

Opinnäytetyö (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka

2018

Tuomas Kiiski

**KOSTEUSANTURIEN
KESTÄVYYS
PITKÄKESTOISESSA BETONIN
KOSTEUSMITTAUKSESSA**

Tuomas Kiiski

KOSTEUSANTURIEN KESTÄVYYS PITKÄKESTOISESSA BETONIN KOSTEUSMITTAUKSESSA

Tässä opinnäytetyössä testattiin ennalta valitun kapasitiivisen rakennekosteusanturin soveltuvuutta betonin kosteusmittaukseen, jossa se altistuu pitkäaikaisesti suurelle suhteelliselle kosteudelle sekä sementistä ja valussa käytetyistä lisäaineista vapautuville kemikaaleille. Työllä halutaan selvittää, kestäkö valittu anturi ja sen elektroniikka näitä olosuhteita sekä voiko anturin antamiin tuloksiin luottaa kosteusmittauksen aikana ja sen jälkeen. Työn toimeksiantaja on Pietiko Oy, joka myy ja valmistaa erilaisia talotekniikan mittausrakenteita ja -järjestelmiä. Testattu rakennekosteusanturi kuuluu Pietiko Oy:n langattomaan mittausrakenteeseen.

Anturin testaus toteutettiin valamalla betonilaatta, johon porattiin reikiä usealle anturille RT-kortin betonin kosteusmittausta koskevan ohjeistuksen mukaisesti. Porattuihin reikiin asennettiin langattomiin lähettämiin kytketyt kosteusanturit, joiden tuloksia seurattiin tutkimuksen ajan. Verrokkimittauksena käytettiin toisen tunnetun valmistajan betonin kosteusmittaukseen tarkoitettuja antureita. Anturien kalibrointitietoja seurattiin ennen koetta ja sen jälkeen.

Testauksen lopputuloksena saatiin selville, ettei anturi kestä sellaisenaan luotettavasti altistusta suurelle suhteelliselle kosteudelle, kemikaaleille tai anturin pinnalle tiivistyvälle kosteudelle anturimoduulin valmistajan tietojen vastaisesti. Pietiko Oy jatkaa anturin kehitystä ja tutkii mahdollisuutta hyödyntää tässä työssä käytettyä vertailuanturia oman järjestelmänsä osana.

ASIASANAT:

betoni, kosteusmittaus, kosteusanturi

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Information and Communications Technology

2018 | 30 pages

Tuomas Kiiski

THE DURABILITY OF HUMIDITY SENSORS IN LONG-TERM CONCRETE HUMIDITY MEASUREMENTS

The purpose of this thesis was to test the preselected capacitive humidity sensor module's suitability for concrete humidity measurement where it becomes exposed to a high level of relative humidity and different kinds of chemicals from cement and additives for a prolonged time. The objective of this thesis was to find out if the chosen humidity sensor and its electronics can handle this environment and can the results of measurements be trusted both during and after the humidity measurement. The client of this thesis was Pietiko Oy that sells and manufactures different kinds of building services engineering related meters and systems. The tested humidity sensor is part of Pietiko's wireless datalogger system.

The humidity sensors were tested by casting a concrete slab in which holes were drilled according to Rakennustieto card's instructions about concrete humidity measurement. Humidity sensors were connected to wireless transmitters and then installed into the drilled holes. The results of measurements were monitored during the test. Another known manufacturer's concrete humidity sensors were used as a comparison. Sensors were calibrated before and after the test.

As a result of the test it was found out that the sensors can't handle reliably exposure to the high relative humidity, chemicals nor the condensing humidity unlike the module's manufacturer claims. Pietiko will continue developing the humidity sensor and explores the possibility of exploiting the sensor used as a comparison in this test as a part of its own datalogger system.

KEYWORDS:

concrete, humidity measurement, humidity sensor

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	5
1 JOHDANTO	6
2 BETONIN KOSTEUSMITTAUKSESTA YLEISESTI	8
2.1 Pintakosteusmittaus	8
2.2 Porareikämittaus	9
2.3 Näytepalamittaus	10
3 KOSTEUSANTURIT	12
3.1 Kapasitiiviset kosteusanturit yleisesti	12
3.2 Valittu kosteusanturi	12
3.3 Vertailuanturi	14
4 ANTURIEN TESTAUS	15
4.1 Mittausjärjestelmän valmistus ja valmistelut	15
4.2 Betonilaatan valu ja valmistelu	17
4.3 Anturitestaus	18
5 YHTEENVETO	29
LÄHTEET	30

KÄYTETYT LYHENTEET

ABS	Eräs kestävä muovilaatu, akryylinitriilibutadieenistyreeni
AD-muunnin	Analogia-digitaalimuunnin (analog-to-digital converter)
ESD	Sähköstaattinen purkaus (electrostatic discharge)
DLS	Pietiko Oy:n loggerijärjestelmän tuotenimi
IAQ.THB+eTH	Pietiko Oy:n DLS-loggerijärjestelmän ulkoisella kosteusanturilla varustettu lähetinyksikkö (indoor air quality temperature humidity barometric pressure external temperature humidity)
I2C	Kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylätyyppi (inter-integrated circuit)
PT1000	Platinalämpötila-anturi, jonka nimellisvastus 0 °C:n lämpötilassa on 1000 Ω
PTAT	Suhteessa absoluuttiseen lämpötilaan (proportional to absolute temperature)
PTFE	Eräs muovilaatu, polytetrafluorieteeni
RTD	Vastuslämpötila-anturi (resistance temperature detector)
RT-kortti	Rakennustietokortti
SPI	Kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylätyyppi (serial peripheral interface)
TVS	Ylijännitesuoja (transient voltage suppressor)
VOC-yhdiste	Haihtuva orgaaninen yhdiste (volatile organic compounds)
%RH	Suhteellisen kosteuden yksikkö (% relative humidity)

1 JOHDANTO

Betonivalun jälkeen on tärkeää seurata sen kosteutta, jotta tiedetään, milloin betoni on riittävän kuivaa päällystemateriaalin, kuten muovimaton tai erilaisten pinnoitteiden, asentamiseen. Pitkäaikaisen kosteusmittauksen avulla saadaan selville kuivumistrendi, jonka avulla voidaan arvioida, milloin betoni on valmis pinnoitettavaksi. Liian aikaisin pinnoitettuun betoniin sitoutunut kosteus aiheuttaa homeriskin, ja pinnoitettuun betoniin jäänyt kosteus saattaa reagoida myös esimerkiksi muovimattojen kiinnitykseen käytetyn liiman kanssa vapauttaen ilmaan mahdollisesti haitallisia VOC-yhdisteitä. Pitkäaikaisen kosteusmittauksen avulla huomataan myös, jos betoni ei kuivu oletetulla tavalla, ja osataan puuttua ajoissa esimerkiksi työmaan kuivumisolosuhteisiin, kuten lämpötilaan ja riittävään tuuletukseen.

Erilaisten langattomien mittaus- ja tiedonkeruujärjestelmien yleistyessä näiden käyttö myös betonin kosteuden seurannassa on yleistynyt. Langattomat tiedonkeruuyksiköt ja kosteusanturit voidaan asentaa kohteeseen betonivalun yhteydessä, tai pian sen jälkeen, ja niiden avulla betonin kuivumista voidaan seurata jopa reaaliaikaisesti erilaisten pilvipalveluiden kautta. Betonin kosteuden seurantamittauksessa käytetyt kosteusanturit joutuvat pitkäkestoiseen koetukseen haastavassa ympäristössä, jossa suhteellinen kosteus on lähes 100 %RH, anturin pinnalle saattaa tiivistyä kosteutta ja pH-taso on vahvasti emäksinen. Tästä syystä kosteusanturien huolellinen suunnittelu ja testaus on tärkeässä asemassa luotettavaa kosteusanturia suunniteltaessa.

Monet mittalaittevalmistajat ovat tuoneet markkinoille betonin kosteusmittaukseen soveltuvia järjestelmiään ja näiden käyttöä onkin tutkittu aiemmissa opinnäytetöissä. Clewerin vuonna 2015 julkaistussa opinnäytetyössä on tutkittu Wiiste Oy:n SolidRH-sarjan betonikosteusanturien käyttöä. [1] Myös Vauhkosen vuonna 2014 ja Huohvanaisen vuonna 2012 valmistuneissa opinnäytetöissä tutkitaan ja vertaillaan erilaisten langattomien tiedonkeruuyksiköiden käyttöä betonin kosteusmittauksessa. [2, 3] Näissä töissä pääpainopisteenä on kuitenkin ollut antureilla suoritettavat mittaukset ja anturien toimintaan ei ole otettu tarkemmin kantaa.

