Kuorielementtien kuivumisen mallintaminen hydrataation huomioivalla FEM-laskennalla

Pauli Sekki, Lauri Korhonen ja Juha Vinha
Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka

Tiivistelmä

Betonirakenteiden riittävää kuivumista arvioitaessa keskitytään lähes yksinomaan lattiarakenteiden riittävän kuivumisen varmistamiseen. Ulkoseinärakenteet voivat kuitenkin koostua hyvin vesihöyrytiiviistä rakennekerroksista, jotka rajoittavat betonisen kuorielementin kuivumista. Tästä syystä myös betonisten ulkoseinärakenteiden riittävään kuivumiseen on syytä kiinnittää huomiota. Tässä tutkimuksessa määritettiin laboratoriomittauksia hyödyntäen laskentamalli kuorielementin kuivumisen mallinnukseen. Laskennallisessa tarkastelussa selvitettiin kuorielementin sisäpinnalle asennettavan vedeneristeen vaikutusta elementin kosteusjakaumaan ja kuivumiseen. Vaikka laskennan perusteella eri eristysmateriaalien kuivumisessa on merkittäviä eroja, ei sisäpinnan kosteus noussut missään laskentatapauksessa siten, että se aiheuttaisi rakenteeseen kosteusvaurioriskiä.

1. Johdanto

Betonirakenteiden riittävää kuivumista arvioitaessa keskitytään lähes yksinomaan lattiarakenteiden riittävän kuivumisen varmistamiseen. Ulkoseinärakenteet ovat kuitenkin usein varsin paksuja betonirakenteita ja käytössä on useita eri eristysmateriaaleja, jotka voivat parhaimmillaan olla hyvin vesihöyrytiiviitä käytännössä estäen betonirakenteen kuivumisen ulospäin. Tästä syystä myös betonisten ulkoseinärakenteiden riittävään kuivumiseen on syytä kiinnittää huomiota.

Tutkimus liittyy COMBI-hankkeeseen, jossa tutkittiin kokeellisesti kosteusmittauksin kuorielementtien kuivumista vakio-olosuhteissa. Lisäksi hankkeessa määritettiin kuorielementeissä käytettävän betonilaadun kosteusteknisiä ominaisuuksia. Tässä tutkimuksessa kuorielementtien tarkastelu tehdään hydrataation huomioivalla FEM-laskennalla. Vaikka nuoren betonin kosteusolojen mallintamista on tutkittu lukuisissa julkaisuissa, laskentaan ei ole yleisesti hyväksyttyä ohjeistusta. Yleisen mallin kehittämiseksi ongelmana on betonin valmistuksessa käytettävien raaka-aineiden laaja kirjo, jotka kaikki vaikuttavat osaltaan tuoreessa betonissa tapahtuviin kemiallisiin reaktioihin ja sitä kautta betonin kosteusominaisuuksiin. Toisaalta myös työteknisillä tekijöillä on suuri merkitys betonin ominaisuuksiin unohtamatta betonin kypsymisolosuhteita. Käytännön ongelmana betonin kosteusilmiöiden mallintamisessa on riittämättömät tiedot käytetystä betonilaadusta.

Betonin kuivumisen arviointiin vakiolämpö ja -kosteusolosuhteissa on kehitetty malli, joka perustuu betonin diffusiviteettiin [1], ja jolle on annettu ohjeelliset betonin kuivumisnopeutta kuvaavat parametriarvot kansainvälisen asiantuntijaorganisaation fib (Fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete) mallinormijulkaisussa [2]. Kyseisen mallin mukaisella tarkastelulla ei kuitenkaan saavutettu erityisen hyvää arviota betonin kuivumiselle verrattaessa sitä koekappaleiden kosteusmittauksiin [3]. Tässä tutkimuksessa laskennallisen tarkastelun materiaaliarvot määritettiin kirjallisuuden sekä laboratoriomittauksien perusteella. Laskentamallin toimivuus tutkitulla betonilaadulla varmistettiin käytännön

kosteusmittausten perusteella.

Laskennallisesti tarkastellaan, voiko kuorielementtien pinnoittaminen esimerkiksi vesihöyrytiiviillä vedeneristeellä aiheuttaa kosteusvaurioita. Tulosten perusteella arvioidaan kuorielementin rajoitetun kuivumisen riskejä mahdollisten kosteusvaurioiden kannalta.

