

# Rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden arviointi lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kenttämittausten sekä niistä koottavan tietokannan avulla

Anssi Laukkarinen<sup>1</sup>, Pauli Sekki<sup>1,2</sup>, Antti Mikkonen<sup>1</sup> ja Juha Vinha<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

<sup>2</sup> Vahanen Rakennusfysiikka Oy

## Tiivistelmä

Tässä keskustelupaperissa käydään läpi rakenteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden jatkuvatoimisten ja pitkäkestoisten kenttämittausten nykyistä laajempaan käyttöön liittyviä mahdollisuuksia ja vaatimuksia. Rakenteissa esiintyvien lämpötilan ja suhteellisen kosteuden olosuhteiden avulla olisi mahdollista rakentaa yhtenäinen ketju suunnitteluvaiheen tavoitteista niiden täyttymisen seuraamiseen rakennuksen käytön aikana. Erityisesti mittauksista olisi hyötyä pohdittaessa rajanvetoa hyväksytyille rakenneratkaisuille sekä tuotettaessa tietoa rakenteiden todellisesta käyttäytymisestä. Mittausdatojen kokoaminen rakennusalan yhteiseksi avoimen datan tietopankiksi toisi uusia mahdollisuuksia rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden määrittelyyn kansallisella tasolla sekä yksittäisten kohteiden arviointiin suhteessa muihin saman rakenneratkaisun kohteisiin.

## 1. Johdanto

Lämpötila (T) ja suhteellinen kosteus (RH) ovat tärkeitä suureita rakennusfysiikassa, koska ne vaikuttavat keskeisellä tavalla useiden vaurioitumisilmiöiden käynnistymiseen ja etenemiseen. Hyvin toimivassa rakenteessa lämpö- ja kosteusolosuhteet pysyvät sellaisina, että rakenne täyttää sille asetetut toimivuusvaatimukset tavoitellun käyttöiän ajan.

Rakentamismääräyksien lähtökohta on, että rakenteiden tulee olla lämpö- ja kosteusteknisesti toimivia [1]. Rakenteiden kosteustekniselle toimivuudelle ei kuitenkaan ole tällä hetkellä yksikäsitteistä määritelmää, minkä seurauksena tulkinnat yksittäisen rakenneratkaisun lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnan hyväksyttävyydestä voivat vaihdella. Osittain tämä on seurausta siitä, että rakenteiden toimivuuden eri arviointimenetelmät (kokemusperäisesti, laskennallisesti, mittauksin) eivät muodosta yhtenäistä jatkumoa, jossa suunnitteluvaiheessa asetettujen tavoitteiden saavuttaminen voitaisiin yksiselitteisesti todentaa valmistuneesta rakennuksesta. Tämän lisäksi eri hankkeissa koottuja aineistoja ei useinkaan koota yhteen, jolloin kerätyn datan potentiaali jää osittain hyödyntämättä.

Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksia tehdään nykyisin esimerkiksi betonirakenteiden kuivumisen ja päällystettävyyden arvioimiseksi [2], talotekniikan laadunvarmistusta ja vastaanottoa varten [3], sisäilmaston tavoitetasojen saavuttamisen todentamiseksi [4] sekä kuntotutkimusten osana rakennuksen ja rakenteiden toimivuuden arvioimiseksi [5, luku 7]. Rakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteiden jatkuvatoimista seuranta voidaan myös tehdä rakennusten ylläpidon osana [6, luku 6.4.3]. Jatkuvatoimisia T/RH-mittauksia tehdään myös erilaisten tutkimus- ja kehityshankkeiden osana Suomessa ja ulkomailla.

Edellä olevien esimerkkien perusteella talonrakentamisessa tehdään paljon erilaisia lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksia eri tarkoituksiin. Näiden esimerkkien ja yleisen käsityksen

perusteella rakenteista tehtävien pitkäkestoisten ja jatkuvatoimisten T/RH-mittausten osuus kaikista mittauksista on kuitenkin melko pieni. Rakenteiden T/RH-olosuhteet tarjoavat kuitenkin keinon määrittää rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden tavoitetasot laskennallisesti rakennuksen suunnitteluvaiheessa ja todentaa niiden saavuttaminen kussakin kohteessa käyttövaiheen aikana. Yksittäisistä kohteista tehtävien mittauksen lisäksi näitä aineistoja tulisi kuitenkin koota yhteen paikkaan ja asettaa avoimesti saataville, jotta rakennusalan eri toimijat voisivat hyödyntää niitä eri tarkoituksiin.

