

Tiivistelmä tutkimuselosteesta Matolog SA-2023/1

Matolog Cure-anturin kosteuden mittaustarkkuus verrattuna porareikämenetelmään (70 mm)

Samuel Aulanko

21.6.2023

Sisällys

1	Taustaa	2
2	Tulokset	2
2.1	Porareikämittaukset	2
2.2	Viiveen arviointi.....	4
2.3	Lämpötilamuutosten kompensointi	4
2.4	Viiveen ja lämpötilan kompensoinnin tulokset porareikäluina.....	5
2.5	Virhemarginaalin arviointi	5
2.6	RT-kortin mittausepävarmuustarkastelu.....	7
2.6.1	Mittalaite-epätarkkuus.....	7
2.6.2	Mittausuoritusepävarmuus	7
2.6.3	Mittausolosuhde-epävarmuus	7
3	Johtopäätökset.....	9

1 Taustaa

Matologin vertailututkimus on osa Peikko Groupin järjestämää tutkimushanketta. Työtä varten perustettiin erillinen laboratorio Lahteen Peikko Groupin tiloihin. Yhteistyökumppaneina projektissa toimivat Peikko Group, Tampereen yliopisto sekä Matolog. Yksi tutkimuksen tavoitteista oli selvittää Matologin teknologian kyvykkyys verrattuna perinteiseen porareikämittausmenetelmään. Matologin käyttämän betonianturin sertifiointiksi ja kyvykkyuden selvittämiseksi ei ole olemassa kansainvälisesti hyväksytyjä menetelmiä, joten paras tapa kyvykkyuden selvittämiseksi on riittävän laaja vertailutestaus uuden menetelmän ja porareikämittauksen välillä. Porareikämittaukset suoritti Tampereen yliopisto. Saatujen tulosten perusteella viimeisteltiin laskenta-algoritmit, joiden avulla Matologin tulokset ilmoitetaan vertailukelpoisina perinteisiin suhteellisen kosteuden menetelmiin verrattuna.

Rakenteeksi valmistettiin lattia, joka koostui erikokoisista teräspalkeista ja ontelolaatoista. Ennen valua rakenteeseen sijoitettiin neljä Matologin anturia eri syvyydelle kahdeksaan eri kohtaan.

Anturit lähettivät dataa kahden tunnin välein eli 4 380 mittausajanhetkeä vuodessa. Rakenne saumavalettiin, tasoitettiin ja pinnoitettiin. Mittausten tarkasteluajanjakso oli yksi vuosi.

Betoni on huokoista materiaalia ja se pyrkii hygroskooppiseen tasapainoon ympäristönsä kanssa. Eri betonilaaduilla on erilainen rakenne, joten niillä on myös erilainen kyky sitoa vettä itseensä.¹ Perinteisesti kosteutta on mitattu kapasitiivisilla menetelmillä², joille on ominaista ryömiminen ajan kuluessa. Tämän takia jatkuva pitkäaikainen mittaaminen ei ole ollut tarkoituksenmukaista. Matologin teknologia poikkeaa tästä ja mahdollistaa jatkuvan mittaamisen ilman merkittävää ryömimisilmiötä.

2 Tulokset

2.1 Porareikämittaukset

Porareikämittauksia tehtiin kolmena eri ajankohtana: 21.2.2022, 21.3.2022 sekä 20.9.2022. Valut pinnoitettiin huhtikuussa 2022, ja kolmannen porareikämittauksen kohdalla Matologin antureiden suhteelliset kosteudet olivat jo tasoittuneet lähelle tasapainotilaa. Tiivistelmässä tuloksia tarkastellaan 70 mm syvyydessä, mikä on porareikämittauksille annettu maksimisyvyys³.

Ensimmäisen ja toisen porareikämittausten tulosten perusteella havaittiin, että Matologin ja porareikämittausten tulosten ero korreloi mittaussyvyyden mukaan: mitä syvemmällä mittausta tehtiin, sitä suurempi oli keskimäärin Matologin ja porareikämittausten ero. Tulosten pohjalta muodostettiin malli, jolla Matologin mittaustulokset voidaan ilmoittaa porareikämittausten tasolla. Mittaussyvyyden ja erotuksen keskiarvon välille voidaan sovittaa suora, jonka kaava on muotoa

$$RH_{Eroitus}(\%) = 0,076 \frac{\%}{mm} \times Syvyys(mm) - 1,1825\%$$

Kaavan perusteella korjaustermiä tarvitaan 16 mm syvyydestä alkaen.