2. Laskentamalli

Betonin lämmön- ja kosteudensiirto sekä hydrataation vaikutus betonin kuivumiseen mallinnettiin lähteessä [4] kuvattujen yhtälöiden mukaisesti. Hydrataation vaikutus otetaan laskennassa huomioon lämmönlähteenä ja kosteusnieluna. Hydrataation etenemistä kuvataan hydrataatioasteella $\alpha(t_e)$. Muutoksena lähteessä [4] esitettyyn hydrataatioastetta (1) kuvaavaan yhtälöön, on tässä tutkimuksessa käytetty kokeellisesti määritettyä (2) betonin suhteellisen kosteuden vaikutuksen huomioivaa lisätermiä $\beta_{RH}(\phi)$. Hydrataatioaste on lisäksi riippuvainen lämpötilasta sekä betonilaadusta. Betonilaatua kuvaavat parametrit haettiin "trial and error" -menetelmällä tarkoittaen, että dynaamista kuivumiskokeiden simulointia tehtiin uudestaan ja uudestaan kokeilemalla eri parametrien arvoja, kunnes löydettiin arvot, jotka johtivat laskennan ja mittausten vertailussa tyydyttävään lopputulokseen, vrt taulukko 1.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right]\beta_{RH}\,\frac{\alpha_u \beta}{t_e}\left(\frac{\tau}{t_e}\right)^{\beta}\exp\left[-\left(\frac{\tau}{t_e}\right)^{\beta}\right] \tag{1}$$

$$\beta \approx \left[1 + (7{,}5 - 7{,}5\phi)^4\right]^{-1} \tag{2}$$

missä ϕ = betonin suhteellinen kosteus (-)
α = hydrataatioaste (-)
E = hydrataation aktivaatioenergia (J/mol)
R = yleinen kaasuvakio, 8314,3 J/(kmol·K)
T = lämpötila (K)
T_r = vertailulämpötila (K)
β_{RH} = suhteellisen kosteuden vaikutus hydrataatioon (-)
α_u = lopullinen hydrataatioaste (< 1)
β = hydrataation muotoparametri (-)
t_e = ekvivalentti aika (s)
τ = hydrataation aikaparametri (s)

Kosteudensiirron materiaaliparametrit on esitetty taulukossa 1. Muut materiaaliominaisuudet on määritetty kirjallisuuden [5] sekä materiaalivalmistajien ilmoittamien tietojen perusteella.

Taulukko 1. Kosteudensiirron materiaaliparametrit ja niiden määrittäminen.

Materiaaliparametrit	**Symboli**	**Määritys**
Vesihöyryn läpäisevyys	δ	Laboratoriokoe, vakioarvo
Kosteuspitoisuus	$w(\phi)$	Laboratoriokoe
Diffusiiviteetti nestemäiselle vedelle	D_w	Funktio [4] *C1*, α_0, ϕ_c *ja n*
$D_{w.maks}$	*C1*	Laboratoriokoe
Suhde $D_{w.min}/D_{w.maks}$	α_0	Laboratoriokoe
ϕ *keskellä muutosaluetta* $D_{w.min}/D_{w.maks}$	ϕ_c	Trial and error -menetelmä
$D_{w.min}/D_{w.maks}$ *muutoksen muotoparametri*	*n*	Trial and error -menetelmä

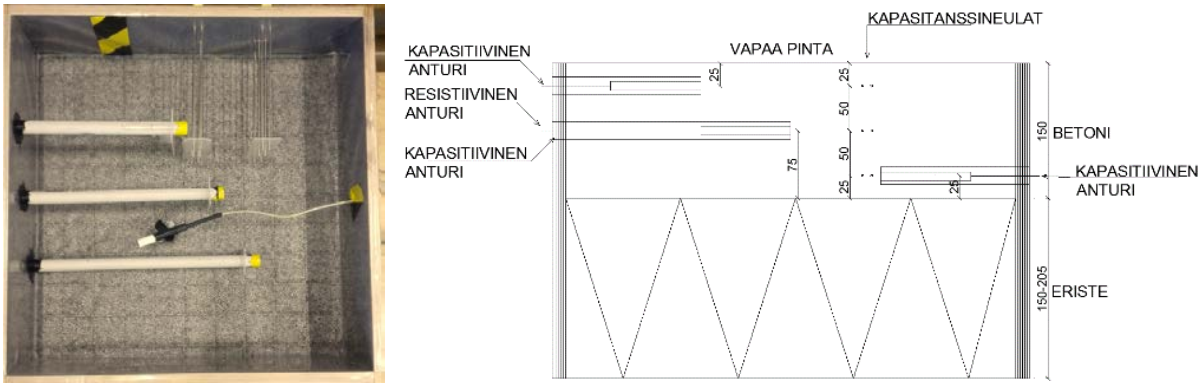
3. Kuorielementtirakenteiden kuivumistarkastelut

