Betonin kosteustekniset materiaaliominaisuudet ja mittausmenetelmän kehittäminen

Eero Tuominen[1], Olli Tuominen[1], Kari Vänttinen[1], Maarit Vainio[1] ja Juha Vinha[1]
[1] Tampereen yliopisto

Tiivistelmä

Osana vuosien 2015-2018 aikana toteutettua COMBI-hanketta toteutettiin seinäelementti- ja ontelolaattabetonin materiaaliominaisuuksien laboratoriotutkimuksia. Mittaustulosten luotettavuuden lisäämiseksi ja mittaamisen vaatiman ajan vähentämiseksi koejärjestelyjen kehitystyötä tehtiin osana tutkimusta. Tässä artikkelissa esitellään saadut materiaaliominaisuuksien mittaustulokset, mutta lisäksi esitellään lyhyesti havainnot tutkimusmenetelmän kehittämisestä.

1. Johdanto

Elementtirakentamisessa käytetään yleisesti korkean lujuuden tiiviitä betoneita. Osana vuosien 2015-2018 aikana toteutettua COMBI-hanketta haluttiin selvittää näiden betonilaatujen rakennusfysikaalisia materiaaliominaisuuksia lämpö- ja kosteusteknisen laskennan lähtötiedoiksi. Tutkittavia betonin kosteusominaisuuksia olivat veden imeytymis- ja tunkeutumiskerroin, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus, maksimikosteuspitoisuus, vesihöyrynläpäisevyys sekä hygroskooppinen ja kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä. Tutkittavia betonielementin sisäkuoressa käytettäviä betonilaatuja oli kolme, joista jokainen eri betonivalmistajalta. Lisäksi tutkittiin kahden eri valmistajan ontelolaattabetonin ominaisuudet.

2. Tutkitut materiaalit ja tutkimusmenetelmät

Tutkimustyö on tehty ja raportoitu Vainion [1], Vänttisen [2] ja Tuomisen [3] diplomitöissä. Tarkempi kuvaus materiaalien ominaisuuksista, jälkihoidosta, säilytyksestä, koekappaleiden työstämisestä ja käytetyistä tutkimusmenetelmistä ylipäänsä löytyy näistä lähteistä.

2.1 Sisäkuoribetonit

Seinäbetoneista tutkittavaksi otettiin kolmen suuren Suomessa toimivan betonivalmistajan tuotteita. Parma Oy:n Forssan julkisivutehtaalta ja Lujabetoni Oy:n Poltinahon tehtaalta saatiin valmiiksi valettu sisäkuorielementti. Lisäksi Rudus Oy toimitti valmisbetonia Nekalan tehtaalta ja tarkoituksena oli saada mahdollisimman lähelle sisäkuorielementtien betonia vastaavan laatuista betonia, josta valettiin materiaalikoekappaleiden lisäksi pieniä seinäelementtejä sandwich-elementtien kuivumiskokeisiin [4, 5]. Tarkka kuvaus sisäkuoribetoneista löytyy Vänttisen diplomityöstä [2].

2.2 Ontelolaattabetonit

Ontelolaattabetonin tutkimiseksi tilattiin sekä Lujabetoni että Parma Oy:n Tamperetta lähinnä sijainneilta ontelolaattatehtailta 1 m pitkä ja 265 mm paksu ontelolaatta. Laattavahvuus määräytyi valmistajien haastattelun perusteella, jossa todettiin tämän paksuuden olevan yleisesti käytetty

Tuominen, E., Tuominen, O., Vänttinen, K., Vainio, M. & Vinha, J. (2019) Betonin kosteustekniset ominaisuudet ja mittausmenetelmän kehittäminen. Julkaisussa: Vinha, J. & Raunima, T. (2019) Rakennusfysiikka 2019. Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut. 28.-30.11.2019 Tampere. Seminaarijulkaisu 6, osa 1(2).

palvelurakennuskohteissa. Tarkempi kuvaus ontelolaattabetoneista löytyy Vainion diplomityöstä [1].