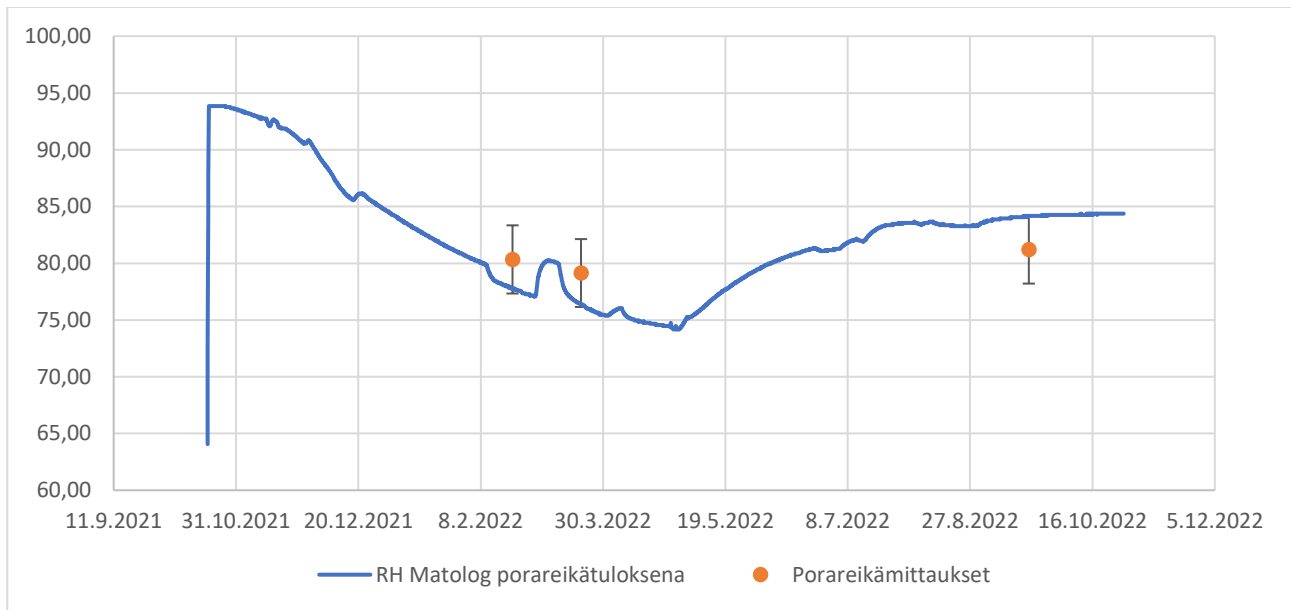
¹ T. Merikallio: Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi, s.10.

² T. Merikallio: Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi, s. 8

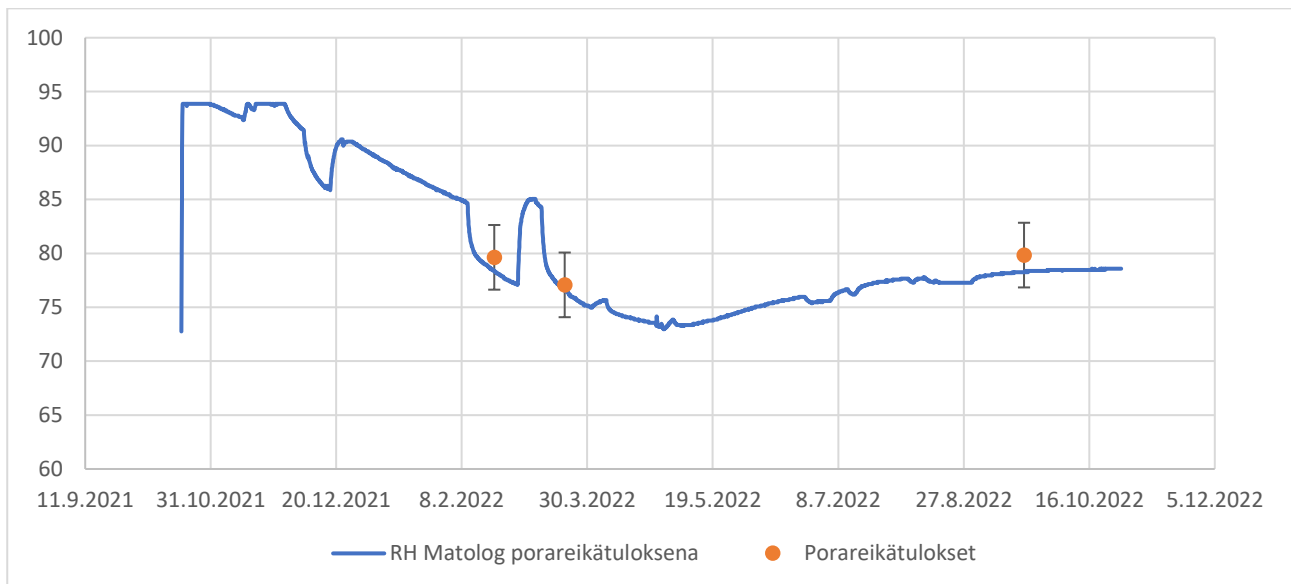
³ T. Merikallio: Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi, s. 26

Kolmannen porareikämittausten tuloksilla arvioitiin kuinka hyvin kahden ensimmäisen mittaushetken perusteella muodostettu Matologin porareikäntulos vastaa porareikämittauksia. Yhtenä vaikuttavana tekijänä tuloksissa on pinnoitus, joka suoritettiin toisen porareikämittauksen jälkeen.

