



Alexis Gray

# Vihreiden betonien kosteusmittaukset ja kuivuminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinööriyö

23.3.2023

## **Alkusanat**

Haluan erityisesti kiittää tekniikan tohtori Leif Wirtasta Ramboll Finland Oy:stä, jossa hän toimii johtavana asiantuntijana. Leif antoi tälle työlle aiheen ja toimi myös sen ohjaajana. Ohjaajana hänen neuvonsa olivat äärimmäisen arvokkaita. Erityisen painoarvon Leifin neuvoille antaa hänen vankka tietämys betonista, sekä rakennusfysiikasta ja -kemiasta.

Haluan kiittää myös Mika Tulimaata ja Mika Autiota Rudus Oy:stä, sekä Risto-Matti Salmea ja Jari Salokangasta Wiiste Oy:stä. Tutkittavat betonimassat valmistettiin ja valettiin Ruduksen betonilaboratoriossa. Wiiste Oy toimitti tutkitut valuun asennettavat ja etäluettavat kosteusmittarit.

Lisäksi kiitän Juha Virtasta Metropoliaa työn ohjauksesta ja koejärjestelyille tarpeellisten tilojen järjestämisestä.

# Tiivistelmä

Tekijä: Alexis Gray  
Otsikko: Vihreiden betonien kosteusmittaukset ja kuivuminen  
Sivumäärä: 44 sivua + 3 liitettä  
Aika: 23.3.2023

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Rakennustekniikka  
Ammatillinen pääaine: Rakennetekniikka  
Ohjaajat: Johtava asiantuntija Leif Wirtanen  
Lehtori Juha Virtanen

---

Rakentamisessa siirrytään tulevaisuudessa yhä enemmän hiilidioksidipäästöiltään pienempiin, eli vihreisiin betoneihin. Tässä työssä tutkittiin kahden erityyppisen vihreän betonin kuivumista ja verrattiin niitä vastaaviin tavanomaisiin betoneihin. Tutkitut betonit ovat tyyppillisiä välipohjavaluissa.

Yksi hiilidioksidipäästöjen vähennystapa betonin tuotannossa on käyttää teollisuuden sivuvirtoja, kuten masuunikuonaa, betonin raaka-aineena. Masuunikuona hidastaa betonin alkusitoutumista ja siten teoriassa kuivumista kokonaisuudessaan. Betonin kuivuminen on usein myös aikataulua rajoittava tekijä ja rakennusprojekteissa betonin lyhyillä kuivumisajoilla voidaan saada merkittäviä säästöjä.

Tutkitut vihreät betonit kuivuvat tulosten perusteella nopeammin kuin vastaavat tavanomaiset betonit.

Kuivumisen lisäksi tutkittiin jaksoittain luettavien ja valuvaiheessa betoniin asennettavien mittarien käyttöä vihreiden betonien kosteuden mittauksessa. Jaksoittain luettavat mittarit ovat jatkuvasti betonissa ja niiden tulokset voidaan lukea langattomasti. Itse mittarien luku ei vaadi porareikiä, tasaantumisaikoja, tai pätevytynyttä kosteusmittaajaa. Mittausohjelman suunnittelu ja tulosten tulkinta edellyttävät kuitenkin aiheeseen perehtyneen ammattilaisen.

Tavanomaisilla betoneilla jaksoittain luettavien mittarien ja rakennusalalla yleisesti hyväksytyyn ja tunnetun porareikämenetelmän välillä ei havaittu merkittävää eroa. Vihreiden betonien mittauksissa jaksoittain luettavat mittarit antoivat kuitenkin korkeampia kosteusmittaustuloksia. Tulosten perusteella vihreiden betonien kuivumista seurattaessa jaksoittain luettavilla kosteusmittareilla on hyvä tehdä ajoittain mittauksia esimerkiksi porareikämenetelmällä tulosten tarkentamiseksi.

Avainsanat: betonin kosteusmittaus, kosteus, vihreä betoni, masuunikuona, jauhettu granuloitu masuunikuona

## Abstract

Author: Alexis Gray  
Title: Drying of green concrete and measurement of its humidity  
Number of Pages: 44 pages + 3 appendices  
Date: 23<sup>rd</sup> of March 2023

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Civil Engineering  
Professional Major: Structural Engineering  
Supervisors: Managing Consultant Leif Wirtanen  
Senior Lecturer Juha Virtanen

---

Construction industry is increasingly shifting to green concretes, concretes with a smaller carbon footprint. In this thesis the drying of two different kinds of green concrete were studied and compared with the corresponding conventional concretes. The studied concretes are commonly used in intermediate floor slabs.

One way of lowering carbon emissions in concrete production is by using industrial by-products like blast furnace slag as a raw material. The studied green concretes used ground granulated blast furnace slag. Blast furnace slag delays the initial curing and thus, in theory also the whole drying process. In construction significant savings can be achieved with shorter drying times for concrete and sufficient drying is often a limiting factor of timetables.

According to the results of this study, the studied green concretes dry quicker than their corresponding conventional concretes.

In addition to the drying, also the measurement of humidity in concrete with periodically read sensors that are installed in the casting stage was studied. The periodically read sensors are permanently installed in the concrete and can be read wirelessly, so measurement does not require drilling, equalization time or certified personnel. Though the planning of measurements and the correct interpretation of the results require an experienced professional.

In conventional concretes no significant difference was detected between the results of periodically read sensors and the widely accepted and known borehole method. However, when measuring humidity in green concrete the periodically read sensors gave higher results. According to the results, when determining the drying of green concretes with periodically read sensors, it would be beneficial to verify the results during the drying process with for example the borehole method.

Keywords: Humidity measurement in concrete, Moisture, Damp, Green concrete, Blast furnace slag, Ground granulated blast furnace slag

# Sisällys

Alkusanat	2
Johdanto	8
1 Kosteus	9
1.1 Käsitteitä	9
1.2 Kosteuslähteet	10
1.2.1 Sisäiset	10
1.2.2 Ulkoiset	10
1.3 Kosteuden siirtyminen	10
1.4 Kosteushaitat	11
2 Kosteuden mittaaminen ja arviointi	12
2.1 Mittaus- ja arviointimenetelmät	12
2.1.1 Porareikämenetelmä	13
2.1.2 Näytepalamenetelmä	14
2.1.3 Jaksoittain luettava seurantamittaus	15
2.1.4 Jatkuvatoiminen seurantamittaus	15
2.1.5 Kuivautus-punnitus-menetelmä	16
2.1.6 Betonin kosteuden arviointi pintakosteudenosoittimilla	16
2.2 Mittauspisteet ja -syvyydet	17
3 Betonin koostumus	18
3.1 Sideaineet	18
4 Betonimassan kuivuminen	20
4.1 Veden kemiallinen sitoutuminen, eli hydrataatio	20
4.2 Betonin kuivuminen veden haihtumisena	21
4.3 Kuivumiseen vaikuttavat tekijät	21
5 Betonirakenteiden kuivumisaika-arviot	22
5.1 Laskentamenetelmät	22
5.2 Kuivumisaika-arvio BY 2020 -ohjelmalla	23
6 Tutkimusjärjestelyt	25

7	Tutkitut betonimassat	29
7.1	Tavanomaiset lattiabetonit, vertailumassat	29
7.2	Vihreät betonimassat, tutkittavat massat	30
8	Tutkitut jaksoittain luettavat kosteusmittarit	30
8.1	Porareikämittaukset, vertailumittaus	30
8.2	Jaksoittain luettavat valuun asennettavat mittarit, tutkittavat mittarit	31
9	Tulokset	32
9.1	Vihreiden ja tavanomaisten betonien kuivuminen	32
9.2	Jaksoittain luettavien mittarien ja porareikämittausten vertailu	35
10	Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	39
10.1	Vihreiden ja tavanomaisten betonien kuivuminen	39
10.2	Jaksoittain luettavien mittarien ja porareikämittausten vertailu	39
11	Yhteenveto	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

Lähteet	44
---------	----

## Liitteet

Liite 1: Tutkittujen betonien tiedot

Liite 2: Kosteus- ja olosuhdemittaustulokset

Liite 3: Kuivumisaika-arviot

## Lyhenteet

a	absoluuttinen kosteus, g/m <sup>3</sup>
RH tai % RH	suhteellinen kosteus prosentteina
t	lämpötila Celsiusasteina
vrk	vuorokausi
vko	viikko

## Johdanto

Rakennusalalla kestävän kehityksen huomioiminen ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen arkipäiväistyy. Betonissa käytettävä sementti on merkittävä hiilidioksidin lähde rakentamisessa ja Suomessa sen valmistamisessa vapautuu noin 700 kg hiilidioksidia jokaista tuotettua sementtiklinkkeritonnia kohti. Lisäksi betonin ja sen muiden raaka-aineiden valmistamisessa, sekä kuljetuksissa syntyy hiilidioksidipäästöjä. Tästä syystä vähähiiliset betonit ovat kasvattaneet suosiotaan. Yksi tapa pienentää betonin hiilijalanjälkeä on käyttää masuunikuonaa betonin, tai sementin seosaineena. [1.]

Tutkituissa vihreissä betoneissa on käytetty masuunikuonaa betonin ja/tai sementin seosaineena. Masuunikuona hidastaa betonin alkusitoutumista ja siten teoriassa myös kuivumisaika olisi masuunikuonaa käytettäessä pidempi. Tällä hetkellä kuivumisaikoja pyritään lyhentämään pääasiassa sementin määrän kasvattamisella, vesisementtisuhteen alentamisella ja hyvällä työmaan olosuhteidenhallinnalla. Rakennusprojekteissa lyhyillä betonin kuivumisajoilla voidaan saada merkittäviä säästöjä. Lisäksi betonivalujen riittävä kuivuminen on työmaalla usein aikataulua rajoittava tekijä.

Sementin reaktionopeus vaikuttaa alkuvaiheen kovettumisen ja siten kuivumisen nopeuteen sekä tavanomaisessa betonissa että vihreissä betoneissa. Osassa betoneista on masuunikuonaa myös sementin lisäaineena. Tämän tutkimuksen betonimassojen sementit olivat tyyppisiä CEM I, CEM II ja CEM III.

Nykyään työmailla käytetään yleisesti valuun asennettavia kosteusmittareita, joiden tulokset tarkistetaan porareikä- tai näytepalamenetelmillä, kun haluttu kuivumisaste on saavutettu. Näin voidaan vähentää tarkistusmittausten määrää.

Tässä työssä on verrattu tavanomaisten ja vihreiden betonilaatujen kuivumisaikoja samoissa kuivumisolosuhteissa. Samalla on verrattu porareikämittausten ja valuun asennettavien mittareiden antamia tuloksia eri betonilaaduissa.



# 1 Kosteus

## 1.1 Käsitteitä

Ilman kosteus tarkoittaa ilmassa olevan vesihöyryn määrää ja sen pitoisuus voidaan ilmoittaa absoluuttisena tai suhteellisena kosteutena, sekä vesihöyryn osapaineena. Rakentamisessa käytetään käytännössä lähinnä absoluuttista tai suhteellista kosteutta.

Absoluuttisella kosteudella tarkoitetaan veden massaa suhteessa tiettyyn toiseen aineeseen, yleensä kuivaan ilmaan. Veden yksikkönä käytetään sen massaa, mutta sen aineen, johon veden massaa verrataan, yksikkönä voidaan käyttää joko tilavuutta tai massaa. Rakentamisessa absoluuttisen kosteuden yksikkönä käytetään yleensä vesihöyryn massaa kuutiossa ilmaa ( $\text{g}/\text{m}^3$ ). [2, s. 68.]

Suhteellinen kosteus on ilman sisältämän kosteuden suhde suurimpaan mahdolliseen saman lämpöisen ilman sisältämään kosteusmäärään prosentteina. Betonirakenteiden suhteellisella kosteudella tarkoitetaan betonin huokostilan ilman suhteellista kosteutta. [2, s. 69.]

Rakennekosteus on rakenteiden sisältämä kosteus, joka pyrkii tasapainotilaan ympäristön kanssa, eli jonka rakenne voi luovuttaa ympäristöönsä kuivuessaan. Rakenne voi siis sitoa itseensä kosteutta ympäristöstään ja sitten luovuttaa rakennekosteutta ympäristöönsä. Aineen kykyä sitoa ympäristön kosteutta itseensä ja luovuttaa sitä takaisin ympäristöönsä kutsutaan hygroskooppisuudeksi. Hygroskooppinen aine imee ympäröivästä ilmasta kosteutta, kun ilman kosteus on riittävän suuri kyseiselle aineelle. Hygroskooppinen aine voi myös luovuttaa kosteutta ympäröivään ilmaan, jos ilmankosteus on riittävästi matalampi aineeseen verrattuna. [2, s. 78; 3, s. 2.]

## 1.2 Kosteuslähteet

Useimmiten kosteuslähteet rakentamisessa jaetaan kahteen pääryhmään, sisäisiin ja ulkoisiin kosteuslähteisiin.

### 1.2.1 Sisäiset

Sisäiset kosteuslähteet ovat rakentamisesta aiheutuvaa kosteuden tuomista rakenteisiin, kuten rakennusmateriaaleissa oleva ja rakenteiden valmistamisessa käytettävä vesi. Monet rakennusmateriaalit sisältävät kosteutta valmistusprosessista tai asennustavasta johtuen, esimerkiksi laastit, maalit ja betoni. Jotkin laastit edellyttävät alustan kostuttamista asennettaessa ja betonin jälkihoito saattaa joissain tapauksissa edellyttää sen pinnan kastelemista.

### 1.2.2 Ulkoiset

Ulkoiset kosteuslähteet ovat rakentamisesta riippumattomia kosteuslähteitä, joista sade on merkittävimpiä. Ilmastonmuutoksen seurauksena sateen määrä ja sateiden intensiteetti on lisääntynyt. Sateen aiheuttamaa kosteusrasitusta pyritään vähentämään sääsuojauksella. Sääsuojauksessa tulee ottaa huomioon vuodenaikojen vaikutukset, kuten lumen kinostuminen ja kulkeutuminen tuulen mukana.

## 1.3 Kosteuden siirtyminen

Kosteutta voi siirtyä höyryfaasissa diffuusion ja konvektion avulla. Diffuusiossa vesihöyryn pitoisuus pyrkii tasaantumaan siirtymällä korkeamman pitoisuuden alueelta matalamman pitoisuuden alueelle. Siirtymistä aineessa ja eri aineiden rajapinnoilla rajoittaa aineiden vesihöyrynvastus. Konvektiossa ilmankosteus siirtyy esimerkiksi lämpötilaerojen takia liikkuvan ilmassan mukana. Myös paine-ero rakenteen yli saa ilmassan ja sen mukana kosteuden liikkumaan rakenteesta tai tilasta toiseen, esimerkiksi rakennuksissa, joissa on koneellinen

ilmanvaihto. Kun kosteutta sisältävä ilma kohtaa riittävän viileän pinnan kosteus voi kondensoitua pinnalle. [2, s. 70...73; 4, s. 70...74.]

Nestefaasissa ollessaan kosteus voi siirtyä painovoimaisesti, kuten sateena tai valuvana vetenä ja kapillaarisesti. Toisinaan myös esimerkiksi ilmavirran mukana. Kapillaarisesti vesi voi siirtyä kaikkiin suuntiin, myös ylöspäin. Korkeus, jonka vesi voi aineessa liikkua ylöspäin riippuu mm. aineen kapillaarisuudesta ja rakenteesta. Kapillaarisesti kosteutta voi siirtyä suuria määriä aineessa. Esimerkiksi betonirakenteissa kosteus voi siirtyä kapillaarisesti.

Lisäksi rakentamisessa sää voi usein olla kosteusrasituksen aiheuttaja, etenkin jos kyseessä ei ole sisätilojen remontointi. Tuuli voi kuljettaa sadetta ja lunta sääsuojauksen aukoista varsinkin avoimessa maastossa sijaitsevilla työmailla. Tuulen aiheuttamana voi syntyä kosteusrasitusta myös valmiisiin rakennuksiin.

#### 1.4 Kosteushaitat

Yksi tämän työn kannalta oleellinen vauriomekanismi on pinnoitteiden ja päällysteiden, sekä pintamateriaalien liimojen vaurioituminen asennettaessa vielä liian kosteiden betonirakenteiden päälle. Sen lisäksi että materiaalit eivät välttämättä toimi halutulla tavalla vaurioituttuaan, voi liiallinen kosteus aiheuttaa myös haitallisia päästöjä, eli emissioita. Lattianpäällysteille kriittinen kosteusraja-arvo on yleensä 85...90 % RH ja liimatilassa kosteus ei yleensä saisi nousta pitkäaikaisesti yli 85 % RH. [5, s. 21...30; 6, s.199...201.]

Työmaalle välipohjavalujen riittämätön kuivuminen ennen seuraavia työvaiheita, voi tuoda ongelmia myös kuivumiskutistumisen muodossa, joka voi esimerkiksi vaurioittaa valun päälle asennettuja rakenteita. Lisäksi valetun betonirakenteen halkeilu ja käyristyminen voi aiheuttaa haasteita työmaalle.

## 2 Kosteuden mittaaminen ja arviointi

### 2.1 Mittaus- ja arviointimenetelmät

Seuraavissa kappaleissa esitellään yleisiä kosteuden mittaus- ja arviointimenetelmiä. Esitetyt menetelmät ovat rakennusalalla vakiintuneita kosteusmittausmenetelmiä, ne ovat hyvin dokumentoituja ja alalla hyvin tunnettuja, jonka takia ne on yleisesti käytössä. Esitetyt menetelmät ovat normaalissa rakentamisessa esiintyvissä tilanteissa myös käytännöllisimpiä. Muitakin mittaus- ja arviointimenetelmiä on olemassa, esimerkiksi kalsiumkarbidimittaus, vastusmittaus ja lämpökameran käyttö kosteiden kohtien löytämiseksi ja niistä saa tietoa alan kirjallisuudesta ja laitevalmistajien aineistosta.