Tässä työssä keskitytään tutkimaan Pietiko Oy:n rakennekosteusmittaukseen suunnitellun kosteusanturin käyttöä betonin kosteusmittauksessa ja erityisesti kosteusanturin elektroniikan kestävyyttä sekä soveltuvuutta mittausympäristön haasteellisiin olosuhteisiin. Työssä käsitellään yleisimpiä kapasitiivisilla kosteusantureilla suoritettavia betonin

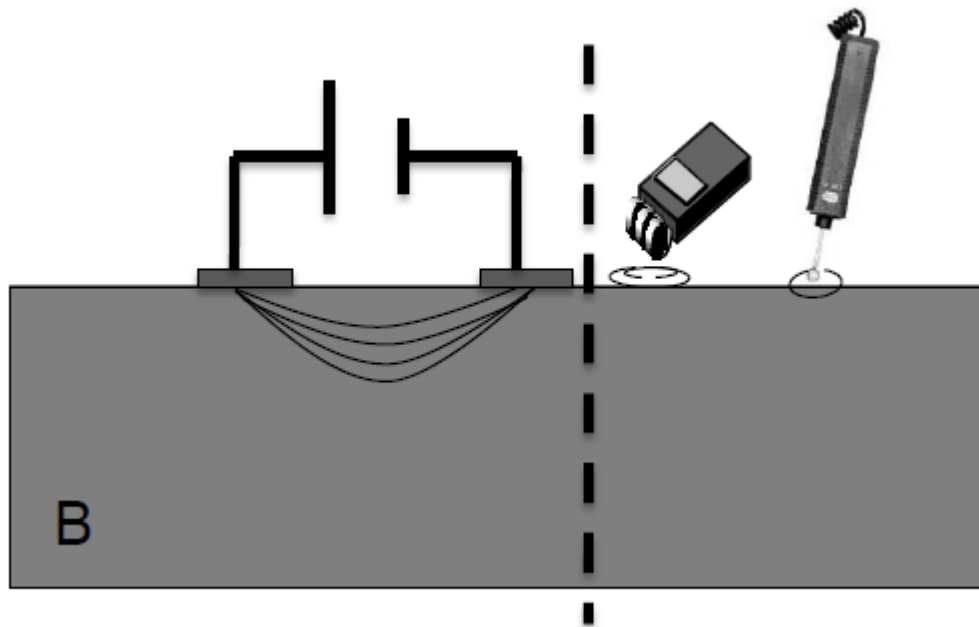
kosteusmittaustapoja, selitetään kapasitiivisten kosteusanturien toimintaperiaatetta yleisesti ja erityisesti tässä työssä käytettyjen kosteusanturien rakennetta ja toimintaa. Työn painopiste on kosteusanturien testausprosessin ja saatujen tulosten tarkastelussa.

2 BETONIN KOSTEUSMITTAUKSESTA YLEISESTI

Tässä luvussa käsitellään erilaisia betonin kosteusmittausmenetelmiä ja kuvataan lyhyesti mittauksen suoritustapa, vahvuudet ja heikkoudet.

2.1 Pintakosteusmittaus

Pintakosteusmittaus tarkoittaa mitattavan pinnan kosteuden mittaamista pintakosteusilmaisimella kuvan 1 mukaisesti. Pintakosteusilmaisinten toiminta perustuu normaalisti mittapään kapasitanssin muuttumiseen mitattavan materiaalin sähköisten ominaisuuksien johdosta. Pintakosteusmittareista puhutaan yleisesti pintakosteusilmaisimina, sillä niiden mittauksen tarkkuus on parhaimmillaankin vain suuntaa antava. [4, 5] Pintakosteusmittarit ilmaisevat koko mitattavan syvyyden kosteuspitoisuuden, eikä sen perusteella voi erotella eri syvyyksillä olevien rakenteiden kostetta. Pintakosteusmittarien näyttämiin saattavat myös vaikuttaa rakenteiden sisällä olevat teräkset, eri materiaalien koostumukset ja mitattavan pinnan vaihtelut. [4, s.11]



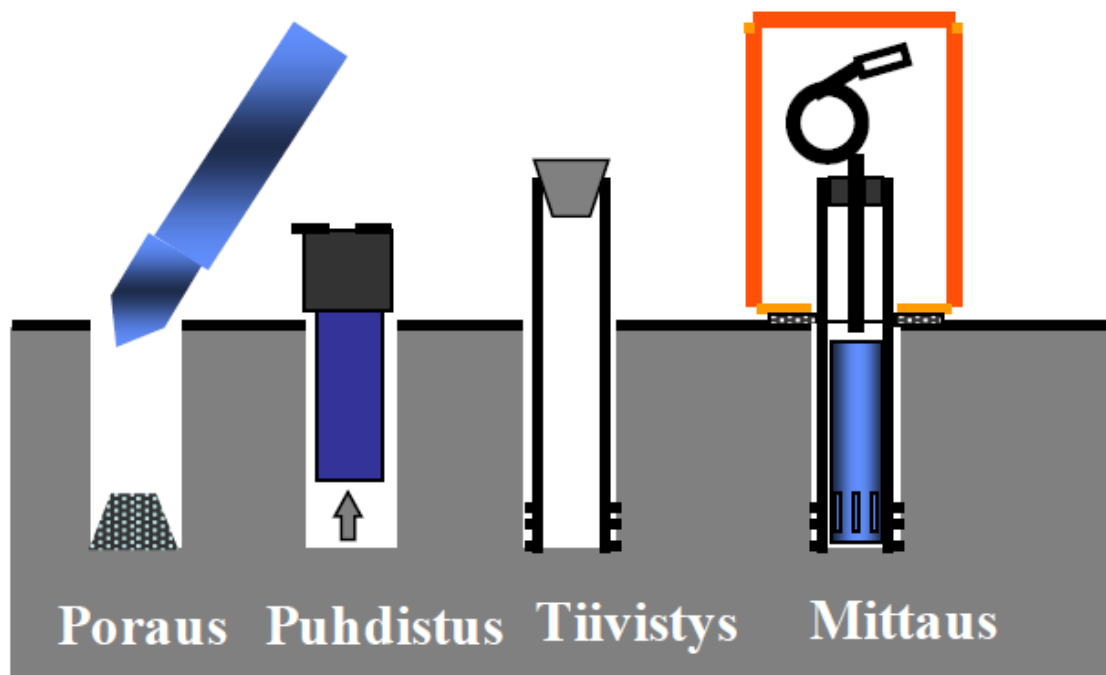
Kuva 1. Pintakosteusmittauksen periaatekuva. [6]

Pintakosteusmittarien hyviä puolia ovat mittausnopeus sekä mahdollisuus havaita kosteus mitattavan pinnan, kuten laattojen, alta rikkomatta pintaa. Mittaus perustuu

kuitenkin mitattavan pinnan sähkönjohtavuuteen, johon vaikuttavia tekijöitä on kosteuden lisäksi muitakin, joten suurenkin virheen mahdollisuus on syytä tiedostaa. RT 14-10984 kehottaakin tästä syystä käyttämään pintakosteusmittareita vain suuntaa antaviin mittauksiin. [4, s.11]

2.2 Porareikämittaus

Porareikämittauksessa mitattavan betonilaatan suhteellinen kosteus mitataan tiettyyn mittaussyvyyteen poratusta reiästä kosteusmittarilla. Mittaus valmistellaan poraamalla betonilaattaan reikä, jonka jälkeen reikä puhdistetaan huolellisesti mittaustulokseen vaikuttavasta pölystä sekä irtoroskasta. Tämän jälkeen porattuun reikään työnnetään putki, jonka tarkoitus on päästää vain reiän pohjalla oleva kosteus porareikään, jolloin mittaus-tulos edustaa tiettyä syvyyttä. Lopuksi putken ja betonin sauma sekä putken yläpää tiivistetään huolellisesti vesihöyrynkästäväällä kitillä. [4, s.4]



Kuva 2. Porareikämittauksen vaiheet. [7]

Kosteusanturi asetetaan ja tiivistetään reikään sen kosteusolosuhteiden tasaannuttua. Porareian kosteusolosuhteiden tasaantumiseen varataan normaalisti 3 vuorokautta porauksen suorittamisesta. Kosteusanturi voidaan asettaa porareikään myös heti poraamisen ja reiän valmisteluiden jälkeen, jolloin mittaus voidaan suorittaa 3 vuorokauden

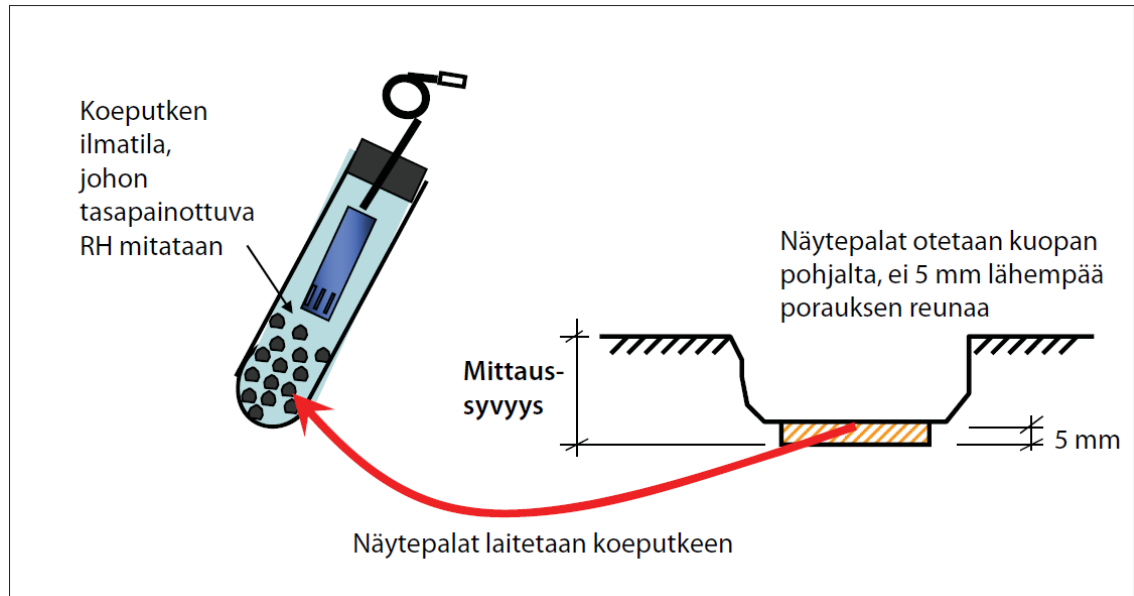
tasaantumisen jälkeen. Muussa tapauksessa mittausta voidaan suorittaa, kun anturi on tasaantunut mittausreiän olosuhteisiin. Tasaantumisaika riippuu anturin valmistajasta, mutta nopeimpienkin anturien tasaantumisaika on normaalisti vähintään tunti. [4, s.5]