3.1 Tarkasteltavat rakenteet

Tutkimuksessa tarkasteltiin neljää kuorielementtirakennetta:

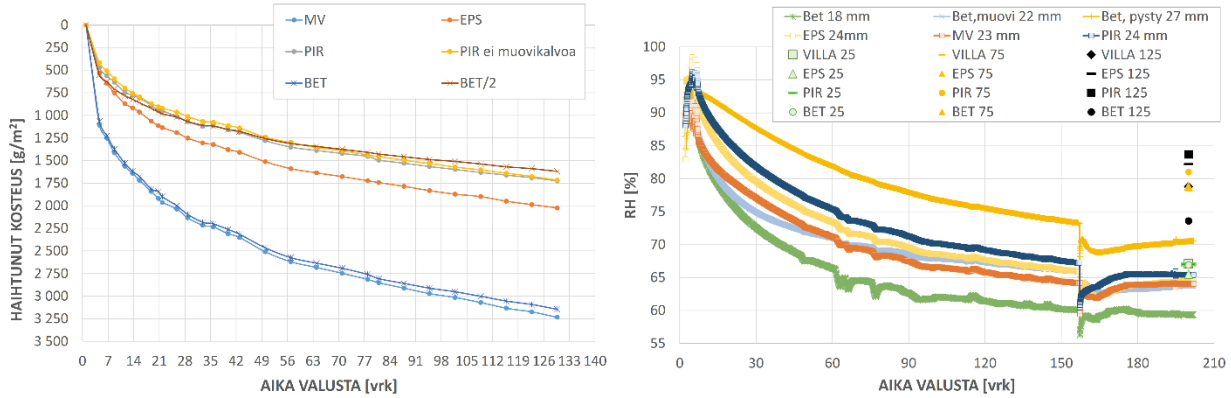
1. EPS: 150 mm betoni + EPS 60S 200mm (FF-EPS 60S), U = 0,15 W/(m^{2}K)
2. MV/VILLA: 150 mm betoni + Min.villa 205 mm (Paroc Cortex One), U = 0,16 W/(m^{2}K)
3. PIR: 150 mm betoni + PIR 150 mm (FF-PIR PLK, muovikalvo pinn.), U = 0,14 W/(m^{2}K)
4. BET:150 mm betoni

Eri rakennetyypeistä tehtiin koekappaleet, joista tehtiin kosteusmittauksia eri mittalaitteilla ja eri syvyyksiltä. Koekappaleen rakenne on esitetty kuvassa 1. Tässä tutkimuksessa verrokkina käytetään kapasitiivisilla kosteusantureilla tehtyjä mittauksia rakenteen pintaosasta sekä 200 vuorokauden kohdalla tehtyä kosteusjakauman määritystä porareikämittauksella.



Kuva 1. Koekappaleet tehtiin sisäpuoleltaan muovikalvolla kosteuseristettyihin vanerilaatikoihin. Vasemmalla koekappale ylhäältä ja oikealla leikkauspiirustus.

Koekappaleiden kuivatuskokeiden mittaustulokset on esitetty kuvassa 2. Punnituskoe ja suhteellisen kosteuden seuranta on tehty eri koesarjoista eri valuista, mutta samalla betonireseptillä. Pitkäaikaismittaukset olivat suunniteltu 25 mm, 75 mm ja 125 mm syvyyksille betonirakenteen vapaasta pinnasta. Kuvan 1 selitteissä on esitetty toteutuneet mittaussyvyydet. Kosteusjakauman mittaus tehtiin 200 vrk kohdalla porareikämittauksena [6].