Rakenteiden kenttämittauksia ajatellaan tässä yhteydessä hyödynnettävän erityisesti sellaisissa tilanteissa, joissa kenttämittauksilla voitaisiin saada lisää tietoa rakenteiden käyttäytymisestä. Tällaisia ovat esimerkiksi yleisesti hyvin toimivaksi arvioitujen tai selkeästi puutteellisesti toimivien rakenteiden mittaukset referenssiaineiston muodostamiseksi; nykyisen ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteiden suhteen hyväksyttävyyden rajalla olevien rakenteiden mittaukset; korjauskohteissa nykytietämyksen valossa puutteellisten rakenneratkaisujen mittaukset, jotka yksittäisissä kohteissa ovat kuitenkin toimineet hyväksyttävästi; uusien rakenneratkaisujen mittaukset erilaisten rakenteellisten ratkaisujen vaikutusten arvioimiseksi.

Tämän artikkelin yleisenä tavoitteena on toimia keskustelupaperina sille, miten rakenteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden pitkäkestoisia ja jatkuvatoimisia kenttämittauksia voitaisiin nykyistä paremmin hyödyntää rakenteiden toimivuuden tavoitteenasettelussa ja todentamisessa. Muut mittaukset on rajattu käsittelyn ulkopuolelle. Kirjoituksen tavoitteet tarkemmin ovat:

- i. Hahmotella keinoja asettaa rakenneratkaisulle lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tavoitteet siten, että ne ovat todennettavissa kohdekohtaisilla mittauksilla (luku 2)
- ii. Hahmotella askelmerkkejä uudelle rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden tietokannalle, johon koottaisiin laaja ja kasvava otos pitkäkestoisia ja jatkuvatoimisia lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kenttämittauksia (luku 3).

Kirjoitus pohjautuu kokemuksiin Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmässä toteutetuista projekteista [9, 10, 11, 12], muuhun alan kirjallisuuteen (viitattu erikseen) sekä artikkelin ykköskirjoittajan väitöskirjaprojektiin. Artikkelissa tarkastellaan rakenteita, joissa jatkuvatoimisilla mittauksilla saadaan enemmän tietoa verrattuna kertaluonteisiin tai jaksoittain luettaviin mittauksiin.

## **2. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kenttämittausten hyödyntäminen rakenteen toimivuuden tavoitteenasettelussa ja todentamisessa**

### **2.1 Tavoitteiden asettaminen**

Lähtökohtana nyt käsiteltävässä menettelyssä on, että tavoitteet rakenneratkaisun lämpö- ja kosteustekniselle toimivuudelle asetetaan suoraan T/RH-arvojen tai näistä laskettujen toimivuussuureiden avulla. Tällöin tavoitteiden saavuttaminen pystytään tekemään suoraan kohdekohtaisilla T/RH-mittauksilla ja tulosten analysoinnilla.

T/RH-arvoihin perustuvat tavoitteet on mahdollista määritellä useilla eri tavoilla. Muutamia esimerkkejä on esitetty taulukossa 1. Taulukossa esitettyihin ehtoihin liittyvät raja-arvot on mahdollista asettaa eri vaurioitumistapoja kuvaavien mallien avulla, mutta myös tekemällä eri rakenneratkaisuista kuntotutkimuksia riittävän laajalla otoksella (kts. luku 3).

Osa T/RH-mittauksiin perustuvaa tavoitteenasettelu- ja todentamismenettelyä on myös

arviointipisteiden lukumäärän ja laajuuden määrittäminen. Arviointipisteellä tarkoitetaan tässä yhteydessä kohtaa rakenteessa, jolle T/RH-arvoihin perustuvat tavoitteet asetetaan ja joiden täytyminen todennetaan myöhemmin mittauksin. Rakenneseosan ilmansuunta, rakenneratkaisu itsessään, korkeusasema maanpinnasta ja huonetilan lattiasta, muun rakenneseosan tai -yksityiskohtan läheisyys sekä kohdan lämpötila- ja kosteushistoria vaikuttavat kaikki muodostuviin olosuhteisiin. Koska rakentamismääräystenkin lähtökohtana on, että rakenteiden tulee olla lämpö- ja kosteusteknisesti toimivia, tulee arviointipisteiden valinnan osua mitoittaviin rakennejärjestelmän kohtiin. Jos mitoittavien pisteiden sijainnista ei ole täyttä varmuutta, niin tällöin arviointipisteitä tulee ottaa mukaan siinä laajuudessa, että mitoittavat pisteet sisältyvät tähän joukkoon suurella todennäköisyydellä. Tällöin arviointipisteiden valinta palautuu normaaliin rakennejärjestelmän rasiustekijöiden ja kestävyuden arviointiin.