Porareikämittauksen avulla on mahdollista saavuttaa hyvä mittaustarkkuus, kunhan noudatetaan RT-kortin ohjeistusta. Porareikämittaus on pintakosteusmittaukseen verrattuna työläs mittaus tapa ja oikea mittaustulos saadaan aikaisintaan 3 vuorokautta porauksen jälkeen. Porareikämittauksen mittaustarkkuus kärsii, jos se suoritetaan esimerkiksi toistuvasti samasta mittausreiästä, putkittamattomasta reiästä tai se suoritetaan liian pian porauksen jälkeen. [4, s.11–12] Tällöin puhutaan suuntaa antavista mittauksista, jotka saattavat olla riittäviä mittaustarkoituksesta riippuen. [4, s.3]

2.3 Näytepalamittaus

Näytepalamittauksessa betonilaatasta otetaan tietyltä syvyydeltä pieniä näytepaloja, joiden suhteellinen kosteus mitataan näyteputkessa kosteusanturin avulla. Mittaus valmistetaan piikkaamalla tai poraamalla betoniin kuoppa lähelle haluttua mittaussyvyyttä, jonka jälkeen kuoppa puhdistetaan huolellisesti pölystä ja irtonaisesta betoniaineksesta. [4, s.7]

Seuraavaksi koepalat piikataan kuvan 3 mukaisesti irti kuopan keskeltä halutusta mittaussyvyydestä ja ne laitetaan esimerkiksi lasiseen koeputkeen yhdessä kosteusanturin kanssa ja koeputken pää tiivistetään vesihöyrynestävällä kitillä. Tämän jälkeen koeputkessa olevien kosteusolosuhteiden annetaan tasaantua rakennuksen käyttöolosuhteita vastaavassa lämpötilassa vähintään 5–12 tuntia, jonka jälkeen kosteuslukemat voidaan lukea. [4, s.7–8]



Kuva 3. Näytepalamittauksen suoritus [4].

Näytepalamittaus on toinen RT-kortin suosittlemista tarkoista kosteuden mittaustavoista ja on asiantuntijoiden paljon käyttämä mittausmetodi. Sen hyvä puoli on saavutettava mittaustarkkuus, kun mittaus suoritetaan oikeaoppisesti. Porareikämittauksen tapaan se on pintakosteusmittausta hitaampi ja työläämpi mittaustapa ja vaatii aina rakenteiden pinnan rikkomista. [4, s.3]

3 KOSTEUSANTURIT

Tässä luvussa esitellään kapasitiivisten kosteusanturien toiminta yleisesti ja verrataan valitun kosteusanturin sekä verrokkianturin tietoja keskenään.

3.1 Kapasitiiviset kosteusanturit yleisesti

Kapasitiivisten kosteusanturien toiminta perustuu nimensä mukaisesti kapasitanssin muutokseen, jonka anturi havaitsee. Eräs yleisesti käytetty kapasitiivinen kosteusanturityyppi on ohutkalvopolymeerianturi. Siinä lasisen tai keraamisen substraatin päälle on koottu kaksi elektrodia, joiden välissä on eristeenä toimiva ohutkalvopolymeeri. Ohutkalvopolymeeri absorboi tai vapauttaa vesihöyryä seuraten ympäröivän ilman suhteellista kosteutta. Ohutkalvopolymeerin eristeominaisuudet riippuvat siihen absorboituneen veden määrästä ja näin anturin kapasitanssi muuttuu anturia ympäröivän suhteellisen kosteuden muuttuessa. [8]

Anturi voi muuttaa kapasitanssiarvon AD-muuntimen tai muun IC:n avulla digitaaliseen muotoon, jolloin kapasitanssiarvo tai jo kosteuslukemaksi muutettu arvo voidaan lähettää mittalaitteelle esimerkiksi I2C- tai SPI-väylän kautta. Kosteuslukema voidaan siirtää anturilta mittalaitteelle myös analogisena jännite- tai virtasignaalina, jonka mittalaite muuntaa kyseistä arvoa vastaavaksi kosteuslukemaksi.

3.2 Valittu kosteusanturi

Valitun kosteusanturimoduulin nimeä ei tämän opinnäytetyön toimeksiantajan pyynnöstä paljasteta. Anturimoduuli on erittäin pienikokoinen, noin 5 × 10 mm:n kokoiselle levyllä valmistettu kokonaisuus, joka sisältää kosteusanturin sekä mikropiirin, joka suorittaa kosteusanturin analogisen mittaustuloksen muunnoksen digitaaliseen muotoon, korjaa mittaustulosten lineaarisuus- ja lämpötilavirheen, mittaa lämpötilan ja hoitaa digitaalisen tiedonsiirron isäntälaitteeseen I2C-väylän yli. Kosteusanturi on kapasitiivinen polymeerikosteusanturi. Lämpötila-anturin mittauseriaate on PTAT, jossa mikropiirin sisään integroidun diodin yli oleva jännite muuttuu ympäröivän lämpötilan muutokseen verrannollisesti.

Anturimoduulin valmistaja lupaa moduulin kestävän hyvin 100 %RH:ta, anturin pinnalle tiivistyvää kosteutta sekä erilaisia kemikaaleja. Anturin tietolehden mukaan moduulin toleranssi on $\pm 1,8$ %RH, kun suhteellinen kosteus on 0–80 %RH ja lämpötila on 23 °C. Tätä suuremmassa kosteudessa toleranssi kasvaa lineaarisesti, kunnes 100 %RH:n kosteudessa virhe on ± 4 %RH:ta. Lämpötilamittauksen toleranssi on $\pm 0,2$ °C, kun lämpötila on 0–60 °C.



Kuva 4. Miran DLS IAQ.THB+eTH100 -lähetinyksikkö. [Pietiko Oy]

Anturimoduuli on juotettu kiinni piirilevyyn, johon myös lähetinyksikön mikropiirille kulkevat I2C-väylän johdot on kytketty. Näiden lisäksi piirilevyllä on vain keraamiset häiriönsuodatuskondensaattorit sekä TVS-diodeista koostuva ESD-suoja. Anturimoduuli ja sen piirilevy on suojattu ruostumattomasta teräksestä valmistetulla kapselilla, joka on rei'itetty kosteusanturin kohdalta. Anturi on kytketty kuvan 4 mukaisesti Miran DLS IAQ.THB+eTH -lähetinyksikköön, josta mittaustulokset siirtyvät ensin järjestelmän sisäisen radioyhteyden kautta keskusyksikölle ja sen jälkeen GPRS-yhteyden kautta pilvipalveluun.

3.3 Vertailuanturi

Vertailuanturina käytettiin Vaisalan valmistama HMP110-kosteus- ja lämpötilamittapää, joka hyödyntää Vaisalan HUMICAP 180R -kosteusanturia. Vaisala on kehittänyt erilaisia kosteusantureita jo lähes 40 vuotta ja on yksi eniten käytetyistä kosteusanturimerkeistä rakenne- ja betonikosteusmittauksessa. HMP110-mittapää on valmistettu pinnoitetusta alumiinista ja sen halkaisija on 12 mm ja pituus noin 71 mm. Anturien päällä on kromipinnoitetusta ABS-muovista valmistettu karkeasuodin, jonka sisäpuolella on PTFE-muovista valmistettu hienorakenteinen kalvosuodin. Mittapää pitää sisälleen 180R-ohutkalvopolymeerikosteusanturin, PT1000 RTD -lämpötila-anturin sekä mikroprosessorin oheiskomponentteineen, jotka hoitavat kosteus- ja lämpötila-anturien kapasitanssi- ja resistanssiarvojen muutoksen digitaaliseksi, tallentavat anturien kalibrointidatan, mahdollistavat sarjaliikenteen ja niin edelleen. Mittapäästä löytyy erilaisia versioita, jotka tukevat erilaisia lähtöjä, kuten analogisia virta- tai jännitelähtöjä tai digitaalista RS-485 -sarjalähtöä. [9, 10]

Vaisalan mittapään mitta-alue on 0–100 %RH ja -40...+80 °C. Suhteellisen kosteuden mittaustarkkuus on $\pm 1,5$ %RH, kun suhteellinen kosteus on 0–90 %RH ja lämpötila 0...+40 °C. Mikäli lämpötila on tätä alhaisempi, virheen toleranssi karkeasti ottaen kaksinkertaistuu. Digitaalisella lähdöllä olevan anturin lämpötilamittauksen mittaustarkkuus on $\pm 0,1$ °C, kun lämpötila on +15...+25 °C ja $\pm 0,15$ °C, kun lämpötila on 0...+15 °C tai +25...+40 °C. Tätä korkeammassa sekä matalammassa olosuhteissa lämpötilan mittaustarkkuus on $\pm 0,4$ °C. [] Mittauksessamme HMP110-mittapää oli kytketty tietokoneeseen sarjayhteyden kautta, josta mittapää sai tarvitsemansa käyttöjännitteen. Mittaustulokset tallentuivat suoraan tietokoneen muistiin.