2.3 Tutkimusmetodit

Tutkittujen betonien vedenimeytymisominaisuudet mitattiin Tampereen yliopiston Rakennusfysiikan tutkimusryhmässä kehitetyllä vapaan veden imeytyslaitteella [6] standardia SFS-EN ISO 15148 [7] mukaillen. Yksinkertaistettu ja lyhyt kuvaus veden imeytymis- ja tunkeutumiskertoimen sekä kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden määrittämisestä kyseisellä laitteistolla löytyy esimerkiksi Kari Vänttisen artikkelista [8].

Maksimikosteuspitoisuus puolestaan mitattiin vakuumikyllästyslaitteen avulla. Vakuumikyllästämisen metodia kehitettiin Vänttisen [2] ja Tuomisen [3] diplomityössä. Vakuumikyllästetyistä koekappaleista määritettiin kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä painelevylaitteella mukaillen standardia NT Build 481 [9]. Myös painelevylaitteen käytössä tehtiin kehitystyötä osana kolmea diplomityötä [1-3].

Vesihöyrynläpäisevyys mitattiin standardin SFS-EN 12572 [10] mukaisesti märkäkuppikokeella käyttäen kosteusparia 50 – 93 % RH ja hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä standardin SFS-EN ISO 12571 [11] mukaisesti. Hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän mittaamiseen kuluvan ajan lyhentämiseksi tehtiin myös standardimenetelmästä poikkeavia kokeita [2, 3].

3. Tulokset

Tutkitut betonilaadut ovat kosteusteknisiltä ominaisuuksiltaan hyvin tiiviitä. Kaikissa tehdyissä kokeissa kokeen onnistuminen vaatii materiaalin kosteusteknistä tasapainottumista erilaisiin olosuhteisiin ja tiiviillä materiaaleilla prosessi voi olla hyvin hidas. Tästä johtuen, huolimatta erittäin pitkästä tutkimusajasta, kaikkia ominaisuuksia ei ole saatu selvitettyä niin kattavasti kuin oli tarkoituksena. Osaa kokeista kuitenkin jatketaan edelleen.

Tutkimusmetodiikan kehitystyötä on tehty paitsi koetulosten saannin nopeuttamiseksi, myös koetulosten luotettavuuden parantamiseksi. Kehitystyö on tehty muun koetoiminnan aikana ja osa esitetyistä mittaustuloksista on saavutettu standardin mukaisilla menetelmillä. Epäluotettaviksi todettuja mittaustuloksia ei esitellä tässä artikkelissa.

3.1 Kosteusominaisuuksien laboratoriomittausten kehittäminen

Laboratoriomittausten yhteydessä todettiin, että painelevy- ja tasapainokosteuskoetta määrittävien standardien mukaiset menetelmät eivät sovellu kaikilta osin sellaisinaan betonien materiaaliominaisuuksien mittaamiseen. Ongelmallisia olivat etenkin kokeiden pitkä kesto ja tasapainottumisen todentaminen. Seuraavassa on lyhyesti esitelty tehty kehitystyö, joka on raportoitu tarkemmin Vänttisen [2] ja Tuomisen diplomityössä [3].

3.1.1 Hygroskooppinen tasapainokosteus

Hygroskooppisen tasapainokosteuden määrittämisessä käytettiin ensin betonin raekokoa vastaavan paksuisia kappaleita. Koekappaleet oli tarkoitus standardin mukaisesti tasapainottaa järjestyksessä erilaisiin olosuhteisiin kuivasta kosteampaan päin ja lopuksi takaisin kuivaa kohti. Vaikka käytetty koekappaleen paksuus oli standardin suositusta pienempi, niin tasapainotusajat osoittautuivat kohtuuttomiksi. Lisäksi standardin mukainen tasapainottumisen määritelmä 0,1

paino% / vrk muutoksen alittumisesta osoittautui täysin riittämättömäksi todellisen tasapainottumisen tapahduttua vasta 0,001 % / vrk suuruusluokassa. Standardin mukaisen rajan ohittamisen jälkeen tapahtui vielä kymmenien prosenttien kosteuspitoisuuden muutoksia ennen painon nousun tasaantumista ja pysähtymistä.

