

Building Technology -maisteriohjelma

# Vähähiilisen betonin kuivuminen

---

Aaro Happonen

Diplomityö  
2023

Copyright ©2023 Aaro Happonen

---

**Author** Aaro Happonen

---

**Title of thesis** Drying of low-carbon concrete

---

**Programme** Building Technology

---

**Thesis supervisor** Professor (Professor of Practice) Jouni Punkki

---

**Thesis advisor** MSc (Tech) Pauli Sekki, AFRY Buildings Finland Oy

---

**Date** 07.07.2023

**Number of pages** 78 + 16

**Language** Finnish

---

### **Abstract**

Increasing use of blast furnace slag concretes creates a need to be more aware of their properties. Objective of this master's thesis was to investigate if drying of slag concretes differs from ordinary concretes. Thesis consists of literature review and empirical measurements. In empirical part, relative humidity measurements and weight loss measurements were conducted for six different concretes containing blast furnace slag.

Based on results of research, slag concretes dried evenly fast or faster than ordinary concretes in good conditions. Slag concretes dried faster due to chemical reaction than ordinary concretes. Moisture transport properties of slag concretes were measured to be significantly lower than those of ordinary concretes. Especially slag concretes with low water to binder ratio seem to suit well to structures that require fast drying.

Due to different distribution of drying mechanisms, influence of changing relative humidity and temperature may differ from ordinary concretes. Based on results of this thesis, guidelines for coatability and borderlines of relative humidity for coating of concretes should be investigated further and updated accordingly.

---

**Keywords** low-carbon concrete, blast furnace slag, slag concrete, drying, relative humidity

---

---

**Tekijä** Aaro Happonen

---

**Työn nimi** Vähähiilisen betonin kuivuminen

---

**Koulutusohjelma** Building Technology

---

**Vastuupettaja/valvoja** Professori (Professor of Practice) Jouni Punkki

---

**Työn ohjaaja** DI Pauli Sekki, AFRY Buildings Finland Oy

---

**Päivämäärä** 07.07.2023 **Sivumäärä** 78 + 16

**Kieli** Suomi

---

### **Tiivistelmä**

Masuunikuonabetoneiden käytön yleistyessä rakentamisessa syntyy tarve tuntea masuunikuonabetoneiden ominaisuuksia ja niiden vaikutuksia paremmin. Diplomityön tavoitteena oli selvittää poikkeako masuunikuonabetoneiden kuivuminen tavanomaisista betoneista. Työ koostuu kirjallisuustutkimuksesta sekä empiirisestä tutkimuksesta. Empiirisessä tutkimuksessa toteutettiin suhteellisen kosteuden mittauksia sekä punnitusmittauksia kuudelle masuunikuonaa sisältävälle betonille.

Tutkimuksen tulosten perusteella masuunikuonabetonit kuivuivat hyvissä olosuhteissa yhtä nopeasti tai nopeammin kuin tavanomaiset betonilaadut. Masuunikuonabetoneiden havaittiin kuivuvan kemiallisesti nopeammin kuin tavanomaisen betonin. Toisaalta masuunikuonabetoneiden kosteudensiirto-ominaisuudet olivat selvästi heikommat kuin tavanomaisilla betoneilla. Erityisesti matalan vesi-sideaine-suhteen masuunikuonabetonit vaikuttavat olevan kuivumisominaisuuksiltaan käyttökelpoisia nopeaa kuivumista vaativiin rakenteisiin.

Erilaisten kuivumismekanismien osuuksien vuoksi olosuhteiden vaihtelun vaikutus masuunikuonabetoneiden kuivumiseen saattaa erota tavanomaisista betoneista. Lisäksi tutkimuksen perusteella masuunikuonabetonin päällystettävyyttä ja sen määrittämisessä käytettäviä raja-arvoja voisi olla perusteltua tarkastella lisätutkimuksen avulla.

---

**Avainsanat** vähähiilinen betoni, masuunikuona, masuunikuonabetoni, kuivuminen, suhteellinen kosteus

---

# Sisällys

Esipuhe .....	7
Symbolit ja lyhenteet.....	8
Symbolit .....	8
Lyhenteet.....	8
1 Johdanto.....	9
2 Betonin hiilidioksidipäästöjen pienentäminen seosaineilla .....	11
2.1 Betonin ja sementin hiilidioksidipäästöt.....	11
2.2 Masuunikuonabetoni .....	14
2.2.1 Masuunikuona ja masuunikuonasementti.....	14
2.2.2 Masuunikuonabetonin koostumus ja ominaisuudet .....	18
2.2.3 Masuunikuonabetonin hiilidioksidipäästöt .....	20
2.2.4 Masuunikuonabetonin käyttö.....	20
2.3 Muut vähähiiliset seosaineet.....	21
3 Betonin kuivuminen ja kosteusominaisuudet .....	23
3.1 Betonin kuivumiseen vaikuttavat tekijät .....	23
3.1.1 Veden kemiallinen sitoutuminen.....	24
3.1.2 Veden haihtuminen ja haihtumiskuivuminen .....	25
3.2 Masuunikuonabetonin kuivumiseen vaikuttavat tekijät.....	29
3.3 Tavoitetasot betonin suhteelliselle kosteudelle .....	33
4 Kokeellinen osuus.....	36
4.1 Yleiskuvaus .....	36
4.2 Koekappaleet .....	37
4.2.1 Betonin koostumus ja hiilijalanjälki .....	37
4.2.2 Koekappaleiden valmistus.....	39
4.2.3 Säilytysolosuhteet.....	42
4.3 Kosteusmittaukset .....	44
4.3.1 Näytepalamittaus yleisesti.....	44
4.3.2 Näytepalamittauksen toteutus .....	45
4.3.3 Virhetekijät kosteusmittauksissa.....	47
4.4 Punnitusmittaukset .....	49
5 Tulokset.....	52

5.1	Kemiallinen kuivuminen.....	52
5.2	Kuivuminen vakio-olosuhteissa .....	54
5.3	Kuivuminen kastumisen jälkeen .....	57
5.4	Veden haihtuminen ja kosteudensiirtoparametrit .....	59
6	Tulosten tarkastelu .....	62
7	Johtopäätökset .....	72
	Lähteet.....	74
A.	Tutkittujen betoneiden ominaispäästöjen laskenta.....	79
B.	Tutkimuksen mittauspöytäkirjat.....	80
	Yhteen suuntaan haihduttavat kappaleet .....	80
	Kemiallisesti kuivuvat kappaleet.....	86
	Kastelujaksolle altistetut kappaleet.....	88
	Punnituskokeet.....	94

## Esipuhe

Diplomityön myötä itselläni vahvistui jo ennestään melko voimakas ajatus siitä, että betonissa on sitä jotain. Jotain minkä äärelle luultavasti tulen palaamaan vielä kerran jos toisenkin. Tätä työtä tehdessäni syvennyin itselleni entuudestaan melko tuntemattomaan osa-alueeseen betonimaailmassa. Haluan osoittaa kiitokset työn ohjaajalle Pauli Sekille, jonka erinomaisella ohjauksella koen päässeeni edes vähän kiinni varsin monimutkaiseksi osoittautuneeseen aiheeseen.

Suuri kiitos myös työn valvojalle professori Jouni Punkille arvokkaista näkemyksistä ja kommentteista työn kaikissa vaiheissa. Lisäksi haluan kiittää Jukka Piirosta kokeellisen osuuden käytännön järjestelyissä avustamisesta, Mika Autiota ja Rudus Oy:tä kokeellisessa osuudessa käytetyistä betoneista, AFRY Buildings Finland Oy:tä työn kokeelliseen osuuteen lainatusta mitauskalustosta sekä betonitekniikan tutkimusrahastoa diplomityön rahoittamisesta.

Lopuksi haluan kiittää työkavereitani, ystäviäni, perhettäni ja Helmiä kaikesta mielenkiinnosta, kannustuksesta ja tuesta diplomityön aikana.

Helsingissä 07.07.2023

Aaro Happonen

# Symbolit ja lyhenteet

## Symbolit

C	sementin määrä [kg/m <sup>3</sup> ]
D	diffusiviteetti [m <sup>2</sup> /s]
dw/dRH	kosteuskapasiteetti RH-välillä [kg/m <sup>3</sup> ]
q	kosteusvuo [kg/m <sup>2</sup> s]
k	haihtumisnopeutta kuvaava parametri [kg/m <sup>2</sup> √s]
k <sub>p</sub>	permeabiliteetti [kg/m]
Δp	huokosveden paine-ero [Pa]
v <sub>s</sub> (T)	ilman vesihöyryn määrä saturaatiopisteessä [kg/m <sup>3</sup> ]
w <sub>e</sub>	haihtumiskykyisen veden määrä [kg/m <sup>3</sup> ]
w <sub>gel</sub>	geeliveden määrä [kg/m <sup>3</sup> ]
w <sub>n</sub>	kemiallisesti sitoutuneen veden määrä [kg/m <sup>3</sup> ]
w <sub>o</sub>	alkuperäinen veden määrä [kg/m <sup>3</sup> ]
Δx	etäisyys [m]
α	hydrataatioaste [%]
α <sub>ult</sub>	korkein hydrataatioaste [%]
μ	vesihöyryn diffuusiovastuskerroin [-]
μ <sub>d</sub>	dynaaminen viskositeetti [Pa s]
Δφ	vesihöyryn pitoisuusero [kg/m <sup>3</sup> ]
δ <sub>p</sub>	vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla laskettuna [kg/msPa]
δ <sub>v</sub>	vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla laskettuna [m <sup>2</sup> /s]

## Lyhenteet

A	betonirakenteen suhteellisen kosteuden arviointisyvyys
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	alumiinioksidi
CaCO <sub>3</sub>	kalsiumkarbonaatti
CaO	kalsiumoksidi
Ca(OH) <sub>2</sub>	kalsiumhydroksidi
CEM I	portlandsementti
CEM II/B-M	portlandseossementtityyppi
CEM III	masuunikuonaselementtien luokka
CEM III/A	masuunikuonaselementtityyppi, jossa on masuunikuonaa 36–65 % sideaineesta
CEM III/B	masuunikuonaselementtityyppi, jossa on masuunikuonaa 66–80 % sideaineesta
CO <sub>2</sub>	hiilidioksidi
CO <sub>2</sub> -ekv.	hiilidioksidiekvivalentti
C-S-H	kalsium-silikaatti-hydraatti-geeli
H <sub>2</sub> O	vesi
IEA	kansainvälinen energiavirasto
MgO	magnesiumoksidi
RH	suhteellinen kosteus
SiO <sub>2</sub>	piidioksidi



# 1 Johdanto

Betoni on globaalisti ihmisen toiseksi eniten kuluttama aine veden jälkeen. Suuret tuotantovolyymit johtavat myös suuriin hiilidioksidipäästöihin. Betonin valmistamiseen käytettävää sementtiä valmistetaan yli neljä miljardia tonnia vuosittain. International Energy Agency (IEA) (2020) mukaan sementtiteollisuuden vuosittaiset päästöt olivat vuonna 2019 2,4 GtCO<sub>2</sub>, joka vastaa noin 7 % globaaleista päästöistä. Finnsementti on arvioinut sementinvalmistuksen tuottaneen vuonna 2018 Suomessa noin 0,9 MtCO<sub>2</sub>-ekv., joka oli noin 1,6 % Suomessa tuotetuista kasvihuonekaasupäästöistä (Finnsementti, 2023).

Rakentamisen päästötietokannan (SYKE & YM, 2022) mukaan esimerkiksi C30/37 lujuusluokan huokostamattoman valmisbetonin tyypillinen ominaispäästö massayksikköä kohden on yhtä suuri kuin GLT liimapuun. Vastaavasti betonirakenteissa käytettävän teräsraudoitteen ominaispäästö on yli viisi kertaa korkeampi. Betonin ominaispäästö ei siis ole rakennusmateriaaliksi erityisen korkea. Lisäksi betoni sitoo karbonatisoitumisen kautta hiilidioksidia koko elinkaarensa ajan. Syy betonin globaalisti merkittäville päästöille onkin sen käyttömäärissä. Betonin korvaaminen muilla materiaaleilla on lisäksi haastavaa ja usein epäkäytännöllistä, koska betoni on ominaisuuksiensa ja saatavuutensa puolesta paras rakennusmateriaali moniin käyttökohteisiin. Betonin suuren käyttömäärän takia pienelläkin ominaispäästön laskemisella voidaan saavuttaa merkittävä päästövähennys. Suurin osa betonin hiilidioksidipäästöistä syntyy sementin valmistuksesta (Salmi, 2021). Punkki (2021) on esittänyt betonin tärkeimmiksi päästövähennyskeinoiksi portlandsementin valmistuksen päästöjen vähentämisen, vaihtoehtoisten sideaineiden laajamittaisen käytön sekä seossementtien laajamittaisen käytön. Betonissa käytettävillä seosaineilla on merkittäviä vaikutuksia betonin ominaisuuksiin, minkä vuoksi eri seosaineiden käyttöä rajoittaa esimerkiksi betonin käyttötarkoitus. Lisäksi seosaineiden käyttöön vaikuttaa esimerkiksi hinta sekä saatavuus. Vähäpäästöisiin seosaineisiin kuuluvat esimerkiksi silika, lentotuhka, kalkkikivifilleri sekä masuunikuona. (Punkki, 2021.)

Betonin kuivuminen on yksi merkittävämpiä ominaisuuksia tarkasteltaessa betonilaadun soveltuvuutta käyttötarkoitukseen. Kuivuminen on sanana monitulkintainen, ja voidaan käsittää eri tavoilla. Tämän työn viitekehksessä kuivumisella tarkoitetaan ensisijaisesti betonin huokosten ilmatilassa vallitsevan suhteellisen kosteuden alentumista, mihin vaikuttaa betonissa olevan fysikaalisesti sitoutuneen veden määrän lisäksi myös esimerkiksi betonin huokosrakenne. Suhteellinen kosteus on betonin päällystettävyyden kannalta kriittinen ominaisuus, ja sallitut suhteellisen kosteuden tasot vaihtelevat päällystämateriaalin mukaan (Merikallio ym., 2007).

Diplomityön päätavoitteena on tarkastella vähähiilisten betonien kuivumista, ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Työssä vähähiilisten betoneiden

tarkastelu on rajattu betoneihin, joissa on käytetty masuunikuonaa sementin seosaineena. Aiheesta on saatavilla heikosti aikaisempaa tutkimustietoa, ja esitetyssä laajuudessa aikaisempia tutkimustuloksia ei ole saatavilla. Työn taustoja hiilidioksidipäästöjen, betonien ominaisuuksien ja kuivumiseen liittyvien tekijöiden osalta tarkastellaan sekä yleisesti betonin, että tarkemmin masuunikuonabetonin näkökulmasta. Mittauksissa kerätään empiirisesti dataa, jota tulkitaan suhteessa työssä esiteltyyn tutkimustietoon. Lisäksi pohditaan valittujen mittausmenetelmien soveltuvuutta tämän kaltaiseen tutkimukseen. Työn pääasiallisena tavoitteena on vastata seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- I. Poikkeako vähähiilisten masuunikuonabetoneiden kuivuminen tavanomaisista betonilaaduista?
- II. Poikkeako masuunikuonabetonin kuivuminen kuivatuksen aikana tapahtuneen kastumisen jälkeen tavanomaisista betonilaaduista?
- III. Soveltuvatko vähähiiliset masuunikuonabetonit käytettäväksi rakenteissa, joissa kuivumiselle on asetettu tavoitteita tai vaatimuksia?

Diplomityö on rakenteeltaan kaksiosainen sisältäen kirjallisuustutkimuksen sekä empiirisen tutkimuksen. Kirjallisuustutkimuksessa tarkastellaan saatavilla olevaa kansainvälistä sekä suomalaista tutkimustietoa, ja pyritään luomaan teoreettinen viitekehys, jonka puitteissa empiirisen tutkimuksen tuloksia voidaan tarkastella. Kirjallisuuskatsauksen ensimmäisessä luvussa tarkastellaan betonin sekä betonin valmistuksessa käytettävien side- ja seosaineiden hiilijalanjälkeä ja ominaisuuksia. Toisessa luvussa tarkastellaan veden sitoutumista betoniin, betonin kuivumista ilmiönä sekä kuivumisen vaikutuksia betonin käyttöön. Lisäksi tarkastellaan masuunikuonan vaikutuksia betonin kosteusominaisuuksiin ja kuivumiseen. Työn empiirisessä tutkimuksessa mitataan masuunikuonaa sisältävien betoneiden suhteellista kosteutta, ja sen kehitystä suhteessa kuivumisaikaan. Lisäksi mitataan betoneiden massanhäviötä suhteessa aikaan, josta johdetaan tutkituille betoneille kosteudensiirtoparametrien arvoja. Empiiristä tutkimusta käsittelevissä luvuissa kuvataan ensin käytetyt tutkimusmenetelmät, -välineet ja -olosuhteet sekä esitellään tutkimuksen sisältö. Seuraavassa luvussa esitellään tutkimuksesta saadut tulokset. Lopuksi sovelletaan saatuja mittaustuloksia sekä kirjallisuustutkimuksessa esitettyä tutkimustietoa, sekä pohditaan tuloksia ja niiden taustalla vaikuttavia syitä. Lisäksi luvussa pohditaan empiirisen tutkimuksen onnistumista. Diplomityön viimeisessä luvussa vastataan aiemmin työssä esitettyjen tulosten, ja niiden perusteella tehdyn pohdinnan kautta työlle asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Lisäksi johtopäätöksissä esitetään työn aikana havaittuja jatkotutkimustarpeita.

## 2 Betonin hiilidioksidipäästöjen pienentäminen seosaineilla

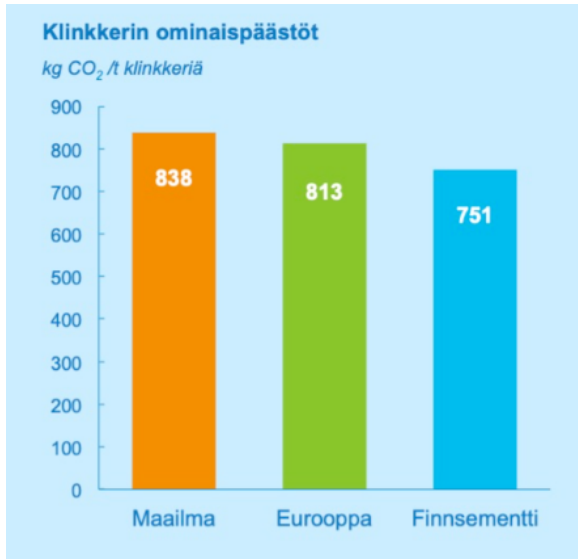
### 2.1 Betonin ja sementin hiilidioksidipäästöt

Suomessa valmistetulle betonille sekä betonivalmisosille on tuotettu elinkaariarviointi sekä laskettu hiilijalanjälki (Salminen, 2021). Elinkaariarvioinnin pohjana on käytetty Betoniteollisuus ry:n jäsenyrityksiltä kerättyä tuotetiedataa, jonka perusteella on pyritty tuottamaan suomalaisia betonituotteita edustavat tulokset. Arvioinnin mukaan valmisbetonien hiilidioksidipäästöistä jopa 70 % syntyy sementin valmistuksesta. Betonituotteiden osalta eri päästölähteiden suhteellisissa osuuksissa on merkittäviä eroja. Esimerkiksi ontelolaattaelementtien valmistuksessa sementin osuus päästöistä on 64 %, mutta vastaavasti sandwich-elementtien valmistuksessa ainoastaan 45 %. Sekä betonituotteiden, että valmisbetonin osalta kuljetus on toiseksi suurin päästölähde noin 20 % osuudella. (Salminen, 2021.)

Sementin valmistuksessa syntyvät päästöt voidaan jaotella kahteen kategoriaan: kalkkikiven kalsinoitumisreaktiossa vapautuvaan hiilidioksidiin sekä polttoaineen palamisessa vapautuvaan hiilidioksidiin. Finnsementin (2023) mukaan heidän tuotannossaan kalsinaatioreaktiossa muodostuvan hiilidioksidin osuus on noin 60 % sementin valmistuksessa syntyvistä päästöistä ja polttoaineiden palamisesta syntyvän hiilidioksidin osuus noin 40 %. Kalkkikiven kalsinaatio on kemiallinen reaktio, jossa kalsiumkarbonaatti muuttuu kalsiumoksidiksi sekä hiilidioksidiksi (yhtälö 1.).



Portlandsementin ominaispäästöihin voidaan vaikuttaa erityisesti tuotannossa käytettävällä polttoaineella sekä energiatehokkuuden parantamisella. Näillä toimilla esimerkiksi Finnsementti kertoo laskeneensa tuottamansa sementtiklinkkerin ominaispäästöjä globaalia ja eurooppalaista keskiarvoa matalammalle tasolle (kuva 1.). (Finnsementti, 2023.) Finnsementin vuoden 2020 ympäristöraportin mukaan Suomessa tuotetun sementin ominaispäästö on vuonna 2021 ollut 589 kgCO<sub>2</sub>/t, ja vuonna 2020 595 kgCO<sub>2</sub>/t. Tuotetun sementin klinkkeriosuus on raportin mukaan ollut noin 80 %.

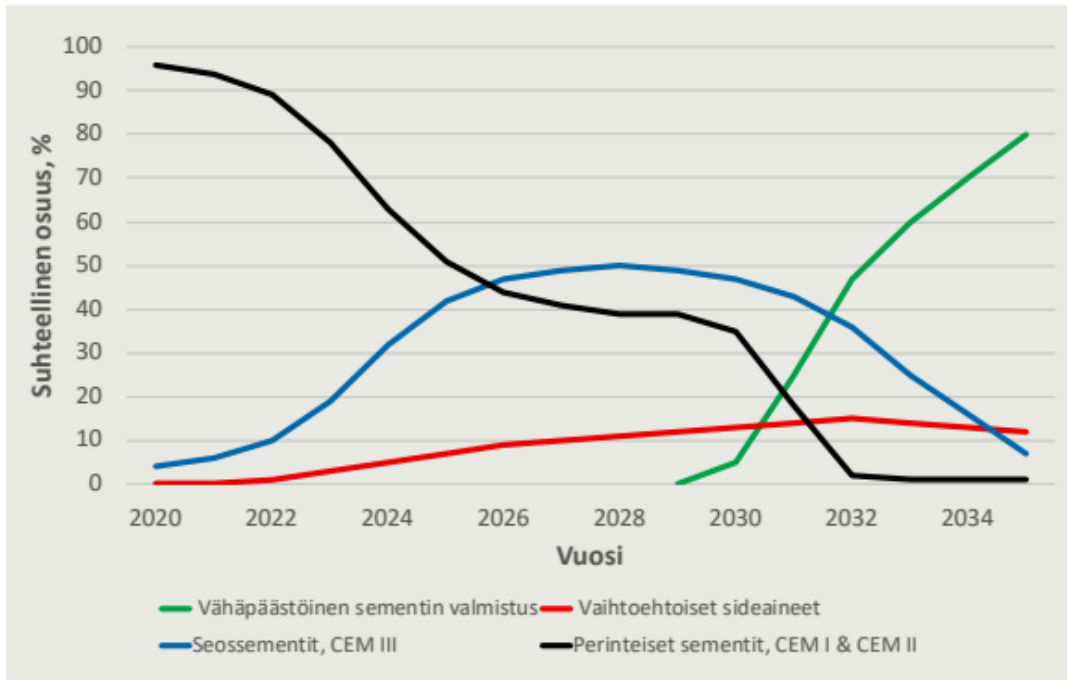


Kuva 1. Klinkkerin keskimääräiset ominaispäästöt Suomessa, Euroopassa ja maailmassa vuonna 2018 (Finnsementti, 2023).

Kajaste & Hurme (2016) esittävät tutkimuksessaan, että sementin ominaispäästöissä on merkittävää maantieteellistä variaatiota. Korkein arvioitu ominaispäästö on Yhdysvalloissa tuotetulla sementillä, 894 kgCO<sub>2</sub>/t, ja matalin Brasiliassa tuotetulla sementillä, 652 kgCO<sub>2</sub>/t. Globaalisti sementin keskiarvo-ominaispäästöksi tutkimuksessa on arvioitu 766 kgCO<sub>2</sub>/t. Tutkimuksessa havaitut erot selittyvät pääosin seosaineiden osuudella sementistä sekä fossiilisella polttoaineella tuotetun energian ja sähköenergian ominaispäästöistä. Esimerkiksi Brasiliassa seosaineiden keskimääräinen osuus sementistä on 34,2 %, kun taas globaalisti osuus on 17,5 %. Korkeamman seosaineosuuden takia Brasiliassa tuotetun klinkkerin ja seosaineiden yhteenlaskettu ominaispäästö on 68 kgCO<sub>2</sub>/t tai 15,7 % matalampi kuin maailman keskiarvo. (Kajaste & Hurme, 2016.) Kajasteen ja Hurmeen tutkimuksessa esitettyjä lukuarvoja vertailtaessa Finnsementin ympäristöraportin lukuihin, voidaan todeta, että Suomessa tuotettu sementti on ominaispäästöiltään globaalisti vertailtuna matalalla tasolla, mutta klinkkerin osuudeltaan lähellä keskiarvoa.

Sementtiklinkkerin osittainen korvaaminen ominaispäästöiltään pienemmillä seosaineilla on lähitulevaisuudessa potentiaalisimpia keinoja vähentää betonin aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. Punkki (2021) on arvioinut, että seossementit, erityisesti masuunikuonalla seostetut CEM III-luokan sementit, yleistyvät voimakkaasti 2020-luvun aikana, ja toimivat merkittävänä välivaiheen ratkaisuna betoniteollisuuden päästöjen vähentämisessä (kuva 2.). Muita sementtiklinkkeriä korvaavia ominaispäästöiltään matalampia seosaineita ovat esimerkiksi lentotuhka, silika sekä kalkkikivijauhe. Useat tutkimukset, kuten Amran ym. (2021), Adesina (2020) sekä Kajaste & Hurme (2016) ovat päätyneet Punkin kanssa samaan johtopäätökseen, että betonteollisuuden päästöjen vähentämiseksi on tehtävä muutoksia kaikkiin

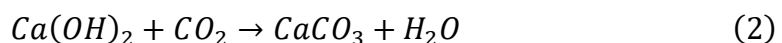
tuotantoprosessin vaiheisiin, mutta klinkkeriä korvaavien seosaineiden käytön lisääminen vaikuttaa ainakin lähitulevaisuudessa potentiaaaliltaan merkittävältä keinolta vähentää rakennusteollisuuden päästöjä.



Kuva 2. Mahdollinen kehityskulku sideaineiden suhteellisille osuuksille 2020- ja 2030-luvulla (Punkki, 2021).

IEA (2018) on luonut kaksi skenaariota globaalille klinkkerin ja seosaineiden suhteen kehitykselle. Globaalin keskilämpötilan kahden Celsiusasteen nousuun perustuvassa skenaariossa klinkkerin keskimääräinen osuus sementistä tippuu vuoteen 2050 mennessä 60 % tasolle. Referenssitasona pidetään klinkkerin osuuden pysymistä vuoden 2014 tasolla, 65 %. Klinkkerin sideainosuuden laskemisella 5 %-yksiköllä voidaan IEA:n (2018) mukaan saavuttaa kumulatiivisesti 2,9 GtCO<sub>2</sub> pienemmät hiilidioksidipäästöt referenssitason verrattuna.

Betonin hiilidioksidipäästöjä arvioitaessa on todellisen kokonaiskuvan saamiseksi olennaista tarkastella elinkaaren aikaisen hiilijalanjäljen lisäksi myös niin kutsuttua hiilikädenjälkeä. Betonilla on materiaalina luontainen kyky absorboida hiilidoksidia ympäröivästä ilmasta. Ilmiötä kutsutaan karbonatisoitumiseksi. Kemiallisella tasolla reaktio on kalsinaatiossa tapahtuvan reaktion vastareaktio, jossa ilmassa oleva hiilidoksidi reagoi betonissa olevan kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia ja vettä (yhtälö 2.). Näin ollen betoni toimii elinkaarensa ajan myös hiilinieluna. (Kekkonen, 2020.)



Kekkonen (2020) on kerännyt kirjallisuustutkimuksessaan kattavasti eri las-kentamenetelmillä tehtyjä arvioita betonin absorboiman hiilidioksidin mää-rästä. Esitettyjen arvioiden skaala on todella laaja, mikä vaikeuttaa yksiselit-teisen johtopäätöksen tekemistä. Tuloksista merkittävä osa on keskenään sa-maa mieltä, että betonin sisältämästä kalsiumoksidista noin 70–75 % voi kar-bonatisoitua riittävän ajan kuluessa. Tutkimusten väliset erot tulivat esiin elinkaaren aikana sitoman hiilidioksidin määrästä, koska elinkaari oli las-kettu eri tavoin. Tuloksissa kalsinaatiossa vapautuneesta hiilidoksidista 16–90 % arvioitiin sitoutuneen takaisin betoniin sen elinkaaren lopussa. Elin-kaaren aikana sitoutuneen hiilidoksidin määrään vaikuttavat merkittävästi esimerkiksi betonin absorboiva pinta-ala, betonin koostumus, lämpötila sekä suhteellinen kosteus. Erityisen suuri vaikutus laskelmissa oli rakenteen käyt-töän jälkeisellä ajalla. Betonin kierrätys murskaamalla elinkaaren lopussa kasvattaa karbonatisoitumisen nopeutta sekä potentiaalia merkittävästi. (Kekkonen, 2020.)

Vaikka betoni toimiikin valmistuksen jälkeisen ajan elinkaarestaan hiili-nieluna, muodostuu ongelmaksi tarve laskea nettohiilidioksidipäästöjä glo-baalisti ilmastonmuutoksen hidastamiseksi mahdollimman nopeasti. Nopei-den päästövähennysten saavuttaminen edellyttää sementin ja betonin tuo-tannossa tapahtuvien päästöjen vähentämistä, ei pelkästään karbonatisoitu-misen kiihdyttämistä esimerkiksi elinkaaren lopussa olevan betonin kierrät-tämisen avulla.

## **2.2 Masuunikuonabetoni**

Masuunikuonaa on käytetty sementin seosaineena jo 1800-luvun loppupuolella (Punkki, 2021). Näin ollen kuonabetonien ei voida sanoa olevan ollen-kaan uusi keksintö. Punkin (2021) mukaan kuonabetoneiden käyttö on ollut paikallisesti laajamittaistakin, ja kuonan osuus sementistä hyvin korkea, jopa 85 % sideaineesta. 2020-luvulla masuunikuona näyttäytyy saatavuutensa, käytettävyytensä sekä ominaispäästöjensä osalta merkittävämpänä yksittäi-senä vähähiilisemmän betonin valmistukseen käytettävänä seosaineena. Li-säksi masuunikuonabetonin ominaisuudet tekevät siitä joihinkin käyttötar-koituksiin, esimerkiksi alhaista hydrataatiolämpöä vaativiin valuihin, puh-taasta portlandsementistä valmistettua betonia paremman vaihtoehdon.

### **2.2.1 Masuunikuona ja masuunikuonasementti**

Masuunikuona on terästeollisuuden sivuvirtatuote, jota syntyy, kun noin 1500 °C masuuniin syötetään kalkkikiveä, koksia sekä rautamalmia. Sula-neen ja pelkistyneen raudan lisäksi masuuniin jää prosessissa muiden lähtö-aineiden muodostamaa kuonaa. Kuona jäähdytetään nopeasti vedellä, jotta se saa lasimaisen, granuloidun olomuodon. Betonin valmistuksessa käyte-tään pääsääntöisesti jauhattua granuloitua masuunikuonaa, jota voidaan

käyttää seosaineena sementin kanssa. Masuunikuonan tiheys (noin 2,9 g/cm<sup>3</sup>) on matalampi kuin portlandsementillä (noin 3,14 g/cm<sup>3</sup>), joten kun sideaineen suhteutetaan betoniin massaperusteisesti, sideaineen tilavuuden osuus betonissa kasvaa. (Matthes ym., 2018.) Granuloitua masuunikuonaa voidaan käyttää betonissa myös kiviaineksena, mutta päästöjen vähentämisen näkökulmasta tämä ei ole hyödyllistä sillä esimerkiksi Suomessa masuunikuonan ominaispäästö on suurempi kuin kiviaineksena käytettävien hiekan ja soran ominaispäästöt (BY-Vähähiilisyysluokitus, 2023).

Matthes ym. (2018) mukaan masuunikuonan kemiallinen koostumus vaihtelee merkittävästi masuunissa käytettyjen raaka-aineiden sekä polttoaineen määrästä, suhteista sekä laadusta. Yksittäisen masuunin tuottaman masuunikuonan koostumus pysyy kuitenkin tyypillisesti muuttumattomana pitkälläkin aikavälillä. SFS EN 197-1 standardi määrittelee, että betonintuotannossa käytettävän granuloidun masuunikuonan painosta kaksi kolmasosaa tulee muodostua kalsiumoksidin (CaO), magnesiumoksidin (MgO) ja piidioksidin (SiO<sub>2</sub>) summasta. Lisäksi standardin mukaan painosuhteen (CaO + MgO) / SiO<sub>2</sub> on oltava suurempi kuin 1,0. Suomessa granuloitu masuunikuona tulee Raahen terästehtaalta, ja sen jauhatuksen betoniteollisuuden käyttöön tekee Finnsementti. Suomessa tuotetun masuunikuonajauheen kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 1. (Finnsementti, 2019.)

Taulukko 1. Suomessa tuotetun masuunikuonajauheen kemiallinen koostumus (Finnsementti, 2019).

CaO	36...42 %
SiO <sub>2</sub>	36...40 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8...10 %
MgO	10...12 %
S	1,5...2 %
Ti	0,9...1,3 %
K <sub>2</sub> O	0,5...1,0 %
Na <sub>2</sub> O	0,5...1,0 %

Masuunikuonan saatavuus tulevaisuudessa tulee heikentymään terästeollisuuden siirtyessä pois masuunisulatuksesta terästuotannossa. Suomessa SSAB on ilmoittanut tavoitteekseen siirtyä Raahen terästehtaalla vetypelkistykseen teräksen tuotannossa vuoteen 2030 mennessä (SSAB, 2023). Samalla masuunikuonan kysyntä on vain kasvanut rakennusteollisuuden kasvavan kysynnän vuoksi. Esimerkiksi Rakennuslehti uutisoi vuoden 2022 syyskuussa, että Finnsementti ei pystynyt tilapäisesti ottamaan vastaan uusia tilauksia masuunikuonaa sisältävistä sementeistä saatavuusongelmien vuoksi. Globaalisti masuunikuonan saatavuus kuitenkin tuskin romahtaa,

sillä teräksen tuotanto on 2000-luvulla yli kaksinkertaistunut, ja perustuu pitkälti rautamalmin masuunipelkistykseen. Vuonna 2018 teräsentuotannon sivutuotteena syntyi arviolta 310–375 miljoonaa tonnia masuunikuonaa. (Piemonti ym. 2021.) Matalan ominaispäästön masuunikuonan päästövähennyspotentiaaliin vaikuttaa merkittävästi kuljetusmatka, joten globaaleiden päästövähennysten näkökulmasta olisi kannattavinta käyttää sivuvirtana syntyvä masuunikuona mahdollisimman lähellä sen tuotantosijaintia.

Masuunikuona on piilevästi hydraulinen materiaali, mikä tarkoittaa, että se tarvitsee betonin kovettumiseen riittävän hydrataatioreaktion alkamiseen veden lisäksi alkalisen aktivaattorin. Tyypillisesti käytetyin aktivaattori on portlandsementtiklinkkeri, jossa oleva kalsiumhydroksidi toimii alkaliaktivaattorina. (Matthes ym. 2018.) Masuunikuona muodostaa hydraulisessa reaktiossaan pääosin kalsium-silikaatti-hydraatti-geeliä (C-S-H), kuten portlandklinkkeri. Masuunikuona vaikuttaa kuitenkin C-S-H:n koostumukseen ja muotoon. Richardson & Groves (1992) ovat esittäneet tutkimuksessaan, että masuunikuonan osuuden kasvattaminen pienentää geelin kalsiumin ja piin suhdetta sekä vähentää lineaarisen, säiemäisen olomuodon ja lisää hienorakenteisen, kalvomaisen olomuodon osuutta. Tutkimuksessa arvioitiin lisääntyneen kalvomaisen olomuodon tekevän huokosrakenteesta hienojakoisemman, sekä vähentävän sen läpäisevyyttä. Masuunikuonalla on portlandklinkkeriä pienempi vedentarve eli se notkistaa luontaisesti tuoretta betonia. Tämän vuoksi masuunikuona voi mahdollistaa esimerkiksi matalamman vesi-sideainesuhteen, pienemmän notkistinannostuksen tai karkeamman kiviaineksen käytön betonissa. (Matthes ym. 2018.)