Porareikä-, koepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmä ovat suhteellisen hitaita ja luonteeltaan rakenteita rikkovia. Lisäksi menetelmät vaativat pätevöityneen mittajan, vähintään ohjaamaan mittauksen suoritusta.

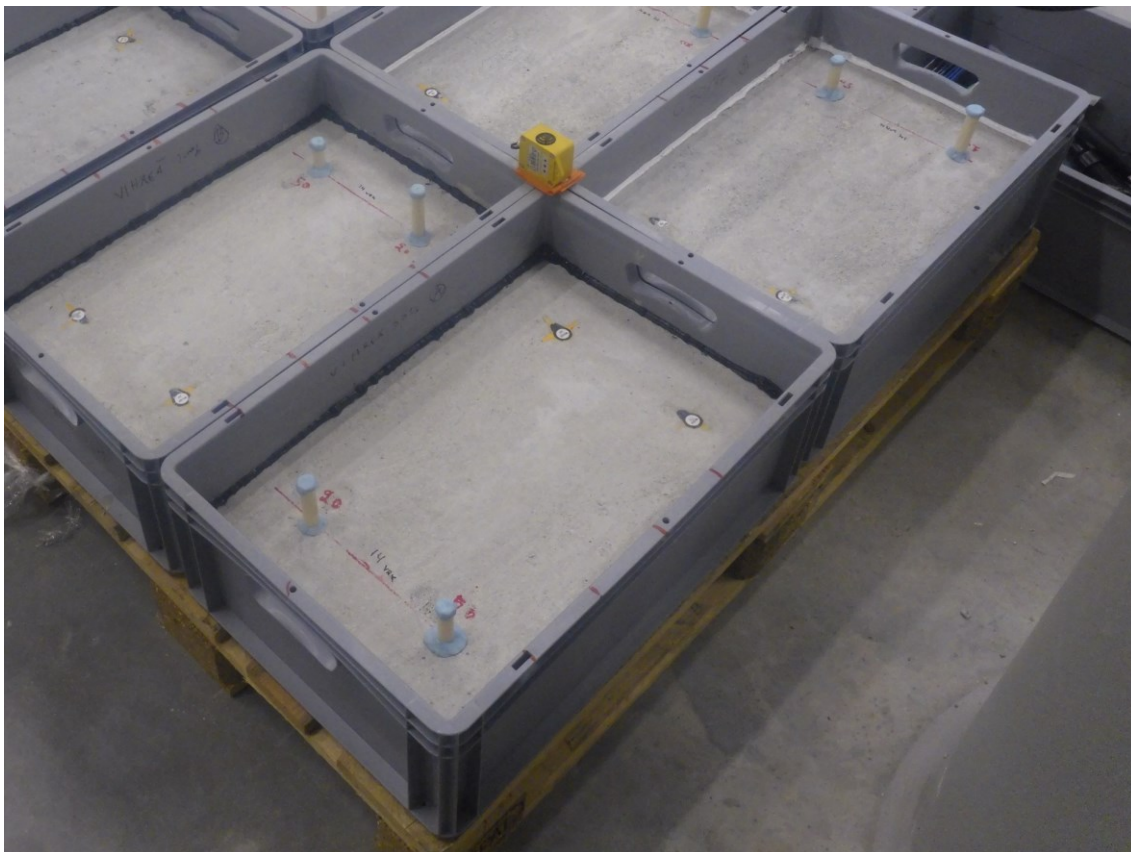
Mittausmenetelmät ilmoittavat betonin sisältämän kosteuden, joko painoprosentteina, tai suhteellisena kosteutena. Suhteellisena kosteutena saadut tulokset ovat käyttökelpoisempia, sillä esimerkiksi pinnoitettavuudelle annetut raja-arvot ovat yleensä annettu juuri suhteellisen kosteuden arvoina. Painoprosentteina saatuja arvoja ei tulisi muuttaa suhteellisiksi kosteuksiksi muuntotaulukoiden avulla, sillä eri betonilaaduilla on omat muuntotaulukot ja arvot vaihtelevat lämpötilan, sekä sen mukaan onko rakenne kuivumassa vai kostumassa, joten mahdollisuudet virheellisiin muunnoksiin ovat erittäin suuret.

Tässä työssä käytettiin porareikämenetelmää ja valuun asennettavia jaksoittain luettavia mittareita. Molemmista menetelmistä on kerrottu seuraavissa kappaleissa tarkemmin yhdessä muiden menetelmien kanssa.

### 2.1.1 Porareikämenetelmä

Porareikämittausmenetelmällä saadaan betonin suhteellinen kosteus mitattua halutulta syvyydeltä. Menetelmän rajoituksena on tasainen 18...25 °C:n lämpötila ja mittausreiän minimi halkaisija 10 mm. Lämpötilan ollessa alle 18 °C, tai yli 25 °C, tai kun mittapään ja mittausreiän yläpuolisen ilman lämpötilassa on yli 2 °C:n ero, mittaustarkkuus kärsii ja menetelmän mittaustulosta voidaan pitää vain suuntaa antavana. [7, s. 13; 8, s. 5; 9, s. 82...84.]

Mittausreikä porataan halutun syvyydeksi ja valitsemalla useita mittaussyvyyksiä voidaan rakenteelle määrittää kosteusprofiili. Poraus tehdään kuivamenetelmällä, porareikä puhdistetaan ja syvyys tarkistetaan mitalla. Porattuun reikään asennetaan mittalaitteen valmistajan putki tai sähköputki. Usein käytetään 16 mm poranterää ja 16 mm sähköputkea, tai mittalaitteen valmistajan putkea ja sille määriteltyä poranterän halkaisijaa. Reikä ja putki puhdistetaan huolellisesti ja putki tiivistetään paikoillaan vesihöyryntiiviillä kitillä sekä tyvestä, että päästä (Kuva 1). Mittausputken annetaan tasaantua vähintään 3 vrk ennen mittauksen suorittamista. Mittausputken tasaantumisen jälkeen mittapää asennetaan tiiviisti mittausputkeen ja annetaan tasaantua riittävän pitkään. Mittapään tasaantumisaikaan vaikuttaa muun muassa mittapäätyyppi, betonin laatu, mutta nopeimmillaan se on tyypillisesti n. 1 tunti. [7, s. 13...16; 8 s. 5...9.]



Kuva 1. Mittausputket asennettuna ja tasaantumassa. Putkien ovat tiivistetty päistä ja tyvistään. Mittaputkia vastapäätä näkyy jaksoittain luettavat mittarit

### 2.1.2 Näytepalamenetelmä

Näytepalamenetelmässä pintabetonia poistetaan tasoon, joka on noin 5 mm haluttua mittaussyvyyttä ylempänä. Poistaminen voidaan tehdä poraamalla 10...16 mm poranterällä piiri näytteenottosyvyyteen ulottuvia reikiä tai käyttämällä kuivaporauskruunua. Porauksen jälkeen betonipinta poistetaan piikkaamalla, piikkauskoneella tai käsityökaluilla, paljastaen näytteenottopinta, joka on 5 mm mittaussyvyyttä lähempänä betonin yläpintaa. Näytteenottopinnan syvyys tarkistetaan mittaamalla. Jotta tulokset olisivat mahdollisimman edustavia, näytepalat otetaan heti pintabetonin poiston jälkeen ja vähintään n. 5 mm etäisyydeltä porauspinnasta. Lähempää porauspintoja ei näytettä voida ottaa, koska poraaminen lämmittää betonia. Mittauskolon muodolla ja koolla ei muuten ole merkitystä.

Näytepaloja kerätään puhtaaseen ja kuivaan koeputkeen n. 1/3 koeputken tilavuudesta. Koepalojen tulisi olla riittävän suuria. Pölymäistä ainesta, tai näytepaloja, joissa on erityisen suuria runkoainekappaleita, ei tulisi kerätä lainkaan. Lämmitettyä betonia tutkittaessa näytepalojen tulisi olla mahdollisimman suuria koeputken koko huomioiden. Näytepalat siirretään välittömästi koeputkeen mittapään kanssa ja koeputki suljetaan vesihöyryntiiviisti. Mittapään kosteuskapasiteetin tulee olla riittävän pieni, jotta se ei sido itseensä merkittävää määrää näytepalojen sisältämästä kosteudesta. Koeputket sisältöineen siirretään vakiolämpötilaan tasaantumaan, mittaustarkkuuden mukaan, 5...12 tunniksi. Jos mitattavan betonin lämpötila poikkeaa näytteenoton aikana sen normaalista käyttölämpötilasta, tulee tasaantumisaikaa pidentää. Lisäksi tiivis betoni vaatii pidemmän tasaantumisaajan kuin huokoinen betoni. [7, s. 17...18; 8 s. 10...12.]

### 2.1.3 Jaksoittain luettava seurantamittaus

Kun rakenteen kosteuspitoisuudesta halutaan tietoa toistuvasti ja mittaustulokset nopeasti, on usein kannattavaa asentaa mittalaitteet, tai mittausputki suoraan mitattavaan betonirakenteeseen. Asennus voidaan tehdä valun yhteydessä, tai porareikäperiaatteella kovettuneeseen betoniin. Jos mittari asennetaan tuoreeseen betoniin, täytyy varmistaa mittarin soveltuvuus betonimassassa vallitseviin haastaviin olosuhteisiin. Mittaus tapahtuu paikan päällä mittauspisteellä. Mittauksen yhteydessä dokumentoidaan myös ympäristön olosuhteet, joiden tulee olla mittalaitteen valmistajan ilmoittamien raja-arvojen sisällä. Rakenteeseen asennettuja mittaputkia käytettäessä tulee varmistaa mittareiden riittävä tasaantuminen mittapisteen olosuhteisiin. Valuun asennettavat mittalaitteet ovat yleensä tasapainossa ympäristönsä kanssa, joten ne voidaan lukea normaalisti heti. [8, s. 13...14.]

### 2.1.4 Jatkuva toiminen seurantamittaus

Jatkuva toiminen kosteusmittaus tapahtuu kuten jaksoittainen kosteusmittaus rakenteeseen kiinnitettävillä mittalaitteilla, mutta mittalaitteet päivittävät mittaustuloksensa automaattisesti tiedonkeruuyksikköön tai -järjestelmään, eikä käyttäjän

ole tarpeellista käydä mittauspisteellä. Käyttäjät voivat usein määritellä tulosten mittaus- ja tallennustiheyden. [8, s. 14.]

### 2.1.5 Kuivautus-punnitus-menetelmä

Kuivautus-punnitus-menetelmällä saadaan betonin kosteus painoprosentteina eli veden massa suhteessa kuivan betonin massaan. Tulos saadaan punnitsemalla näyte ensin kosteana, sitten kuivana. Kosteusprosentti on kostean ja kuivan näytteen painon erotuksen ja kuivapainon suhde. Menetelmä sopii kaikille yleisille rakennusmateriaaleille.

Betonin kosteuspitoisuus painoprosentteina saadaan ottamalla betonirakenteesta näytepala tutkittavalta syvyydeltä. Näytepala kuljetetaan punnittavaksi astiassa tai pussissa, joka estää kosteuden haihtumisen. Etenkin astian valinnassa on huomioitava, että se ei saa olla huomattavasti isompi kuin näyte, sillä silloin astian sisällä olevaan ilmaan pääsee haihtumaan kosteutta näytteestä. Betoninäytteet kuivataan uunissa 105 °C, kunnes vuorokaudessa tapahtuva painonvähennys on alle 0,1 % näytteen painosta kosteana. Kosteuspitoisuus painoprosentteina saadaan syöttämällä saadut massat kaavaan 1. [7, s. 8; 10, s. 342.]

$$\text{kosteus painoprosentteina} = \frac{\text{paino kosteana} - \text{paino kuivana}}{\text{paino kuivana}} \times 100 \% \quad (1)$$

### 2.1.6 Betonin kosteuden arviointi pintakosteudenosoittimilla

Pintakosteudenosoittimien eli pintakosteusmittareiden toiminta perustuu kosteuden vaikutuksesta tapahtuvaan mitattavan materiaalin sähköisten ominaisuuksien muuttumiseen. Pintakosteusmittareiden suurimpia etuja ovat mahdollisuus mitata ilman rakenteiden rikkomista ja kyky havaita kosteuden muutokset pintarakenteiden, esimerkiksi vedeneristeen tai maton, alta. Pintakosteusmittareilla ei tosin saada ilman rakennetyyppikohtaista kalibrointia konkreettisia kosteusarvoja ja niitä tulisi käyttää vain suuntaa antavana mittauslaitteina, jolla haetaan mielenkiintoiset kohdat tarkempia kosteusmittauksia varten. Kosteuden lisäksi



materiaalien muut ominaisuudet vaikuttavat huomattavasti pintakosteusmittarien antamiin lukemiin, mitattavan rakenteen pinnan epätasaisuudet ja epähomogeenisuudet aiheuttavat tulokseen hajontaa ja eri pintakosteudenosoitintyyppit ja -mallit antavat samalle näytteelle eri arvoja. Mitattavan materiaalin sisällä oleva kosteus tai muut materiaalit, kuten raudoitukset, kiinnikkeet, vesi- ja sähköjohdot vaikuttavat myös mittarin antamiin arvoihin. [7, s. 6...7.]

## 2.2 Mittauspisteet ja -syvyydet

Rakenteiden kosteusoloja tutkittaessa jokaisen mittauspisteen tulisi koostua useammasta mittausreiästä. Mittauspisteen sijainti tulisi valita esimerkiksi mittaamalla rakenteita rikkomattomalla menetelmällä ja päättelemällä todennäköisesti kostein rakenne.

Mikäli halutaan muodostaa rakenteelle kosteusprofiili, mittauspiste koostuu vähintään kolmesta eri syvyydelle ulottuvasta mittausreiästä. Kosteusprofiili on hyödyllinen etenkin paksujen rakenteiden kuivumisen arvioinnissa, sillä syvemmällä rakenteessa saattaa olla vielä huomattavasti kosteutta, joka siirtyy tiiviillä rakenteilla pinnoittamisen jälkeen aikaisemmin riittävän kuiviksi todettuihin kerroksiin.

Päällystettävyyssmittauksissa on yleensä määritetty rakennetyypistä riippuva arvostelusyvyys, jossa tietty raja-arvo on alitettava ja johon tulisi tehdä useampi rinnakkainen mittausreikä vähintään 50–200 mm etäisyydelle toisistaan [8, s. 20]. Tulokset eivät saa poiketa huomattavasti toisistaan [9, s. 86]. Mittapisteiden tulee edustaa rakennetta, joka saavuttaa päällystettävyyden raja-arvon käsiteltävällä alueella viimeiseksi. Yleensä tämä tarkoittaa paksuinta valua, kuten kololaatan valua, tai aluetta, jolla vallitsee epäsuotuisimmat kuivumisolosuhteet.

Tässä työssä tutkittavat betonimassat valettiin muovisiin laatikoihin, joten mitaussyvyyksiksi valittiin porareikämenetelmässä yhteen suuntaan kuivuvan rakenteen mitaussyvytydet. Porareikämenetelmässä yhteen suuntaan kuivuvan rakenteen, kuten liittolaatan, tai kololaatan ja yli 50 mm betonivalun (pintalaatta)

mittaussyvytydet ovat: 0,4 kertaa valun paksuus, joka on arviointisyvyys  $a$  ja 0,4 kertaa arviointisyvyys. Työssä valettiin 125 mm paksu rakenne, joten arviointisyvyys on  $0,4 \times 125 \text{ mm} = 50 \text{ mm} = a$  ja  $0,4 \times a = 0,4 \times 50 = 20 \text{ mm}$ . Kustakin betonimassasta valettiin kaksi koekappaletta, jolloin saatiin tulokset, suositusten mukaisesti, useammasta mittausreiästä. [7, s. 22.]

### 3 Betonin koostumus

Betoni koostuu sideaineesta, vedestä ja runkoaineesta, sekä mahdollisista seos- ja lisäaineista. Suomessa betonissa käytetään tavanomaisesti vesijohtovettä. Runkoaineena on tyypillisesti kivimurske, jonka kivilaji ja rakeisuusjakauma valitaan haluttujen ominaisuuksien mukaan. Suomessa sideaineena on nykyrakentamisessa käytetty tavanomaisesti portlandsementtiä, tai portlandseossementtiä, jotka sisältävät pienen osuuden seosaineita haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Suomessa käytetyt seosaineet ovat pääasiassa masuunikuona, silika ja lentotuhka. Masuunikuonaa käytetään enenevässä määrin portlandsementtiä korvaavana sideaineena sen pienemmän hiilijalanjäljen takia.

Betonissa voidaan käyttää myös lisäaineita, kuten tehonotkistimia ja huokostimia, sekä kiihdyttimiä ja hidastimia. Kiihdyttimet nopeuttavat sitoutumista, kun taas hidastimet viivästyttävät sitä.

#### 3.1 Sideaineet

Betonissa on tyypillisesti käytetty sideaineena portlandsementtiä tai portlandseossementtiä. Suomessa betonin valmistukseen käytettävän sementin tulee olla standardin SFS-EN 197-1 *Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimuksenmukaisuus* mukaista ja CE-merkittyä.