Tasapainotusaikojen lyhentämiseksi osa koekappaleista murskattiin ja näin tasapainottumisaikoja saatiin lyhennettyä merkittävästi. Murskaustekniikalla oli vaikutusta syntyvään hienoaineksen määrään, joka pyrittiin minimoimaan. Pienikokoinen leukamurskain osoittautui parhaaksi menetelmäksi, mutta tästä huolimatta murskattujen koekappaleiden tulokset eivät vastanneet ehjien koekappaleiden tuloksia. Murskatuilla koekappaleilla ei myöskään saatu johdonmukaista tasapainokosteuskäyrää, koska koekappaleiden välinen vaihtelu kasvoi murskauksen myötä entistä suuremmaksi.

Parhaaksi metodiksi osoittautui koekappaleiden hiominen mahdollisimman ohueksi (4-6 mm) ja koekappaleiden määrän kasvattaminen niin suureksi, että jokaiseen eri olosuhteeseen saatiin riittävä määrä koekappaleita tasaantumaan yhtä aikaisesti. Myös koekappaleiden uunikuivaus jätettiin kokeen alussa tekemättä, koska uunikuivaus aiheuttaa betonin mikrohalkeilua, joka nostaa mitattuja tasapainokosteuspitoisuuksia. Ohuilla koekappaleilla rikkoontumisen riski olisi myös noussut merkittäväksi. Toisaalta todettiin myös, että kuivapainon saamiseksi alhaisessa lämpötilassa (60 °C) kuivaaminen on paitsi hidasta, myös epäluotettavaa ja todellista kuivapainoa ei saavutettu. Tutkimuksen perusteella tasapainokosteuskäyrän määrittämiseen voi kulua joka tapauksessa vuosi kokeiden aloittamisesta, vaikka käytettäisiin murskausta tai hyvin ohuita koekappaleita.

3.1.2 Vakuumikyllästyskoe

Vakuumikyllästyksen jälkeisessä vesiupotuksessa havaitun painon nousun vuoksi vakumointimenetelmää pyrittiin kehittämään. Testauksissa havaittiin selkeitä eroavaisuuksia saavutettavissa maksimikosteuspitoisuuksissa eri mittausmenetelmin. Tehtyjä havaintoja oli muun muassa, että standardin NT Build 481 [9] mukainen menetelmä toimii heikosti johtuen lyhyestä vesiupotuksesta. Sillä sen sijaan ei vaikuttaisi olevan merkitystä, upotetaanko kappaleet veteen alipaineessa vai ei. Tyhjiöpumpun kestävyyden vuoksi onkin parempi jättää upotuksen jälkeinen vakumointi tekemättä.

Jo tasapainokosteuskokeiden yhteydessä esitetty uunikuivauksen problematiikka näyttäisi olevan vältettävissä vakumoimalla tehtävällä kuivauksella. Tällä menetelmällä vesi saadaan alhaisesta paineesta johtuen kiehumaan pois ilman koekappaleen merkittävää lämpötilan muutosta. Näin koekappaleen huokosrakenne muuttuu vähemmän kuivauksesta johtuen. Riittävää vakumoinnin kestoa ei tässä tutkimuksessa kuitenkaan määritetty.

Vakumoinnissa tehdyt muuta variaatiot eivät eronneet toisistaan niin selkeästi, että koekappaleiden huokosverkostossa tapahtuneet muutokset eivät niitä voisi selittää. Toistuvia testejä samoilla koekappaleilla tulisikin betonin kanssa välttää. Eri kyllästysmenetelmistä huolimatta pitkä vesiupotus vakumoinnin jälkeen näyttäisi tuottavan suurimman maksimikosteuspitoisuuden. Osa havaitusta painon muutoksesta voi kuitenkin selittyä myös betonin kemiallisilla muutoksilla.

3.1.3 Painelevykoe

Painelevykokeissa havaittiin epäjohdonmukaisuutta ensimmäisten koesarjojen mittauksissa. Lisäksi havaittiin, että tasaantumisen seuraamiseen olisi hyvä olla muitakin metodeita kuin ulos purkautuvan vesimäärän mittaaminen. Myös kammion ilmatiiveys havaittiin tärkeäksi; pienikin ilmavuoto aiheuttaa pitkään kestävissä kokeissa koekappaleiden kuivumista diffuusiolla kammiossa vaihtuvaan ilmaan. Kokeen perustuessa materiaalin kuivumiseen kapillaariverkoston kautta tapahtuvana nestevirtauksena ulos kammiosta aiheuttaa diffuusio käytännössä kokeen epäonnistumisen.