Standardissa SFS EN 197-1 (2012) on määritelty 27 sementtituotetta, joista 9 sisältää masuunikuonaa. Nämä voidaan jakaa neljään ryhmään: portland-masuunikuonasementit, portland-seossementit, masuunikuonasementit ja seossementit. Masuunikuonaa sisältävät sementit ja niiden sisältö on esitelty taulukossa 2. Suomen markkinoilla on saatavilla 35–64 % masuunikuonaa sisältävää CEM III/A luokan masuunikuonasementtiä (Kolmossementti) sekä yhteensä 21–35 % masuunikuonaa ja kalkkikivifillieriä sisältävää CEM II/B-M luokan portlandseossementtiä (Oiva) valmiina tuotteena. Finnsementti on kuitenkin kertonut, että se on tuomassa 66–80 % masuunikuonaa sisältävän CEM III/B luokan sementin Suomen markkinoille vuoden 2023 aikana (Sementti, 2022).



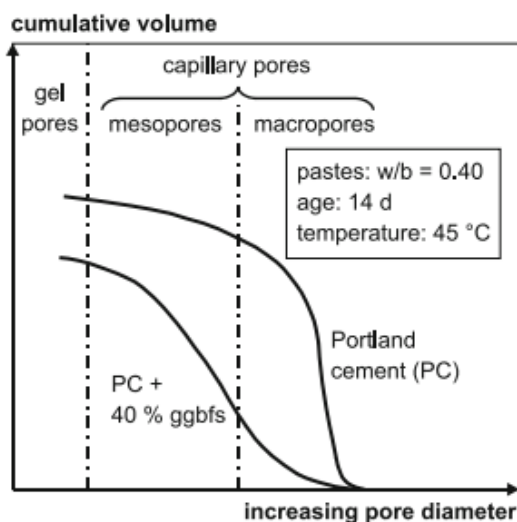
Taulukko 2. Masuunikuonaa sisältävien sementtien koostumukset (SFS EN 197-1, 2012).

Merkintä	Koostumus (massa-%)						
	Klinkkeri	Masuuni-kuona	Silika	Pozzo- laanit	Lento- tuhka	Kalkkikivi	Sivuosa- aineet
CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	0-5
CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	0-5
CEM II/A-M	80-94	12-20					0-5
CEM II/B-M	65-79	21-35					0-5
CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	0-5
CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	0-5
CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	0-5
CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-	0-5
CEM V/B	20-38	31-49	-	31-49		-	0-5

Varsinaisten masuunikuonaa sisältävien sementtien lisäksi masuunikuonaa voidaan lisätä betoniin myös seosaineena betoniasemalla. BY 65 (Betoniyhdistys, 2021) julkaisussa on esitetty masuunikuonan suurimmat sallitut suhdeluvut puhtaan portlandsementtiklinkkerin (CEM I) määrään suhteutettuna. Osuudet vaihtelevat rasisluokittain 50–95 %, ja perustuvat standardissa SFS EN 197-1 esitettyihin vaatimuksiin betonin koostumukselle. Osuudet pätevät, mikäli koko loppu osuus sideaineesta on portlandklinkkeriä. Mikäli käytetään kahta tai useampaa seosainetta, seosaineiden suurimmat sallitut osuudet lasketaan yhteen niin, että pienin sallittu portlandklinkkerin määrä ei alitu. Masuunikuonaa korkeintaan 95 % sideaineesta sisältävää betonia voidaan käyttää ainoastaan X0 ja XC1 (raudoittamaton betoni tai kuivat tai jatkuvasti märät pinnat) rasisluokitelluissa rakenteissa. Rasisluokkaan XF2 ja XF4 (jäätymiselle ja jäänsulatusaineille alttiit pinnat) kuuluvissa rakenteissa masuunikuonan suurin sallittu määrä on 50 % sideaineen määrästä. XA2 ja XA3 (kemiallisesti kohtalaisen tai voimakkaasti aggressiivinen ympäristö) rasisluokissa voidaan käyttää sulfaatinkestävän CEM I sementin sijasta yli 70 % masuunikuonaa sisältävää sideaineseosta. Muissa rasisluokissa masuunikuonan enimmäismäärä on 80 % sideaineesta. (Betoniyhdistys, 2021.)

## 2.2.2 Masuunikuonabetonin koostumus ja ominaisuudet

Masuunikuonan käyttö seosaineena vaikuttaa betonin huokosrakenteeseen. Roy ja Parkerin (1983) mukaan masuunikuonan käyttö seosaineena tekee betonin huokosrakenteesta hienojakoisemman (kuva 3.) Halkaisijaltaan pienten geelihuokosten suhteellinen määrä on kuonabetonissa suurempi kuin portlandsementistä valmistetussa betonissa. Vastaavasti kapillaarihuokosten määrä ja kumulatiivinen tilavuus on huomattavasti pienempi kuin portlandsementistä valmistetulla betonilla. (Roy & Parker, 1983.) Kapillaarihuokosten pienempi määrä ja tilavuus heikentää huokosten kykyä siirtää massaa niiden välillä, minkä vuoksi masuunikuona heikentää betonin läpäisevyyttä. (Matthes ym. 2018.)



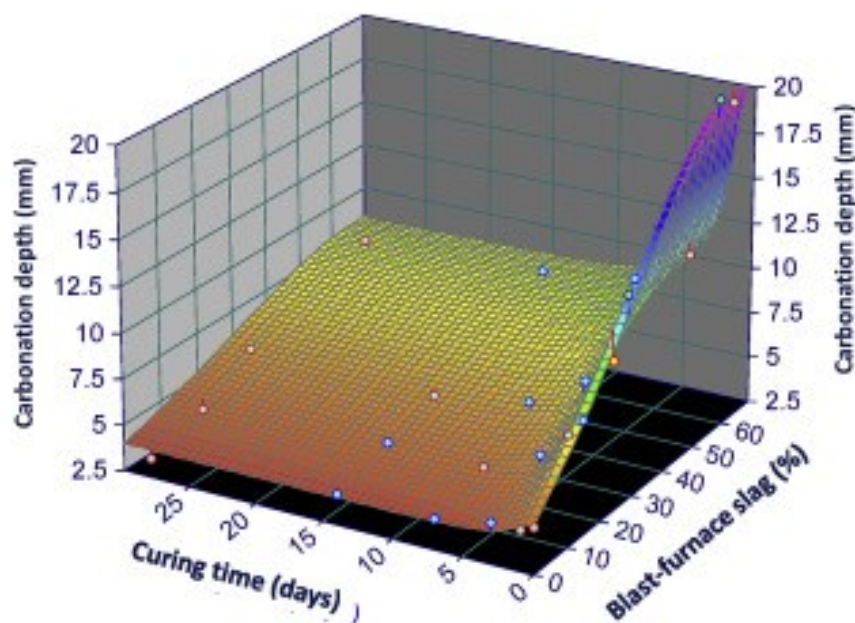
Kuva 3. Huokosten jakautuminen portlandsementtiä ja masuunikuonaa sisältävissä betoneissa (Roy & Parker, 1983).

Masuunikuonan hydrataatio vaatii portlandsementtiä suuremman aktivaatioenergian, minkä vuoksi kuonabetonien jälkihoidon lämpötila on merkittävässä roolissa. 20 °C lämpötilassa masuunikuonabetonien alkulujuuden kehitys on hitaampaa kuin portlandsementeillä. Castellano ym. (2016) esittävät, että lämpötilaa nostamalla masuunikuonabetonien lujuudenkehitystä voidaan nopeuttaa merkittävästi, mutta samalla riski loppulujuuden heikentymiselle kasvaa. Kuonabetonien hitaampi hydrataatioreaktio aiheuttaa myös vähäisemmän lämpötilan nousun betonin sisällä (Matthes ym. 2018).

Masuunikuonan osuus sideaineesta vaikuttaa betonin lujuudenkehitykseen. Osmanovic ym. (2018) havaitsivat tutkimuksessaan, että CEM III/A luokan sementistä valmistettujen betonien puristuslujuus oli 28 päivää valusta hieman matalampi, mutta 90 päivää valusta samaa luokkaa kuin vastaavalla CEM I luokan sementistä valmistetulla betonilla. CEM III/B luokan sementeillä vertailulujuuteen ei päästy kuin osalla testatuista massoista, ja

niilläkin vasta loppulujuuden osalta 365 päivää valun jälkeen. CEM III/C luokan sementeillä betonin puristuslujuus jäi huomattavasti vertailulujuutta matalammaksi. Taivutuslujuuden osalta kuonabetonit suoriutuvat paremmin, CEM III/A ja CEM III/B luokan sementistä valmistetut betonit saavuttavat vertailulujuuden jo 28 päivän iässä. (Osmanovic ym. 2018.)

Masuunikuonan käyttäminen sideaineena vaikuttaa myös betonin karbonatisoitumiseen. Gruyaert ym. (2012) havaitsivat tutkimuksessaan, että masuunikuonaa sisältävät betonit karbonatisoituvat nopeammin kuin ainoastaan portlandsementistä valmistetut betonit. Sanjuán ym. (2018) toistivat saman havainnon, sekä havaitsivat jälkihoidolla olevan merkittävä vaikutus masuunikuonabetonin karbonatisoitumisen nopeuteen. Jälkihoidon pidentäminen vaikuttaa kaikilla betonilaaduilla karbonatisoitumisen nopeuteen, mutta masuunikuonabetoneilla vaikutus on sekä suhteellisesti, että absoluuttisesti suurempi kuin portlandsementeillä (kuva 4.). Esimerkiksi CEM III/B luokan sementistä valmistettu betoni vaatii vähintään viikon mittaisen jälkihoitojakson, jotta karbonatisoitumisen nopeus ei kasva merkittävästi. (Sanjuán ym., 2018.)



Kuva 4. Masuunikuonan määrän sekä jälkihoidon pituuden vaikutus betonin karbonatisoitumiseen (Sanjuán ym., 2018).

Huokosrakenteen hienojakoisuuden ja masuunikuonajauheen klinkkeristä eroavan kemiallisen koostumuksen takia masuunikuonabetonin kestävyys eroaa portlandsementeistä valmistetusta betonista. Toisaalta nopea karbonatisoituminen altistaa masuunikuonabetonin korroosiovaurioille ja hienojakoinen huokosrakenne pakkasvaurioille. (Matthess ym., 2018.)

### 2.2.3 Masuunikuonabetonin hiilidioksidipäästöt

Suomessa käytettävän masuunikuonajauheen ominaispäästöarvo on BY-Vähähiilisyysluokituksen (2023) mukaan 69 kgCO<sub>2</sub>/t. Ominaispäästö saattaa tulevaisuudessa kasvaa, mikäli EU:n tasolla päätetään masuunikuonan luokittelusta teollisuusjätteen sijasta sivutuotteeksi, jolloin sen ominaispäästöön sisällytetään myös osa päätuotteen valmistuksesta syntyneistä päästöistä. Huolimatta mahdollisesta kasvusta, masuunikuonan ominaispäästö tulee säilymään huomattavasti klinkkerin ominaispäästöä matalampana. (Punkki, 2021.)

Masuunikuonabetonin ominaispäästöihin vaikuttaa merkittävästi masuunikuonan osuus käytetystä sideaineesta. Kuten Vahanen Environmentin selvityksessä todettiin, Suomessa sementin osuus valmiin betonirakenteen tai betonituotteen elinkaaripäästöistä on noin 45–70 % (Salminen, 2021). CEM III/A luokkaan kuuluvan Kolmossementin ominaispäästöt ovat BY-Vähähiilisyysluokituksen (2023) mukaan 446 kgCO<sub>2</sub>/t ja CEM I luokkaan kuuluvan Paraisilla valmistetun Pikasementin vastaavasti 776 kgCO<sub>2</sub>/t. Molemmat sementit kuuluvat lujuusluokkaan 52,5 MPa. Näin ollen vaihtamalla betonin sideaine esimerkiksi Pikasementistä Kolmossementtiin sideaineen ominaispäästöt vähentyvät noin 43 %.

Masuunikuonabetoni eroaa portlandsementistä valmistetusta betonista hiilijalanjäljen lisäksi myös karbonatisoitumisen aiheuttamassa hiilensidonnassa. Masuunikuonabetonin karbonatisoitua nopeammin, se sitoo itseensä elinkaaren aikana nopeammin hiilidioksidia. Toisaalta masuunikuonan CaO sisältö on portlandsementtiä pienempi, joten teoreettinen kapasiteetti sitoa hiilidioksidia karbonatisoitumisen kautta koko elinkaaren aikana on mahdollisesti matalampi. (Gruyaert ym., 2013.)

### 2.2.4 Masuunikuonabetonin käyttö

Masuunikuonaa sisältävän betonin käyttöä ohjaa pitkälti kuonabetonin soveltuvuus tarpeeseen sekä käyttäjän kiinnostus pienentää betonirakenteen hiilidioksidipäästöjä. Masuunikuonan vaikutukset betonin ominaisuuksiin tekevät siitä joihinkin käyttötarkoituksiin poikkeuksellisen hyvän, ja toisaalta toisiin huonosti soveltuvan vaihtoehdon. Hitaan kemiallisen reaktion seurauksena matalana pysyvä hydrataatiolämpö tekee kuonabetonista hyvän materiaalin massiivisiin valuihin, joissa rakenteen sisälämpötila nousisi tavallisilla betoneilla korkeaksi. Masuunikuonabetonin hitaan alkulujuuden kehityksen vuoksi se soveltuu huonosti valuihin, joissa muotit halutaan purkaa mahdollisimman nopeasti valun jälkeen, mikä voi osoittautua haasteeksi myös valuissa, joihin masuunikuonabetoni soveltuisi hyvin muiden ominaisuuksiensa osalta. Kuonabetonin nopea karbonatisoituminen ja heikko pakassuolakestävyys heikentää käytettävyyttä erityisesti suojaamattomissa ulko-olosuhteissa. Esimerkiksi Väyläviraston infrabetonien valmistus -

ohjeessa (2020) rajataan masuunikuonan sideaineen enimmäisosuudeksi 50 % P-luvullisilla betoneilla ja 70 % PO-luokan betoneilla. Toisaalta tämä kuitenkin mahdollistaa CEM III/A luokan betonin käytön kaikissa, ja CEM III/B luokan betonin PO-luokan betonirakenteissa. Korkean sulfaatinkestävyyden ansiosta erityisesti CEM III/B ja CEM III/C luokan betoneita voi hyödyntää rakenteissa, joihin kohdistuu sulfaattirasitusta.

Edellä mainittujen ominaisuuksien sekä rajoitteiden valossa masuunikuonabetonin potentiaalisimpien käyttökohteiden joukossa vaikuttaa olevan sääsuojattuihin tiloihin tulevat valurakenteet, joilta ei vaadita korkea alkulujuutta. Tällaisia rakenteita on esimerkiksi rakennusten pohjalaatat sekä välipohjarakenteet. Lisäksi masuunikuonabetoni soveltuu myös betonielementtien valmistukseen, mikäli betonin riittävä lujuudenkehitys voidaan varmistaa.

### **2.3 Muut vähähiiliset seosaineet**

Muita betonissa käytettäviä vähähiilisiä seosaineita ovat esimerkiksi lentotuhka, silika sekä kalkkikivifilleri. Kuten masuunikuonan, muidenkin seosaineiden käytöstä betonissa on säädetty standardissa SFS EN 197-1 (2012). Seosaineet eroavat keskenään merkittävästi vaikutuksiltaan betonin ominaisuuksiin. Vaikutukset taas säätelevät kuinka suurina osuuksina seosaineita voidaan käyttää betonin sideaineesta.

Lentotuhka ja silika kuuluvat pozzolaanisiin materiaaleihin. Pozzolaanit muodostavat veden ja sementin hydrataatiotuotteena syntyvän kalsiumhydroksidin, tai muun alkaliaktivaattorin kanssa reagoidessaan C-S-H:ta. Lentotuhka on sivutuote, jota syntyy hiilen polton yhteydessä. Standardissa SFS-EN 197-1 lentotuhka jaotellaan silikaattipitoisiin sekä kalkkipitoisiin lentotuhkiin. Lisäksi lentotuhkaa luokitellaan hehikutushäviön mukaan. Kuten masuunikuona, lentotuhka pienentää betonin veden tarvetta ja parantaa sen työstettävyyttä. Lentotuhkan käyttö betonin seosaineena hidastaa hydrataatioreaktiota, madaltaa hydrataatiolämpöä ja hidastaa alkulujuudenkehitystä. Toisaalta lentotuhkan käyttö seosaineena lisää betonin loppulujuutta. Lentotuhkaa tekee betonin huokosrakenteesta hienojakoisempaa, ja näin ollen heikentää sen läpäisevyyttä. (Sideris ym. 2018.) Lentotuhkan suurin sallittu osuus sideaineesta on rasisluokissa X0 ja XC1 50 % ja muissa rasisluokissa 30 % (Betoniyhdistys, 2021). BY-vähähiilisyysluokituksessa (2022) lentotuhkan ominaispäästöksi on arvioitu 53 kgCO<sub>2</sub>e/t, joskin tiedon laatu on luokiteltu erittäin huonoksi. Ominaispäästön voidaan kuitenkin arvioida olevan hyvin merkittävästi matalampi kuin portlandklinkkerillä.

Silika on rauta- ja piisilikaattiseoksien valmistuksessa savukaasuista erottettava pozzolaani. Silika on koostumukseltaan erittäin hienojakoista, ja koostuu pallomaisista partikkeleista. Silikasta vähintään 85 % on amorfista piidioksidia. (SFS-EN 197-1, 2012.) Silikan suuri pinta-ala lisää betonin veden tarvetta ja pienentää sen painumaa, minkä vuoksi sitä käytetään usein

yhdessä notkistimien kanssa. Toisaalta silikan pallomainen rakenne parantaa betonin pumpattavuutta. Kuten lentotuhka ja masuunikuona, silika tekee betonin huokosrakenteesta hienojakoisemman. Silika lisää betonin lujuutta, mutta ei heikennä alkulujuudenkehitystä. Silika pienentää betonin läpäisevyyttä merkittävästi, ja näin ollen tekee siitä myös kestävämmän kemialliselle rasitukselle. Ominaisuuksiensa vuoksi silikaa käytetään esimerkiksi korkealujuusbetoneissa, sekä merivedelle ja kemialliselle kuormitukselle alttiissa rakenteissa. (Lewis, 2018.) Silikan korkea hinta rajaa sen käytön lähinnä käyttötarkoituksiin, joissa hyödytään sen ominaisuuksista merkittävästi. Silikan suurin sallittu osuus sideaineesta on kaikissa rasitusluokissa 10 % (Betoniyhdistys, 2021). BY-vähähiilisyysluokituksessa (2022) silikan ominaispäästöksi on arvioitu 53 kgCO<sub>2</sub>e/t. Kuten lentotuhkan osalta, tiedon laatu on luokiteltu erittäin huonoksi, mutta ominaispäästö on merkittävästi portlandklinkkeriä matalampi.

Kalkkikivifillleri on hienojakoiseksi jauhattua kalkkikiveä. Kalkkikiven kemiallinen reaktio betonissa on merkitykseltään melko vähäinen, ja sitä voidaan pitää lähes inerttinä seosaineena. Herfort ja Lothenback (2015) ovat esittäneet, että kalkkikivi reagoi betonissa muodostaen ettringiittiä ja monokarbonaattia. Näiden reaktioiden loputtua kalkkikivi jää betoniin vakaana muotona. Kalkkikiven kemiallista reaktio on kuitenkin portlandsementin tai esimerkiksi pozzolaanien kemialliseen reaktioon verrattuna vähäinen. Kalkkikivifilllerin vaikutuksiin vaikuttaa huomattavasti jauhatuksen hienojakoisuus. Hienojakoinen kalkkikivifillleri pakkautuu lähelle betonin kiviainesrakeita, mikä vähentää betonin huokoisuutta, parantaa betonin lujuutta, sekä voi vähentää veden tarvetta. (Courard ym., 2018.) BY-vähähiilisyysluokituksessa (2022) kalkkikivifilllerin ominaispäästöksi on arvioitu 11 kgCO<sub>2</sub>e/t, joka on selkeästi matalampi kuin portlandklinkkerillä tai muilla yleisesti käytetyillä seosaineilla.

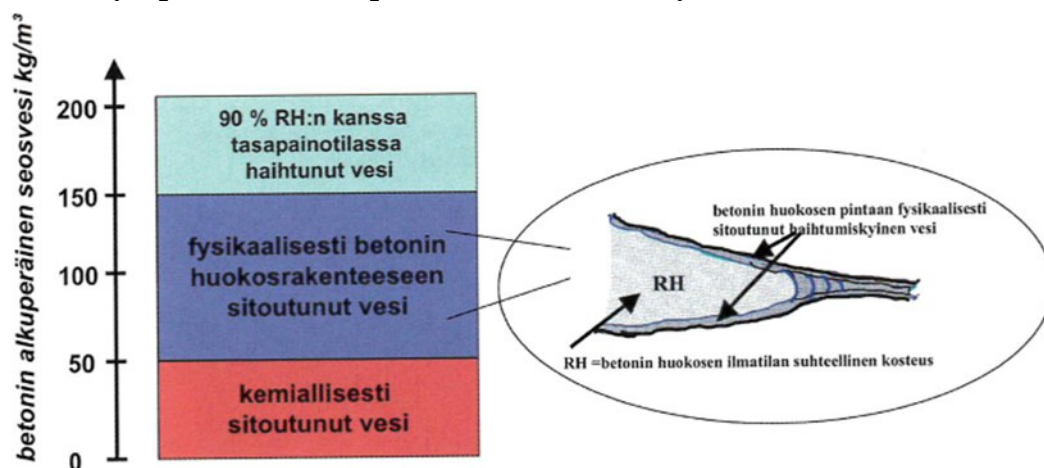
### 3 Betonin kuivuminen ja kosteusominaisuudet

#### 3.1 Betonin kuivumiseen vaikuttavat tekijät

Betonin pääraaka-aineet ovat kiviaines, sideaine (tyypillisesti sementti) sekä vesi. Betonissa oleva vesi voidaan jakaa kahteen osaan (kuva 5.) (Merikallio ym., 2007):

- Kemiallisessa reaktiossa sitoutuneeseen veteen, joka ei voi haihtua, eikä myöskään vaikuta betonin suhteelliseen kosteuteen
- Fysikaalisesti sitoutuneeseen veteen, joka on adsorptoitunut tai kapillaarisesti sitoutunut betonin huokosrakenteeseen

Fysikaalisesti sitoutuneen veden määrä yhdessä betonin huokosrakenteen kanssa määrää kuinka paljon betonin huokosrakenteen ilmatilassa on vesihöyryä, ja näin ollen kuinka suuri suhteellinen kosteus (RH [%]) huokosissa vallitsee ympäröivässä lämpötilassa. (Merikallio ym., 2007.)



Kuva 5. Esimerkki alkuperäisen seosveden jakautumisesta betonissa (Merikallio ym., 2007).

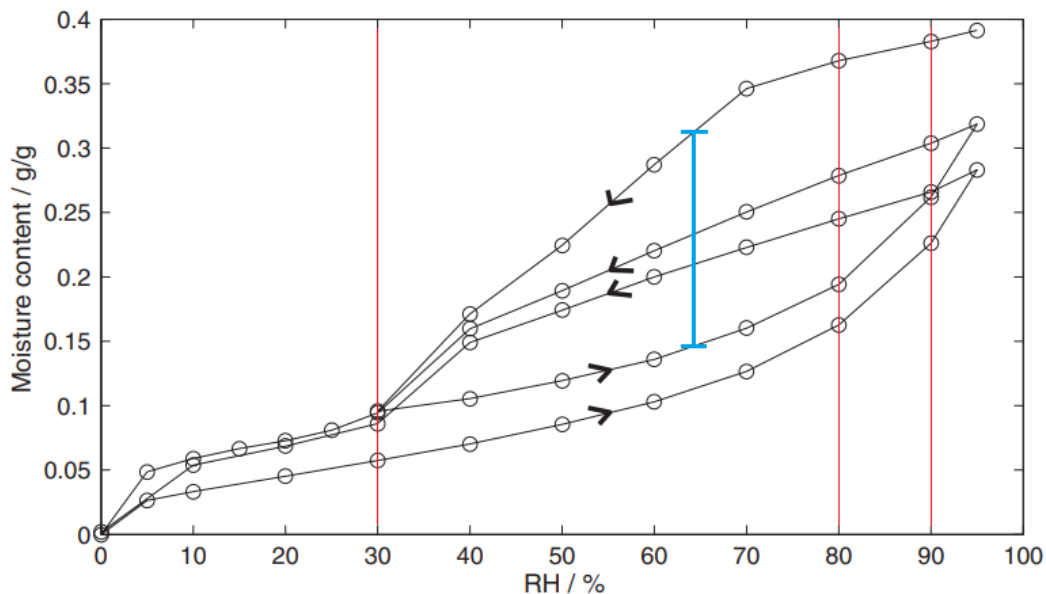
Betoniin fysikaalisesti sitoutuneen veden määrän ja huokosrakenteessa vallitsevan RH:n välistä suhdetta kuvataan sorptiokäyrällä. Nilssonin (1980) mukaan vesimäärän ja RH:n suhteeseen vaikuttaa sementin koostumus, vesi-sideaine-suhde, hydrataatioaste sekä lämpötila. Betonin sorptiokäyrään vaikuttaa lisäksi kuivuuko vai kostuuko betoni. Desorption (kuivuminen) ja absorption (kostuminen) välistä eroa kutsutaan hystereesiksi. (Merikallio ym., 2007.) Lisäksi sorptiokäyrän muotoon vaikuttaa esimerkiksi betonin kosteushistoria. Kuvassa 6. on esitetty käyrän muuttuminen kolmen kuivumis-kastumissyklin aikana (Saeidpour & Wadsö, 2015).

Fysikaalisesti sitoutunut vesi sijoittuu betonissa useisiin erilaisiin huokosrakenteisiin. Saeidpour ja Wadsö (2015) ovat soveltaneet tutkimuksessaan Jenningsin (2008) CM-II mallia sekä Muller ym. (2012) ja Muller ym. (2013) tutkimuksia, ja luoneet vesihöyryn sorptiomallin sekä jakaneet sen neljään

RH väliin, joissa kuivuminen tapahtuu eri kokoisissa huokosissa. Nämä välit ovat esitetty seuraavasti (kuva 6.) (Saeidpour & Wadsö, 2015):

- $\geq 90$  % RH, jolloin kooltaan suurimmat (halkaisijaltaan  $\geq 12$  nm) kapillaarihuokokset kuivuvat
- 90 % - 80 % RH, jolloin C-S-H kiderykelmien väleissä oleva vesi kuivuu
- 80 % - 30 % RH, jolloin yksittäisten C-S-H kiteiden muodostamissa väleissä sijaitsevat geelihuokokset (halkaisijaltaan 1–3 nm) kuivuvat
- $\leq 30$  % RH, jolloin C-S-H kiteiden sisäisten kerrosten (halkaisijaltaan  $\leq 1$  nm) välinen vesi (ns. geelivesi) kuivuu

Pääpiirteisään kuivuminen tapahtuu siis ensimmäisenä kaikista suurimmissa huokosissa, josta se etenee järjestyksessä pienempiin huokosiin. Näin ollen huokosjakaumalla on vaikutus sorptiokäyrän kulmakertoimeen ( $dw/dRH$ ), jota kutsutaan myös kosteuskapasiteetiksi. Ilmiötä voidaan havainnollistaa kuvan 6. ensimmäisellä (ylimmällä) desorptiokäyrällä. Alkuvaiheessa kosteuskapasiteetti on pieni, jolloin varsin pienellä kosteuspitoisuuden muutoksella saavutetaan varsin suuri muutos RH:ssa. Myöhemmin kosteuskapasiteetin kasvaessa RH:n muutos vaatii taas suuremman kosteuspitoisuuden muutoksen, ja todennäköisesti pidemmän kuivumisajan.



Kuva 6. Kolmen kuivumissyklin isoterminen sorptiokuvaaja (Saeidpour & Wadsö, 2015). Kuvaajaan lisätty eri kokoisten huokosten kuivumisalueet punaisilla viivoilla sekä hystereesi ensimmäisessä sorptiosyklistä sinisellä viivalla. Kosteuspitoisuus ilmaistuu kuvaajassa suhteessa sideaineen määrään.

### 3.1.1 Veden kemiallinen sitoutuminen

Sementin hydrataatioreaktio sitoo betonin valmistuksessa käytettyä vettä kemiallisesti. Powers ja Brownyard (1948) ovat esittäneet, että kemiallisesti



hydrataatiossa sitoutuneen veden määrä riippuu sementin määrästä ja hydrataatioasteesta, ja voidaan esittää puhtaalle portlandsementille kaavalla :

$$\frac{w_n}{C} \approx 0,25\alpha \quad (3)$$

Jossa  $w_n$  kemiallisesti sitoutuneen veden määrä,  $C$  on sementin määrä ja  $\alpha$  on sementin hydrataatioaste (%). Esitetyn mallin mukaisesti täydellinen hydrataatio sitoo vettä 25 % sementin massasta. Täydellisen hydrataation saavuttaminen vie kuitenkin jopa vuosia aikaa, eikä riittävän matalan vesi-sementti-suhteen (v/s) betonien kohdalla ole edes mahdollista. Tämän takia Mills (1966) on esittänyt portlandsementille hydrataatiomallin, joka huomioi hydrataatioreaktion pysähtymisen ennen kaiken reagoimattoman sementin kulumista:

$$\alpha_{ult} = \frac{1,031 \frac{w_0}{C}}{0,194 + \frac{w_0}{C}} \quad (4)$$

Jossa  $\alpha_{ult}$  on korkein hydrataatioaste tietylle v/s-suhteelle ja  $w_0$  on alkupeäinen veden määrä betonissa. Esitetyissä kaavoissa ei ole otettu huomioon moderneissa betoneissa usein käytettäviä seosaineita, kuten masuunikuonaa ja kalkkikivifillieriä, joilla voi olla merkittäviä vaikutuksia hydrataatioreaktioon seosaineosuuksista riippuen.

Kemiallisen sitoutumisen kautta tapahtuva kuivuminen on riippuvaista betonin v/s-suhteesta ja hydrataatioasteesta. Matalan v/s-suhteen betonit, joissa sideaineen määrä on korkea, kykenevät sitomaan nopeammin vettä kemiallisen reaktion kautta. Tästä syystä kemiallisen kuivumisen aiheuttama suhteellisen kosteuden lasku on matalan v/s-suhteen betoneilla nopeampaa kuin korkean v/s-suhteen betoneilla. Toisaalta kaavan 4. mukaisesti matalan v/s-suhteen betoneilla korkein hydrataatioaste jää matalammaksi, joka tasoi eroa pitkällä aikavälillä. Poikkeuksellisen nopeasti kuivuvien erikoisbetoneiden ominaisuudet perustuvatkin tyypillisesti juuri korkeaan sideaineen määrään, ja sen aiheuttamaan nopeaan kemialliseen kuivumiseen (Merkallio ym., 2007).

### 3.1.2 Veden haihtuminen ja haihtumiskuivuminen

Betoni on hygroskooppinen materiaali, ja pyrkii tasapainoon RH:n suhteen sekä materiaalin sisäisesti, että myös ympäröivän olosuhteen kanssa (Hedenblad, 1993). Näin ollen betoni pyrkii haihduttamaan fyysikaalisesti sitoutunutta vettä, mikäli sitä ympäröivä RH on matalampi kuin sen sisällä. Esi-merkiksi Powers ja Brownyard (1948) ovat esittäneet, että

haihtumiskykyisen veden kokonaismäärä portlandsementistä valmistetulle betonille on laskettavissa kaavalla:

$$\frac{w_e}{C} \approx \frac{w_0}{C} - 0,75 \frac{w_n}{C} \quad (5)$$

Jossa  $w_e$  on haihtumiskykyisen veden määrä betonissa. Haihtumiskykyinen vesi voidaan jakaa kapillaariseen veteen ja sementtigeeliin fysikaalisesti sitoutuneeseen veteen. Powersin (1960) mukaan geeliveden määrä ( $w_{gel}$ ) portlandsementistä valmistetussa betonissa voidaan ilmaista kaavalla:

$$\frac{w_{gel}}{C} = 0,21\alpha \quad (6)$$

Merikallion ym. (2007) mukaan haihtumiskuivuminen voidaan jakaa kahteen vaiheeseen, joissa veden liikkumisen mekanismit betonin sisällä eroavat toisistaan. Ensimmäisessä vaiheessa betonin suhteellisen kosteuden ollessa yli 97 % vesi liikkuu betonin sisällä sekä kapillaarisesti nesteinä, että diffuusiolla vesihöyryinä. Kapillaarinen siirtyminen on kuitenkin merkittävästi nopeampaa kuin diffuusiolla tapahtuva. Tämän takia kosteuden siirtyminen hidastuu toisessa vaiheessa huomattavasti, kun kapillaarinen kuivuminen estyy huokosten ilmatilan suhteellisen kosteuden laskiessa alle 97 %:n. Suhteellisen kosteuden lasku tämän tason alle tapahtuu ensin betonin pinnassa, ja etenee kuivumisen myötä syvemmälle. (Merikallio ym., 2007.) Powers ym. (1959) ovat esittäneet arvion minkä ikäisillä eri v/s-suhteiden portlandsementtibetoneilla kapillaarihuokosten välillä ei ole enää yhteyttä (taulukko 3.).

Taulukko 3. Kapillaariyhteyksien loppumiseen kuluva aika valusta eri vesisementti-suhteilla (Powers ym., 1959).

v/s	Aika valusta
0,4	3 päivää
0,5	7 päivää
0,6	14 päivää
0,7	6 kuukautta
>0,7	Ei koskaan

Kosteuden siirtyminen kapillaarisesti perustuu betonin huokosissa vallitseviin nesteiden paine-eroihin. Kapillaarisesti nestemäisenä liikkuvan veden liikumista betonissa kuvataan usein Darcyn lain (Whitaker, 1986) avulla:

$$q = -\frac{k_p \Delta p}{\mu_d \Delta x} \quad (7)$$

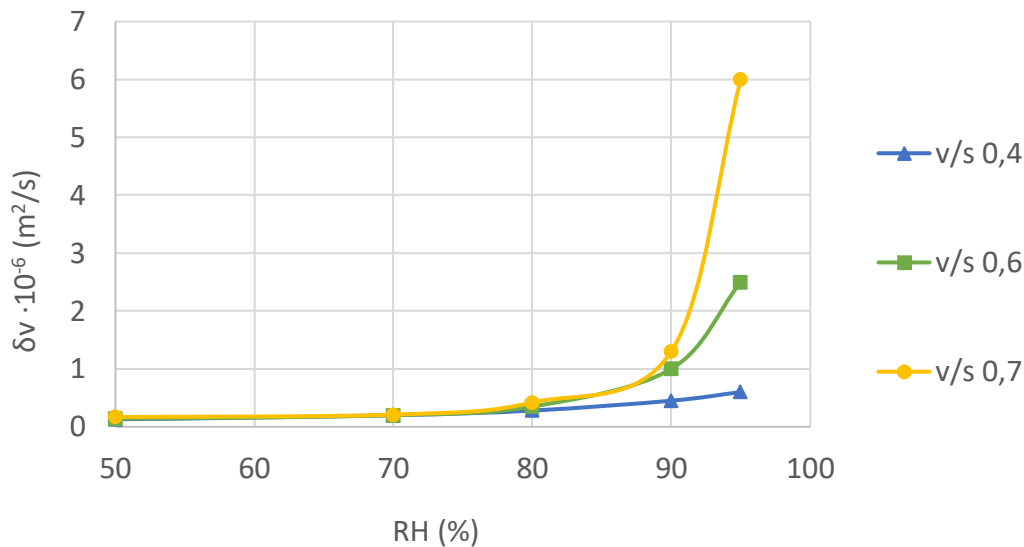
Jossa  $q$  on kosteusvuo,  $k_p$  on permeabiliteetti,  $\mu_d$  on dynaaminen viskositeetti,  $\Delta p$  on huokosveden paine-ero ja  $\Delta x$  etäisyys. Diffusiivisen kosteuden siirtymisen malli perustuu vesihöyryn pitoisuuseroihin huokosten välillä. Diffusiivista siirtymistä kuvataan Fickin lain (Fick, 1855) avulla:

$$q = -D \frac{\Delta \varphi}{\Delta x} \quad (8)$$

Jossa  $q$  on kosteusvuo,  $D$  on diffusiviteetti,  $\Delta \varphi$  on vesihöyryn pitoisuusero ja  $\Delta x$  etäisyys.