Sementit on luokiteltu standardissa viiteen päätyyppiin:

CEM I	Portlandsementti, vähintään 95 % portlandsementtiä
CEM II	Portlandseossementti, seosaineita 6...35 %
CEM III	Masuunikuonasementti, masuunikuonaa 36...95 %
CEM IV	Pozzolaaniseimentti
CEM V	Seossementti

Suomessa käytetään rakentamisessa pääasiassa päätyyppien CEM I ja CEM II -sementtien eri alatyyppejä. Alatyypit on merkitty A, B tai C kirjaimella, joilla viitataan sementtien sisältämien seosaineiden osuuksiin, esimerkiksi CEM II/A. Suomessa käytettävät standardissa määritellyt seosaineet ovat masuunikuona, kalkkikivi, silika, pozzolaanit, lentotuhka ja poltettu liuske. Seosaineiden lyhenneet, joita käytetään standardin mukaisissa sementtityyppien merkinnöissä ovat vastaavasti; S, L tai LL, D, P tai Q, V tai W ja T. [11, s. 29...30.]

Suomalaisen portlandsementtiklinkkerien koostumus.

	Normaali klinkkeri	SR*-klinkkeri	Valkoklinkkeri
CaO	64 %	64 %	69 %
SiO <sub>2</sub>	21 %	22 %	25 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,1 %	2,9 %	1,9 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,8 %	4,4 %	0,3 %
MgO	3,5 %	2,5 %	0,6 %
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	1,6 %	1,0 %	0,2 %

\* Sulfaatinkestävä klinkkeri

Suomalaisen sementin hienous on tavanomaisesti 300...500 m<sup>2</sup>/kg, mutta käytetty hienous valitaan tarpeen mukaan.

Masuunikuonan aktiivisuus, jolla tarkoitetaan sementin seosaineen sementiksi laskettavaa osuutta, on 0,8 tai 1,0 rasisluokasta riippuen, eli seosaineena käytettävästä masuunikuonasta 80 % tai 100 % voidaan laskea sementiksi. [12, s. 32.]

Masuunikuonan hydrataatiolämpö on pienempi kuin sementin, joten sitä käytetään usein massiivisissa valuissa, joissa lämmöntuotto olisi muuten liian suurta heikentäen betonin loppulujuutta, sekä aiheuttaen muodonmuutoksia ja halkeamia. [11, s. 57.]

Masuunikuona on raudan tuotannon ylijäämätuotetta. Betonin seos- tai lisäaineena käytetään vedellä nopeasti jäähdytettyä masuunikuonaa. Jäähdytetty masuunikuonagranulaatti kuivataan ja jauhetaan haluttuun hienouteen. Masuu-

nikuona koostuu pääasiassa kalkista, piioksidista, magnesiumoksidista, mangaanioksidista ja rikistä, mutta koostumus vaihtelee hieman rautamalmin koostumuksen mukaan.

Suomalaisen masuunikuonan koostumus on keskimäärin seuraava:

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 %

Finnsementin säkkitavarana suomessa myymän masuunikuonan hienous 400 m<sup>2</sup>/kg (Blaine) ja irtotiheys 1200 kg/m<sup>3</sup>. [13.]

## 4 Betonimassan kuivuminen

Betonimassan kuivuminen tapahtuu kahden mekanismin kautta, veden kemiallisen sitoutumisen ja veden haihtumisen kautta.

### 4.1 Veden kemiallinen sitoutuminen, eli hydrataatio

Hydrataatio on betonissa tapahtuva kemiallinen prosessi, jossa sementtiliima kovettuu veden ja sementin tai muiden seosaineiden välisten reaktioiden seurauksena. Vesi ja sementti alkavat muodostaa reagoivien partikkelien, kuten sementti, kalkkikivi ja masuunikuona, pinnoille sementtigeeliä. Geeli turpoo ja alkaa täyttää sementti- ja runkoainekappaleiden välistä tilaa. Geelin kasvaessa yhteen betoni alkaa kovettumaan. Myös masuunikuona hydratoituu, mutta se tarvitsee emäksisen ympäristön reaktion toteutumiseen, eli se on piilevästi hydraulinen. Betonissa sementin hydrataatiossa syntyy natrium-, kalium- ja kalsiumhydroksidia, sekä kalsium-silikaattihydraatteja, jotka nostavat betonin pH:n korkeaksi, eli muuttaa massan emäksiseksi, mahdollistaen masuunikuonan hydratoitumisen. [11, s. 57.]

## 4.2 Betonin kuivuminen veden haihtumisena

Betonimassasta poistuu vettä myös haihtumalla ja loppuvaiheessa se on pääasiallinen kuivumismekanismi betonirakenteissa, koska betoniin jää vettä, joka ei ole kemiallisesti sitoutunut kuivumisen alkuvaiheen hydrataatioreaktioissa. Sitoutumaton vesi poistuu aluksi nestemäisenä kapillaarisesti betonissa olevien huokostilojen verkostojen kautta ja haihtuu betonin pinnalta. Vettä poistuu tässä vaiheessa suhteellisen nopeasti betonirakenteesta. Huokostilojen tyhjentyessä vesi ei voi enää liikkua kapillaarisesti, vaan sen on haihduttava höyryfaasissa huokostilasta toiseen, mahdollisesti välillä tiivistyen huokosten pinnoille. Hydratoitumisen jatkuessa kapillaarihuokosia myös sulkeutuu ja alle 0,6 vesi-sementtisuhteen betonissa huokosverkoston yhteydet katkeavat. Betonin huokosverkko jää avoimeksi, jos vesi-sementtisuhte on yli 0,7. Vesisementtisuhteen ollessa alle 0,4 ei betoniin muodostu kapillaarihuokosia. [11, s. 81...83.]

## 4.3 Kuivumiseen vaikuttavat tekijät

Betonimassan vesi-sementtisuhte vaikuttaa betonin kuivumisnopeuteen massan sisältämän veden kokonaismäärän ja hydrataatiossa sitoutuvan veden suhteen kautta. Toisaalta suuremman vesi-sementtisuhteen betoneihin jää kattavampi kapillaarihuokosverkosto veden poistumisreitiksi rakenteesta. Lisäksi sementin tyyppi ja koostumus vaikuttavat betonimassan kuivumiseen, sekä mahdollisesti käytetyt lisäaineet. Esimerkiksi sementtahiukkasten koko vaikuttaa hiukkasten pinta-alaan ja siten reaktioiden nopeuteen.

Tässä työssä tutkituissa vihreissä betoneissa on käytetty masuunikuonaa sekä sementin seosaineena että betonin lisäaineena. Masuunikuonan vedentarve on pienempi kuin sementin, jolloin betonimassaan jää enemmän vapaata vettä.

Kuivatusolosuhteet, eli lämpötila, ympäristön ilmankosteus ja tuuletus vaikuttavat myös oleellisesti betonimassan kuivumiseen. Ympäröivän ilman on oltava riittävän kuivaa vastaanottaakseen kosteutta betonimassalta ja tähän vaikuttaa ilman lämpötila ja ilman liike pinnan yli.

Massan jälkihoito on oleellista kuivumiskutistumisen hallitsemiseksi. Betonimassa peitetään valun jälkeen esimerkiksi muovikalvolla tai pinnalle ruiskutetaan jälkihoitoainetta, estämään veden liian nopea haihtuminen. Kun betoni on saavuttanut riittävän lujuuden, mahdollinen muovikalvo poistetaan ja betonimassan pinnalta hierretään sementtiliimapinta rikki. Muovikalvon poistaminen mahdollistaa vesihöyryn haihtumisen ympäristöön ja sementtiliiman poistaminen helpottaa veden poistumista betonista ja betoni kuivuu nopeammin.

## 5 Betonirakenteiden kuivumisaika-arviot

### 5.1 Laskentamenetelmät

Kaikki kuivumisaika-arviot, laskentatavasta riippumatta, ovat nimensä mukaisesti arvioita ja luonteeltaan suuntaa antavia. Niillä voidaan arvioida esimerkiksi aikatauluja ja työvaiheiden ajoittamista. Pinnoitettaessa tai päällystettäessä betonirakenteita, tulee niiden riittävä kuivuminen varmistaa mittauksilla.

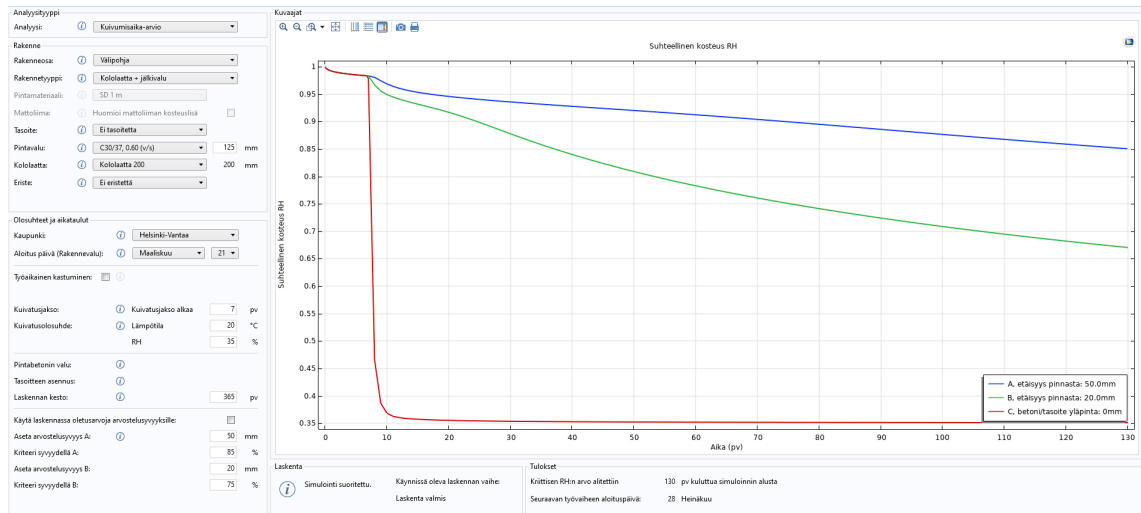
Betonirakenteiden kuivumisaika voidaan arvioida laskemalla käsin esimerkiksi vesi-sementtisuhteelle, rakenteelle ja olosuhteille määriteltyjen kertoimien ja kuvaajien avulla, kuten betonikeskus ry:n julkaisemassa Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi teoksessa [7]. Julkaisu perustuu Tarja Merikallion väitöskirjaan Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa ja sen pohjalta on tehty myös Excel-laskentapohja BY 1021 Betoniyhdistys ry:n toimesta, mutta se ei ole enää myynnissä. Laskentapohjan etuna on sen tekemä interpolointi, kun lähtöarvot ovat taulukkoarvojen välillä. Laskentapohjassa ei ole varsinaisesti eri betonilaatuja, vaan betonin ominaisuuksista valitaan vesi-sementtisuhte vastaamaan arvioitavaa betonia. Laskentapohjalla saatiin tulokseksi C 30/37 betonille, eli vesi-sideainesuhteeltaan 0,6 olevalle betonille kuivumisarvioksi 20,6 viikkoa. NP betonille, eli vesi-sementtisuhteeltaan 0,45 olevalle betonille, se oli 10,5 viikkoa. Olosuhdeparametreina oli kuivatusjakson alkuvaiheen todellisia olosuhteita vastaavat 35 % RH ja 20°C ilman valun jälkeistä kastumista. BY 1021:n tilalle on tullut BY 2020 kuivumisaika-arvio -ohjelma, joka on myös Betoniyhdistyksen julkaisema.

## 5.2 Kuivumisaika-arvio BY 2020 -ohjelmalla

Tutkituista betoneista tehtiin kuivumisaika-arviot BY 2020 -ohjelmalla. Ohjelma on FEM-pohjainen ja arvio huomioi pintavalun tai tasoituksen, sekä pinnoittamisen myös valun jälkeen tehtyinä. Olosuhteina voi myös käyttää vuodenajalle ja sijainnille tyypillisiä sääolosuhteita, jos halutaan ottaa huomioon sääsuojauksen puuttuminen valamisen aluksi. Ohjelmalla voi arvioida kosteuspitoisuutta tietyillä syvyyksillä ajan suhteen ja kosteusjakaumaa rakenteessa syvyyden suhteen eri ajankohtina.

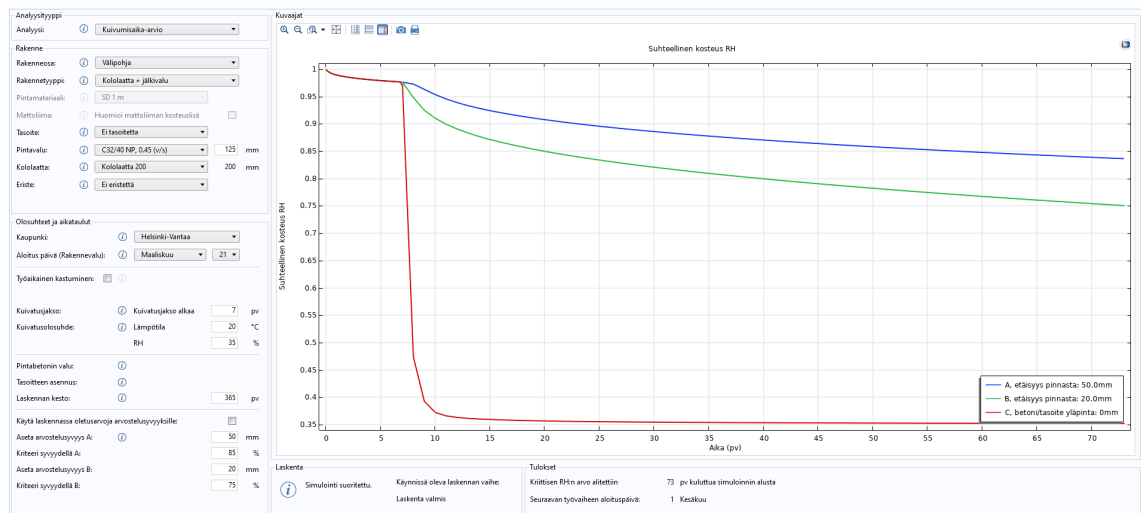
Tutkimusten aikana ohjelman materiaalikirjastossa oli ainoastaan tavanomaisilla sideaineilla toteutettuja betoneita, joten arviot tehtiin vertailubetoneine toimiville C 30/37 ja NP betoneille. Uudessa ohjelmassa ei ollut liittolaattarakennetta rakennekirjastossa, joka vastaisi koejärjestelyitä lähimmin. Valittavissa olevista rakennemalleista valittiin kololaatta, joka vastaa kuitenkin varsin hyvin koejärjestelyjä. Kololaatassa on alustana tiivis betonipinta, joka imee itseensä hieman kosteutta ja jonka kautta rakenne voi teoriassa hieman kuivua myös alaspäin. Arviointisyvyydeksi (A) voitiin myös valita tutkittua liittolaattarakennetta vastaava, eli tässä tapauksessa 50 mm ja lähempänä pintaa toiseksi mittapisteeksi 20 mm (0,4 x A). Ohjelmassa kuivatusjakso alkaa aikaisintaan 7 pv valusta, vaikka tutkimusjärjestelyissä se oli n. 1 pv. Kuivatusjaksolla tarkoitetaan ohjelmassa aikaa, jolloin jälkihoito on lopetettu ja rakenne on säältä suojassa. Raja-arvoiksi valittiin yleisesti käytetyt 85 % RH arvostelusyvytydellä ja lähempänä pintaa, 20 mm syvyydellä, 75 % RH. Ohjelmalla saadut tulokset ja kuvaajat on esitetty myös liitteessä 3. Pinnan läheisyydessä käytetyllä raja-arvolla pinnoitteiden ja tasoitteiden valmistajat pyrkivät varmistamaan, että rakenteella on riittävästi kapasiteettia ottamaan vastaan esimerkiksi tasoitteen tai liiman sisältämä vesi, ilman kosteuspitoisuuden nousua haitallisen korkeaksi. [5, s. 11...12.]

Ohjelma antoi kuivumisaika-arvioksi C 30/37 betonille 130 vrk valusta (85 % RH, arviointisyvytydellä 50 mm) ja tämän tutkimuksen mittaussakson lopussa (91 vrk) kosteus olisi ohjelman mukaan n. 89 % RH (Kuva 2, sininen käyrä Kuva 2. BY 2020 -ohjelmalla saadut C 30/37 betonin kuivumisaika-arvion tulokset.).



Kuva 2. BY 2020 -ohjelmalla saadut C 30/37 betonin kuivumisaika-arvion tulokset.

NP betonin kuivumisaika-arvio oli 73 vrk, mutta rajoittavana tekijänä on 20 mm syvyydessä saavutettava arvo 75 % RH (Kuva 3, vihreä käyrä). Arviointisyvyydellä (50 mm) 85 % RH raja-arvo saavutetaan ohjelman mukaan n. 58 vrk valusta (Kuva 3, sininen käyrä).



Kuva 3. BY 2020 -ohjelmalla saadut NP betonin kuivumisaika-arvion tulokset.



BY 1021 laskentapohjan kuivumisaika-arvio on C 30/37 betonille samaa suuruusluokkaa uuden BY 2020 ohjelman arvion kanssa. BY 1021 laskentapohjan arvio on 144,2 vrk kun BY 2020 ohjelmalla se on 130 vrk. NP betonille vastaavat arviot ovat arviointisyvyydessä (50 mm) laskentapohjalla 73,5 vrk ja 58 vrk ohjelmalla. Tosin ohjelmalla rajoittavana tekijänä on lähellä pintaa, 20 mm syvyydessä, saavutettava 75 % RH, johon ohjelman mukaan kulusi 73 vrk.

Taulukko 1. BY 1021 laskupohjalla ja BY 2020 ohjelmalla saadut kuivumisaika-arviot 85 % RH syvyydellä 50 mm

Arviomenetelmä Betonilaatu	BY 1021	BY 2020
C 30/37 (v/s = 0,6)	144,2 vrk (20,6 vko)	130 vrk
NP betoni (v/s = 0,45)	73,5 vrk (10,5 vko)	58* vrk

\*Aika jolloin saavutetaan 85 % RH syvyydellä 50 mm, ohjelman kuivumisaika-arvio on 73 vrk, jolloin saavutetaan 75 % RH syvyydellä 20 mm.