Koekappaleiden pintaan liimatut teräksiset neulat mahdollistavat koekappaleen kosteuspitoisuuden muutoksen seurannan neulojen välisen kapasitanssin mittauksen avulla. Vaikka mittaustapaa testattiin ja kehitettiin vasta tutkimuksen loppuvaiheessa, saatiin kohtalaisen lupaavia tuloksia ja kehitystä aiotaan jatkaa. Ulospurkautuvaa vesimäärää mitattaessa tulee käyttää hyvin tarkkoja ja tiiviitä mittavälineitä, jotta haihtuminen ei estä mittausta kokonaan. Mittausten perusteella tutkituille betonilaaduille tarvitaan vähintään 1-2 kk tasapainottumisaika, jos koekappaleet ovat 6-7 mm paksuja.

Epäjohdonmukaiset tulokset kokeissa saatiin parhaiten vältettyä perusteellisella vakumoinnilla ennen painelevykoetta. Vakumointi osoittautui tarpeelliseksi myös eri painetasojen välillä, kun standardin mukainen ohjeistus on punnitusten jälkeen jatkaa mittauksia samoilla koekappaleilla yhä suurenevaan painetasoon. Punnitusten yhteydessä tapahtuva koekappaleen pinnan kuivuminen heikensi kapillaarista yhteyttä painelevyn ja koekappaleen välillä estäen tasapainottumista suoraan punnitusten jälkeen tehdyissä korkeamman painetason kokeissa.

Standardin mukaisesti koekappaleen ja painelevyn välissä käytetään kaoliinisavea kapillaarisen kontaktin varmistamiseksi. Tehtyjen kokeiden perusteella tämä on kuitenkin tarpeetonta, mikäli käytetään aivan tasaiseksi hiottuja ja sileitä koekappaleita.

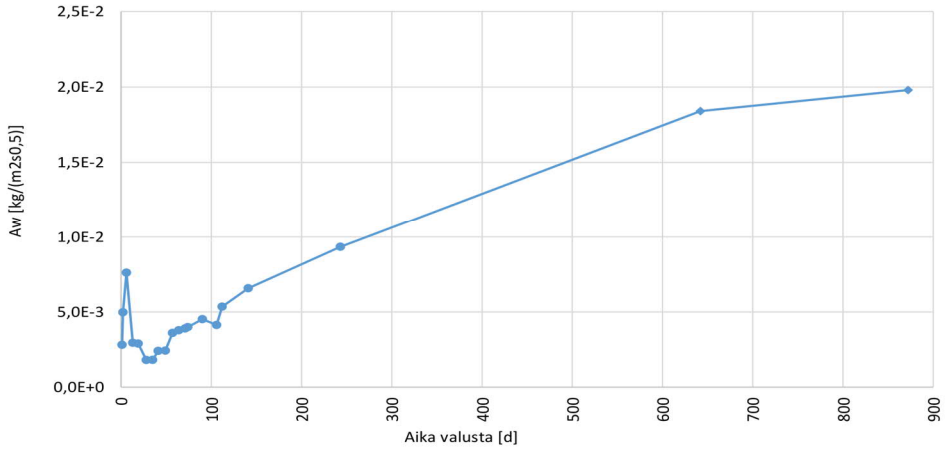
3.2 Betonien materiaaliominaisuudet

Betonin vedenimeytymiskokeessa mitatut ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tutkittujen betonien vedenimeytymiskokeen tulokset.