Diffuusion avulla tapahtuvan kosteuden siirtymisen nopeus riippuu betonin ominaisuuksista sekä ympäröivistä olosuhteista. Betonin tiiveys ja huokosrakenne vaikuttavat sen vesihöyrynläpäisevyyteen. Tiiviin betonin läpäisevyys on pienempi kuin huokoisen betonin. Huokosten ilmatilassa oleva suhteellinen kosteus sekä lämpötila määrittävät vesihöyryn paineen ilmatilassa. Korkea RH ja lämpötila nostavat vesihöyryn painetta, mikä puolestaan kasvattaa läpäisevyyttä. (Merikallio ym., 2007.) Betonin kuivuminen aiheuttaa siis diffuusion vaikuttavien olosuhteiden muutoksen, ja hidastaa kosteuden siirtymistä diffuusion välityksellä. Tästä syystä haihtumiskuivuminen hidastuu betonin RH:n laskiessa. Matalan v/s-suhteen betonit ovat huokosrakenteeltaan tiiviimpiä kuin korkean v/s-suhteen betonit, minkä vuoksi niillä on pienempi vesihöyrynläpäisevyys (Merikallio ym., 2007).

Diffusiviteetin lisäksi betonin vesihöyrynläpäisevyyttä voidaan arvioida laskennallisesti käyttäen vesihöyrypitoisuuseroa ( $\delta_v$ ) tai vesihöyryn osapaine-eroa ( $\delta_p$ ) potentiaalina. Yksi yleisesti vesihöyryn vastuksen kuvaamisessa käytetty suure on suhteellinen vesihöyryn diffuusiovastuskerroin ( $\mu$ ), jonka perusteella voidaan laskea vastaavat vesihöyrynläpäisevydet haluttussa potentiaalissa. Kosteudensiirto-ominaisuuksien arviointi betonille on haastavaa, sillä parametrien arvot eivät ole lineaarisia suhteellisen kosteuden muutoksen suhteen. Tämän vuoksi kosteudensiirto-ominaisuudet esitetään tietyllä RH-tasolla, tai vaihtoehtoisesti arviona jollekin RH-välille. RIL 255-1-2014 (2014) teoksessa esitetyt parametrin  $\delta_v$  arvot havainnollistavat korkean suhteellisen kosteuden alueella tapahtuvaa veden kapillaarisen siirtymän aiheuttamaa arvon kasvamista (kuva 7). Vesihöyrynläpäisevyyden kasvaminen korostuu vesi-sementti-suhteen kasvaessa. Vesi-sementti-suhteen vaikutus liittyy erityisesti kapillaarihuokosten määrän kasvuun korkeilla v/s-suhteilla.



Kuva 7. Vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna ( $\delta_v$ ) kolmelle vesi-sementti-suhteelle välillä 50–95 % RH (RIL 255-1-2014, 2014).

Betonin kosteudensiirto-ominaisuuksien mittaaminen on todella työlästä ja hidasta perinteisillä menetelmillä, kuten kuppikokeilla. Nilsson ja Bergström (2020) ovat esitelleet ”the tin can methodin”, jolla voidaan arvioida betonin kosteudensiirto-ominaisuuksia huomattavasti kevyemmin ja nopeammin koejärjestelyin. Menetelmässä betonia jälkihoidetaan tiiviissä astiassa vähintään kuukausi, jonka jälkeen betonin pinta aukaistaan, ja betonikappaleen massan muutosta seurataan. Massan muutoksen perusteella tutkitulle betonille voidaan johtaa kosteudensiirto-ominaisuuksia, kuten edellä esitetyt diffusiviteetti ( $D$ ) tai vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla laskettuna ( $\delta_v$ ) RH-välillä, jonka toinen raja on ympäröivän ilman suhteellinen kosteus, ja toinen raja betonin sisäinen suhteellinen kosteus. (Nilsson & Bergström, 2020.) Menetelmän suurin haaste liittyy edellä esitettyyn kosteudensiirtoparametrien epälinearisuuteen. Koska menetelmä tuottaa tutkitun RH-välin keskiarvon, sen käyttö korkean v/s-suhteen betoneille voi tuottaa hyvin karkean arvion betonin todellisista kosteudensiirto-ominaisuuksista.

Betonin suhteellisen kosteuden tasoa ja jakaumaa tarkasteltaessa haihtumiskuivumisen rooli kasvaa lähemmäksi pintaa mentäessä. Syvemmillä betonirakenteessa kemiallisen kuivumisen osuus kuivumisesta on suuri erityisesti nuorissa ja tiiviissä betoneissa. Huokoisissa betonilaaduissa haihtumiskuivuminen vaikuttaa syvällä betonirakenteessa aikaisemmin kuin tiiviillä betonilaaduilla. Betonin kosteudensiirto-ominaisuuksilla on myös merkittävä vaikutus betonin kuivumiseen valun jälkeisen kastumisen osalta. Merikallion ym. (2007) mukaan tiiviitkin betonilaadut vastaanottavat vettä kapillaarisesti kastuessaan esimerkiksi sateessa, mikä hidastaa kuivumista huomattavasti.

### 3.2 Masuunikuonabetonin kuivumiseen vaikuttavat tekijät

Masuunikuona eroaa portlandklinkkeristä kemiallisen koostumuksensa osalta. Tästä syystä masuunikuonan hydrataatioreaktio eroaa klinkkerin hydrataatiosta. Masuunikuonan klinkkeriä matalamman kalsiumsisällön vuoksi se tarvitsee ylimääräistä kalsiumia kalsiumsilikaattihydraatin (C-S-H) muodostamiseksi. (Escalante-Garcia, 2003.) Masuunikuonan vaikutusta hydrataatioreaktiossa sitoutuneen veden määrään on tutkittu useassa tutkimuksessa. Esimerkiksi Escalante-Garcian (2003) tulosten mukaan 60 % masuunikuonaa sisältävän sementin kemiallisesti sitoman veden osuus on pienempi kuin portlandsementillä korkeammasta hydratoitumisasteesta huolimatta. Ensimmäiset 14 päivää valusta masuunikuonasementin  $w_n/C$  oli jopa 6 prosenttiyksikköä matalampi kuin portlandsementeillä, ja tämän jälkeen noin 3 prosenttiyksikköä matalampi. Myös Lumleyn ym. (1996) tutkimuksessa havaittiin masuunikuonan osuuden kasvaessa hydrataatioreaktion hidastuvan sekä korkeimman hydrataatioasteen laskevan. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin masuunikuonan laadun vaikuttavan merkittävästi reaktion nopeuteen ja korkeimpaan hydratioasteeseen. Toisaalta Millsin (1966) tutkimuksessa havaittiin, että masuunikuonasementit sitoisivat hydratoitueensa jopa enemmän vettä kemiallisesti kuin portlandsementit. Millsin tutkimuksessa masuunikuonan kemiallinen koostumus erosi esimerkiksi Suomessa tuotettavan masuunikuonan (Taulukko 1.) tai esimerkiksi Lumleyn ym. (1996) tutkijain masuunikuonien koostumuksista. Millsin tutkimuksessa masuunikuonan CaO:n ja SiO<sub>2</sub>:n osuudet olivat pienemmät ja vastaa-vasti Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:n ja MgO:n osuudet suuremmat.

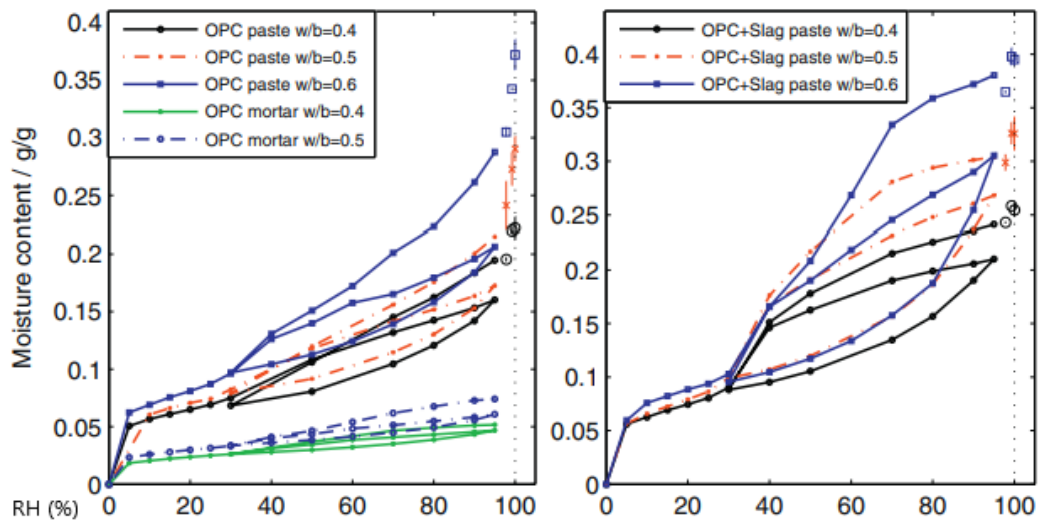
Masuunikuonabetoneilla on useissa tutkimuksissa havaittu olevan hienojakoisempi huokosrakenne ja vähemmän kapillaarihuokosia kuin vastaavan v/s-suhteen portlandsementistä valmistetulla betonilla (Roy & Parker, 1983; De Belie ym., 2010; Duan ym., 2013; Gruyaert ym., 2013). Pienempi kapillaarihuokosten määrä heikentää niiden muodostaman verkoston yhteyttä, ja heikentää tämän vuoksi kapillaarista veden siirtymistä betonissa. Tiivis ja hienojakoinen huokosrakenne pienentää myös betonin vesihöyrynläpäisevyyttä. Esimerkiksi Ben Fraj ym. (2012) havaitsivat, että masuunikuonaa 30 % sideaineesta sisältävän betonin vesihöyrynläpäisevyys oli noin 50 % pienempi kuin vastaavan portlandsementtibetonin. Masuunikuonan vaikutusta betonin haihtumiskuivumiseen on tutkinut myös esimerkiksi Divsholi ym. (2013), jotka havaitsivat, että portlandsementistä valmistetun betonin massan häviö on suurempi kuin 50 % masuunikuonaa sisältävällä betonilla. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että jälkihoitoajan massahäviötä pienentävä vaikutus oli suurempi masuunikuonabetonilla.

Tiiviimpi ja hienojakoisempi huokosrakenne vaikuttaa myös betonin kykyyn absorboida ja välittää vettä kapillaarisen imun välityksellä. Esimerkiksi Lane (2012) on tutkinut 12–16 vuotta vanhoista siltarakenteista otettuja betoninäytteitä. Masuunikuonabetonista valmistetuista silloista otettujen

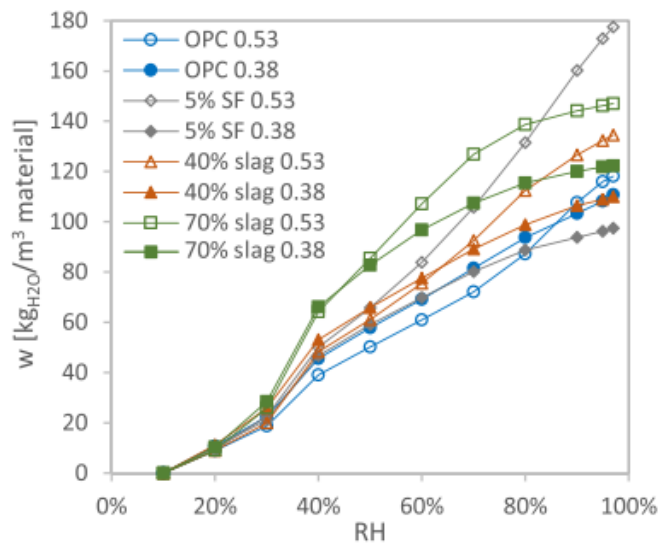
näytteiden absorptiokyky oli matalampi kuin portlandsementtibetonista valmistetuista silloista otettujen näytteiden. Samanlaisen lopputulokseen Lannen kanssa päätyi Ukpata ym. (2018), jotka havaitsivat masuunikuonabetonilla olevan pienempi absorptiokerroin kuin CEM I betonilla.

Masuunikuonan vaikutus betonin huokosrakenteeseen vaikuttaa myös haihtumiskykyisen veden jakautumiseen betonin sisällä. Saeidpour ja Wadsö (2015) ovat esittäneet tutkimuksessaan sorptiokäyrät sekä tavalliselle portlandsementtibetonille, että sideaineesta 70 % sisältävälle masuunikuonabetonille eri v/s-suhteilla (kuva 8.). Sorptiokäyristä voidaan arvioida, että masuunikuonan kosteuspitoisuus on huomattavasti korkeampi kaikilla RH-tasoilla kuin vastaavan v/s-suhteen portlandsementillä. Vastaavia tuloksia on saaneet myös Olsson ym. (2018) tutkimuksessaan, jossa on määritelty desorptiokäyrät CEM I betonille sekä 40 % ja 70 % sideaineesta masuunikuonaa sisältäville betoneille (kuva 9.). Olssonin ym. tulosten perusteella voidaan arvioida, että masuunikuonan vaikutus betonin fysikaalisesti sitoutuneen veden määrään tietyllä suhteellisen kosteuden tasolla ei ole lineaarinen. Ero kosteusmäärässä on 40 % ja 70 % masuunikuonaa sisältävien betonien välillä huomattavasti suurempi kuin 0 % ja 40 % masuunikuonaa sisältävien betonien välillä. Yleisesti masuunikuonalla voidaan havaita olevan kaksi selkeää vaikutusta desorptiokäyriin. Ensinnä masuunikuona lisää betonissa olevan fysikaalisesti sitoutuneen veden määrää kaikilla RH-tasoilla. Ero kasvaa, kun masuunikuonan osuus sideaineesta tai v/s-suhde kasvaa. Toisena masuunikuonabetoneiden kosteuskapasiteetti on huomattavasti tavallista betonia suurempi välillä 30–70 % RH ja pienempi välillä 70–100 % RH. Eroa kasvattaa sekä masuunikuonan osuuden kasvaminen, että v/s-suhteen kasvaminen. (Saeidpour & Wadsö, 2015; Olsson ym., 2018.)

Saeidpourin & Wadsön (2015) tutkimuksen perusteella kosteushistorian vaikutus sorptiokäyriin on suurempi masuunikuonabetoneilla. Masuunikuonabetoneilla hystereesin pienentyminen ensimmäisen ja toisen sorptiosyklin välillä on suurempaa kuin portlandsementistä valmistetuilla betoneilla kaikilla v/s-suhteilla.



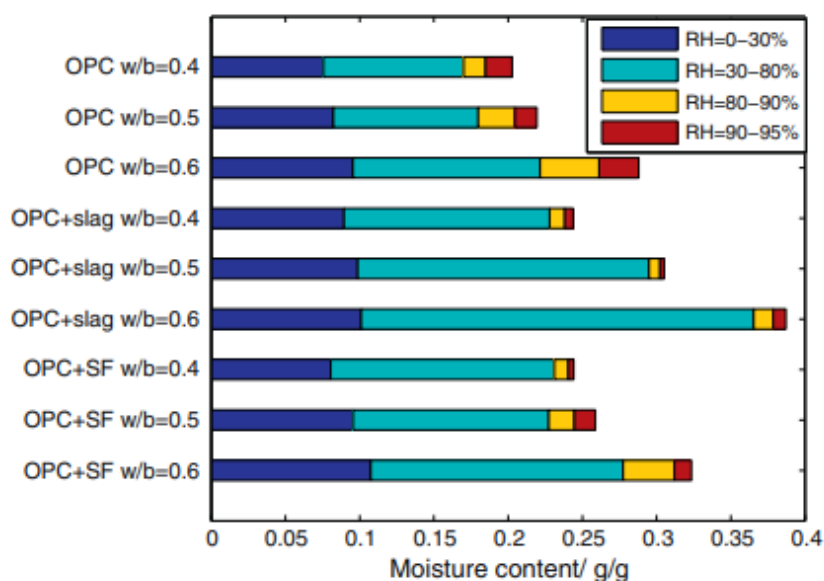
Kuva 8. Sorptiokäyrät portlandsementille sekä masuunikuonaseментille eri v/s-suhteilla (Saeidpour & Wadsö, 2015).



Kuva 9. Desorptiokäyrät eri sideaineille ja v/s-suhteille (Olsson ym., 2018).

Saeidpour ja Wadsö (2015) ovat johtaneet sorptiokäyristä myös määriteltyillä RH-väleillä haihtuvan veden määrän. Kuvassa 10. esitetystä kuvaajasta voidaan nähdä, että masuunikuonabetoneilla RH-välillä 0–80 % haihtuvan veden määrä on suurempi kuin tavallisella betonilla. Vastaavasti RH-välillä 80–95 % tavallinen betoni haihduttaa enemmän vettä. Tukimuksessa arvioidaan erojen johtuvan veden erilaisesta jakautumisesta betoneiden sisällä. Tavallisten betoneiden karkeammassa huokosrakenteessa on enemmän vettä kapillaarihuokosissa ja C-S-H kiderykelmien väleissä, joista se haihtuu ensimmäisenä RH-välillä 80–95 %. Masuunikuonabetonissa on enemmän geelihuokosia ja niissä olevaa vettä, joka haihtuu RH-välillä 30–80 %. Alle

30 % suhteellisen kosteuden betonista haihtuva vesi on pääosin geelivettä, jonka määrä vaikuttaa tutkimuksen mukaan olevan suurempi masuunikuonaa sisältävässä betonissa. Masuunikuonasementeillä v/s-suhteen vaikutus 30–80 % välillä haihtuvaan veteen on suurempi kuin portlandsementillä. (Saeidpour & Wadsö, 2015.) Olsson ym. (2018) ovat myös esittäneet desorptiokäyrien perusteella määritellyt RH-väleillä haihtuneen veden määrät. Tulokset ovat hyvin samankaltaisia Saeidpourin ja Wadsön tulosten kanssa.



Kuva 10. RH-väleillä haihtunut vesi eri sideaineilla ja v/s-suhteilla (Saeidpour & Wadsö, 2015).

Saeidpourin & Wadsön (2015) ja Olssonin ym. (2018) tutkimuksissa esitettyjen desorptiokäyrien keskinäisen vertailun luotettavuutta heikentää niissä käytettyjen metodien erot. Saeidpourin ja Wadsön tutkimuksessa sorptiokäyrien määrittämiseen käytettiin niin kutsuttua kuppimenetelmää, kun taas Olssonin ym. tutkimuksessa käytettiin DVS-laitetta. Tutkimustulokset eroavat sekä absoluuttisen kosteuden määrien, että kulmakertoimen osalta. Toisaalta molemmissa tutkimuksissa esitetyt käyrät kuvaavat masuunikuonan vaikutusta sorptiokäyriin samankaltaisesti.

Tämän työn tutkimuskysymykset liittyvät nimenomaan betonin huokosten ilmatilan suhteellisen kosteuden kehitykseen. Masuunikuonan vaikutusta betonin kuivumiseen tältä näkökulmalta ei ole kuitenkaan tarkasteltu kirjallisuudessa juurikaan. Samankaltaisia suhteellisen kosteuden mittauksia on tehnyt Nikkilä AMK opinnäytetyössään ”Vihreän betonin kuivuminen” (2022). Tutkimuksessa mitattiin porareikämenetelmällä sekä etäluettavaa mittaustanturia hyödyntäen CEM II/A-LL ja CEM III/A sementeistä valmistettujen betoneiden kuivumista 40 mm syvyydellä 5 viikkoa valun jälkeen.



Tutkimuksessa havaittiin, että CEM III/A sementistä valmistetun betonin suhteellinen kosteus oli ensimmäiset kolme viikkoa korkeampi kuin CEM II/A-LL sementistä valmistetulla betonilla. Kolmen viikon jälkeen CEM III/A betoni oli mittaussyvyydellä kuivempaa sekä yhteen-, että kahteen suuntaan kuivuvan kappaleen osalta. (Nikkilä, 2022.)

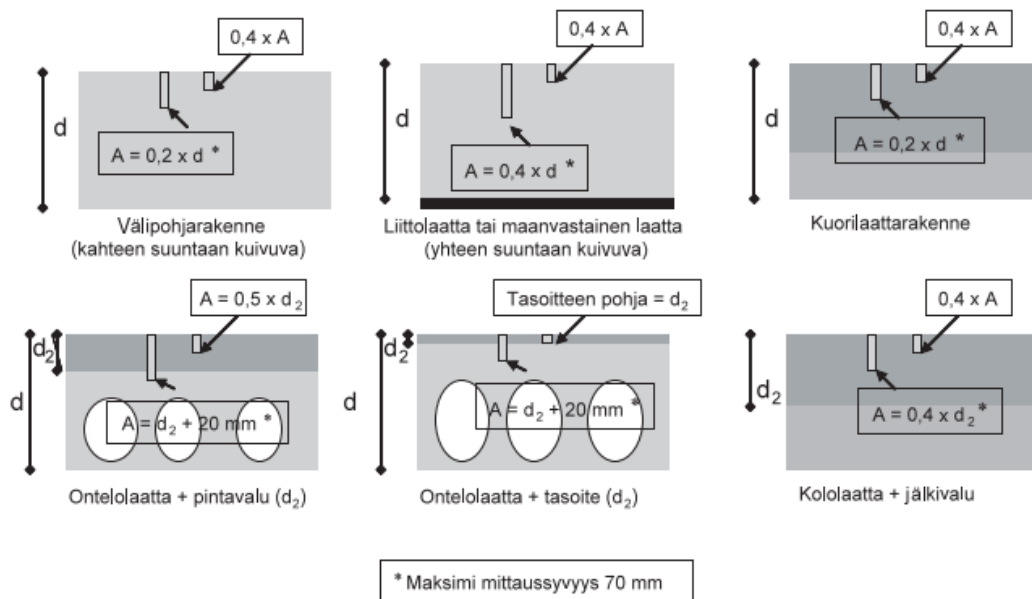
### 3.3 Tavoitetasot betonin suhteelliselle kosteudelle

Betonin suhteellista kosteutta mitataan pääosin päällystettävistä betonirakenteista. Mikäli betonin pintaan asennettavan materiaalin vesihöyrynläpäisykyky on pienempi kuin betonilla, tasaantuu betonin sisällä oleva kosteus pinnoitteen alle. Liian korkea suhteellinen kosteus pinnoitteen alla voi aiheuttaa pinnoitemateriaalista riippuen esimerkiksi liimauksen heikkenemistä, mikrobivaurioita, päällystemateriaalin irtoamista tai pinnoitteiden kemiallisessa hajoamisessa syntyvien terveydelle haitallisten yhdisteiden emittoitumista sisäilmaan (Merikallio ym. 2007). Edellä kuvattujen sekä muiden ongelmien välttämiseksi ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta (782/2017) määrää rakenteiden kuivumisen osalta seuraavasti: *”Rakennusvaiheen vastuuhenkilön on huolehdittava siitä, että rakenteissa olevan kosteuden ja rakennuskosteuden kuivumisaste mahdollistaa rakenteiden peittämisen kuivumista hidastavalla ainekerroksella, pinnoitteella tai rakenteella vaurioita aiheuttamatta. Rakennusvaiheen vastuuhenkilön on huolehdittava kosteusmittauksin rakenteiden asianmukaisesta kosteuspitoisuudesta seuraavaan työvaiheeseen siirtymistä varten.”*

Asetus ei kuitenkaan ota kantaa kysymykseen, mikä on riittävän kuiva rakenne. Merikallio ym., 2007 ovat esittäneet enimmäisarvoja suhteelliselle kosteudelle arviointisyvyydelle A sekä betonin pintaosissa 0,4A eri päällystemateriaaleille (taulukko 4.) Arviointisyvyyden A määrittäminen on ohjeistettu Betonirakenteiden päällystäminen ohjeet -kirjassa (Suomen Betonitieto Oy, 2007) ja esitetty kuvassa 11. Merikallion ym. esittämät suhteellisen kosteuden raja-arvot ovat voimassa, kun mittaukset suoritetaan luotettavasti ympäristöministeriön asetuksenkin vaatimilla suhteellisen kosteuden mittauksen menetelmillä, joita on esitelty esimerkiksi RT 103333 Betonin suhteellisen kosteuden mittaus -ohjekortissa. Aiemmin kosteusmittauksissa on käytetty myös esimerkiksi karbidimittareita ja pintakosteusosoittimia, joilla ei saada luotettavia tuloksia rakenteessa vallitsevasta suhteellisesta kosteudesta. (Merikallio ym., 2007.)

Taulukko 4. Enimmäisarvot alustabetonin suhteelliselle kosteudelle päällystyksettä eri päällystemateriaaleille (Merikallio ym., 2007).

Päällystemateriaali	Betonin RH (%) arviointisyvyydellä (A)	Betonin ja/tai tasoitteen RH (%) pinnassa ja 1-3 cm:n syvyydellä (0,4xA)
Muovimatot	85	75
Linoleumi	85	
Kumimatot	85	
Tekstiilimatto, tiivis alusta (pvc, kumi, kumilateksisively) tai luonnonmateriaalista tehty	85	
Täyssynteettiset tekstiilimatot ilman alusrakennetta	90	
Muovi-, kumi-, linoleumilaatat	90	
Mosaiikkiparketti (normaalibetoni)	85	
Mosaiikkiparketti (erikoisbetoni, v/s < 0,5)	90	
Alustaan liimattava lautaparketti (normaalibetoni)	85	
Alustaan liimattava lautaparketti (erikoisbetoni, v/s < 0,5)	90	
Kelluva lautaparketti ja alusmateriaali	85	
Laminaatti ja vesihöyryntiivis alusmateriaali	85	



Kuva 11. Arviointisyvyyden (A) määrittäminen erityyppisistä rakenteista (Suomen Betonitieto Oy, 2007).

Betonin, ja erityisesti päällystettävän lattiabetonin, kuivumisen nopeus määrittää huomattavasti rakennustyömaiden aikatauluja. Aikataulun kiristäminen kuivumisen kustannuksella on johtanut päällystemateriaalien vaurioitumiseen ja sisäilmaongelmiin. Myös betonirakenteiden muuttuminen paksummaksi on tuonut haasteita kuivumisen hidastuessa. (Rakennuslehti, 2021). Tavallisten laattavalujen lisäksi yhdeksi haasteeksi on havaittu

elementtirakenteisissa välipohjissa käytetyn betonilla täytetyn teräsluottopalkkirakenteen kuivuminen (Vahnen Oy, 2016). Teräsluottopalkin osittain suljetun rakenteen vuoksi haihtumiskuivuminen on tavalliseen betonirakenteeseen verrattuna hidasta, ja kemiallisen kuivumisen merkitys rakenteen kuivumisessa on hyvin suuri. Vaaditun suhteellisen kosteuden tason saavuttamiseksi palkin valussa olisi Vahnen Oy:n tutkimuksen mukaan suositeltavaa käyttää korkean lujuusluokan betonia, joka kuivuu nopeammin, ja jolla saavutetaan kemiallisen kuivumisen kautta alhaisempi RH taso kuin matalamman lujuusluokan betoneilla.

## 4 Kokeellinen osuus

### 4.1 Yleiskuvaus

Työssä tehtävien kosteusmittausten ja analyysin tarkoituksena on selvittää kuinka masuunikuonan sideaineosuus vaikuttaa betonin kuivumisen nopeuteen. Betonien kuivumista tarkastellaan suhteellisen kosteuden mittauksilla sekä punnituksilla määritettävällä massan häviöllä. Kosteusmittauksia toteutetaan kolmen tyyppisille betonikoekappaleille:

- Vakio-olosuhteessa yhteen suuntaan kuivuvat kappaleet
- Valun jälkeen tiivisti säilytetyt kappaleet, jotka kuivuvat ainoastaan kemiallisen sitoutumisen kautta
- Kastelujaksolle altistetut, vakio-olosuhteessa yhteen suuntaan kuivuvat kappaleet

Kaikista kappaleityypeistä tarkastellaan betonin masuunikuonasisällön ja vesi-sideainesuhteen vaikutusta kuivumiseen tarkastelujaksolla. Tutkimuksen tavoitteena ei ole selvittää betonien tarkkoja kuivumisaikoja tiettyyn suhteellisen kosteuden tasoon, koska saadut tulokset eivät vakioitujen olosuhteiden vuoksi olisi suoraan vertailukelpoisia todelliseen kuivumisympäristöön. Toisaalta mittauksista voidaan käyttää arviona betonin suhteellisen kosteuden laskusta esimerkiksi ainoastaan kemiallisesti kuivuvilla kappaleilla tai geometrialtaan koekappaleita vastaavilla rakenteilla.

Kokeellisen osuuden mittausten kriteereinä olivat kosteusmittausten ajallinen kattavuus sekä diplomityölle kohtuullinen suoritus aika. Riittävän kattavien tulosten saavuttamiseksi mittausajaksi päätettiin 180 päivää valusta, minkä katsottiin riittävän hyvään kuivumisasteeseen. Taulukossa 5. esiteltujen suunniteltujen mittausten toteuttamiseksi arvioitiin tarvittavan 11 koekappaletta kosteusmittauksia varten sekä 1 koekappale punnitusmittauksia varten betonilaatua kohden. Lisäksi varauduttiin virhetekijöihin sekä lisätutkimustarpeisiin varakappaleilla. Koekappaleiden kokonaismääräksi valittiin 20 kappaletta betonilaatua kohden. Neljä koekappaletta varattiin tiivisti säilytettäväksi, ja neljä koekappaletta kastelututkimuksia varten.

Taulukko 5. Tutkimukseen sisällytettävien kosteusmittausten ajankohdat.

Mittaukset	Mittausajankohta				
<i>aika valusta (päivää) --&gt;</i>	<i>30</i>	<i>60</i>	<i>90</i>	<i>120</i>	<i>180</i>
Kemiallinen kuivuminen	X		X		X
Vakio-olosuhde	X	X	X	X	X
Kastelut (60-->90)			X	X	X

Kokeellinen osuus toteutettiin yhteistyössä AFRY Buildings Finland Oy:n sekä Rudus Oy:n kanssa. Koekappaleet valettiin Ruduksen Konalan betonitehtaalla. Kokeellisen osuuden mittauksiin käytettiin AFRY:n mittauskalustoa.

## 4.2 Koekappaleet

### 4.2.1 Betonin koostumus ja hiilijalanjälki

Tutkittaviksi sideaineiksi valittiin tutkimuskysymysten perusteella kolme masuunikuonaa sisältävää sementtilaattaa (tuotenimi suluissa), joista CEM II/B-M edustaa yleiskäytössä olevaa sementtilaattaa, ja muut runsaammin seostettuja masuunikuonasementtejä.

- CEM II/B-M (Oiva)
- CEM III/A (Kolmossementti)
- ”CEM III/B” (70 % masuunikuonajauhe + 30 % Pikasementti)

SFS EN 197-1 (2012) mukaisesti CEM II/B-M sisältää yhteensä 21–35 % masuunikuonaa ja kalkkikiveä. Vastaavasti CEM III/A sisältää 36–65 % masuunikuonaa. Tutkimuksessa käytetty CEM III/B sisältää 70 % masuunikuonaa. Vesi-sideaine -suhteiksi tutkimukseen valittiin v/s 0,45 sekä v/s 0,60, joiden todettiin vastaavan melko kattavasti Suomessa käytettyjä betonilaatuja. Betonimassat valmistettiin toisiaan vastaaviksi v/s-suhteen lisäksi painuman ja ilmamäärän osalta. Betonimassojen painumaa säädettiin notkistimella halutun v/s-suhteen säilyttämiseksi. Tutkimukseen sisällytettävien betonien reseptit on esitetty taulukossa 6. CEM III/B sementtiä vastaava masuunikuonajauheesta ja CEM I:stä valmistettu seos ei välttämättä vastaa täydellisesti tehdasvalmisteista CEM III/B tuotetta esimerkiksi hienouden osalta, mutta katsottiin tämän tutkimuksen viitekehyksessä vertailukelpoinen sideaineseokseksi.

Taulukko 6. Kokeellisen osuuden betoneiden reseptit (Rudus Oy).

		v/s 0,60			v/s 0,45		
		CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B	CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B
<b>Oiva</b>	kg/m <sup>3</sup>	315			430		
<b>Kolmossementti</b>	kg/m <sup>3</sup>		310			425	
<b>Pikasementti</b>	kg/m <sup>3</sup>			94			130
<b>Kuonajauhe</b>	kg/m <sup>3</sup>			220,0			304
Tehollinen vesi	kg/m <sup>3</sup>	188	185	188	192	190	195
v/s-suhde		0,60	0,60	0,60	0,45	0,45	0,45
0-5 kivituhka	%						
0-8 h	%	20,0	20,0	20,0	15,0	15,0	15,0
0-8 k	%	50,0	50,0	50,0	55,0	55,0	55,0
5-16	%	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
<b>Notkistin</b>	%	0,6	0,9	0,6	0,64	0,62	0,70
Painuma (tavoite)		S3	S3	S3	S3	S3	S3
Painuma (mitattu)	mm	140	150	150	140	120	170
Muut							
Ilma	%	1,50	1,20	1,40	1,40	1,80	1,60
Tiheys	kg/m <sup>3</sup>	2427	2441	2431	2435	2433	2413

Hiilidioksidipäästöjen pienentämisen ollessa merkittävin syy masuunikuonabetonin käytön yleistymiselle Suomessa, on perusteltua arvioida tähänkin työhön käytettyjen betonien päästöjä. Betonien päästöjen arviointiin käytetyn GWP-luokituksen käyttäminen vertailuun on tässä tapauksessa haastavaa, koska betonit on valmistettu vakioidulla vesi-sideaine-suhteella eikä GWP-luokituksessa vertailutasona käytettävällä lujuusluokituksella. Sementtien lujuudenkehityksen erotessa toisistaan, tässä työssä käytetyt betonit eivät vastaa toisiaan lujuusluokituksen osalta. Rudus valmisti tutkimuskappaleiden valmistuseristä ylimääräiset kappaleet betoneiden puristuslujuuksien mittaamiseksi, ja suoritti mittaukset normaalin laadunvarmistusmenettelyn mukaisesti. Puristuslujuudet on testattu 1, 7, 28 ja 91 päivää valun jälkeen (taulukko 7.). Tulokset on ilmoitettu kuutiomaisten koekappaleiden puristuslujuuksina. Puristuslujuuksien merkittävien erojen vuoksi tutkitut betonit eivät vastaa toisiaan käytettävyydeltään.

Taulukko 7. Kokeellisessa osuudessa käytettyjen betonien puristuslujuudet ( $f_{ck,cube}$ ) (Rudus Oy).

Puristuslujuus (MPa)	v/s 0,60			v/s 0,45		
	CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B	CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B
1d	7,2	4,0	2,2	14,8	11,0	3,0
7d	28,6	27,1	17,8	40,6	41,7	27,3
28 d	38,2	42,2	32,6	51,2	57,9	47,1
91 d	42,5	50,0	39,8	55,8	61,9	54,1

Betoneiden ominaispäästöjen laskenta on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä A. Betonin valmistuksen kokonaisominaispäästöihin vaikuttaa käytetty sementin lisäksi raaka-aineiden kuljetus sekä valmistukseen käytetty energia. Ominaispäästöjen laskentaan on käytetty BY-Vähähiilisyysluokituksen (2023) mukaisia ominaispäästöarvoja, arvioituja kuljetusmatkoja Ruduksen Konalan betonitehtaalte sekä Betoniteollisuus ry:n (2021) tilaaman valmisbetonin elinkaariarvion mukaista energian käytöstä aiheutuvaa päästöä. Ominaispäästöt on laskettu BY-Vähähiilisyysluokituksen ohjeiden (2022) mukaisesti elinkaariarvioinnin vaiheille A1-A3 (kuva 12.)

