavoitteena oli tutkia mittausmenetelmän toimivuutta betonin kosteusprofiilin tarkemmassa selvittämisessä. Tutkimuksessa onnistuttiin löytämään tapoja käsitellä mittadataa siten, että kosteuden liikkeitä betonissa pystytään arvioimaan. Tarkemmat johtopäätökset kuitenkin edellyttävät jatkotutkimuksia ja pitkäkestoisempaa koejärjestelyä. Myös pinnoituksen vaikutus tulosten analysointitapaan tulee ottaa mukaan mahdollisissa jatkotutkimuksissa.

Osasta tutkimuksessa mukana olleista koekappaleista tehtiin lopuksi porareikämittaukset, joissa tarkasteltiin paitsi Matolog Cure -antureiden ja porareikämittausten välisiä systemaattisia eroja, myös porauksen vaikutusta betonista mitattavaan suhteellisen kosteuden tasoon. Keskeinen havainto oli, että betonista mitattavan suhteellisen kosteuden tasaantuminen porausta edeltävälle tasolle vaatii aikaa jopa viikkoja. Porareikämittauksen ja Matolog Cure -anturin systemaattisen mittaustuloksen eron taustalla saattaa olla betonin kosteustilan muutos, jossa mittausalueen betoni on siirtynyt vakaan kuivumisen desorptio-tasapainokosteuskäyrältä adsorptio- ja desorptiokäyrien välimaastoon. Keskeistä on myös havaita, että systemaattista eroa syntyy geometrian eroista, kun Matolog Cure-anturin mittapään tarkkaa mittaussyvyyttä ei voi tarkasti määrittää.

Matolog Cure -antureita on tämän tutkimuksen perusteella mahdollista käyttää porareikämittausten tapaan betonin arviointisyvyyden suhteellisen kosteuden mittaamiseen. Systemaattinen ero mittalaitteiden geometrian välillä aiheuttaa tarpeen päivittää tulosten tulkintatapaa.

6

LÄHTEET

[1] SFS-EN 1363-1:2020:en. *Fire resistance tests. Part 1: General requirements*. Finnish Standards Association SFS: Helsinki, Finland, 2020.

[2] RT 103333. 2009. Betonin suhteellisen kosteuden mittaus. Rakennustieto Oy.

[3] B210973EN-F. 2013. Humidity conversion formulas - Calculation formulas for humidity. Vaisala Oyj. 17 s.

Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka
PL 600, 33014 Tampereen yliopisto
Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere

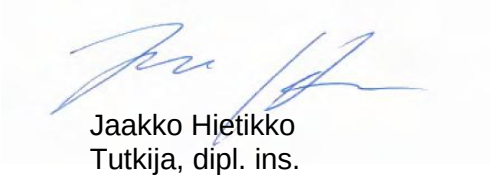
Puhelinvaihde
0294 5211

etunimi.sukunimi@tuni.fi
www.tuni.fi

Tampereella 19.3.2025

TAMPEREEN YLIOPISTO
Rakennustekniikka

Tuomas Raunima
Tutkija, dipl. ins.



Jaakko Hietikko
Tutkija, dipl. ins.

Eero Tuominen
Projektipäällikkö, dipl. ins.

Juha Vinha
Professori, tekn. toht.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille koekappaleille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka
PL 600, 33014 Tampereen yliopisto
Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere

Puhelinvaihde
0294 5211

etunimi.sukunimi@tuni.fi
www.tuni.fi