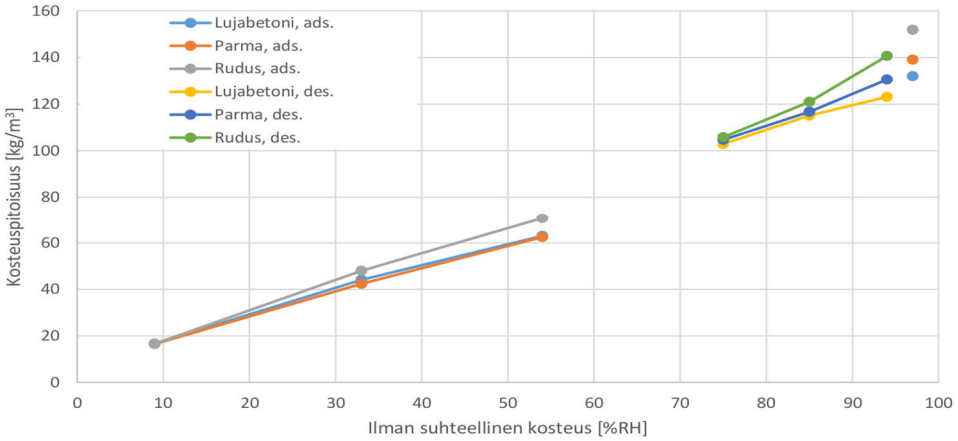
Materiaali	**Ikä [d]**	**A_w [kg/(m^{2}s^{0,5})]**	**B_w [mm/s^{0,5})]**	**w_{cap} [kg/m^3]**	**ρ_{dry} [kg/m^3]**
Ontelolaattabetoni, Luja	-	8,0E-4	-	105	2209
Ontelolaattabetoni, Parma	-	5,2E-3	0,0809	120	2241
Seinäbetoni, Luja	245	1,44E-3	0,0453	131,1	2104
	370	1,20E-3	0,0414	103,0	
Seinäbetoni, Parma	147	1,65E-3	0,0432	130,1	2190
	278	2,39E-3	0,102	97,3	
Seinäbetoni, Rudus paikalla valettu	215	5,65E-3	0,0911	134,5	2318

Tutkimuksen yhteydessä valetusta Ruduksen betonista tehtiin myös veden imeytymiskertoimen kehittymistä kuvaava mittasarja, joka on esitetty kuvassa 1. Heti valun jälkeen tehdyissä mittauksissa paitsi hydrataation keskeneräisyys, myös koekappaleiden valun jälkeinen korkea alkukosteuspitoisuus on vaikuttanut koetuloksiin. Ensimmäisen kuukauden jälkeen muutos on kuitenkin ollut selvää ja jatkunut usean vuoden ajan. Huomattavaa on, että veden imeytyminen on kasvanut kertaluokkia suuremmaksi ajan kuluessa.



Kuva 1. Vedenimeytymiskertoimen kehittyminen Rudus Oy:n betonilla.

Tasapainokosteuskokeissa tulokset ovat edelleen puutteelliset. Kuvassa 2 esitetyt sisäkuoribetonien hygroskooppiset tasapainokosteuskäyrät on mitattu ehyillä ja ohuilla koekappaleilla, joita on kaksi sarjaa: toinen sarja adsorptiossa ja toinen desorptiossa. Tasapainotusolosuhteiksi valittiin 9, 33, 55, 75, 83, 93 ja 97 % RH. Molemmat sarjat on siirretty neljänteen tasapainotusolosuhteeseen, mutta tulosta ei ole vielä tästä kosteustasosta saatu.



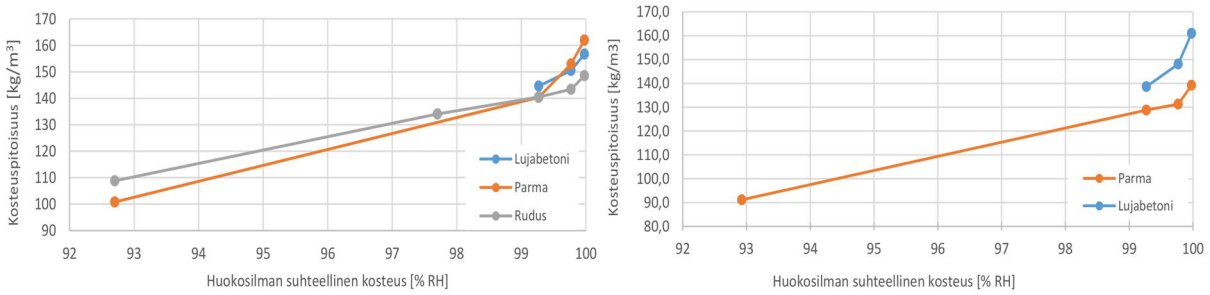
Kuva 2. Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä seinäbetoneilla. Ruduksen kosteuspitoisuus on sekä adsorptiossa että desorptiossa kaikista korkein, desorptiossa Parma on keskimmäinen ja Luja alin. Adsorptiossa Luja ja Parma ovat lähes samoissa arvoissa.