Porareikämittausten virhemarginaali on korkeissa kosteuksissa ± 3 prosenttiyksikköä⁴ ja ne on piirretty porareikämittausten yhteyteen. Kuvissa 1 ja 2 on kahden Matologin anturin tulokset porareikäntuloksiksi laskettuina sekä porareikämittausten tulokset (oranssit pisteet). Matologin arvot pysyvät kolmannella mittaushetkellä porareikämittausten virhemarginaalin sisällä 70 mm syvyydessä. Kuvaaja alaa kalibrointimishetkestä ja Matologin tuloksissa on huomioitu syvyyskorjaus.



Kuva 1: Holes-1 B-70 -anturin RH-tulokset porareikäntuloksina sekä porareikäntulokset.

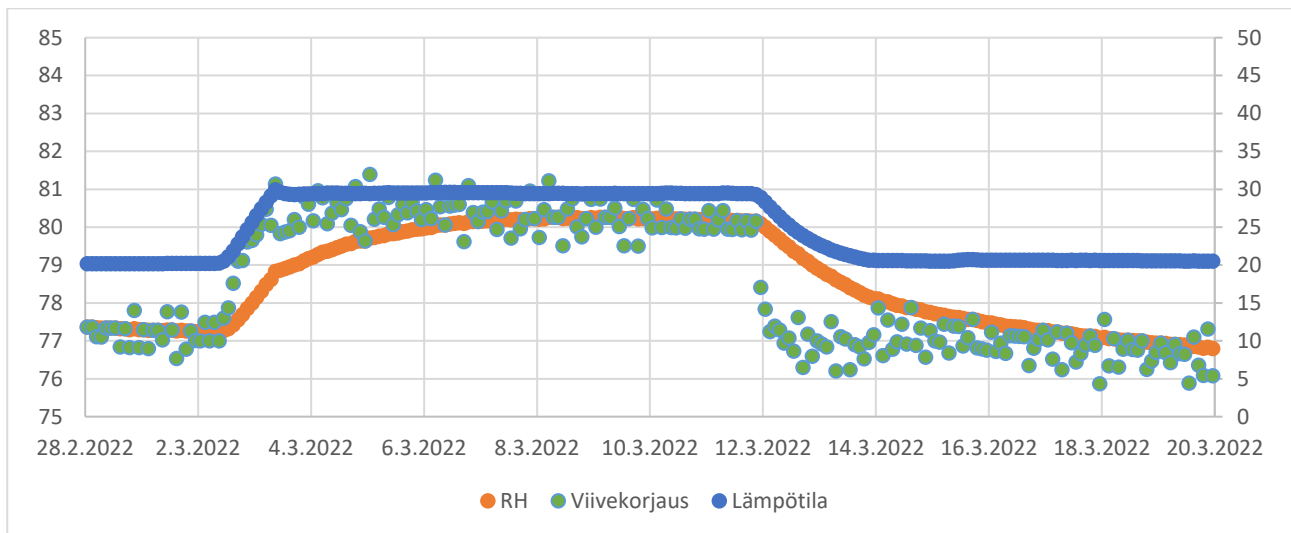


Kuva 2: Holes-2 B-70 -anturin RH-tulokset porareikäntuloksina sekä porareikäntulokset.

⁴ T. Merikallio: Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi, s. 12

2.2 Viiveen arviointi

Matologin anturissa on viivettä kosteuden tai lämpötilan muuttuessa nopeasti. Tutkimusrakenteen kontrolloidut ja nopeat lämpötilan muutokset mahdollistivat viiveen arvioinnin lämpötilan muuttuessa. Lämpötila nousee anturissa nopeammin kuin laskuvaiheessa. Anturi puolestaan reagoi eri tavalla lämpötilan vielä muuttuessa kuin verrattuna tilanteeseen, jossa lämpötila on jo asettunut. Viiveen korjaukseen käytettiin yksinkertaista anturin RH:n muutosnopeuden perusteella laskettua kompensointia. Koska nopeat lämpötilan muutosvaiheet aiheuttavat reagointiin erilaisuutta, kompensointiparametrit jaettiin kahteen osaan: nopeisiin ja hitaisiin lämpötilan muutosvaiheisiin. Tällä tavalla toteutetulla viiveen kompensoinnilla saatiin kuvan 3 kaltaisia tuloksia.



Kuva 3: Holes-1 -palkin 85 mm syvyydessä olevan anturin viive.