Taulukko 1. Eri tapoja asettaa rakenteelle T/RH-olosuhteisiin perustuvia toimivuusvaatimuksia.

id	Ehto	Kommentteja
i	$RH < RH_{max}$	Yksinkertainen tarkistaa, mutta vakiosuuruinen yläraja ei ota huomioon eri vaurioitumistapojen yksityiskohtia. Esimerkkejä: i) Suhteellisen kosteuden tulee olla jatkuvasti alle 80 % RH, ii) Suhteellisen kosteuden tulee olla 99 % ajasta alle 85 % RH. Molempia ehtoja voidaan visualisoida RH-aika -viivakuvaajien lisäksi myös RH:n kertymäfunktioiden avulla.
ii	$RH < RH_{crit}(T)$	Myös melko yksinkertainen tarkistaa, minkä lisäksi olosuhteita voidaan visualisoida T-RH -pistekuvaajalla. Kriittisen RH:n funktiossa voidaan ottaa samalla kertaa huomioon homeen kasvu [13] ja kosteuden kondensoituminen (kommentti alla). Esimerkki: $RH_{crit} = \begin{cases} 0,83T + 97 & , T \leq 0 \\ \min \left( \max \left( \begin{matrix} -0,00267T^3 \\ +0,16T^2 \\ -3,13T + 100 \end{matrix} , 80 \right) , 97 \right) & , \text{muutoin} \end{cases}$ Pakkasen puolella olevissa arvoissa on otettu huomioon, että RH-anturit ilmoittavat lukeman yleensä nestemäisen veden suhteen myös < 0 °C lämpötilassa.
iii	$\Delta t = \sum_{j=1}^N \Delta t_j$ [jos $RH_j > RH_{crit}$ ]	Niiden ajanjaksojen yhteenlaskettu kesto, kun olosuhdetavoitteet eivät täyty. Voidaan laskea myös prosentiosuutena mittausten kestoista.
iv	$M_{max}(T, RH) < 1$	Mitatuista T/RH-arvoista rajapinnan herkimmälle materiaalille laskettu suomalaisen homeindeksin maksimiarvo, jonka tulee pysyä alle ykkösen (ei homeen kasvua). Sallivampi ehto edellisiin verrattuna, mutta tulosten arviointiin tulee mukaan enemmän homeen kasvun mallintamiseen liittyviä epävarmuuksia.
v	$(v - v_u) \approx 0$ ja $(T - T_u) > \Delta T(T)$	Mittauspisteessä ei ole juurikaan kosteuslisää ulkoilmaan nähden, mutta mittauspiste on tavoitellun verran ulkoilmaa lämpimämpi.
vi	$VI = \frac{v - v_u}{v_s - v_u} < VI_{max}$ ja $TI = \frac{T - T_u}{T_s - T_u} > TI_{min}$	Perusidea kuten edellä, mutta vesihöyrypitoisuus- ja lämpötilaerot on normeerattu sisä- ja ulkoilman olosuhteiden välisten erotusten avulla. Jos toinen tai molemmat nimittäjistä ovat lähellä nollaa, tulee tilanteet käsitellä erikseen esimerkiksi kohdan v) avulla.
vii	$I(T_{ref}, RH_{ref}) < I_{max}$ , kun $T_{ref}, RH_{ref} = f(T, RH)$	Mitatut T/RH-olosuhteet normeerataan ensin rakennusfysikaalisen testivuoden mukaisiin referenssiolosuhteisiin (ref), ennen kuin niistä lasketaan vertailuun käytettävät toimivuusuurat I.

Tietyn rakenteen tai pisteen erityispiirteet voivat tehdä kyseisestä kohdasta T/RH-mittauksia ajatellen erityisen kiinnostavan tai toisaalta tehdä mittaukset kyseisestä kohdasta tarpeettomiksi. Jos suhteellisen kosteuden tiedetään olevan pysyvästi tietyssä pisteessä hyvin korkea (> 90...95 % RH), ei mittausepävarmuuksien vuoksi tältä alueelta tehtävistä jatkuvatoimisista mittauksista saada juuri lisätietoa tähän ennakkotietoon nähden. Tällöin voi kuitenkin olla perusteltua tehdä

lämpötilamittauksia rakennejärjestelmän suunnitelmienmukaisen toiminnan todentamiseksi. Jos suhteellisen kosteuden tasosta ei ole tarkkaa käsitystä etukäteen, tällöin korkealla RH-alueella tehtävien mittausten perusteella voidaan saada selville suhteellisen kosteuden suuruusluokka. Hitaasti kuivuvien rakenteiden olosuhteet muuttuvat ajan funktiona, jolloin niiden kuivumisen seuranta on perusteltua. Pysyvästi matalan RH-alueen pisteitä ei ole tarpeen seurata vaurioitumisen seuraamiseksi, mutta tällaiset mittaukset voivat kuitenkin mahdollistaa esimerkiksi lämpötila- ja vesihöyrypitoisuusprofiilien sekä -erojen määrittämisen rakenteen yli ja olla siten hyödyllisiä rakenteen käyttäytymisen havainnollistamiseksi.