Tuotevaihe			Rakentamisvaihe		Käyttövaihe								Purkuvaihe				Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset		
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	D	D	
x	x	x	x	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	x	x	x	x	x	x	x	
Raaka-aineet	Kuljetus	Valmistus	Kuljetus	Työmaatoiminnat	Käyttö	Kunnossapito	Korjaus	Osien vaihto	Korjaukset	Laajamittaiset korjaukset	Energian käyttö	Veden käyttö	Purkaminen	Kuljetus	Purkujätteen käsittely	Loppusijoitus	Uudelleenkäyttö	Energianhyötykäyttö	Kierätyks

Kuva 12. Elinkaariarvioinnin vaiheet (Betoniteollisuus ry, 2021). Ominaispäästöjen laskentaan käytetyt vaiheet rajattu punaisella.

Tutkimuksessa käytetyt betonit on jaoteltu ominaispäästöjen sekä 28 ja 91 päivän puristuslujuuksien perusteella GWP-luokkiin (taulukko 8.). Lujuusluokka on määritelty vähentämällä 5 MPa Ruduksen ilmoittamista puristuslujuustuloksista. Vähennys tehdään, koska lujuustulokset ovat keskimääräisiä tuloksia, ja lujuusluokituksessa huomioidaan myös lujuustulosten hajonta. Taulukosta voidaan nähdä, että masuunikuonan määrällä on merkittävä vaikutus betonin ominaispäästöihin, lujuusluokkaan sekä siihen mihin GWP-luokkaan se asettuu. Masuunikuonan osuuden lisääminen pienentää ominaispäästöjä merkittävästi, ja samalla parantaa GWP-luokitusta. 28 päivän laadunvarmistusikällä CEM II betonit eivät täytä luokitukseen vaadittavaa ominaispäästötasoa. CEM III/A betonit ovat lujuusluokassaan GWP.85-tasolla ja CEM III/B betonit GWP.70-tasolla. Verrattaessa 28 ja 91 päivän lujuusluokituksen mukaista GWP-luokkaa, kolmen kuudesta betonista GWP-luokitus paranee laadunvarmistusikää kasvattamalla. Molemmat CEM II/B-M betonit nousevat luokkaan GWP.REF ja korkean v/s-suhteen CEM III/A betoni luokkaan GWP.70.

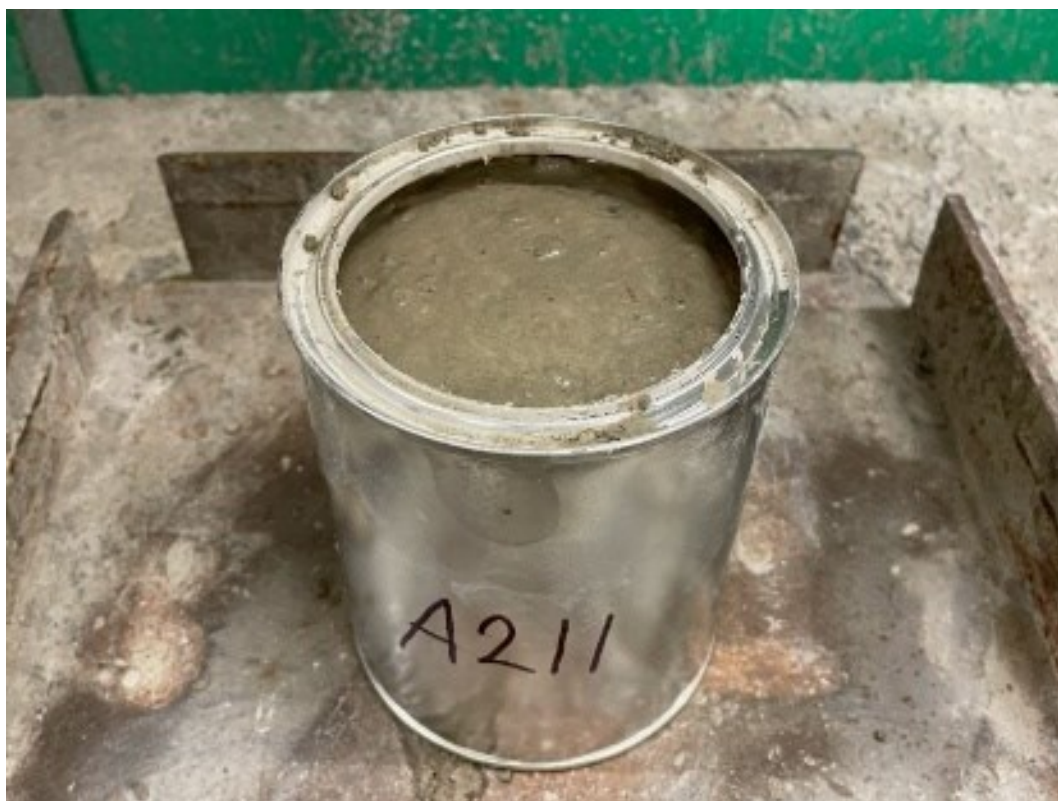
Taulukko 8. Tutkimuksessa käytettyjen betonien ominaispäästöt.

Betonilaatu	v/s 0,60			v/s 0,45		
	CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B	CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B
<b>Ominaispäästö (kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>)</b>	232	197	139	304	240	180
<b>Lujuusluokka (28d - 5 MPa)</b>	C25/30	C30/37	C20/25	C35/45	C40/50	C30/37
<b>GWP-luokka (28d)</b>	-	GWP.85	GWP.70	-	GWP.85	GWP.70
<b>Lujuusluokka (91d - 5 MPa)</b>	C30/37	C35/45	C25/30	C40/50	C45/55	C35/45
<b>GWP-luokka (91d)</b>	GWP.REF	GWP.70	GWP.70	GWP.REF	GWP.85	GWP.70

#### 4.2.2 Koekappaleiden valmistus

Koekappaleiden valumuoteille asetettiin tehtävien tutkimusten perusteella vaatimukseksi mahdollistaa sekä yhteen suuntaan kuivuvien kappaleiden, että suljetuissa astioissa säilytettävien kappaleiden valmistus. Muottien tuli olla helposti saatavilla sekä riittävän pieniä koekappaleiden suuren määrän vuoksi. Toisaalta muottien tuli mahdollistaa kosteusmittausten mahdollisimman helppo ja luotettava toteutus. Muoteiksi valikoitui kannelliset, tilavuudeltaan 1,0 litran metallipurkit. Muotin sisähalkaisija on 107 millimetriä ja tilavuudeltaan 1,0 litran kappaleen korkeus on täten noin 112 millimetriä.

Koekappaleiden valu toteutettiin 10.10.2022 Ruduksen betonitehtaan laboratoriossa Konalassa. Betonit sekoitettiin laboratorion betonimyllyssä reseptien mukaisesti, minkä jälkeen betoni siirrettiin valumuotteihin (kuva 13.). Yhteen valumuottiin betonia valettiin noin 1,0 litran verran, ja koekappaleiden koon vaihtelu pyrittiin pitämään mahdollisimman pienenä. Valun jälkeen betonikappaleet tiivistettiin tärypöydällä. Koon vaihtelun minimoiminen oli valitulla muottityypillä haastavaa, ja valmiissa kappaleissa havaittiin pientä koon vaihtelua. Punnitusten perusteella betonien tiheydet huomioiden tilavuuden vaihtelu oli korkeintaan  $\pm 4$  %. Mittausten luonne huomioiden tämän suuruusluokan vaihtelulla ei arvioitu olevan merkittävää vaikutusta kosteusmittausten luotettavuuteen. Toinen geometrinen haaste syntyi koekappaleiden haihduttavan pinnan suoruudesta. Valun jälkeen koekappaleiden suuren määrän vuoksi niitä jouduttiin asettamaan päällekkäin, minkä vuoksi osassa kappaleista tapahtui pientä kallistumista ennen betonin kovettumista. Tämän vuoksi yksittäisten koekappaleiden yläpintaan syntyi 1–4 millimetrin suuruisia pystykallistuksia halkaisijan leveydeltä. Kallistuksen arvioitiin voivan vaikuttaa tulosten luotettavuuteen, minkä vuoksi se tulisi ottaa huomioon suhteellisen kosteuden mittauksissa.



Kuva 13. Valumuottiin valettu koekappale tiivistyksen jälkeen.

Valun jälkeen koekappaleita jälkihoidettiin pitämällä valuastiat suljettuina 7 päivän ajan. Tämän jälkeen haihduttavien koekappaleiden kansi ja betonikappaleen yli menevä reuna poistettiin. Betonin pinta ”aukaistiin”



poistamalla siihen muodostunut ohut sementtiliimakerros hiomalla sitä kevyesti kulmahiomakoneella sekä teräsharjalla. Mahdollisimman tarkkojen tulosten saavuttamiseksi muiden pintojen kuin aukaistun pinnan kautta tapahtuva haihtuminen haluttiin minimoida. Reuna tiivistettiin sivelemällä betonikappaleen kylki sekä betonin ja metallipurkin välinen sauma epoksilla. Tiivistyksen viimeistelemiseksi epoksisivelyn päälle asennettiin alumiiniteippi. Kuvissa 14a-e. on esitetty koekappaleiden valmistus vaiheittain.



Kuvat 14a-e. Koekappaleiden valmistusvaiheet: a-b. metallireunan poisto, c. betonin pinnan aukaisu, d. muotin ja betonin liittymän tiivistys epoksisivelyllä ja e. alumiiniteipin asennus muotin ja betonin liittymän päälle.

Tutkimuksen yksi tavoitteista oli simuloida kastelujakson vaikutusta betonien kuivumiseen. Koska todellisen betonirakenteen kastuminen tapahtuu tyypillisesti ainoastaan haihduttavan pinnan kautta, haluttiin tähänkin tutkimukseen rakentaa vastaava koeasetelma. Tämä tehtiin asentamalla koekappaleen reunojen ympäri tiiviisti muovipussi. Tämän jälkeen muovipussilla peitetyn kappaleen yläosan päälle kaadettiin noin 10 millimetriä vettä (kuva 15a.). Osassa kasteltavista kappaleista huomattiin heikkenemistä kastelujärjestelmän tiiveydessä, minkä vuoksi lisätiivistyksiä sekä veden lisäämistä jouduttiin tekemään kastelujakson aikana. Kaikkien kappaleiden

osalta pyrittiin vesipatjan korkeus pitämään mahdollisimman lähellä 10 millimetrin alkuperäistä korkeutta. Kastelujakson päätyttyä koekappaleista purettiin kastelua varten tehdyt järjestelmät pois, ja säilytystä jatkettiin vakioolosuhteissa muiden kappaleiden tavoin (kuva 15b.).



Kuvat 15a-b. Koekappale kastelujakson aikana (a) ja koekappaleet välittömästi kastelujakson jälkeen (b).

Kappaleet, jotka tehtiin kemiallisen kuivumisen mittauksia sekä punnitusmittauksia varten säilytettiin mittaushetkeen asti tiiviisti. Valuastian kansi asennettiin heti valun jälkeen, minkä lisäksi kappale asetettiin suljettavaan muovipussiin. Kemiallisen kuivumisen kappaleita ei muokattu ennen mittauksia. Punnitusmittauksia varten tiiviisti säilytettyjen kappaleiden kansi ja betonikappaleen yläpuolinen reuna poistettiin, jonka jälkeen kappaleen pinnasta poistettiin sementtiliima hiomakiveä sekä teräsharjaa käyttäen. Lopuksi betonin ja muotin välinen sauma tiivistettiin alumiiniteipillä.

#### 4.2.3 Säilytysolosuhteet

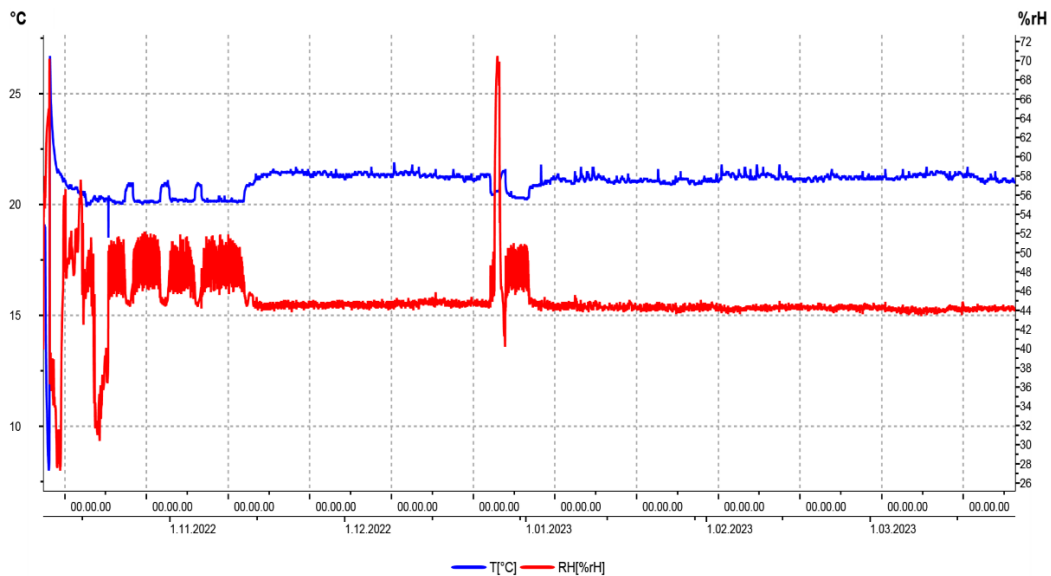
Koekappaleiden säilytykseen haluttiin saada vakioitu ja mahdollisimman todenmukainen kuivumisolosuhte. Koekappaleiden säilytyspaikaksi valittiin Aalto-yliopiston rakennustekniikan laitoksen olosuhdehuone Otaniemessä, jossa lämpötila on vakioitu 20 celsiusasteeseen ja suhteellinen kosteus 45 prosenttiin.

Koekappaleita säilytettiin valun jälkeinen vuorokausi Ruduksen betonilaboratoriossa, jotta vältettäisiin betonissa kuljettamisesta aiheutuva erottuminen. Vuorokauden jälkeen koekappaleet siirrettiin AFRY:n betonilaboratorioon Leppävaaraan, jossa niitä säilytettiin jälkihoidon sekä koekappaleiden muokkauksen ajan. Kymmenen päivää valun jälkeen koekappaleet siirrettiin niiden lopulliseen säilytyspaikkaan olosuhdehuoneeseen (kuva 16.).



Kuva 16. Koekappaleet säilytyksessä Aalto-yliopiston rakennustekniikan laitoksen olosuhdehuoneessa.

Koekappaleita ympäröiviä olosuhteita seurattiin koko tutkimuksen ajan neljällä ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaavalla Testo 174H -dataloggerilla (kuva 17.). Ensimmäisen viikon aikana olosuhteissa oli vaihtelua säilytyspaikkojen vaihdellessa. Toisaalta lämpötila pysyi melko vakaana kuljetuksista huolimatta. Viikon jälkeen kappaleet siirrettiin olosuhdehuoneeseen, jonka tavoiteolosuhde oli RH 45 % ja lämpötila 20 °C. Ensimmäiset kolme viikkoa ilman suhteellinen kosteus vaihteli välillä RH 45-50 %. Kolmen viikon jälkeen olosuhde tasaantui hyvin vakaaksi RH 45 % ja lämpötila 21 °C, joka pysyi pääsääntöisesti vakaana tutkimuksen loppuun saakka. Joulukuun lopussa tapahtunut piikki erityisesti suhteellisessa kosteudessa johtui vesivahingosta tilassa. Vesivahinko ei vaikuttanut koekappaleisiin muuten kuin hetkellisesti poikenneen ilmastokosteuksen osalta. Tilanteen korjaamisen jälkeen olosuhde tasaantui kuitenkin hyvin nopeasti ennen vahinkoa olleeseen tilaan.



Kuva 17. Betoneiden säilytystilan lämpötila (sininen) ja suhteellinen kosteus (punainen) kokeellisen jakson aikana.

### 4.3 Kosteusmittaukset

Tutkimuksessa tehdyt kosteusmittaukset perustuvat RT 103333 Betonin suhteellisen kosteuden mittaus -ohjekorttiin (Rakennustieto, 2021). Mittauksissa sovellettiin ohjekortissa kuvattua näytepalamittaus -menetelmää. Näytepalamenetelmä arvioitiin laboratorio-olosuhteissa koekappaleiden geometria huomioiden porareikämittausta ja jatkuvatoimista seuranta-mittausta luotettavammaksi mittausmenetelmäksi. Lisäksi mittaus on helposti toistettava ja toteutettava tarvittavien mittausvälineiden puolesta. Kosteusmittauksissa käytettiin Vaisala HMP44 mittapäitä, ja Vaisala HMI 41 lukijaa. Näytepalat ja mittapäät asetettiin lasisiin 150x25 mm koeputkiin, joiden avonainen pää tiivistettiin ilmatiiviiksi butyylitiivistenauhasta ja valko-tarrasta sekoitetulla massalla.

#### 4.3.1 Näytepalamittaus yleisesti

Näytepalamittaus on rakennekosteuden mittaukseen tarkoitettu menetelmä, jossa rakenteesta otetaan materiaalinäyte halutulta näytteenotto-syvyydeltä. Materiaalinäytteen suhteellinen kosteus mitataan asettamalla näytepalat tiivistettyyn koeputkeen yhdessä suhteellista kosteutta mittaavan mittapään kanssa. (Merikallio, ym. 2007.) RT 103333 ohjekortissa määritellään näytepalamittauksen prosessi yksityiskohtaisesti vaiheittain. Näytepalamittauksessa näytteenottopinta on 5 millimetriä mittaussyvyyden yläpuolella, ja mittauksessa käytettävä materiaalinäyte tulee ottaa näiden pintojen välistä. Betonista otettavien näytepalojen tavoitekoko on 5 mm x 5 mm x 5 mm.

Näytepalat tulisi irrottaa mekaanisesti esimerkiksi lyöntimeisselillä tai piikkausvasaralla. (RT 103333.) Niemi (2010) ohjeistaa, että näyteputkeen ei laiteta suuria kiviainesrakeita tai betonipölyä. Luotettavan mittaustuloksen saavuttamiseksi samasta mittaussyvyydestä tulisi ottaa vähintään kaksi koeputkea näytepaloja (Niemi, 2010).

Nilssonin (1980) mukaan näytepalamittaus perustuu betonista otettujen näytepalojen kosteuden, mittapään sekä näyteputken ilman kosteuden tasapainoon. Mittauksen tarkkuuteen vaikuttaa tällöin näytepalojen ja ilman määrien suhde sekä mittapään kosteuskapasiteetin suuruus. Modernien mittapäiden ollessa lähes kosteutta absorboimattomia, merkittävimmäksi mitaustarkkuuteen vaikuttavaksi yksityiskohdaksi jää näytepalojen ja ilman suhde näyteputkessa. (Nilsson, 1980.) RT 103333 -ohjekortissa määritellään suositelluksi näytemääräksi vähintään 1/3 näyteputken tilavuudesta. Näyteputken kosteuden tasaantumisaika vaihtelee betonin laadun ja mittapään tyyppin mukaan. Ohjekortissa määritetty tasaantumisaika on 5...12 tuntia normaalilujuuksisille betoneille. (RT 103333.) Liian pienen näytemäärän ja tasaantumisaajan lisäksi näytepalamittauksen mitaustarkkuuteen voi vaikuttaa mittalaitteen tarkkuus, epätarkka mittaussyvyys, näytteenoton aikana tapahtuva kosteuden haihtuminen sekä näyteputken tiivistyksen epäonnistuminen (Niemi, 2010).

#### **4.3.2 Näytepalamittausten toteutus**

Tutkimussuunnitelman mukaisesti näytepalamittauksia toteutettiin noin 30, 60, 90, 120 ja 180 päivää valun jälkeen. Keskenään samanlaisten kappaleiden mittaukset pyrittiin toteuttamaan samana päivänä. Tutkitut syvyudet olivat 5 mm, 20 mm ja 50 mm. Mittaussyvyudet määritettiin vastaamaan kirjallisuudessa esitettyjä vertailussyvyysiksi (Merikallio ym., 2007) yleisille rakennepaksuuksille. Vertailussyvyyden A vastineeksi valittiin 50 mm mittaussyvyys, ja vertailussyvyyden 0,4A vastineeksi 20 mm mittaussyvyys. Mittaussyvyudet vastaavat ohjeita (kuva 11.) esimerkiksi 250 mm paksulla välipohjaja kuorilaattarakenteella tai 125 mm paksulla yhteen suuntaan kuivuvalla laattarakenteella, joka on lähellä koekappaleiden simuloimaa rakennetta. Lisäksi mitattiin betonin pintaosan kuivumista kosteusjakauman määrittämiseksi. Kemiallisesti kuivuvista koekappaleista näytepalamittaukset tehtiin mahdollisimman keskeltä kappaletta.

Kappaleiden geometrian takia näytepalojen irrotus erosi ohjekortissa esitetystä tavasta. Käytävissä olevan betonimateriaalin maksimoimiseksi koko mittaussyvyyden leikkauspintaa käytettiin hyväksi. Mittaussyvyyksien määrittäminen tehtiin kappaleen reunasta ennen näytepalojen ottamista. Käytetty metodi heikensi mittaussyvyyden luotettavuutta, koska mittaussyvyys ei ollut todennettavissa enää näytepalojen irrottamisen jälkeen. Tästä syystä mitausten aikana kiinnitettiin erityistä huomiota mittaussyvyyksien huolelliseen merkintään koekappaleen kylkeen ennen mitausten aloittamista (kuva

18a.). Jokaisesta mittaussyvyydestä pyrittiin saamaan riittävästi näytepaloja kolmeen näyteputkeen. Yksittäisten mittauspisteiden osalta näytepaloja riitti vain kahteen putkeen, joka on RT 103333 ohjeiden mukainen vähimmäismäärä näytteille.

Näytepalojen irrotukseen käytettiin iskuporakoneeseen kiinnitettyä talttaa sekä vasaraa. Näytepalojen irrottaminen mittaussyvyydeltä aloitettiin aina koekappaleen reunasta, jotta mittaussyvyyden tarkkuus säilyisi mahdollisimman korkeana. Irrotettuja näytepaloja pienennettiin vasaralla, mikäli niiden halkaisija oli suurempi kuin 5 mm, tai ne sisälsivät suuria kiviainesrakeita. Irrotetut näytepalat siirrettiin välittömästi lasiseen 150 x 25 mm näyteputkeen. Mittapää asetettiin näyteputkeen, kun näytepaloja oli näyteputkessa silmämääräisesti arvioituna selvästi yli 1/3 putken tilavuudesta. Mittapään asettamisen jälkeen näyteputken suu tiivistettiin huolellisesti. Kuvissa 18a-d. on esitetty näytepalamittauksen toteutuksen vaiheita. Kun näytteenotto-isyvyydestä oli saatu riittävä määrä näytepaloja, koekappaleesta poistettiin materiaalia seuraavaan mitattavaan pintaan asti. Mitattavasta pinnasta pyrittiin tekemään mahdollisimman tasainen sekä tarkka mittaussyvyyden suhteen.



Kuvat 18a-d. Näytepalamittauksen vaiheita: a. mittaussyvyyden merkitseminen koekappaleeseen, b-c. näytepalojen irrotus ja d. näytepalat tiivistetyssä koeputkessa suhteellisen kosteuden mittapäiden kanssa.

Kemiallisesti kuivuvien kappaleiden osalta näytepalamittausten suorittaminen erosi muista koekappaleista. Koska koekappaleita oli säilytetty tiiviisti, oletuksena oli kosteuden tasainen jakautuminen kappaleen sisällä. Tämän oletuksen perusteella näytteenottokohdalla ei olisi väliä. Toisaalta kappaleiden täydellisestä tiivyydestä ei ollut varmuutta, joten näytepalat pyrittiin ottamaan mahdollisimman keskeltä koekappaleita. Tämä toteutettiin halkaisemalla koekappaleet hydraulisella prässillä leikkauspinnan suuntaisesti kahdesta tasosta. Saadun betonikappaleen keskeltä irrotettiin taltalla ja vasaralla näytepaloja. Edellä kuvatulla menetelmällä saatujen näytepalojen suhteellinen kosteus mitattiin samalla menetelmällä kuin muidenkin näytepalojen. Kemiallisesti kuivuvien kappaleiden näytteenotto on esitetty kuvissa 20a-c.



Kuvat 19a-c. Kemiallisen kuivumisen kappaleiden näytepalamittaus: a-b. koekappaleen halkaisu ja c. halkaistun koekappaleen pienentäminen näytepaloiksi.

#### 4.3.3 Virhetekijät kosteusmittauksissa

Näytepalamittausten toteutukseen liittyy useita aiemmin tässä työssä mainittuja mahdollisia virhetekijöitä. Tutkimus suoritettiin kontrolloiduissa ja vakioituissa olosuhteissa, joka edesauttaa virheiden minimoimista. Toinen virheiden mahdollisuutta pienentävä tutkimuksen alussa määritetty tekijä on mittausten määrä. Näytepalamittauksille määritetty minimi mittausten määrä yhdestä mittaussyvyydestä on kaksi kappaletta. Tähän tutkimukseen pyrittiin kuitenkin saamaan kolme mittaustulosta jokaisesta mittapistestä tulosten luotettavuuden parantamiseksi. Näytemäärän riittävyys varmistettiin soveltamalla ohjeistettua arvoa konservatiivisesti: näytettä tuli olla visuaalisesti arvioituna selvästi yli 1/3 putken tilavuudesta, jotta se hyväksyttiin. Yksittäisissä tapauksissa mittapistestä saatiin näytepaloja riittävästi vain kahteen koeputkeen. Tasaantumisaajan riittävyys varmistamiseksi koeputkien kosteuden annettiin tasaantua aina seuraavaan päivään asti. Vähimmillään tämä tarkoittaa 16 tunnin tasaantumisaikaa, joka ylittää suosituksen normaalilujuuksiselle betonille selvästi. Näyteputket tasaantuivat samassa

tilassa, jossa koekappaleita säilytettiin. Mittapäät on luettu koekappaleiden säilytyslämpötilassa.

Käytetyn Vaisala HMP44 mittapään tarkkuus on valmistajan ilmoituksen mukaan  $\pm 2$  %RH välillä 0...90 %RH ja  $\pm 3$  %RH välillä 90...100 %RH. Mittapäiden lukemiseen käytetyn Vaisala HMI41 lukijan tarkkuus  $\pm 0,1$  %RH. Mittapäiden kalibrointi on suoritettu säännöllisesti valmistajan ohjeiden mukaisesti, ja mittapäiden ryöminän tiedetään olevan vähäistä.

Kosteuden haihtumista näytepalojen irrotuksen aikana pyrittiin minimoimaan käyttämällä palojen irrotukseen teräväkärkistä talttaa, jolloin palojen irrottaminen ei siirrä merkittävästi lämpöä koekappaleeseen. Lisäksi näytepalat siirrettiin välittömästi irrotuksen jälkeen koeputkeen, ja koeputken tiivistäminen suoritettiin heti koeputken täytyttyä. Näyteputken tiivistäminen havaittiin yhdeksi mahdolliseksi virhelähteeksi ensimmäisissä mittauksissa, jolloin puutteellinen tiivistäminen saattoi aiheuttaa yksittäisten tulosten luotettavuuteen. Tiivistyksen laatuun ja tiivistysmassan määrän riittävyyteen kiinnitettiin tutkimusten aikana erityisesti huomiota. Tutkimuksen edetessä tiivistämistekniikka ja tiivistysten laatu parantuivat toistojen myötä.

Haastavimmin kontrolloitavaksi virhetekijäksi tässä tutkimuksessa arviointiin näytteenottosyvyyden luotettavuus. RT 103333 sallii  $\pm 2$  % kokonaisepävarmuusluokassa mittaustulokselle korkeintaan 1 mm ja  $\pm 4$  % kokonaisepävarmuusluokassa 2 mm epätarkkuuden näytteenottosyvyyteen. Koska mittaussyvyyttä ei voitu tarkastaa luotettavasti näytepalojen irrottamisen jälkeen keskeltä koekappaletta, mittaussyvyyden luotettavuuteen liittyy epävarmuutta. Lisähaasteen mittasyvyyden määrittämiseen tuo yksittäisten koekappaleiden kallistunut pinta. Mittauksiin pyrittiin valitsemaan koekappaleita, joissa pinnan kallistus ei olisi merkittävän suuri. Lisäksi näytteenotopinnat määritettiin useasta kohdasta kappaletta, jotta mahdollisen kallistuksen vaikutus saatiin huomioitua myös 20 mm ja 50 mm mittaussyvyksillä. Mittaussyvyyden kontrollointiin kiinnitettiin tarkasti huomiota mahdollisimman luotettavien tulosten saavuttamiseksi. Koeasetelman sisältämistä haasteista huolimatta voidaan arvioida, että suurin osa mittaustuloksista on saatu korkeintaan 1 millimetrin mittaussyvyyden epätarkkuudella.

Mittausten kokonaisepä tarkkuutta arvioidaan RT 103333 kortissa esitettyjen kriteerien perusteella. Kokonaisepä tarkkuuteen vaikuttaa mittalaitte-epävarmuus, mittaussuoritus-epävarmuus sekä mittaolosuhde-epävarmuus. Tämän tutkimuksen osalta rajoittavaksi tekijäksi kokonaisepävarmuuden osalta muodostuu mittalaitteen tarkkuus. Kokonaisepävarmuusluokka tässä mittauksessa on RT 103333 mukaisesti  $\pm 4$  %, kun huokosilman suhteellinen kosteus on  $\leq 90$  %RH ja  $\pm 6$  %, kun  $> 90$  %RH. Mittaussuoritus-epävarmuuden sekä mittaolosuhde-epävarmuuden osalta tutkimuksessa täyttyy parhaan  $\pm 2$  % kokonaisepävarmuusluokan kriteerit. Kokonaisepävarmuuden voidaan arvioida olevan todellisuudessa pienempi, koska tutkimus suoritetaan vakaisissa laboratorio-olosuhteissa, ja näytemäärä yksittäisestä syvyydestä on vaadittua suurempi.



#### 4.4 Punnitusmittaukset

Punnitusmittauksien tarkoituksena on mitata koekappaleissa tapahtuvaa massan häviötä, eli käytännössä aukaistun pinnan kautta tapahtuvaa veden haihtumista. Mittaustulosten tarkasteluun ja niiden perusteella kosteuden-siirto-ominaisuuksien määrittämiseen sovellettiin aiemmin työssä esiteltyä Nilssonin ja Bergströmin (2020) ”the tin can methodia”. Menetelmän avulla massan häviöstä johdettiin betoneille diffusiviteetti (yhtälö 9). Diffusiviteetin avulla betoneille johdettiin myös vesihöyrynläpäisevyydet vesihöyrypitoisuuseron (yhtälö 10.) (Nilsson & Bergström, 2020) ja vesihöyryn osapaineeron (yhtälö 11.) (Hedenblad, 1993) avulla laskettuna sekä vesihöyryn dif-fuusiovastuskerroin (yhtälö 12.) (Vinha ym., 2005). Mittaustapa ei ota huomioon betonin karbonatisoitumisen koekappaleiden massaa kasvattavaa vaikutusta. Tämän tutkimuksen kohdalla karbonatisoitumisen vaikutus voi vääristää tuloksia, koska suurempi masuunikuonan osuus kasvattaa karbonatisoitumisen nopeutta.

$$D = \frac{\pi k^2}{\left(2 \frac{dw}{dRH} (RH_1 - RH_2)\right)^2} \quad (9)$$

$$\delta_v = \frac{\pi k^2}{4v_s(T) \frac{dw}{dRH} (RH_1 - RH_2)^2} \quad (10)$$

$$\delta_p = \delta_v \frac{M_w}{RT} \quad (11)$$

$$\mu = \frac{\delta_{p,ilma}}{\delta_p} \quad (12)$$

jossa

$$\delta_{p,ilma} = \frac{2,0 * 10^{-7} * T^{0,81}}{p_{ilma}} \quad (13)$$

Edellä esitetyissä yhtälöissä parametrit on määritelty seuraavasti:

- Parametri  $k$  (kg/(m<sup>2</sup>√s)) on kulmakerroin kuvaajasta, jossa massahäviö per pinta-ala on esitetty ajan neliön funktiona.
- $v_s(T)$  on vesihöyryn määrä saturaatiopisteessä koekappaleiden säilytyslämpötilassa
- $RH_1$  on betonin suhteellinen kosteus haihtumisen alkaessa
- $RH_2$  on koekappaleita ympäröivän ilman suhteellinen kosteus

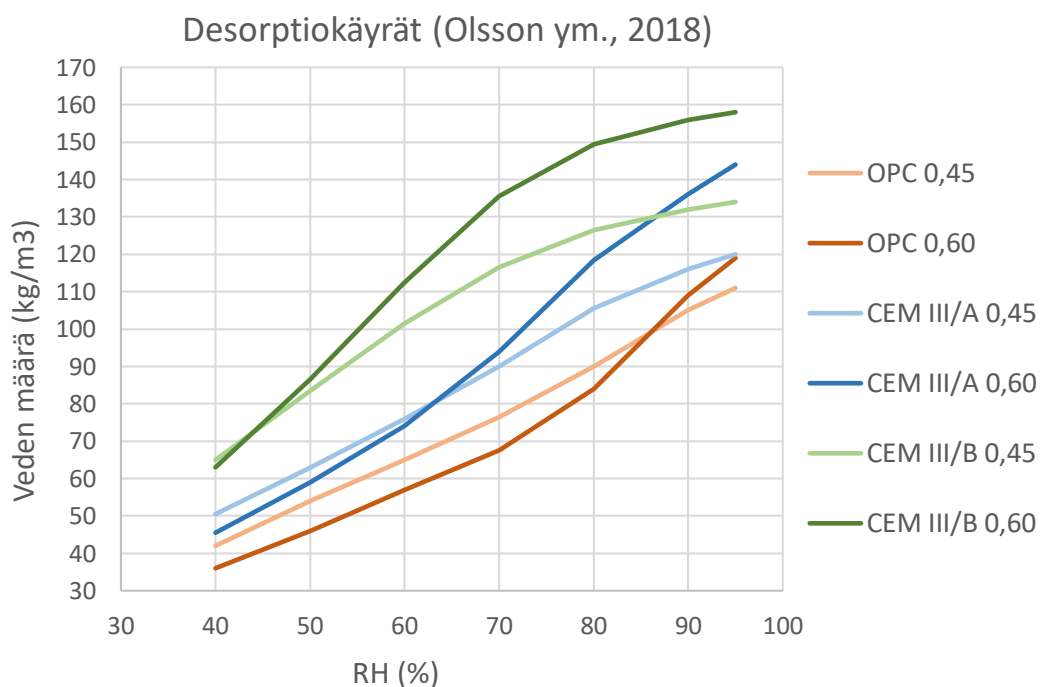
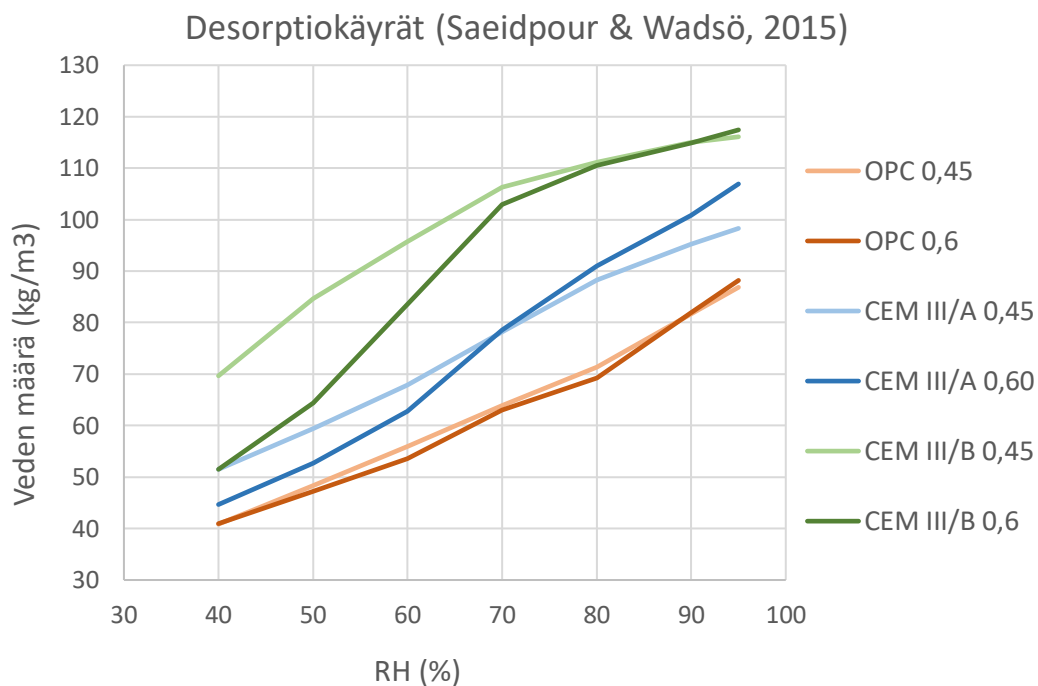
- $dw/dRH$  on betonin kosteuskapasiteetti RH-välillä ( $RH_1, RH_2$ ), joka on johdettu kirjallisuudessa esitetyistä desorptiokäyrästä erikseen jokaiselle betonille
- $M_w$  on veden moolimassa 18,02 g/mol
- $R$  on kaasuvakio 8,1343 J/K mol
- $T$  on betonin säilytyslämpötila (K)
- $p_{ilma}$  on ilmanpaine (Pa)

Mittausta varten koekappaleita säilytettiin tiiviisti noin neljä kuukautta materiaalin kosteuden tasoittumiseksi kappaleen sisällä. Tiiviisti säilytetyn jakson jälkeen koekappaleiden pinnat ”aukaistiin” aikaisemmin kuvatulla tavalla. Tämän jälkeen koekappaleiden säilyttämistä jatkettiin vakio-olosuhteissa, ja niille suoritettiin punnituksia säännöllisin väliajoin.  $RH_1$  arvon määrittämiseksi ennen punnitusten aloittamista tehtiin ylimääräinen kemiallisesti kuivuvien betonien suhteellisen kosteuden määrittäminen. Koska tiiviisti säilytetyt kappaleet eivät riittäneet tähän tarkoitukseen, tehtiin yhteen suuntaan kuivuvien kappaleiden osalta ylimääräiset näytepalamittaukset mitaussyvyyksiltä 70 mm ja 100 mm. Kaikilla mitatuilla kappaleilla suhteellinen kosteus oli sama näiden mittapisteen välillä, minkä perusteella voidaan arvioida, että tällä syvyydellä haihtumisella ei ollut vielä merkittävää vaikutusta suhteellisen kosteuden määräytymiseen, ja kuivuminen oli ollut ainoastaan veden kemiallista sitoutumista.