Kuva 2. Vasemmalla 1. koesarjan punnitustulokset. Oikealla koekappaleiden pintarakenteen jatkuvatoimisten kosteusmittausten tulokset sekä 200 vrk kohdalla tehdyn kosteusjakauman määritys hetkellisenä mittauksena. Lukuarvo kuvaa mittaussyvyyden betonin vapaasta pinnasta.

Mineraalivilla on hyvin vesihöyryä läpäisevä ($\delta_{p.Mv}$ = 190e-12 kg/(msPa) ja mittausten

perusteella mineraalivillalla eristetty koekappale kuivui yhtä nopeasti kuin eristämättömän koekappale. Muovieristeet ovat kohtalaisen vesihöyrytiiviitä, joista EPS on kuitenkin hieman läpäisevämpi ($\delta_{p.EPS}$ = 5e-12 kg/(msPa) kuin muovipinnoitettu PIR-eriste ($\delta_{p.PIR}$ = 4e-14 kg/(msPa). Mittausten perusteella PIR-eristetty rakenne kuivuu hitaimmin, ja koekappaleesta haihtunut kosteus vastaa noin puolta kahteen suuntaan kuivuvan (Bet/2) kappaleen haihtuvasta kosteudesta. EPS-koekappaleen kuivuminen on vain hieman PIR-eristettyä nopeampaa.

3.2 Laskentamallin ja -parameterien määritys

COMBI-hankkeessa on tutkittu betonin materiaaliominaisuuksia sekä rakennekoekappaleiden kuivumista laboratoriokokein, joiden perusteella mallin laskenta- ja materiaaliparametrien määrittäminen tehtiin. Laskenta on tehty COMSOL Multiphysics -ohjelman versiolla 5.3.

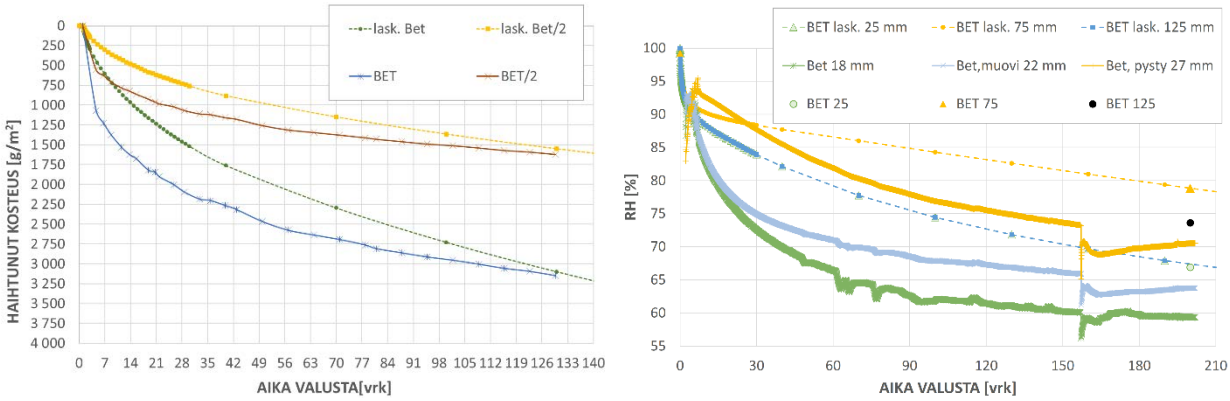
Ensimmäisessä vaiheessa määritettiin mitattavat materiaaliparametrit. Loput parametrit määritettiin trial error -menetelmällä eristämättömän kuorielementin mittausten perusteella, jonka jälkeen mallia testattiin eristettyjen koekappaleiden mittaksiin verrattuna.