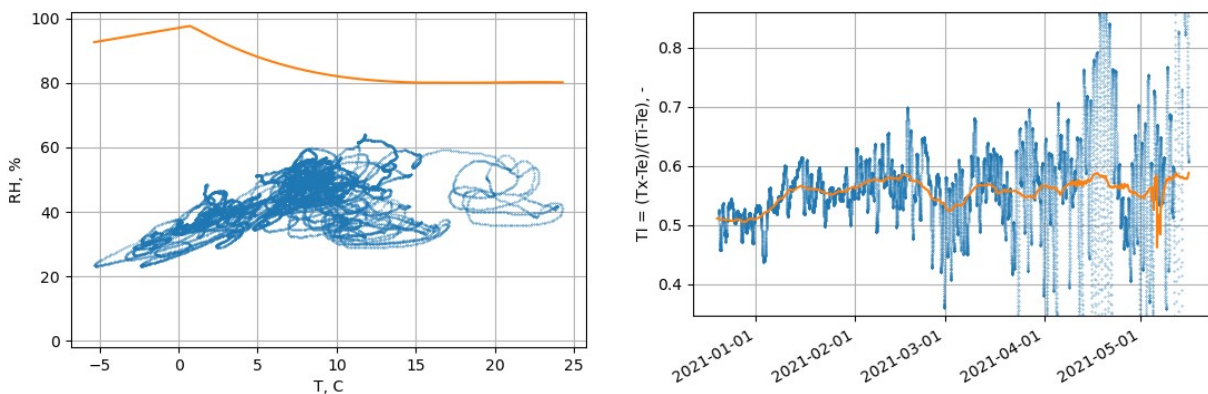
Joskus mittausprojektiin päättymisen jälkeen mittauspisteiden määrän kasvattaminen voi olla siinä määrin helppoa ja edullista, että lisämittauksia halutaan ottaa mukaan varmuuden vuoksi. Tällöin ohjaavia strategioita lisäpisteiden valintaan voivat olla:

- a) yksittäisten mittauspisteiden tuplaaminen, jolla varaudutaan laiterikkoihin
- b) samankaltaisten mittauspisteiden ottaminen mukaan, jolla saadaan lisätietoa olosuhteiden vaihtelusta samankaltaisten mittauspisteiden kesken ja voidaan laskea laajempaa geometrista aluetta kuvaavat keskiarvo-olosuhteet, tai
- c) poikkeavien mittauspisteiden mukaanotto, jolla pyritään tuottamaan tulosaineistoon lisää referenssipisteitä tulosdatan tulkintamahdollisuuksien laajentamiseksi.

Ilmastonmuutokseen varautuminen on mahdollista toteuttaa asettamalla toimivuusvaatimukset siten, että niissä on ylimääräistä varmuutta nykyilmaston olosuhteissa, mutta että vaatimusten arvioidaan täyttyvän myös tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. Asetetut tavoitteet ja niihin liittyvät todentamismenettelyt tulee dokumentoida.

## 2.2 Toteutumisen todentaminen

Yksinkertaisimmillaan toteutumisen todentaminen tarkoittaa hyvin lyhyttä vertailua. Jos esimerkiksi toimivuusvaatimus tietylle arviointipisteelle on asetettu taulukon 1, kohdan (i) mukaisesti, tällöin mitattua suhteellista kosteutta verrataan tähän rajaan ja mitattujen RH-arvojen tulee jäädä sen alle. Kuvassa 1 on esimerkki erään ulkoseinärakenteen mittauksista hyödyntäen taulukon 1 tapoja ii ja vi (TI:n osalta).



Kuva 1. Erään ulkoseinärakenteen mittaustuloksia. Olosuhteet seinässä olivat mittausjaksolla rakennusfysiikallisesti hyvällä tasolla. Vasen kuva: RH:lle asetettu maksimitaso ja toteuma. Oikea kuva: Lämpötilaindeksin tuntiarvot ja niiden liukuva keskiarvo.