2.3 Lämpötilamuutosten kompensointi

Lämpötilamuutosten vaikutusarvion perusteella on mahdollista ilmoittaa Matologin RH-tulokset halutussa lämpötilassa, vaikka mittaushetken lämpötila vaihtelisikin esimerkiksi ulkoilman mukaan. Rakenteen lämpötilojen muutoshetkien perusteella arvioitiin kuinka paljon lämpötilan muutokset vaikuttavat Matologin mittaamiin RH-lukemiin. Lämpötilojen muutoskohdista tunnistettiin kuvaajien perusteella kuinka suuri lämpötilamuutos tapahtui ja mille tasolle Matologin RH-lukemat uudessa lämpötilassa tasoittuivat.

Lämpötilan vaikutus RH-lukemiin ei ole lineaarinen, vaan kasvaa lämpötilaeron kasvaessa. Pisteisiin voidaan sovittaa toisen asteen käyrä, mutta sitä täytyy käytännön sovelluksissa rajoittaa riippuen RH-alueesta, jolla mittauksia tehdään. Lisäksi antureiden välinen hajonta kasvaa lämpötilaeron kasvaessa, mikä aiheuttaa epävarmuutta lämpötilakorjauksiin. Mittauspisteisiin sovitettiin toisen asteen funktio:

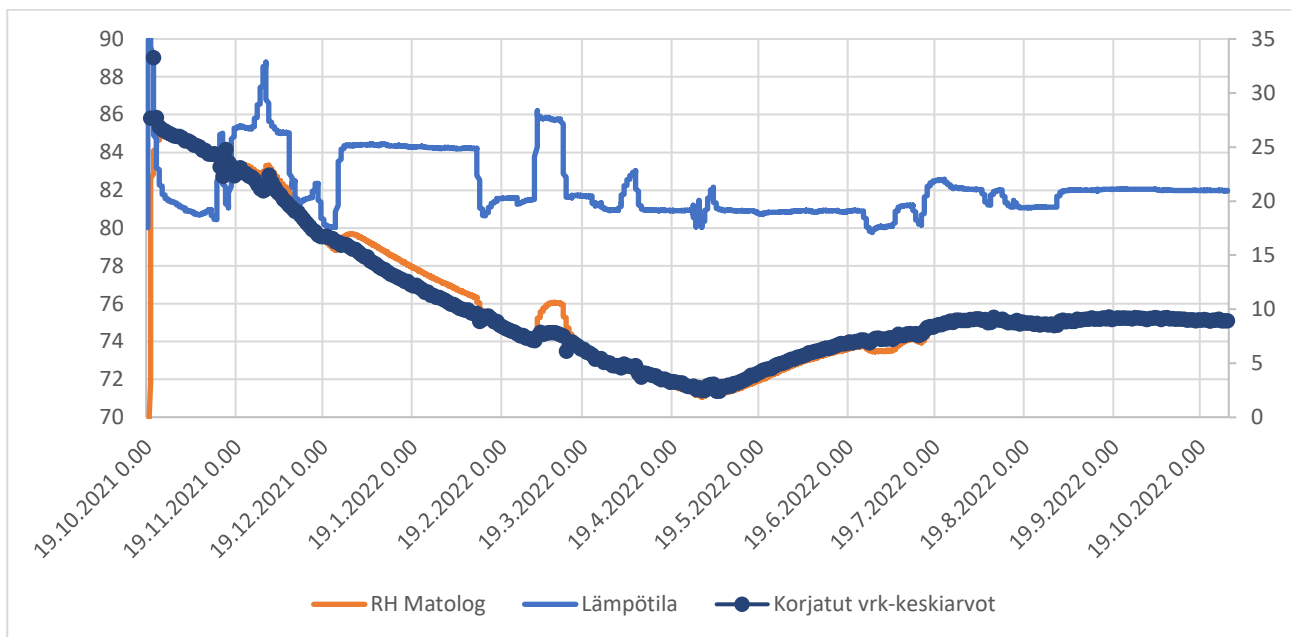
$$\Delta RH = 0,0155 * \Delta T^2 + 0,1398 * \Delta T$$

2.4 Viiveen ja lämpötilan kompensoinnin tulokset porareikäluukuina

Matologin anturin mittaamille RH-lukemille tehtiin seuraavat muokkaukset

1. Muutos porareikätulokseksi syvyyden funktiona
2. Viiveen kompensointi
3. Lämpötilan kompensointi
4. Keskiarvoistaminen vuorokausitasolle

Näiden toimenpiteiden avulla saatiin kuvan 4 mukaisia tuloksia.



Kuva 4: Orig-1 B-70 -anturin tulokset.

2.5 Virhemarginaalin arviointi

Matologin anturit kalibroidaan tehtaalla referenssianturin avulla, jolloin lämpötilan tarkkuus on $\pm 0,2$ astetta ja suhteellisen kosteuden tarkkuus on ± 2 %-yksikköä.