Parametrin  $k$  määrittämistä varten punnituksissa mitattiin massan häviö suhteessa haihduttavaan pinta-alaan. Massan häviö esitetään pinnan avaamisesta kuluneen ajan neliön funktiona. Pisteiden suhteen piirretyn suunta- viivan perusteella määritetään kulmakerroin  $k$ . Parametri  $v_s(T)$  määritetään psykometrisestä kartasta (Aukema, 2023) säilytyslämpötilan mukaan.

Betonien kosteuskapasiteetin RH-välillä määrittämiseen käytetään ensimmäiselle kuivumissyklille määritettyä desorptiokäyrää. Desorptiokäyrien määrittäminen tai löytäminen osoittautui haastavaksi. Mistään yksittäisestä lähdemateriaalista ei ole saatavissa kaikille mitattaville betoneille samoilla menetelmillä tehtyjä vertailukelpoisia desorptiokäyriä. Ratkaisuksi tutkimuksessa käytettiin kahdessa eri lähteessä esitetyjä käyriä, joita osin muokattiin tähän tutkimukseen sopiviksi. Olssonin ym. (2018) tutkimuksessa esitettyjen desorptiokäyrien pohjalta sovitettiin käyrät  $v/s$ -suhteille 0,45 ja 0,60 olettaen, että  $v/s$ -suhteen muuttaminen aiheuttaa lineaarisen muutoksen desorptiokäyrän muotoon. Oletusta tukee Saeidpourin & Wadsön (2015) tutkimus, jossa on esitetty desorptiokäyrät kolmelle  $v/s$ -suhteelle. Saeidpourin ja Wadsön esittämien desorptiokäyrien suhteen tehtiin myös sovitukset  $v/s$ -suhteelle 0,45 edellä mainitulla oletuksella. Lisäksi sovitettiin puuttuvat CEM III/A betonin desorptiokäyrät olettaen, että masuunikuonan osuuden vaikutus on yhtä suuri kuin Olssonin ym. esittämässä desorptiokäyrissä. (Saeidpour & Wadsö, 2015; Olsson ym., 2018.) Sovitukset tehtiin RH-välille 40–95 %, joka kattaa tämän tutkimuksen tarpeen. Tuloksena saadut desorptiokäyrät on esitetty kuvissa 19a-b. CEM II/B-M betonien

laskuissa päätettiin käyttää CEM I betonille mitattuja desorptiokäyriä, koska pienten masuunikuonan ja kalkkikivifillerin osuuksien vaikutusten arvioitiin olevan vähäisiä.



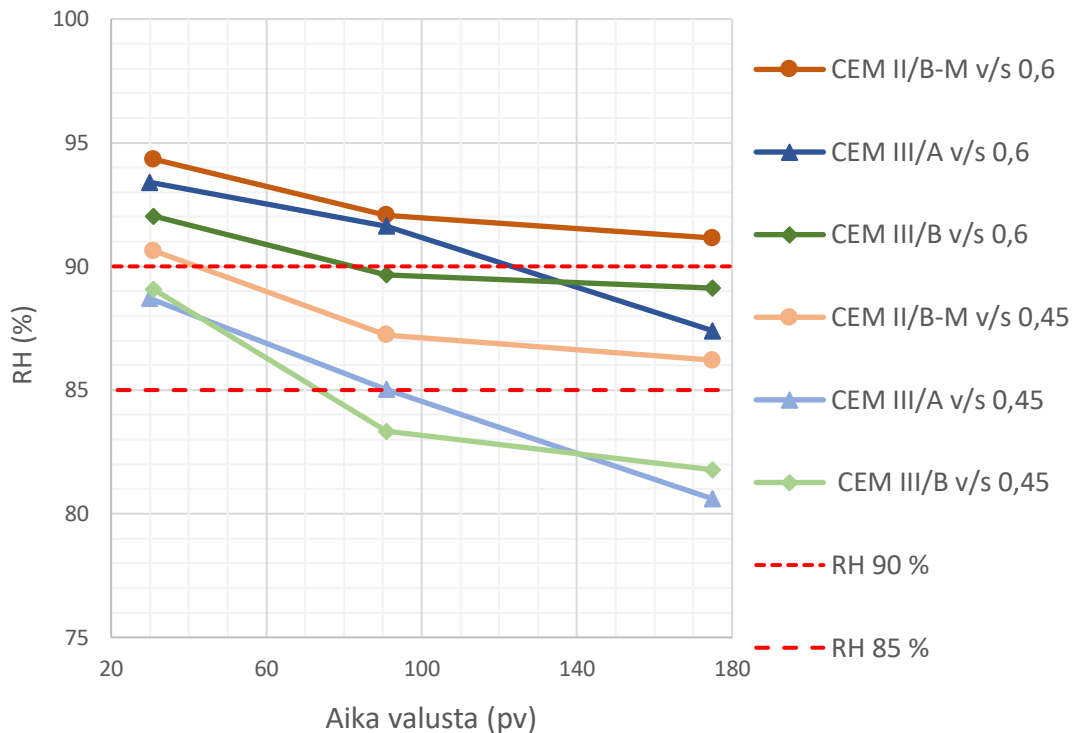
Kuvat 20a-b. Saeidpourin & Wadsön (2015) ja Olssonin ym. (2018) esittämistä desorptiokäyristä tutkituille betoneille sovitettut kuvaajat.

## 5 Tulokset

Luvussa esitellään kokeelliseen osuuden tulokset. Lisäksi mittaustuloksia verrataan kirjallisuudessa esitettyihin suhteellisen kosteuden raja-arvoihin. Ajallisia arvioita suhteellisen kosteuden tasojen saavuttamisesta tietyllä betonilaadulla ei tule käyttää yleispätevästi, vaan ne soveltuvat ainoastaan vastaavissa olosuhteissa säilytettyjen koekappaleiden keskinäiseen vertailuun. Kokeellisen osuuden mittauspöytäkirjat on esitetty liitteessä B. Selkeyden vuoksi kaikki suhteellisen kosteuden kuvaajat on esitetty ensimmäisestä mittausajankohdasta (noin 30 päivää valusta) lähtien. Valuhetkellä betonin suhteellinen kosteus on aina 100 %.

### 5.1 Kemiallinen kuivuminen

Tiiviisti säilytettyjen koekappaleiden kosteusmittauksia tehtiin muita kosteusmittauksia harvemmillä näytteenottovälillä. Tulosten perusteella RH:n kehittyminen ainoastaan kemiallisesti kuivuvilla betoneilla vaihtelee sekä käytetyn sideaineen, että v/s-suhteen myötä (kuva 21.). Mittausvälillä 30–90 päivää valusta RH:n muutos on matalan v/s-suhteen betoneilla suurempi kuin korkean v/s-suhteen betoneilla. Lisäksi matalan v/s 0,45 CEM III/B betonin RH:n muutos on tällä välillä muita saman v/s-suhteen betoneita nopeampaa. Mittausvälillä 90–180 päivää valusta voidaan havaita, että CEM III/A betoneiden suhteellisen kosteuden lasku on huomattavasti suurempi, noin 4 %-yksikköä, kuin CEM II/B-M ja CEM III/B betoneilla, joiden RH:t laskivat mittausvälillä noin 1 %-yksikön. CEM III/A betoneiden RH:n muutos jatkuu lineaarisena koko 30–180 päivän mittausaikavälin, mikä viittaa siihen, että hydrataatioreaktio kuluttaa vettä vielä 180 päivää valun jälkeen. Toisaalta CEM II/B-M ja CEM III/B betonien hydrataatioreaktion voidaan arvioida hidastuneen merkittävästi jälkimmäisellä mittausvälillä.



Kuva 21. Suhteellinen kosteus ainoastaan kemiallisesti vettä sitovissa kappaleissa.

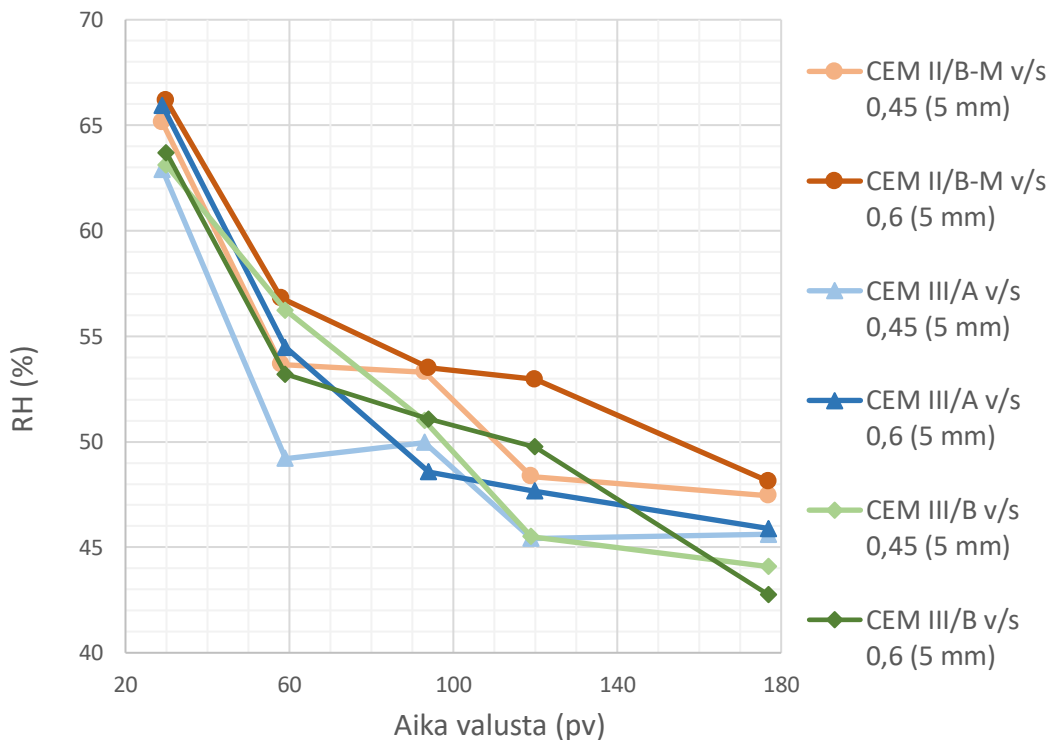
Verrattaessa kemiallisesti kuivuvien betoneiden suhteellisen kosteuden kehitystä Merikallion ym. (2007) esittämiin raja-arvoihin betonin päällystettävyydelle voidaan havaita melko suuria eroja sekä sideaineiden, että v/s-suhteiden välillä. Ainoastaan kemiallisesti kuivuvien kappaleiden osalta matala v/s-suhte on korostetun tärkeässä roolissa raja-arvojen ja erityisesti RH 85 % saavuttamisessa. Korkean v/s-suhteen betonit saavuttavat 90 % RH tason hitaammin, eikä mittausvälillä mikään sideaine ehdi kuivua tasolle 85 % RH. Masuunikuonan vaikutus kemiallisessa kuivumisessa voidaan jakaa kahteen osaan. Masuunikuonan määrän kasvattaminen vaikuttaa korreloivan nopeamman kuivumisen kanssa ensimmäiset 100 päivää, ja CEM III/B betoneilla saavutetaan nopeimmin raja-arvot 85 % RH v/s 0,45:llä ja 90 % RH v/s 0,6:lla. Toisaalta CEM III/A:sta tehdyn betonin kemiallisen kuivumisen kautta saavutettava RH-taso vaikuttaa olevan kaikista pienin. Tämän konkreettinen vaikutus näkyy esimerkiksi siinä, että v/s 0,60 CEM III/A betonilla päästään 180 päivässä lähemmäs 85 % RH tasoa kuin muilla tutkituilla sideaineilla v/s-suhteella 0,6.

## 5.2 Kuivuminen vakio-olosuhteissa

Vakio-olosuhteessa säilytettyjen betonien suhteellinen kosteus 5 mm syvyydellä haihduttavasta pinnasta on esitetty kuvassa 22. Läheltä pintaa tehtyjen mittausten aiheuttama heilunta tuloksissa vaikeuttaa tarkkojen tulkintojen tekemistä. Yleisemmän tason trendejä pystytään kuitenkin havaitsemaan. Kuvaajasta voidaan tehdä kolme selkeää havaintoa:

- Pienemmän vesi-sideaine-suhteen betoneiden suhteellinen kosteus on matalampi 5 mm syvyydessä.
- CEM III luokan betonien suhteellinen kosteus on matalampi 5 mm syvyydessä. Masuunikuonabetoneiden välillä ei ole keskenään suurta eroa.
- Mittaustulokset tasaantuvat odotetusti lähelle säilytysilmankosteutta (45 % RH)

5 mm syvyydessä kaikkien betonien suhteellinen kosteus on alittanut päällystämislle asetetun betonin pintaosien suhteellisen kosteuden raja-arvon RH 75 % jo ennen ensimmäistä mittaussijaintia.

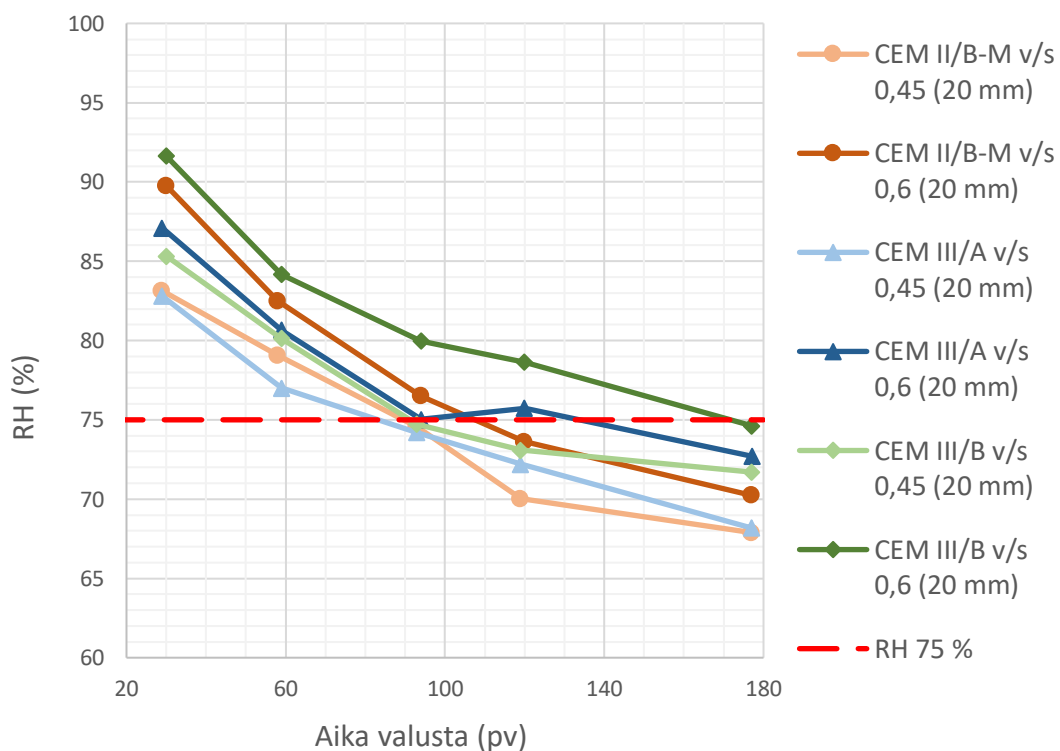


Kuva 22. Suhteellinen kosteus 5 mm syvyydellä haihduttavasta pinnasta.

20 mm syvyydellä haihduttavasta pinnasta suhteellisen kosteuden muutos on hitaampaa, kun lähellä pintaa 5 mm syvyydellä (kuva 23.) RH:n muutoksen hidastuessa pienemmistä eroista tulee kuitenkin ajallisesti merkittävämpiä. 20 mm syvyydellä haihduttavasta pinnasta suhteellisen kosteuden

kehitys voidaan jakaa ajallisesti kahteen osaan. 30–90 päivää valusta molempien vesi-sideainesuhteiden CEM III/A betoni on kuivempaa kuin CEM II/B-M. Noin 60 päivää valun jälkeen CEM III betonien RH:n lasku hidastuu suhteessa CEM II betoniin, ja 90 päivää valusta jälkeen CEM II betoni on 20 mm syvyydellä kaikista kuivinta. CEM III/B betonin kuivuminen on 20 mm syvyydellä selkeästi hitainta. Matalan v/s suhteen betoneiden RH on 20 mm syvyydellä koko mittausvälin 2–5 %-yksikköä matalampi kuin vastaavan sideaineen korkean v/s-suhteen betoneilla. Masuunikuonan osuuden kasvaessa v/s-suhteen vaikutus RH:n kehitykseen kasvaa. CEM III/B betoneilla v/s-suhteen vaikutus suhteelliseen kosteuteen on kaikista suurin.

20 mm syvyydellä suhteellisen kosteuden luontainen vertailukohta on yli 60 mm paksuista betonirakenteista mitattava vertailusyvyys 0,4A, jossa päällystettävyyden raja-arvo on RH 75 % (Merikallio ym., 2007). Mittaustuloksista nähdään, että muilla testatuilla betonilaaduilla ajallinen ero päällystettävyyden raja-arvon saavuttamiseen on pieni, mutta v/s 0,6 CEM III/B betonin kuivuminen tavoitetasoon kestää merkittävästi pidempään.

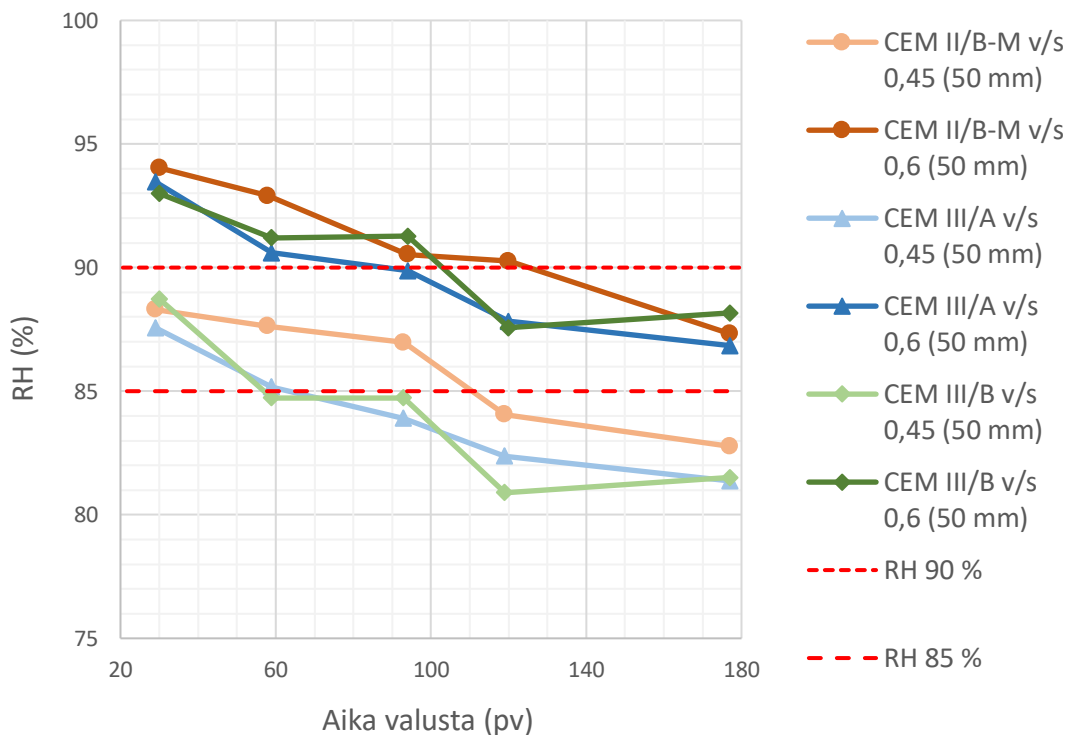


Kuva 23. Suhteellinen kosteus 20 mm syvyydellä haihduttavasta pinnasta.

Tutkituista syvyyksistä 50 mm näytteenottosyvyydessä RH:n muutos on johdonmukaisesti hitainta ja suhteellinen kosteus korkeimmalla tasolla. Kuvassa 24. esitetystä suhteellisten kosteuksien kehityksestä voidaan havaita, että 50 mm syvyydellä haihduttavasta pinnasta korkean v/s-suhteen betoneilla masuunikuonan määrän vaikutus RH:n kehitykseen on pienempi kuin matalan v/s-suhteen betoneilla. Lisäksi masuunikuonabetoneiden RH on

mittausvälillä pääsääntöisesti matalammalla kuin vastaavan v/s-suhteen CEM II betoneiden. Ero on suuruusluokaltaan v/s 0,45 betoneilla noin  $2 \pm 1$  %-yksikköä ja v/s 0,6 betoneilla  $1 \pm 1$  %-yksikköä. Vaikka ero on absoluuttisesti pieni, on sen merkitys suuri, kun huomioidaan RH:n keskimääräinen muutosnopeus, joka on 0,032–0,048 %-yksikköä päivässä. Näin ollen ajallisesti ero on mittausvälillä keskimäärin 1–2 kuukautta. CEM III/B betoneissa on havaittavissa yhdenmukaista heiluntaa RH:n kehityksessä ajan funktiona. Molempien CEM III/B betoneiden tulosten yhdenmuotoisuus antaa perusteita uskoa heilunnan johtuvan ainakin osittain betoneiden ominaisuuksista eikä esimerkiksi mittausvirheestä.

50 mm syvyydellä käytetään kirjallisuudessa vertailusyvyydellä A määritellyjä päällystettävyyden raja-arvoja eri materiaaleille 90 % RH ja 85 % RH (Merikallio ym., 2007). 50 mm syvyydellä pinnasta v/s-suhteen vaikutus raja-arvojen saavuttamiseen kuluvaan aikaan korostuu. Matalan v/s-suhteen betonit alittavat 90 % RH jo ennen ensimmäisen 30 päivän aikana ja 85 % RH viimeistään noin 100 päivän ikäisenä. Korkeamman v/s-suhteen betonit alittavat 90 % RH noin 100 päivän ikäisenä, mutta eivät alita 85 % RH mittausjakson aikana. Matalan v/s-suhteen betoneilla havaittu masuunikuonan suurempi vaikutus näkyy erityisesti 85 % RH saavuttamisessa kuluvaan ajassa. CEM III betonit alittavat raja-arvon noin 60 päivää valusta, kun CEM II/B-M betonilla tähän kuluu noin 110 päivää.



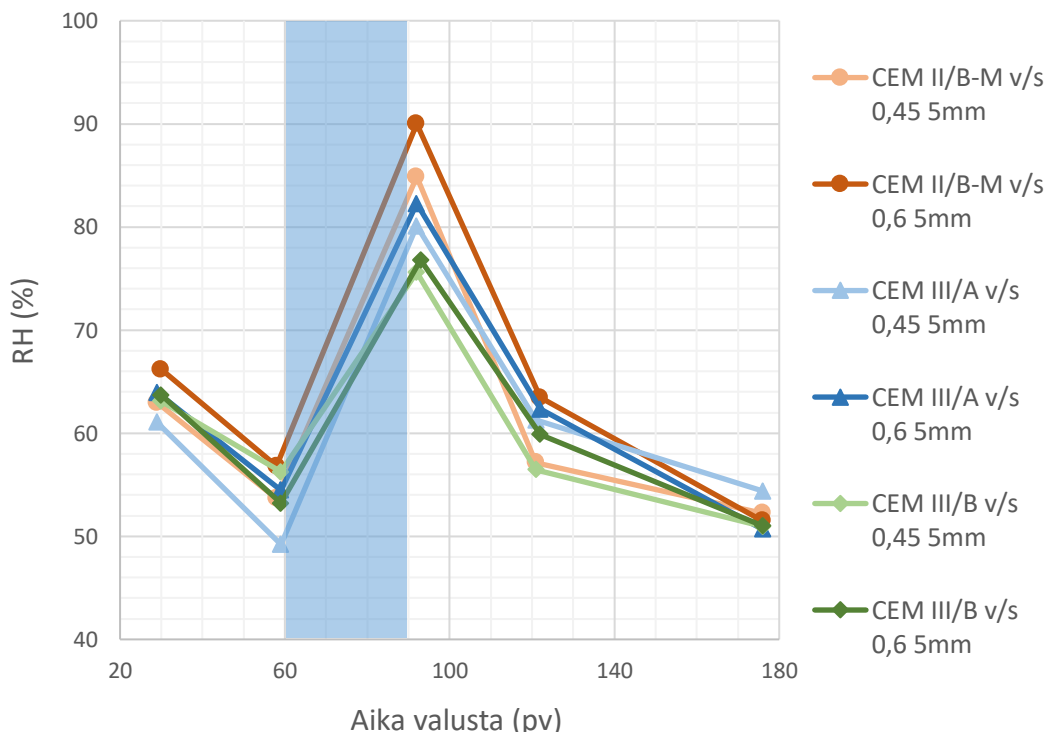
Kuva 24. Suhteellinen kosteus 50 mm syvyydellä haihduttavasta pinnasta.



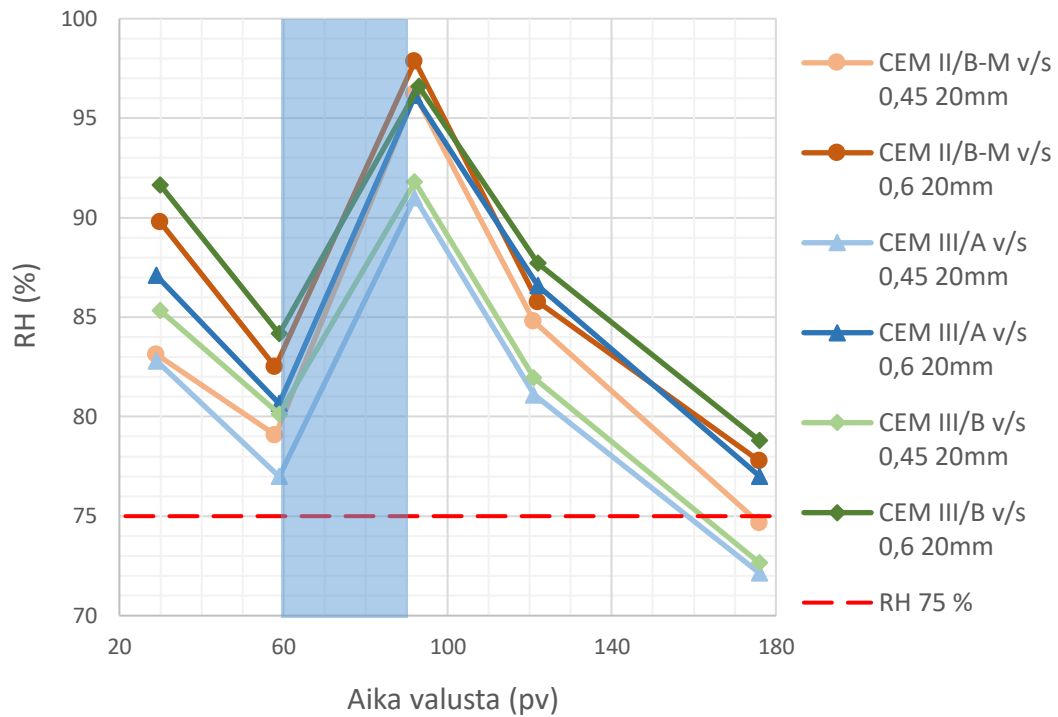
### 5.3 Kuivuminen kastumisen jälkeen

Kastelujakson vaikutus koekappaleiden RH:n kehitykseen on esitetty kuvissa 25–27. mittaussyvyyksittäin. Yksi päivä kastelujakson loppumisen jälkeen tehdyistä mittauksista havaitaan, että RH:n kasvu korreloi näytteenotto-syvyyden kanssa. Kaikilla betoneilla korkein RH oli tällöin 20 mm syvyydellä pinnasta. Syvyyksillä 5 mm ja 20 mm havaitaan, että masuunikuonan määrä korreloi kastelujakson aiheuttaman RH:n kasvun kanssa niin, että masuunikuonan osuuden kasvaessa RH:n kasvu vähentyy. Vesi-sideaine-suhteella ei vaikuta olevan suurta vaikutusta RH:n kasvuun kastelujaksolla. 50 mm syvyydellä erot betonilaatujen välillä RH:n nousussa kastelujaksolla ovat pieniä.

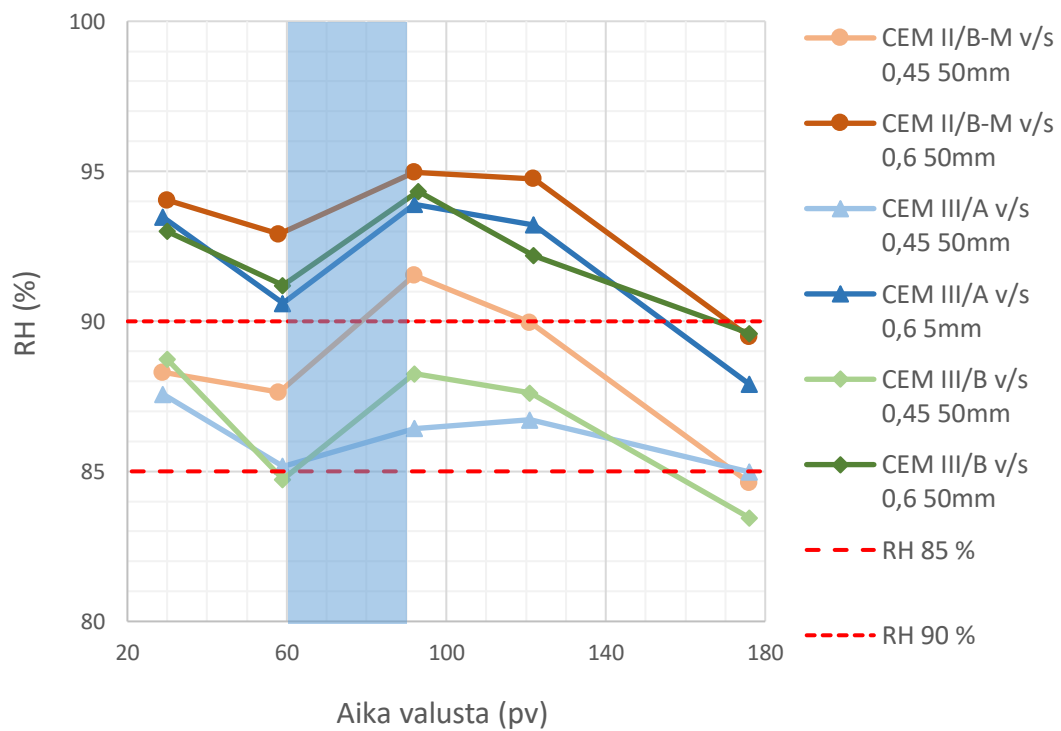
Kastelujakson päätyttyä aikavälillä 90–120 päivää valusta kuivuminen RH:n muutos mukaillee melko hyvin käänteisenä kastelujakson vaikutuksia. CEM II betoneilla kuivuminen on CEM III betoneita nopeampaa syvyyksillä 5 mm ja 20 mm. 50 mm syvyydellä suuria eroja ei ole. Vesi-sideaine-suhteen vaikutus on pieni kaikilla syvyyksillä ja sideaineilla. Aikavälillä 120–180 päivää valusta kastelukappaleiden RH:n kehitys ei poikkea merkittävästi sideaineen tai v/s-suhteen takia kuin 5 mm syvyydessä, jossa voidaan havaita, että v/s-suhteen 0,6 betonit kuivuvat nopeammin kuin v/s 0,45 betonit.



Kuva 25. Suhteellinen kosteus 5 mm syvyydellä haihduttavasta pinnasta kastelujaksolle altistetuissa kappaleissa. Kastelujakso esitetty sinisellä.



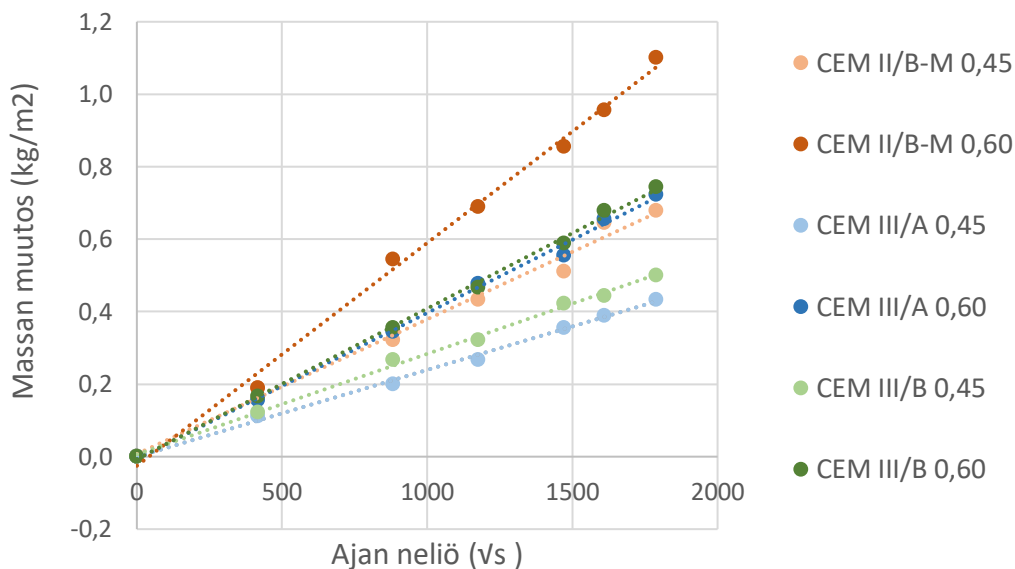
Kuva 26. Suhteellinen kosteus 20 mm syvyydellä haihduttavasta pinnasta kastelujaksolle altistetuissa kappaleissa. Kastelujakso esitetty sinisellä.



Kuva 27. Suhteellinen kosteus 50 mm syvyydellä haihduttavasta pinnasta kastelujaksolle altistetuissa kappaleissa. Kastelujakso esitetty sinisellä.