Mittaustulosten arviointiin liittyy kuitenkin myös tiettyjä ehtoja, joiden tulee toteutua tulosten luotettavuuden varmistamiseksi ja parantamiseksi sekä erityistilanteisiin liittyvien kysymysten

ratkaisemiseksi. Osa näistä on kaikkiin mittauksiin liittyviä teknisiä ja prosessiluonteisia kysymyksiä, kuten tarkoitukseen sopivien ja kalibroitujen mittalaitteiden käyttö, oikea asennustapa, prosessissa mukana olevien henkilöiden riittävä osaaminen sekä toiminnan suunnitelmallisuus ja avoimuus. Näihin liittyvää ohjeistusta on löydettävissä alan kirjallisuudesta, eikä niitä käydä tässä yhteydessä sen tarkemmin läpi. Osa taas on erityisesti nyt käsiteltävään menettelyyn liittyviä ja niistä käydään alla tarkemmin läpi mittausepävarmuuden roolia ja tarvittavaa mittausjakson pituutta.

Mittaasepävarmuudet vaikeuttavat vahvojen tulkintojen tekemistä mittaustuloksista, mutta samalla laitteisiin ja niiden kalibrointeihin liittyvien epävarmuuksien tunteminen on myös etu verrattuna menetelmiin, joissa epävarmuuksia ei tunneta. Taulukossa 1 esitettyihin arvoihin ei ole merkattu näkyviin mittaasepävarmuuksia, koska monimutkaisemmille menetelmille näitä ei tällä hetkellä tunneta. Mittaasepävarmuuden käsittelyn ns. suorassa menetelmässä (*simple acceptance*) osapuolet voivat sopia erilaisista mittaasepävarmuuden pienentämistoimenpiteistä, mutta mittaasepävarmuutta ei kuitenkaan oteta erikseen huomioon vaatimustason täyttymistä arvioitaessa. Yksityiskohtaisempi tapa on määrittää mittaustuloksiin liittyvä standardiepävarmuus [14] ja tämän jälkeen asettamalla vaatimus, että mittaustulos on vähintään 1–2 standardiepävarmuuden verran vaatimusrajan varmalla puolella (*guarded acceptance*) [15].

Mittaasepävarmuuden olemassaolo on hyvä muistaa myös kahden luvun vertailuissa, joissa erotuksen voidaan sanoa olevan merkityksellinen vasta siinä vaiheessa, kun se on erotuksen mittaasepävarmuutta suurempi. Esimerkin vuoksi oletetaan, että olemme tehneet T/RH-mittauksia rakenteen lämpimältä ja kylmältä puolelta. Laiterikkoja varten rakenteen kylmemmälle puolelle on asennettu kaksi anturia ( $N_2 = 2$ ) ja lämpimämmälle puolelle yksi anturi ( $N_1 = 1$ ). Kylmällä puolella (ryhmä 2) olevien antureiden keskiarvo-olosuhteet ovat  $-5\text{ °C}$  ja  $80\%$  RH sekä lämpimällä puolella (ryhmä 1) olevan anturin tulos  $15\text{ °C}$  ja  $25\%$  RH. Oletetaan anturit ja näihin liittyvät standardiepävarmuudet toisistaan riippumattomiksi ja keskenään samanlaisiksi ja että yksittäiseen mittalaitteeseen liittyvät yhdistetyt standardiepävarmuudet ovat:  $u_2(T) = 0,5\text{ °C}$ ,  $u_1(T) = 0,3\text{ °C}$ ,  $u_2(\varphi) = 5\%$  RH ja  $u_1(\varphi) = 3\%$  RH.

Kun halutaan selvittää arviointipisteiden vesihöyrypitoisuuksien erotus, niin tämä saadaan laskettua anturiryhmien keskiarvojen erotuksena, eli:  $\Delta v = \bar{v}_2 - \bar{v}_1 = 3,20\text{ g/m}^3 - 2,73\text{ g/m}^3 = 0,47\text{ g/m}^3$ . Tähän tulokseen liittyvän standardiepävarmuuden lausekkeeksi voidaan johtaa:  $u_c(\Delta v) = \sqrt{u^2(v_1)/N_1 + u^2(v_2)/N_2}$ , jossa  $u(v_1)$  on vesihöyrypitoisuuden standardiepävarmuus lämpimällä puolella olevaan ryhmään 1 kuuluvalla yksittäiselle anturille ja  $u(v_2)$  vastaava arvo kylmällä puolella ryhmään 2 kuuluville yksittäisille antureille. Yksittäisen anturin standardiepävarmuus saadaan laskettua GUM-ohjeen sekä kyllästysvesihöyrypitoisuuden lausekkeen, ideaalikaasun tilanyhtälön, varianssien summalausekkeen ja Taylorin sarjakehitelmän avulla [12, 14].