Anturin ilmoittamalle RH:lle tehdään porareikä, viive- ja lämpötilakorjaukset ja sen jälkeen lasketaan vuorokausikohtaiset keskimääräiset RH:t korjatuista luvuista. Laskemalla hajonta ja 95 % luottamusväli vuorokausikohtaisesti saadaan arvio luottamusvälille kaavalla

$$\left[\bar{x} - 1,96 \frac{s}{\sqrt{n}}; \bar{x} + 1,96 \frac{s}{\sqrt{n}} \right]$$

Esimerkinomaisesti anturille Orig-1 B-70 laskettiin viivekorjauksen vuorokausikohtaiset luottamusvälit ja niille laskettiin keskiarvo, jolloin keskimääräiseksi 95 % luottamusväliksi saatiin $\pm 0,809$. Luottamusväli tulee laskea vuorokausikohtaisesti, jolloin saadaan juuri kyseiseen vuorokauteen liittyvä luottamusväli ilmoitettua. Näin ollen virhemarginaali $\pm 0,809$ kuvastaa keskimääräistä virhettä. Viivekompensoinnin tarkkuus riippuukin

aina suoritettavan valun olosuhteista: mitä stabiilimpi ympäristö lämpötilan ja ympäröivän kosteuden suhteen, sen pienempi on epätarkkuus.

Lämpötilakorjauksen luottamusvälille on annettu luottamusväli rakenteen lämpötilan aiheuttamien RH-muutosten hajonnan perusteella. Virhemarginaali kasvaa mitä suurempi lämpötilakorjaus tehdään. Taulukko 1 sisältää RH:n hajonnan kolmelle eri lämpötilakorjauksen suuruudelle, jotka on arvioitu kuvan perusteella mittauspisteiden etäisyyksistä toisiinsa eri lämpötilamuutoksissa.

Taulukko 1: Lämpötilakorjausten virhemarginaalit.

Lämpötilan muutos	RH ± virhemarginaali
5	0,65
13	1,30
15	2,25

Mittausepävarmuuden kokonaistarkastelussa ($T = 20 \pm 15 \text{ °C}$) voidaan käyttää kaavaa

$$Epävarmuus = \sqrt{T_{Anturi}^2 + T_{Viive}^2 + T_{Lämpötila}^2}$$

jos anturin (T_{Anturi}), viivekorjauksen (T_{Viive}) sekä lämpötilakorjauksen ($T_{Lämpötila}$) epävarmuuksien oletetaan olevan toisistaan riippumattomia.⁵ Tällöin anturin Orig-1 B-70 esimerkille mittausepävarmuudet ilman lämpötilakorjausta sekä 5 ja 15 asteen lämpötilakorjauksille keskimääräisellä viivekorjauksella saavat seuraavia arvoja:

$$Epävarmuus(T = 20) = \pm\sqrt{1,5^2}$$

$$Epävarmuus(ei lämpötilakorjausta) = \pm\sqrt{1,5^2 + 0,809^2} \approx \pm 1,70$$

$$Epävarmuus(5 \text{ °C korjaus}) = \pm\sqrt{1,5^2 + 0,809^2 + 0,65^2} \approx \pm 1,82$$

$$Epävarmuus(15 \text{ °C korjaus}) = \pm\sqrt{1,5^2 + 0,809^2 + 2,25^2} \approx \pm 2,82$$

Luonnollisesti jos lämpötilakorjaus tehdään vielä suuremmalle erolle, myös virhemarginaali kasvaa. Jos taulukon 1 tulosten perusteella ekstrapoloidaan virhemarginaalin suuruutta (eksponentiaalinen sovite mittauspisteisiin), 30 asteen lämpötilakorjaukselle kokonaisvirhemarginaali olisi n. ± 6,2 %-yksikköä. Tekemällä lisämittauksia suuremmilla lämpötilamuutoksilla sekä erilaisissa olosuhteissa lämpötilakorjauksen virhemarginaalia saadaan tarkennettua sekä jo mitattujen muutosten osalta että ekstrapolaation mielekkyyden osalta.

⁵ RT 103333 Betonin suhteellisen kosteuden mittausta, s. 26

2.6 RT-kortin mittausepävarmuustarkastelu

RT-kortin kortin kokonaistarkkuuden määrittelyssä arvioidaan kolme päätekijää: mittalaite-, mittauasuoritus- ja mittausolosuhde-epävarmuus. Yleiset epävarmuusluokat ovat ± 2 , ± 4 ja ± 6 RH-%. Taulukossa 2 on määritellyt kriteerit kullekin päätekijälle per kokonaistarkkuusluokka.

Taulukko 2: RT-kortin kokonaistarkkuusluokat.