## 5.4 Veden haihtuminen ja kosteudensiirtoparametrit

Betoneiden kosteudensiirtoparametrien selvittämiseksi koekappaleiden massan muutosta seurattiin viiden viikon ajan. Massan muutos pinta-alayksikköä kohden on esitetty kuvassa 28. ajan neliön funktiona. Punnitustuloksista nähdään, että masuunikuonabetonit haihduttavat huomattavasti vähemmän vettä kuin vastaavan v/s-suhteen CEM II betonit. CEM III betoneiden keskinäiset erot ovat pieniä. Lisäksi voidaan havaita, että v/s-suhteen kasvattaminen lisää haihtuvaa massaa. Mittauksissa vesi-sideaine-suhteen kasvattaminen 0,45:stä 0,6:een kasvatti massan haihtumista 50–68 %.



Kuva 28. Koekappaleiden massan muutos pinta-alayksikköä kohden ajan neliön funktiona

Koekappaleiden säilytysolosuhteet Otaniemessä olivat mittausjakson aikana: lämpötila 21 °C ja ilman suhteellinen kosteus 45 %. Parametrin  $v_s(T)$  arvo vallitsevissa olosuhteissa on 0,0132 kg/m<sup>3</sup> (Aukema, 2023). Ilmanpaineena käytettiin normaali-ilmakehän painetta 101325 Pascalia. Kosteuskapasiteetit halutuille RH-väleille ( $dw/dRH$ ) määritettiin kuvissa 19a. ja 19b. esitetystä desorptiokäyristä. Kirjallisuudesta sekä empiirisesti saatujen parametriarvojen avulla tutkittaville betoneille laskettiin diffusiviteetti ( $D$ ), vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden ( $\delta_v$ ) ja osapaine-eron ( $\delta_p$ ) avulla laskettuna sekä vesihöyryn diffuusiovastuskerroin ( $\mu$ ) yhtälöiden 9–13 avulla (taulukot 9. ja 10.).

Olssonin ym. mukaan tehtyjen laskelmien perusteella tutkittujen saman v/s-suhteen betoneiden järjestys läpäisevimmästä huonoiten läpäisevään sideaineeseen on CEM II/B-M - CEM III/B - CEM III/A. Saeidpourin ja Wadsön mukaan tehtyjen laskelmien mukaan CEM II/B-M on parhaiten

läpäisevää, mutta CEM III betoneiden väliset erot ovat pieniä. Molempien tulosten perusteella v/s-suhteen nostamisella on suurempi vaikutus CEM II/B-M sideaineella, kuin CEM III sideaineilla. Samoin molempien tulosten perusteella tutkitun v/s- suhteen eron (0,45–0,60) vaikutus on huomattavasti pienempi kuin masuunikuonan sideaineosuuden kasvattamisen CEM II/B-M mukaisesta CEM III/A mukaiseen. Saeidpourin ja Wadsön mukaan tehdyissä laskelmissa masuunikuonabetoneiden diffusiviteetti ( $D$ ) on suurempi v/s 0,45 betoneilla kuin v/s 0,60 betoneilla, mikä on tuloksena epäjohdonmukainen. Tulosta voi selittää laskentakaava, jossa epävarma muuttuja  $dw/dRH$  on toisessa potenssissa ja saa näin ollen korkean merkityksen.

Taulukko 9. Kosteudensiirtoparametrit käyttäen Olssonian ym. (2018) mukaisia desorptiokäyriä

Sideaine	v/s	RH1	$dw/dRH$	$k$ (kg/m <sup>2</sup> v/s)	$D$ (m <sup>2</sup> /s)	$\delta_v$ (m <sup>2</sup> /s)	$\delta_p$ (kg/msPa)	$\mu$ (-)
CEM II/B-M	0,45	0,87	129	3,72E-04	3,72E-11	3,64E-07	2,68E-12	74
CEM II/B-M	0,60	0,93	155	6,15E-04	5,42E-11	6,38E-07	4,70E-12	42
CEM III/A	0,45	0,82	134	2,40E-04	1,80E-11	1,83E-07	1,35E-12	146
CEM III/A	0,60	0,91	184	4,03E-04	1,81E-11	2,52E-07	1,86E-12	106
CEM III/B	0,45	0,82	144	2,77E-04	2,07E-11	2,27E-07	1,67E-12	118
CEM III/B	0,60	0,90	180	4,16E-04	2,07E-11	2,83E-07	2,08E-12	95

Taulukko 10. Kosteudensiirtoparametrit käyttäen Saeidpouria & Wadsöta (2015) mukailevia desorptiokäyriä

Sideaine	v/s	RH1	$dw/dRH$	$k$ (kg/m <sup>2</sup> v/s)	$D$ (m <sup>2</sup> /s)	$\delta_v$ (m <sup>2</sup> /s)	$\delta_p$ (kg/msPa)	$\mu$ (-)
CEM II/B-M	0,45	0,87	81	3,72E-04	9,39E-11	5,78E-07	4,26E-12	46
CEM II/B-M	0,60	0,93	84	6,15E-04	1,86E-10	1,18E-06	8,70E-12	23
CEM III/A	0,45	0,82	64	2,40E-04	7,83E-11	3,81E-07	2,81E-12	70
CEM III/A	0,60	0,91	118	4,03E-04	4,38E-11	3,92E-07	2,89E-12	68
CEM III/B	0,45	0,82	94	2,77E-04	4,93E-11	3,50E-07	2,58E-12	77
CEM III/B	0,60	0,90	120	4,16E-04	4,66E-11	4,24E-07	3,13E-12	63

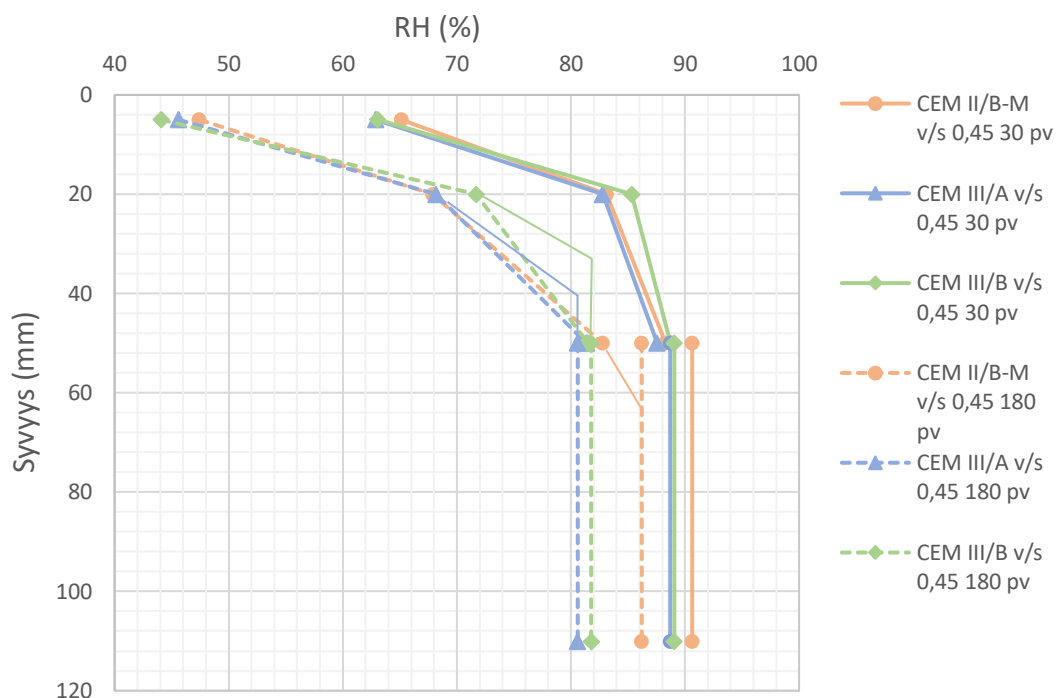
Tulosten luotettavuuden arvioimiseksi massan muutosta vertailtiin massan muutokseen kosteusmittauskappaleilla 30, 60, 90, 120 ja 180 päivää valusta. Kosteusmittausten yhteydessä tehtyjen punnitusten perusteella määritetyt parametrin  $k$  arvot olivat 4–26 % korkeampia kuin varsinaisten punnitusten perusteella määritetyt  $k:n$  arvot. Korkean  $v/s$ -suhteen betoneilla suhteellinen kasvu oli huomattavasti pienempää kuin matalan  $v/s$ -suhteen betoneilla. Sideaineella ei havaittu selkeää vaikutusta suhteelliseen kasvuun. Kasvun syynä voi olla esimerkiksi merkittävästi lyhyempi jälkihoitoaika, karbonatisoitumisen vaikutus ja pienempi kemiallisen kuivumisen vaikutus. Betoneiden  $k$ -arvojen keskinäinen järjestys pysyi vertailumittauksissa lähes samana, mutta  $v/s$  0,45 CEM II/B-M sai korkeamman arvon kuin  $v/s$  0,60 CEM III/A. Vertailupunnitusten tulokset tukevat eroista huolimatta punnitusmittausten tulosten luotettavuutta.

## 6 Tulosten tarkastelu

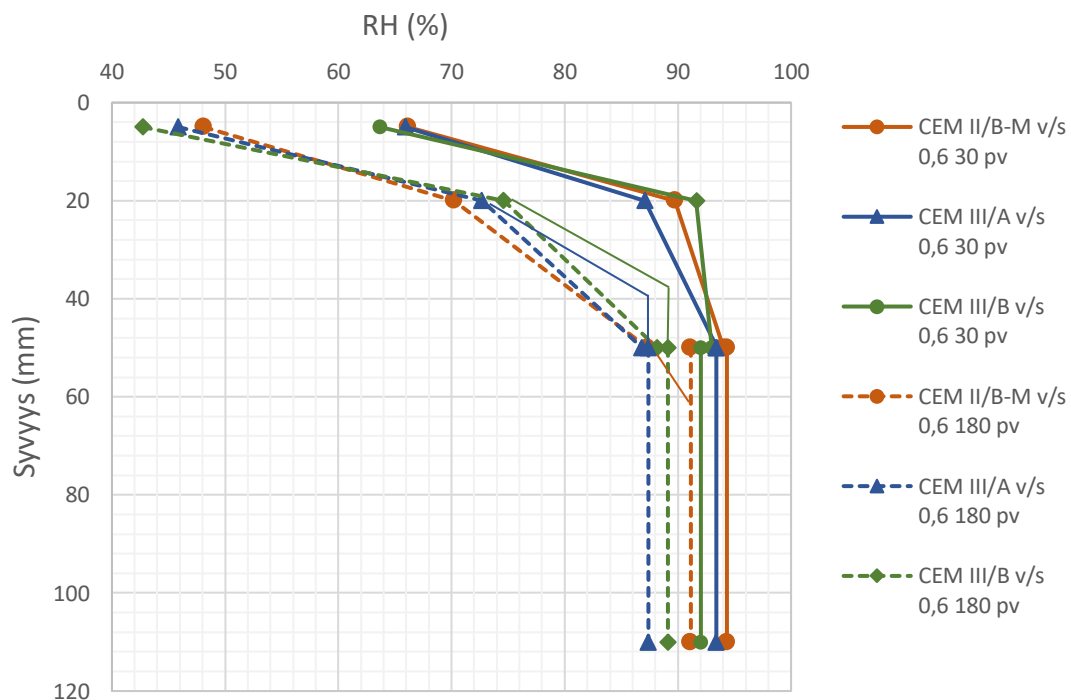
Mittaustulosten perusteella voidaan sanoa, että masuunikuonan käytöllä betonin sideaineena on vaikutus sen kuivumiseen. Edellisessä luvussa esitetyt mittauksia vertailemalla havaitaan, että masuunikuonabetonit kuivuivat kemiallisen sitoutumisen kautta nopeammin kuin portland-seossementistä valmistetut betonit. Ilmiö vaikuttaa myös yhteen suuntaan kuivuvien kappaleiden osalta erityisesti 50 mm syvyydessä. Toisaalta haihduttavien kappaleiden osalta CEM II/B-M betonit kuivuivat 20 mm syvyydessä nopeammin kuin CEM III betonit. Ilmiön kokonaiskuvaa voidaan peilata tutkimuksessa mitattujen kosteusjakaumien ja kosteudensiirtoparametrien sekä kirjallisuustutkimuksen kautta.

Eri syvyyksien mittauksia vertailtaessa voidaan havaita, että betoni-laadut kuivuvat suhteessa toisiinsa eri tavoin. Masuunikuonan ja v/s-suhteen vaikutukset RH:n kehitykseen eroavat keskenään eri syvyyksillä. Mittausryvyyden vaikutus suhteelliseen kosteuteen on esitetty kuvissa 29. ja 30. Kuvaajat esittävät kosteustason kehittymistä syvyyksittäin koekappaleen sisällä 30 ja 180 päivää valusta tehtyjen mittausten aikana v/s-suhteittain eriteltynä. Yli 50 mm syvyydessä esitetty suhteellisen kosteuden taso vastaa kemiallisen kuivumisen tasoa samalla hetkellä. Molemmissa kuvaajissa havaitaan yhteneväisiä eroja kosteusjakauman kehityksessä sideaineiden välillä. Pienempi masuunikuonan määrä vaikuttaa aiheuttavan mittausvälillä lineaarisemman kosteusjakauman koekappaleen sisällä. Erityisesti 180 päivän mittauksissa CEM II betoneiden kosteusjakauma on CEM III betoneita selkeästi loivempi välillä 5–20 mm ja jyrkempi välillä 20–50 mm. CEM III/B betoneilla ilmiö näkyy selkeimmin. Kuvaajia vertailtaessa voidaan kuitenkin havaita, että vesi-sementti-suhteen vaikutus kosteusjakauman jyrkkyyteen on suurempi kuin masuunikuonan osuuden vaikutus.

Pinnasta 50 mm syvyydelle ulottuvan kosteusjakauman sekä mitatun kemiallisen kuivumisen avulla voidaan arvioida karkeasti myös kemiallisesta kuivumisesta eroavan suhteellisen kosteuden jakauman syvyyttä koekappaleiden sisällä. Graafisesti arvioiden 180 päivän kohdalla jakauma alkaa CEM II/B-M betoneilla noin 55–65 mm syvyydessä, CEM III/A betoneilla 35–45 mm syvyydessä ja CEM III/B betoneilla 30–40 mm syvyydessä betonin pinnasta. Kosteusjakauman graafinen arviointi 180 päivän iässä on esitetty kuvissa 26. ja 27. ohuella yhtenäisellä viivalla.



Kuva 29. v/s 0,45 betoneiden kosteusjakaumat 30 ja 180 päivää valusta. Todellista kosteusjakaumaa 180 päivän iässä on arvioitu graafisesti yhtenäisillä viivoilla.



Kuva 30. v/s 0,60 betoneiden kosteusjakaumat 30 ja 180 päivää valusta. Todellista kosteusjakaumaa 180 päivän iässä on arvioitu graafisesti yhtenäisillä viivoilla.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella masuunikuonabetonit ovat huokosrakteeltaan tiiviimpiä kuin portlandsementistä valmistetut betonit. Tämän vuoksi niiden kosteudenläpäisy- ja kosteudensiirto-ominaisuudet ovat heikommat kuin portlandsementistä valmistetuilla betoneilla. Tässä tutkimuksessa tehdyt punnitusmittaukset sekä kosteudensiirtoparametrien määrittäykset tukevat aikaisempia havaintoja.

Olssonin ym. mukailevien laskelmien perusteella tehdyn betoneiden keskinäisen vertailun perusteella  $v/s$  0,45 CEM II/B-M betonin diffusiviteetti on noin kaksinkertainen verrattuna CEM III betoneihin. Vastaavasti  $v/s$  0,60 CEM II/B-M betonin diffusiviteetti on suuruusluokaltaan noin kolminkertainen verrattuna CEM III betoneihin. Diffuusiovastuskertoimia ( $\mu$ ) vertailtaessa  $v/s$  0,45 CEM III/A:lla on noin kaksinkertainen ja CEM III/B:llä noin 1,5-kertainen verrattuna CEM II/B-M betoniin. Vastaavasti  $v/s$  0,60 CEM III/A:lla  $\mu$  on noin 2,5-kertainen ja CEM III/B:llä kaksinkertainen CEM II/B-M betoniin verrattuna. CEM II ja CEM III betoneiden väliset erot ovat suuruusluokaltaan yhdenmukaisia kirjallisuustutkimuksen kanssa, jossa esitettiin masuunikuonabetoneiden vesihöyrynläpäisevyyden olevan noin 50 % pienempi kuin tavallisilla betoneilla. Masuunikuonabetoneiden  $v/s$ -suhteen aiheuttamat erot kosteudensiirto-ominaisuuksiin ovat tulosten mukaan pieniä, mikä viittaa siihen, että korkean vesi-sideaine-suhteen masuunikuonabetoneiden kosteudensiirto-ominaisuudet ovat lineaarisemmat RH:n suhteen kuin tavallisilla betoneilla (vrt. kuva 7.) Tämä on yhdenmukaista masuunikuonabetonin pienemmän kapillaarihuokoisuuden kanssa. Kokonaisuudessaan voidaan arvioida masuunikuonabetoneiden olevan vesihöyrytiiviimpiä kuin tavallisten betoneiden. Toisaalta kosteudensiirto-ominaisuuksien pienentyminen ei vaikuta seuraavan masuunikuonan sideaineosuutta, vaan pienimmät arvot olivat tämän tutkimuksen perusteella CEM III/A betoneilla.

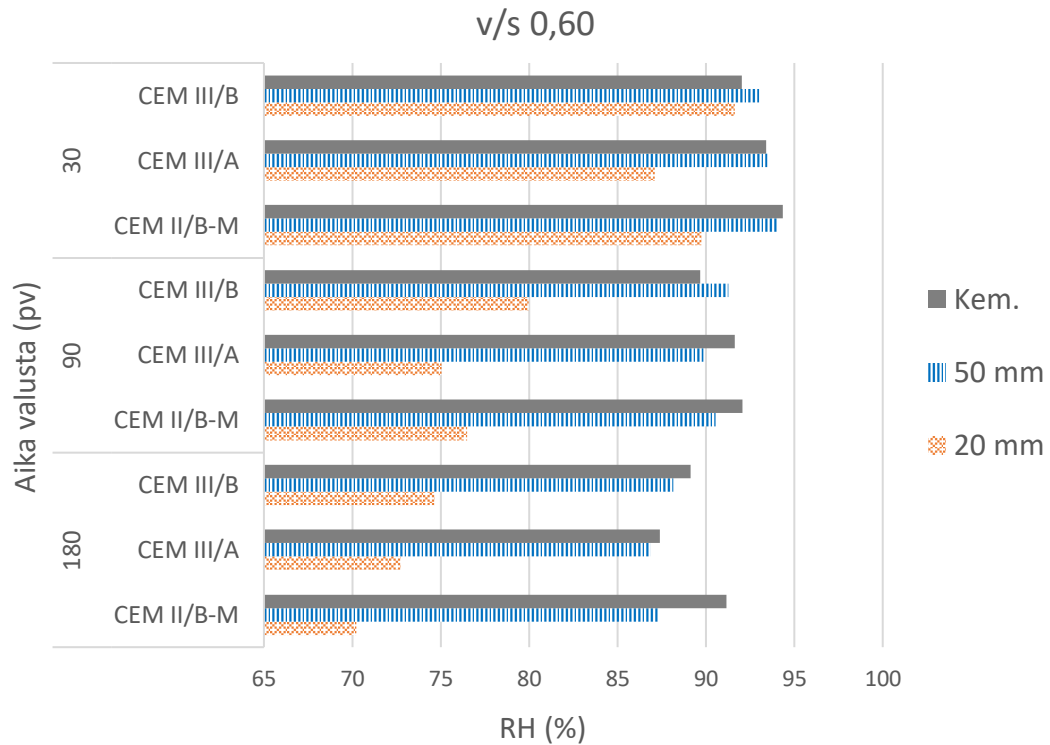
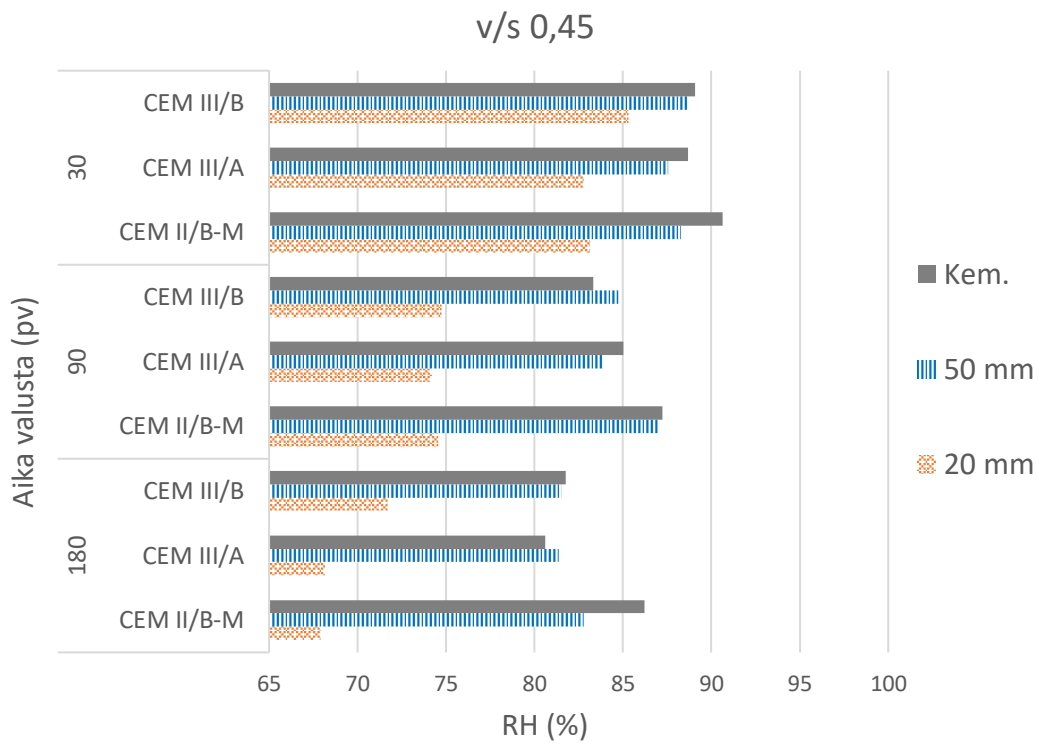
Kosteudensiirtoparametrien tulosten arvioimiseksi niitä verrattiin kirjallisuudesta löytyviin vastaaviin tuloksiin. Luontaisimmat vertailutulokset ovat käytetyn menetelmän kehittäneiden Nilssonin & Bergströmin (2020) tulokset. Tutkimuksessa esitettyjen vesihöyrynläpäisevyydet ( $\delta_v$ )  $5,8 \text{ E-}8$ – $3,5 \text{ E-}7 \text{ m}^2/\text{s}$  ovat suuruusluokaltaan lähempänä Olssonin ym. perusteella laskettuja arvoja. Nilssonin & Bergströmin tutkimuksessa koekappaleiden säilytysolosuhde oli eri (60 % RH), mikä voi pienentää epävarman  $dw/dRH$  parametrin merkitystä suhteessa tähän tutkimukseen. Tässä tutkimuksessa käytetty laaja RH-väli voi kasvattaa RH-riippuvaisten parametrien aiheuttamaa tulosten epävarmuutta. Myös Sekki ym. (2020) ovat tutkimuksessaan mitanneet betoneiden kosteudensiirto-ominaisuuksia. Esitetyt diffuusiovastuskertoimet ( $\mu$ ) (112–321) ovat myös suuruusluokaltaan lähempänä Olssonin ym. perusteella laskettuja parametriarvoja. Suuruusluokkavertailun perusteella Olssonin ym. perusteella laskettuja kosteudensiirtoparametrien arvoja voidaan pitää suuruusluokaltaan luotettavampina kuin Saeidpourin ja



Wadsön perusteella laskettuja. Molemmissa verratuissa tutkimuksissa käytetyt betonit eroavat tässä työssä käytetyistä, minkä vuoksi suuruusluokkaa tarkempaa tarkastelua ei ole perusteltua tehdä. Lisäksi tässä tutkimuksessa tutkitut betonit olivat iältään varsin ”nuoria”, minkä vuoksi niiden kosteudensiirto-ominaisuudet eivät vastaa täysin vanhempia betoneita ja määriteltujen arvojen luonne pääosin suuntaa antava.

Kirjallisuustutkimuksessa löydettiin näyttöä kemiallisesti sitoutuneen veden määrän pientymisestä masuunikuonabetoneilla. Tämä on ristiriidassa tässä tutkimuksessa havaitun kemiallisesti kuivuvien kappaleiden RH:n kehityksen kanssa. Ilmiötä voi selittää esimerkiksi kirjallisuustutkimuksessa havaittu masuunikuonabetoneiden eroava kosteuskapasiteetti RH välillä. Masuunikuonabetonin tarvitsee poistaa vähemmän fysikaalisesti sitoutunutta vettä kuivuakseen, kun sen suhteellinen kosteus on yli 70 % RH. Tämä voisi selittää myös miksi masuunikuonabetoneiden suhteellinen kosteus laskee kemiallisen kuivumisen seurauksena enemmän kuin CEM II/B-M betoneiden, vaikka sen potentiaali poistaa vettä haihtumisen ja kemiallisen sitoutumisen kautta ovat pienemmät. Myös desorptiokäyrien avulla voidaan pohdita syitä masuunikuonan lisäämään kosteusjakauman jyrkkyyteen. Kuten kirjallisuustutkimuksessa havaittiin, masuunikuonabetoneiden tulee poistaa enemmän vettä kuin portlandsementistä valmistetun betonin kuivuakseen 70 % RH alapuolella. Betoneiden  $dw/dRH$  arvoa kasvattaa tällöin sekä masuunikuonan osuuden, että  $v/s$ -suhteen kasvattaminen. Tämä on johdonmukaista verrattuna 20 mm mittaussyvyyden tuloksiin, joissa havaittiin sekä masuunikuonan määrän kasvun, että masuunikuonabetonien  $v/s$ -suhteen kasvun hidastavan kuivumista.

Kemiallisen kuivumisen tuloksia verrataan yhteen suuntaan kuivuvien kappaleiden kosteusjakaumiin kuvissa 31a-b. Kuvaajista voidaan arvioida kemiallisen kuivumisen osuutta kuivumisesta mittaussyvyyksillä sekä haihtumiskuivumisen vaikutussyvyyttä mittaushetkillä. Kuvaajista voidaan tulkita sekä masuunikuonan määrän lisäämisen, että  $v/s$ -suhteen pienentämisen lisäävän kemiallisen kuivumisen osuutta kaikilla mittaussyvyyksillä. Haihtumissyvyyden vaikutussyvyyden arviointi on haastavaa, sillä melkein kaikissa tapauksissa se on jossain 20 mm ja 50 mm välissä. Ainoastaan CEM II/B-M betoneilla voidaan havaita 50 mm mittaussyvyydellä selkeä haihtumiskuivumisen vaikutus. Vesi-sideaine-suhteen 0,60 betonilla vaikutus alkaa 30–90 päivää valun jälkeen ja  $v/s$  0,45 betonilla 90–180 päivää valun jälkeen. CEM III betoneilla vaikutusta ei havaita, tai se on niin pieni, että sitä ei voida erottaa mittausepäätarkkuudesta. Havainnot ovat yhteneväisiä kosteusjakauman graafisesta tarkasteluista tehtyihin päätelmiin.



Kuvat 31a-b. Mittaussyvyyksien 20 ja 50 mm sekä kemiallisesti kuivuvien kappaleiden suhteellinen kosteus 30, 90 ja 180 päivää valusta.

Pohdittaessa masuunikuonan vaikutusta rakenteen kuivumiseen käytännöllisestä näkökulmasta korostuu kuivumiseen kuluneen ajan merkitys. Taulukossa 11. on esitetty kosteusmittausten perusteella arvioituja kuivumisaikoja päällystettävyyden suhteellisen kosteuden raja-arvoihin. Kuivumisajat eivät ole yleisesti päteviä aika-arvioita tutkituille betonilaaduille, vaan ainoastaan tämän tutkimuksen koekappaleiden kuivumisen vertailuun soveltuvia arvoja. Tuloksien luotettavuutta heikentää pitkät välit mittaussajankohtien välillä. Toisaalta voidaan arvioida, että mittaussajankohtien välille piirretyt lineaariset kuvaajat tarjoavat melko hyvän arvion RH tasosta myös mittausten välillä.

Sekä sideaineella, että v/s-suhteella oli vaikutus raja-arvojen saavuttamiseen kuluvaan aikaan. 20 mm syvyydessä kuivumisaika tavoitetasoon oli saman v/s-suhteen betoneilla suuruusluokaltaan yhtä pitkä. V/s 0,60 CEM III/B betoni teki poikkeuksen, ja sillä kului raja-arvon saavuttamiseen yli kaksi kuukautta pidempään kuin muilla betoneilla. Matalan v/s-suhteen betonit saavuttivat 90 % RH raja-arvon 50 mm syvyydessä ennen ensimmäistä mittausta, mutta 85 % RH saavuttamiseen CEM II betonilla kului lähes kaksi kertaa pidempi aika kuin CEM III betoneilla. Saman kaltainen kehityssuunta havaitaan v/s 0,60 betoneilla 90 % RH raja-arvon saavuttamisen suhteen. CEM II betonilla kului 20–35 päivää enemmän tavoitetasoon saavuttamiseen, kuin vastaavilla CEM III betoneilla. Kemiallisen kuivumisen osalta havaitaan, että masuunikuonan määrän lisääminen nopeuttaa molempien raja-arvojen saavuttamista v/s-suhteesta huolimatta.

Taulukko 11. Päällystettävyyden raja-arvojen saavuttamiseen kulunut aika päivinä valusta betonilaaduittain.

Syvyys (mm) / RH (%)	v/s 0,60			v/s 0,45		
	CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B	CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B
20 mm / 75 %	105	100	170	90	85	90
50 mm / 90 %	125	90	105	<30	<30	<30
50 mm / 85 %	>180	>180	>180	110	60	60
Kem. / 90 %	>180	125	90	40	<30	<30
Kem. / 85 %	>180	>180	>180	>180	90	75

Esitettyjen kuivumisaikojen perusteella havaitaan, että masuunikuonan käyttäminen muuttaa kuivumiseen kuluvan ajan rajoittavia tekijöitä. Toisin kuin tavallisilla betoneilla, masuunikuonabetoneilla vertailusyvyyden A molemmat raja-arvot saavutettiin matalan v/s-suhteen betoneilla ennen vertailusyvyyden 0,4A raja-arvoa. Korkean v/s-suhteen betoneilla 90 % RH saavutettiin syvyydellä A ennen 0,4A syvyyden raja-arvon saavuttamista. Masuunikuonabetoneilla rajoittavana tekijänä voi siis olla tavallisista betoneista poikkeavasti lähempänä pintaa olevan betonin kuivuminen. Tästä

huolimatta masuunikuonabetonit saavuttavat raja-arvot aikaisemmin kuin vastaavan v/s-suhteen CEM II/B-M betonit. Poikkeuksen tekee v/s 0,60 CEM III/B betoni, joka kuivuu muita betoneita selvästi hitaammin.

Tulosten perusteella voidaan arvioida, että erityisesti matalan v/s-suhteen masuunikuonabetonit soveltuvat betonirakenteisiin, joilta vaaditaan nopeaa kuivumista. Masuunikuonasementteillä pelkästään kemiallisen sitoutumisen kautta saavutettava kuivumisen nopeutuminen, ja potentiaali saavuttaa matalia suhteellisen kosteuden tasoja ilman haihtumiskuivumista on suurempi kuin tavallisilla portlandsementeillä. Tämä tekee masuunikuonasementteistä potentiaalisen sideaineen rakenteisiin, joissa haihtumisen kautta tapahtuva kuivuminen on geometrian takia rajoitettua, kuten täyteen valettaviin teräsluottopalkkiin. CEM III/B sementti ei tutkimustulosten valossa sovellu korkean v/s-suhteen ( $\geq 0,60$ ) betoneihin mikäli niiltä vaaditaan nopeaa kuivumista. CEM III/A betoni kuivuu tutkimuksen perusteella molemmilla v/s-suhteilla, ja kaikilla tarkastelusyvyyksillä yhtä hyvin tai paremmin kuin vastaavan v/s-suhteen CEM II/B-M betoni. Näin ollen CEM III/A sementtiä voi kuivumisen näkökulmasta suositella käytettäväksi kaikissa rakenteissa.

Tutkimuksessa havaitut erot kosteudensiirto-ominaisuuksissa sekä kosteusjakauksissa ovat keskenään ainakin osittain johdonmukaisia. Päälystämisen näkökulmasta masuunikuonabetonit vaikuttavat tämän tutkimuksen perusteella eroavan tavallisista betoneista. Masuunikuonabetoneiden heikkommat kosteudensiirto-ominaisuudet yhdistettynä nopeampaan kemialliseen kuivumiseen voivat vaikuttaa parantavasti sen päälystettävyyteen. Yhdessä ominaisuudet voivat hidastaa merkittävästi kosteuden tasautumista päälysteen alapuolelle. Toisaalta masuunikuonabetoneiden saavuttaessa päälystettävyyden raja-arvon poikkeuksellisesti syvyydellä A ennen syvyyttä 0,4A, tulisi pohtia onko masuunikuonabetoneiden kohdalla järkevää soveltaa tavallisille betonilaaduille tehtyä ohjeistusta. Masuunikuonabetoneiden päälystettävyyden sekä kosteuden tasaantumisen päälysteen alle tutkiminen olisivat luontaisia jatkumia tässä työssä tehdyille havainnoille.

Tässä tutkimuksessa ei tarkasteltu kuivumisolosuhteiden vaikutusta betoneiden kuivumiseen. Masuunikuonabetoneiden kuivumismekanismit ja kosteusominaisuudet vaikuttavat tämän tutkimuksen perusteella eroavan merkittävästi tavanomaisesti käytetystä portlandseossementtibetonista. Tämän johdosta voidaan pitää mahdollisena, että olosuhteiden muutoksella on tavallisista betoneista eroava vaikutus suhteellisen kosteuden kehitykseen masuunikuonabetoneilla. Kirjallisuustutkimuksen mukaan lämpötilan nostamisen positiivinen vaikutus sekä hydrataatioreaktion nopeuteen, että betonin vesihöyryn läpäisevyyteen on kasvattava, ja laskemisen päinvastoin pienentävä. Masuunikuonabetonin päälystettävyyttä rajoittava suhteellinen kosteus sijaitsee syvyydellä, jossa veden haihtuminen vaikuttaa nopeasti valun jälkeen. Tämä voisi mahdollistaa masuunikuonabetonin hyötyvän lämpötilan nostamisesta jopa tavallisia betoneita enemmän erityisesti päälystettävyyden raja-arvojen saavuttamiseen kuluvan ajan näkökulmasta.

Toisaalta lämpötilan hallinta on työmaalla hankalaa, ja alhaiset lämpötilat voivat olla hyvin haitallisia kuivumisen kannalta. Ilman suhteellisen kosteuden vaikutus kohdistuu nimenomaan haihtumiskuivumiseen, minkä vuoksi masuunikuonabetonit eivät välttämättä ole yhtä herkkiä sen vaihtelulle kuin tavalliset betonit. Edellä mainittujen seikkojen vuoksi lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaikutusta masuunikuonabetoneiden kuivumiseen olisi hyödyllistä tutkia enemmän. Masuunikuonabetonin käytettävyyteen kuivumisen suhteen vaikuttaa myös masuunikuonan pienempi veden tarve, mikä mahdollistaa tavallista matalampien v/s-suhteiden käytön betoneissa. Matalan v/s-suhteen käyttäminen parantaa myös masuunikuonabetoneiden lujuudenkehitystä, jonka hitaus aiheuttaa rajoitteita masuunikuonabetoneiden käytölle.

Betonin kastumisen merkittävin ongelma työmaalla on sen aiheuttama viivästys kuivumisaikoihin. Viivästyksen suuruutta on arvioitu laskemalla, kuinka monta päivää kuukauden kastelujaksolle altistetuilla betoneilla kestää saavuttaa päällystettävyyden raja-arvot sekä kuinka paljon kastelujakso hidastaa raja-arvojen saavuttamista (taulukko 12.). Päivämääräiset arviot eivät ole yleispäteviä tutkituille betoneille, mutta antavat jonkinlaisen käsityksen kuivumisaikojen keskinäisestä suhteesta. Tuloksista voidaan havaita, että v/s-suhteen 0,60 betoneilla erot viivästyksissä ovat korkeintaan 20 päivää. V/s-suhteen 0,45 betoneissa erot ovat suurempia (jopa 2–3 kuukautta), ja vaihtelevat syvyyksittäin. Yleisesti masuunikuonabetoneilla kastumisen aiheuttama viivästys on suurempi.