Ontelolaattabetonien tasapainokosteuskokeiden tulokset ovat koekappaleiden vähäisyydestä johtuen harvat ja esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Ontelolaattabetonien hygroskooppisen tasapainokosteuskokeen tulokset.

Suunta	**Kosteustaso [% RH]**	**Parma**	**Lujabetoni**
		Kosteuspitoisuus[kg/m³]	
adsorptio	97	103,5	-
desorptio	94	101,1	95,0
	85	98,4	91,0

Myöskään painelevykokeesta ei ole saatu koko koesarjaa mitattua. Valitut painetasot olivat: 0,316; 1; 3,16; 10; 31,6 ja 100 bar. Näistä viimeiset painetasot vastaavat noin 99,3 ja 92,7 % RH hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän kosteustasoa. Luotettaviksi varmennetut tulokset on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä seinäbetoneilla (vas) ja ontelolaattabetoneilla (oik). Ontelolaattabetoneissa ylempi käyrä on Lujabetonin arvoja. Sisäkuoribetoneissa Parma lähtee alimmasta arvosta päätyen ylimpään, Rudus vastaavasti lähtee korkeammasta arvosta päätyen alimpaan ja Lujabetonin käyrä on lyhin ja kattaa vain tuloksia 99 – 100 % RH kosteustasolla.

Märkäkuppikokeen tuloksena saatavat vesihöyrynläpäisevyydet on esitetty kuvassa 4. Eri betonien välillä on varsin merkittäviä eroja havaittavissa.

Taulukko 3. Tutkittujen betonien vesihöyrynläpäisevyydet.

Betonilaatu	Ontelolaattabetoni		Seinäbetoni		
Valmistaja	Luja	Parma	Luja	Parma	Rudus
δ_v *10^{-7} [m² / s]	0,778	1,35	0,848	1,30	2,43

4. Yhteenveto

Eri betonien kosteusteknisissä ominaisuuksissa on varsin suuria eroja myös käyttötarkoitukseltaan ja reseptiikaltaan samankaltaisten betonien välillä. Tästä johtuen laskennan yhteydessä on tärkeä tehdä herkkyystarkasteluja eri materiaaliominaisuuksien arvoilla.

Materiaaliominaisuuksien standardin mukainen määrittäminen ei välttämättä tuota luotettavia mittaustuloksia, jos kyseessä on poikkeava materiaali. Tässä tutkimuksessa mukana olleista hyvin tiiviistä ontelolaatta- ja seinäbetoneista ei saatu kaikkia materiaaliominaisuuksia luotettavasti määritettyä ennen koejärjestelyjen kehitystyötä. Tästä huolimatta tuloksia saatiin myös standardin mukaisilla menetelmillä ja tutkimustulosten kriittinen arviointi osoittautui tässäkin hyvin tärkeäksi.

Lähdeluettelo

[1] Vainio, M. 2016. Kalsiumsilikaattilevyjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet

[2] Vänttinen, K. 2017. Sisäkuoribetonin rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet

[3] Tuominen, O. Arvioitu julkaisu 2019. Sisäkuori- ja ontelolaattabetonien rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet ja mittausmenetelmien kehitys

[4] Korhonen, L. 2018. Solumuovieristettyjen betonielementtien kuivumistarkastelut
[5] Raunima, T. Arvioitu julkaisu 2019. Kapasitiivisten kosteusanturien seuranta betonin ja kipsin kuivumisen seurannassa
[6] Tuominen, E. 2016. Laastien ja betonien kapillaarisuusominaisuuksien määritys vapaan veden imeytyskokeella
[7] SFS-EN ISO 15148:2016
[8] Vänttinen, K; Tuominen, E. ja Vinha, J. 2017. Betonin kosteusteknisten materiaaliominaisuuksien määrittäminen
[9] NT Build 481. 1997
[10] SFS-EN ISO 12572:2001
[11] SFS-EN ISO 12571:2014