Periaate	Mittalaite-epävarmuus	Mittausasuoritusepävarmuus	Mittausolosuhde-epävarmuus	
± 2	Porareikä	Betonimittauksiin erityisesti tarkoitettu mittalaite. $\pm 1,5$ RH-yksikön tarkkuuden kalibrointi korkeintaan 12 kk ennen. Mittapääkohtainen ryömintätieto osoittaa hyvän näyttämäpysyvyyden.	Syvyys 1 mm tarkkuudella. Tiivistys vuotamaton. Mittapään hyvä tasapaino betonin kanssa tunnetaan kokemuseräisesti.	Tila/rakenne normaalissa käytössä tai lähes normaaliolosuhdetta vastaavassa lämpötilassa. Porauksen ja mittauksen välisenä aikana ei suuria olosuhdevaihtelua. Ei lattialämmitystä käytössä.
	Näytepala	Betonimittauksiin erityisesti tarkoitettu mittalaite. $\pm 1,5$ RH-yksikön tarkkuuden kalibrointi korkeintaan 12 kk ennen. Mittapääkohtainen ryömintätieto osoittaa hyvän näyttämäpysyvyyden.	Syvyys 1 mm tarkkuudella. Tiivistys vuotamaton. Mittapään hyvä tasapaino betonin kanssa tunnetaan kokemuseräisesti.	Mittauskohteen olosuhteet eivät vaikuta mittausepävarmuuteen. Lukemienottolämpötilan oltava 2 asteen tarkkuudella rakenteen normaali lämpötila.
± 4	Porareikä	± 2 RH-yksikön tarkkuuden kalibrointi korkeintaan 12 kk ennen. Mittapään ryömintä tiedetään melko vähäiseksi.	Syvyys 2 mm tarkkuudella. Hyvä tiivistys. Mittapään melko hyvä tasapaino betonin kanssa tunnetaan kokemuseräisesti.	Tila/rakenne 5 asteen tarkkuudella normaalilämpötilassa. Porauksen ja mittauksen välisenä aikana ei suuria olosuhdevaihtelua.
	Näytepala	± 2 RH-yksikön tarkkuuden kalibrointi korkeintaan 12 kk ennen. Mittapään ryömintä tiedetään melko vähäiseksi.	Syvyys 2 mm tarkkuudella. Hyvä tiivistys. Mittapään melko hyvä tasapaino betonin kanssa tunnetaan kokemuseräisesti.	Mittauskohteen olosuhteet eivät vaikuta mittausepävarmuuteen. Lukemienottolämpötilan oltava 3 asteen tarkkuudella rakenteen normaali lämpötila.
± 6	Porareikä	± 3 RH-yksikön tarkkuuden kalibrointi korkeintaan 12 kk ennen. Ryöminnästä ei tarkkaa tietoa	Syvyys 2 mm tarkkuudella. Melko hyvä tiivistys. Mittapään tasapaino betonin kanssa epävarmaa.	Tila/rakenne 10 asteen tarkkuudella normaalilämpötilassa, mutta olosuhteet epävakaut.
	Näytepala	± 3 RH-yksikön tarkkuuden kalibrointi korkeintaan 12 kk ennen. Ryöminnästä ei tarkkaa tietoa	Syvyys 2 mm tarkkuudella. Hyvä tiivistys. Mittapään kohtalainen tasapaino betonin kanssa tunnetaan kokemuseräisesti.	Mittauskohteen olosuhteet eivät vaikuta mittausepävarmuuteen. Lukemienottolämpötilan oltava 5 asteen tarkkuudella rakenteen normaali lämpötila.

2.6.1 Mittalaite-epätarkkuus

Matologin mittauslaitteet kalibroidaan yksilöllisesti valmistuvaiheessa, jolloin mittalaite-epätarkkuus on $\pm 1,5$ RH-% kosteuden ollessa välillä 35 – 90 RH-%. Mittapään ryömintä on 0,5 RH-% vuodessa.

2.6.2 Mittausasuoritusepävarmuus

Matologin anturi tulee asentaa syvyyden osalta 1 mm tarkkuudella. Matologin anturi on tiivis ja sen tasapaino betonin kanssa tunnetaan.