Edellä mainittuja lähtötietoja ja menetelmiä käytettäessä yhden anturin tuloksista lasketun vesihöyrypitoisuuden standardiepävarmuus on kylmän puolen olosuhteille  $u(v_1) = 0,17\text{ g/m}^3$  ja lämpimän puolen olosuhteille  $u(v_2) = 0,38\text{ g/m}^3$ . Vesihöyrypitoisuuseron yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi saadaan tällöin:  $u_c(\Delta v) = (0,38^2 / 2 + 0,17^2 / 1)^{0,5} = 0,40\text{ g/m}^3$ . Jos mittaasepävarmuus oletetaan normaalijakautuneeksi ja että  $95\%$  luottamusväliä vastaa kattavuuskerroin  $k = 2$ , niin tällöin vesihöyrypitoisuuseron  $95\%$  luottamusväliä vastaava laajennettu mittaasepävarmuus on:  $U_{k=2} = 2 \cdot 0,40\text{ g/m}^3 = 0,80\text{ g/m}^3$ . Tällöin mittaasepävarmuuden näkökulmasta katsottuna arviointipisteiden välillä olisi nollostapoikkeava vesihöyrypitoisuusero kattavuuskerrointa  $k = 1$  käytettäessä, mutta ei kerroin  $k = 2$  käytettäessä. Normaalijakautuneille suureille nämä arvot vastaavat noin  $68\%$  ja  $95\%$  luottamusvälejä.

Tarvittavaa mittausjakson pituutta arvioitaessa lähtökohtana tulisi olla, että mittaustuloksissa on mukana otos kaikista rakenteeseen kohdistuvista olosuhteista. Tällä perusteella toimivuuden arviointi tulisi tehdä pitkäkestoisilla mittauksilla, koska olosuhteet rakenteen sisällä muuttuvat vuoden kierron ja vuorokauden ajan mukaan ja lyhytkestoiset mittaukset eivät anna edustavaa kuvaa mittauskohdan pitkäaikaisesta käyttäytymisestä. Tarkempien tietojen puuttuessa mittausjakson tulisi olla vähintään yksi vuosi, jotta tuloksissa olisi mukana vähintään yksi kesäkausi ja yksi talvikausi. Mittausdatan analysointimenetelmien kehittyessä mittausjakson vaadittua pituutta voi olla tulevaisuudessa mahdollista lyhentää.

Vaikka mittausjakso sisältäisi yhden kesä- ja yhden talvijakson, voivat peräkkäiset vuodet olla rakennusfysiikallisesti toisistaan hyvin erilaisia. Eri ajanjaksoina tehdyt mittaukset voivat osua mihin tahansa kohtaan vuosien kriittisyysjärjestystä, minkä seurauksena eri aikoina tehdyt mittaukset eivät automaattisesti ole keskenään vertailukelpoisia. Vuosien välisen vaihtelun huomioon ottamiseksi on olemassa ainakin seuraavat keinot:

- a) Mittauksia jatketaan niin pitkään, että asetettujen vaatimusten täyttyminen voidaan todeta suoraan raakadatasta
- b) Mittauksia jatketaan niin kauan, että mittausjaksoon tulee mukaan erilaisia vuosia. Mitattujen vuosien olosuhteita verrataan viimeisimpään 30 vuoden ilmastolliseen vertailukauteen ja tavanomaisten vuosien tapauksessa kaikkien mitattujen vuosien tulee täyttää asetetut tavoitteet.
- c) Mitatuille olosuhteille määritetään sellainen varmuusmarginaali, että päätös rakenteen toimivuudesta voidaan tehdä suoraan yhden vuoden mittausjaksosta
- d) Mittaustulosten analysointi tehdään käyttäen menetelmiä, jotka normeeraavat mittaustulokset rakennusfysiikallisen testivuoden olosuhteisiin. Vaadittu mittausjakson pituus riippuu tällöin normeerausmenettelyn ominaisuuksista.

Edellä olevissa kohdissa sisäilman olosuhteiden vaihtelun vaikutukset oletetaan tulevan otetuiksi huomioon ulkoilman olosuhteiden vaihtelun osana.

### **3. Pitkäkestoisten T/RH-mittausten tietokannan muodostaminen**

#### **3.1 Laajaan otokseen perustuva rakenneratkaisun hyväksymismenettely**

Rakenteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden pitkäkestoisia mittauksia on tehty Suomessa useita vuosikymmeniä. Osa näistä mittaustuloksista on jo ennestään raportoitu julkisesti erilaisten tutkimushankkeiden, opinnäytetöiden ja kehitysprojektien osana, mutta niihin liittyviä aikasarjoja ei useinkaan ole sähköisesti vapaasti saatavilla. Lisäksi eri tahoilla voi olla rakenteiden T/RH-mittausten aikasarjoja, joita ei ole aikaisemmin julkaistu oman organisaation ulkopuolelle, mutta joiden julkaisemiselle ei sinällään olisi periaatteellista estettä. Nämä aineistot muodostavat olemassa olevan ja arvokkaan tietomäärän, joka tulisi pyrkiä kokoamaan avoimeksi tietokannaksi jatkoehdyntämistä varten. Erilaisista avoimen datan tietokannoista on olemassa muilta aloilta useita esimerkkejä, mikä lisäksi avoimen datan keräämiseen, tallentamiseen ja hallinnointiin on nykyisin saatavissa apua ja valmiita ratkaisuja esimerkiksi yliopistojen ja tieteen tietotekniikan keskuksen CSC:n kautta. Lisätietoja avoimesta datasta löytyy esimerkiksi osoitteesta: [www.avoindata.fi](http://www.avoindata.fi) [16].