3.3 Kuorielementtirakenteiden laskennallinen tarkastelu

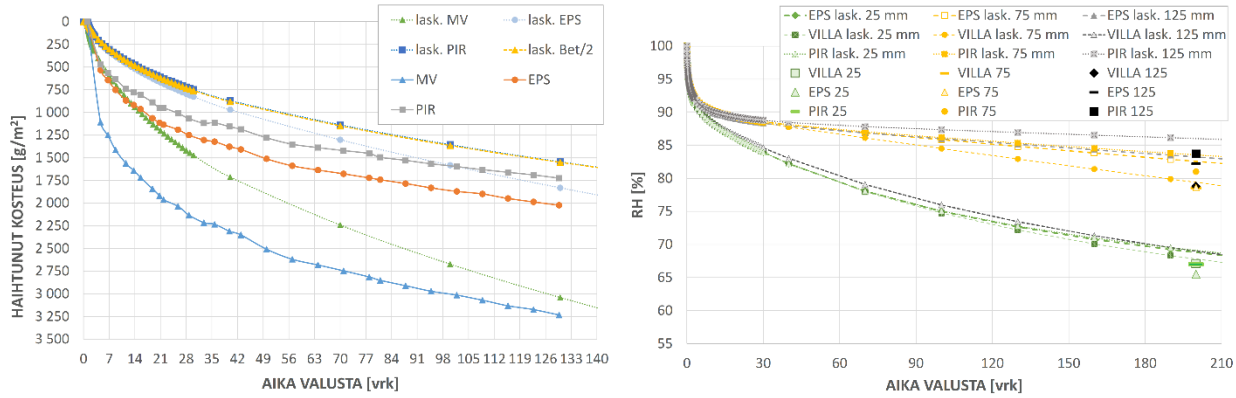
Tutkimuksessa tarkasteltiin laskennallisesti kuorielementtirakenteiden sisäpinnan vedeneristämisen vaikutusta kosteusjakauman muutokseen. Sisäpinnan lämpötilareunaehtona käytettiin vakiolämpötilaa 23 °C ja muuttuvaa suhteellista kosteutta alkaen jälkihoidosta 100 % ja päätyen käytönaikaiseen 40 % (ks. Kuva 5). Ulkopuolisena reunaehtona käytettiin Comsol:n (ASHRAE 2013, Helsinki-Vantaan) keskimääräisiä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden tietoja. Koska kuorielementin ulkopinta on tehokkaasti eristetty, ei ulkoilmareunaehdon käyttö aiheuta virhettä; kuorielementti on sisä- ja ulkopinnoilta tarkasteltuna tasalämpöinen ~23 °C. Sisäpuolen lämpötila pidettiin tarkastelussa vakiona, jotta muutokset sisäpuolisessa kosteusreunaehdossa tulevat selkeästi esiin. Tarkastelun aloituspäivänä oli 1.6. Laskennassa sisäpintaan määritettiin 1 mm vedeneriste (δ_p = 3,2e-12 kg/(msPa) 120 vuorokauden kohdalla. Vedeneristeen kerrospaksuus on valmistajan ohjeistukseen verrattuna kaksinkertainen.

4. Tulokset

Mittausten ja laskennan vertailut on esitetty kuvissa 3 ja 4.



Kuva 3. Laskentatulosten vertailut mittaustuloksiin. Vasemmalla kappaleesta haihtuneen kosteuden määrä pinta-alayksikköä kohden. Oikealla suhteellinen kosteus tarkastelusyvyyksillä. Hetkellisten mittausten selitteen lukuarvo kuvaa mittaussyvyyden betonin vapaasta pinnasta.