Taulukko 12. Päällystettävyyden raja-arvoihin kuivumiseen kulunut aika päivinä 30 päivän kastelujaksolle altistetuilla koekappaleilla betonilaaduittain. Suluissa kuivumisajan pidentymisen päivinä.

Syvyys (mm) / RH (%)	v/s 0,60			v/s 0,45		
	CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B	CEM II/B-M	CEM III/A	CEM III/B
20 mm / 75 %	>180 (>75)	>180 (>80)	>180 (>10)	175 (85)	160 (75)	165 (75)
50 mm / 90 %	170 (45)	155 (65)	170 (65)	<30 (0)	<30 (0)	<30 (0)
50 mm / 85 %	>180 (-)	>180 (-)	>180 (-)	170 (60)	170 (110)	155 (95)

Suhteellisen kosteuden mittauksiin liittyviä mahdollisia epätarkkuustekijöitä on tarkasteltu tämän työn luvussa neljä. Mittausten onnistumista tarkastellaan ensisijaisesti epätarkkuustekijöiden minimoinnin kautta. Yksittäisten epätarkkuuden lähteiden vaikutusta on vaikea arvioida, mutta mittauksista havainnoitua tarkkuutta voidaan arvioida RT 103333 ohjekortissa esitettyjen kokonaisepätarkkuuden tasojen kautta.

Lähellä betonin haihduttavaa pintaa suhteellisen kosteuden mittaukset ovat kaikista epätarkimpia. Mittausten hajonnat on esitetty näytteenotto-syvyyksittäin taulukossa 13. Näytepalamittauksessa käytetyn syvyydsvälin 0–5 mm sisällä suhteellinen kosteus jakautuu voimakkaasti, minkä vuoksi samasta koekappaleesta otettujen yksittäisten näyteputkien suhteellinen kosteus voi vaihdella merkittävästi. Suuri hajonta on perusteltua hyväksyä, koska yksittäisen näyteputken sisältö ei välttämättä ole jakaantunut tasaisesti koko näytteenottovälille. Tällöin kolmen näyteputken keskiarvo on suuresta hajonnasta huolimatta tarkin arvio vallitsevalle suhteelliselle kosteudelle. Verrattuna 5 mm syvyydeltä tehtyjen mittauksiin, suurempien näytteenotto-syvyyksien tulokset ovat sekä kuvaajien visuaalisen jatkuvuuden, että tulosten hajonnan suhteen vakaampia. Tämä johtuu todennäköisesti näytteenottovälillä vallitsevan kosteuden pienemmästä jakaumasta. Kemiallisen kuivumisen mittausten keskihajonnan arvoja voidaan pitää vertailukohtana, koska niiden osalta mittaussyvyyden tarkkuus ei vaikuta tuloksiin. Keskihajonnan keskiarvot ovat todella samanlaiset sekä vakio-olosuhde-, että kastelukappaleilla mittaussyvyyksittäin. Mittausten hajonnoista voidaan arvioida, että mittaustulokset ovat kokonaisuudessaan tarkkoja, ja mittaukset onnistuneita. Yksittäisissä mittapisteeissä koeputkien välinen suhteellinen kosteus poikkesi huomattavasti, mutta lähes kaikki poikkeamat mahtuvat mittapään tarkkuuden marginaaliin. Lisäksi tutkimuksen aikavälille vaikuttaa muodostuvan johdonmukaisia trendejä.

RT 103333 -kortin mukaan määritetty kokonaisepävarmuusluokka tälle tutkimukselle oli  $\pm 4$  %-yksikköä. Alla esitettyjen hajontojen perusteella voidaan pitää todennäköisenä, että tässä työssä esitetyt mittaussyvyyksien keskiarvotulokset ovat todellisuudessa merkittävästi tarkempia. Toteutuneen mittaasepävarmuusluokan voidaan arvioida olevan todellisuudessa lähempänä parasta,  $\pm 2$  %-yksikön luokkaa.

Taulukko 13. Mittausten keskihajonnat syvyyksittäin ja koekappaletyypeittäin.

Syvyys	Keskihajonta (%-yksikköä)	
	Suurin	Keskiarvo
5 mm	4,38	1,57
20 mm	1,80	0,94
50 mm	3,50	0,80
5 mm kastelu	3,38	1,70
20 mm kastelu	2,32	0,94
50 mm kastelu	1,59	0,79
Kemiallinen	1,52	0,72

Diplomityön perusteella voidaan arvioida näytepalamittauksen soveltuvan menetelmänä tämän kaltaiseen tutkimukseen hyvin tarkkuutensa sekä toistettavuutensa arviosta. Vaikka mittausmenetelmä vaatii hieman harjaantumista, on sen käyttäminen mahdollista lyhyelläkin harjoittelulla, kunhan huolehditaan vaadittavasta tarkkuudesta ja huolellisuudesta mittauksen toteutuksessa.

Punnitusmittausten perusteella määriteltyjen kosteudensiirtoparametrien tarkkuus ei ole yhtä korkea kuin suhteellisen kosteuden mittauksilla. Kosteudensiirtoparametrien määrittämisessä käytetyt oletukset, kuten desorptiokäyrämallit, laskennassa käytetyt teoreettisesti määritetyt kaavat, sekä esimerkiksi karbonatisoitumisen aiheuttama massan muutos heikentävät saatujen tulosten absoluuttista tarkkuutta merkittävästi. Toisaalta tulosten voidaan arvioida olevan kohtuullisen hyvin vertailukelpoisia keskenään. Tämän vuoksi niitä voidaan soveltaa vertailtaessa muihin tutkimuksiin, joissa on esitetty vastaavia kosteudensiirtoparametrien arvoja.

## 7 Johtopäätökset

Diplomityössä tutkittiin vähähiilisen betonin kuivumista sekä siihen vaikuttavia tekijöitä kirjallisuustutkimuksen sekä empiirisen tutkimuksen avulla. Empiirisessä tutkimuksessa mitattiin suhteellisen kosteuden kehitystä sekä määritettiin haihtuvan kosteuden määrän perusteella kosteudensiirtoparametrien arvoja kuudelle masuunikuonaa sisältävälle betonilaadulle. Kosteusmittauksia tehtiin yhteen suuntaan haihduttaville, tiiviisti säilytetyille sekä kastelujaksolle altistetuille betonikoekappaleille. Empiirisen tutkimuksen tuloksia peilattiin kirjallisuustutkimukseen, minkä perusteella arvioitiin mitausten onnistumista sekä tuloksista tehtäviä tulkintoja.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella masuunikuonalla on merkittävä vaikutus betonin rakenteeseen sekä ominaisuuksiin. Tiiviimmän huokosrakenteen vuoksi masuunikuonabetoneiden kyky sitoa ja siirtää kosteutta poikkeaa tavanomaisista betoneista. Masuunikuonaa kasvataminen pienentää kosteuskapasiteettia ( $dw/dRH$ ) yli 70 % RH alueella ja kasvattaa alle 70 % RH alueella. Masuunikuonabetoneiden kosteudensiirto-ominaisuudet ovat heikkomat kuin tavallisilla betoneilla. Empiirisen tutkimuksen tulokset tukevat kirjallisuustutkimuksessa saatuja tuloksia heikommista kosteudensiirto-ominaisuuksista.

Kirjallisuustutkimuksessa todettiin, että masuunikuonabetoneiden kosteuden kehityksestä ei löydy aiempaa vastaavaa tutkimusta. Empiirisessä tutkimuksessa tehtyjen suhteellisen kosteuden mittausten, kirjallisuustutkimuksen sekä laskettujen kosteudensiirto-ominaisuuksien perusteella voidaan vastaukset työn tutkimuskysymyksiin kiteyttää seuraavasti:

- I. Masuunikuonabetonit kuivuvat tutkituissa olosuhteissa yhtä nopeasti tai nopeammin kuin tavanomaiset betonilaadut. Masuunikuonabetoneilla kemiallinen kuivuminen on nopeampaa ja haihtumiskuivumisen osuus pienempi kuin tavanomaisilla betoneilla. Masuunikuonabetoneilla kosteusjakauma ei muodostu yhtä syväälle betoniin, kuin tavanomaisilla betoneilla, mikä johtuu todennäköisesti heikommista kosteudensiirto-ominaisuuksista. Tutkitut masuunikuonabetonit saavuttivat päällystämisen raja-arvot jopa kuukauden aikaisemmin, kuin vastaavan v/s-suhteen CEM II/B-M betoni. Päinvastoin kun tyypillisesti, tutkitut masuunikuonabetonit saavuttivat pintaosalle (0,4A) määritellyn raja-arvon hitaammin kuin syvemmälle (A) määritellyn raja-arvon.
- II. Kuivatuksen aikana tapahtuva kastuminen hidastaa masuunikuonabetoneiden kuivumista enemmän kuin tavanomaisten betoneiden. Tutkituilla betonilaaduilla havaittiin jopa 1–2 kuukautta suurempi viivästys päällystämisen raja-arvojen saavuttamisessa.



- III. Diplomityön perusteella voidaan arvioida, että masuunikuonabetonit soveltuvat kuivumisen näkökulmasta käytettäväksi rakenteissa, joissa kuivumiselle on asetettu tavoitteita tai vaatimuksia. Korkean masuunikuonaosuuden betoneita, joissa on korkea vesi-sementtisuhte (esimerkiksi tutkittu v/s 0,60 CEM III/B) ei voida suositella nopeaa kuivumista vaativiin rakenteisiin. Matalan v/s-suhteen masuunikuonabetonit voivat tutkimuksen perusteella olla poikkeuksellisen hyviä betonilaatuja rakenteisiin, joissa tavoitellaan nopeaa kemiallista kuivumista.

Masuunikuonabetoneiden tavanomaisista betoneista poikkeavat kuivumismekanismien osuudet sekä kemiallisen reaktion lämpötilaherkkyys tekevät siitä mahdollisesti alttiin lämpötilan muuttumisen vaikutuksille kuivumisen näkökulmasta. Kuivumisolosuhteiden vaikutusta masuunikuonabetoneiden kuivumiseen olisi perusteltua tutkia lisää toimivuuden varmistamiseksi käytännössä toteutuvissa olosuhteissa. Lisäksi kastumisesta aiheutuvan kuivumisajan viivästyksen suurenemisen takia masuunikuonabetoneilla valujen sääsuojaamisen merkitys kasvaa huomattavasti.

Empiirisessä tutkimuksessa havaittujen kosteusjakaumien erojen sekä päällystettävyyden raja-arvojen normaalista poikkeavan saavuttamisen perusteella olisi syytä pohtia tulisiko masuunikuonabetoneiden päällystettävyyttä arvioida eri tavoin, kun tavanomaisten betoneiden. Työssä esitettyjen tulosten ja havaintojen perusteella selkeä jatkotutkimustarve olisi selvittää onko masuunikuonabetoneiden käytöllä vaikutusta kosteuden tasapainottumiseen päällysteiden alle.

## Lähteet

- Adesina, A. (2020). Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. *Environmental Challenges*, Vol 1, ISSN 2667-0100. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100004>.
- Amran, M., Murali, G., Khalid, N. H. A., Fediuk, R., Ozbakkaloglu, T., Lee, Y. H., Haruna, S. & Lee, Y. Y. (2021). Slag uses in making an ecofriendly and sustainable concrete: A review. *Construction and Building Materials*, Vol 272, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121942>.
- Aukema, B. (2023). Psychometric chart. (Viitattu: 06.07.2023). Saatavissa: <https://www.psych-chart.com/>
- Ben Fraj, A., Bonnet, S. & Khelidj, A. (2012). New approach for coupled chloride/moisture transport in non-saturated concrete with and without slag. *Construction and Building Materials*, Vol 35, S. 761-771, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.106>.
- Betoniteollisuus ry (2021). Verifioitu elinkaariarvio (LCA). (Viitattu: 08.05.2023). Saatavissa: <https://betoni.com/betoni-ja-ymparisto/ymparistoselosteet/valmisbetonit/>
- Castellano, C. C., Bonavetti, V. L., Donza, H. A., & Irassar, E. F. (2016). The effect of w/b and temperature on the hydration and strength of blastfurnace slag cements. *Construction and Building Materials*, Vol 111, S. 679-688, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.001>.
- De Belie, N., Kratky J. & Van Vlierberghe S. (2010). Influence of pozzolans and slag on the microstructure of partially carbonated cement paste by means of water vapour and nitrogen sorption experiments and BET calculations. *Cement and Concrete Research*, Vol 40, S. 1723-1733, ISSN 0008-8846. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.014>.
- Duan, P., Shui, Z. Chen, W. & Shen, C. (2013). Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 44, S. 1-6, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.075>.
- Escalante-Garcia, J. I. (2003). Nonevaporable water from neat OPC and replacement materials in composite cements hydrated at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, Vol 33, S. 1883-1888, ISSN 0008-8846. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00208-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00208-4).
- Fick (1855). Ueber Diffusion. *Annalen der Physik*, vol. 170, no. 1, pp. 59-86.
- Finnsementti (2023). CO<sub>2</sub>-tarina. (Viitattu: 05.07.2023). Saatavissa: <https://finnsementti.fi/palvelut/ymparisto/co2-tarina/>
- Finnsementti (2022). Ympäristöraportti 2022. (Viitattu 08.05.2023). Saatavissa: <https://finnsementti.fi/palvelut/ymparisto/ymparistoraportit/>

Gruyaert, E., Van den Heede, P. & De Belie, N. (2013). Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient – Effect of carbonation on the pore structure. *Cement and Concrete Composites*, Vol 35, S. 39-48, ISSN 0958-9465. <https://doi.org/10.1016/j.cemcon-comp.2012.08.024>.

Hedenblad, G. (1993). Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste. [Doctoral Thesis (monograph), Division of Building Materials]. Division of Building Materials, LTH, Lund University.

Herfort, D. & Lothenbach B. (2015). A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials. In: SrivenerK (ed) Taylor & Francis Inc.

IEA (2018). Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry. IEA, Paris. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>, Lisenssi: CC BY 4.0.

IEA (2020), Energy Technology Perspectives 2020, IEA, Paris. Saatavissa; <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>, Lisenssi: CC BY 4.0

Kajaste, R., Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, Vol 112, S. 4041-4052, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>.

CO<sub>2</sub>NCRETE SOLUTION (2020). CO<sub>2</sub>NCRETE SOLUTION Report Q1/2020, Kirjallisuusreferaatti (kompakti).

Lane, S. D. (2012). Performance of Slag Cement in Hydraulic Cement Concrete. *Transportation Research Record*, Vol 2290, S. 84-88, ISSN 0361-1981.

Lewis, R. C. (2018). Silica Fume. In: Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials, RILEM State-of-the-Art Reports 25. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1_3)

Linderoth, O. (2020). Hydration, pore structure, and related moisture properties of fly ash blended cement-based materials: Experimental methods and laboratory measurements. Department of Building and Environmental Technology, Lund University.

Lumley, J. S., Gollop, R. S., Moir, G. K. & Taylor, H.F.W. (1996). Degrees of reaction of the slag in some blends with Portland cements. *Cement and Concrete Research*, Vol 26, S. 139-151, ISSN 0008-8846. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00190-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00190-5).

Matthes, W., Vollpracht, A., Villagrán, Y., Kamali-Bernard, S., Hooton, D., Gruyaert, E., Soutsos, M. & De Belie, N. (2018). Ground Granulated Blast-Furnace Slag. In: Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials, RILEM State-of-the-Art Reports 25. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1_1)

- Merikallio T., Niemi, S. & Komonen, J. (2007). Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen. (2. painos) Helsinki, Suomi: Suomen Betonitieto Oy. ISBN 978-952-5075-88-5
- Mills, R. H. (1966). Factors Influencing Cessation of Hydration in Water Cured Cement Pastes. Highway Research Board Special Report, Issue 90, S. 406-424.
- Niemi, S. (2010). Betonirakenteiden kosteuden mittaaminen ja onnistunut päällystäminen. Rakentajain kalenteri 2010.
- Nikkilä, S. (2022). Vihreän betonin kuivuminen. [AMK opinnäytetyö, rakennustekniikka]. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.
- Nilsson, L-O. (1980). Hygroscopic moisture in concrete - drying, measurements & related material properties. [Doctoral Thesis (monograph), Division of Building Materials]. Division of Building Materials, LTH, Lund University.
- Nilsson L-O. & Bergström K. (2020). The tin can method for determining moisture transport properties of concrete. E3S Web of Conferences, 172, 14005. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202017214005>
- Olsson, N., Nilsson, L-O., Åhs, M. & Baroghel-Bouny, V. (2018). Moisture transport and sorption in cement based materials containing slag or silica fume. Cement and Concrete Research, Vol. 106, S. 23-32, ISSN 0008-8846. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.018>.
- Osmanovic, Z., Haračić, N. & Zelić, J. (2018). Properties of blastfurnace cements (CEM III/A, B, C) based on Portland cement clinker, blastfurnace slag and cement kiln dusts. Cement and Concrete Composites, Vol. 91, S. 189-197, ISSN 0958-9465. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.006>.
- Piemonti, A., Conforti, A., Cominoli, L., Sorlini S., Luciano, A. & Plizzari, G. (2021) Use of Iron and Steel Slags in Concrete: State of the Art and Future Perspectives. Sustainability, 13(2):556. <https://doi.org/10.3390/su13020556>
- Powers, T. C. (1960). Physical Properties of Cement Paste. Chemistry of Cement: Proceedings of the Fourth International Symposium, Washington, Vol. 2, S. 577-609.
- Powers, T. C. & Brownyard, T. L. (1948). Studies on the physical properties of hardened Portland cement paste. PCA, Bulletin 22, Chicago.
- Powers, T. C., Copeland, L. E. & Mann, H. M. (1959). Capillary continuity or discontinuity in cement pastes. Journal of the PCA Research and Development Laboratories, Vol. 1, No 2.
- Punkki, J. (2021). Betonin sideaineet tulevaisuudessa. Betoni, Vol. 4, S. 74-83.
- Rakennuslehti (2022). Vihreän sementin valmistus hyttyy masuunikuonan puutteeseen – ”Pyrimme hankkimaan sitä lisää Euroopasta”. Viitattu 28.04.2023. Saatavissa: <https://www.rakennuslehti.fi/2022/09/vihrean-sementin-valmistus-hyytyy-masuunikuonan-puutteeseen-pyrimme-hankkimaan-sita-lisaa-euroopasta/>

Rakennuslehti, 2021. Betonin kuivuminen ei ole salatiedettä, mutta hokkuspokkuskonsteilla hankala muovimatto-ongelma ei ratkea

RIL (2014). RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1 Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. ISSN 0356-9403.

Richardson, I. G., Groves, G. W. (1992). Microstructure and microanalysis of hardened cement pastes involving ground granulated blast-furnace slag. *Journal of Material Science*, Vol. 27, S. 6204–6212. <https://doi.org/10.1007/BF01133772>

Roy D. M., Parker K. M. (1983). Microstructures and properties of granulated slag-Portland cement blends at normal and elevated temperatures. In: Malhotra VM (ed) *Proceedings of the 1st international conference on the use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete SP-79*. American Concrete Institute, 1, S. 397–414.

Rakennustieto (2021). RT 103333 Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen. Ohjekortti.

Saeidpour, M. & Wadsö, L. (2015). Moisture equilibrium of cement based materials containing slag or silica fume and exposed to repeated sorption cycles. *Cement and Concrete Research*, Vol 69, S. 88-95, ISSN 0008-8846. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.12.005>.

Salminen, E. (2021). Suomalaisen betonin hiilijalanjälki. *Betoni*, Vol 1, S. 86-91.

Sanjuán M. A., Estévez, E., Argiz, C. & del Barrio, D. (2018). Effect of curing time on granulated blast-furnace slag cement mortars carbonation. *Cement and Concrete Composites*, Vol 90, S. 257-265, ISSN 0958-9465. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.04.006>.

Sekki, P., Karvinen, T. & Vinha, J. (2020). Moisture behavior of external insulated precast concrete wall panels. *Journal of Building Physics*, 2021, 44(5), S. 409-434. <https://doi.org/10.1177/1744259120925850>.

Sementti (2022). LOIKKA-hanke puolittaa päästöjä. *Sementti* 2.22, S. 29, ISSN 2342-2092.

Sideris, K., Justnes, H., Soutsos, M. & Sui, T. (2018). Fly Ash. In: *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials*, RILEM State-of-the-Art Reports 25. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1_2)

SSAB (2023). Kohti fossiilivapaata terästuotantoa. (Viitattu: 28.04.2023). Saatavissa: <https://www.ssab.com/fi-fi/ssab-konserni/tietoja-ssabsta/tuotantopaikkakunnat-suomessa/raahe/kohti-fossiilivapaata-terastuotantoa>

Suomen Betoniyhdistys (2023). BY-Vähähiilisyysluokitus, Hiilidioksidipäästöjen laskennassa käytettävät ominaisarvot. (Viitattu 16.05.2023). Saatavissa: <https://vahahiilinenbetoni.fi/ominaisarvot/>

Suomen Betoniyhdistys (2022). BY-vähähiilisyysluokitus, Osa 2, Käyttöohje suunnittelijalle ja betonin tilaajalle. ISBN 978-952-7314-23-4

Suomen Betoniyhdistys (2021). by 65 Betoninormit 2021. ISSN 0358-5239.

Ukpata, J. O., Basheer, P. A. M. & Black, L. (2018). Performance of plain and slag-blended cements and mortars exposed to combined chloride–sulfate solution. *Advances in Cement Research*, 30(8), S. 371–386.  
[fhttps://doi.org/10.1680/jadcr.17.00121](https://doi.org/10.1680/jadcr.17.00121)

Vahanen Oy (2016). Päällystettyjen elementtirakenteisten välipohjien kosteustekninen toimivuus osana rakennuksen tervettä elinkaarta. *Betoni*, Vol. 3, S. 70-77.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi., M., Mikkilä, A. & Käkelä, P. (2005). Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan osasto. Talonrakennustekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 129. ISSN 1459-4102.

Väylävirasto (2020). Infrabetonien valmistus. Väyläviraston ohjeita 41/2020.

Whitaker (1986). Flow in porous media I: A theoretical derivation of Darcy's law. *Transport in Porous Media*, Vol. 1, no. 1, S. 3-25.

YM (2017). Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta (782/2017).

## A. Tutkittujen betoneiden ominaispäästöjen laskenta

Betoni laatu		CEM II/B-M v/s 0,60	CEM III/A v/s 0,60	CEM III/B v/s 0,60	CEM II/B-M v/s 0,45	CEM III/A v/s 0,45	CEM III/B v/s 0,45	Ominaispäästö [kgCO <sub>2</sub> e/kg]
Oiva-sementti, PA	[kg/m <sup>3</sup> ] [kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ]	315 185	0	0	430 252	0	0	0,587
Kolmossementti		0	310	0	0	425	0	0,446
Pikasementti, PA		0	138	94	0	190	0	0,776
Kuonajauhe		0	0	220	73	0	101	0,069
Hiekka / sora		0	0	15	0	0	21	
Notkistin		1909	1924	1914	1797	1803	1767	0,004
		8	8	8	7	7	7	
		15	22	15	16	15	17	1,53
		22	34	22	24	23	26	
Raaka-aineiden kuljetus	[km] [kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ]							Ominaispäästö [kgCO <sub>2</sub> e/kg km]
Sementti		340	340	340	340	340	340	0,000079
		8	8	3	12	11	3	
Masuunikuona, laiva				840				0,000045
		0	0	8,316	0	0	11,4912	
Masuunikuona rekka				75				0,000079
		0	0	1,3035	0	0	1,8012	
Kivaines, rekka		25	25	25	25	25	25	0,000085
		4	4	4	4	4	4	
Energia	[kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ]	5	5	5	5	5	5	
<b>Yhteensä</b>	<b>[kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>]</b>	<b>232</b>	<b>197</b>	<b>139</b>	<b>304</b>	<b>240</b>	<b>180</b>	

## B. Tutkimuksen mittauspöytäkirjat

### Yhteen suuntaan haihduttavat kappaleet

O1XX = Oiva v/s 0,45									
Mittaus pvm	Valusta [pv]	Kappale	Mittaussyvyys (mm)		1	2	3	KA	Hajont
08/11/2022	29	O101	5	Anturi	32	33	34		
08/11/2022	29	O101	5	RH (%)	63,3	69,5	62,6	65,1	3,10
08/11/2022	29	O101	5	T(°C)	20,1	20,2	20,2	20,2	0,05
08/11/2022	29	O101	20	Anturi	35	36	37		
08/11/2022	29	O101	20	RH (%)	83,3	83,1	83,0	83,1	0,12
08/11/2022	29	O101	20	T(°C)	20,3	20,1	20,2	20,2	0,08
08/11/2022	29	O101	50	Anturi	38	39	40		
08/11/2022	29	O101	50	RH (%)	86,5	89,0	89,4	88,3	1,28
08/11/2022	29	O101	50	T(°C)	20,3	20,3	20,3	20,3	0,00
07/12/2022	58	O102	5	Anturi	19	20	21		
07/12/2022	58	O102	5	RH (%)	53,4	53,8	53,8	53,7	0,19
07/12/2022	58	O102	5	T(°C)	19,7	19,5	19,6	19,6	0,08
07/12/2022	58	O102	20	Anturi	22	23	24		
07/12/2022	58	O102	20	RH (%)	79,6	77,6	80,0	79,1	1,05
07/12/2022	58	O102	20	T(°C)	19,7	19,7	19,8	19,7	0,05
07/12/2022	58	O102	50	Anturi	25	26	27		
07/12/2022	58	O102	50	RH (%)	86,3	87,3	89,3	87,6	1,25
07/12/2022	58	O102	50	T(°C)	19,7	19,7	19,7	19,7	0,00
11/01/2023	93	O103	5	Anturi	34	35	36		
11/01/2023	93	O103	5	RH (%)	54	52,6	53,3	53,3	0,57
11/01/2023	93	O103	5	T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05
11/01/2023	93	O103	20	Anturi	37	38	39		
11/01/2023	93	O103	20	RH (%)	73,2	75,3	75,2	74,6	0,97
11/01/2023	93	O103	20	T(°C)	21,1	21	21,1	21,1	0,05
11/01/2023	93	O103	50	Anturi	40	41	42		
11/01/2023	93	O103	50	RH (%)	87,5	86,2	87,2	87,0	0,56
11/01/2023	93	O103	50	T(°C)	21,1	21	21	21,0	0,05
06/02/2023	119	O104	5	Anturi	61	62	63		
06/02/2023	119	O104	5	RH (%)	48,4	47,6	49,0	48,4	0,58
06/02/2023	119	O104	5	T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05
06/02/2023	119	O104	20	Anturi	64	65	66		
06/02/2023	119	O104	20	RH (%)	68,4	69,9	71,8	70,0	1,38
06/02/2023	119	O104	20	T(°C)	21,1	21	21,1	21,1	0,05
06/02/2023	119	O104	50	Anturi	67	68			
06/02/2023	119	O104	50	RH (%)	84,6	83,5		84,1	0,58
06/02/2023	119	O104	50	T(°C)	21	21		21,0	0,00
05/04/2023	177	O105	5	Anturi	37	38	39		
05/04/2023	177	O105	5	RH (%)		44,8	48,2	49,3	1,90
05/04/2023	177	O105	5	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00
05/04/2023	177	O105	20	Anturi	40	41	42		
05/04/2023	177	O105	20	RH (%)		67,7	68,0	67,9	0,17
05/04/2023	177	O105	20	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00
05/04/2023	177	O105	50	Anturi	43	44	45		
05/04/2023	177	O105	50	RH (%)		83,0	83,0	82,8	0,34
05/04/2023	177	O105	50	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00



O2XX = Oiva v/s 0,6										
Mittaus pv	Valusta [pv]	Kappale	Mittausvyvyys (mr)		1	2	3	KA	Hajonta	
09/11/2022	30	O201	5	Anturi	13	14	15			
09/11/2022	30	O201	5	RH (%)	68,3	65,6	64,6	66,2	1,56	
09/11/2022	30	O201	5	T(°C)	20,1	20,1	20,0	20,1	0,05	
09/11/2022	30	O201	20	Anturi	16	17	18			
09/11/2022	30	O201	20	RH (%)	89,5	90,7	89,1	89,8	0,68	
09/11/2022	30	O201	20	T(°C)	20,1	20,3	20,2	20,2	0,08	
09/11/2022	30	O201	50	Anturi	19	20	21			
09/11/2022	30	O201	50	RH (%)	93,9	94,0	94,2	94,0	0,12	
09/11/2022	30	O201	50	T(°C)	20,1	19,8	19,9	19,9	0,12	
07/12/2022	58	O202	5	Anturi	28	29	30			
07/12/2022	58	O202	5	RH (%)	57,8	57,1	55,5	56,8	0,96	
07/12/2022	58	O202	5	T(°C)	19,6	19,7	19,7	19,7	0,05	
07/12/2022	58	O202	20	Anturi	31	32	33			
07/12/2022	58	O202	20	RH (%)	84,1	81,8	81,6	82,5	1,13	
07/12/2022	58	O202	20	T(°C)	19,7	19,6	19,7	19,7	0,05	
07/12/2022	58	O202	50	Anturi	34	35	36			
07/12/2022	58	O202	50	RH (%)	92,7	92,8	93,2	92,9	0,22	
07/12/2022	58	O202	50	T(°C)	19,7	19,8	19,7	19,7	0,05	
12/01/2023	94	O203	5	Anturi	61	62	63			
12/01/2023	94	O203	5	RH (%)	54,7	52,3	53,5	53,5	0,98	
12/01/2023	94	O203	5	T(°C)	21,1	21,2	21,1	21,1	0,05	
12/01/2023	94	O203	20	Anturi	64	65	66			
12/01/2023	94	O203	20	RH (%)	77,5	76,8	75,2	76,5	0,96	
12/01/2023	94	O203	20	T(°C)	21,2	21,1	21,0	21,1	0,08	
12/01/2023	94	O203	50	Anturi	67	68	69			
12/01/2023	94	O203	50	RH (%)	90,5	90,0	91,1	90,5	0,45	
12/01/2023	94	O203	50	T(°C)	21,1	21,2	21,1	21,1	0,05	
07/02/2023	120	O204	5	Anturi	61	62	63			
07/02/2023	120	O204	5	RH (%)	52,8	51,0	55,1	53,0	1,66	
07/02/2023	120	O204	5	T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05	
07/02/2023	120	O204	20	Anturi	64	65	66			
07/02/2023	120	O204	20	RH (%)	71,9	73,9	75,0	73,6	1,28	
07/02/2023	120	O204	20	T(°C)	21,1	21	21,1	21,1	0,05	
07/02/2023	120	O204	50	Anturi	67	68	69			
07/02/2023	120	O204	50	RH (%)	90,2	90,4	90,2	90,3	0,11	
07/02/2023	120	O204	50	T(°C)	21	21	21,0	21,0	0,00	
05/04/2023	177	O205	5	Anturi	46	47	48			
05/04/2023	177	O205	5	RH (%)	50,2	46,1		48,1	2,05	
05/04/2023	177	O205	5	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	
05/04/2023	177	O205	20	Anturi	49	50	51			
05/04/2023	177	O205	20	RH (%)	73,5	70,0	67,2	70,2	2,58	
05/04/2023	177	O205	20	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	
05/04/2023	177	O205	50	Anturi	52	53	54			
05/04/2023	177	O205	50	RH (%)	87,6	86,5	87,8	87,3	0,58	
05/04/2023	177	O205	50	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	

A1XX = CEM III/A v/s 0,45										
Mittaus pvm.	Valusta	Kappale	Mittausvyvy	(mm)	1	2	3	KA	Hajont	
08/11/2022	29	A101	5	Anturi	13	14	15			
08/11/2022	29	A101	5	RH (%)	58,8	63,3	66,6	62,9	3,20	
08/11/2022	29	A101	5	T(°C)	20,0	20,0	19,9	20,0	0,05	
08/11/2022	29	A101	20	Anturi	16	17	18			
08/11/2022	29	A101	20	RH (%)	83,4	83,5	81,5	82,8	0,92	
08/11/2022	29	A101	20	T(°C)	20,1	20,3	20,2	20,2	0,08	
08/11/2022	29	A101	50	Anturi	19	20	21			
08/11/2022	29	A101	50	RH (%)	86,3	88,3	88,1	87,6	0,90	
08/11/2022	29	A101	50	T(°C)	20,1	19,8	20,0	20,0	0,12	
08/12/2022	59	A102	5	Anturi	37	38	39			
08/12/2022	59	A102	5	RH (%)	49,6	49,3	48,7	49,2	0,37	
08/12/2022	59	A102	5	T(°C)	20,1	20,1	20,1	20,1	0,00	
08/12/2022	59	A102	20	Anturi	40	41	42			
08/12/2022	59	A102	20	RH (%)	77,7	77	76,3	77,0	0,57	
08/12/2022	59	A102	20	T(°C)	20,2	20,1	20,1	20,1	0,05	
08/12/2022	59	A102	50	Anturi	43	44	45			
08/12/2022	59	A102	50	RH (%)	84,0	86,4	85,1	85,2	0,98	
08/12/2022	59	A102	50	T(°C)	20,2	20,2	20,0	20,1	0,09	
11/01/2023	93	A103	5	Anturi	43	44	45			
11/01/2023	93	A103	5	RH (%)	48,6	51,8	49,5	50,0	1,35	
11/01/2023	93	A103	5	T(°C)	21,2	21,2	21,0	21,1	0,09	
11/01/2023	93	A103	20	Anturi	46	47	48			
11/01/2023	93	A103	20	RH (%)	75	75	72,6	74,2	1,13	
11/01/2023	93	A103	20	T(°C)	21,2	21,0	21,1	21,1	0,08	
11/01/2023	93	A103	50	Anturi	49	50	51			
11/01/2023	93	A103	50	RH (%)	82,7	84	85	83,9	0,94	
11/01/2023	93	A103	50	T(°C)	21,1	21,2	21,3	21,2	0,08	
06/02/2023	119	A104	5	Anturi	73	74	75			
06/02/2023	119	A104	5	RH (%)	44,4	46,5	45,4	45,4	0,85	
06/02/2023	119	A104	5	T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05	
06/02/2023	119	A104	20	Anturi	76	77	78			
06/02/2023	119	A104	20	RH (%)	73,7	72,5	70,4	72,2	1,38	
06/02/2023	119	A104	20	T(°C)	21,1	21	21,1	21,1	0,05	
06/02/2023	119	A104	50	Anturi	79	80				
06/02/2023	119	A104	50	RH (%)		82,4		82,4	0,00	
06/02/2023	119	A104	50	T(°C)	21	21		21,0	0,00	
05/04/2023	177	A105	5	Anturi	55	56	57			
05/04/2023	177	A105	5	RH (%)	45,8	45,1	45,9	45,6	0,38	
05/04/2023	177	A105	5	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	
05/04/2023	177	A105	20	Anturi	58	59	60			
05/04/2023	177	A105	20	RH (%)	68,2	68,5	67,8	68,2	0,29	
05/04/2023	177	A105	20	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	
05/04/2023	177	A105	50	Anturi	61	62	63			
05/04/2023	177	A105	50	RH (%)	82,2	80,1	81,8	81,4	0,88	
05/04/2023	177	A105	50	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	