Yksi pitkien T/RH-aikasarjojen tietokannan soveltamiskohteista liittyy edellisen luvun mukaiseen ajatukseen rakenneratkaisun tavoitteiden asettamisesta suoraan T/RH-mittausdatan avulla. Laajan

tietokannan avulla pystyttäisiin määrittämään eri rakenneratkaisujen lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta kuvaavien suureiden jakauma, jonka jälkeen näitä toteutuneita arvoja verrattaisiin koko rakennuskantaa koskeviin tavoitteisiin. Ilmastonmuutokseen varautuminen pystyttäisiin toteuttamaan joko varaamalla mittaustuloksiin eri päästöskenaarioiden mukainen riittävä varmuus tai käyttämällä mitattuja T/RH-olosuhteita referenssinä laskentatulosten riittävän tarkkuuden varmistamiselle (vrt. [7, 8]). Aineistojen määrän kasvaessa muodostuisi listaus lämpö- ja kosteustekniseltä toiminnaltaan käyttöön hyväksytyistä rakenteista. Uusien rakenteiden hyväksymisprosessi etenisi vaiheittain kohdekohtaisesta suunnittelusta ja toimivuuden varmistamisesta seurantaan ja mahdollisesti lopulta hyväksytyjen rakenteiden listalle, jolloin samalla myös kyseisen rakenneratkaisun mittaustarve vähenee ajan myötä.

Tilastollisesti luotettavien tulosten muodostaminen tietokantaan tallennetuista mittauspisteistä ja näihin liittyvistä tausta-aineistoista edellyttää riittävän suurta otoskokoja. Otoksoon etukäteisarviointiin on olemassa menetelmiä, mutta nämä perustuvat usein oletuksiin suureiden jakaumasta ja sisältävät siten epävarmuutta. Lähtökohtana tulisi kuitenkin olla, että tiettyä rakennetta kuvaavia laadukkaita aikasarjoja tulisi olla vähintään useita kymmeniä. Tällaisten aineistomäärien kokoaminen edellyttää koko rakennusalan yhteisiä panostuksia, mutta toteutuessaan tarjoaisi poikkeuksellisen työkalun rakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden arvioimiselle ja kokonaisvaltaiselle kehittämiselle.

### 3.2 Tietokantaan lisättävien T/RH-aikasarjojen kuvailutiedot (metadata)

T/RH-mittausten tietokantaan lisättyjen aikasarjojen hyödyntämismahdollisuudet riippuvat vahvasti kuhunkin aikasarjaan liittyvien kuvailutietojen (metadatan) määrästä ja laadusta. Kuvailutietojen minimimäärä riippuu tavoitelluista käyttötarkoituksista, mutta useissa eri tilanteissa tarpeellisia tietoja ovat:

- Rakennuksen sijaintipaikkakunta, maastoluokka ja käyttötarkoitus
- Huonetilojen käyttötarkoitus ja olosuhteet sekä ulkopuolet varjostukset ja suojaukset
- Rakennuksen pohjakuva/muoto ja rakenneleikkaus, joista ilmenevät mittauspisteiden tarkka sijainti ja rakennetyypin tiedot
- Mittalaitteen merkki ja malli sekä standardiepävarmuudet.

T/RH-olosuhteille asetettavat tavoitteet (taulukko 1) voidaan määrittää eri vaurioitumistapoja kuvaavien mallien avulla, mutta myös tekemällä mitatuista kohteista rakenteiden kuntotutkimuksia ja analysoimalla näitä riittävän suurella otoskolla. Tällainen lähestymistapa mahdollistaisi räätälöidymmän ja kattavamman arvioinnin kyseisistä rakenneratkaisuista, koska kuntotutkimusten avulla olisi mahdollista saada mukaan myös ilmiöitä, joille ei ole laskennallisia malleja käytettävissä.