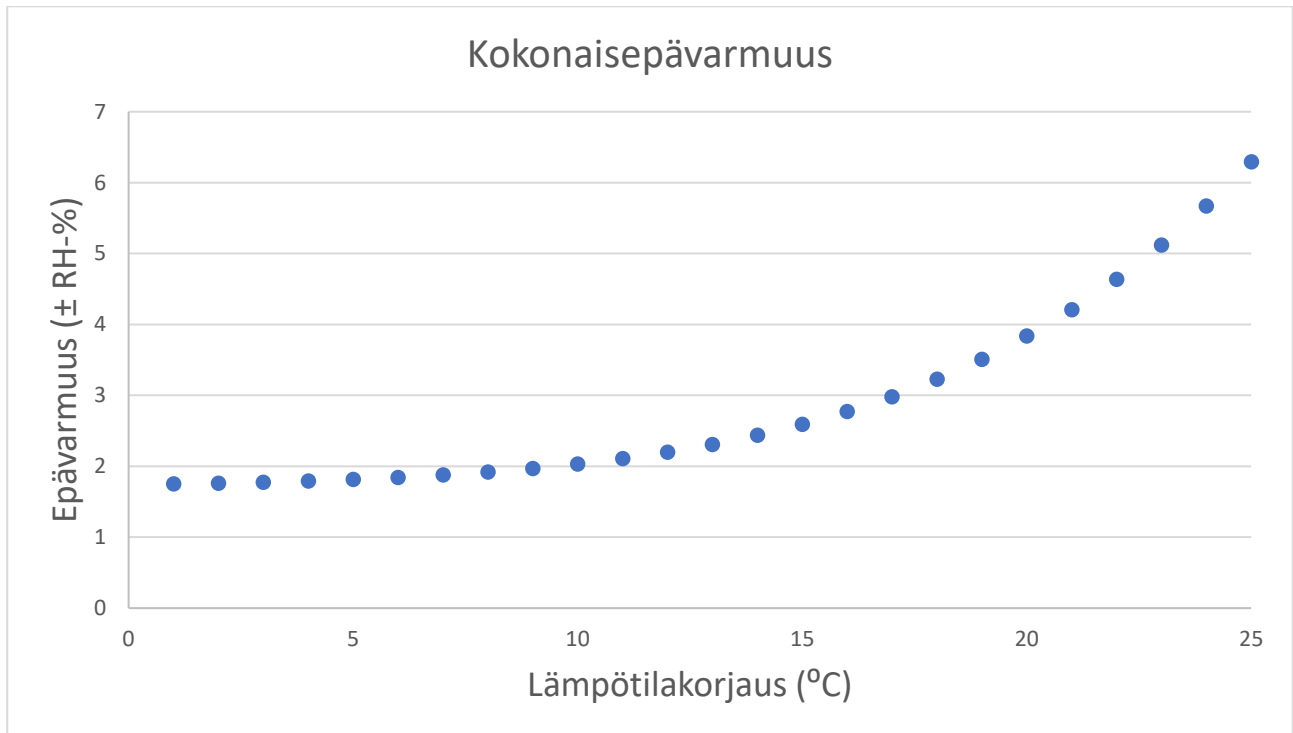
2.6.3 Mittausolosuhde-epävarmuus

Matologin ilmoittamassa RH-%:ssa huomioidaan olosuhteet lämpötilan osalta. Virhemarginaali kasvaa sitä mukaan mitä kauempana ollaan 20 °C lämpötilasta. Ratkaisemalla kappaleessa **Virhe. Viitteen lähde ei löytnyt.** ilmoitetun mittausepävarmuuden kokonaistarkastelun kaavasta lämpötilakorjauksen epävarmuus saadaan laskettua lämpötilakorjauksen epätarkkuus, jolla kokonaisepätarkkuus on alle ± 2 RH-%:

$$\begin{aligned}
 2 &= \sqrt{1,5^2 + 0,809^2 + T_{\text{lämpötilakorjaus}}^2} \\
 \Rightarrow 2^2 &= 1,5^2 + 0,809^2 + T_{\text{lämpötilakorjaus}}^2 \\
 \Rightarrow T_{\text{lämpötilakorjaus}}^2 &= 2^2 - 1,5^2 - 0,809^2 \\
 \Rightarrow T_{\text{lämpötilakorjaus}} &= \sqrt{2^2 - 1,5^2 - 0,809^2} \\
 &\Rightarrow T_{\text{lämpötilakorjaus}} \approx 1,05
 \end{aligned}$$