4 ANTURIEN TESTAUS

4.1 Mittausjärjestelmän valmistus ja valmistelut

Laitteiston osalta testauksen valmistelut aloitettiin valmistamalla mittausjärjestelmä ja kalibroimalla se. Järjestelmä koottiin yhdestä DLS-keskuksesta, kuudesta IAQ.TBH+eTH -lähetinyksiköstä sekä kuudesta lähettimiin kytketystä eTH100-kosteusanturista, jotka on nimetty nimillä Betoni1–Betoni6. Myöhemmin järjestelmään ja testaukseen lisättiin vielä kaksi IAQ.TBH+eTH -lähetinyksikköä ja seitsemän eTH100-kosteusanturia, jotka on nimetty nimillä Betoni7–Betoni13.

Kuuden ensimmäisen anturin piirilevyt käsiteltiin elektroniikan suojaukseen tarkoitetulla suojalakalla, jonka jälkeen niiden ympärille kiedottiin kaksi kerrosta pte-teippiä. Kolme antureista kiedottiin 0,075 mm ja toiset kolme 0,1 mm paksuiseen pte-teippiin. Myöhemmin valmistetuissa antureissa (Betoni7–Betoni8) ei käytetty pte-teippiä, vaan ne suojattiin pelkällä lakalla ja neljää viimeisestä anturia (Betoni9–Betoni13) ei suojattu kosteudelta mitenkään.

Kuusi ensimmäiseksi valmistettua ulkoista anturia lähetettiin kokoamisen jälkeen Servikal Oy:n kalibroitavaksi. Järjestelmään yhdistettyjen anturien trimmaus kalibroinnin perusteella on tämän opinnäytetyön kirjoitushetkellä vielä testikäytössä oleva ominaisuus, mutta kalibroinnin perusteella on nähtävissä poikkeamat tietyistä vakiokosteuksissa tehdyistä mittauksista. Myös Vaisalan HMP110-vertailuanturit kalibroitiin. Kalibroitien tuloksista on tehty yhteenveto, jotka ovat nähtävissä taulukoissa 1–4.

Taulukko 1. Anturien kalibroitiedot 32,9 %RH vakiokosteudessa.

Anturi	Betoni 1	Betoni 2	Betoni 3	Betoni 4	Betoni 5	Betoni 6	HMP110 01	HMP110 02
Vertailuarvo (A) (%RH)	32,9	32,9	32,9	32,9	32,9	32,9	32,9	32,9
Mittarin näyttämä (B) (%RH)	31,7	31,5	31,3	31,6	31,5	31,5	33,6	33,5
Erotus (B – A) (%RH)	-1,2	-1,4	-1,6	-1,3	-1,4	-1,4	0,7	0,6

Matalassa 32,9 %:n suhteellisessa kosteudessa eTH-anturien virheet ovat taulukon 2 mukaisesti likipitään yhtä suuria ja poikkeavat vertailuarvosta keskimäärin noin $-1,4$ %RH verran. Vaisalan HMP110-anturit ovat paremmin kalibroituja ja näyttävät väärin keskimäärin noin $0,65$ %RH:n verran.

Taulukko 2. Anturien kalibroitiedot 75,4 %RH vakiokosteudessa.

Anturi	Betoni 1	Betoni 2	Betoni 3	Betoni 4	Betoni 5	Betoni 6	HMP110 01	HMP110 02
Vertailuarvo (A) (%RH)	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4
Mittarin näyttämä (B) (%RH)	70,6	72,2	71,0	73,4	70,5	71,9	75,4	75,1
Erotus (B – A) (%RH)	-4,8	-3,2	-4,4	-2,0	-4,9	-3,5	0	-0,3

Kuten taulukosta 3 on nähtävissä, korkeassa 75,4 %:n suhteellisessa kosteudessa anturien väliset erot alkavat näkyä selvemmin. ETH-anturien näyttämät poikkeavat toisistaan enemmän, kuin matalammassa kosteudessa ja niiden näyttämät poikkeavat vertailuarvosta keskimäärin noin $-3,8$ %RH:n verran. Betoni4:n muista poikkeava kalibroitulos erottuu joukosta jo tässä vaiheessa. HMP110-anturien kalibrointi on lähes täydellisesti kohdallaan toisen anturin näyttäessä täsmälleen oikeaa arvoa ja toisen poiketessa vertailuarvosta vain $-0,3$ %RH.

Taulukko 3. Anturien kalibroitiedot 97,4 %RH vakiokosteudessa.

Anturi	Betoni 1	Betoni 2	Betoni 3	Betoni 4	Betoni 5	Betoni 6	HMP110 01	HMP110 02
Vertailuarvo (A) (%RH)	97,4	97,4	97,4	97,4	97,4	97,4	97,4	97,4
Mittarin näyttämä (B) (%RH)	91,9	92,0	92,5	98,4	92,0	93,6	97,0	97,1
Erotus (B – A) (%RH)	-5,5	-5,4	-4,9	1,0	-5,4	-3,8	-0,4	-0,3

Erittäin korkeassa 97,4 % suhteellisessa kosteudessa Betoni4:n näyttämä poikkeaa huomattavasti muista eTH-antureista, kuten taulukosta 4 nähdään. Muiden eTH-anturien poikkeama vertailuarvosta on keskimäärin $-5,0$ %RH. HMP110-anturien näyttämät ovat edelleen lähes oikein ja poikkeavat vertailuarvosta keskimäärin noin $-0,35$ %RH.

Taulukko 4. Anturien kalibrointitiedot $20,64$ °C vakioämpötilassa

Anturi	Betoni 1	Betoni 2	Betoni 3	Betoni 4	Betoni 5	Betoni 6	HMP110 01	HMP110 02
Vertailuarvo (A) (°C)	20,64	20,64	20,64	20,64	20,64	20,64	20,64	20,64
Mittarin näyttämä (B) (°C)	20,8	20,8	20,9	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8
Erotus (B – A) (°C)	0,16	0,16	0,26	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16

Lämpötilakalibrointi osoitti yhtä lukuun ottamatta kaikkien anturien lämpötilalukeman olevan $0,16$ °C:n päässä todellisesta lämpötilasta. Tässä suhteessa eTH- ja HMP110-antureissa ei ole eroa.

Miran DLS -järjestelmän mittaustulokset asetettiin tallentumaan keskusyksikön muistiin 10 min:n välein ja siirtymään sieltä pilvipalvelimelle 60 min:n välein. Vaisalan HMP110-antureilla käytetään niiden digitaalista sarjalähtöä, joka on yhdistetty tietokoneeseen yhdistettyyn USB-muuntimeen. Vertailuanturin tiedot tallentuvat tietokoneelle 60 min:n välein.

4.2 Betonilaatan valu ja valmistelu

Betonilaatan valu suoritettiin Turun AMK:n rakennuspuolen betonilaboratoriossa helmikuun alkupuolella. Valussa käytettiin Plus-sementtiä, vesi-sementtisuhde oli $0,6$ ja maksimi raekoko 8 mm. Laatassa käytetty betoni vastasi tyypillistä omakotitalon alapohjalaatan massaa. Valussa ei käytetty lisäaineita, kuten notkistimia tai huokoistimia, joilla olisi ollut vaikutusta betonivalun kemialliseen ja fysikaaliseen koostumukseen. Valu tehtiin muovilla päällystettyyn $800 \times 600 \times 100$ mm:n muottiin, joka vastasi paksuudeltaan normaalia lattialaatan valun paksuutta, oli riittävän suuri kuivuakseen vielä isomman

laatan tavoin porareii'istä huolimatta ja oli toisaalta tarpeeksi pieni käsin siirreltäväksi. Muovin tarkoitus oli estää laatan kuivuminen muihin suuntiin, kuin ylöspäin.

Valun jälkeen laatan annettiin kuivua viisi päivää, jonka jälkeen muotti purettiin, laatan pinnasta hiottiin betoniliima pois kiviainekseen saakka kuivumisen parantamiseksi ja laattaan porattiin kuusi reikää antureita varten. Porauksen jälkeen reiät imuroitiin huolellisesti tyhjäksi pölystä sekä irtonaisesta betoniaineksesta ja reikään työnnettiin sopivaa halkaisijaa oleva putki. Putken tarkoitus oli estää kosteuden siirtyminen poratun reiän sivuilta porareikään, jolloin porareii'ässä oleva kosteus edusti reiän pohjalla olevan betonin kosteutta. Lopuksi muoviputken ja betonin liitoskohta sekä putken yläpää täytettiin huolellisesti vesihöyryn kestäväällä kitillä kuvan 5 mukaisesti. Kitin tarkoitus oli estää porareii'än kuivuminen.