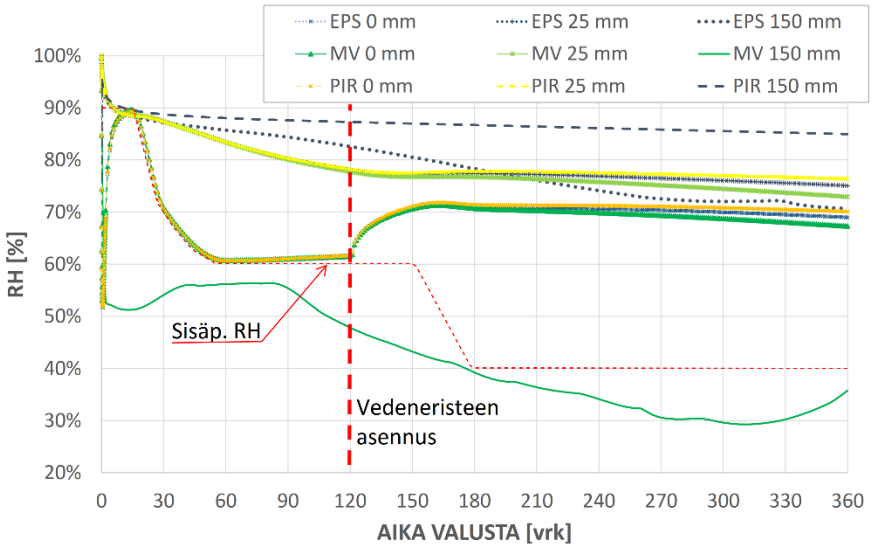


Kuva 4. Laskentatulosten vertailut mittaustuloksiin. Vasemmalla kappaleesta haihtuneen kosteuden määrä pinta-alayksikköä kohden. Oikealla suhteellinen kosteuden laskentatulosten vertailu kosteusjakauman mittaukseen 200 vuorokauden kohdalla. Hetkellisten mittausten selitteen lukuarvo kuvaa mittaussyvyyden betonin vapaasta pinnasta.

Kuvan 3 kosteusmittauksissa on esitetty kolmen eristämättömän koekappaleen mittaustulokset. Koekappale BET on valettu ja jälkihoidettu vastaavalla tavalla eristettyjen kanssa ilman jälkihoitoa. BET,muovi -koekappaleen jälkihoidossa käytettiin muovia. BET,pysty -koekappale tehtiin pystyvaluna, jossa tarkastelupinta oli vanerimuottipintaa vasten. Koekappaleiden tarkat mittaussyvyydet on esitetty kuvassa. Mittaussyvyydet poikkesivat hieman tavoitesyvyydestä 25 mm, mikä vaikeuttaa hieman vertailua.

Laskentatulos vastaa tarkastelujakson molempien vertailumittausten lopputasoja hyvin. Erityisesti laskennan kosteus sekä kosteusjakauman mittaustulokset vastaavat hyvin toisiaan. Alkuvaiheen kuivumista ei onnistuttu kuitenkaan saamaan täysin mittauksia vastaavaksi eikä laskentakäyrien kulmakerroin vastaa mittauksia tarkastelun loppuvaiheessa. Tästä syystä tarkasteluja ei tehty pidemmälle kuin vuoden tarkastelujaksolle.

Kuvassa 5 on esitetty kuorielementin sisäpinnan vedeneristyksen vaikutus rakenteen kuivumiseen.



Kuva 5. Kuorielementin suhteelliset kosteudet laskentatapauksissa eri syvyyksillä. 0 mm on betonin sisäpinta vedeneristeen alla ja 150 mm kuorielementin ulkopinnassa betonin ja eristeen rajapinnassa. Vedeneristeen asennus 120 vuorokauden kohdalla. Laskennan aloituspäivä 1.6.

Tulosten perusteella vedeneristeen asennuksen jälkeen betonirakenteen sisäpinnan kosteus nousee tarkastelutapauksissa noin 10 prosenttiyksikköä. Koska kaikissa tapauksissa kosteus 25 mm syvyydellä on lähes sama, ei kosteuden nousussakaan ole merkittäviä eroja eri eristeiden välillä. Koska PIR-eristetty rakenne kuivuu ulospäin hitaimmin, on kosteus myös sisäpinnassa korkein tarkastelujakson lopussa ollen tarkastelujakson lopussa noin 3 RH-yksikköä korkeampi verrattuna mineraalivillaeristettyyn. Eroa EPS-eristettyyn rakenteeseen on kuitenkin sisäpinnassa vain hyvin vähän. Tarkastelutapauksessa vedeneristys ei kuitenkaan aiheuta missään tapauksessa sellaista kosteuden nousua pintarakenteeseen, mikä aiheuttaisi rakenteen vaurioitumisriskiä.

Tarkasteltaessa kuorielementin ja eristeen rajapintaa voidaan todeta, että PIR-eristetty rakenne kuivuu heikoiten. Suhteellinen kosteus tarkastelujakson lopussa on noin 85 %. EPS eristeellä kosteus lopussa on 70 % ja mineraalivillan tapauksessa betonirakenteen ulkopinnan kosteus seuraa ulkopuolista olosuhdetta. Laskennan lopussa PIR-eristetyn kuorielementin keskimääräinen kosteuspitoisuus on noin 113 kg/m3, mikä vastaa noin 80 % keskimääräistä suhteellista kosteutta. Vastaavasti keskimääräinen kosteuspitoisuus EPS-eristetyn rakenteen tapauksessa on noin 107 kg/m3 (RH 75 %) ja mineraalivillaeristetyn 93 kg/m3 (RH 65 %).