BY 1021 laskentapohjan tulokset annetaan arviointisyvyydelle, mutta tuloksista ei käy ilmi mikä se kulloinkin on. Arviointisyvyydet riippuvat rakennetyypistä ja valun paksuudesta ja ne ovat esitetty esimerkiksi edellä mainitussa Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi teoksessa. BY 2020 -ohjelma sen sijaan ilmoittaa, joko itse määritellyt, tai rakenteesta riippuvat syvyydet ja saavutettavat reunaehdot.

## 6 Tutkimusjärjestelyt

Betonimassat tätä tutkimusta varten valmistettiin Rudus Oy:n Konalan betoni-tehtaan laboratorioissa n. 150 kg panoksina. Tutkittavista ja vertailtavista betonimassoista valettiin 125 mm paksuiset kappaleet muovilaatikoihin, joiden sisämitat olivat n. 554 x 362 mm ja valun tilavuus siten noin 25 l per laatikko. Kutakin

betonimassaa valettiin 2 laatikkoa mittausten luotettavuuden parantamiseksi. Betonimassat tiivistettiin tärysauvalla, eli ns. betonivibralla, varoen runkoaineen erottumista ja massat tasoitettiin muovilastalla. Massojen tiheys oli 2313 ja 2416 kg/m<sup>3</sup> välillä ja siten koekappaleiden paino noin 60 kg. Massoihin asennettiin valun yhteydessä jaksoittain luettavat mittarit 20 ja 50 mm mittaussyvyysyksiin.



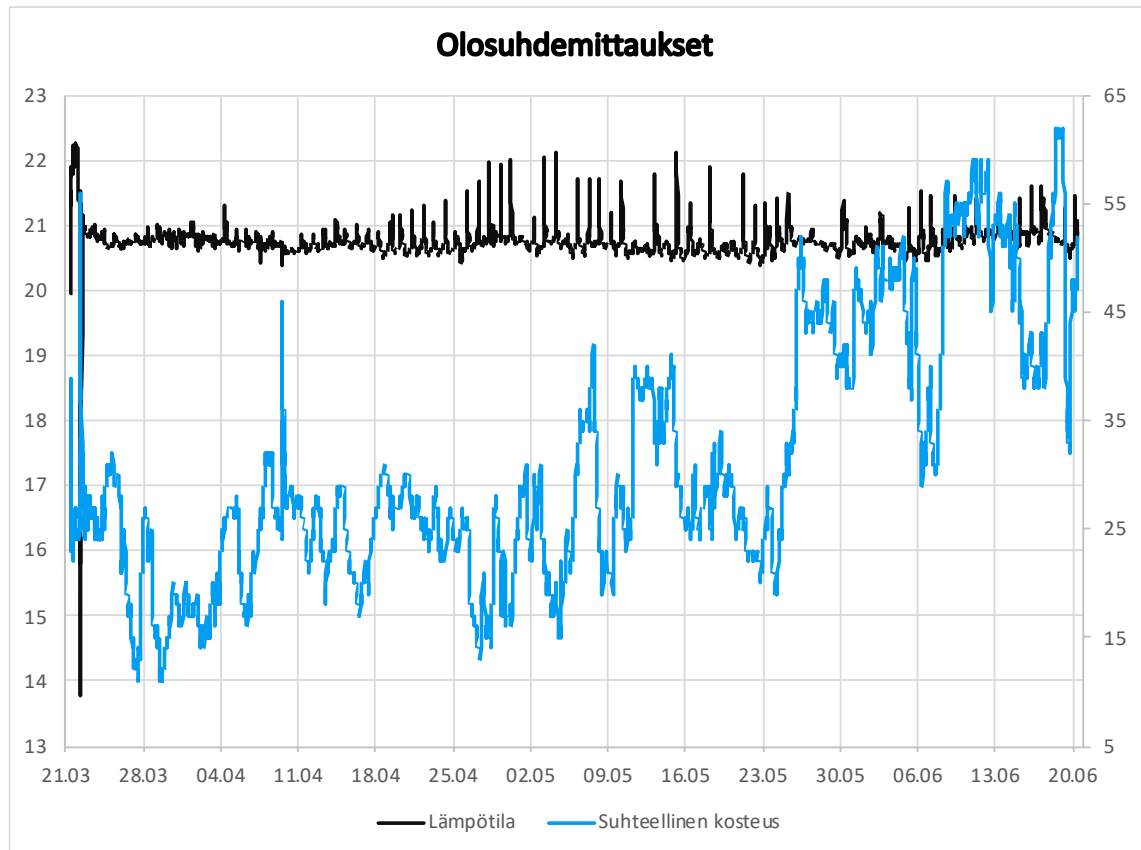
Kuva 4. Valetut betonimassat, johon on asennettu jaksoittain luettavat kosteusmittarit. Betonien päällä on muovikalvot, jotka poistettiin seuraavana päivänä siirron jälkeen. Ylhäällä oikealla olosuhdemittarit.

Betonimassan annettiin valun ja tasoituksen jälkeen hetken sitoutua, jonka jälkeen massa peitettiin muovikalvolla. Seuraavana päivänä laatikot siirrettiin Metropolian rakennustekniikan laboratorioon, jossa massat olivat koko seurantajakson. Kun laatikot olivat paikoillaan, muovikalvot poistettiin, laatikoiden seinämät puhdistettiin betoniliimasta betonipinnan liittymästä ja betonin ja laatikon liittymä tiivistettiin saniteettisilikonilla.



Kuva 5. Betonit Metropolian Myllypuron kampuksen rakennustekniikan laboratoriossa. Keskellä, laatikoiden laitojen päällä, olosuhdemittarit.

Kuivumisolosuhteita seurattiin valusta viimeiseen mittaukseen kahdella Tinytag TGP-4500 -olosuhdemittarilla, jotka mittasivat ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Olosuhteiden seurannalla haluttiin varmistaa, että ympäristön olosuhteet eivät muutu oleellisesti ja kuivumisolosuhteiden vaikutukset mahdollisiin poikkeaviin tuloksiin havaittaisiin. Olosuhdeseurannasta havaittiin, että olosuhteet pysyivät suhteellisen vakaina. Lämpötila oli pääasiassa 20,5...21°C. Alkukevään aikana sisäilman kosteus pysyi suurimmaksi osaksi alle 35 % RH, mutta sään lämmitessä loppukeväästä sisäilman kosteus nousi pääasiassa yli 40 % RH. Ympäristön ilmankosteus ei kuitenkaan noussut yli 60 % RH kuin hetkellisesti aivan mittausjakson lopussa.



Kuva 6. Ympäristön olosuhdemittaukset lämpötilan (musta) ja kosteuden (sininen) osalta.

Kosteudet mitattiin porareikämenetelmällä 14, 29, 56 ja 91 vrk valusta. Mittausohjelmassa toinen mittaus on yleensä 28 vrk valusta, mutta sitä siirrettiin yksi päivä pääsiäisen takia. Koulurakennus oli pääsiäispyhät kiinni, eikä kulkuoikeuksien saanti laboratoriotiloihin ollut mahdollista.

Porareikämittaukset toteutettiin RT-kortin 103333 mukaan. Mittauksissa käytettiin Vaisalan SHM40 mittaussarjaa, jonka mittarit koostuvat erillisistä mittapäistä ja näyttölaitteesta. Mittapäiden tasaantumista ympäristön ja mittausputken olosuhteisiin seurattiin näyttölaitteella. Mittapäät oli kalibroitu alle 6 kk mittauksen suorituksesta, yksi sarja 11.3.2022 ja toinen 5.4.2022.



Kuva 7. Porareikämittauksessa käytetyt kosteusmittarit tasaantumassa ympäristön olosuhteisiin ennen mittausputkiin asennusta.

## 7 Tutkitut betonimassat

Koska rakennusalalla käytetään enenemässä määrin matalamman hiilidioksidijalanjäljen betonimassoja, haluttiin tutkia vertailumittauksilla vihreiden ja vastaavien tavanomaisten portlandsementtipohjaisten betonimassojen kuivumista identtisissä ja hallituissa olosuhteissa. Tutkittujen betonien tarkat reseptit ovat liikesalaisuuksia, mutta tutkimuksen kannalta oleelliset tiedot on esitelty tässä luvussa ja liitteessä 1.

### 7.1 Tavanomaiset lattiabetonit, vertailumassat

Lattia- ja välipohjavaluissa on tavanomaisesti käytetty lujuusluokan C 30/37 betonia. Toinen tavanomaisesti välipohjavaluissa käytetty betoni on NP betoni, eli

nopeasti päällystettävä betoni. NP betonia käytetään, kun kuivumisaikaa halutaan lyhentää. Nämä laajasti käytetyt ja kuivumisominaisuuksiltaan tunnetut betonit valittiin vertailubetoniksi, johon vihreitä betoneita verrattiin. Vertailubetonien sideaineena on käytetty CEM I ja CEM II -sementtien sekoituksia. NP betonin vesisementtisuhde on 0,45 ja C 30/37 betonin on 0,6.

## 7.2 Vihreät betonimassat, tutkittavat massat.

Tutkitut pienemmän hiilijalanjäljen betonimassat ovat Vihreä 30 ja Vihreä NP betonit. Vihreä 30:n hiilijalanjälki on 30 prosenttia pienempi kuin vastaavan tavanomaisen – eli tässä tutkimuksessa C30/37 -betonimassan. Vihreä 30 betonissa käytetään CEM III tyyppin sementtiä. Vihreä NP on kuivumisajaltaan nopeasti päällystettävää NP-betonia vastaava tuote ja sitä verrataankin tavanomaiseen NP-betoniin. Vihreä NP betonissa käytetään CEM I tyyppin sementtiä ja masuunikuonaa sideaineena. Vihreä NP betonin vesisementtisuhde on 0,45 ja Vihreä 30 betonin on 0,6. Tutkimusten aikana Vihreä 30 betoni on saanut uuden kaupanimen, Vihreä Betoni GWP.70 ja Vihreä NP betonimassa on tullut kaupallisesti saataville, sekä pilottikäyttöön työmaille.

## 8 Tutkitut jaksoittain luettavat kosteusmittarit

### 8.1 Porareikämittaukset, vertailumittaus

Porareikämittaus on pinnoitettavuusmittauksissa ja kuntotutkimuksissa usein käytetty kosteusmittausmenetelmä. Menetelmällä saadut tulokset ovat yleisesti hyväksytyjä ja koepalamenetelmän kanssa ne ovat yleisesti käytettyjä ”virallisia” kosteusmittausmenetelmiä. Porareikämenetelmälle on määritelty selkeät protokollat ja yleisesti hyväksytyt toimintatavat, sekä mittaussyvyyydet eri rakenneratkaisuille. Lisäksi esimerkiksi pinnoitukselle määritetyt raja-arvot on annettu usein porareikä- tai näytepalamenetelmille määritetyille mittaussyvyyksille.

Porareikämittauksissa käytettyjen mittareiden, Vaisala HM40s, valmistajan ilmoittama tarkkuus on 0...40 °C lämpötila-alueella  $\pm 1,5$  % RH, tulosten ollessa



0...90 % RH ja  $\pm 2,5$  % RH, kun tulokset ovat yli 90 % RH. Itse mittapään tarkkuus kalibroitu on  $\pm 1,1$  % RH ja  $\pm 1,8$  % RH, mittaustulosalueilla 0...90 ja 90...100 % RH vastaavasti. RT kortissa 103333 on määritetty eri mittausseläimille mittauserävarmuusluokat, jonka perusteella tässä työssä toteutetuille porareikämittauksille voidaan käyttää luokkaa  $\pm 2$  % RH, kun mitattu kosteus on alle 90 % RH. Mittaustuloksen olleessa 90 % RH tai yli käytettiin mittauserävarmuusluokkaa  $\pm 4$  % RH. [8, s. 26...27.]

## 8.2 Jaksoittain luettavat valuun asennettavat mittarit, tutkittavat mittarit

Tutkitut jaksoittain luettavat kosteusmittarit olivat Wiiste Oy:n valun yhteydessä asennettavat SH1-tyyppin mittarit ja niiden tulokset luettiin porareikämittausten yhteydessä Wiisteen RD1 lukulaitteella. Mittarien mittapäiden toiminta perustuu puoliläpäisevän kalvon kapasitanssin mittaamiseen. Mittarit toimitetaan käyttäjälle hänen määrittelemien mittaussyvyyksien mukaisesti mitoitettuna, jolloin oikea mittaussyvyys saadaan painamalla mittari valuun niin että sen yläpinta tulee betonipinnan tasoon. Mittari on valmiiksi kalibroitu ja kullekin mittarille on tallennettu mittaussyvyys ja oma yksilöivä sarjanumero. Tulokset voidaan lukea lukulaitteen näytöltä, mutta käytännöllisintä on tallentaa tulokset valmistajan Relia-verkkopalveluun (<https://relia.wiiste.com>) tietokoneen ja WSync-ohjelman avulla. Palvelussa näkyvät aikaisemmat mittaustulokset mittausseläimittain. Palvelussa on myös muita toiminnallisuuksia, kuten raportointi työkalu ja mahdollisuus asettaa automaattisia hälytyksiä.

Valmistajan ilmoittama mittaustarkkuus, tai epävarmuus, on  $\pm 2,5$  % RH, kun tulos on 80 % RH tai alle. Yli 80 % RH tulosten kohdalla epävarmuus kohoaa lineaarisesti mittaustulosten 80 ja 100 % RH välillä arvosta  $\pm 2,5$  % RH arvoon  $\pm 3$  % RH vastaavasti. [14.]



Kuva 8. Valuun asennettuja jaksoittain luettavia kosteusmittareita.

## 9 Tulokset

Vihreiden ja tavanomaisten betonien kuivumista vertailtaessa käytettiin porareikämenetelmän tuloksia. Porareikämenetelmä on rakennusalalla vakiintunut, yleisesti käytetty ja tunnettu menetelmä. Tässä työssä verrattiin myös alalla yleistyviin valuun asennettävien jaksoittain luettavien mittarien tuloksia porareikämittauksiin.

### 9.1 Vihreiden ja tavanomaisten betonien kuivuminen

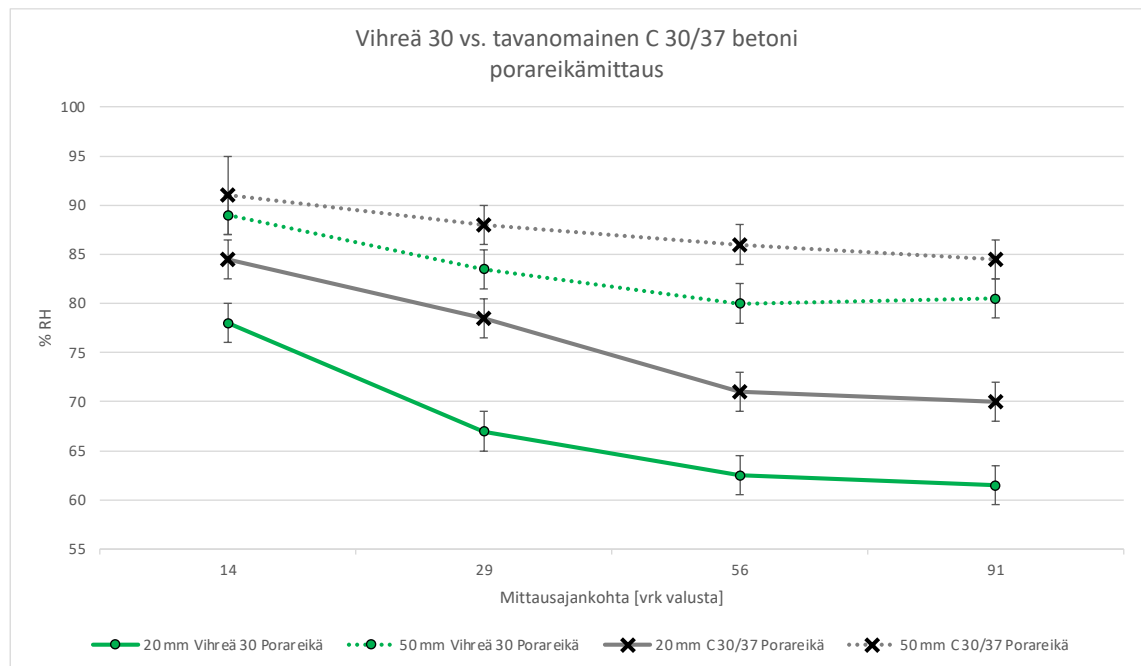
Molempien tutkittujen vihreiden betonien kuivuminen on tulosten perusteella nopeampaa kuin vastaavien tavanomaisten betonien. Vihreiden betonien sisältämän masuunikuonan sementtiä hitaamman alkusitoutumisen, hitaamman reak-



tionopeuden ja pienemmän vedentarpeen takia olisi odotettavissa masuunikuonaa sisältävien betonimassojen kuivuvan hitaammin. Porareikämittausten mittausepävarmuusluokkana käytettiin  $\pm 2$  % RH, kun tulos oli alle 90 % RH ja  $\pm 4$  % RH, kun tulos oli 90 %, tai yli.

Vihreä 30 betonin ja tavanomaisen C 30/37 betonin vertailussa vihreä betoni kuivui mittausten mukaan nopeammin kuin tavanomainen betoni. Vertailusyvyydellä ero oli mittausjakson ensimmäisellä mittauskerralla, 14 vuorokautta valusta, varsin pieni ja molempien betonien kosteusmittaustulokset olivat alle mittausepävarmuuden verran toisistaan. Mittausjakson muut tulokset erosivat selkeämmin toisistaan. Arvostelusyvydellä Vihreä 30 betonin kosteusmittaustulos alitti yleisen päällystettävyyden raja-arvon 85 % RH, mittausepävarmuus huomioiden, kolmannella mittauskerralla 56 vuorokautta valusta. Tulos oli tuolloin 78...82 % RH mittausepävarmuus huomioiden. Lineaarisesti interpoloimalla Vihreä 30 betoni alitti arvostelusyvydellä arvon 85 % RH 36 vrk valusta, mittausepävarmuus huomioiden. Tavanomainen C 30/37 betoni ei alittanut arvoa 85 % RH arvostelusyvydellä mittausjakson aikana, eli 91 vuorokautta valusta, kun mittausepävarmuus huomioidaan.