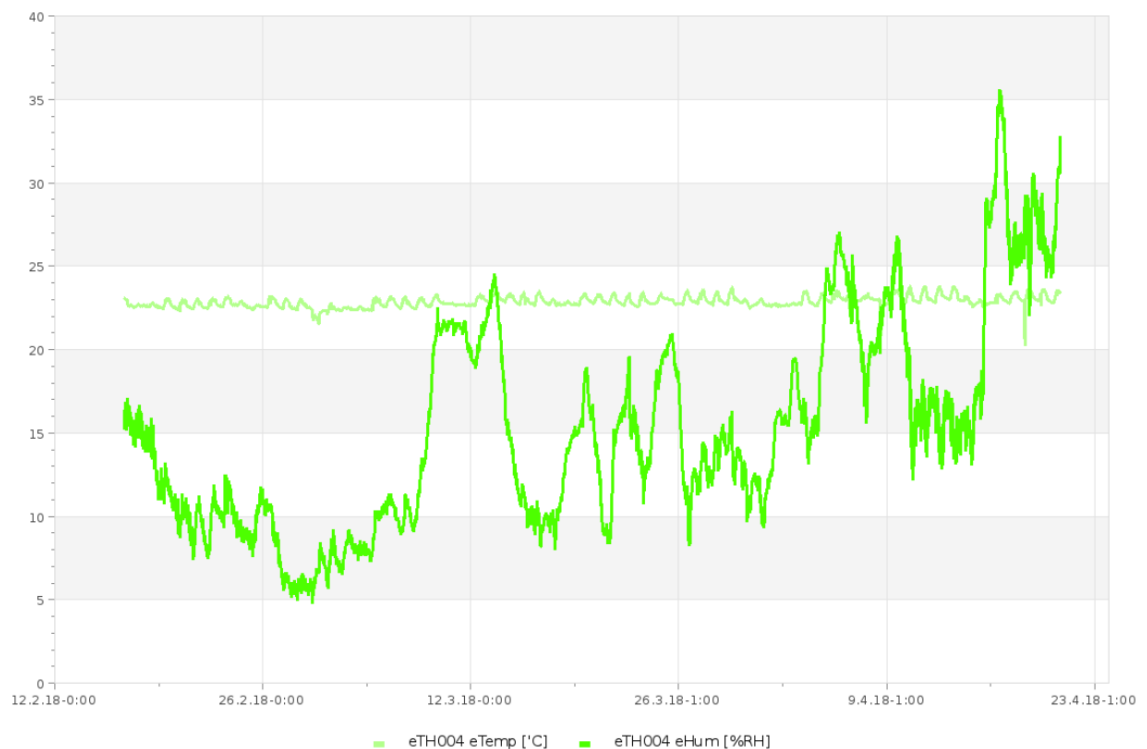


Kuva 5. Betonilaatta muotin purun ja reikien valmistelun jälkeen.

4.3 Anturitestaus

Anturien testaus suoritettiin asentamalla testattavat anturit hiljattain valetun betonilaatan sisään ja suorittamalla niillä pitkäkestoinen kosteuden porareikämittaus RT-kortin [4] ohjeistuksen mukaisesti. Testauksessa haluttiin selvittää, miten anturit kestävät pitkäkestoisesta altistusta suurelle suhteelliselle kosteudelle, mahdolliselle tiivistyväälle kosteudelle ja betonista vapautuville kemikaaleille. Kokeessa arvioitiin anturien yleistä toimivuutta, niiden tarkkuutta ja sen muuttumista testin aikana sekä mittaustulosten siirtymistä.

Testaus suoritettiin Pietiko Oy:n tiloissa, jossa olosuhteet betonin kuivumiselle olivat ihanteelliset. Kuvasta 6 nähdään, että ilman lämpötila oli koko kokeen ajan noin 23 °C ja ilman suhteellinen kosteus noin 5–35 %RH. Testijaksolle osui muutama pakkas- ja sadepäivä, jotka nostivat ilman suhteellista kosteutta. Testauksen olosuhteet eivät täysin vastaa todellisten työmaiden olosuhteita, mutta olosuhde-erojen vaikutus kyseisessä testauksessa on pieni. Tyypillisesti työmaaolosuhteissa riittävä ilman lämpötila on +20...+25 °C ja ilman suhteellinen kosteus noin 40–50 %RH. [11]



Kuva 6. Kokeen aikaisen olosuhdemittauksen tulokset.

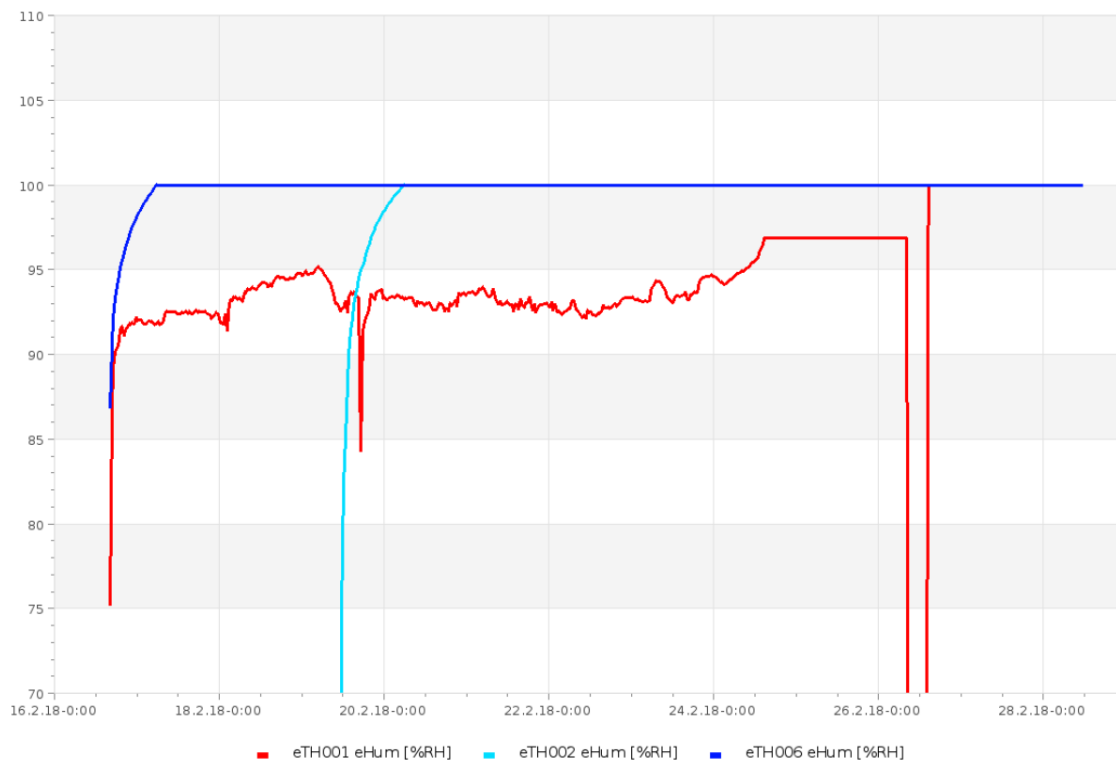
Ensimmäiset anturit asennettiin kuvan 7 mukaisesti betonilaatan sisään, kun valusta oli kulunut noin viikko. Valuun asennettiin kaksi testattavaa eTH-anturia (Betoni1 ja Betoni6) sekä HMP110-vertailuanturi. Yksi anturi (Betoni4) jätettiin betonin pinnalle mittaamaan ympäröiviä olosuhteita ja sen tulokset ovat nähtävissä kuvassa 6. Betoniin lisättiin vielä

muutama päivä myöhemmin yksi anturi (Betoni2) ja ilmeisesti kalibroinnin jälkeen vaurioitunut HMP110 02 vaihdettiin toiseen Vaisalan anturiin HMP110 01.



Kuva 7. Betonilaatta ensimmäisten asennettujen anturien kanssa.

ETH2-lähettimeen yhdistetyn Betoni2-anturin ja eTH6-lähettimeen yhdistetyn Betoni6-anturin lukemat nousivat odotetusti 100 %RH:n, mutta eTH1-lähettimeen yhdistetyn Betoni1-anturin lukemat jäivät vaeltamaan näiden alapuolelle noin 90–95 %RH:n kosteuteen, eivätkä tasaantuneet muiden anturien mittausarvojen tapaan. Anturia tarkemmin tutkittaessa huomattiin, että toiseen sen maa- (GND) ja käyttöjännitteenastojen (V_{dd}) välillä olevista häiriönsuodatuskondensaattoreista oli muodostunut oikosulku, joka aiheutti ripeliä mittaustulokseen ja lisäsi anturin virrankulutusta kuluttaen lähettimen pariston loppuun noin yhdeksässä vuorokaudessa. Molemmat häiriönsuodatuskondensaattorit vaihdettiin uusiin ja kosteusanturi laitettiin takaisin mittausreikään, jonka jälkeen anturin lukemat nousivat 100 %RH:n kosteuteen. Kuvassa 8 näkyy ensimmäisten anturien tulokset kahdelta ensimmäiseltä viikolta.