Tarkastelussa vedeneristyksen asennus on lokakuun alussa, joten ulkoilman lämpötila on siitä eteenpäin selkeästi sisäilman lämpötilaa matalampi. Betonirakenteen yli ei ole merkittävää lämpötilaeroa, koska rakenteet ovat tehokkaasti lämmöneristettyjä. Sen sijaan eristeen yli on suuri lämpötilaero, jolloin kuivuminen vesihöyryä hyvin läpäisevän lämmöneristeen yli on tehokasta, kuten mineraalivillan tapauksessa (vertaa kuva 4). Erityisen vesihöyrytiiviillä eristeellä, kuten muovipinnoitetulla PIR-eristeellä, kuorielementin kosteus siirtyy kohti ulkopintaa ja ranteen kuivuminen tapahtuu hyvin hitaasti. Koska laskenta on tehty keskimääräisillä ulkoilman olosuhdetiedoilla, ei sateen vaikutus näy tuloksissa. Tarkempi tulos saataisiin tekemällä laskenta tuntitasolla käyttäen tuntitason olosuhdetietoja. Tällöin edellä kuvatut erot rakenteiden kuivumisessa saattavat hieman tasoittua, koska mineraalivilla eristetty rakenne saa kosteutta myös ulkoilmasta.

Tulosten perusteella kuorielementtirakenteiden sisäpinnan pinnoittaminen tiiviilläkin pinnoitteella tms. materiaalikerroksella ei aiheuta merkittävää riskiä pinnoitteen vaurioitumisen kannalta. Mikäli kuorielementin sisäpuolelle asennetaan eristekerroksia tai lämpöä eristäviä rakenneosia, voi sisäpuolinen lämpöä eristävä rakenne betonin sisäpinnan lämpötilan laskiessa nostaa suhteellisen kosteuden haitallisen korkeaksi. Erityisen vesihöyrytiiviitä eristeitä käytettäessä suositellaan tässä tapauksessa varmistamaan, että betonikuori kuivuu riittävästi ennen sisäpuolisten rakenteiden asennusta.

5. Yhteenveto

Tutkimuksessa määritettiin laboratoriomittauksia hyödyntäen laskentamalli kuorielementin kuivumisen mallinnukseen. Mittausten perusteella kuorielementtirakenteiden kuivumisessa on valitusta eristeestä riippuen suuria eroja. Mittausten perusteella laboratorio-olosuhteissa mineraalivillaeristetty kuorielementti kuivuu huomattavasti nopeammin kuin EPS- tai PIR-eristetyt rakenteet. Laskennallisessa tarkastelussa selvitettiin kuorielementin sisäpinnalle asennettavan vedeneristeen vaikutusta elementin kosteusjakaumaan ja kuivumiseen. Vaikka laskennan perusteella eri eristysmateriaalien kuivumisessa on merkittäviä eroja, ei sisäpinnan kosteus noussut missään laskentatapauksessa siten, että se aiheuttaisi rakenteeseen kosteusvaurioriskiä. Laskentatulokset saatiin kohtalaisen hyvin vastaamaan vakio-olosuhteissa tehtyjä mittauksia. Mallin toimivuutta tulee vielä tarkastella muuttuvissa lämpötila- ja

kosteusolosuhteissa. Lisäksi tulee pyrkiä selvittämään, miten kuivumisen alkuvaiheen laskentatulos saadaan vastaamaan paremmin käytäntöä.

Lähdeluettelo

[1] Bazant Z.P, Najjar L.J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. Máteriaux et construction vol. 5. No 25 – 1972.
[2] fib Bulletin 65: Model Code 2010 - Final draft, Volume 1. Fib 2012
[3] Sekki P, Viljanen K. Betonirakenteiden kosteuskäyttäytymisen arviointi mallintamalla Rakennusfysiikka 2015. Juvenes Print, Suomen Suomen Yliopistopaino 2015.
[4] Sekki, P. ja Karvinen, T. 2017. Numerical simulation and measurements of drying of Finnish concrete grades. Proceedings of the 11th Nordic Symposium on Building Physics. Trondheim, Norway, 11-14 June 2017.
[5] RIL 255-1 Rakennusfysiikka I, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Tammerprint Oy 2014.
[6] Rakennustieto 2010. Betonin suhteellisen kosteuden mittaus. RT 14-10984.