BY 2020 -ohjelmalla saatuihin kuivumisaika-arvioin verrattuna C 30/37 betoni kuivui mittausten mukaan nopeammin. Jos mittausepävarmuus jätetään huomioidatta tavanomainen C 30/37 betoni alitti raja-arvon 85 % RH noin 80 vrk valusta. Kuivumisaika-arvio BY 2020 -ohjelmalla oli 130 vrk.

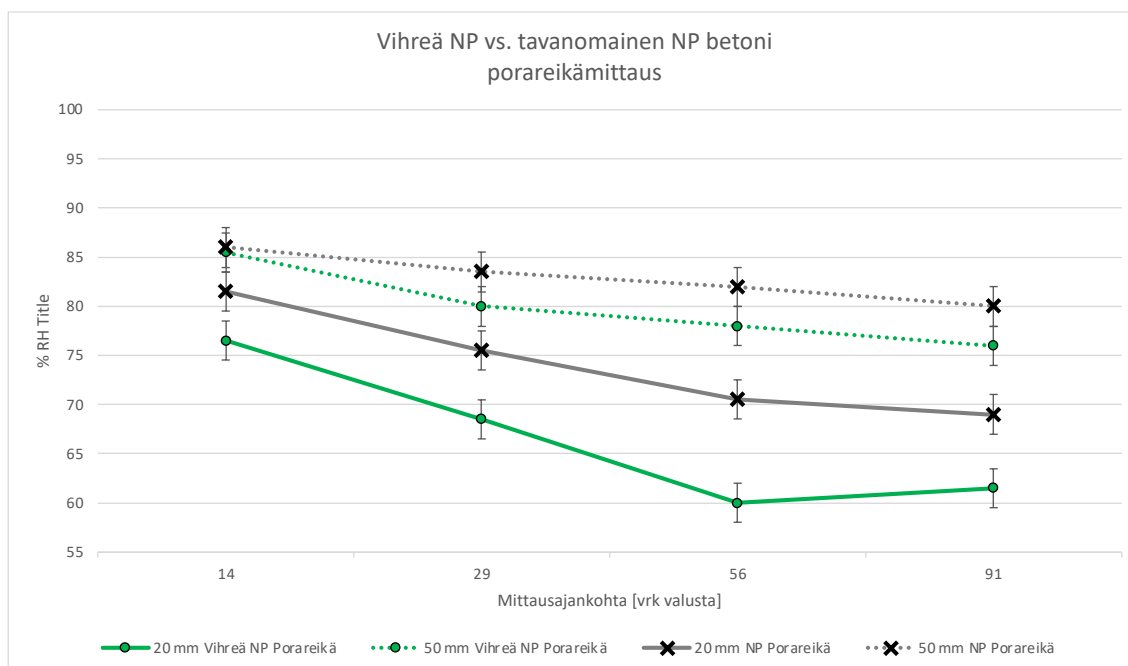


Kuva 9. Betonien Vihreä 30 (vihreällä) ja C 30/37 (harmaalla) kosteusmittaustulokset mitattuna porareikämenetelmällä

Myös Vihreä NP betonin ja tavanomaisen NP betonin vertailussa Vihreä NP betoni kuivui mittausten mukaan nopeammin kuin tavanomainen betoni. Vertailusyvyydellä ero oli kuitenkin koko mittausjakson mittausepävarmuuden verran tai alle toisistaan. Lähempänä pintaa, syvyydellä 20 mm tulokset erosivat selkeämmin toisistaan, Vihreä NP betonin kosteusmittaustulosten ollessa suuruusluokaltaan 5...10 % RH alhaisempia. Arvostelusyvyydellä Vihreä NP betonin mittaus tulos alitti yleisen raja-arvon 85 % RH, mittausepävarmuus huomioiden, toisella mittauskerralla, 29 vuorokautta valusta, ollen 78...82 % RH. Lineaarisesti interpoloimalla Vihreä NP betoni alitti arvostelusyvyydellä arvon 85 % RH noin 21 vrk valusta, mittausepävarmuus huomioiden. Tavanomainen NP betoni alitti arvon 85 % RH noin 43 vrk valusta, mittausepävarmuus huomioiden.

BY 2020 -ohjelmalla saatuihin kuivumisaika-arviointi verrattuna NP betoni kuivui mittausten mukaan nopeammin. Jos mittausepävarmuutta ei huomioida, tavanomainen NP betoni alitti raja-arvon 85 % RH 20 vrk valusta syvyydellä 50 mm. Kuivumisaika-arvio BY 2020 -ohjelmalla oli samalla raja-arvolla ja arviointi-

syvyydellä 58 vrk. Kuitenkin BY 2020 -ohjelmalla rajoittavaksi tekijäksi tuli lähempänä pintaa, 20 mm syvyydessä saavutettava raja-arvo 75 % RH, joka ohjelman mukaa tapahtuisi 73 vrk valusta. Mittausten mukaan, kun mittausepävarmuutta ei huomioida, syvyydellä 20 mm alitetaan raja-arvo 75 % RH 32 vrk valusta.



Kuva 10. Betonien Vihreä NP (vihreällä) ja NP (harmaalla) kosteusmittaustulokset mitattuna porareikämenetelmällä

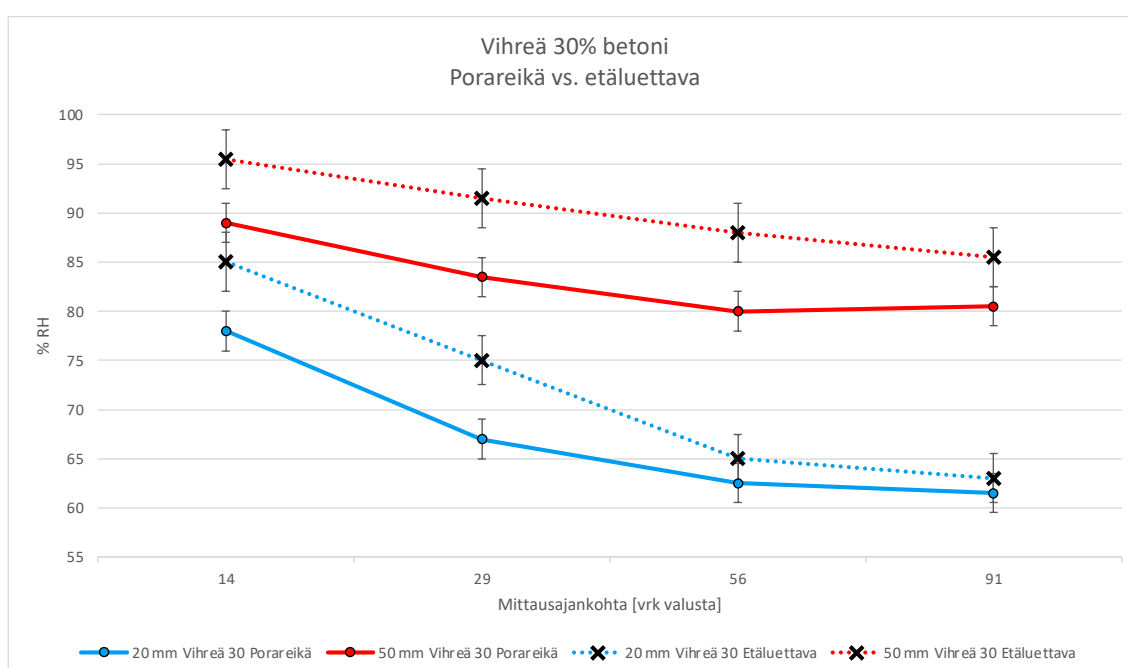
## 9.2 Jaksoittain luettavien mittarien ja porareikämittausten vertailu

Porareikämenetelmällä mitatut kosteuspitoisuudet ovat suurimmaksi osaksi matalampia kuin jaksoittain luettavilla valuun asennettavilla mittareilla mitatut. Valuun asennettavien mittareiden ja porareikämenetelmän mittaustulokset poikkesivat eniten vihreillä betoneilla. Tavanomaisten, sideaineena CEM I ja CEM II -sementtejä käyttävien betonimassojen kosteusmittauksissa erot olivat varsin pieniä ja mahtuivat mittausepävarmuuden sisälle toisistaan.

Vihreiden, masuunikuonaa sisältävien betonien tapauksessa jaksoittain luettavien mittareiden ja porareikämenetelmällä saatujen mittaustulosten välillä oli

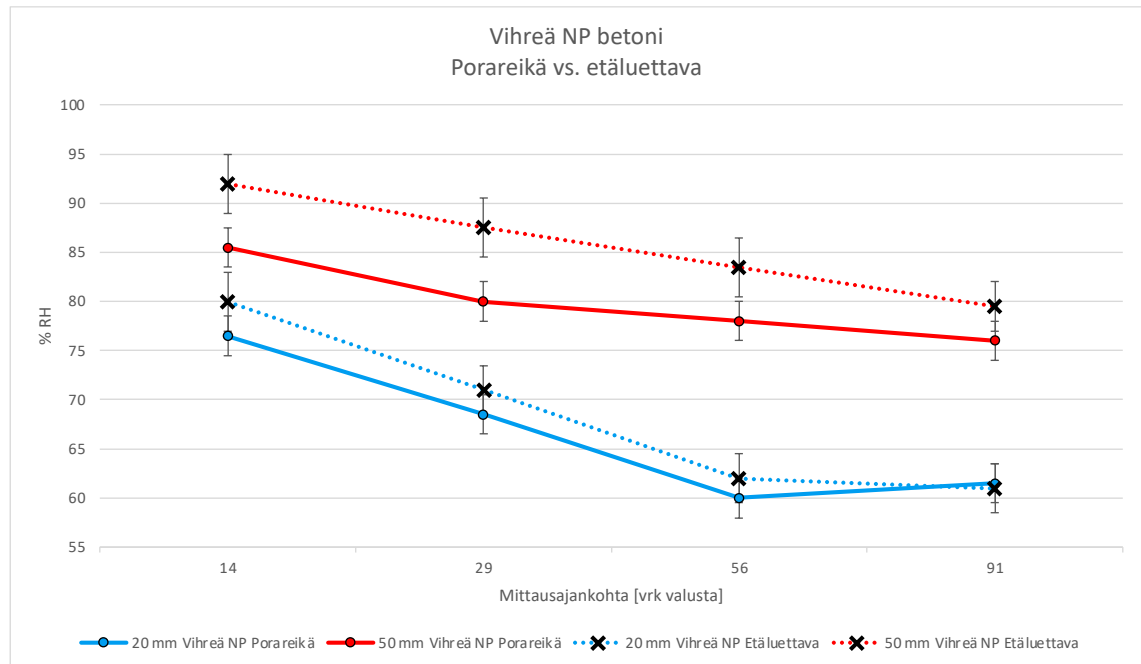
selkeä ero, jaksoittain luettavien mittarien antaen suurempia mittaustuloksia. Suurimmat erot olivat mittausjakson alussa ja syvemmissä mittaussyvyyksissä, eli kosteammassa betonissa. Mittausjakson loppupuolella, etenkin lähellä pintaa, eli kuivemmassa betonissa erot pienuivat.

Vihreän 30 betonin kosteusmittauksissa alittuu usein käytetty raja-arvo 85 % RH porareikämenetelmällä mitattuna kolmannella mittauskerralla, 56 vrk valusta, mittausepävarmuus huomioiden. Jaksoittain luettavalla mittarilla mitattuna raja-arvoa ei aliteta mittausjakson (91 vrk) aikana.



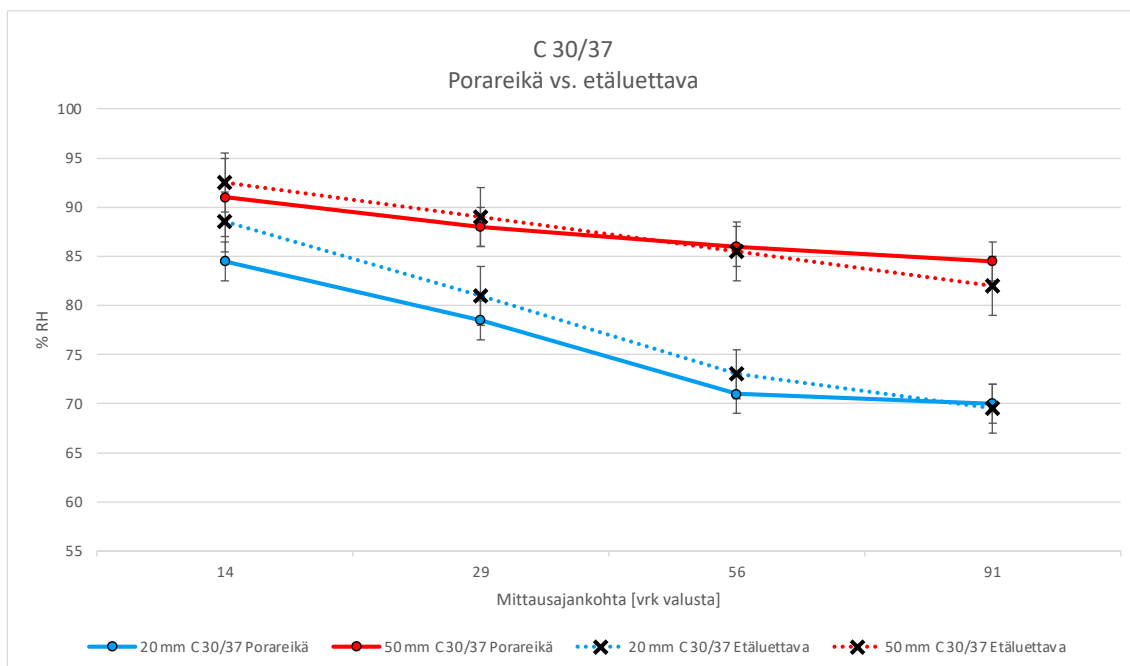
Kuva 11. Vihreä 30 % betonin kosteusmittaustulokset porareikämenetelmällä (porareikä, kiinteällä viivalla) ja jaksoittain luettavilla mittareilla (etäluettava, katkoviivalla).

Vihreän NP betonin tapauksessa usein käytetty raja-arvo 85 % RH on alitettu toisella mittauskerralla, 29 vrk valusta, mittausepävarmuus huomioiden porareikämenetelmän tulosten mukaan. Jaksoittain luettavalla mittarilla raja-arvo alitetaan, neljännellä mittauskerralla 91 vrk valusta, kun mittausepävarmuus otetaan huomioon.

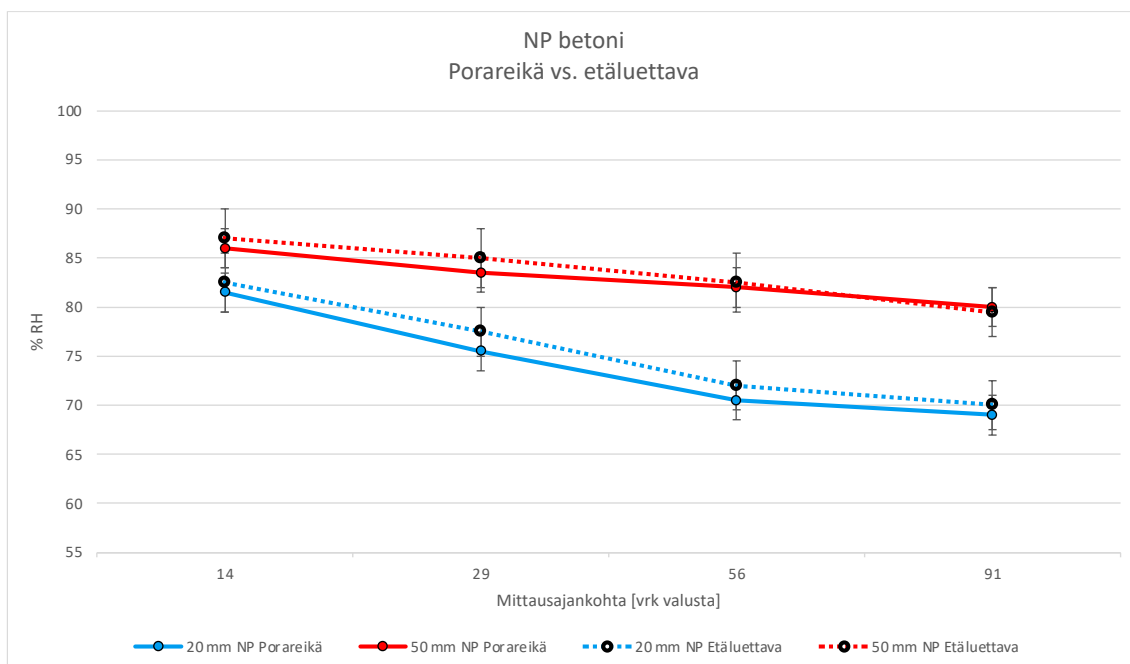


Kuva 12 Vihreä NP betonin kosteusmittaustulokset porareikämenetelmällä (porareikä, kiinteällä viivalla) ja jaksoittain luettavilla mittareilla (etäluettava, katkoviivalla).