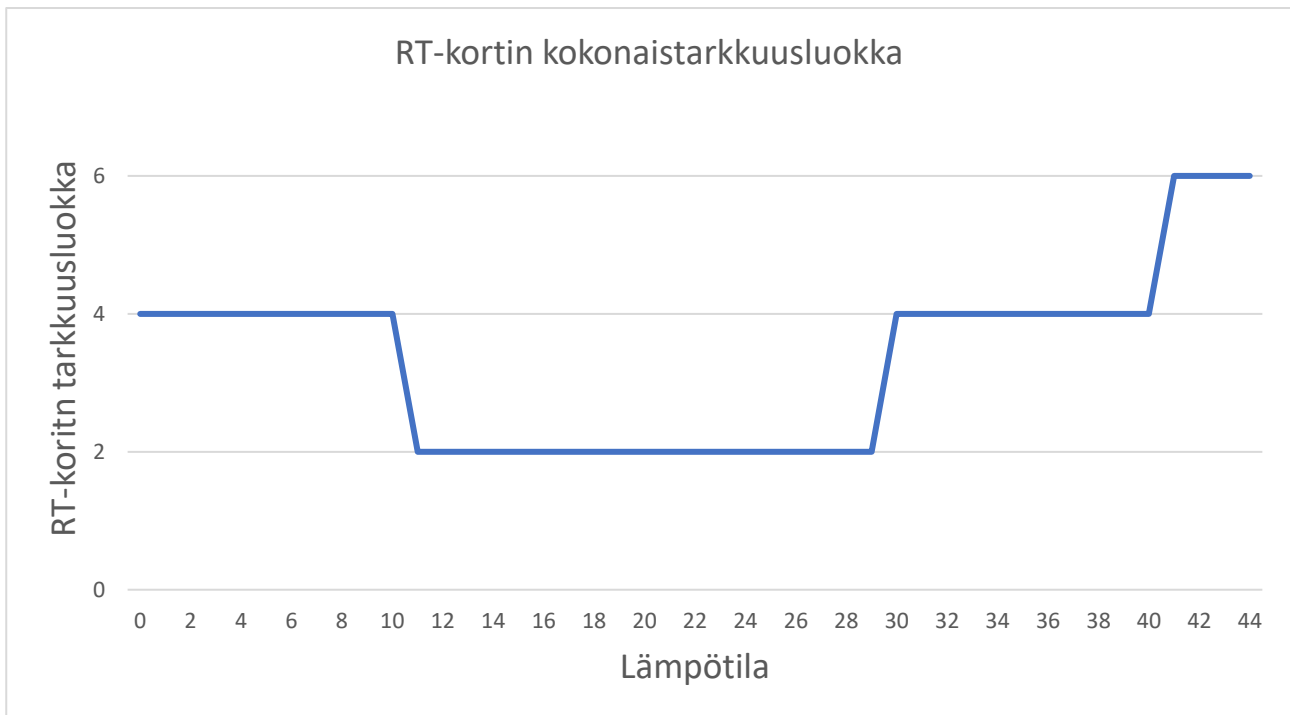
Interpoloimalla taulukosta 1 voidaan arvioida, että lämpötilakorjauksen epävarmuus 1,05 saavutetaan 9 asteen lämpötilakorjauksen kohdalla. Näin ollen mittausolosuhteiden epävarmuuden osalta päästään ± 2 RH-%:n tarkkuuteen, kun mittauslämpötila on välillä 11–29 °C.

Kuvassa 5 on piirretty kokonaisepävarmuuden taso lämpötilakorjauksen funktiona. Sen avulla nähdään, että kokonaisepävarmuus on välillä ± 2 – ± 4 RH-% lämpötilakorjauksen ollessa välillä 10–20 °C. Alle ± 6 RH-%:n kokonaisepävarmuudessa pysytään, kun lämpötilakorjaus on välillä 21–24 °C.



Kuva 5: Kokonaisepävarmuus lämpötilakorjauksen funktiona.

Kuvassa 6 on RT-kortin kokonaispätarkkuusluokat Matologin anturille eri lämpötiloissa.



Kuva 6: RT-kortin tarkkuusluokat Matologille eri mittauslämpötiloissa.

3 Johtopäätökset

Matologin tulokset saadaan ilmoitettua porareikämittausten tasossa porareikämittauksen virhemarginaalin sisällä 70 mm syvyydessä tarkasteltuna.

Matologin anturin viive lämpötilan muutosten suhteen pystytään mallintamaan ja ottamaan huomioon tuloksia tarkasteltaessa. Myös lämpötilan vaikutus RH-lukemiin voidaan mallintaa, jolloin on mahdollista ilmoittaa Matologin RH-tulokset esimerkiksi 20 Celsius-asteessa. Anturin ja viivekorjauksen yhteenlaskettu virhemarginaali (95 % luottamusväli) on $\pm 1,70$. Lämpötilakorjauksen virhemarginaali kasvaa lämpötilaeron funktiona ja esimerkiksi 15 asteen lämpötilakorjauksen kokonaisvirhemarginaali (anturin mittauspää ja viive huomioiden) on $\pm 2,82$ %-yksikköä.

Tarkasteltaessa RH-kortin kokonaistarkkuusluokkia Matologin anturilla päästään parhaaseen ± 2 RH-%:n luokkaan, kun mittaushetken lämpötila on välillä 11 – 29 °C ja kosteus on välillä 35 – 90 RH-%. Kokonaistarkkuus on luokassa ± 4 RH-% mittauslämpötilan ollessa välillä 0 – 10 °C tai 30 – 40 °C. Huonoin tarkkuusluokka on lämpötilan ollessa välillä 41 – 44 °C.

Jos kokonaisvirhemarginaalia halutaan pienentää, tulee vuorokausikeskiarvoistamista pidentää esimerkiksi yhteen viikkoon.