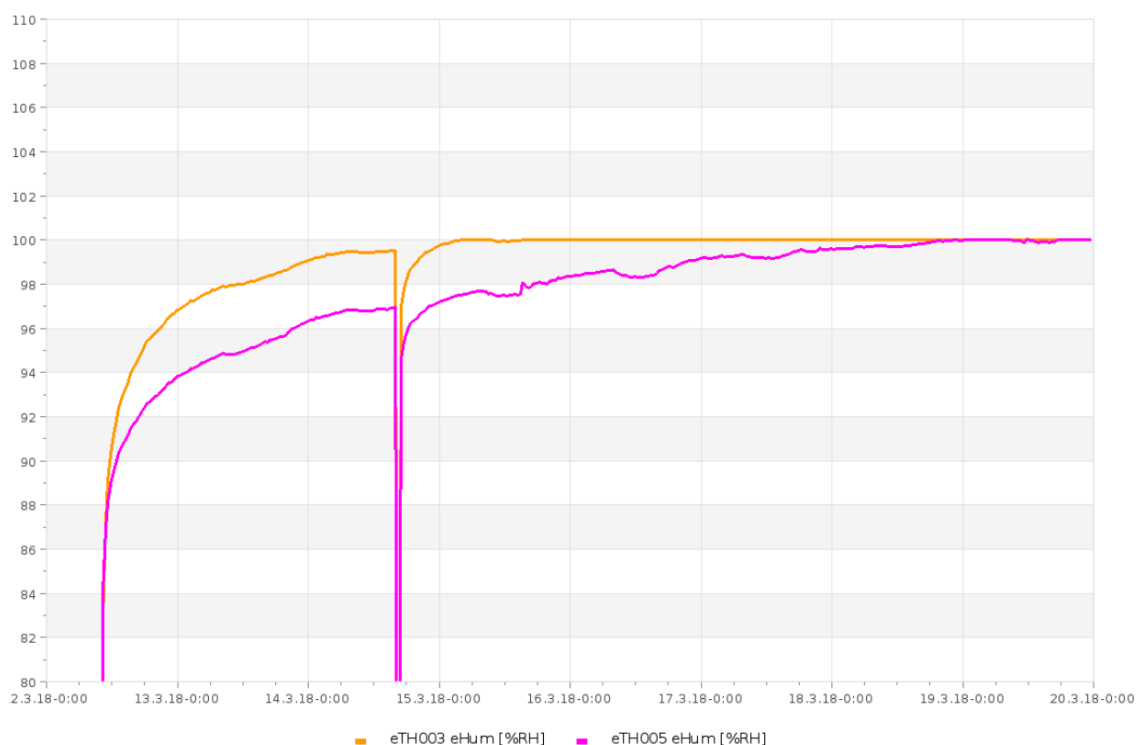


Kuva 8. Ensimmäisten anturien tulokset kahdelta ensimmäiseltä viikolta.

Kolme viikkoa anturien asennuksesta Betoni6-anturi otettiin pois mittausreiästä anturin tarkistusta varten. Anturi tasaantui 33 %RH:n kalibroitikapselissa 33,9 %RH:hon ja 75 %RH:n kalibroitipurkissa noin 87,0 %RH:hon. Vastaavien lukujen ollessa ennen testausta suoritettussa kalibroinnissa 31,5 %RH ja 71,9 %RH, nähdään selvästi, että anturin tarkkuudessa on tapahtunut suuria muutoksia. Myös Betoni2-anturia testattiin 75 %RH:n kalibroitikapselissa ja sen lukemat tasaantuivat 78,7 %RH:hon. Ennen testiä suoritetussa kalibroinnissa Betoni2-anturi tasaantui 72,7 %RH:hon, joten vastaavaa siirtymää on havaittavissa myös tällä anturilla. Antureita tarkastellessa huomattiin, että kapasitanssia aistivan osan pinta oli selvästi samentunut kummassakin anturissa. Betoni6-anturin pinta putsattiin isopropyylialkoholilla anturivalmistajan ohjeiden mukaisesti, jonka jälkeen se testattiin 75 %RH:n kalibroitikapselissa. Anturin lukema tasaantui 81,2 %RH:hon. Lukema tuli siis hieman lähemmäs oikeaa arvoa, kuin ennen puhdistusta, mutta se ei edelleenkään ole toleransseissa.

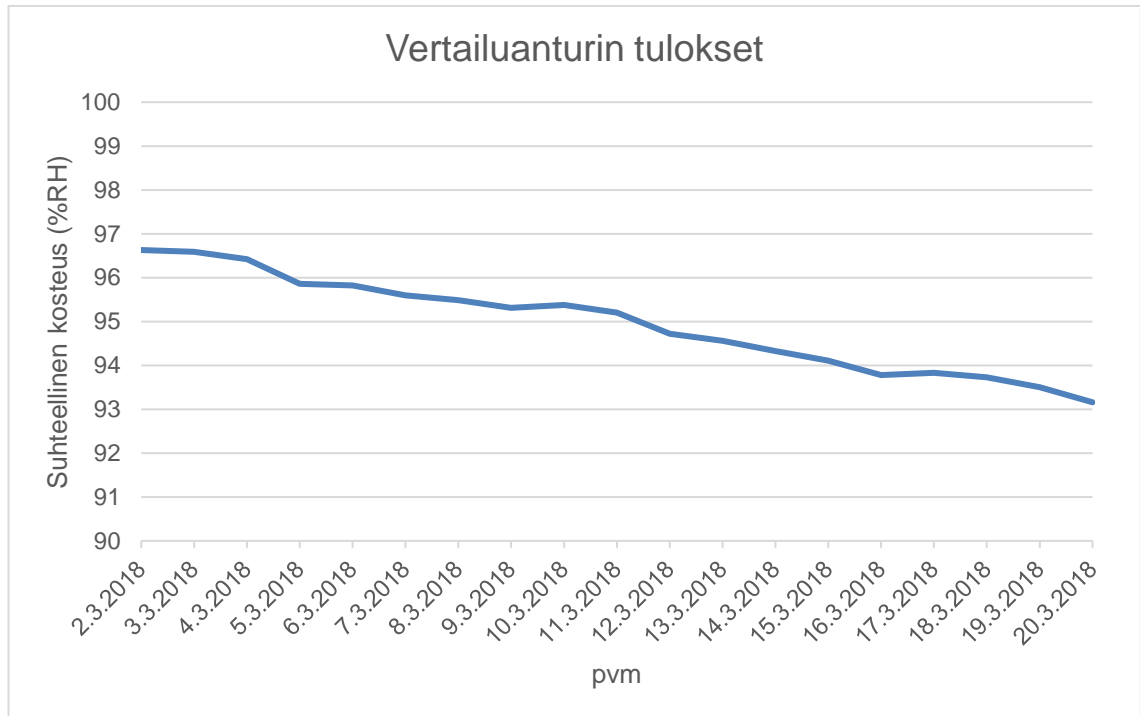
Valuun asennettiin kaksi testattavaa anturia (Betoni3 ja Betoni5) lisää, kun valusta oli kulunut noin kuukausi. ETH3-lähettimeen yhdistetyn Betoni3-anturin ja eTH5-lähettimeen yhdistetyn Betoni5-anturin lukemat lähtivät nousemaan kohti 100 %RH:ta hitaammin, kuin pian valun jälkeen laitetetut anturit. Kuten kuvasta 9 nähdään, Betoni5-anturi

näytti myös noin kahden prosenttiyksikön verran pienempää lukemaa, kuin Betoni3-anturi. Anturit vaihdettiin päittäin mittausreikästä toiseen mahdollisen mittausreikien kosteuseron eliminoimiseksi noin kaksi vuorokautta myöhemmin. Tämän jälkeen Betoni3-anturin lukema nousi 100 %RH:hon Betoni5-anturin näyttäessä edelleen noin 2 prosenttiyksikköä pienempää lukemaa. Myös Betoni5-anturin lukema nousi kuitenkin hitaasti 100 %RH:hon muutaman vuorokauden kuluessa.