Tavanomaisten C30/37 ja NP betonien kosteusmittauksissa jaksoittain luettavien mittarien ja porareikämittausten tulosten välillä erot olivat mittausepävarmuuden sisällä toisistaan. Tavallisesti käytettyä 85 % RH raja-arvoa ei C 30/37 betonilla saavutettu mittausjakson aikana, kun mittausepävarmuus otetaan huomioon. NP betonin tapauksessa eri mittausmenetelmillä yleinen 85 % RH raja-arvo saavutetaan eri mittauskerroilla, kun mittausepävarmuus otetaan huomioon, porareikämenetelmällä kolmannella mittauskerralla (56 vrk. valusta) ja jaksoittain luettavilla neljännellä mittauskerralla (91 vrk. valusta).



Kuva 13. C 30/37 betonin kosteusmittaustulokset porareikämenetelmällä ja jaksottain luettavilla mittareilla.



Kuva 14. NP betonin kosteusmittaustulokset porareikämenetelmällä ja jaksottain luettavilla mittareilla.

## 10 Tulosten tarkastelu ja yhteenveto

### 10.1 Vihreiden ja tavanomaisten betonien kuivuminen

Tässä työssä tutkitut vihreät betonit eivät kuivu hitaammin verrattuna tavanomaisiin betoneihin, vaan tulosten perusteella nopeammin. Vihreät betonit siis mahdollistavat rakennusprojekteissa hiilijalanjäljen pienentämisen ilman kuivumisaikojen kasvattamista, jopa niitä lyhentäen tutkittujen betonilaatujen osalta. Mahdollista syytä masuunikuonaa sisältävien betonimassojen teoriaa nopeampiin kuivumisaikoihin ei tutkittu tässä työssä, koska mahdollisia mekanismeja voi olla monia ja niiden tutkiminen edellyttäisi pitkälle vietyjä koejärjestelyjä ja laitteistoa.

Tällä hetkellä kuivumisajan arviointi laskennallisesti antaa liian pitkän kuivumisajan tutkituille tavanomaisille betoneille valituilla parametreilla. Ero kuitenkin pienenee, kun mittaustuloksissa otetaan mittausepävarmuus huomioon, kuten tehdään esimerkiksi päällystettävyyttä arvioitaessa. Pidemmät kuivumisaika-arviot ovat myös turvallisemmalla puolella lopputuloksen suhteen.

### 10.2 Jaksoittain luettavien mittarien ja porareikämittausten vertailu

Vihreiden betonien kosteusmittauksissa jaksoittain luettavat mittarit antavat korkeampia tuloksia verrattuna porareikämittauksiin. Mittausmenetelmästä johtuva ero pienenee molemmilla vihreillä betoneilla mittaustulosten pienentyessä, eli kuivemmissa vihreissä betoneissa. Mittausmenetelmien välinen ero ei kuitenkaan pienene yhtä paljon Vihreä 30 ja Vihreä NP betoneilla kosteuspitoisuuden laskiessa. Menetelmien välinen ero näyttäisi siis riippuvan sekä betonin ominaisuuksista että kosteuspitoisuudesta. Jos jaksoittain luettavilla mittareilla saatuja tuloksia haluttaisiin korjata vastaamaan porareikämittausten tuloksia, tulisi laatia kullekin vihreälle betonityypille erikseen korjauskertoimet, -yhtälöt tai -taulukot.

Tavanomaisten betonien kohdalla mittausmenetelmien erot olivat mittausepävarmuuksien päässä toisistaan, eli menetelmien välillä ei ole tarkkuuden suhteen merkittävää eroa. Ajallisesti jonkin tietyn raja-arvon saavuttamisessa voi mittausmenetelmien välillä olla suhteellisen suuria eroja, etenkin jos mittausepävarmuus poikkeaa menetelmien välillä. Mittausmenetelmistä riippumatta, tuloksissa tulee huomioida mittausepävarmuus, jonka takia raja-arvon saavuttaminen riippuu ajallisesti selkeästi mittausepävarmuusluokasta, jota mitauksissa voidaan käyttää. Suuri ero raja-arvon saavuttamisen ajankohdassa johtuu betonin hitaasta kuivumistahdistista, etenkin syvemmällä betonissa, kuten tutkitun rakenteen arviointisyvytydessä. Eri mittausepävarmuusluokkien välisen eron, esimerkiksi 2 % RH, vaatima ylimääräinen kuivumisaika voi olla viikkojaikin, vaikka itse mittaustulokset olisivatkin samat.

Tässä työssä porareikämenetelmälle voitiin käyttää mittausepävarmuutena pääasiassa  $\pm 2$  % RH, koska ympäristön olosuhteet olivat tasaiset ja menetelmälle otolliset, mittarit olivat tarkkuudeltaan hyviä ( $\pm 1,1$  % RH) ja ne kalibroitiin alle 6 kk välein. Lisäksi työskentelyolosuhteet mahdollistivat tarkat poraussyvytydet. Mittaustuloksen ollessa yli 90 % RH käytettiin mittausepävarmuusluokkana  $\pm 4$  % RH, koska valmistajan ilmoittama mittarin mittausepävarmuus nousee arvoon  $\pm 1,8$  % RH. Epäsuotuisemmissa työskentely- ja ympäristön olosuhteissa, tarkkuudeltaan huonomman kosteusmittauslaitteiston ja pidemmän kalibrointivälin tapauksessa koko mittaussarjan mittausepävarmuutena tulisi käyttää ainakin  $\pm 4$  % RH, jolloin menetelmien välinen ero kutistuisi.

Jaksoittain luettavien mittareiden mittausepävarmuutena voitiin käyttää, pitkälti samoin perustein kuin porareikämittauksissa, valmistajan ilmoittamaa mittausepävarmuutta  $\pm 2,5$  % RH tulosten ollessa 80 % RH tai alle. Valmistajan mukaan mittausepävarmuus nousee lineaarisesti  $\pm 2,5 \dots 3,0$  % RH mittaustulosten 80...100 % RH välillä. Tässä työssä on kuitenkin käytetty  $\pm 3,0$  % RH mittausepävarmuutta kaikissa yli 80 % RH tuloksissa. Valmistaja esittää myös maksimitoleranssin mittaustuloksille  $\pm 3,0$  % RH, kun tulokset ovat 80 % RH tai alle, joka on 0,5 % RH suurempi kuin perus mittausepävarmuus. Mittaustulosten ollessa 80...100 % RH välillä maksimitoleranssi nousee myös lineaarisesti  $\pm$



3,0...4,0 % RH. Olosuhteiden ollessa epäsuotuisimmat tulisi käyttää maksimitoleranssia.

Käytännössä mittausten vaivattomalla toteutuksella on merkitystä, kun halutaan varmistaa riittävä kuivuminen ja optimoida työvaiheiden aloittaminen. Jaksoittain luettavilla mittareilla mittauskertoja on helppo lisätä, koska porausta ja mittaputkien tasaantumisaikaa ei tarvita. Näin ollen, haluttua raja-arvoa lähestyttäessä voidaan mittauskertoja lisätä tarpeen mukaan helpommin kuin porareikämenetelmässä ja seuraavat työvaiheet voidaan aloittaa mahdollisimman pian.

## 11 Johtopäätökset

Tutkitut vihreät betonit kuivuivat, vastoin ennako-odotuksia, nopeammin kuin vastaavat tavanomaiset betonit. Yksi syy voi olla vihreiden betonien mikrorakenteessa, sillä masuunikuonan pienemmän vedentarpeen takia betonimassaan voi jäädä laajempi kapillaarihuokosverkosto, joka mahdollistaa kosteuden nopeamman siirtymisen betonirakenteen sisäosista ympäristöön. Masuunikuonan vaikutuksesta betoniin muodostuvilla reaktiotuotteilla voi myös olla ominaisuuksia, jotka edesauttavat kuivumista.

Betonirakenteiden liian aikaisen pinnoittamisen riskit ymmärretään rakennusalalla nykyään hyvin ja betonin riittävä kuivuminen halutaan usein varmistaa. Porareikämittaus, jota tässä työssä käytettiin vertailumittauksena, on yksi rakennusalalla vakiintuneista kosteusmittausmenetelmistä. Se on kattavasti dokumentoitu ja alalla hyvin tunnettu, jonka takia se on varsin yleinen. Menetelmä on kuitenkin suhteellisen hidas ja luonteeltaan rakenteita rikkova. Lisäksi mittaus vaatii pätevöityneen mittaajan, vähintään ohjaamaan mittaustyön suoritusta.

Jaksoittain luettavien ja valuun asennettavien mittareiden lukeminen on nopeampaa ja onnistuu kokemattomammiltakin henkilöiltä. Mittaaminen voidaan tehdä nopeasti ja ilman uusien reikien tekemistä rakenteisiin, jolloin valittua raja-arvoa lähestyttäessä mittauksia voidaan toistaa useammin ilman merkittä-

vää lisävaivaa. Tiheämmin mitattujen tulosten avulla voidaan ennustaa paremmin riittävän kuivumisen ajankohta ja siitä riippuvien työvaiheiden ajoitus. Jaksoittain luettavat mittarit soveltuvatkin hyvin kohteisiin, joissa betonirakenteiden kuivuminen on aikatauluja rajoittava tekijä. Kuitenkin tulosten perusteella, tutkittujen vihreiden betonien osalta kosteuspitoisuuden mittaaminen jaksoittain luettavilla mittareilla vaatisi vielä tulosten varmistamista ja korjaamista esimerkiksi porareikämittausten avulla. Toisaalta kosteusteknisesti, liian suuria arvoja antava mittausmenetelmä on turvallisempi kuin päinvastoin. On teoriassa myös mahdollista, että jaksoittain luettavien mittareiden tulokset antavatkin oikeampia tuloksia kuin porareikämenetelmä.

Mahdollinen jatkotutkimusaihe olisi selvittää miksi masuunikuonaa sisältävien betonien mittauksissa jaksoittain luettavien valuun asennettavien mittarien ja porareikämenetelmällä saatujen kosteusmittaustulosten välillä on selkeä ero. Jaksoittain luettavat mittarit antoivat systemaattisesti suurempia kosteuspitoisuuksia, kuin porareikämenetelmä. Toisaalta ei ole myöskään varmuutta kummalla menetelmällä saadut tulokset ovat ”oikeita”, koska tulosten poikkeavuuden syitä ei tiedetä. Esimerkiksi näytepala- ja porareikämenetelmien, sekä jaksoittain luettavien valuun asennettavien mittarien välinen laajempi vertailu voisi avata menetelmien vaikutusta mittaustuloksiin.

Toinen mahdollinen jatkotutkimusaihe olisi selvittää masuunikuonan teoriasta poikkeava vaikutus kuivumiseen. Tutkimusta masuunikuonan käytöstä betonissa ja sen eri vaikutuksista betonin eri ominaisuuksiin, kuten lämmöntuottoon ja lujuudenkehitykseen on ollut jo pitkään, mutta sen vaikutuksesta kuivumisnopeuteen tavanomaisissa rakenteissa ei ole riittävästi tutkittu.

Tässä työssä tehdyt mittaukset ovat otannaltaan varsin suppeat, eikä tuloksia voi siten analysoida tilastollisilla menetelmillä, joten myös tätä työtä vastaavat jatkotutkimukset suuremmalla otannalla toisivat lisää tarkkuutta tuloksiin.

Tässä työssä esitetyt tulokset on saatu erittäin vakaassa lämpötilassa, ja ympäristön suhteellinen kosteus on ollut jatkuvasti alhainen. Normaalisti betonien kuivuminen tapahtuu työmaaolosuhteissa, eli vaihtelevissa ympäristön kosteuspi-toisuuksissa ja lämpötiloissa. Alhaisemmassa lämpötilassa ja korkeammassa ympäristön kosteudessa betonin kuivuminen kestäisi pidempään.

## Lähteet

- 1 Betoniteollisuus ry. Sementti ja kasvihuonepäästöt. <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/>. Luettu 28.9.2022
- 2 Siikanen, Unto. 2014. Rakennusfysiikka, perusteet ja sovelluksia. Rakennustieto Oy.
- 3 Suomen rakentamismääräyskokoelma C2: Veden- ja kosteudeneristys. <https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/c2.pdf>. Luettu 28.9.2022
- 4 Åström, Gunnar et al. 2011. RIL 250-2011, Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
- 5 Niemi, Sami ja Merikallio, Tarja. 2022. Muovimatolla päällystetyt betonilattiat. Vauriot, korjaustarpeen arviointi ja korjaaminen. Ympäristöministeriö
- 6 Pitkäranta, Miia et al. 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus, Ympäristöopas 2016
- 7 Merikallio, Tarja. 2002. Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi. Suomen Betonitieto Oy
- 8 Lahti, Timo et al. 2021. RT kortti 103333 Betonin suhteellisen kosteuden mittaus. Rakennustieto Oy
- 9 Merikallio, Tarja et al. 2007. Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen, Suomen Betonitieto Oy, Lattian ja seinänpäällysteliitto ry
- 10 Vinha, Juha et al. 2014. RIL 255-1-2014, Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
- 11 Haara, Tuomo et al. 2018. BY 201, Betonitekniikan oppikirja 2018. Suomen Betoniyhdistys ry
- 12 Merikallio, Tarja et al. 2016. BY 65 Betoninormit 2016. Suomen Betoniyhdistys ry

- 13 Finnsementti Oy. 2019. Tuote-esite masuunikuonajauheelle KJ400.  
[https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019/02/Masuunikuonajauhe\\_KJ400.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019/02/Masuunikuonajauhe_KJ400.pdf). Luettu 20.1.2023
- 14 Wiiste Oy. 2019. Tuotekortti mittarille SH1.  
<https://www.wiiste.com/uploads/l6DR1TvX/tuotekortti-SolidRSH1.pdf>.  
Luettu 21.2.2023

## Liite 1: Tutkittujen betonien tiedot

Betonit valmistettiin Rudus Oy:n Konalan betonilaboratoriossa. Valmistuneista betonimassoista mitattiin lämpötila ja ilmamäärä, lisäksi niille tehtiin kartiokoe. Kartiokokeella mitattiin massan notkeudesta kertova painuma.

### Tavanomainen välipohjien valussa käytetty betoni C 30/37 (LA 37)

massan lämpötila	18,8°C
ilmamäärä	1 tilavuus %
kartiokoe	180 mm
vesi-sideainesuhde	0,6
sideaineet	CEM I ja CEM II
tiheys	2416 kg/m <sup>3</sup>

### Vähähiilinen Vihreä 30 Betoni (VI 37, nykyisin Vihreä betoni GWP.70)

massan lämpötila	18,7°C
ilmamäärä	1,5 tilavuus %
kartiokoe	175 mm
vesi-sideainesuhde	0,6
sideaineet	CEM III
tiheys	2410 kg/m <sup>3</sup>

### Tavanomainen NP betoni (NP 37)

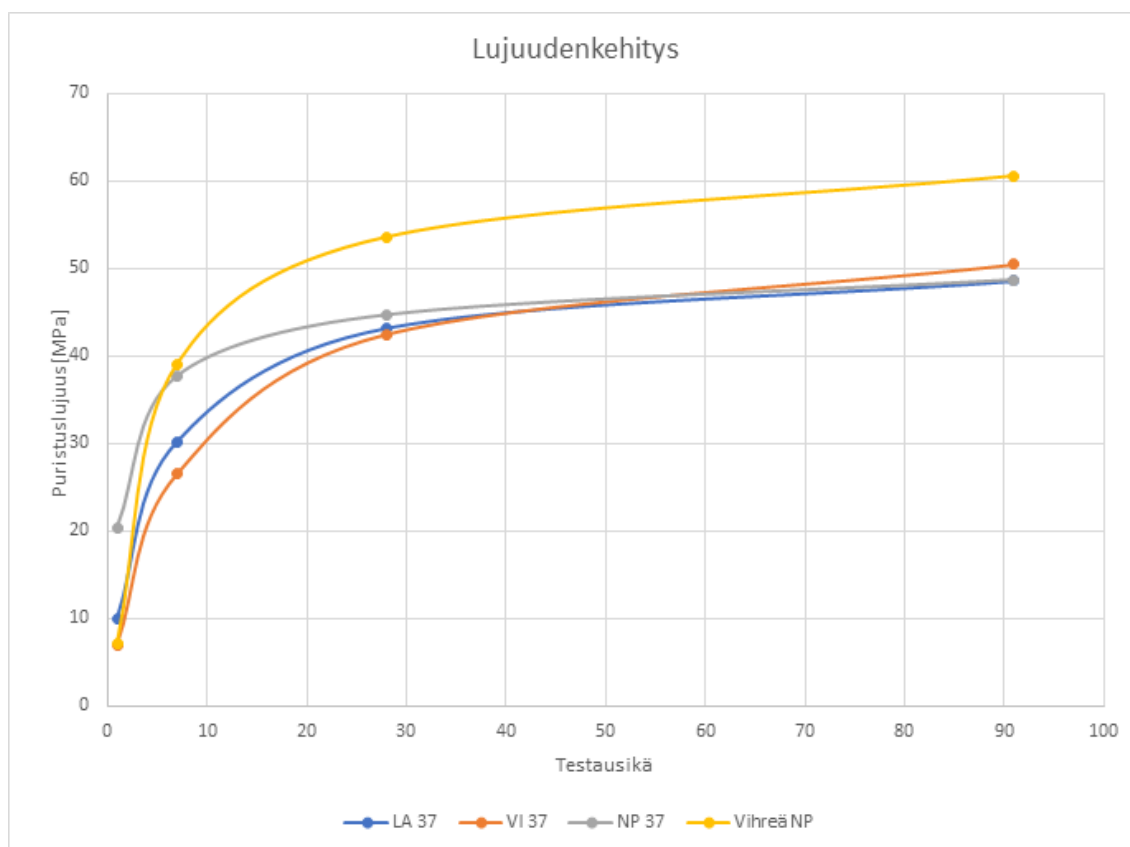
massan lämpötila	19,8°C
ilmamäärä	5,3 tilavuus %
kartiokoe	150 mm
vesi-sideainesuhde	0,45
sideaineet	CEM I ja CEM II
tiheys	2338 kg/m <sup>3</sup>