A2XX = CEM III/A v/s 0,6											
Mittaus pvr	Valusta [pv]	Kappale	Mittausyvyys (mm)		1	2	3	KA	Hajonta		
08/11/2022	29	A201	5	Anturi	22	23	24				
08/11/2022	29	A201	5	RH (%)	69,9	62,6	65,3	65,9	3,01		
08/11/2022	29	A201	5	T(°C)	20,1	20,1	20,3	20,2	0,09		
08/11/2022	29	A201	20	Anturi	25	26	28				
08/11/2022	29	A201	20	RH (%)	85,1	88,5	87,7	87,1	1,45		
08/11/2022	29	A201	20	T(°C)	20,2	20,1	20,1	20,1	0,05		
08/11/2022	29	A201	50	Anturi	29	30	31				
08/11/2022	29	A201	50	RH (%)	92,2	94,6	93,6	93,5	0,98		
08/11/2022	29	A201	50	T(°C)	20,2	20,2	20,2	20,2	0,00		
08/12/2022	59	A202	5	Anturi	46	47	48				
08/12/2022	59	A202	5	RH (%)	58,6	56,4	48,4	54,5	4,38		
08/12/2022	59	A202	5	T(°C)	20,2	20,1	20	20,1	0,08		
08/12/2022	59	A202	20	Anturi	85	86	87				
08/12/2022	59	A202	20	RH (%)	81,5	78,6	81,9	80,7	1,47		
08/12/2022	59	A202	20	T(°C)	20,1	20,1	20,1	20,1	0,00		
08/12/2022	59	A202	50	Anturi	88	89	90				
08/12/2022	59	A202	50	RH (%)	90,2	90,4	91,2	90,6	0,43		
08/12/2022	59	A202	50	T(°C)	20	20,2	20,1	20,1	0,08		
12/01/2023	94	A203	5	Anturi	70	71	72				
12/01/2023	94	A203	5	RH (%)	49,8	47,9	48	48,6	0,87		
12/01/2023	94	A203	5	T(°C)	21,0	21,1	21,0	21,0	0,05		
12/01/2023	94	A203	20	Anturi	73	74	75				
12/01/2023	94	A203	20	RH (%)	75,8	74,7	74,6	75,0	0,54		
12/01/2023	94	A203	20	T(°C)	21,1	21,2	21,0	21,1	0,08		
12/01/2023	94	A203	50	Anturi	76	77	78				
12/01/2023	94	A203	50	RH (%)	89,1	89,4	91,1	89,9	0,88		
12/01/2023	94	A203	50	T(°C)	21,1	21,0	21,1	21,1	0,05		
07/02/2023	120	A204	5	Anturi	74	75	76				
07/02/2023	120	A204	5	RH (%)	47,6	46,9	48,5	47,7	0,66		
07/02/2023	120	A204	5	T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05		
07/02/2023	120	A204	20	Anturi	77	78	79				
07/02/2023	120	A204	20	RH (%)	75,2	76,3	75,6	75,7	0,47		
07/02/2023	120	A204	20	T(°C)	21,1	21	21,1	21,1	0,05		
07/02/2023	120	A204	50	Anturi	80	81	82				
07/02/2023	120	A204	50	RH (%)	88,4	87,2	87,9	87,8	0,47		
07/02/2023	120	A204	50	T(°C)	21	21	21,0	21,0	0,00		
05/04/2023	177	A205	5	Anturi	64	65	66				
05/04/2023	177	A205	5	RH (%)	48,8	42,9		45,9	2,96		
05/04/2023	177	A205	5	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00		
05/04/2023	177	A205	20	Anturi	67	68	69				
05/04/2023	177	A205	20	RH (%)	73,6	71,0	73,6	72,7	1,24		
05/04/2023	177	A205	20	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00		
05/04/2023	177	A205	50	Anturi	70	71	72				
05/04/2023	177	A205	50	RH (%)	83,8	88,2	88,5	86,8	2,15		
05/04/2023	177	A205	50	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00		

B1XX = CEM III/B v/s 0,45

Mittaus pvm.	Valusta [pv]	Kappale	Mittausyvyvy	nm	1	2	3	KA	Hajonta
09/11/2022	30	B101	5	Anturi	22	23	24		
09/11/2022	30	B101	5	RH (%)	63,0	63,2		63,1	0,10
09/11/2022	30	B101	5	T(°C)	20,1	20,1	20,3	20,2	0,09
09/11/2022	30	B101	20	Anturi	25	26	28		
09/11/2022	30	B101	20	RH (%)	85,9	85,3	84,8	85,3	0,45
09/11/2022	30	B101	20	T(°C)	20,3	20,2	20,2	20,2	0,05
09/11/2022	30	B101	50	Anturi	29	30	31		
09/11/2022	30	B101	50	RH (%)	87,1	88,9	90,2	88,7	1,27
09/11/2022	30	B101	50	T(°C)	20,3	20,3	20,4	20,3	0,05
08/12/2022	59	B102	5	Anturi	91	92	93		
08/12/2022	59	B102	5	RH (%)	54,2	56,0	58,5	56,2	1,76
08/12/2022	59	B102	5	T(°C)	20,2	20,1	20,1	20,1	0,05
08/12/2022	59	B102	20	Anturi	94	95	96		
08/12/2022	59	B102	20	RH (%)	79,9	80,2	80,3	80,1	0,17
08/12/2022	59	B102	20	T(°C)	20,1	20,1	20,1	20,1	0,00
08/12/2022	59	B102	50	Anturi	73	74	75		
08/12/2022	59	B102	50	RH (%)	85,5	84,6	84,1	84,7	0,58
08/12/2022	59	B102	50	T(°C)	20,2	20,3	19,3	19,9	0,45
11/01/2023	93	B103	5	Anturi	52	53	54		
11/01/2023	93	B103	5	RH (%)	51,9	47,6	53,5	51,0	2,49
11/01/2023	93	B103	5	T(°C)	21,2	21,1	20,9	21,1	0,12
11/01/2023	93	B103	20	Anturi	55	56	57		
11/01/2023	93	B103	20	RH (%)	76,2	72,2	75,8	74,7	1,80
11/01/2023	93	B103	20	T(°C)	21,1	21,2	21,1	21,1	0,05
11/01/2023	93	B103	50	Anturi	58	59	60		
11/01/2023	93	B103	50	RH (%)	83,5	84,2	86,5	84,7	1,28
11/01/2023	93	B103	50	T(°C)	21,1	21,0	21,3	21,1	0,12
06/02/2023	119	B104	5	Anturi	85	86	87		
06/02/2023	119	B104	5	RH (%)	45,0	43,4	48,2	45,5	2,01
06/02/2023	119	B104	5	T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05
06/02/2023	119	B104	20	Anturi	88	89	90		
06/02/2023	119	B104	20	RH (%)	72,9	74,3	72,1	73,1	0,92
06/02/2023	119	B104	20	T(°C)	21,1	21	21,1	21,1	0,05
06/02/2023	119	B104	50	Anturi	91	92			
06/02/2023	119	B104	50	RH (%)	80,6	81,2		80,9	0,26
06/02/2023	119	B104	50	T(°C)	21	21		21,0	0,00
05/04/2023	177	B105	5	Anturi	73	74	75		
05/04/2023	177	B105	5	RH (%)	42,5	45,7	44,1	44,1	1,29
05/04/2023	177	B105	5	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00
05/04/2023	177	B105	20	Anturi	76	77	78		
05/04/2023	177	B105	20	RH (%)	71,2	72,5	71,4	71,7	0,58
05/04/2023	177	B105	20	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00
05/04/2023	177	B105	50	Anturi	79	80	81		
05/04/2023	177	B105	50	RH (%)	81,7	81,7	81,1	81,5	0,30
05/04/2023	177	B105	50	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00

B2XX = CEM III/B v/s 0,6										
Mittaus pvr	Valusta [pv]	Kappali	Mittaussyvyys (mm)		1	2	3	KA	Hajont:	
09/11/2022	30	B201	5	Anturi	22	23	24			
09/11/2022	30	B201	5	RH (%)	63,5	65,2	62,4	63,7	1,15	
09/11/2022	30	B201	5	T(°C)	20,3	20,3	20,5	20,4	0,09	
09/11/2022	30	B201	20	Anturi	25	26	28			
09/11/2022	30	B201	20	RH (%)	92,2	91,9	90,8	91,6	0,60	
09/11/2022	30	B201	20	T(°C)	19,3	20,4	20,5	20,1	0,54	
09/11/2022	30	B201	50	Anturi	29	30	31			
09/11/2022	30	B201	50	RH (%)	89,5		96,5	93,0	3,50	
09/11/2022	30	B201	50	T(°C)	20,5	20,5	20,5	20,5	0,00	
08/12/2022	59	B202	5	Anturi	76	77	78			
08/12/2022	59	B202	5	RH (%)	50,8	57,4	51,4	53,2	2,98	
08/12/2022	59	B202	5	T(°C)	20,2	20,1	20,1	20,1	0,05	
08/12/2022	59	B202	20	Anturi	79	80	81			
08/12/2022	59	B202	20	RH (%)	85,3	83,3	83,9	84,2	0,84	
08/12/2022	59	B202	20	T(°C)	20,2	20,4	20,2	20,3	0,09	
08/12/2022	59	B202	50	Anturi	82	83	84			
08/12/2022	59	B202	50	RH (%)	91	90,3	92,3	91,2	0,83	
08/12/2022	59	B202	50	T(°C)	20,1	20,2	20,3	20,2	0,08	
12/01/2023	94	B203	5	Anturi	25	26	27			
12/01/2023	94	B203	5	RH (%)	50,2	51,2	51,8	51,1	0,66	
12/01/2023	94	B203	5	T(°C)	21,2	21,1	21,2	21,2	0,05	
12/01/2023	94	B203	20	Anturi	28	29	30			
12/01/2023	94	B203	20	RH (%)	81,1	78,1	80,7	80,0	1,33	
12/01/2023	94	B203	20	T(°C)	21,1	21,2	21,3	21,2	0,08	
12/01/2023	94	B203	50	Anturi	31	32	33			
12/01/2023	94	B203	50	RH (%)	91,5	90,7	91,6	91,3	0,40	
12/01/2023	94	B203	50	T(°C)	21,3	21,0	21,0	21,1	0,14	
07/02/2023	120	B204	5	Anturi	87	88	89			
07/02/2023	120	B204	5	RH (%)	47,2	50,9	51,2	49,8	1,83	
07/02/2023	120	B204	5	T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05	
07/02/2023	120	B204	20	Anturi	90	91	92			
07/02/2023	120	B204	20	RH (%)	80,0	78,0	77,9	78,6	0,96	
07/02/2023	120	B204	20	T(°C)	21,1	21	21,1	21,1	0,05	
07/02/2023	120	B204	50	Anturi	93	94	95			
07/02/2023	120	B204	50	RH (%)	88,0	87,2	87,6	87,6	0,31	
07/02/2023	120	B204	50	T(°C)	21	21		21,0	0,00	
05/04/2023	177	B205	5	Anturi	82	83	84			
05/04/2023	177	B205	5	RH (%)	44,2	41,2	42,8	42,7	1,22	
05/04/2023	177	B205	5	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	
05/04/2023	177	B205	20	Anturi	85	86	87			
05/04/2023	177	B205	20	RH (%)	73,8	74,7	75,4	74,6	0,64	
05/04/2023	177	B205	20	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	
05/04/2023	177	B205	50	Anturi	88	89	90			
05/04/2023	177	B205	50	RH (%)	89,0	86,4	89,1	88,2	1,22	
05/04/2023	177	B205	50	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	

## Kemiallisesti kuivuvat kappaleet

CEM II/B-M v/s 0,45									
Mittaus pvm.	Valusta [pv]	Kappale	Mittaussyvyys (mm)		1	2	3	KA	Hajonta
10/11/2022	31	O110	Kem.	Anturi	35	36	37		
10/11/2022	31	O110	Kem.	RH (%)	90,9	91,2	89,8	90,6	0,60
10/11/2022	31	O110	Kem.	T(°C)	20,1	20,2	20,2	20,2	0,05
09/01/2023	91	O111	Kem.	Anturi	25	26	27		
09/01/2023	91	O111	Kem.	RH (%)	86,5	87,1	88,1	87,2	0,66
09/01/2023	91	O111	Kem.	T(°C)	21	21	21,1	21,0	0,05
03/04/2023	175	O112	Kem.	Anturi	37	38	39		
03/04/2023	175	O112	Kem.	RH (%)	85,6	86,9	86,1	86,2	0,56
03/04/2023	175	O112	Kem.	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00
CEM II/B-M v/s 0,6									
Mittaus pvm.	Valusta [pv]	Kappale	Mittaussyvyys (mm)		1	2	3	KA	Hajonta
10/11/2022	31	O210	Kem.	Anturi	32	33	34		
10/11/2022	31	O210	Kem.	RH (%)	95,2	95,0	92,8	94,3	1,09
10/11/2022	31	O210	Kem.	T(°C)	17,4	19,7	20,4	19,2	1,28
09/01/2023	91	O211	Kem.	Anturi	28	29	30		
09/01/2023	91	O211	Kem.	RH (%)	90,4	92,9	92,9	92,1	1,18
09/01/2023	91	O211	Kem.	T(°C)	21	21,1	21,2	21,1	0,08
03/04/2023	175	O212	Kem.	Anturi	40	41	42		
03/04/2023	175	O212	Kem.	RH (%)	90,9	90,4	92,1	91,1	0,74
03/04/2023	175	O212	Kem.	T(°C)	21,6	21,3	21,3	21,4	0,14
CEM III/A v/s 0,45									
Mittaus pvm.	Valusta [pv]	Kappale	Mittaussyvyys (mm)		1	2	3	KA	Hajonta
09/11/2022	30	A110	Kem.	Anturi	35	36	37		
09/11/2022	30	A110	Kem.	RH (%)	88,7	88,8	88,6	88,7	0,08
09/11/2022	30	A110	Kem.	T(°C)	20,4	20,3	20,4	20,4	0,05
09/01/2023	91	A111	Kem.	Anturi	31	32	33		
09/01/2023	91	A111	Kem.	RH (%)	85,4	85,3	84,4	85,0	0,45
09/01/2023	91	A111	Kem.	T(°C)	21,2	20,9	21,1	21,1	0,12
03/04/2023	175	A112	Kem.	Anturi	43	44	45		
03/04/2023	175	A112	Kem.	RH (%)	80,1	81,2	80,5	80,6	0,46
03/04/2023	175	A112	Kem.	T(°C)	21,3	21,3	21,3	21,3	0,00
CEM III/A v/s 0,6									
Mittaus pvm.	Valusta [pv]	Kappale	Mittaussyvyys (mm)		1	2	3	KA	Hajonta
09/11/2022	30	A210	Kem.	Anturi	32	33	34		
09/11/2022	30	A210	Kem.	RH (%)	94,2	93,5	92,5	93,4	0,70
09/11/2022	30	A210	Kem.	T(°C)	20,3	20,3	20,3	20,3	0,00
09/01/2023	91	A211	Kem.	Anturi	34	35	36		
09/01/2023	91	A211	Kem.	RH (%)	92,1	91,3	91,5	91,6	0,34
09/01/2023	91	A211	Kem.	T(°C)	21	21,1	21	21,0	0,05
03/04/2023	175	A212	Kem.	Anturi	46	47	48		
03/04/2023	175	A212	Kem.	RH (%)	87,4	86,8	88,0	87,4	0,52
03/04/2023	175	A212	Kem.	T(°C)	21,3	21,3	21,3	21,3	0,00

CEM III/B v/s 0,45									
Mittaus pvm.	Valusta [pv]	Kappale	Mittausvyvyys (mm)		1	2	3	KA	Hajonta
10/11/2022	31	B110	Kem.	Anturi	41	42	43		
10/11/2022	31	B110	Kem.	RH (%)	87,7	89,5	90,0	89,1	0,99
10/11/2022	31	B110	Kem.	T(°C)	20,5	20,5	20,5	20,5	0,00
09/01/2023	91	B111	Kem.	Anturi	37	38	39		
09/01/2023	91	B111	Kem.	RH (%)	84,0	81,5	84,5	83,3	1,31
09/01/2023	91	B111	Kem.	T(°C)	21,2	21,1	21,2	21,2	0,05
03/04/2023	175	B112	Kem.	Anturi	49	50	51		
03/04/2023	175	B112	Kem.	RH (%)	81,8	81,3	82,3	81,8	0,40
03/04/2023	175	B112	Kem.	T(°C)	21,3	21,3	21,3	21,3	0,00
CEM III/B v/s 0,6									
Mittaus pvm.	Valusta [pv]	Kappale	Mittausvyvyys (mm)		1	2	3	KA	Hajonta
10/11/2022	31	B210	Kem.	Anturi	38	39	40		
10/11/2022	31	B210	Kem.	RH (%)	90,1	92,2	93,8	92,0	1,52
10/11/2022	31	B210	Kem.	T(°C)	20,5	20,6	20,7	20,6	0,08
09/01/2023	91	B211	Kem.	Anturi	40	41	42		
09/01/2023	91	B211	Kem.	RH (%)	89,7	89,2	90,1	89,7	0,37
09/01/2023	91	B211	Kem.	T(°C)	21,2	21,0	21,0	21,1	0,09
03/04/2023	175	B212	Kem.	Anturi	52	53	54		
03/04/2023	175	B212	Kem.	RH (%)	88,3	90,6	88,5	89,1	1,03
03/04/2023	175	B212	Kem.	T(°C)	21,3	21,3	21,3	21,3	0,00

## Kastelujaksolle altistetut kappaleet

O1XX										
Mittaus pvm.	Valusta [p]	Kappale	Mittaussyvyys (mm)		1	2	3	KA	Hajonta	
08/11/2022	29	O101	5	RH (%)	63,3	69,5	62,6	63,0	0,35	
08/11/2022	29	O101	20	RH (%)	83,3	83,1	83,0	83,1	0,12	
08/11/2022	29	O101	50	RH (%)	86,5	89,0	89,4	88,3	1,28	
07/12/2022	58	O102	5	RH (%)	53,4	53,8	53,8	53,7	0,19	
07/12/2022	58	O102	20	RH (%)	79,6	77,6	80,0	79,1	1,05	
07/12/2022	58	O102	50	RH (%)	86,3	87,3	89,3	87,6	1,25	
10/01/2023	92	O106	5	Anturi	25	26	27			
10/01/2023	92	O106	5	RH (%)	82	85,5	87,1	84,9	2,13	
10/01/2023	92	O106	5	T(°C)	21	21,1	21,1	21,1	0,05	
10/01/2023	92	O106	20	Anturi	28	29	30			
10/01/2023	92	O106	20	RH (%)	94,2	96,6	97,8	96,2	1,50	
10/01/2023	92	O106	20	T(°C)	21	21,1	21,1	21,1	0,05	
10/01/2023	92	O106	50	Anturi	30	31	32			
10/01/2023	92	O106	50	RH (%)	90,8	91,2	92,6	91,5	0,77	
10/01/2023	92	O106	50	T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05	
08/02/2023	121	O107	5	Anturi	61	62	63			
08/02/2023	121	O107	5	RH (%)	57,0	56,5	57,9	57,1	0,58	
08/02/2023	121	O107	5	T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05	
08/02/2023	121	O107	20	Anturi	64	65	66			
08/02/2023	121	O107	20	RH (%)	85,3	84,3		84,8	0,50	
08/02/2023	121	O107	20	T(°C)	21,1	21,1	21,1	21,1	0,00	
08/02/2023	121	O107	50	Anturi	67	68	69			
08/02/2023	121	O107	50	RH (%)	89,3	89,9	90,8	90,0	0,61	
08/02/2023	121	O107	50	T(°C)	21	21	21,1	21,0	0,05	
04/04/2023	176	O108	5	Anturi	37	38	39			
04/04/2023	176	O108	5	RH (%)	50,4		54,1	52,2	1,84	
04/04/2023	176	O108	5	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	
04/04/2023	176	O108	20	Anturi	40	41	42			
04/04/2023	176	O108	20	RH (%)	75,6	73,7		74,6	0,91	
04/04/2023	176	O108	20	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	
04/04/2023	176	O108	50	Anturi	43	44	45			
04/04/2023	176	O108	50	RH (%)	84,6	84,1	85,2	84,6	0,45	
04/04/2023	176	O108	50	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	



## O2XX

Mittaus pvm.	Valusta [pv]	Kappale	Mittausvyvyys (mm)	1	2	3	KA	Hajonta
09/11/2022	30	O201	5 RH (%)	68,3	65,6	64,6	66,2	1,56
09/11/2022	30	O201	20 RH (%)	89,5	90,7	89,1	89,8	0,68
09/11/2022	30	O201	50 RH (%)	93,9	94,0	94,2	94,0	0,12
07/12/2022	58	O202	5 RH (%)	57,8	57,1	55,5	56,8	0,96
07/12/2022	58	O202	20 RH (%)	84,1	81,8	81,6	82,5	1,13
07/12/2022	58	O202	50 RH (%)	92,7	92,8	93,2	92,9	0,22
10/01/2023	92	O206	5 Anturi	34	35	36		
10/01/2023	92	O206	5 RH (%)	88,8	90,4	90,8	90,0	0,86
10/01/2023	92	O206	5 T(°C)	21,0	21,0	20,9	21,0	0,05
10/01/2023	92	O206	20 Anturi	40	41	42		
10/01/2023	92	O206	20 RH (%)	98,2	97,5	97,9	97,9	0,29
10/01/2023	92	O206	20 T(°C)	21,2	21,0	20,8	21,0	0,16
10/01/2023	92	O206	50 Anturi	37	38	39		
10/01/2023	92	O206	50 RH (%)	96,2	93,8	94,9	95,0	0,98
10/01/2023	92	O206	50 T(°C)	21,0	21,0	21,0	21,0	0,00
09/02/2023	122	O207	5 Anturi	61	62	63		
09/02/2023	122	O207	5 RH (%)	66,1	61,0	63,2	63,5	2,07
09/02/2023	122	O207	5 T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05
09/02/2023	122	O207	20 Anturi	64	65	66		
09/02/2023	122	O207	20 RH (%)	85,2	87,0	85,1	85,8	0,89
09/02/2023	122	O207	20 T(°C)	21,1	21,1	21,1	21,1	0,00
09/02/2023	122	O207	50 Anturi	67	68	69		
09/02/2023	122	O207	50 RH (%)	94,7	95,2	94,4	94,7	0,32
09/02/2023	122	O207	50 T(°C)	21	21	21,1	21,0	0,05
04/04/2023	176	O208	5 Anturi	46	47	48		
04/04/2023	176	O208	5 RH (%)	49,4	49,4	55,7	51,5	2,96
04/04/2023	176	O208	5 T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00
04/04/2023	176	O208	20 Anturi	49	50	51		
04/04/2023	176	O208	20 RH (%)	77,9		77,6	77,8	0,13
04/04/2023	176	O208	20 T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00
04/04/2023	176	O208	50 Anturi	52	53	54		
04/04/2023	176	O208	50 RH (%)	90,4	89,1	88,9	89,5	0,68
04/04/2023	176	O208	50 T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00

A1XX									
Mittaus pvm.	Valusta [p]	Kappale	Mittausvyvyys (mm)		1	2	3	KA	Hajonta
08/11/2022	29	A101	5	RH (%)	58,8	63,3	66,6	61,1	2,25
08/11/2022	29	A101	20	RH (%)	83,4	83,5	81,5	82,8	0,92
08/11/2022	29	A101	50	RH (%)	86,3	88,3	88,1	87,6	0,90
08/12/2022	59	A102	5	RH (%)	49,6	49,3	48,7	49,2	0,37
08/12/2022	59	A102	20	RH (%)	77,7	77	76,3	77,0	0,57
08/12/2022	59	A102	50	RH (%)	84,0	86,4	85,1	85,2	0,98
10/01/2023	92	A106	5	Anturi	43	44	45		
10/01/2023	92	A106	5	RH (%)	80,1	79	81,2	80,1	0,90
10/01/2023	92	A106	5	T(°C)	21,2	21,2	21,1	21,2	0,05
10/01/2023	92	A106	20	Anturi	46	47	48		
10/01/2023	92	A106	20	RH (%)	91,7	90,9	90,4	91,0	0,54
10/01/2023	92	A106	20	T(°C)	21,2	20,9	21,1	21,1	0,12
10/01/2023	92	A106	50	Anturi	49	50	51		
10/01/2023	92	A106	50	RH (%)	85,7	86,4	87,2	86,4	0,61
10/01/2023	92	A106	50	T(°C)	21,1	21,2	21,2	21,2	0,05
08/02/2023	121	A107	5	Anturi	70	71	72		
08/02/2023	121	A107	5	RH (%)	60,6	59,2	64,1	61,3	2,05
08/02/2023	121	A107	5	T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05
08/02/2023	121	A107	20	Anturi	73	74	75		
08/02/2023	121	A107	20	RH (%)	80,8	82,1	80,5	81,1	0,69
08/02/2023	121	A107	20	T(°C)	21,1	21,1	21,1	21,1	0,00
08/02/2023	121	A107	50	Anturi	76	77	78		
08/02/2023	121	A107	50	RH (%)	84,6	87,9	87,6	86,7	1,47
08/02/2023	121	A107	50	T(°C)	21	21	21,1	21,0	0,05
04/04/2023	176	A108	5	Anturi	55	56	57		
04/04/2023	176	A108	5	RH (%)	53,2	53,4	56,6	54,4	1,54
04/04/2023	176	A108	5	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00
04/04/2023	176	A108	20	Anturi	58	59	60		
04/04/2023	176	A108	20	RH (%)	73,7	70,6		72,1	1,56
04/04/2023	176	A108	20	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00
04/04/2023	176	A108	50	Anturi	61	62	63		
04/04/2023	176	A108	50	RH (%)	84,8	83,8	86,4	85,0	1,11
04/04/2023	176	A108	50	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00

A2XX								
Mittaus pvm.	Valusta [p]	Kappale	Mittausvyvyys (mm)	1	2	3	KA	Hajonta
08/11/2022	29	A201	5 RH (%)	69,9	62,6	65,3	64,0	1,35
08/11/2022	29	A201	20 RH (%)	85,1	88,5	87,7	87,1	1,45
08/11/2022	29	A201	50 RH (%)	92,2	94,6	93,6	93,5	0,98
08/12/2022	59	A202	5 RH (%)	58,6	56,4	48,4	54,5	4,38
08/12/2022	59	A202	20 RH (%)	81,5	78,6	81,9	80,7	1,47
08/12/2022	59	A202	50 RH (%)	90,2	90,4	91,2	90,6	0,43
10/01/2023	92	A206	5 Anturi	61	62	63		
10/01/2023	92	A206	5 RH (%)	82,9	80,1	83,8	82,3	1,58
10/01/2023	92	A206	5 T(°C)	21,2	21,3	21,2	21,2	0,05
10/01/2023	92	A206	20 Anturi	64	65	66		
10/01/2023	92	A206	20 RH (%)	95,9	95,2	97,3	96,1	0,87
10/01/2023	92	A206	20 T(°C)	21,3	21,2	21,0	21,2	0,12
10/01/2023	92	A206	50 Anturi	67	68	69		
10/01/2023	92	A206	50 RH (%)	94,5	92,9	94,3	93,9	0,71
10/01/2023	92	A206	50 T(°C)	21,2	21,1	21,0	21,1	0,08
09/02/2023	122	A207	5 Anturi	70	71	72		
09/02/2023	122	A207	5 RH (%)	61,2	59,4	66,4	62,3	2,95
09/02/2023	122	A207	5 T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05
09/02/2023	122	A207	20 Anturi	73	74	75		
09/02/2023	122	A207	20 RH (%)		88,3	84,9	86,6	1,67
09/02/2023	122	A207	20 T(°C)	21,1	21,1	21,1	21,1	0,00
09/02/2023	122	A207	50 Anturi	76	77	78		
09/02/2023	122	A207	50 RH (%)	92,2	93,5	93,9	93,2	0,72
09/02/2023	122	A207	50 T(°C)	21	21	21,1	21,0	0,05
04/04/2023	176	A208	5 Anturi	64	65	66		
04/04/2023	176	A208	5 RH (%)	51,0	49,4	51,6	50,7	0,95
04/04/2023	176	A208	5 T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00
04/04/2023	176	A208	20 Anturi	67	68	69		
04/04/2023	176	A208	20 RH (%)	78,5	76,2	76,3	77,0	1,07
04/04/2023	176	A208	20 T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00
04/04/2023	176	A208	50 Anturi	70	71	72		
04/04/2023	176	A208	50 RH (%)	86,0	89,6	88,2	87,9	1,50
04/04/2023	176	A208	50 T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00

B1XX									
Mittaus pvm.	Valusta [p]	Kappale	Mittausvyvyys (mm)	1	2	3	KA	Hajonta	
09/11/2022	30	B101	5 RH (%)	63,0	63,2	70,7	63,1	0,10	
09/11/2022	30	B101	20 RH (%)	85,9	85,3	84,8	85,3	0,45	
09/11/2022	30	B101	50 RH (%)	87,1	88,9	90,2	88,7	1,27	
08/12/2022	59	B102	5 RH (%)	54,2	56,0	58,5	56,2	1,76	
08/12/2022	59	B102	20 RH (%)	79,9	80,2	80,3	80,1	0,17	
08/12/2022	59	B102	50 RH (%)	85,5	84,6	84,1	84,7	0,58	
10/01/2023	92	B106	5 Anturi	52	53	54			
10/01/2023	92	B106	5 RH (%)	74,2	75,9	76,7	75,6	1,04	
10/01/2023	92	B106	5 T(°C)	21,2	21,1	20,9	21,1	0,12	
10/01/2023	92	B106	20 Anturi	55	56	57			
10/01/2023	92	B106	20 RH (%)	91,9	91,9	91,6	91,8	0,14	
10/01/2023	92	B106	20 T(°C)	21,1	21,2	21,1	21,1	0,05	
10/01/2023	92	B106	50 Anturi	58	59	60			
10/01/2023	92	B106	50 RH (%)	88,4	88,1		88,3	0,15	
10/01/2023	92	B106	50 T(°C)	21,1	21,0	21,3	21,1	0,12	
08/02/2023	121	B107	5 Anturi	87	88	89			
08/02/2023	121	B107	5 RH (%)	58,0	55,7	55,7	56,5	1,06	
08/02/2023	121	B107	5 T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05	
08/02/2023	121	B107	20 Anturi	90	91	92			
08/02/2023	121	B107	20 RH (%)	83,9	81,3	80,7	82,0	1,38	
08/02/2023	121	B107	20 T(°C)	21,1	21,1	21,1	21,1	0,00	
08/02/2023	121	B107	50 Anturi	93	94	95			
08/02/2023	121	B107	50 RH (%)	87,8	87,5	87,5	87,6	0,16	
08/02/2023	121	B107	50 T(°C)	21	21	21,1	21,0	0,05	
04/04/2023	176	B108	5 Anturi	73	74	75			
04/04/2023	176	B108	5 RH (%)	49,9	51,1	51,8	51,0	0,79	
04/04/2023	176	B108	5 T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	
04/04/2023	176	B108	20 Anturi	76	77	78			
04/04/2023	176	B108	20 RH (%)	71,2	73,4	73,4	72,6	1,05	
04/04/2023	176	B108	20 T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	
04/04/2023	176	B108	50 Anturi	79	80	81			
04/04/2023	176	B108	50 RH (%)	84,0	82,7	83,7	83,5	0,55	
04/04/2023	176	B108	50 T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00	

B2XX									
Mittaus pvm.	Valusta [p]	Kappale	Mittausvyvyys (mm)		1	2	3	KA	Hajonta
09/11/2022	30	B201	5	RH (%)	63,5	65,2	62,4	63,7	1,15
09/11/2022	30	B201	20	RH (%)	92,2	91,9	90,8	91,6	0,60
09/11/2022	30	B201	50	RH (%)	89,5		96,5	93,0	3,92
08/12/2022	59	B202	5	RH (%)	50,8	57,4	51,4	53,2	2,98
08/12/2022	59	B202	20	RH (%)	85,3	83,3	83,9	84,2	0,84
08/12/2022	59	B202	50	RH (%)	91	90,3	92,3	91,2	0,83
11/01/2023	93	B206	5	Anturi					
11/01/2023	93	B206	5	RH (%)	73,6	77,7	79,1	76,8	2,33
11/01/2023	93	B206	5	T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05
11/01/2023	93	B206	20	Anturi					
11/01/2023	93	B206	20	RH (%)	93,4	97,6	98,8	96,6	2,32
11/01/2023	93	B206	20	T(°C)	21,1	21,1	21,1	21,1	0,00
11/01/2023	93	B206	50	Anturi					
11/01/2023	93	B206	50	RH (%)	95,9	93,5	93,6	94,3	1,11
11/01/2023	93	B206	50	T(°C)	21,2	21,0	21,0	21,1	0,09
09/02/2023	122	B207	5	Anturi	87	88	89		
09/02/2023	122	B207	5	RH (%)	60,8	61,2	57,6	59,9	1,63
09/02/2023	122	B207	5	T(°C)	21,1	21,1	21	21,1	0,05
09/02/2023	122	B207	20	Anturi	90	91	92		
09/02/2023	122	B207	20	RH (%)	89,0	86,8	87,3	87,7	0,95
09/02/2023	122	B207	20	T(°C)	21,1	21,1	21,1	21,1	0,00
09/02/2023	122	B207	50	Anturi	93	94	95		
09/02/2023	122	B207	50	RH (%)	91,7	93,2	91,6	92,2	0,74
09/02/2023	122	B207	50	T(°C)	21	21	21,1	21,0	0,05
04/04/2023	176	B208	5	Anturi	82	83	84		
04/04/2023	176	B208	5	RH (%)	47,5	50,0	55,6	51,0	3,38
04/04/2023	176	B208	5	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00
04/04/2023	176	B208	20	Anturi	85	86	87		
04/04/2023	176	B208	20	RH (%)	78,9	78,3	79,2	78,8	0,38
04/04/2023	176	B208	20	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00
04/04/2023	176	B208	50	Anturi	88	89	90		
04/04/2023	176	B208	50	RH (%)	89,1	88,0	91,8	89,6	1,59
04/04/2023	176	B208	50	T(°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	0,00

## Punnituskokeet

"tin can method"	Valu:	10/10/2022										
Hahduttava pinta-ala (m <sup>2</sup> ):		0,008992024										
Pinnat aukaistu:		13/02/2023		126	päivää	valuusta						
Punnitus pvm.		13/02/2023	15/02/2023	22/02/2023	04/03/2023	10/03/2023	15/03/2023	22/03/2023				
Päivää pinnan aukaisusta	0	2	9	16		25	30	37				
Sekuntia pinnan aukaisusta	0	172800	777600	1382400		2160000	2592000	3196800				
V/s	0	416	882	1176		1470	1610	1788				
Muutos alkuperäisestä (kg)	2548,2	2546,5	2545,3	2544,3		2543,6	2542,4	2542,1				
Muutos alkuperäisestä (kg/m <sup>2</sup> )	0	0,0017	0,0029	0,0039		0,0046	0,0058	0,0061				
Muutos edellisestä (g/pv)	0,000	0,189	0,323	0,434		0,512	0,645	0,678				
		0,095	0,036	0,027		0,020	0,022	0,018				
	O2XX	2572,5	2570,8	2567,6		2566,3	2564,8	2563,9				
Muutos alkuperäisestä (kg)	0	0,0017	0,0049	0,0062		0,0077	0,0086	0,0099				
Muutos alkuperäisestä (kg/m <sup>2</sup> )	0,000	0,189	0,545	0,689		0,856	0,956	1,101				
Muutos edellisestä (g/pv)		0,095	0,061	0,043		0,034	0,032	0,030				
	A1XX	2620,9	2619,9	2619,1		2618,5	2617,7	2617,4				
Muutos alkuperäisestä (kg)	0	0,001	0,0018	0,0024		0,0032	0,0035	0,0039				
Muutos alkuperäisestä (kg/m <sup>2</sup> )	0,000	0,111	0,200	0,267		0,356	0,389	0,434				
Muutos edellisestä (g/pv)		0,056	0,022	0,017		0,014	0,013	0,012				
	A2XX	2617,5	2616,1	2614,4		2613,2	2612,5	2611,6				
Muutos alkuperäisestä (kg)	0	0,0014	0,0031	0,0043		0,005	0,0059	0,0065				
Muutos alkuperäisestä (kg/m <sup>2</sup> )	0,000	0,156	0,345	0,478		0,556	0,656	0,723				
Muutos edellisestä (g/pv)		0,078	0,038	0,030		0,022	0,022	0,020				
	B1XX	2566,8	2565,7	2564,4		2563,9	2563	2562,3				
Muutos alkuperäisestä (kg)	0	0,0011	0,0024	0,0029		0,0038	0,004	0,0045				
Muutos alkuperäisestä (kg/m <sup>2</sup> )	0,000	0,122	0,267	0,323		0,423	0,445	0,500				
Muutos edellisestä (g/pv)		0,061	0,030	0,020		0,017	0,015	0,014				
	B2XX	2561,5	2560	2558,3		2557,3	2556,2	2554,8				
Muutos alkuperäisestä (kg)	0	0,0015	0,0032	0,0042		0,0053	0,0061	0,0067				
Muutos alkuperäisestä (kg/m <sup>2</sup> )	0,000	0,167	0,356	0,467		0,589	0,678	0,745				
Muutos edellisestä (g/pv)		0,083	0,040	0,029		0,024	0,023	0,020				