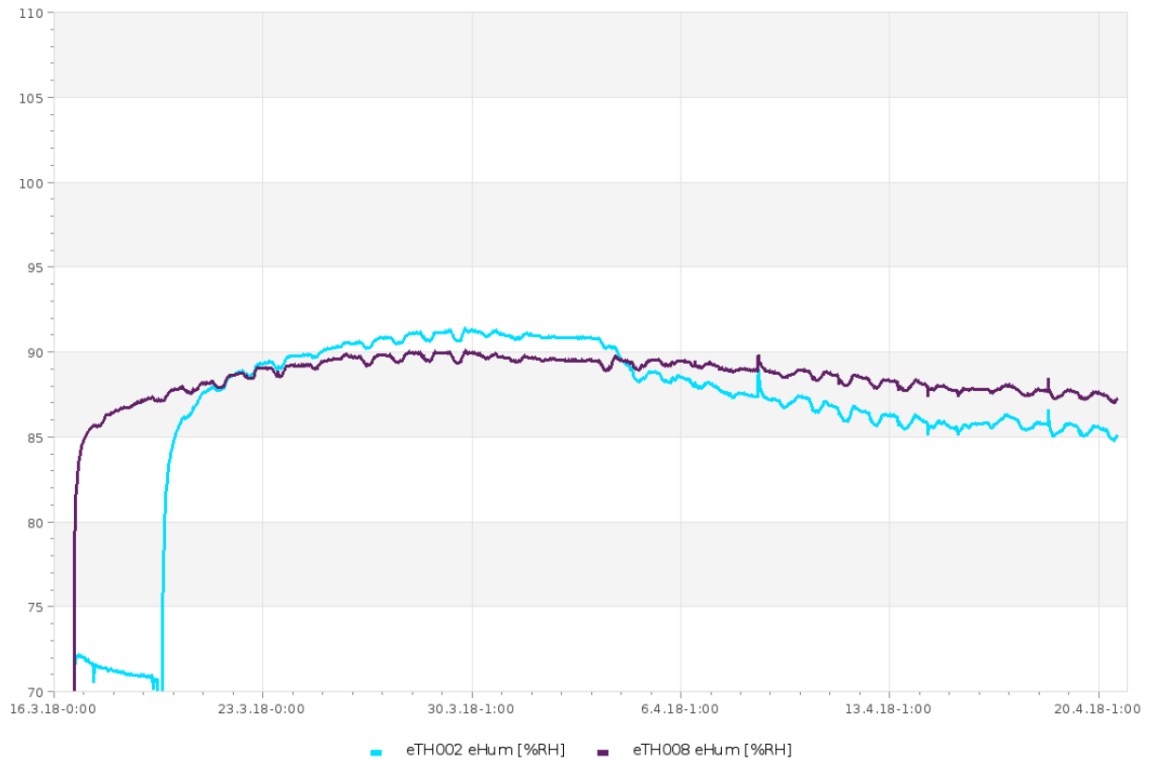
Kuva 9. Kuukausi valusta lisättyjen anturien tulokset.

Vertailuanturin tulosten laskiessa kuvan 10 mukaisesti melko tasaisesti noin 1 %RH / viikko, olisi Betoni3 – sekä Betoni5-anturien odotettu laskevan vastaavasti. ETH-anturien kalibroinnin perusteella niiden olisi tullut näyttää noin 4,5–5,0 %RH pienempiä arvoja, kuin Vaisalan vertailuanturi. Kuvista 9 ja 10 on kuitenkin selkeästi nähtävissä, että eTH-anturien lukemat tasaantuvat 100 %RH:n kosteuteen ja pysyvät siellä, kun Vaisalan HMP110-anturin lukemat laskevat tasaisesti. Vertailujakson loppuessa eTH-anturit ovat 100 %RH:n kosteudessa ja vertailuanturi on laskenut noin 93,2 %RH:hon. Vaisalan anturin lukeman tasainen lasku vaikuttaa todenmukaiselta ja tulokset luotettavilta.



Kuva 10. HMP110-anturin vertailutulokset.

Myöhemmin samalla viikolla ja sitä seuranneella viikolla valuun lisättiin kaksi uutta anturia. Betoni9-anturi yhdistettiin eTH2-lähtetimeen ja Betoni8-anturi yhdistettiin eTH8-lähtetimeen. Anturit eroavat aiemmin valmistetuista siten, että Betoni8-anturin päällä ei ole lainkaan pte-teippiä ja se on suojattu pelkällä lakalla. Betoni9-anturissa ei ole pte-teippiä tai suojalakkaa, vaan se on suojattu vain anturikapselin päälle kiinnitetyllä Vaisalan PTFE-suodattimella. Betoni8-anturi asennettiin valuun ensin ja sen lukemat lähtivät hitaaseen nousuun kuvan 11 mukaisesti tasaantuen kahdessa viikossa noin 90 %RH:hon. Betoni9-anturi asennettiin betoniin muutaman päivän myöhemmin kalibroinnin jälkeen ja senkin lukemat lähtivät hitaaseen nousuun tasaantuen noin 91 %RH:hon. Kolmannella viikolla kummankin anturin lukemat lähtivät laskuun Betoni9-anturin lukeman laskiessa hieman nopeammin kuin Betoni8-anturin.



Kuva 11. Kuukausi valusta lisättyjen eritavoin suojattujen anturien tulokset.

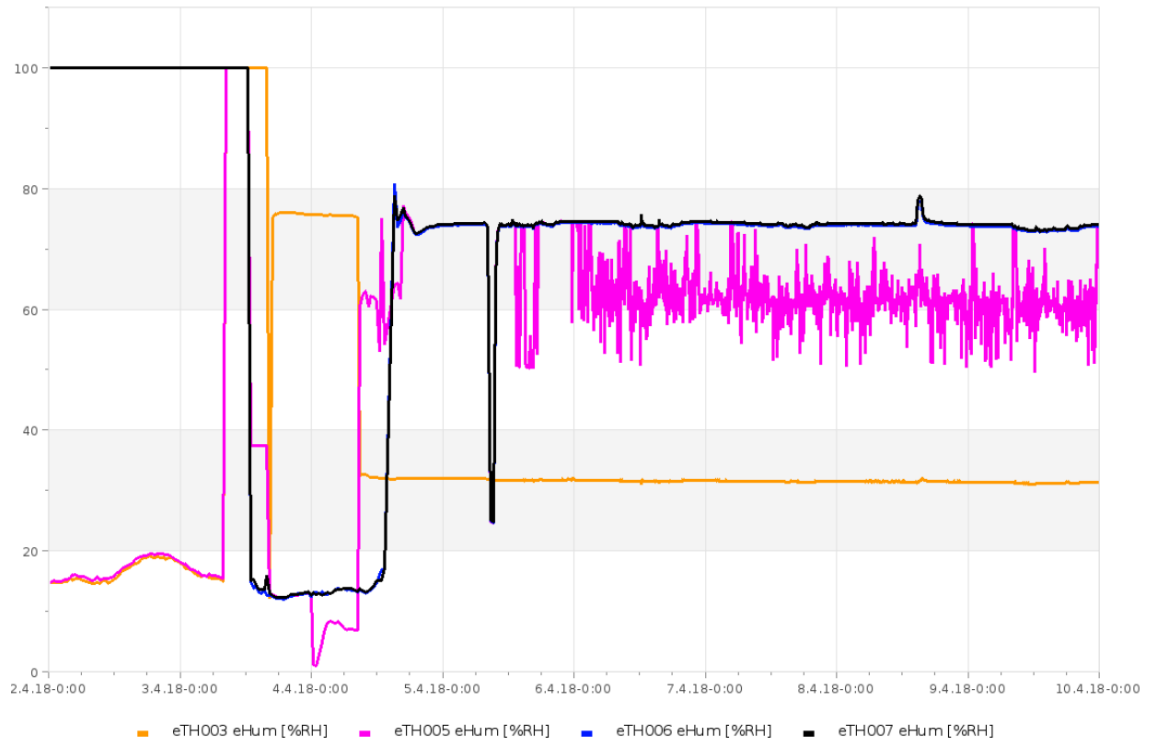


Kuva 12. HMP110-anturin vertailutulokset.

Vertaillessa kuvassa 11 näkyvien eTH-anturien ja kuvassa 12 näkyvän HMP110-vertailuanturin tuloksia huomataan, että kuluu noin kaksi viikkoa ennen, kuin eTH-anturit ovat

tasaantuneet näyttämään suurin piirtein samaa lukemaa, kuin HMP110-anturi. Tämän jälkeen kaikkien anturien lukemat laskevat noin 1 %RH/viikko. ETH-anturien lukemat poikkeavat kuitenkin hieman toisistaan ja vertailuanturista. Tämä saattaa johtua esimerkiksi anturien erilaisesta suojauksesta.

Neljän aiemmin käyttämättömän anturin (Betoni9–Betoni13) toimintaa testattiin suljetussa vesiastiassa, jonka suhteellinen kosteus oli 100 %RH. Kokeella haluttiin testata anturien pinnalle tiivistyvän kosteuden kestoa. ETH6-lähettimeen liitetty Betoni13- sekä eTH7-lähettimeen kytketty Betoni10-anturit olivat testissä jännitteellisiä. Betoni11- sekä Betoni12-antureita ei ole liitetty lähetinyksiköihin ja ne olivat jännitteettömiä. Testissä havaittiin, että jännitteelliset anturit kestivät testauksen ehjinä, mutta jännitteettömät anturit lakkasivat toimimasta, kun anturit liitettiin lähettimiin tai pian sen jälkeen. Betoni11-anturi liitettiin eTH3-lähettimeen ja Betoni12-anturi eTH5-lähettimeen. Anturien juotoksissa havaittiin hapettumia, jotka aiheuttivat toimintahäiriöt. Hapettumien puhdistuksen jälkeen anturit alkoivat taas näyttää lukemia, mutta Betoni12-anturi oli vioittunut ja sen näyttämät lukemat 75 %RH:n kalibrointikapselissa heittelivät rajusti näyttäen keskimäärin noin 10 %RH liian pientä arvoa, kuten kuvasta 13 voidaan nähdä. Betoni11-anturi testattiin puhdistamisen jälkeen 75 %RH:n ja 33 %RH:n kalibrointikapseleissa, joissa se tasaantui 75,2 %RH:hon ja 31,4 %RH:hon. Ennen testausta anturi näytti samoissa kalibrointipurkeissa 30,9 %RH ja 72,8 %RH, joten kalibrointituloksissa on havaittavissa pientä siirtymää ylöspäin varsinkin korkeammassa suhteellisessa kosteudessa.