### Vähähiilinen Vihreä NP betoni (Vihreä NP)

massan lämpötila	19,0°C
ilmamäärä	5,6 tilavuus %
kartiokoe	150 mm
vesi-sideainesuhde	0,45
sideaineet	CEM I + masuunikuona
tiheys	2313 kg/m <sup>3</sup>

Taulukko 2. Valmistajan ilmoittama lujuudenkehitys tutkituille betonityypeille, Rudus Oy

	LA 37	VI 37	NP 37	Vihreä NP
1 vrk	10	7	20,4	7,2
7 vrk	30,2	26,5	37,7	39,1
28 vrk	43,2	42,5	44,7	53,6
91 vrk	48,6	50,5	48,7	60,6



Kuva 15. Tutkittujen betonilaatujen lujuudenkehityksen kuvaajat

## Liite 2: Kosteus- ja olosuhdemittaustulokset

KOSTEUSMITTAUSPÖYTÄKIRJA		Mittauksen tekijä: Alexis Gray								
Tilaaja:	Gray Oppari	Porareikien porausajankohhta:	1.4.2022							
Projekti:		Mittapaiden asennus:	4.4.2022							
Projekti nro:		Kosteusarvojen luku:	4.4.2022							
Piste	Mene- telmä	Mittapaän tunnus	Tila	Mittauskohta/rak- enneyyppi/raken- nekerros	Syvyys (mm)	Mittauksetulokset	T	Kokonais- epävarmuus RH %	RH % mittavirhe huomiotu	Muuta huomiotettavaa esim. mittapaän tasaantumis aika
Vihreä 30 A	Pora	50		betoni	20	77	13,9	20,8	± 2,0	75 - 79 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä 30 A	Pora	43		betoni	50	89	16,0	20,7	± 2,0	85 - 93 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä 30 B	Pora	55		betoni	20	79	14,3	20,8	± 2,0	77 - 81 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä 30 B	Pora	51		betoni	50	89	16,1	20,8	± 2,0	87 - 91 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
NP A	Pora	52		betoni	20	81	14,7	20,8	± 2,0	79 - 83 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
NP A	Pora	49		betoni	50	86	15,6	20,8	± 2,0	84 - 88 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
NP B	Pora	40		betoni	20	82	14,8	20,8	± 2,0	80 - 84 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
NP B	Pora	41		betoni	50	86	15,6	20,8	± 2,0	84 - 88 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä NP A	Pora	46		betoni	20	76	13,8	20,8	± 2,0	74 - 78 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä NP A	Pora	59		betoni	50	85	15,4	20,8	± 2,0	83 - 87 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä NP B	Pora	53		betoni	20	77	13,9	20,8	± 2,0	75 - 79 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä NP B	Pora	44		betoni	50	86	15,6	20,8	± 2,0	84 - 88 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
C 30/37 A	Pora	47		betoni	20	84	15,2	20,8	± 2,0	82 - 86 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
C 30/37 A	Pora	56		betoni	50	91	16,5	20,8	± 4,0	87 - 95 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
C 30/37 B	Pora	42		betoni	20	85	15,4	20,8	± 2,0	83 - 87 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
C 30/37 B	Pora	45		betoni	50	91	16,5	20,8	± 4,0	87 - 95 seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
		48		Sisällina		27	4,9	20,8	± 1,5	25,5 - 28,5
		58		Sisällina		26	4,7	20,8	± 1,5	24,5 - 27,5

Kuva 16. Porareikämittausten kosteusmittauspöytäkirja 4.4.2022



KOSTEUSMITTAUSPÖYTÄKIRJA											
Tilaaja: Gray Oppari					Mittauksen tekijä: Alexis Gray						
Projekti: Kosteusarvojen luku:					Porareikien porausajankohita: 14.4.2022						
Projekti nro:					Mittapöydän asennus: 19.4.2022						
Mittausarvojen luku:					19.4.2022						
Piste	Mene- telmä	Mittapöydän tunnukset	Tila	Mittauskohta/ rakennetyyppi/ rakennekerros	Syvyyden (m)	RH %	Mittausolosk. Abs g/m <sup>3</sup>	T °C	Kokonais- epävar- muus RH %	RH % mittavirhe huomioitu	Muuta huomioitavaa esim. mittapöydän tasaantumis aika
Vihreä 30 A	Pora	55		betoni	20	69	12,4	20,7	± 2,0	67 - 71	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä 30 A	Pora	43		betoni	50	83	14,9	20,6	± 2,0	81 - 85	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä 30 B	Pora	44		betoni	20	65	11,7	20,7	± 2,0	63 - 67	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä 30 B	Pora	41		betoni	50	84	15,1	20,7	± 2,0	82 - 86	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
NP A	Pora	59		betoni	20	75	13,5	20,7	± 2,0	73 - 77	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
NP A	Pora	49		betoni	50	84	15,1	20,7	± 2,0	82 - 86	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
NP B	Pora	52		betoni	20	76	13,7	20,7	± 2,0	74 - 78	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
NP B	Pora	54		betoni	50	83	14,9	20,7	± 2,0	81 - 85	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä NP A	Pora	53		betoni	20	69	12,5	20,8	± 2,0	67 - 71	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä NP A	Pora	40		betoni	50	80	14,5	20,8	± 2,0	78 - 82	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä NP B	Pora	51		betoni	20	68	12,3	20,8	± 2,0	66 - 70	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä NP B	Pora	50		betoni	50	80	14,5	20,8	± 2,0	78 - 82	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
C 30/ 37 A	Pora	58		betoni	20	79	14,2	20,7	± 2,0	77 - 81	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
C 30/ 37 A	Pora	45		betoni	50	88	15,8	20,7	± 2,0	86 - 90	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
C 30/ 37 B	Pora	46		betoni	20	78	14,1	20,8	± 2,0	76 - 80	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
C 30/ 37 B	Pora	48		betoni	50	88	15,8	20,7	± 2,0	86 - 90	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
		42		Sisäilma		26	4,7	20,8	± 1,5	24,5 - 27,5	
		57		Sisäilma		25	4,5	20,7	± 1,5	23,5 - 26,5	

Kuva 17. Porareikämittausten kosteusmittauspöytäkirja 19.4.2022

KOSTEUSMITTAUSPÖYTÄKIRJA		Mittauksen tekijä: Alexis Gray								
Tilaaja:		Porareikien porausaj ankohta:								
Projekti: Gray Oppari		Mittapöydän asennus:								
Projekti nro:		Kosteusarvojen luku:								
Piste	Mene- telmä	Mittapöydän tunnus	Tila	Mittauskohta/rak- ennetyypö/raken	Syvyys (mm)	Mittaus tulokset RH % Abs g/m <sup>3</sup>	T °C	Kokonais- epävar- muus RH %	RH % mittavirhe huomiointi	Muuta huomioitavaa esim. mittapöydän tasaantumis aika
Vihreä 30 A	Pora	51		betoni	20	61	20,7	± 3,0	58 - 64	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä 30 A		46		betoni	50	80	14,3	± 3,0	77 - 83	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä 30 B		55		betoni	20	64	11,6	± 3,0	61 - 67	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä 30 B		50		betoni	50	80	14,4	± 3,0	77 - 83	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
NP A		43		betoni	20	71	12,8	± 3,0	68 - 74	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
NP A		58		betoni	50	82	14,8	± 3,0	79 - 85	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
NP B		52		betoni	20	70	12,7	± 3,0	67 - 73	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
NP B		49		betoni	50	82	14,8	± 3,0	79 - 85	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä NP A		40		betoni	20	59	10,7	± 3,0	56 - 62	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä NP A		54		betoni	50	78	14,1	± 3,0	75 - 81	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä NP B		41		betoni	20	61	11,0	± 3,0	58 - 64	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
Vihreä NP B		53		betoni	50	78	14,1	± 3,0	75 - 81	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
C 30/37 A		44		betoni	20	72	13,0	± 3,0	69 - 75	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
C 30/37 A		47		betoni	50	86	15,5	± 3,0	83 - 89	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
C 30/37 B		59		betoni	20	70	12,7	± 3,0	67 - 73	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
C 30/37 B		48		betoni	50	86	15,5	± 3,0	83 - 89	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasaantumiset
		42		Sisäilma		25	4,5	± 1,5	23,5 - 26,5	
		45		Sisäilma		24	4,3	± 1,5	22,5 - 25,5	

Kuva 18. Porareikämittausten kosteusmittauspöytäkirja 16.5.2022

KOSTEUSMITTAUSPÖYTÄKIRJA		Mittauksen tekijä: Alexis Gray		Mittauksen tekijä: Alexis Gray		Mittauksen tekijä: Alexis Gray					
Tilaaja:		Gray Oppari		Porareikien porausajankohta:		17.6.2022					
Projekti:		Gray Oppari		Mittapäiden asennus:		20.6.2022					
Projekti nro:				Kosteusarvojen luku:		20.6.2022					
Piste	Mene- telmä	Mittapään tunnus	Tila	Mittauskohta/ rakennekerros	Syvyy- s (m)	Mittausluoket RH Abs g/m <sup>3</sup>	T °C	Kokonais- epävar- muus RH %	RH % mittavi- huomioitu	Muuta huomioitavaa esim. mittapään tasautumis aika	
Vihreä 30 A	Pora	30		betoni	20	62	11,2	20,8	± 2,0	60 - 64	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
Vihreä 30 A	Pora	23		betoni	50	80	14,5	20,8	± 2,0	78 - 82	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
Vihreä 30 B	Pora	34		betoni	20	61	11,1	20,9	± 2,0	59 - 63	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
Vihreä 30 B	Pora	29		betoni	50	81	14,7	20,9	± 2,0	79 - 83	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
NP A	Pora	31		betoni	20	70	12,7	20,9	± 2,0	68 - 72	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
NP A	Pora	37		betoni	50	80	14,5	20,8	± 2,0	78 - 82	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
NP B	Pora	32		betoni	20	68	12,4	20,9	± 2,0	66 - 70	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
NP B	Pora	26		betoni	50	80	14,6	20,9	± 2,0	78 - 82	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
Vihreä NP A	Pora	28		betoni	20	61	11,1	20,9	± 2,0	59 - 63	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
Vihreä NP A	Pora	25		betoni	50	76	13,8	20,9	± 2,0	74 - 78	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
Vihreä NP B	Pora	38		betoni	20	62	11,3	20,9	± 2,0	60 - 64	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
Vihreä NP B	Pora	24		betoni	50	76	13,8	20,9	± 2,0	74 - 78	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
C 30/ 37 A	Pora	59		betoni	20	67	12,1	20,8	± 2,0	65 - 69	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
C 30/ 37 A	Pora	51		betoni	50	84	15,2	20,9	± 2,0	82 - 86	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
C 30/ 37 B	Pora	35		betoni	20	71	12,9	20,9	± 2,0	69 - 73	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
C 30/ 37 B	Pora	36		betoni	50	85	15,5	20,9	± 2,0	83 - 87	seurattu ymp. olosuhteisiin + porareikään tasautumiset
		33		Sisälmaa		27	4,9	20,8	± 1,5	25,5 - 28,5	
		27		Sisälmaa		26	4,7	20,8	± 1,5	24,5 - 27,5	

Kuva 19. Porareikämittausten kosteusmittauspöytäkirja 20.6.2022

**RELIA**  
MEASUREMENT  
REPORT

*Report created automatically in Relia-service 20.01.2023 klo 12:00.*

**Project**

**Gray Opinnäytetyö**  
Myllypurontie 1  
00920 Helsinki

**Developer****Main Contractor****Relia Responsible User**

Alexis Gray  
Ramboll Finland Oy

Humidity and temperature values measured with SolidRH-system.  
Nbl Wiiste Inc is not responsible for the accuracy of reported values.

**The measurement range and typical accuracy of SolidRH-system**

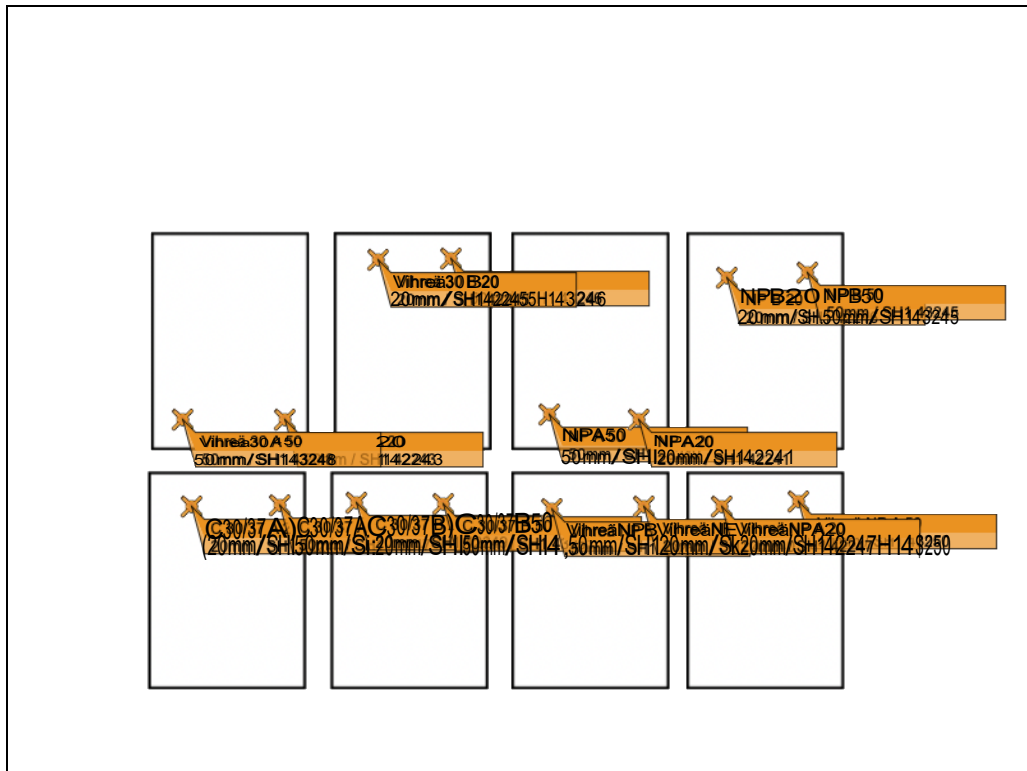
±2,5 %RH between 0 - 90 %RH, ±3,0 %RH over 90 %RH  
±0,2 °C between 0 - 60 °C

*The reported accuracy does not consider measurement errors due to invalid installation.*

*The reported accuracy does not consider measurement errors due to temperature difference between concrete and ambient air.*

Kuva 20. Tuloste Wiiste Oy:n Relia palvelusta, sivu 1, jossa on esitetty mm. projektin perustietoja.

### Plan:PohjaLaatikot



Kuva 21. Tuloste Wiiste Oy:n Relia palvelusta, sivu 2, jossa on esitetty antureiden sijainti pohjakuvassa.

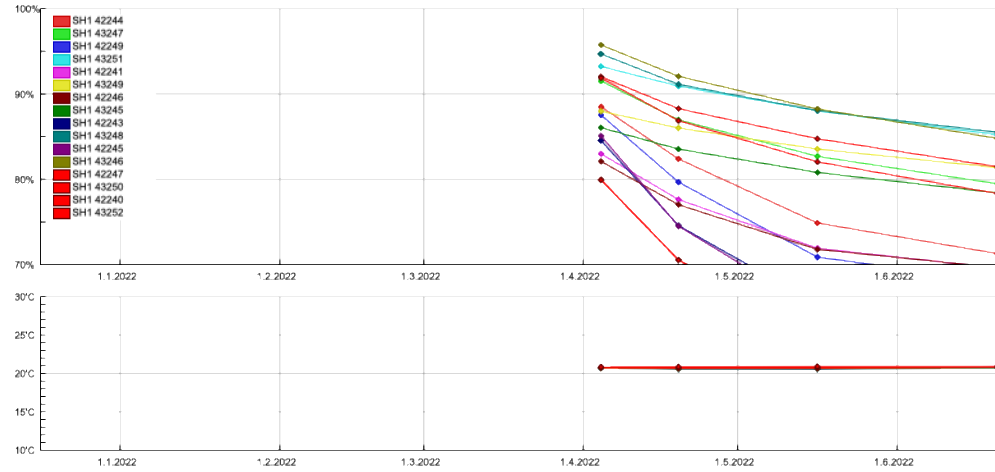
Measurement Point	Measurement Depth	Sensor #	Latest Measurement				
			Time	Ambient T [°C]	Ambient RH [%]	T [°C]	RH [%]
C 30/37 A 20	20mm	SH1 42244	20.06.2022 12:51	21.26	50.38	20.78	71.29
C 30/37 A 50	50mm	SH1 43247	20.06.2022 12:51	21.30	50.29	20.79	79.47
C 30/37 B 20	20mm	SH1 42249	20.06.2022 12:50	21.22	50.58	20.85	68.07
C 30/37 B 50	50mm	SH1 43251	20.06.2022 12:50	21.26	50.47	20.81	85.21
NP A 20	20mm	SH1 42241	20.06.2022 12:50	21.00	50.99	20.84	69.60
NP A 50	50mm	SH1 43249	20.06.2022 12:50	21.00	50.93	20.76	81.35
NP B 20	20mm	SH1 42246	20.06.2022 12:50	21.05	50.87	20.84	69.66
NP B 50	50mm	SH1 43245	20.06.2022 12:50	21.05	50.99	20.81	78.40
Vihreä 30 A 20	20mm	SH1 42243	20.06.2022 12:49	20.92	50.53	20.79	63.43
Vihreä 30 A 50	50mm	SH1 43248	20.06.2022 12:49	20.96	50.61	20.71	85.52
Vihreä 30 B 20	20mm	SH1 42245	20.06.2022 12:50	20.96	50.79	20.83	62.76
Vihreä 30 B 50	50mm	SH1 43246	20.06.2022 12:50	20.96	50.96	20.77	84.78
Vihreä NP A 20	20mm	SH1 42247	20.06.2022 12:50	21.09	50.99	20.84	60.89
Vihreä NP A 50	50mm	SH1 43250	20.06.2022 12:50	21.09	50.87	20.83	81.48
Vihreä NP B 20	20mm	SH1 42240	20.06.2022 12:50	21.17	50.73	20.90	60.87
Vihreä NP B 50	50mm	SH1 43252	20.06.2022 12:50	21.17	50.67	20.84	78.33