## 4. Yhteenveto ja kehitys eteenpäin

Tässä kirjoituksessa käsiteltiin mahdollisuutta toteuttaa rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden tavoitteenasettelu ja todentaminen hyödyntäen rakenteista tehtäviä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden jatkuvatoimisia ja pitkäkestoisia mittauksia sekä mittaustuloksista koottavaa tietokantaa. Keskeisiä etuja menettelyssä olisivat tavoiteltujen ja toteutuneiden olosuhteiden vertailun selkiyttäminen, toteumatiedon tuominen kenttäolosuhteista suunnitteluvaiheeseen, uudet mahdollisuudet määrittellä rakentamismääräysten laadulliset tavoitteet numeroarvoilla sekä yhteinen tapa kommunikoida rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen liittyvistä asioista. Aineistoja voitaisiin hyödyntää myös

laskentatulosten tarkkuuden arvioinnissa ja rakenneratkaisujen luokittelussa.

Pitkäkestoisten ja jatkuvatoimisten mittausten laaja toteuttaminen ja hyödyntäminen edellyttäisi myös huomattavan määrän panoksia rakennusalan eri toimijoilta, jotta uusia käytäntöjä saataisiin kehitettyä, testattua ja otettua käyttöön. Konkreettisia asioita, joita rakennushankkeissa olisi tällä hetkellä mahdollista tehdä, olisivat esimerkiksi käynnissä olevien jatkuvatoimisten mittausten keston pidentäminen sekä uusien mittauspisteiden liittäminen mukaan datan määrän kasvattamiseksi, mittausdatoja ja niiden kuvailutietoja koskevien avoimen datan lisenssiehtojen kirjaaminen mukaan sopimuksiin, sekä jo olemassa olevien mittausaineistojen lähettäminen artikkelin kirjoittajille tallentamista varten. Viimeisestä kohdasta on hahmoteltu esimerkkiä github.com -palvelussa olevaan TRH-1 -tietovarastoon [17].

Uusia menettelyjä käyttöönotettaessa on alkuvaiheessa hyvä ainoastaan kerätä kokemuksia ja tämän jälkeen hiljalleen kasvattaa vaatimusten tarkkuutta. Rakennusalalla on jo olemassa useita esimerkkejä muista mittauksiin perustuvista vaatimuksenmukaisuuden todentamisen menettelyistä, joten ajan myötä tällainen olisi varmasti rakennettavissa myös vaipparakenteiden käyttötilanteen lämpö- ja kosteustekniselle toimivuudelle.

## Lähdeluettelo

- [1] Ympäristöministeriön asetus 782/2017 rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta, ympäristöministeriö.
- [2] RT 103333 (2021) Betonin suhteellisen kosteuden mittaust, Rakennustieto Oy.
- [3] RT 10-11301 (2018) Talotekniikan laadunvarmistus- ja vastaanottomenettely, Rakennustieto Oy.
- [4] RT 07-11299 (2018) Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Rakennustieto Oy.
- [5] Ympäristöopas 2016 (2016) Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus (toim. Miia Pitkäranta). Ympäristöministeriö.
- [6] RIL 250-2020 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ril ry.
- [7] SFS-EN ISO 13788 (2013) Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation. Calculation methods. SFS ry.
- [8] SFS-EN 15026 (2007) Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation. SFS ry.
- [9] Laukkarinen, A. (2015) Tuulettuvien yläpohjien lämpö- ja kosteustekninen toiminta nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto.
- [10] Laukkarinen, A. & Vinha, J. (2017) Temperature and relative humidity measurements and data analysis of five crawl spaces. NSB 2017, Trondheim, Norway.
- [11] Laukkarinen, A., Musakka, S., Penttilä, O., Teriö, O. & Vinha, J. (2017) Puukerrostalon työmaavaiheen lämpö- ja kosteusolosuhteiden mittaukset. Rakennusfysiikka 2017, 24.-26.10.2017, Tampere.
- [12] Laukkarinen, A., Vinha, J., Kalbe, K., Kesti, J., Kalamees, T. & Honkakoski, E. (2020) Laboratory tests and modelling of mineral wool insulated steel sandwich panels. NSB 2020, Tallinn, Estonia.
- [13] Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J. & Salminen, K. (2010) Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials. Buildings Conference, Clearwater Beach, Florida.
- [14] JCGM 100 (2008) GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, BIPM. <https://www.bipm.org/en/publications/guides>
- [15] JCGM 106 (2012) Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment. BIPM. <https://www.bipm.org/en/publications/guides>
- [16] Digi- ja väestötietovirasto, Avoindata.fi [Online]. <https://www.avoindata.fi/fi> [Haettu 23 8 2021].
- [17] Laukkarinen, A. (2021) TRH-1: Rakenteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden jatkuvatoimisten ja pitkäkestoisten kenttämittausten avoin tietokanta. Saatavilla: <https://github.com/anssilaukkarinen/trh-1>