Kuva 13. Tiivistyvän kosteuden kestitestaus.

Testauksen päätteeksi eTH-anturit kalibroitiin omatekoisissa erilaisten suolojen tasapainokosteuksia hyödyntävissä kalibrointilaatikoissa. Kalibroinnissa käytettiin vertailuanturina DeltaOhmin HD2102.2R kosteusmittaria. Kalibrointien tulokset ovat nähtävillä taulukoissa 5 ja 6. Antureista Betoni7–Betoni13 ei ole kalibrointitietoja testausta edeltävältä ajalta ja Betoni12 lakkasi toimimasta täydellisesti ennen kalibrointia. Vertaillen anturien näyttämää testausta edeltäneessä kalibroinnissa (taulukoiden 5 ja 6 alimmat rivit) ja testauksen jälkeisessä kalibroinnissa (taulukoiden 5 ja 6 toiseksi alin rivi) huomataan, että käytännössä kaikkien testattujen anturien näyttämä on muuttunut selvästi testausaikana. Suurin muutos on tapahtunut antureissa, jotka ovat olleet betonissa kauan. Tulos ei ole kuitenkaan täysin tarkka, sillä kalibroinnit suoritettiin eri tavoin.

Taulukko 5. eTH-anturien kalibrointi 33 %RH kosteudessa testien jälkeen.

Anturi	Betoni 1	Betoni 2	Betoni 3	Betoni 4	Betoni 5	Betoni 6	Betoni 7	Betoni 8	Betoni 9	Betoni 10	Betoni 11	Betoni 12	Betoni 13
Vertailuarvo	32,0	32,0	32,0	32,0	32,0	32,0	32,0	32,1	32,1	32,1	32,1	32,1	32,1

(A) (%RH)													
Mittarin näyttämä (B) (%RH)	31,3	29,7	29,8	29,5	30,8	31,5	28,2	27,1	30,2	30,9	29,8	-	30,8
Erotus testauk- sen jäl- keen (B – A) (%RH)	-0,7	-2,3	-2,2	-2,5	-1,2	-0,5	-3,8	-5,0	-1,9	-1,2	-2,3	-	-1,3
Erotus ennen testausta (B – A) (%RH)	-1,2	-1,4	-1,6	-1,3	-1,4	-1,4	-	-	-	-	-	-	-

Taulukko 6. eTH-anturien kalibrointi 75 %RH kosteudessa testien jälkeen.

Anturi	Be- toni 1	Be- toni 2	Be- toni 3	Be- toni 4	Be- toni 5	Be- toni 6	Be- toni 7	Be- toni 8	Be- toni 9	Be- toni 10	Be- toni 11	Be- toni 12	Be- toni 13
Vertai- luarvo (A) (%RH)	74,8	74,8	74,8	74,8	74,8	74,8	74,8	74,1	74,1	74,1	74,1	74,1	74,1
Mittarin näyttämä (B) (%RH)	81,5	74,5	76,4	74,7	78,2	77,8	69,9	70,4	72,6	73,4	72,7	-	72,9
Erotus testauk- sen jäl- keen (B – A) (%RH)	+6,7	-0,3	+1,6	-0,1	+3,4	+4,0	-4,9	-3,7	-1,5	-0,7	-1,4	-	-1,2
Erotus ennen testausta	-4,8	-3,2	-4,4	-2,0	-4,9	-3,5	-	-	-	-	-	-	-

(B – A) (%RH)													
------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

ETH-antureita testattiin tämän opinnäytetyön puitteissa 9 viikon ajan koetta varten valetussa betonivalussa. Testien ja niitä edeltäneiden sekä seuranneiden kalibrointien perusteella voidaan todeta, etteivät eTH100-anturit kestä betoninkosteusmittausta ainaakaan testeissä käytetyillä suojausmenetelmillä. Anturit eivät kestäneet luotettavasti pinnalleen tiivistyvää kosteutta ja niiden mittaustulokset siirtyivät rajusti varsinkin kosteusmittaustestin alkupuolella betoniin asennetuissa kosteusantureissa. Uskon mm. kapasitanssia mittaavan osan päällä havaitun samentuman vaikuttavan ohutkalvopolymeerianturin kykyyn absorboida kosteutta ja sitä kautta vaikuttavan kosteusmittaukseen. Tuoreen betonin pH:n ollessa jopa 13–14 pH:ta, [12] voi erittäin emäksisessä ympäristössä kosteusanturin pinnalle tiivistyvä kosteuskin pilata anturin.

5 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia, soveltuuko Pietiko Oy:n rakennekosteusmittaukseen suunniteltu kosteusanturi käytettäväksi betonin kosteusmittauksessa. Testaus toteutettiin valamalla betonilaatta, jossa kosteusanturien toimintaa testattiin erilaisin testein RT-kortin porareikäkosteusmittauksen ohjeistuksen mukaisesti 9 viikon aikana.

Kosteusanturien testauksessa havaittiin, että niiden näyttämät mittaus- sekä kalibrointitulokset siirtyvät merkittävästi ylöspäin, kun antureita on käytetty betonin kosteusmittaukseen muutaman viikon ajan. Kokeissa huomattiin, että erityisesti pian valun jälkeen betoniin asennetut anturit eivät palautuneet testauksen jälkeen koetta edeltävälle tasolle. Tulosten siirtyminen ylöspäin voisi työmaolosuhteissa aiheuttaa betonin kosteuden yliarvioinnin ja sen seurauksena kohteen valmistumisen viivästymisen. Merkittävä huomio oli myös, että anturit eivät kestäneet pinnalleen tiivistyvää kosteutta luotettavasti vaan ne menivät oikosulkuun suojauksesta huolimatta.

Testausta kannattaa jatkaa kokeilemalla eri tavoin suojattuja antureita, kuten plastidipinnoitteen tai muun vastaavan massan sisään valettuja antureita. Vastaavan paksuisen betonilaatan riittävä kuivuminen vie parhaimmillaankin kuukausia, joten anturit voitaisiin asentaa varsinaisissa kohteissa betoniin, kun valusta on kulunut pidempi aika. Tällöin betonin on kuivempaa ja sen emäksisyys on jo hieman laskenut. Myös vertailuanturin integrointia omaan järjestelmään kannattaa harkita, sillä se suoriutui testauksesta hyvin ja on yleisesti paljon käytetty anturi betonin kosteusmittauksessa.

LÄHTEET

- [1] Clewer, S. Betonin kosteusmittauksen kehittäminen. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu, Tampere. 2015. 86 s. Viitattu 23.4.2016. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/89814/Clewer_Sampo.pdf
- [2] Vauhkonen, M. Betonin kuivumisen reaaliaikainen mittaus. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Jyväskylä. 2014. 49 s. Viitattu 23.4.2018. Saatavissa: http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/72484/Vauhkonen_Milja_opin-naytetyo.pdf
- [3] Huohvanainen, H. Kahden eri suhteellisen kosteuden mittalaitteiston tutkiminen betonin kosteusmittauksen yhteydessä. Opinnäytetyö. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, Joensuu. 2012. 58 s. Viitattu 23.4.2018. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/40984/Harri_Huohvanainen.pdf
- [4] Rakennustieto 2010. RT 14-10984. Betonin suhteellisen kosteuden mittaus. Viitattu 10.3.2018. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/kortistot/rt/kortit/10984.html.stx>
- [5] Jääskeläinen, V. & Janhunen, T. & Heimlander, A & Lammi, L & Malmivaara, K & Piitulainen, T. Testissä pintakosteusosoittimet. Rakennusmaailma, 2008, verkkojulkaisu. 7/2008. Viitattu: 22.4.2018. Saatavissa: <https://rakennusmaailma.fi/testissa-pintakosteusosoittimet/>
- [6] Merikallio, T. Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu, Espoo. 2009. 137 s. ISBN 9789512299577.
- [7] Lumme ym. Betonin kosteuden hallinta. Kestävä kivitaloprojekti. Helsinki: Suomen betonitieto Oy, 1997. 31 s. ISBN 9789525075014.
- [8] Vaisala 2012. Vaisala HUMICAP® -anturi suhteellisen kosteuden (RH) mittaamiseen. Viitattu 16.4.2018. Saatavissa: <http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/Technology%20Descriptions/HUMICAP-Technology-description-B210781FI-C.pdf>
- [9] Vaisala 2018. HUMICAP® Humidity and Temperature Probe HMP110. Tietolehti. Viitattu 16.4.2018. Saatavissa: https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/HMP110-Datasheet-B210852EN_1.pdf
- [10] Vaisala. Vaisala Humidity and Temperature Probes HMP60 and HMP110 Series. Käyttöohje. Helsinki: Vaisala Oyj, 2016. Viitattu 16.4.2018. Saatavissa: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/HMP60%20and%20HMP110%20Series%20User's%20Guide%20in%20English.pdf>
- [11] Merikallio, T. Rakennustyömaan kosteudenhallinta. Verkkodokumentti. Viitattu: 23.4.2018. Saatavilla: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK050502.pdf>
- [12] Ositum. Kemialliset tutkimukset, karbonatisoituminen. Verkkodokumentti. Viitattu 5.5.2018. Saatavissa: <http://www.ositum.fi/index.php?p=Karbonatisoituminen>