Measurement History

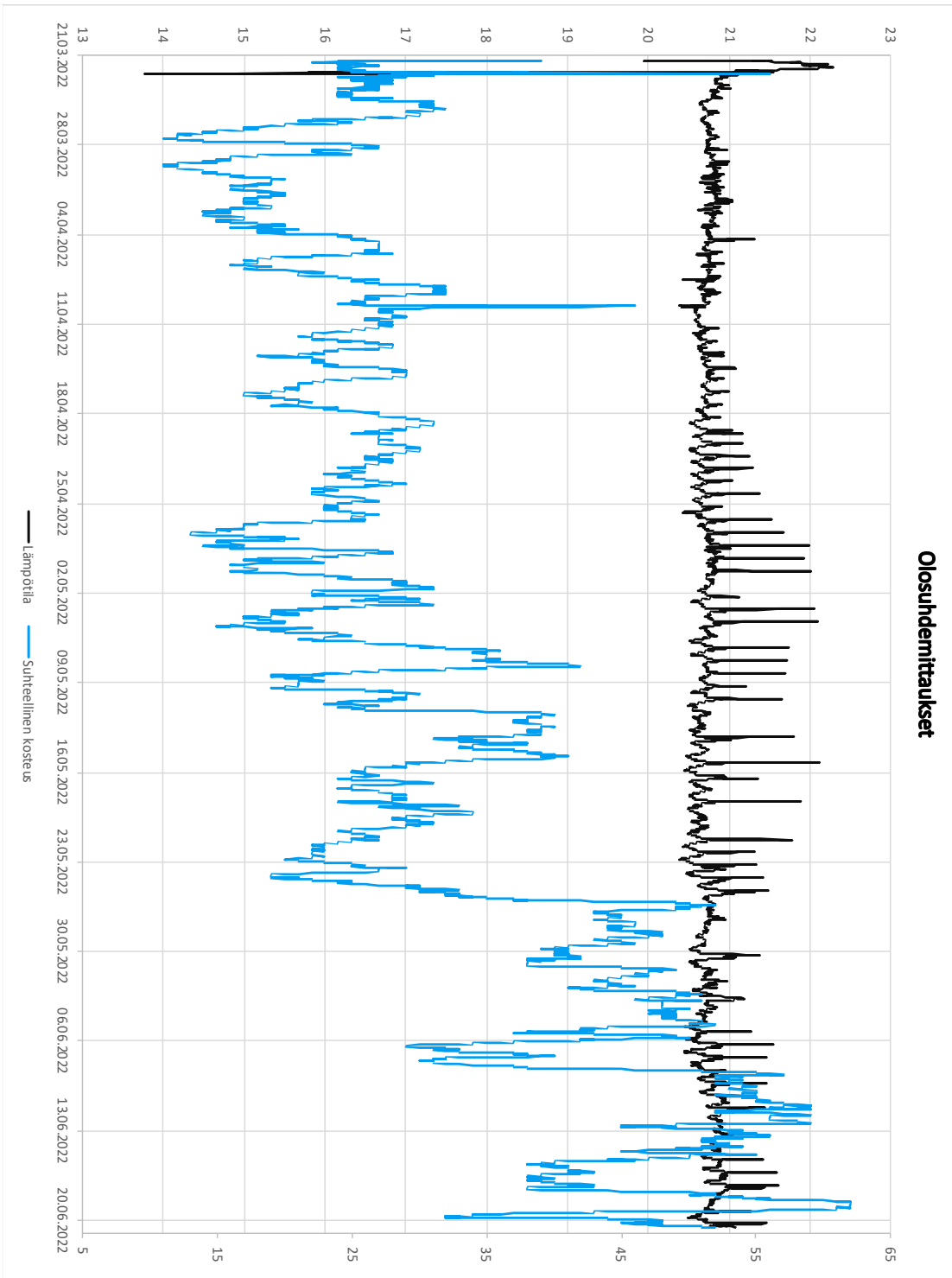
Measurement Point	Sensor #	Measurement Depth	04.04.2022	19.04.2022	16.05.2022	20.06.2022
			RH [%] T [°C]	RH [%] T [°C]	RH [%] T [°C]	RH [%] T [°C]
C 30/37 A 20	SH1 42244	20mm	88.50 20.73	82.39 20.66	74.88 20.65	71.29 20.78
C 30/37 A 50	SH1 43247	50mm	91.51 20.77	86.97 20.68	82.69 20.65	79.47 20.79
C 30/37 B 20	SH1 42249	20mm	87.53 20.75	79.67 20.74	70.88 20.70	68.07 20.85
C 30/37 B 50	SH1 43251	50mm	93.23 20.77	90.91 20.70	88.03 20.66	85.21 20.81
NP A 20	SH1 42241	20mm	82.98 20.78	77.63 20.75	71.92 20.71	69.60 20.84
NP A 50	SH1 43249	50mm	87.98 20.74	86.01 20.67	83.55 20.63	81.35 20.76
NP B 20	SH1 42246	20mm	82.10 20.76	77.02 20.78	71.78 20.76	69.66 20.84
NP B 50	SH1 43245	50mm	86.05 20.76	83.54 20.73	80.80 20.73	78.40 20.81
Vihreä 30 A 20	SH1 42243	20mm	84.53 20.75	74.58 20.63	65.40 20.62	63.43 20.79
Vihreä 30 A 50	SH1 43248	50mm	94.69 20.69	91.14 20.58	88.04 20.57	85.52 20.71
Vihreä 30 B 20	SH1 42245	20mm	85.08 20.80	74.51 20.72	64.60 20.72	62.76 20.83
Vihreä 30 B 50	SH1 43246	50mm	95.74 20.73	92.07 20.63	88.25 20.66	84.78 20.77
Vihreä NP A 20	SH1 42247	20mm	79.97 20.82	70.56 20.80	61.94 20.76	60.89 20.84

Kuva 22. Tuloste Wiiste Oy:n Relia palvelusta, sivu 3, jossa on esitetty viimeisimmät mittaustulokset antureille ja aikaisempia tuloksia.

Vihreä NP A 50	SH1 43250	50mm	<b>92.03</b> 20.77	<b>88.28</b> 20.73	<b>84.75</b> 20.73	<b>81.48</b> 20.83
Vihreä NP B 20	SH1 42240	20mm	<b>79.91</b> 20.83	<b>70.53</b> 20.86	<b>61.76</b> 20.90	<b>60.87</b> 20.90
Vihreä NP B 50	SH1 43252	50mm	<b>91.87</b> 20.79	<b>86.87</b> 20.75	<b>82.04</b> 20.82	<b>78.33</b> 20.84



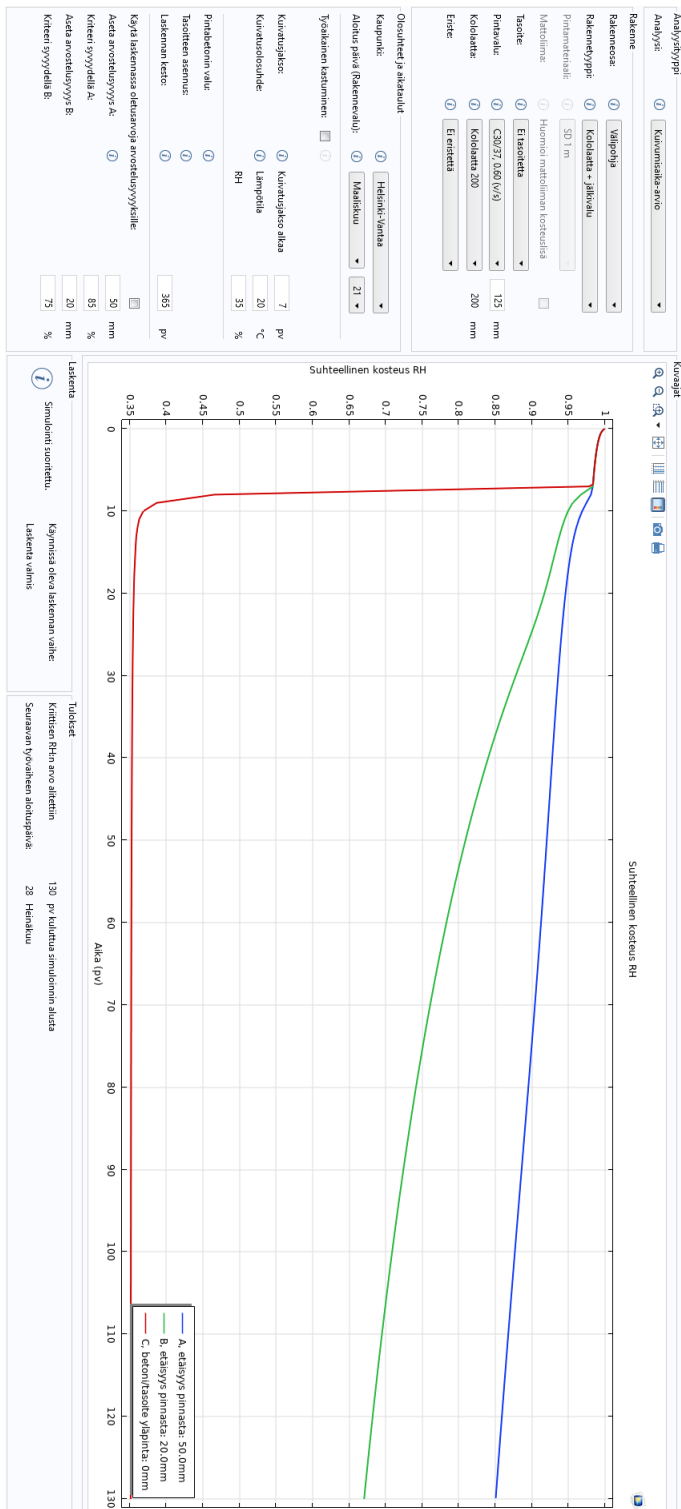
Kuva 23. Tuloste Wiiste Oy:n Relia palvelusta, sivu 4, jossa on esitetty mittaus-  
tuloksia antureille, sekä tuloksista tehdyt kuvaajat



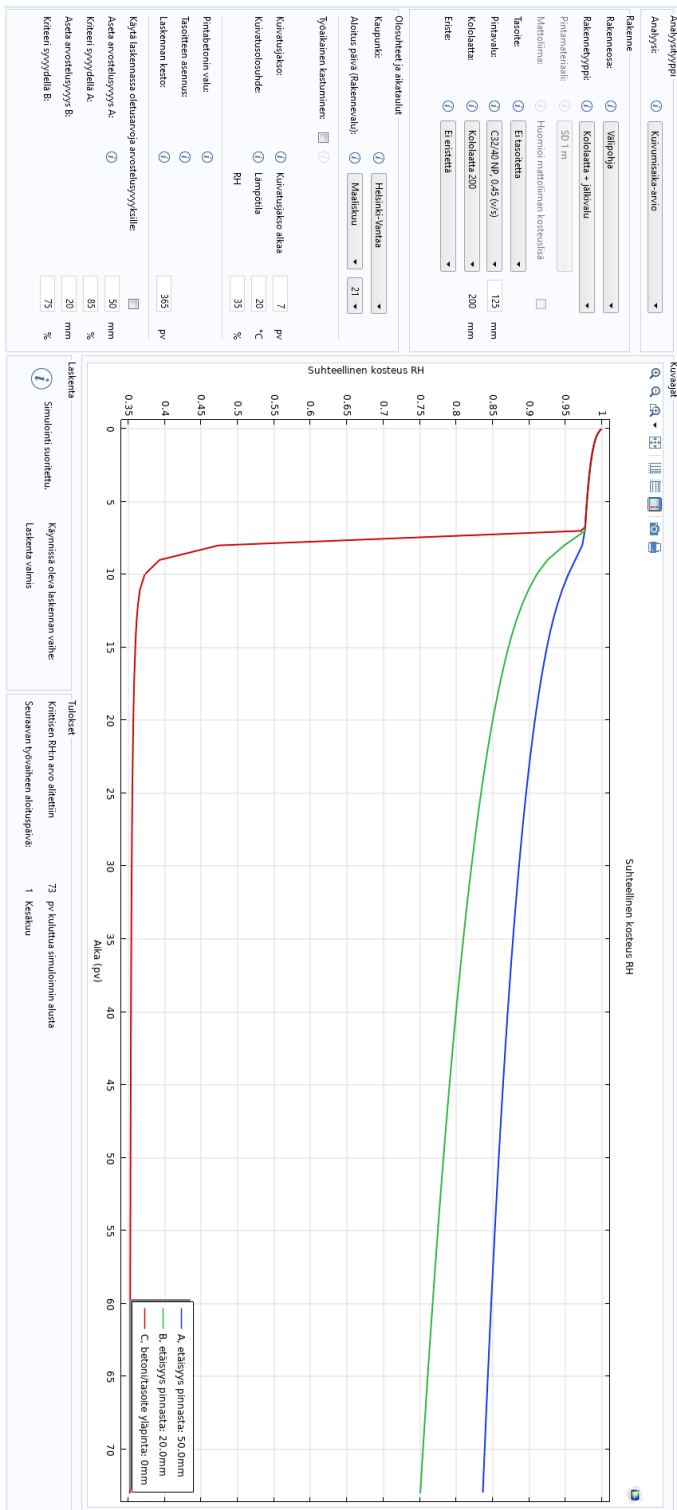
Kuva 24. Kuvaaja olosuhdemittausten tuloksista



## Liite 3: Kuivumisaika-arviot



Kuva 25. BY 2020 -ohjelmalla tehty kuivumisaika-arvio C 30/37 betonille



Kuva 26. BY 2020 -ohjelmalla tehty kuivumisaika-arvio NP betonille

## Betonirakenteiden kuivuminen

"Tarja Merikalio. Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi. Betonikeskus 2002."

Kohde: **Kiinteistö Oy**

### Liitto laattavälipohja

Kun olet ensin valinnut haluamasi rakenneytymän sivun alareunan taulukoista, syötä sitten arvot tavoitekosteudelle, vesi-sideainesuhteelle ja rakenteen paksuudelle. Valitse lisäksi vaihtoehdoista kastumisaika sekä kuivumisolosuhteista kosteus ja lämpötila. Kuivumisaika ilmoitetaan viikkoina. Kuivumisajan lasketaan alkavan siitä kun rakenne ei enää saa lisäkosteutta. Jos jälkihoito tehdään kastelemalla, lasketaan aika kastelun lopettamisen jälkeen. Jos jälkihoito tehdään peittämällä, lasketaan aika valusta.

	Syöttöarvot	Raja-arvo	Peruskuivumisaika
Tavoitekosteus	85.0 %	"80-100"	83.0 Kerroin
Vesi-sideainesuhte	0.60	"0.4-0.7"	0.70 Kerroin
Rakenteen paksuus	125.0 mm	"150-200"	0.51

# BY1021

Kastumisaika

- Kuivassa  
 Kosteassa yli 2 viikkoa  
 Kastunut yli 2 viikkoa

### Kuivumisolosuhteet

Kosteus

- 35 %  
 50 %  
 60 %  
 70 %  
 80 %

Lämpötila

- 10 C  
 15 C  
 20 C  
 25 C  
 30 C

Kuivumisaika viikkoina:

20.6



Kuva 27. BY 1021 -laskentapohjalla tehty kuivumisaika-arvio C 30/37 betonille

## Betonirakenteiden kuivuminen

"Tarja Merikalio. Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi. Betonikeskus 2002."

Kohde: **Kiinteistö Oy**

### Liitto laattavälipohja

Kun olet ensin valinnut haluamasi rakenneytymän sivun alareunan taulukoista, syötä sitten arvot tavoitekosteudelle, vesi-sideainesuhteelle ja rakenteen paksuudelle. Valitse lisäksi vaihtoehdoista kastumisaika sekä kuivumisolosuhteista kosteus ja lämpötila. Kuivumisaika ilmoitetaan viikkoina. Kuivumisajan lasketaan alkavan siitä kun rakenne ei enää saa lisäkosteutta. Jos jälkihoito tehdään kastelemalla, lasketaan aika kastelun lopettamisen jälkeen. Jos jälkihoito tehdään peittämällä, lasketaan aika valusta.

	Syöttöarvot	Raja-arvo	Peruskuivumisaika
Tavoitekosteus	85.0 %	"80-100"	83.0 Kerroin
Vesi-sideainesuhte	0.45	"0.4-0.7"	0.38 Kerroin
Rakenteen paksuus	125.0 mm	"150-200"	0.46

BY1021

Kastumisaika

- Kuivassa  
 Kosteassa yli 2 viikkoa  
 Kastunut yli 2 viikkoa

### Kuivumisolosuhteet

Kosteus

- 35 %  
 50 %  
 60 %  
 70 %  
 80 %

Lämpötila

- 10 C  
 15 C  
 20 C  
 25 C  
 30 C

Kuivumisaika viikkoina:

10.5



Kuva 28. BY 1021 -laskentapohjalla tehty kuivumisaika-arvio NP betonille